

Systems Engineering
Van secundair proces naar primaire toepassing

Afstuderen
Cees van Leeuwen

Eindrapport BAM



Systems Engineering

Van secundair proces naar primaire toepassing



C.J. van Leeuwen

Technische Universiteit Delft i.s.m. BAM Infraconsult

Colofon

Gegevens afstudeerproject:

Auteur: Cees van Leeuwen
Studienummer: 1040898
E-mail: C.vanLeeuwen@baminfraconsult.nl
Datum: Juli 2009
Universiteit: Technische Universiteit Delft
Faculteit: Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie: Bouwprocessen
Bedrijf: BAM Infraconsult te Gouda
Afdeling: RAMS-Riskmanagement

Afstudeercommissie:

Voorzitter: Prof.dr.ir. H.A.J. de Ridder
Civiele Techniek en Geowetenschappen
Technische Universiteit Delft
H.A.J.deRidder@tudelft.nl

Commissielid: Dr. ir. G.A. van Nederveen (dagelijks begeleider)
Civiele Techniek en Geowetenschappen
Technische Universiteit Delft
G.A.vanNederveen@tudelft.nl

Commissielid: Ir. G. Arends
Civiele Techniek en Geowetenschappen
Technische Universiteit Delft
G.Arends@tudelft.nl

Commissielid: Ir. D. Nakken
BAM Infraconsult
D.Nakken@baminfraconsult.nl

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerrapport met als titel "Systems Engineering, van secundair proces naar primaire toepassing". Dit rapport is onderdeel van afstuderen aan de TU in Delft voor de studie Civiele Techniek en geldt als afsluiting van de master Design & Construction Processes. De afstudeerstudie is tot stand gekomen in samenwerking met de afdeling RAMS-Riskmanagement/Systems Engineering van BAM Infraconsult. Het onderwerp Systems Engineering(SE) is onderwerp van veel discussie, wordt ervaren als een administratieve plicht en leidt nog niet tot een vermindering van de faalkosten. In het uiteindelijke rapport hoop ik te kunnen bijdragen aan de verbetering van de toepassing van SE in de infratructurele sector. Systems Engineering kan bij een juiste toepassing zeker van waarde zijn voor de bouwsector, maar daarvoor zal wel medewerking nodig zijn van alle betrokkenen. Voor het opstellen van dit afstudeerrapport ben ik ondersteund door alle medewerkers van de afdeling RAMS-Risk Engineering van BAM Infraconsult, deze wil ik dan ook daarvoor bedanken. Tevens wil ik de leden van de afstudeercommissie: dhr. de Ridder, dhr. Arends, dhr van Nederveen en dhr. Nakken van harte bedanken voor hun inbreng van expertise, feedback en sturing gedurende het onderzoek. Ten slotte wil ik mijn familie en vrienden en natuurlijk vriendin bedanken voor de nodige steun tijdens het afstuderen.

Cees van Leeuwen
29 juli 2009, Leiden

Afkortingen

CROW	Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Weg- en Waterbouw en de Verkeerstechniek
DKP	Deelkwaliteitsplan
EMVI	Economisch Meest Voordelige Inschrijving
INCOSE	INternational Council On Systems Engineering
KP	Keuringsplan
LCC	Life Cycle Costing
OBS	Organisational Breakdown Structure
OTB	Ontwerptracébesluit
PKM	Software-tool voor het structureren van de eisen in het kader van de System Engineering
PKP	Projectkwaliteitsplan
PMP	Projectmanagementplan
RAW	Rationalisatie en Automatisering in de Grond- Weg- en Waterbouw.
SBS	System Breakdown Structure ook wel de objectenboom hierin staan alle objecten van een project (Systeem)
SE	Systems Engineering is een gestructureerde manier van ontwerpen, waarbij alles voortdurend wordt bekeken vanuit het perspectief van het totale systeem.
SMART	Specifiek, Meetbaar, Acceptabel, Realistisch en Tijdsgebonden
TB	Tracébesluit
VE	Value Engineering
VP	Verificatieplan
VR	Verificatierapport
WBS	Work Breakdown Structure
WPU	Werkplan uitvoering

Inhoudsopgave

Voorwoord

Afkortingen

1. Inleiding	8
1.1 Doelstelling	9
1.2 Onderzoeksmodel	9
1.3 Vraagstelling	10
1.4 Afbakening	10
1.5 Onderzoeksstrategie	11
1.6 Onderzoeksmateriaal	11
1.7 Opbouw Rapportage	11
2. Veranderingen die leiden tot SE	12
2.1 Terugtrekkende overheid	13
2.2 Toenemende complexiteit	15
2.3 Deelconclusie	17
3. Systems Engineering	18
3.1 Definitie van een systeem	18
3.2 Definitie van Systems Engineering	18
3.3 Geschiedenis van Systems Engineering	19
3.4 Algemene theorie Systems Engineering	21
3.5 Systems Engineering in de Lucht- & Ruimtevaartsector	30
3.6 Deelconclusie	32
4. SE in de bouwsector	35
4.1 Huidige proces	35
4.2 Overdracht van de vraag	42
4.3 Systems Engineering bij de BAM	44
4.4 Deelconclusie	48
5. Casestudies	50
5.1 Casestudy A4 Burgerveen	51
5.2 Deelconclusie A4 Burgerveen-Leiden	54
5.3 Casestudy A2 Zaltbommel-Maasbrug	56
5.4 Deelconclusie A2 Zaltbommel-Maasbrug	58
6. Verbetervoorstel SE-proces	60
6.1 Inleiding	60
6.2 Verbeterpunten huidige manier van werken binnen BAM	60
6.3 Verbeterpunten Opdrachtgever in de bouwsector	62
6.4 Verbeterpunten overnemen van theorie in de bouwsector	64
7. Expertmeeting	70
7.1 Inleiding	70
7.2 Opbouw Expertmeeting	70
7.3 Resultaten Expertmeeting	70
8. Final Discussion	77
8.1 Constateringen	77
8.2 Mogelijkheid tot verder onderzoek	78
8.3 Wat mist er aan dit onderzoek?	78
8.4 Nieuwe ontwikkelingen	78
9. Conclusies en aanbevelingen	79
9.1 Conclusies	79
9.2 Aanbevelingen	80
Literatuurlijst	82
Figurenlijst	84
Bijlagen	86

1 Inleiding

Grote opdrachtgevers in de bouwsector laten steeds meer de opdrachtnemers invulling geven aan het ontwerpen in de vorm van design en construct (D&C) contracten. Hierdoor komt een andere scheiding tussen de taken van de opdrachtgever (OG) en opdrachtnemer (ON). De ON voert het technische gedeelte uit (ontwerp en constructie) en de OG concentreert zich op het overige: het formuleren van de eisen, het bewaken van de eisen gedurende het bouwproces en de financiële afhandeling.

Deze ontwikkelingen vragen om een nieuwe werkwijze die zorgt voor transparantie en betere beheersing van processen. Rijkswaterstaat (RWS) en ProRail, twee van de grootste opdrachtgevers in de GWW, spelen hierbij een belangrijke rol. Systeemgerichte contractbeheersing wordt door RWS veelal gebruikt als beheersstrategie bij D&C contracten. Systems Engineering (SE) wordt, vanwege het succes in andere industrieën, door de opdrachtgevers gezien als methode om een systematisch en transparant proces te waarborgen. Voor zowel opdrachtgevers als de opdrachtnemers in de GWW is het gebruik van Systems Engineering redelijk nieuw. Er worden wel al een aantal projecten met SE uitgevoerd. Verwacht wordt dat het aandeel D&C contracten in de toekomst zal stijgen (tot circa 80% van de contracten bij RWS).

Systems Engineering is een gestructureerde manier van ontwerpen, waarbij alles voortdurend wordt bekeken vanuit het perspectief van het totale systeem. Denk hierbij aan een complex infrastructureel project waarvoor een uiterst ingewikkeld stuk techniek nodig is. Zoals een brug of een tunnel, een viaduct, een spoorlijn, verkeersknooppunt, hoogspanningslijn of een nieuw station.

Binnen BAM is Systems Engineering volop in ontwikkeling. In mei 2008 is met het uitbrengen van de SE-Wijzer voor BAM Infra getracht lijn te krijgen in het toepassen van Systems Engineering binnen de projecten. In de praktijk bestaat er echter nog steeds veel onduidelijkheid over de juiste methode van toepassing.

Tevens is vanwege de meerwaarde besloten Systems Engineering in alle projecten te gaan toepassen, ook daar waar het niet door de Opdrachtgever(OG) wordt geëist. Duidelijkheid en eenduidigheid is hierbij noodzakelijk. Zowel binnen alle projecten zijn verschillende inzichten te vinden van de juiste toepassing van SE, als tussen de verschillende werkmaatschappijen. Uiteindelijk zijn de meeste situaties werkbaar door veel extra werk. Echter de voordelen worden nog niet benut.

Op dit moment wordt SE nog als een administratieve methode voor het aantonen van eisen ervaren die door de OG wordt opgelegd. De meerwaarde van SE wordt nog niet als zodanig ervaren. Voornamelijk omdat er een grote hoeveelheid administratief werk aan vooraf gaat alvorens te kunnen profiteren van de methodiek. SE biedt mogelijkheden om het ontwerpproces te sturen en te verbeteren, maar in de praktijk wordt hier nog geen gebruik van gemaakt.

De grootste winst kan liggen in een heldere opstartprocedure, waarbij voor alle gebruikers inzichtelijk kan worden gemaakt wat het nut is en hoe het wordt toegepast. Wanneer het gebruikelijke proces al is opgestart is het lastig alsnog SE in het ontwerpproces te verweven en wordt gedurende de totale cyclus achter de feiten aangelopen.

Door een vergelijking te maken met andere sectoren waar SE al langer wordt toegepast een toelichting te geven op het decomponeren van het systeem zal worden getracht het proces van SE te verbeteren en voor alle gebruikers inzichtelijk te maken. Hierbij wordt tevens meer aandacht besteedt aan het maken van trade-offs en het vastleggen van keuzes, waarbij de kosten en waarde gedurende de levenscyclus een belangrijke rol spelen.



1.1 Doelstelling

In de omschrijving van de doelstelling wordt onderscheid gemaakt in het externe doel en het interne doel. Het externe doel is een kernachtige omschrijving van de bijdrage die het onderzoek tracht te leveren binnen het projectkader. In het interne doel wordt omschreven welke kennis en inzichten daar voor nodig zijn.

Extern doel

“Hoe kan SE in het primaire proces worden opgenomen zodat het eisenpakket van de OG doelmatig en doeltreffend kan worden omgezet in een systeem dat voldoet aan de specificaties.”

Daarnaast wordt een intern doel van het onderzoek geformuleerd:

Intern doel

Op basis van een vergelijking van de bouwpraktijk met de lucht- en ruimtevaart, de beschikbare literatuur over SE en een analyse van de bouwsector een vergelijking maken die leidt tot een praktische handreiking om het gebruik van de methode Systems Engineering binnen de BAM Infrabedrijven te verbeteren.

1.2 Onderzoeksmodel

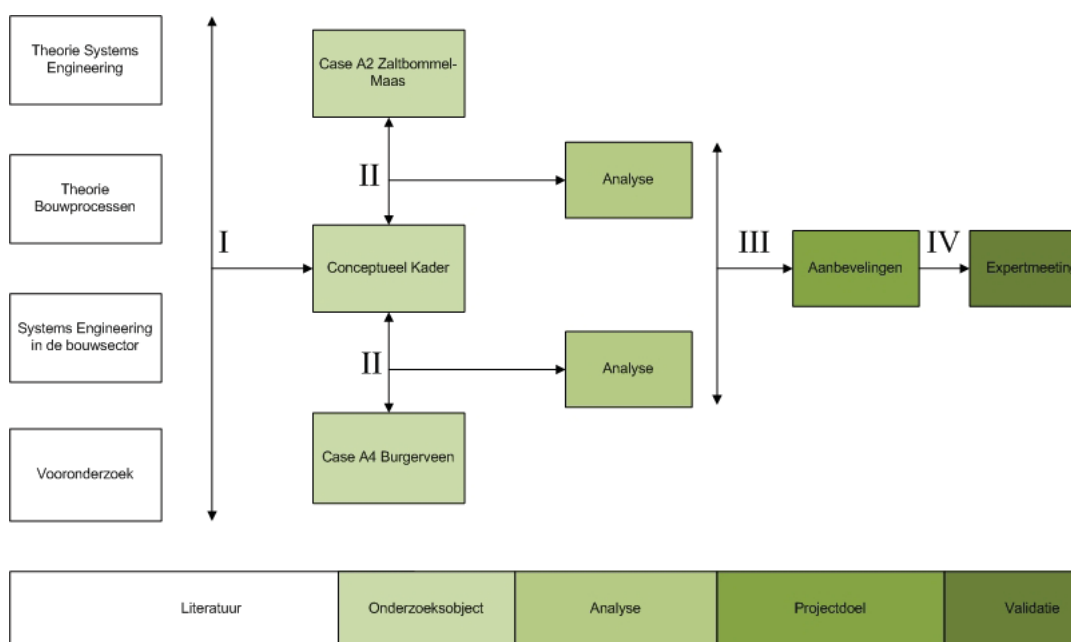
Het onderzoeksmodel is gebaseerd op een viertal elementen, het uitgangspunt, het onderzoeksobject, de analyse en het projectdoel. In dit onderzoek worden deze als volgt gekozen:

Het **uitgangspunt** is het model van decomposities en relaties dat wordt gevormd door de theorie van Systems Engineering, de vergelijking van de lucht- en ruimtevaartsector met de bouwpraktijk en als basis de SE-wijzer van BAM Infra.

De **onderzoeksubjecten** zijn de cases A4 Burgerveen-Leiden en de A2 Zaltbommel-Maas en de interviews die bij de Systems Engineers zijn afgenomen door Eric van Rooijen (Trainee BAM Groep).

De onderzoekobjecten worden vervolgens getoetst aan de theorie van Systems Engineering zoals die is ontstaan in andere sectoren, de resultaten van deze vergelijking worden vastgelegd gedurende de **analyse**. In deze analyse worden verschillen geconstateerd en uit deze verschillen kunnen conclusies worden getrokken.

Deze analyse leidt vervolgens tot de **aanbevelingen** die tot verbetering van het proces van Systems Engineering binnen de BAM Infra-bedrijven moet leiden. Daarbij concentreert het onderzoek zich op de opname van Systems Engineering in het primaire proces. Deze aanbevelingen worden gevalideerd middels een expertmeeting. Bovenstaande elementen worden in het onderstaand model weergegeven.



Figuur 1: Onderzoeksmodel

1.3 Vraagstelling

De eerste centrale vraag heeft betrekking op het uitgangspunt, de vergelijking met het gebruik van Systems Engineering.

I. Hoe wordt Systems Engineering theoretisch toegepast en wat ligt er aan de toepassing ervan ten grondslag (beschrijvend)?

De tweede vraag heeft betrekking op het tweede gedeelte van het onderzoek, het onderzoeksobject.

II. Op welke manier wordt Systems Engineering bij BAM in omschreven en in praktijksituaties toegepast (evaluatief)?

De derde centrale vraag heeft betrekking op het laatste gedeelte van het onderzoek, de analyse en het projectdoel.

III. Welke punten kunnen op basis van de theorie en onderzoeksobjecten worden aangedragen om de toepassing van Systems Engineering in de infrasector van BAM te verbeteren (evaluatief)?

Ten slotte worden de resultaten voor de verbetering gevalideerd middels een expertmeeting:

IV. In hoeverre is implementatie van de verbeterde procesbeschrijving uit centrale vraag III haalbaar in de bouwsector (evaluatief)?

Bovenstaande centrale vragen worden verder beschreven in de deelvragen, waarmee duidelijker wordt welke informatie zal worden verzameld en geanalyseerd.

Ad Centrale vraag I

I-a Welke veranderingen en karakteristieken hebben geleid tot de toepassing van Systems Engineering in de bouwsector (beschrijvend)?

I-b Wat is de algemene theorie van Systems Engineering zoals die is ontwikkeld door de industrie en Lucht- en Ruimtevaartsector (beschrijvend)?

Ad Centrale vraag II

II-a Op welke manier wordt Systems Engineering op dit moment toegepast in de bouwsector en specifiek bij BAM (beschrijvend)?

II-b Welke constatering kunnen worden gedaan en welke knelpunten kunnen worden geïdentificeerd over de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de toepassing van Systems Engineering binnen de casus A4 Burgerveen-Leiden (evaluatief)?

II-c Welke constatering kunnen worden gedaan en welke knelpunten kunnen worden geïdentificeerd over de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de toepassing van Systems Engineering binnen de casus A2 Zaltbommel-Maas (A2-ZaMa) (evaluatief)?

Ad Centrale vraag III

III-a Welke aanbevelingen kunnen worden gedaan op basis van de twee casestudies (evaluatief)?

III-b Welke aanbevelingen kunnen worden gedaan voor implementatie van het theorie in de praktijk van de bouwsector (beschrijvend)?

1.4 Afbakening

Om voldoende diepgang in het onderzoek te krijgen wordt de scope van het onderzoek afgebakend. Onderstaand beperkingen worden opgelegd om te voorkomen dat het onderzoek te breed wordt uitgevoerd:

- Het onderzoek concentreert zich op de hoofdstructuur van de SE in de L&R. De structuur van de decomposities van het systeem.
- Het onderzoek maakt een vergelijking met de praktijksituatie van de casesudies: A4 Burgerveen-Leiden en A2 Zaltbommel-Maas.
- Het onderzoek richt zich op de opname van Systems Engineering in het primaire proces.

1.5 Onderzoeksstrategie

Het onderzoek zal deels een bureauonderzoek zijn waarbij de theorie wordt bestudeerd en deels een empirisch onderzoek waarbij de theorie wordt vergeleken met de praktijk. Het valt uiteen in een drietal onderdelen.



Gefundeerde theoriebenadering/Literatuuronderzoek

Gegeven de aard van de eerste stap van het onderzoek wordt gekozen voor een gefundeerde theoriebenadering. Er wordt gebruik gemaakt van een primaire theoretische vergelijking. De theorie die ontwikkeld is in andere sectoren wordt bekeken en vergeleken met de theorie die is ontwikkeld in de bouwsector.

Tweevoudige casestudy

De A4 Burgerveen en A2 Zaltbommel-Maas worden gebruikt als casestudy.

Survey

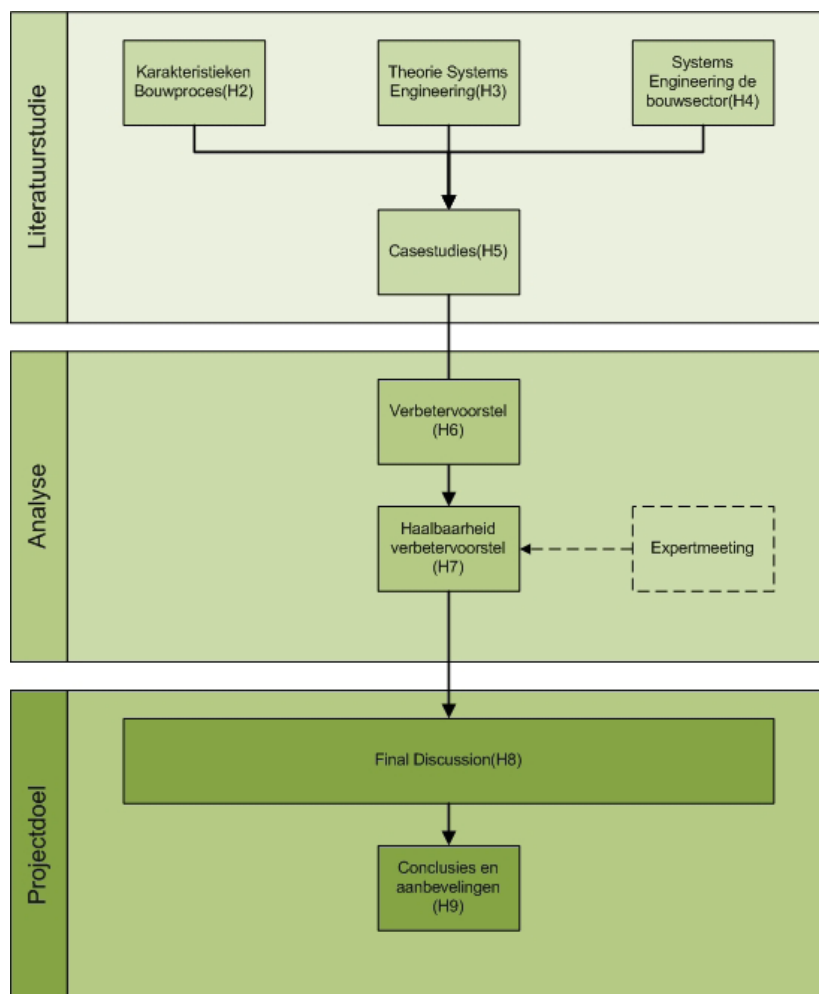
Voor het onderzoek naar de huidige toepassing van Systems Engineering bij de BAM wordt gebruik gemaakt van de vragenlijsten van Eric van Rooijen(Trainee BAM Groep). Hierin zijn actoren van een viertal grote projecten ondervraagd over te toepassing van Systems Engineering.

1.6 Onderzoeksmateriaal

- Vragenlijsten Eric van Rooijen, ingevuld door verantwoordelijken van SE binnen een aantal projecten, zoals de Systems Engineer en de ontwerpleider.
- Literatuur over Systems Engineering in de Lucht en Ruimtevaart, informatie via de faculteit L&R in Delft en de Universiteit Bibliotheek van de TU Delft
- Case specifieke informatie van de projecten A4 Burgerveen en A2-ZaMa, het projectmanagementplan, de SBS, WBS en werk- en keuringsplannen.
- De SE-wijzer van BAM.

1.7 Opbouw Rapportage

De opbouw van de rapportage is in de onderstaand schema grafisch weergegeven.

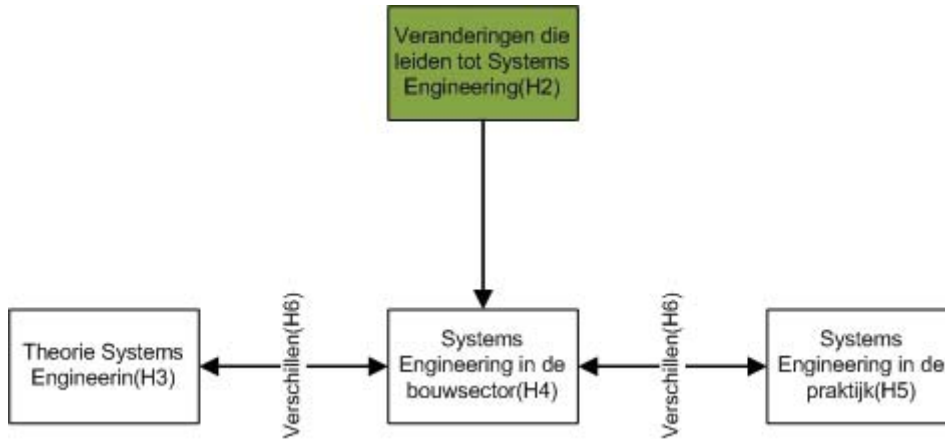


Figuur 2: Opbouw rapport



2 Veranderingen die leiden tot SE

In dit hoofdstuk worden de veranderingen weergegeven die uiteindelijk hebben geleid tot de introductie van Systems Engineering in de bouwsector. De context van dit hoofdstuk in relatie tot de andere hoofdstukken is weergegeven in onderstaand figuur.

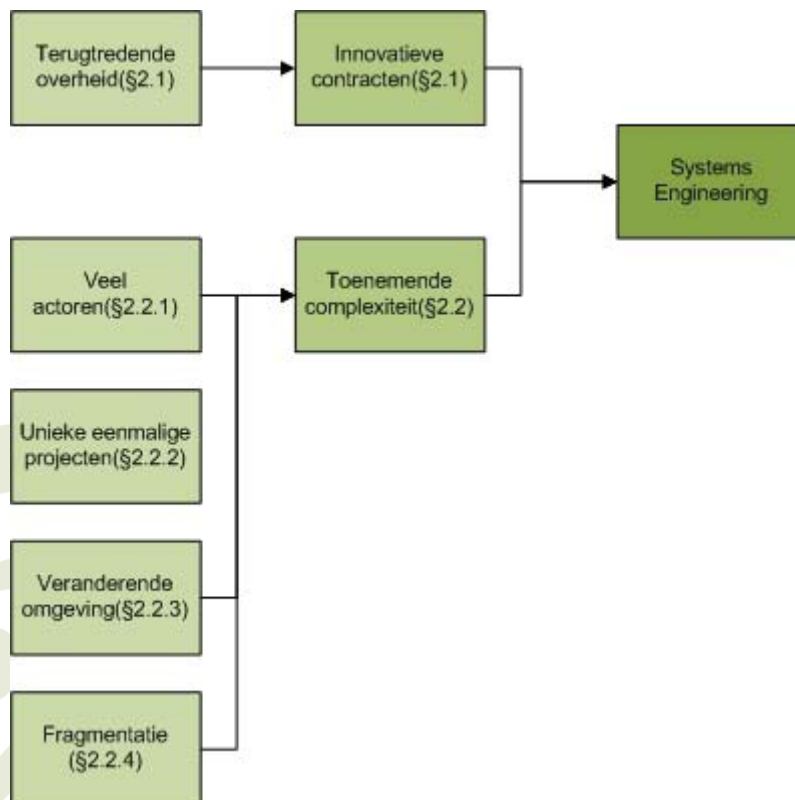


Figuur 3: Hoofdstukken

Dit hoofdstuk moet antwoord geven op de eerste deelvraag:

I-a Welke veranderingen en karakteristieken hebben geleid tot de toepassing van Systems Engineering in de bouwsector(beschrijvend)?

De afgelopen jaren hebben zich een aantal veranderingen in de bouwsector voorgedaan die geleid hebben tot het gebruik van Systems Engineering in de bouwsector. Deze veranderingen zijn samengevat in de onderstaande figuur.



Figuur 4: Veranderingen in de bouwsector

Daarbij moet worden opgemerkt dat dit allemaal factoren zijn die met elkaar samenhangen en gezamenlijk de keuze voor Systems Engineering hebben bepaald. Deze factoren zullen in dit hoofdstuk verder worden toegelicht om de achtergrond voor het gebruik van Systems Engineering in de bouwsector helder te krijgen.



2.1 Terugtrekende overheid

De politieke wens om overheden te laten terugtreden en de marktwerking te bevorderen heeft tot gevolg gehad dat de hoeveelheid kennis bij de opdrachtgevers afneemt en dat vaker samenwerking met het bedrijfsleven wordt gezocht. (Handboek Oplossingsvrij specificeren, CROW, 2007).

Door een verandering van de aanbestedingsstrategie is sprake van een verschuiving van taken, verantwoordelijkheden en risico's van de opdrachtgever naar de markt, doordat opdrachtnemers eerder in het bouwproces worden betrokken. Bij Rijkswaterstaat gebeurt dit onder de titel: "De Markt, tenzij". Dit betekent dat Rijkswaterstaat zoveel mogelijk werkzaamheden aan marktpartijen dient over te laten, tenzij het niet anders kan en Rijkswaterstaat het zelf moet uitvoeren. Het doel hiervan is:

- *Meer transparantie*
- *Stimuleren innovatie*
- *Verbeteren prijs/kwaliteitsverhouding*

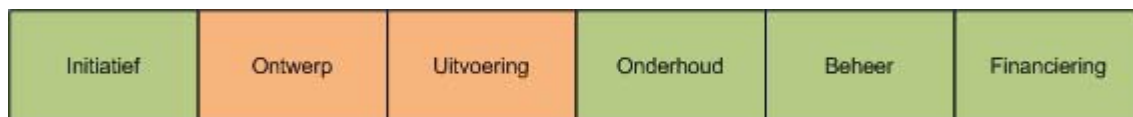
- Handreiking Systemgerichte contractbeheersing(RWS2007))

In de traditionele aanbestedingen is gekozen voor het expliciet specificeren van een oplossing in een bestek en de uitvoering hiervan door een toezichthouder te laten controleren. In de innovatieve contracten wordt vaak impliciet gespecificeerd, maar is de rol van toezichthouder verdwenen. Vanwege de publieke verantwoordelijkheid van de opdrachtgevers in de infrasector was dit toezicht wel noodzakelijk. Mede om deze reden is Systems Engineering in de contracten opgenomen.

Geïntegreerde contracten

Wanneer de opdrachtgever naast het realiseren ook andere taken aan één en dezelfde externe partij uitbesteedt, wordt vaak gesproken van 'geïntegreerde bouworganisatievorm'. Die marktpartij voert dan als het ware een aantal taken 'geïntegreerd' uit. Het gaat dan meestal om een combinatie van de ontwerp- en de uitvoeringstaak, maar denkbaar is ook dat het verzorgen van het meerjarig onderhoud aan het takenpakket wordt toegevoegd. Het is zelfs mogelijk om in aanvulling daarop het verwerven van projectfinanciering en zelfs de exploitatie van het bouwproject geïntegreerd in één hand uit te besteden. In onderstaande paragrafen is een overzicht te vinden van de verschillende contractvormen.

D&B



Design & Build is een geïntegreerde bouworganisatievorm waarbij het ontwerp en de realisatie tegelijk aanbesteed aan dezelfde marktpartij. Deze term wordt ook wel in de literatuur teruggevonden als E&C(Engineering & Construct) en D&C(Design&Construct). Waarbij 'Construct' voornamelijk wordt gebruikt voor GWW-projecten en 'Build" vooral voor werken in de Woning- en Utiliteitsbouw. Daarbij moet worden opgemerkt dat 'Design' meer omvattend is dan 'Engineering', maar het in beide gevallen komt het neer op het verder uitwerken van de specificaties van de Opdrachtgever.

Door integratie van ontwerp en uitvoering kunnen verschillende voordelen worden behaald. Wanneer de opdrachtgever niet te gedetailleerd specificeert kan geprofiteerd worden van het innovatieve vermogen van de markt. Daarnaast wordt de coördinatie verbeterd wanneer beide taken door één Opdrachtnemer worden uitgevoerd. Dan moet de opdrachtnemer echter wel over een geïntegreerde organisatie beschikken. Kenmerkend voor deze basisvorm van de geïntegreerde bouworganisatievorm, in vergelijking tot de traditionele bouworganisatievorm, is dat de opdrachtgever nu in plaats van twee contracten met twee verschillende marktpartijen slechts één contract met een opdrachtnemer sluit. Daaruit vloeit dan tegelijkertijd voort dat die opdrachtnemer nu ook de juridische verantwoordelijkheid draagt voor een deel van de ontwerp-taak, terwijl die in de traditionele bouworganisatievorm bij de opdrachtgever dan wel bij de architect of raadgevend ingenieur ligt. Meer algemeen is het zo dat binnen D&B (maar ook bij de hierna nog te bespreken andere varianten van de geïntegreerde bouworganisatievorm) gestuurd wordt op integrale productverantwoordelijkheid van de opdrachtnemer.



Het overdrachtsmoment naar de markt kan verschillen. In de meest zuivere vorm maakt de opdrachtgever slechts een programma van eisen. Maar in de praktijk heeft de opdrachtgever vaak al een aantal stappen gezet in het ontwerpproces. Een overdracht na het Definitief Ontwerp wordt ook nog D(E)&C genoemd. De opdrachtnemer hoeft dan nog slechts het Uitvoerings Ontwerp(UO) te maken. Hoe later het project wordt overgedragen aan de markt hoe kleiner de ontwerprijheid is voor de opdrachtgever.



DBM

Deze variant van de geïntegreerde bouworganisatievorm staat in de praktijk bekend onder de naam DBM ('Design, Build & Maintain'). Hierbij is het meerjarig onderhoud op zijn minst voor één termijn aan het contract toegevoegd. Toevoeging van de meerjarige onderhoudstaak aan de aannemer die ook de ontwerptaak vervult, heeft als voordeel dat de zogenoemde 'life-cycle' benadering als uitgangspunt wordt genomen. Dat kan leiden tot een onderhoudsvriendelijk en efficiënt ontworpen bouwproject. Wanneer de marktpartij niet alleen het ontwerp en de uitvoering maar ook het meerjarig onderhoud van het door hem te realiseren project verzorgt, zal hij in de ontwerpfase mogelijk met 'slimme' onderhoudsvriendelijke oplossingen komen.

DBFM



Deze variant op de geïntegreerde bouworganisatievorm staat in de praktijk bekend als DBFM ('Design, Build, Finance & Maintain'). In vergelijking met de hiervoor besproken variant (DBM) draagt de opdrachtnemer ook de verantwoordelijkheid voor de financiering van het project en wordt hij gestuurd door middel van een systeem van betalingen die is gekoppeld aan de beschikbaarheid van het project.

De verantwoordelijkheid terzake de financiering (F) betreft niet een gewone voorfinanciering van de bouwkosten, waarbij de bouwsom uiteindelijk bij de oplevering door de aanbesteder wordt betaald. Het gaat om een financiering met een veel zelfstandiger karakter. De aanbesteder betaalt namelijk niet voor een gereed product, maar voor de (mate van) beschikbaarheid van het gerealiseerde object gedurende de gehele looptijd van het contract. Die looptijd is meestal aanzienlijk, aangezien hij in belangrijke mate gekoppeld is aan de economische levensduur van het gerealiseerde object. Afhankelijk van de aard van dit object varieert de looptijd van DBFM-contracten dikwijls tussen de 15 en 30 jaren. (Bron: Ministerie van Financiën, DBFM Handboek, Den Haag 2005, p. 6)



DBFMO

Bij DBFMO ('Design, Build, Finance, Maintain & Operate') draagt de aannemer ook het exploitatie-risico van het te realiseren project. Hierbij is de aannemer voor de betaling van zijn diensten (via tol of huurinkomsten) afhankelijk van het feitelijke gebruik van het gerealiseerde project. Bij DBFM is de aannemer voor de betaling van zijn diensten (via een door de opdrachtgever te betalen beschikbaarheidsvergoeding of 'schaduwtoel') afhankelijk van de feitelijke beschikbaarheid van het gerealiseerde project. Voorbeelden van op basis van DBFMO gerealiseerde projecten komen we in de praktijk op dit moment vooral bij projecten van de Rijksgebouwendienst tegen. Te denken valt aan projecten als de renovatie van het Ministerie van Financiën te Den Haag; Belastingdienst Doetinchem; IB-Groep en Belastingdienst Groningen; Uitzetcentrum Rotterdam en Montaigne; justitieel complex Schiphol; penitentiaire inrichting Zaanstad; justitiële

2.2 Toenemende complexiteit

Naast een veranderende opdrachtgever heeft de markt te maken met een veranderende omgeving die het organiseren van een groot bouwproject complexer maakt. Het ontstaan van complexiteit zal hier worden toegelicht en de factoren die daarmee samenhangen in de hier opvolgende paragrafen.

Complexe projecten worden vaak omschreven als projecten die te ingewikkeld zijn om te programmeren, te ontwerpen en te realiseren, waardoor het beheersen ervan tot een moeilijke opgave wordt gemaakt. Complexiteit kan zowel slaan op het product als op het proces dat nodig is om tot dit product te komen. Dit kan worden uitgelegd op basis van de door de Bruijn onderscheiden dimensies van complexiteit, de technische, sociale en de organisatorische dimensie.

Technische complexiteit: bij veel onzekerheden in het ontwerp ontstaat technologische onzekerheid. Bouwprojecten zijn vaak uniek, dus binnen elk project ontstaan factoren die niet van te voren zijn vast te stellen.

Sociale complexiteit: Bij de aanwezigheid van een groot aantal actoren met uiteenlopende, soms botsende, belangen kan het project zo ingewikkeld worden dat het complex wordt genoemd.

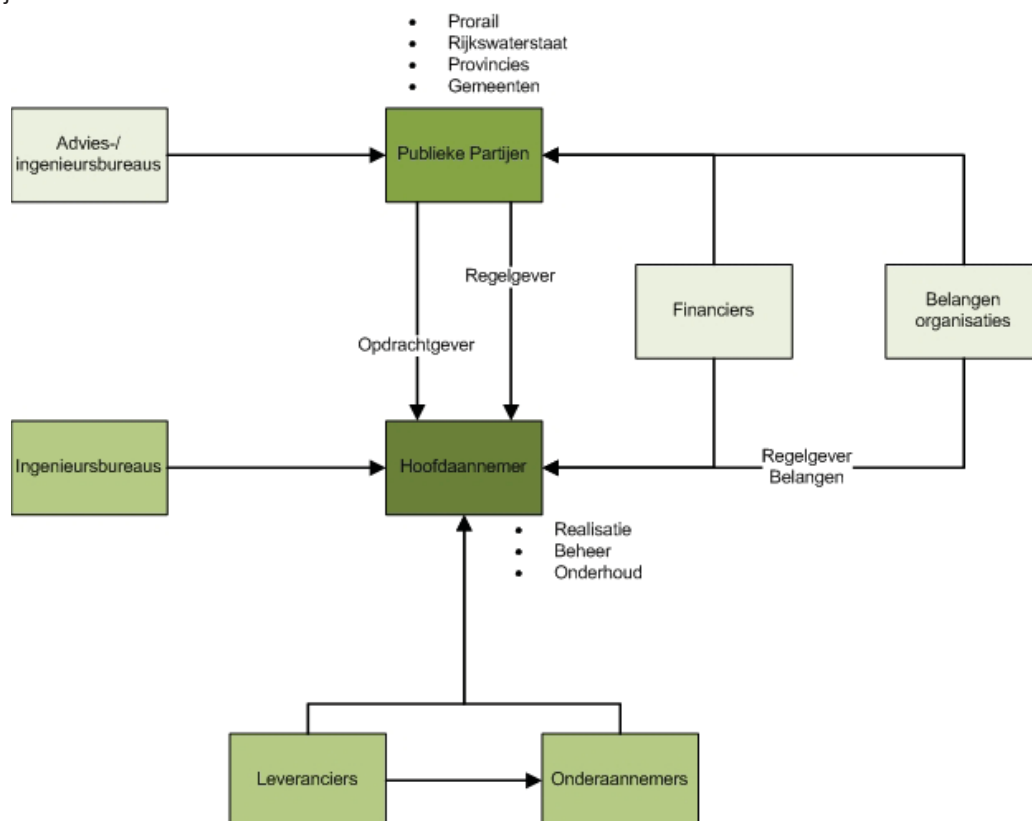
Organisatorische complexiteit: Deze vorm is meer een samenvoeging van beide bovenstaande dimensies. Een project wordt organisatorisch complex genoemd wanneer het een combinatie is het technische en sociale complexiteit, iets wat in de bouwsector vaak voorkomt.

De organisatorische complexiteit neemt toe wanneer:

- Het project grootschaliger is, hierbij neemt het aantal actoren over het algemeen navenant toe.
- De doorlooptijd van het project langer is.
- Tijdsdruk groter is.
- Meerdere wetten en planstelsels van toepassing zijn.

2.2.1 Vele actoren

De constant veranderende situatie en de omgevingsfactoren zorgen ervoor dat de bouwsector voor ieder project een nieuwe projectorganisatie opzet. Bij alle projecten zijn een groot aantal actoren betrokken die vaak ook nog eens op verschillende locaties werken. Onderstaand is een schema geschetst van de betrokken partijen bij een groot infrastructureel bouwproject:



Figuur 5: Organisatiemodel (bewerking van dictaat CT1210, CiTG, TUDelft (2005))

In infrastructurele projecten worden de opdrachten vaak verstrekt door de publieke partijen, zoals het Rijk, provincies, gemeenten. De twee grootste opdrachtgevers zijn Rijkswaterstaat en ProRail, die verantwoordelijk zijn voor respectievelijk het hoofdwegenet en het railnetwerk. Deze publieke partijen zorgen samen met bouwinstututen en andere belanghebbenden tevens voor de wetten en regels waar de aannemer zich aan moet conformeren. Deze opdrachtgevers worden vaak geadviseerd bij de aanbesteding door adviesbureaus, op het gebied van het technische, economische, sociaal en milieutechnische vlak. Op zijn beurt wordt de aannemer ondersteund door ingenieursbureaus, onderaannemers, leveranciers en indien nodig maakt hij tevens gebruik van adviesbureaus. Al deze partijen worden in het project gedwongen samen te werken om tot een oplossing te komen. Deze organisaties zijn onderhevig aan veranderingen die leiden tot onduidelijkheden in de verantwoordelijkheden. In het traditionele bouwproces is er een grotere taak weggelegd voor de opdrachtgever, de opdrachtnemer heeft hierbij minder risico's en verantwoordelijkheden.

2.2.2 Unieke eenmalige projecten

De bouwsector kenmerkt zich doordat ieder project uniek is. Dit wordt veroorzaakt door veranderende behoeften en prioriteiten van de klant. Deze klant specificeert zijn wens, waardoor de opdrachtnemers vrijwel nooit met standaard objecten kunnen werken. Het verschil zit hem vooral in het totale project, de randvoorwaarden en omstandigheden veranderen voortdurend. De materialen, componenten en specialisaties die nodig zijn, zijn meestal voor ieder project hetzelfde. Vanuit het oogpunt van de aannemers en de ontwerp bureaus is er vaak continuïteit en herhaling: procedures en uitvoeringstaken zijn voor ieder project nagenoeg gelijk. Het unieke karakter van de projecten geldt vooral vanuit de scope van het totale project en niet zozeer vanuit de kleine onderdelen ervan, kleine onderdelen worden veelal standaard gemaakt, het unieke zit in het geheel.

2.2.3 Omgeving

Doordat het bouwproces op steeds verschillende locaties plaatsvindt, speelt de omgeving een belangrijke rol. Daar waar in de meeste sectoren de productieketen plaatsvindt op dezelfde locatie, is de bouwsector één van de weinige sectoren waar de productie plaatsvindt op een steeds veranderende plek. In de bouwsector wordt een bouwplaats opgezet voor één enkel product, in vergelijking met verschillende andere sectoren waar meerdere producten worden geproduceerd in een vaste keten en worden gedistribueerd naar meerdere klanten. Hierdoor beïnvloedt de omgeving het bouwproces, de volgende zaken spelen daar in een rol:

Weersinvloeden: het weer heeft een duidelijke invloed op het bouwproces, een deel van de werkzaamheden is sterk afhankelijk van het weer, in de planning dient hier ook rekening mee te worden gehouden.

Logistiek: door de steeds veranderende omstandigheden moet rekening worden gehouden met de aan- en afvoer van materialen. Onderaannemers en leveranciers opereren vaak in wisselende samenstelling. Daarnaast is er extra ruimte nodig voor het inrichten van een bouwplaats. Bij een slechte planning en logistiek plan is het noodzakelijk de bouwplaats te vergroten.

Locale context: opdrachtnemers dienen rekening te houden met de lokale context van het project. Voorbeelden van de randvoorwaarden die voortkomen uit de lokale context zijn het beperken van geluidsoverlast en het voorlichten van omwonenden.

Deze laatste twee factoren hebben de afgelopen decennia meer grip gekregen op het bouwproces. Nederland wordt steeds voller en hierdoor moet steeds meer rekening worden gehouden met de omgeving. Niet alleen met omwonenden, maar ook met het verkeer, bedrijven en hulpdiensten. Daarnaast is het milieu een belangrijkere rol gaan spelen. Hierdoor is de regelgeving rond projecten steeds complexer geworden waardoor een noodzaak ontstond om de eisen te structureren en het ontwerpproces af te stemmen op de omgeving.

2.2.4 Fragmentatie

Het traditionele bouwproces kenmerkt zich door een sterk gescheiden, sequentiële opvolging van fase in het bouwproces. *Deze segmentatie wordt veroorzaakt doordat voor elke fase opnieuw partijen worden gecontracteerd. Hierdoor veranderen de taken, verantwoordelijkheden en aansprakelijkheden van de partijen per fase. De partijen opereren gescheiden en daarmee zijn ook de fasen in het bouwproces gescheiden*(EIB, 1996)



2.3 Deelconclusie

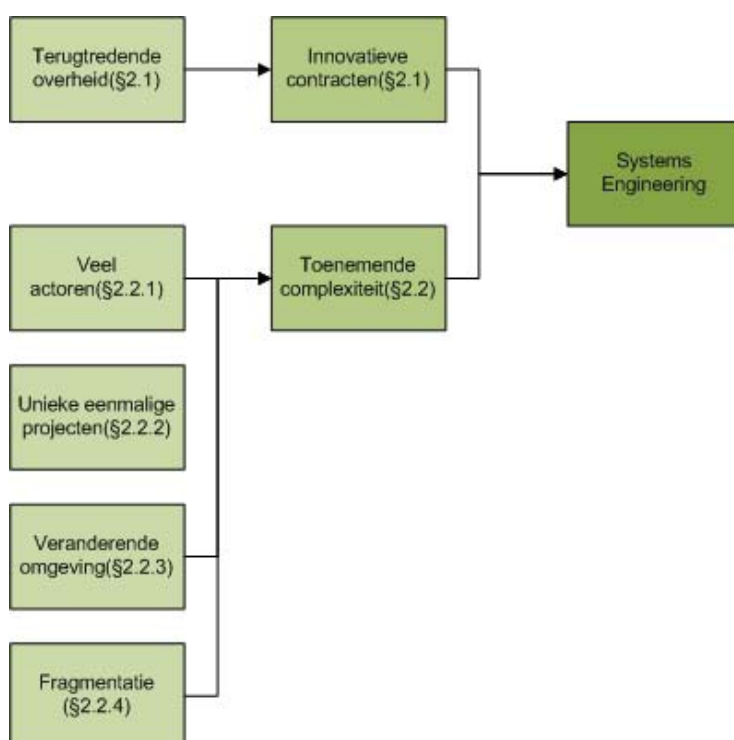
In de bouwsector is de afgelopen decennia veel veranderd. De regelgeving is toegenomen, de bebouwing is dichter op elkaar komen te staan en de contracten uitgebreider en complexer. Een combinatie van verschillende factoren hebben er toe geleid dat Rijkswaterstaat en ProRail, de twee grootste opdrachtgevers in de infrasector, hebben gekozen om Systems Engineering op te leggen aan de opdrachtnemers. Om een goed beeld te krijgen van de achtergrond van de keuze voor Systems Engineering tracht dit hoofdstuk antwoord te geven op deelvraag I-a:

I-a Welke veranderingen en karakteristieken hebben geleid tot de toepassing van Systems Engineering in de bouwsector(beschrijvend)?

Een aantal karakteristieken en veranderingen van de bouwsector zijn verantwoordelijk geweest voor de keuze van Systems Engineering in de bouwsector:

- Onder toenemende politieke druk de marktpartijen meer verantwoordelijkheden geven om marktwerking te bevorderen.
- Als gevolg hiervan de keuze voor “innovatieve contracten” waarbij meer taken bij de opdrachtnemer liggen. Daarbij kan gedacht worden aan het ontwerp, maar ook aan het onderhoud en de financieren of zelfs het beheer.
- Toenemende complexiteit van de projecten. Meer bebouwing en veel externe actoren, waardoor de regelgeving rond grote infrastructurele projecten is toegenomen.
- Naast vele externe factoren wordt in de bouwsector tevens gewerkt met vele interne actoren die allemaal goed moeten samenwerken om het project te realiseren.
- De projecten in de GWW-sector zijn vaak unieke eenmalige projecten, de klant specificeert waardoor elk object opnieuw moet worden ontworpen.
- In de bouwsector wordt gewerkt in een veranderende omgeving, de aannemer dient rekening te houden met deze lokale context. Dit hangt samen met de toenemende complexiteit van projecten.
- De bouwsector is gefragmenteerd opgebouwd, waardoor het project meerdere malen in het proces moet worden overgedragen.

Deze karakteristieken zijn in onderstaand schema samengevat. Veel van deze karakteristieken hebben samenhang en zijn een logisch gevolg van elkaar. De omgeving speelt hier een belangrijke rol. In onderstaand schema zijn deze factoren samengevat.

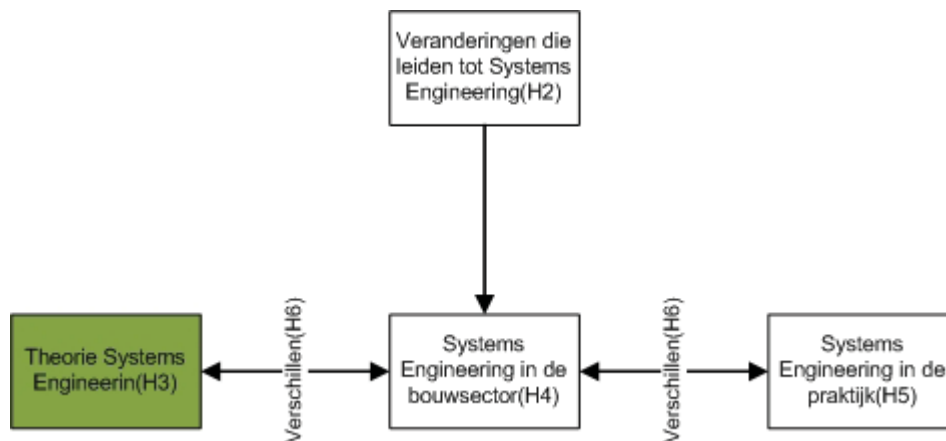


Figuur 6: Verandering in de bouwsector



3 Systems Engineering

In dit hoofdstuk wordt de theorie van de SE-methode weergegeven zoals die in de verschillende sectoren is ontstaan.



Figuur 7: Opbouw van hoofdstukken

Dit hoofdstuk tracht antwoord te vinden op de tweede deelvraag:

I-b Wat is de algemene theorie van Systems Engineering zoals die is ontwikkeld door de industrie en Lucht- en Ruimtevaartsector(beschrijvend)?

3.1 Definitie van een systeem

Het belangrijkste aspect van Systems Engineering is het systeemdenken. De essentie hiervan komt uit het systeem. De definitie van een systeem is:

"A system is a whole that cannot be divided into independent parts without losing its essential characteristics as a whole"
- Rehtin, 1999

Ofwel vrij vertaalt, een constructie of verzameling van verschillende elementen die een gezamenlijk doel hebben, die de elementen niet onafhankelijk kunnen vervullen. De elementen, of onderdelen, kunnen bijvoorbeeld mensen, hardware, software, faciliteiten, beleid en documenten zijn. Dus, alle zaken die nodig zijn om het uiteindelijke doel te kunnen bewerkstelligen. Het doel is inclusief systeem mogelijkheden, eigenschappen, karakteristieken, functies, gedrag en prestaties. De waarde toegevoegd door het totale systeem dat boven de onafhankelijk onderdelen gaat, is primair gecreëerd door de relaties tussen die onderdelen.

Daarnaast bevat de Systems Engineering ook de term Engineering. De betekenis hiervan is impliciet bekend, maar kent ook een definitie:

"Het proces van het toepassen van wetenschap en wiskunde met praktische doelen. Vooral gedurende het constructief ontwerp, de integratie en de productie fases. Over het algemeen gebaseerd op analyse, feiten, logica en afleiden."
- Rehtin, 1999

3.2 Definitie van Systems Engineering

De losse definities van de termen zijn vrij helder uit te leggen, de definities van Systems Engineering lopen echter uiteen. Hieronder zijn een aantal definities gegeven.

"Systems Engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems."
- INCOSE

"Systems Engineering is a robust approach to the design, creation and operation of systems."
- NASA



“The design, production, and maintenance of trustworthy systems within cost and time restraints.”

- SAGE

“The interdisciplinary approach governing the total technical effort required to transform a requirement into a solution.”

- ECSS-E-10

De US Militaire standaard geeft een uitgebreide definitie:

“The application of scientific and engineering efforts to:

(1) Transform an operational need into a description of system performance parameters and a system configuration through the use of an iterative process of definition, synthesis, analysis, design, test and evaluation

(2) Integrate related technical parameters and ensure compatibility of all related, functional and program interfaces in a manner that optimizes the total system definition and design.

(3) Integrate reliability, maintainability, safety, survivability, human and other such factors into the technical engineering effort to meet cost, schedule and technical; performance objectives.”

- Mil-Std 449A

Ondanks de verschillende definities komen een aantal onderdelen vaak terug: het ontwerpen van systemen en het omzetten van een klantwens in een oplossing. Hierbij is de definitie van de European Committee on Space Standardisation het meest omvattend:

“The interdisciplinary approach governing the total technical effort required to transform a requirement into a solution.”

- ECSS-E-10

Ofwel de interdisciplinaire methode die de totale technische inspanning omvat om een eis om te zetten in een oplossing. Deze definitie zal dus ook in het vervolg worden gebruikt als de definitie voor Systems Engineering.

3.3 Geschiedenis van Systems Engineering

De term Systems Engineering voert terug naar Bell Telephonie Laboraties in de jaren 40. De behoefte ontstond in die tijd om de eigenschappen van een systeem te identificeren en te beïnvloeden als geheel, daar waar dat in complexe projecten zeer van de som van de eigenschappen van de elementen kan verschillen.

Dit motiveerden het Ministerie van Defensie, NASA, en andere industrieën om de discipline toe te passen. Toen het niet langer mogelijk was om de verbeteringen van een ontwerp te baseren op het totale systeem, er meer disciplines gedwongen werden samen te werken en de bestaande hulpmiddelen niet volstonden om aan de nieuwe eisen te voldoen startte de ontwikkeling van nieuwe methoden die de complexiteit overzichtelijk trachten te maken. Het naast elkaar werken, maar ook het samenwerken van deze disciplines, vroeg om een integrale aanpak van het ontwikkelingsproces. Daarbij bleek het vaak moeilijk om bij grote projecten alle onderdelen op tijd en binnen het budget gereed te krijgen, omdat bijvoorbeeld niemand het overzicht hierover had of verantwoordelijkheden niet duidelijk vastgelegd waren. Ook was er behoefte aan het structureren, vastleggen en evalueren van belangrijke informatie die tijdens een project gegenereerd werd, zoals (verandering van) eisen die aan een ontwerp gesteld werden, relaties tussen verschillende componenten en beslissingen die tijdens het ontwikkelingsproces genomen werden. Aan dit laatste heeft de opkomst van de computer in grote mate bijgedragen. De populaire hulpmiddelen die vaak in de context van Systems Engineering worden gebruikt zijn hierbij ontwikkeld bijvoorbeeld UML en QFD, IDEF0.

In 1990, werd de National Council on Systems Engineering (NCOSE), opgericht door vertegenwoordigers van een aantal bedrijven en organisaties uit de V.S. NCOSE werd opgericht om te voldoen aan de behoefte tot verbetering en scholing rond SE. Als gevolg van de toenemende betrokkenheid van internationale Systems Engineering, werd de naam van de organisatie veranderd in de International Council on Systems Engineering (INCOSSE) in 1995.

De Systems Engineering is zowel een benadering als een discipline in de techniek. Het doel van onderzoek in de SE is de benadering eenvoudig te formaliseren en zo doende, nieuwe methoden en onderzoekkansen te identificeren gelijkend op de manier zoals het op ander gebieden van de techniek voorkomt.

De tabel op de volgende pagina geeft een kort overzicht van de ontwikkeling van Systems Engineering in de 20e eeuw.



1939-1945 Bell Labs ondersteunt de ontwikkeling van NIKE
1951-1980 SAGE Air Defense System opgesteld en beheerd door MIT
1956 Uitvinding van Systeem Analyse door RAND Corporation
1962 Publicatie van "A Methodology for Systems Engineering"
1969 Jay Forrester (Schrijver "Urban Systems") Onderzoeker aan MIT
1990 Oprichting NCOSE
1995 Internationalisering van NCOSE tot INCOSE
1996 Oprichting INCOSE Nederland
1994 Perry Memorandum benadrukt het toepassen van IEEE P1220 voor militaire opdrachtnemers.
2002 Uitgifte van de standaard ISO/IEC 15288

Wikipedia.com



3.4 Algemene theorie Systems Engineering

Systems Engineering bestaat uit een aantal onderdelen die gezamenlijk de basis vormen van de theorie. Deze elementen worden in de standaard IEEE 1220 als volgt omschreven:

1. Eisenanalyse
2. Eisenvalidatie
3. Functionele analyse
4. Functionele verificatie
5. Synthese
6. Ontwerp verificatie
7. System analyse
8. Control

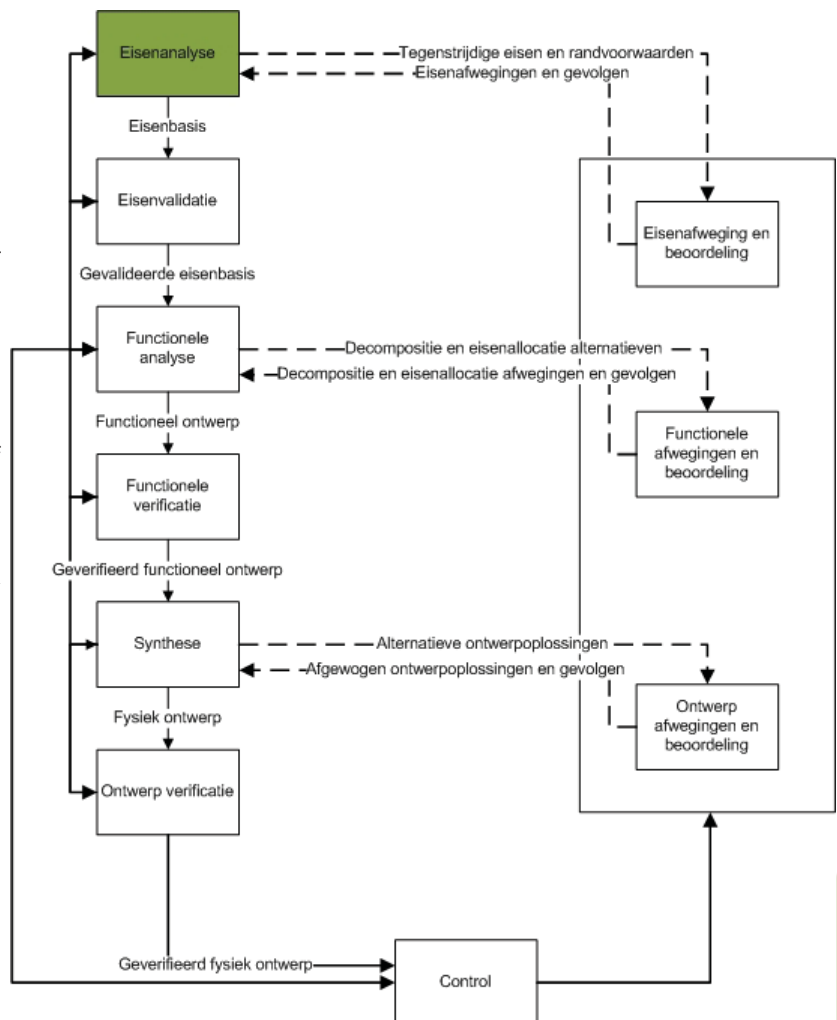
Deze 8 stappen in het Systems Engineeringsproces zullen hier worden uitgewerkt om een goed beeld te krijgen van de theorie. Deze stappen worden op elk niveau doorlopen om tot een totale decompositie te komen van het systeem. Daarbij moet worden opgemerkt dat er verschillen bestaan tussen de sectoren waarin SE is geëvolueerd en de bouwsector, hier zal in paragraaf 3.5 op worden ingegaan.

3.4.1 Eisenanalyse

De eerste stap in het SE-proces is het analyseren van de input van het systeem. Deze analyse wordt gebruikt om functionele en prestatie-eisen te ontwikkelen. Hiermee worden de opdrachtgevers wensen vertaald in een reeks eisen die bepalen wat het systeem moet presteren en hoe goed. *“Het is zaak deze eisen zo op te stellen dat ze eisen begrijpelijk, ondubbelzinnig, volledig en beknopt zijn.”*(IEEE1220, 2005). De eisenanalyse moet de functionele eisen en de ontwerpbeperkingen bepalen of verduidelijken.

Deze analyse begint met het inventariseren van de stakeholders van het project. Elk project kent een aantal stakeholders, die een bepaald belang hebben bij een project. In die zin hebben zij bepaalde verwachtingen van het project. Voorbeelden van deze stakeholders zijn:

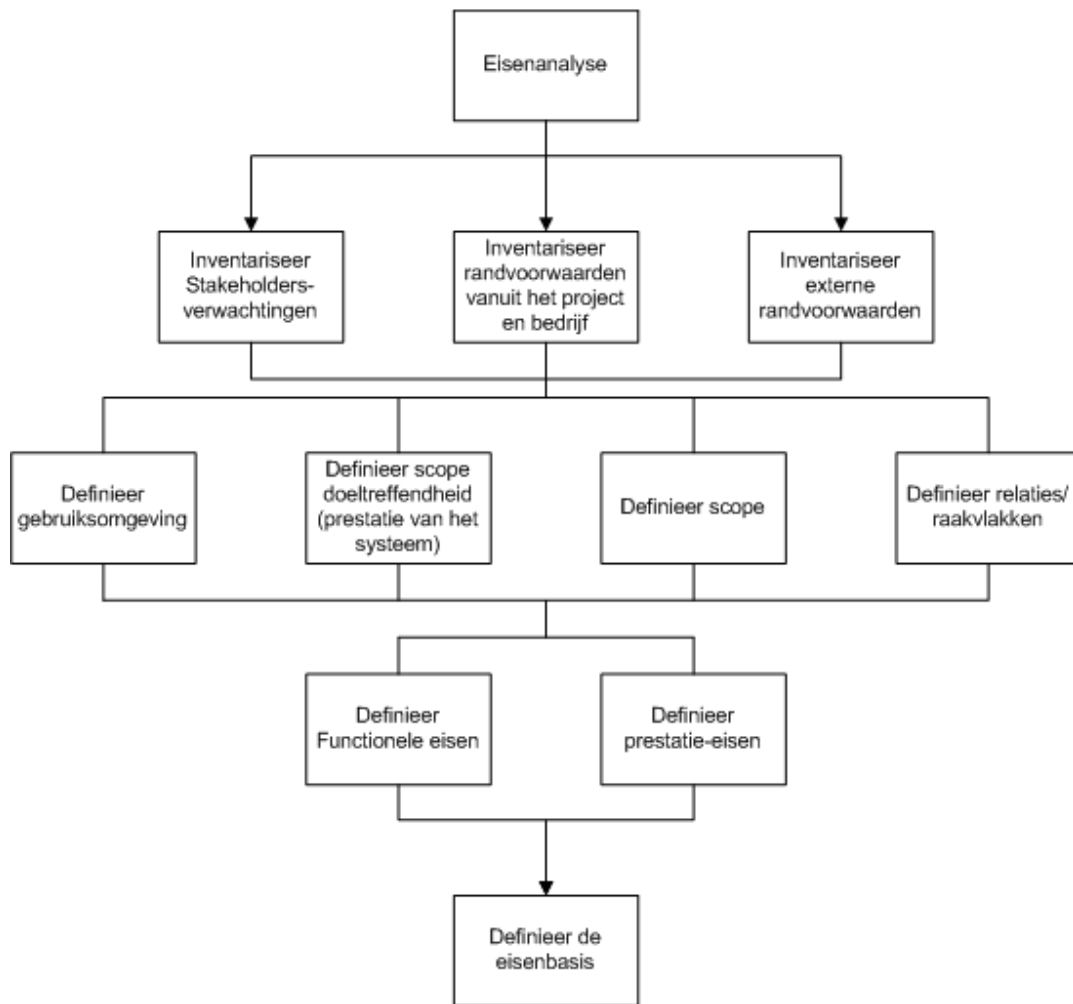
- Gebruikers
- Omwonenden
- Bouwers
- Opdrachtgevers
- Milieuorganisaties
- Overheden
- Waterschappen



Figuur 8: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)

De verwachtingen van al deze actoren vormen gezamenlijk het projectdoel. Bij een groot aantal betrokkenen is het goed mogelijk dat de verwachtingen met elkaar in tegenstrijd zijn. Wanneer verwachtingen tegenstrijdig zijn is het noodzakelijk een afweging te maken. Het doel van de eisenanalyse is om tot een set eisen te komen die meetbaar zijn en niet tegenstrijdig. In de standaard IEEE1120 wordt gedetailleerd beschreven welke stappen moeten worden doorlopen op een zorgvuldige eisenanalyse uit te voeren. Op de volgende pagina is een stroomschema te vinden die in de eisenanalyse wordt doorlopen.



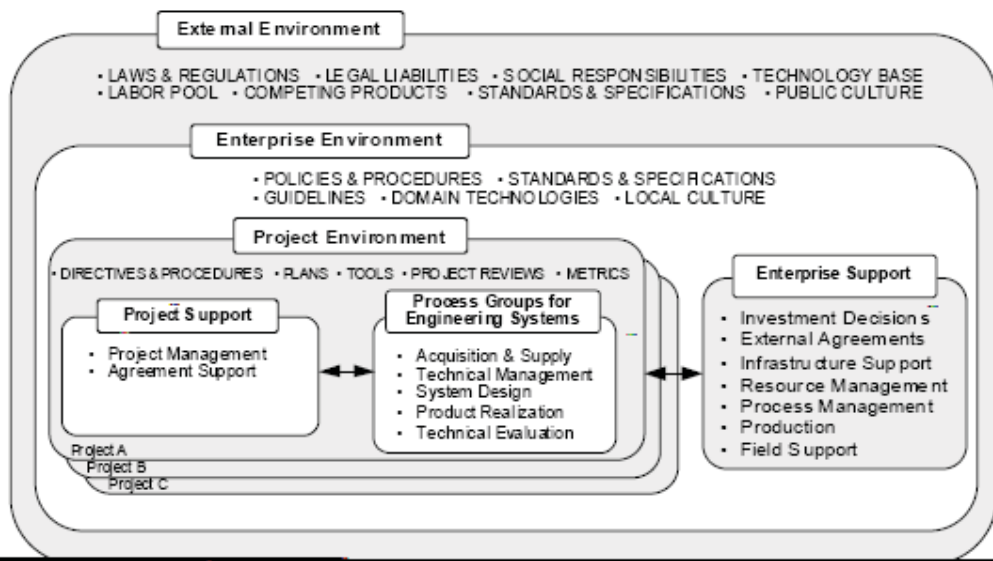


Figuur 9: Eisenanalyse(Bewerking van IEEE1220)

De eisen van de actoren kunnen vanuit verschillende omgevingen komen, deze omgevingen kunnen een handvat vormen voor het inventariseren van de stakeholders en belangen. Deze omgevingen worden in het SE handbook(2002) omschreven en zijn:

- Externe omgeving
- Bedrijfsomgeving
- Projectomgeving

In figuur 10 zijn deze omgevingen grafisch weergegeven. Deze stap moet op elk niveau worden herhaald, eisen vanuit de ze 3 omgevingen kunnen dus op verschillende detailniveau's in de eisenanalyse worden opgenomen.



Figuur 10: Eisenherkomst(Afkomstig uit standaard EIA632)



Één enkele eis heeft een bepaald kosteneffect op de oplossing en het opnemen van de eis zou een zorgvuldige afweging moeten zijn. In de theorie wordt dit als volgt omschreven:

“Requirements definition is a complex process that employs performance analysis, trade studies, constraint evaluation and cost/benefit analysis. System requirements cannot be established without checking their impact (achievability) on lower level elements.” – INCOSE(2002)

Het resultaat van de eisenanalyse moet een basis zijn van volledige, nauwkeurige, niet-dubbelzinnige systeemeisen. Hiervoor is het noodzakelijk de eisen hiërarchisch op te bouwen, zodat alle onderliggende eisen traceerbaar zijn. Het uiteindelijke doel moet zijn dat de onderliggende eis¹:

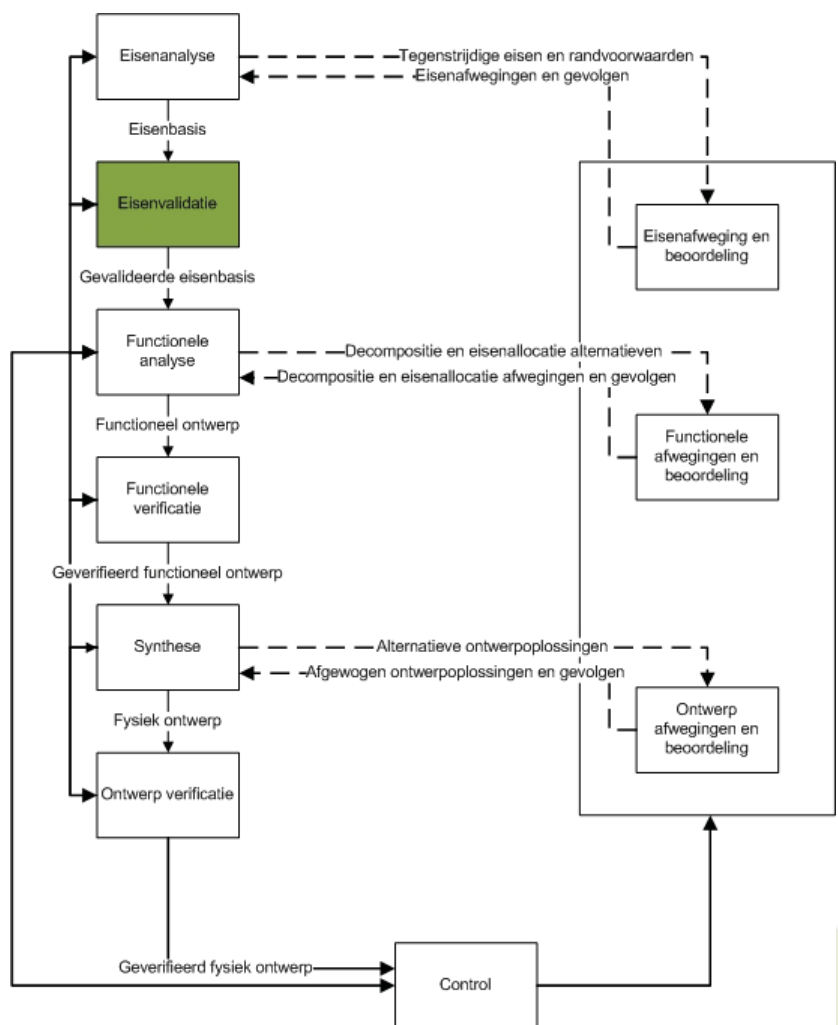
- helder is.
- van toepassing is op slecht één systeemfunctie.
- niet tegenstrijdig is met andere eisen of overbodig is.
- niet beïnvloed is door een bepaalde toepassing(uiteindelijke oplossing).

3.4.2 Valideren van de eisenbasis

Om te waarborgen dat de eisen die ontwikkeld zijn aan de hand van de stakeholders verwachtingen en randvoorwaarden ook daadwerkelijk in lijn zijn met de input wordt er een validatie uitgevoerd over de ontwikkelde eisen. In deze validatie moeten eisen die niet in lijn zijn met de stakeholders-verwachtingen en tegenstrijdige eisen worden gelokaliseerd. Wanneer eisen niet voldoen aan de stakeholders-verwachtingen dan zullen de eisen moeten worden gewijzigd of moet een afweging worden gemaakt over het opnemen van de eis in de eisenbasis.

Tegenstrijdige eisen kunnen leiden tot onduidelijkheid en meerwerk bij het overdragen van het werk aan de opdrachtnemer. Het is van groot belang dat het vaststellen en opnemen van eisen zorgvuldig gebeurt om een goede uitgangspositie te hebben voor het ontwerp van het systeem.

Hiervoor wordt de eisenbasis die is verkregen in eisenanalyse vergeleken met de initiële eisen die afkomstig zijn



Figuur 11: Systems Engineeringsproces (bewerking van IEEE1220) uit de in de vorige paragraaf genoemde bronnen. Hierdoor wordt in een vroeg stadium voorkomen dat het gebouwde uiteindelijk niet aan de verwachtingen van de stakeholders voldoet of dat niet wordt voldaan aan voor het bedrijf vastgesteld beleid.



3.4.3 Functionele analyse

Met de input van de gevalideerde eisenbasis wordt een functionele analyse gedaan, deze analyse heeft de twee volgende doelstellingen:

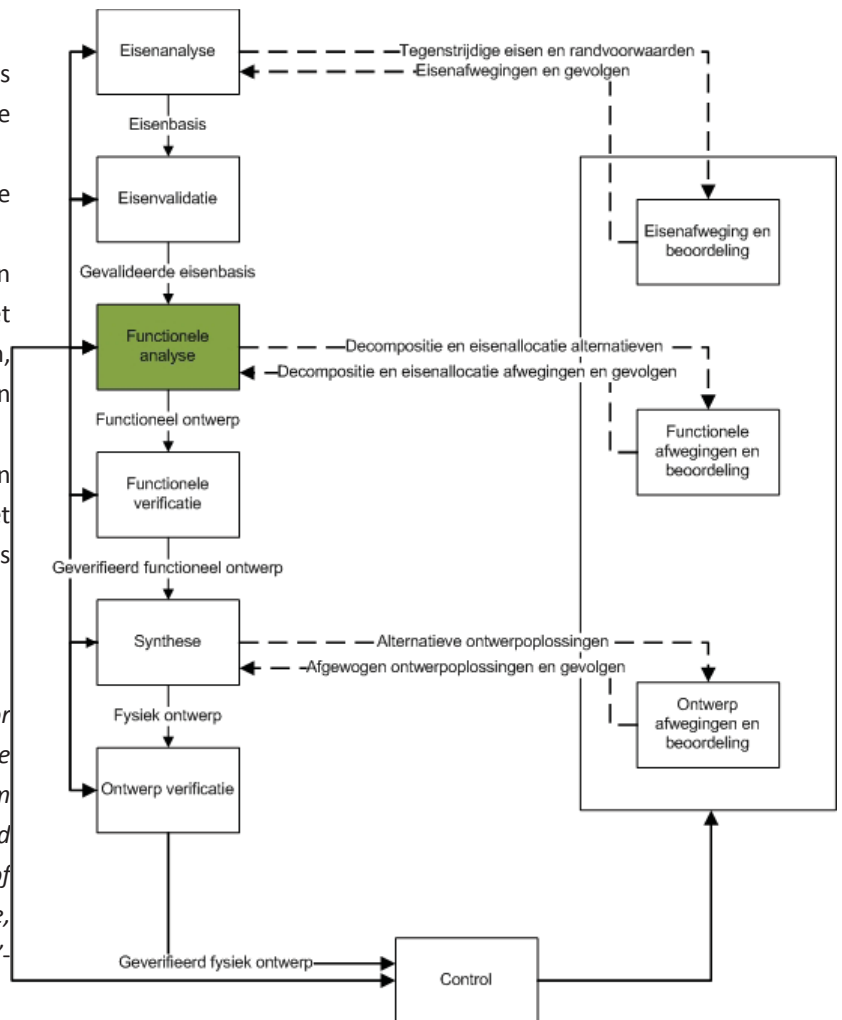
- Het probleem dat door de eisenanalyse wordt bepaald verder uit te werken.
- Het systeem van hoofdfuncties ontbinden in deelfuncties die door delen van het systeemontwerp (b.v. subsystemen, componenten of elementen) moeten worden vervuld.

Deze functionele analyse zou moeten worden uitgevoerd zonder ontwerp oplossingen in het achterhoofd. Er wordt gekeken naar deelfuncties die door de hoofdfunctie worden uitgevoerd. INCOSE(2002) omschrijft een functie als volgt:

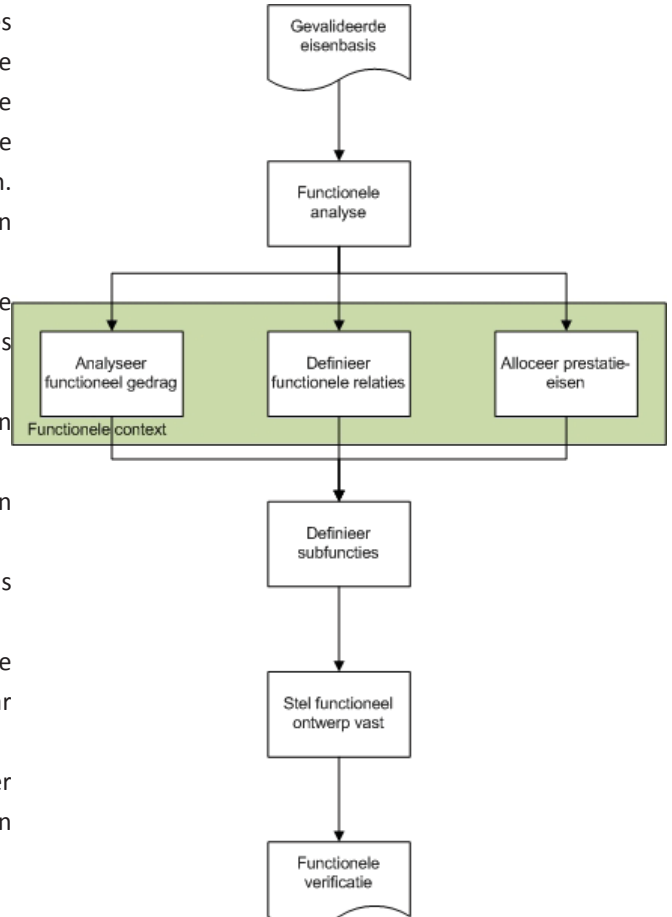
"A function is a characteristic task, action or activity that must be performed to achieve a desired outcome. It is the desired system behaviour. A function may be accomplished by one or more system elements comprised of equipment (hardware), software, firmware, facilities, personnel, and procedural data."
INCOSE(2002)

De functionele analyse onderzoekt welke onderliggende functies nodig zijn om de bovenliggende functie te bewerkstelligen. In deze functionele analyse worden verschillende sets van functionele decomposities met elkaar afgewogen om tot de meest effectieve en efficiënte vertaling te komen van de belangen van de actoren. In de standaard IEEE1220 wordt dit proces in de volgende stappen uitgewerkt:

1. Toplevefuncties ontbinden in subfuncties. Het doel is te bepalen welke functies het systeem op de lagere niveaus heeft.
2. Bepalen hoe goed de functies op dit lagere niveau moeten presteren en dit opnemen in prestatie-eisen.
3. Identificeren en bepalen van interne en externe relaties van de functies.
4. Verschillende functionele groeperingen genereren, met als doel het aantal relaties te minimaliseren.
5. Het uitvoeren van trade-offs om de verschillende samenstellingen, die voldoen aan de eisenbasis, met elkaar af te wegen.
6. Zonodig de stappen herhalen uit de eisenanalyse wanneer niet tot een correcte functionele decompositie kan worden gekomen.



Figuur 12: Systems Engineeringsproces (bewerking van IEEE1220)



Figuur 13: Functionele analyse (bewerking van IEEE1220)



De doelstelling van de functionele analyse is om de functies, de prestaties en de relaties te identificeren. De functionele analyse bepaalt nog geen oplossing.

Met behulp van de functionele analyse kunnen ontwerp oplossingen worden gegenereerd. Voor het vervullen van de functies op het lagere niveau zijn verschillende fysieke oplossingen mogelijk. Deze oplossingen worden in de synthese uitgewerkt.

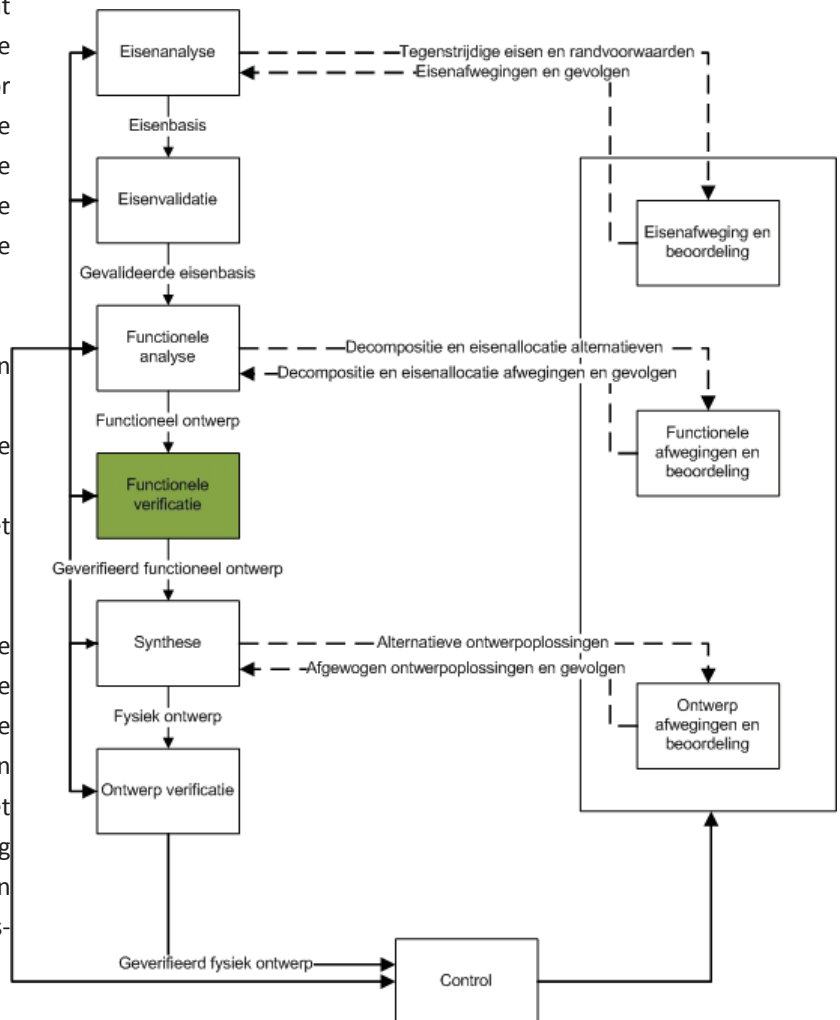
3.4.4 Functionele verificatie

De verkregen functionele decompositie moet tevens worden geverifieerd om te bepalen of deze decompositie op de juiste manier is gedaan. Hiermee ontstaat een geverifieerd functioneel ontwerp. Deze functionele decompositie vormt de basis voor het generen van ontwerp oplossingen. In deze verificatie wordt bekeken of de functionele decompositie voldoet aan de gevalideerde eisenbasis. Hiervoor wordt de decompositie bekeken op de volgende punten:

- Compleetheit
- Zijn alle functionele en prestatie-eisen meegenomen in de decompositie
- Zijn alle randvoorwaarden in de decompositie meegenomen.

De output wordt vervolgens gebruikt in het ontwerp(synthese).

Het is van belang te bekijken of de functionele eisen van de actoren in de functionele decompositie te traceren zijn. De decompositie zou een weergave moeten zijn van de topeisen die door de verschillende betrokkenen aan het systeem zijn gesteld. Bij een onjuiste vertaling ervan zouden de oplossingen, gegenereerd in de synthese, niet voldoen aan de stakeholders-verwachtingen.



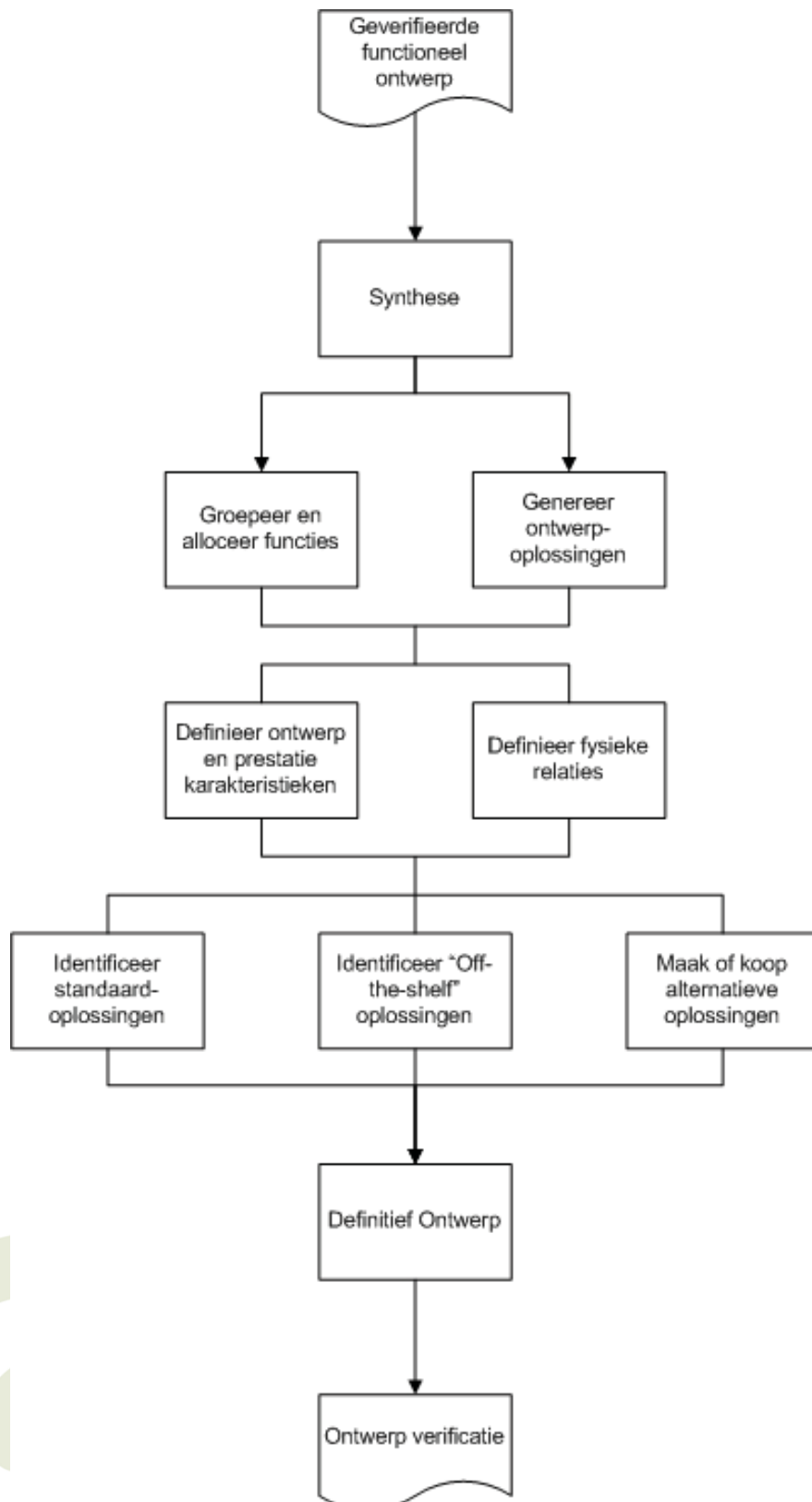
Figuur 14: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)

3.4.5 Synthese

In de synthese worden op basis van de geverifieerde functionele decompositie alternatieven gegenereerd die voldoen aan de functie. Één enkele functie kan door meerdere oplossingen worden vervuld. Deze oplossingen worden met elkaar afgewogen met behulp van trade-offs om tot een definitieve oplossing te komen. Doel van de synthese is het omzetten van de functies in een fysiek systeem door afwegingen te maken in fysieke delen die de functies kunnen vervullen. De synthese is een belangrijk onderdeel van het Systems Engineeringsproces omdat in deze fase het fysieke ontwerp wordt bepaald. In dit gedeelte van het proces zit de ontwerp vrijheid. In het omzetten van een functie in een ontwerp oplossing moeten de juiste afwegingen worden gemaakt om te voorkomen dat uiteindelijk voor een te dure oplossing wordt gekozen, dat de planning niet kan worden gehaald of dat een oplossing te veel risico's met zich meebrengt waardoor bouwfouten kunnen optreden.



In de standaard IEEE1220 wordt het proces dat in de synthese wordt doorlopen als volgt weergegeven:



Figuur 15: Synthese(bewerking van IEEE1220)

In dit schema spelen ook standaardoplossingen een rol. Het kan zijn dat een oplossing die al voor handen is al voldoende presteert, waardoor het niet noodzakelijk is een nieuwe oplossing te ontwerpen. Wordt er een prestatie van het systeem geëist die niet door standaardoplossingen kan worden bereikt, dan is het noodzakelijk een nieuwe oplossing te bedenken of een bestaande oplossing te optimaliseren. Op die manier wordt er gestructureerd naar een totaaloplossing toegewerkt die voldoet aan de eisen, maar tevens kostenefficiënt is.



3.4.6 Ontwerp verificatie

In de ontwerpverificatie wordt het ontwerp dat is gemaakt getoetst aan de eisen gesteld in de eisenanalyse. Hiervoor wordt het ontwerp op een tweetal punten getoetst, zijnde:

1. De eisen gesteld aan het laagste niveau van het ontwerp, inclusief de afgeleide eisen, zijn traceerbaar naar de stakeholdersverwachtingen.
2. Het ontwerp voldoet aan de gevalideerde eisenbasis.

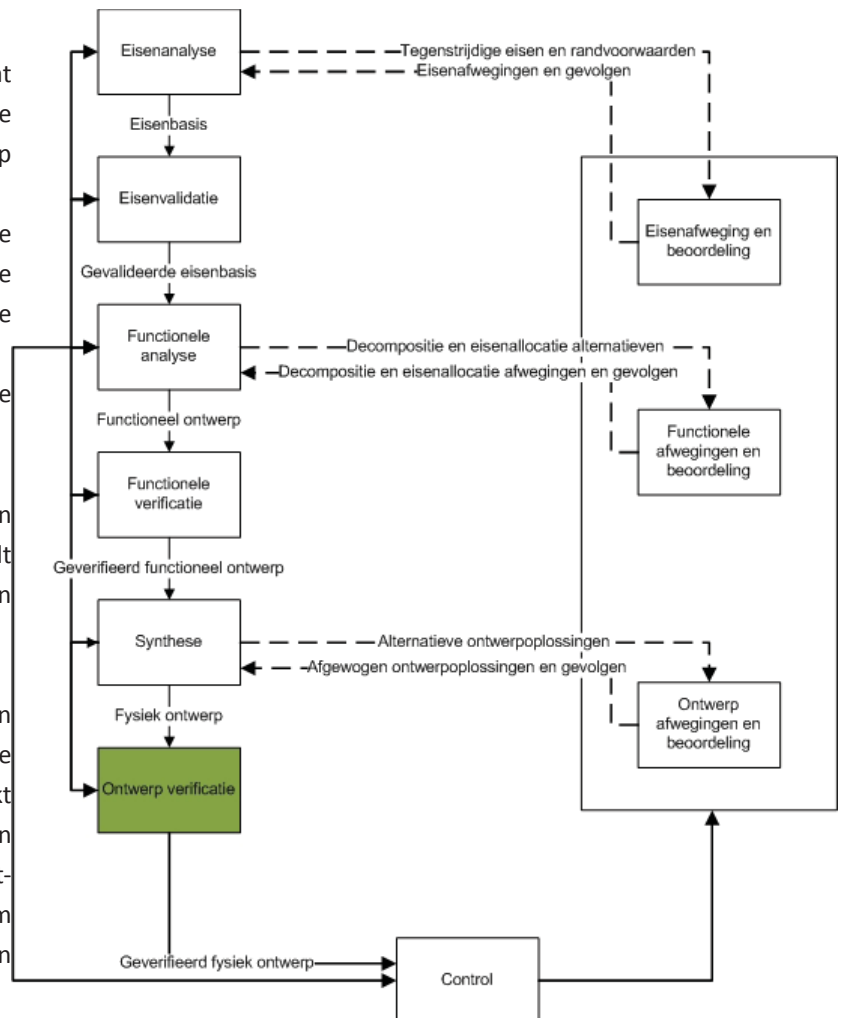
Deze verificatie speelt een belangrijke rol in het ontwerpproces, omdat in deze fase wordt aangetoond dat het fysieke ontwerp voldoet aan de gestelde eisen.

Om aan te tonen dat wordt voldaan aan de eisen worden onderscheid gemaakt in verschillende methoden. Daarbij moet worden opgemerkt dat deze methoden afhankelijk van de aard van de sector verschillend kunnen zijn. In de lucht- en ruimtevaartsector, waar de faalkans minimeer moet zijn worden de volgende methoden toegepast:

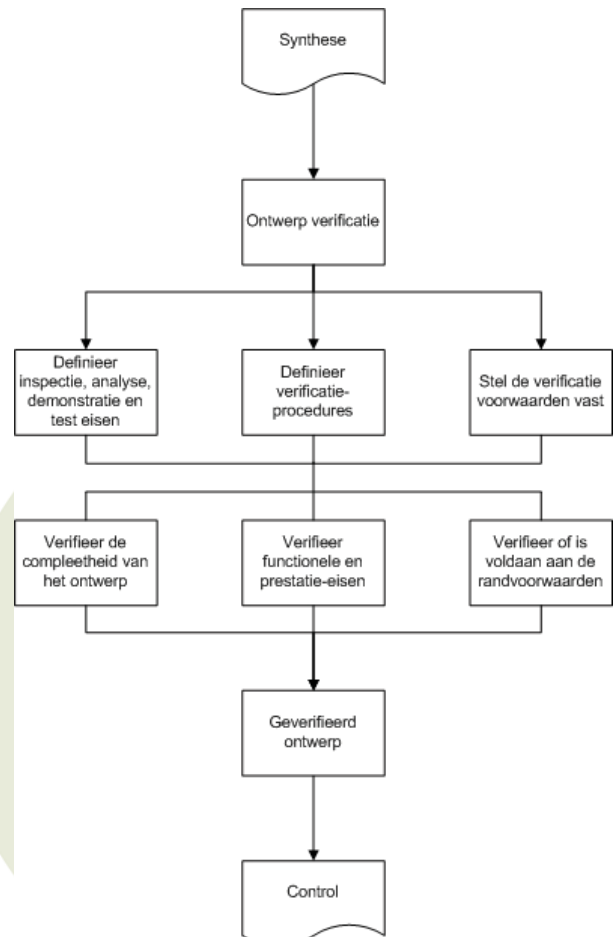
- Demonstratie
- Analyse
- Inspectie
- Test

In deze sector loopt het ontwerp parallel aan de realisatie, kleine onderdelen worden ontworpen, gebouwd(soms op schaal), getest en indien niet voldaan is aan de eisen opnieuw ontworpen. Vervolgens worden op een hoger niveau deze stappen herhaalt. Dit wordt de integratie genoemd.

Het is van belang de methoden voor verificatie van het ontwerp helder te omschrijven, zodat geen misverstanden kunnen ontstaan over het aantonen van de eisen gedurende het ontwerp. Daarnaast moeten de randvoorwaarden voor de verificatie worden weergegeven. Het proces van de ontwerpverificatie wordt in de figuur hiernaast weergegeven.



Figuur 16: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)



Figuur 17: Ontwerpverificatiebewerking van IEEE1220)



3.4.7 System Analyse

De systeemanalyse heeft meerdere functies. Één van de functies begint al bij het vaststellen van de eisen. In deze fase worden tijdens de analyse conflicterende eisen geïdentificeerd en opgelost of met elkaar afgewogen. Vervolgens worden in de functionele analyse functionele eisen gedecomposeerd en prestatie-eisen toegewezen. In de synthese(ontwerp) ten slotte wordt de effectiviteit van de verschillende ontwerp oplossingen beoordeeld en wordt de beste ontwerp oplossing geselecteerd. Hiermee is het één van de belangrijkste elementen van het Systems Engineeringproces. De drie stappen worden hieronder verder toegelicht:

1. Eisenafweging

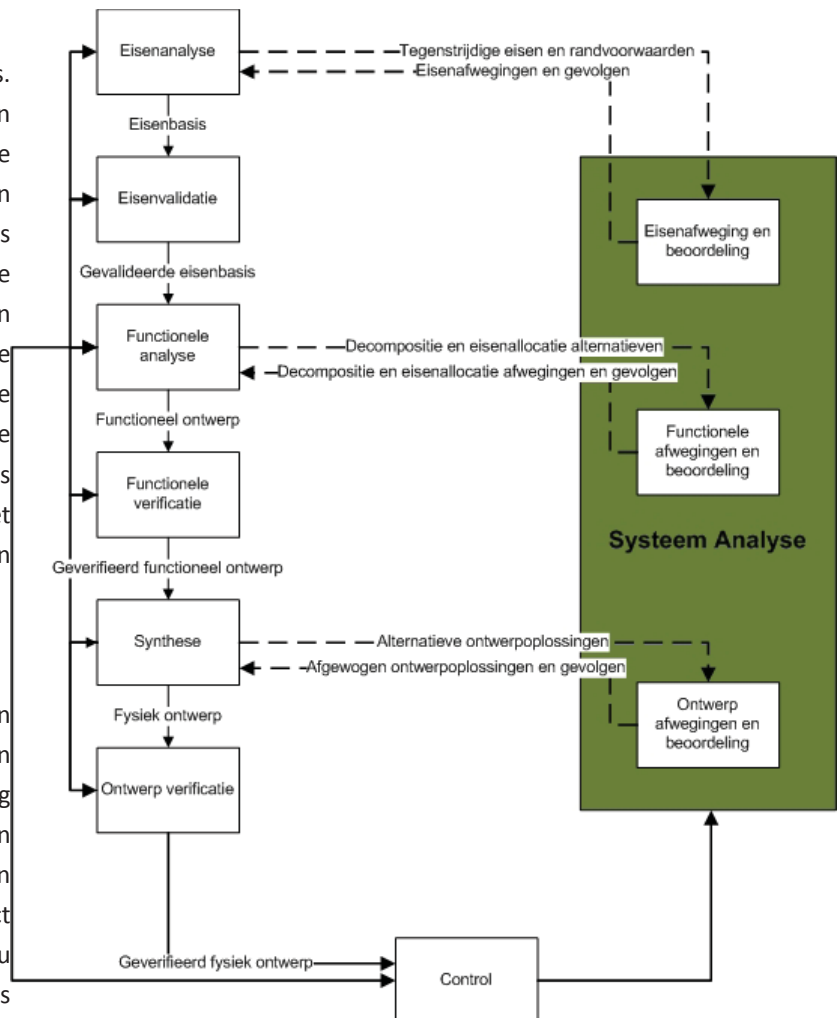
Gedurende de eisenafweging worden tegenstrijdige eisen en randvoorwaarden gelokaliseerd en worden waar nodig alternatieve functionele eisen of prestatie-eisen in de eisenbasis opgenomen. Het opnemen van een eis in de eisenbasis betekent vaak indirect een kostenverhoging. Het opnemen ervan zou om die reden een afweging moeten zijn op basis van kosten, planning en risico's.

2. Functionele afweging

In deze fase worden verschillende functionele alternatieven met elkaar afgewogen. Het beoordeelt verschillende samenstellingen van subfuncties die de hoofdfunctie kunnen vervullen. Daarnaast worden de prestatie-eisen aan een subfunctie toegewezen.

3. Ontwerpafweging

In de synthese worden verschillende ontwerp oplossingen gedefinieerd die aansluiten bij het functioneel ontwerp. In deze fase worden deze oplossingen met elkaar afgewogen.



Figuur 18: Systems Engineeringproces(bewerking van IEEE1220)

Voor het afwegen van verschillende alternatieven wordt gebruik gemaakt van verschillende methoden. Deze afwegingen worden Trade-offs genoemd. INCOSE onderscheidt een drietal verschillende mogelijkheden voor het maken van trade-offs: *Formeel*: Een afweging die gebruik maakt van een gestandaardiseerde methode en tevens worden vastgelegd in een openbaar document.

Informeel: deze afweging maakt tevens gebruik van een gestandaardiseerde methode maar wordt slechts intern vastgelegd op een kladblok of een ander informeel document.

Mentaal: dit is een afweging die door iedereen in het dagelijkse leven vaak wordt gemaakt. Een meer informele manier om een afweging te maken. Deze manier van afwegen wordt gebruikt wanneer een afweging niet belangrijk genoeg is om formeel vast te leggen, wanneer één alternatief duidelijk boven de rest uitsteekt of wanneer de tijd beperkt is. Echter het is wel goed om te documenteren waarom er geen formele afweging is gemaakt.

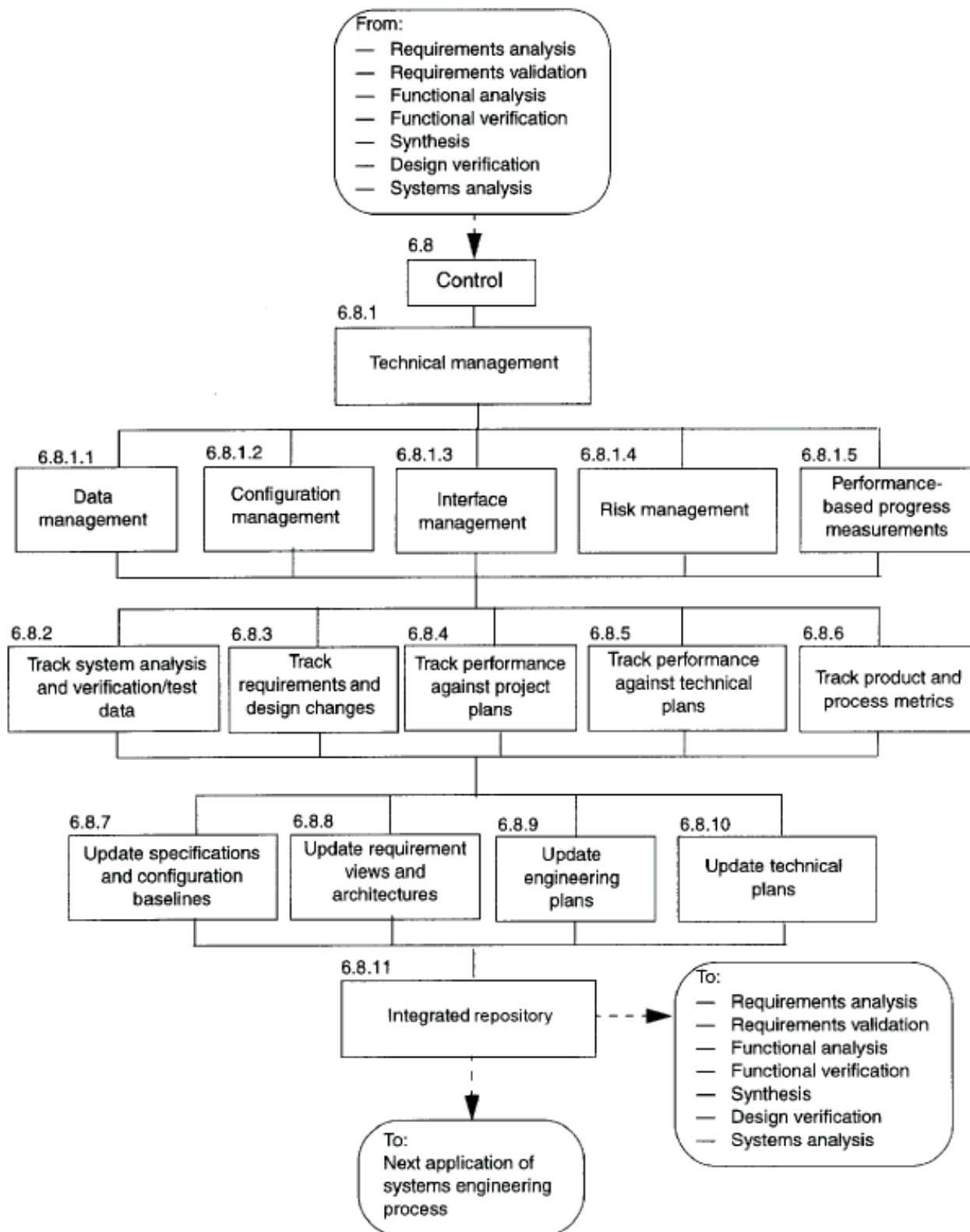
In een formele Trade-off worden de volgende zaken gedocumenteerd:

1. Een lijst met haalbare alternatieven
2. Een lijst met selectiecriteria, dit zijn criteria die voor de keuze belangrijk zijn.
3. Een beoordeling van de alternatieven op basis van de afzonderlijke alternatieven.
4. Een weging van de criteria die het relatieve belang ten opzichte van elkaar weergeven.



3.4.8 Control

De bovengenoemde stappen komen samen in de control. In dit onderdeel wordt het Systems Engineeringsproces beheerd. De stappen die doorlopen worden brengen het systeem op een steeds lager niveau tot voldoende detail in het ontwerp is bereikt om tot realisatie over te gaan. Om dit weer te geven worden verschillende decomposities gebruikt. In de functionele analyse wordt de functieboom (*Functional Breakdown Structure(FBS)*) ontwikkeld, gedurende het ontwerp de objectenboom(*System Breakdown Structure(SBS)*) en om het werk te verdelen wordt er tevens gewerkt met een activiteitenboom(*Work Breakdown Structure(WBS)*) en een organisatieboom(*Organisational Breakdown Structure(OBS)*). Deze structuren worden gebruikt om controle te houden over het proces en het werk te verdelen. Het totale proces van control wordt in IEEE1220 als volgt weergegeven:



Figuur 19: Controlproces (afkomstig uit IEEE1220)



3.5 Systems Engineering in de Lucht- & Ruimtevaartsector

In de lucht- en ruimtevaartsector wordt Systems Engineering al langer toegepast. Om te kunnen leren van andere sectoren zal een interpretatie van de verschillen noodzakelijk zijn. Activiteiten zoals ze plaatsvinden in de Lucht-en Ruimtevaartsector(L&R)zijn niet direct toepasbaar op of één-op-één vergelijkbaar met de bouwsector. In het rapport "Learning across Business Sectors"(2004) wordt een vergelijking gemaakt tussen de sectoren. In dit rapport worden zowel overeenkomsten gevonden als sterke verschillen. Toch kan de ervaring met Systems Engineering in de L&R van waarde zijn voor de bouwsector. Voornamelijk het vastleggen van keuzes en het traceerbaar maken ervan vindt in de L&R explicieter plaats dan in de bouwsector. Maar misschien wel het belangrijkste verschil van de bouwsector met de ruimtevaart sector is de beperkte aanwezigheid van externe stakeholders in de ruimtevaart. In de bouwsector moet met velen externe stakeholders rekening worden gehouden, daar waar dat er in de ruimtevaart maar enkele of één zijn.

Verschillen tussen de Lucht-en Ruimtevaart en bouwsector	
Lucht- en Ruimtevaartsector	Bouwsector
Veel vertrouwen in de sector	Weinig vertrouwen in de sector
Centraal georganiseerd	Versplinterd
Weinig verschillende opdrachtgevers	Veel verschillende opdrachtgevers
Hoge technologische kennis	Lage technologische kennis
Hoge drempel toe te treden tot de markt	Lage drempel om tot de markt toe te treden
Veel tijd per project	Beperkte tijd per project
Vaste locatie	Wisselende locaties
Sterke onderlinge afhankelijkheid	Grote zelfstandigheid
Wereldwijd georganiseerd	Vooral lokale context

Vergelijkingen tussen de bouw en de ruimtevaartsector zijn vooral relevant omdat ze zo verschillend zijn. De bouwnijverheid is versplinterd en er is voldoende concurrentie. In tegenstelling tot de ruimtevaartsector die wordt gevormd door een klein aantal grote firma's. De leveranciers in de L&R zijn gespecialiseerder dan die in de bouw, met een hoger niveau van technologische intensiteit.

In tegenstelling tot de L&R vinden projecten in de bouw vaak op wisselende locaties plaats, daar waar in de L&R in een vaste omgeving wordt gewerkt. Het binnenhalen van projecten in te bouw vindt vaak plaats op basis van kostenefficiëntie in plaats van op basis van innovatie en technologische deskundigheid. Deze reductie van kosten worden vaak behaald door het uitknijpen van de onderaannemers. Dit in vergelijking tot de L&R waar waarde wordt gecreëerd door te innoveren. Een streven waar de bouw op den duur ook naar toe wil.

De L&R heeft tevens een meer geïntegreerde organisatie. In de bouw wordt nog te vaak gedacht vanuit het eigen perspectief. Bij grote projectorganisatie, waarin verschillende partijen samenwerken, heerst nog te vaak het zogenaamde "over the wall syndrome", waarbij problemen bij elkaar worden gezocht en wordt verantwoordelijkheden zo veel mogelijk worden beperkt.

Deze versplinterde organisatie staat innovatie in de weg. Risico's wordt vaak vermeden en men is huiverig om projectoverstijgende investeringen te doen om innovatie te stimuleren.

Systems Engineering in de L&R richt zich voornamelijk op het optimaliseren van het bestaande systeem. In veel gevallen is het uiteindelijke doel scherp omschreven en is de objectenboom al bekend. De verschillende onderdelen van de ontwerporganisatie gaan aan de slag met een klein element van het totale systeem. Voor dit element worden verschillende ontwerpen gemaakt, die allemaal aan de specificaties voldoen. Deze concepten worden onderling met trade-offs afgewogen. Zo wordt met elk geoptimaliseerd onderdeel een nieuw systeem gebouwd. De bouw kan voornamelijk leren het expliciet vastleggen van de keuzes. Daar waar in de bouw veelal op basis van ervaring en inschatting keuzes worden gemaakt, ligt er in de L&R een gedegen proces aan ten grondslag.



Alternatieven worden doorgerekend op betrouwbaarheid, kosten, waarden en duurzaamheid. Daarnaast worden de concepten getoetst aan de eisen, randvoorwaarden, uitgangspunten en wensen. In de bouwsector wordt dit onderscheid vaak niet gemaakt. Daarbij moeten worden opgemerkt dat de L&R zich makkelijker laat modelleren dan een project in de bouw. Een vliegtuig is immers makkelijker in onderdelen te knippen dan een groot infrastructureel project.

Daarnaast moet rekening worden gehouden met het tijdsaspect, in de bouw is deze vaak beperkt en wordt al met de uitvoering begonnen voordat het ontwerp volledig is afgerond. In de L&R staat betrouwbaarheid voorop en is tijd ondergeschikt. Bij een juiste toepassing van Systems Engineering zou het traject dat vooraf gaat aan de uitvoering meer tijd in beslag nemen. Dit wordt echter weer terugverdiend in de uitvoering. De ervaring leert namelijk dat veel bouwprojecten tijdens de uitvoering vertraging oplopen door onjuiste afstemming van het ontwerp of de fasering.

Toch kent de sector ook overeenkomsten met de bouw, althans de doelen komen vaak overeen. De L&R opereert op een markt, waar na in gebruik name van het product geen of nauwelijks herstel van optredende fouten mogelijk is. Dat betekent, dat er een grote mate van waarschijnlijkheid moet zijn, dat het afgeleverde product correct werkt. Daarnaast zijn de producten complex, en dienen zij aan zware eisen te voldoen; de kans op fouten in het ontwerp en de verificatie daarvan neemt daardoor toe. Herstel daarvan kost veel tijd, en dus geld.

Daarnaast zijn producten vaak enkelstuks, soms kleine series. Dit komt overeen met de situatie in de bouw waar projecten vaak mede ingegeven door de verschillende locaties slechts eenmaal worden uitgevoerd.

Ook in de samenstelling van de projectteams zijn overeenkomsten te vinden. Door de complexiteit en vaak hoge kosten van het product worden de meeste projecten uitgevoerd door een internationaal team van bedrijven om de benodigde expertise en fondsen te verkrijgen. De betrokkenheid van veel mensen, disciplines en bedrijven in het ontwerp en ontwikkelingstraject stelt specifieke eisen aan organisatie en werkwijze. Daarbij komt dat de klant en/of gebruiker vaak niet precies weet wat hij wil; zijn visie is sterk toekomst gericht, vaak slechts gebaseerd op een idee en gaat uit van de best beschikbare technologie. Hierdoor wordt ook in de L&R deels ontworpen in een lokale context, met het totale systeem als achtergrond.

Belangrijke aspecten die uit de L&R in de bouwsector van belang kunnen zijn:

Value Engineering in trade-off: de verhouding kosten-waarde speelt een belangrijke rol in SE in de L&R. De NASA verwoordt dit op deze manier:

The System Engineer's Dilemma

At each cost-effective solution:

- To reduce cost at constant risk, performance must be reduced.
- To reduce risk at constant cost, performance must be reduced.
- To reduce cost at constant performance, higher risks must be accepted.
- To reduce risk at constant performance, higher costs must be accepted.

In this context, time in the schedule is often a critical resource, so that *schedule* behaves like a kind of cost.

Figuur 20: Cost-effective(SE-handbook NASA)



Doorrekenen van alternatieven: varianten worden afgewogen op basis van traceerbare berekeningen in plaats van op basis van ervaring en inschatting van het projectteam.

Standaarden: In de L&R zijn sectorbreed standaarden beschikbaar voor het toepassen van Systems Engineering. Met name op het gebied van terminologie is het van belang dat de opdrachtgever en opdrachtnemer eenzelfde taal spreken.

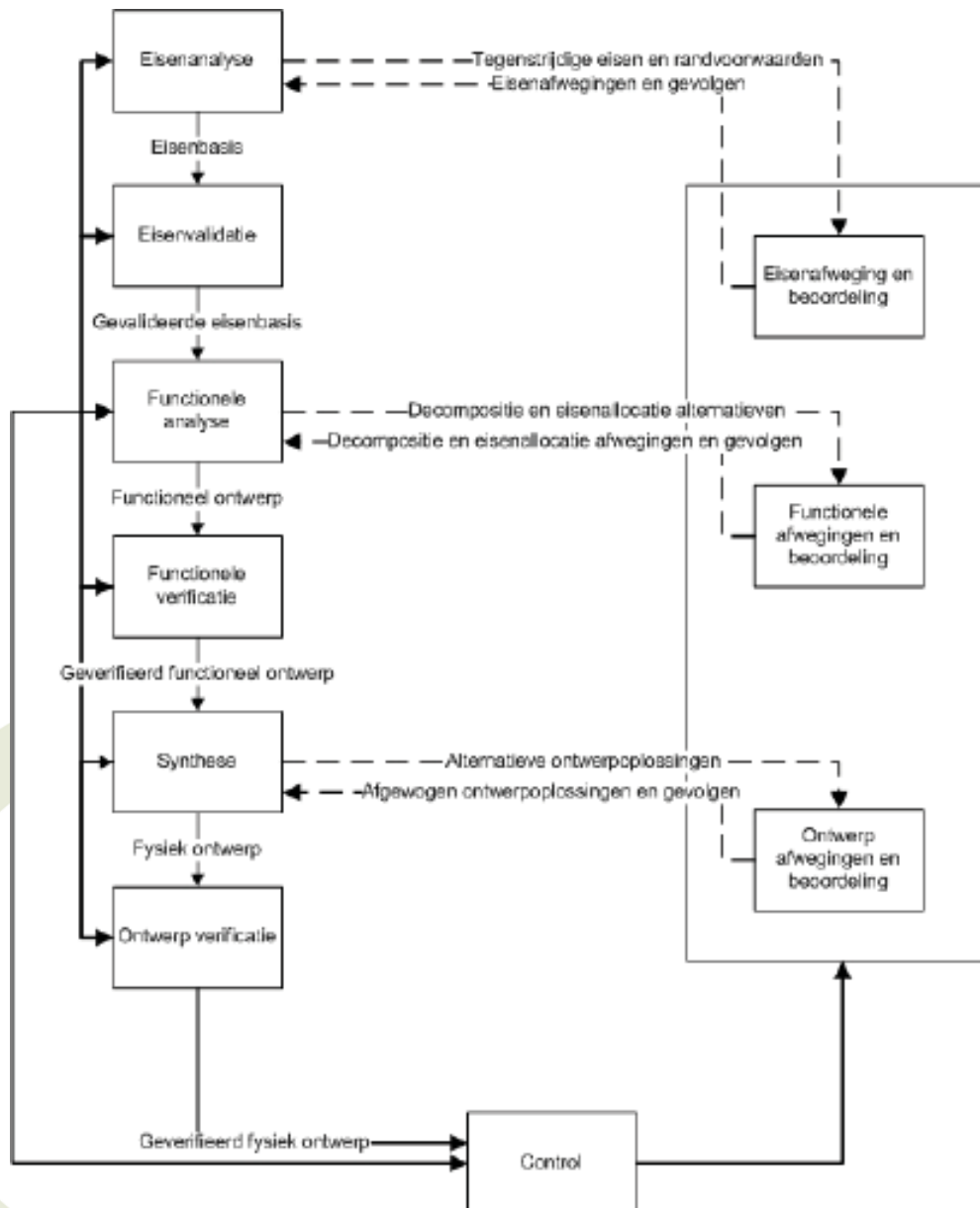
Life-Cycle benadering: afwegingen worden gemaakt op basis van de volledige levenscyclus. Daar waar in de bouwsector nog vaak op prijs van de realisatie wordt gefocust worden keuzes in de I&R gemaakt op basis van de gevolgen voor de totale cyclus.

3.6 Deelconclusie

Dit hoofdstuk tracht antwoord te geven op deelvraag I-b:

I-b Wat is de algemene theorie van Systems Engineering zoals die is ontwikkeld door de industrie en Lucht- en Ruimtevaartsector(beschrijvend)?

In de vorige paragrafen is deze theorie uitgebreid omschreven en geïllustreerd. Het belangrijkste deel van de theorie wordt in onderstaande figuur samengevat. De stappen in deze figuur worden continu herhaald om voldoende detailniveau te bereiken om tot de uitvoering over te gaan. Deze stappen om het systeem te detailleren vormen samen het ontwerpproces.



Figuur 21: Systems Engineeringsproces (bewerking van IEEE1220)

Deze processen zorgen in combinatie voor een uitwerking van de eisenboom, functieboom en objectenboom. Door het structureel uitvoeren van deze processen wordt de traceerbaarheid en de transparantie van het project bevorderd. Wanneer er in de uitvoering van het project problemen ontstaan kan worden getraceerd door welke keuzes in het proces een afwijking is ontstaan. De kernpunten van alle processen zijn in onderstaande figuur samengevat en geven antwoord op onderzoeksvraag I-b.

Karakteristieken	
Eisenanalyse	<p>De eisenanalyse heeft tot doel te bepalen wat het systeem moet kunnen presteren, hoe goed ze dat moeten doen in kwantitatieve en meetbare termen, de context waarin het systeem zich bevindt en de beperkingen die ontwerp oplossingen beïnvloeden.</p> <p>In de eisenanalyse worden stakeholderswensen gedefinieerd.</p> <p>In de eisenanalyse worden eisen en randvoorwaarden vanuit de bedrijfsomgeving gedefinieerd.</p> <p>In de eisenanalyse worden externe randvoorwaarden gedefinieerd.</p> <p>De eisenanalyse wordt op elk niveau van decompositie uitgevoerd.</p>
Eisenvalidatie	<p>De eisenvalidatie heeft tot doel te controleren of er geen tegenstrijdigheden of omissies in de eisenbasis zitten.</p> <p>De eisen en randvoorwaarden uit de eisenanalyse vanuit de stakeholders, bedrijfsomgeving en externe omgeving worden vergeleken en beoordeeld op tegenstrijdigheden en omissies.</p> <p>Bij ontstaan van tegenstrijdigheden en omissies wordt de eisenanalyse herhaalt.</p>
Functioneel ontwerp	<p>Het functioneel ontwerp heeft tot doel de eisen verder te detailleren en het systeem te decomponeren tot functies die door deelobjecten moeten worden vervuld.</p> <p>De hoofdfuncties worden gedecomposeerd in samenstellingen die samen de hoofdfunctie kunnen vervullen.</p> <p>Hiervoor worden de relaties bepaald, de werking van de hoofdfunctie en de prestatie-eisen gealloceerd.</p>
Functionele verificatie	<p>Het doel van de functionele verificatie is het functioneel ontwerp te beoordelen op volledigheid in het vervullen van de gevalideerde eisenbasis.</p> <p>De traceerbaarheid naar het systeem van alle eisen in de eisenbasis in het functioneel ontwerp wordt gecontroleerd.</p> <p>De traceerbaarheid van het systeemniveau van alle eisen in de eisenbasis wordt gecontroleerd met het vastgestelde functioneel ontwerp.</p> <p>De traceerbaarheid van alle randvoorwaarden vanuit de verschillende omgevingen wordt gecontroleerd met het functioneel ontwerp.</p>
Synthese	<p>De synthese heeft tot doel verschillende ontwerp oplossingen te definiëren en subsystemen te identificeren die voldoen aan het geverifieerd functioneel ontwerp.</p> <p>De functies worden gegroepeerd en gealloceerd.</p> <p>Er worden ontwerp oplossingen gegenereerd die voldoen aan het functioneel ontwerp.</p> <p>Er wordt rekening gehouden met mogelijkheid tot standaardisering.</p> <p>Er wordt rekening gehouden met oplossingen die binnen de bedrijfsomgeving direct voor handen zijn.</p> <p>Er wordt rekening gehouden met oplossingen die in te kopen zijn of kunnen worden ontworpen.</p>
Ontwerpverificatie	<p>Het doel van de ontwerpverificatie is te controleren of het ontwerp voldoet aan de gevalideerde eisenbasis en of de eisen, inclusief afgeleide eisen, gesteld aan het ontwerp op het laagste niveau traceerbaar zijn naar het geverifieerd functioneel ontwerp.</p> <p>In de ontwerpverificatie worden het fysiek ontwerp getoetst aan dezelfde zaken als in de functionele verificatie.</p> <p>De verificatieprocedure wordt vastgesteld.</p> <p>De verificatiemethode wordt vastgesteld.</p> <p>Bij ontstaan van conflicten en omissies wordt de synthese en systeem analyse herhaald.</p>



Karakteristieken	
Ondersteunende processen	
Control	<p>Het controlproces heeft tot doel het Systems Engineeringsproces te managen en te documenteren.</p> <p>Als belangrijkste zaken van het controlproces worden omschreven:</p> <ul style="list-style-type: none"> Datamanagement Risicomangement Interfacemanagement Configuratiemanagement
System analyse	<p>De systeemanalyse heeft meerdere doelen die hier worden gesplitst:</p> <ul style="list-style-type: none"> Identificeren van conflicten gedurende de eisenanalyse. Decomponeren van functionele eisen. Alloceren functionele eisen gedurende het functioneel ontwerp. Beoordelen van de effectiviteit van de ontwerp oplossingen. Selecteren van de beste ontwerp oplossing. Beoordelen van de effectiviteit van het systeem. Het managen van risicofactoren gedurende het hele proces.

Tabel 1: Kernpunten Systems Engineeringsproces

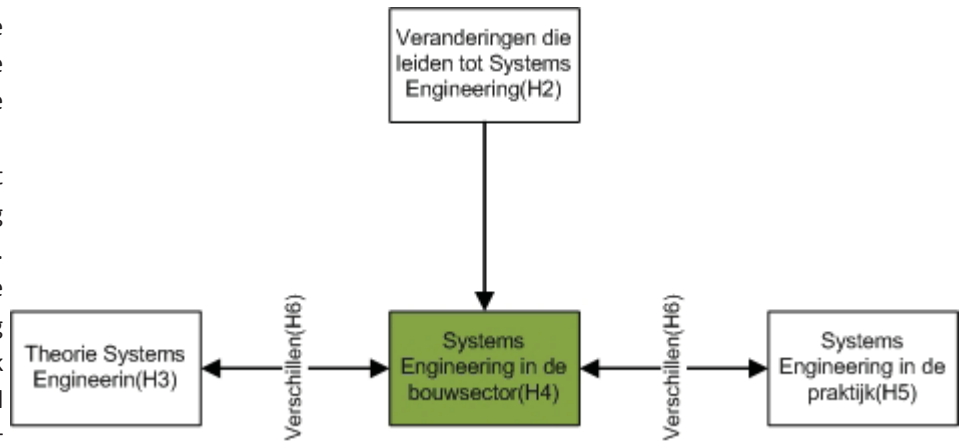
Na het ontwerp worden de objecten in de SBS uitgevoerd door de activiteiten, die worden vastgelegd in de Work Breakdown Structure(WBS). De activiteiten in de WBS hebben een bekende in - en output en op die manier kan goed worden gestuurd op planning, risico's, begroting en prestatie van het systeem.



4 SE in de bouwsector

In dit hoofdstuk wordt de theorie weergegeven zoals die in de bouwsector en specifiek bij de BAM is overgenomen.

Door Prorail en Rijkswaterstaat (RWS) is Systems Engineering geïntroduceerd in de bouwsector. Om de markt te informeren is de leidraad Systems Engineering gepubliceerd. In de praktijk leidt SE in de bouw tot veel administratief werk. Het wordt veelal wel gezien als



Figuur 22: Opbouw van hoofdstukken

een meerwaarde voor het proces, maar dit wordt nog niet als zodanig ervaren. De BAM heeft in een verdieping op de leidraad SE van ProRail en RWS tevens een richtlijn gepubliceerd om de werkmatschappijen een handvat te bieden. Hier zal worden ingegaan op de problematiek zoals die door de bouwsector wordt ervaren rond de toepassing van Systems Engineering. Voornamelijk rond het moment van overdracht van het project, de ontwerprijheid en de controledrang van de opdrachtgevers. Het hoofdstuk zal antwoord geven op deelvraag II-a:

II-a Op welke manier wordt Systems Engineering op dit moment toegepast in de bouwsector en specifiek bij de BAM(beschrijvend)?

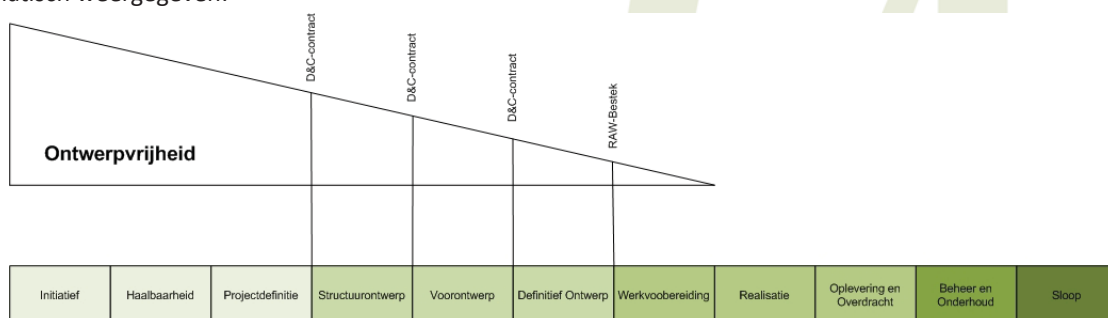
4.1 Systems Engineering in de bouwsector

In de leidraad wordt de reden van de introductie van Systems Engineering door de twee grootste opdrachtgevers in de Grond-Weg- en Waterbouwsector als volgt omschreven:

“De aanleiding voor de introductie van deze werkwijze is de politieke en maatschappelijke vraag om een terugtrekkende overheid en de behoefte om de marktsector meer, en in een eerdere fase, te betrekken bij ontwerp, bouw en beheer van de infrastructuur in Nederland. Een andere aanleiding is de roep om transparantie en betere beheersing van processen. Dat vraagt om goede communicatie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer, waarbij zij keuzes en uitwerkingen van technische oplossingen op een heldere wijze verifiëren en valideren.”

- Leidraad SE, RWS/ProRail

In de praktijk wordt het opleggen van Systems Engineering in de bouwsector vooral gezien als een controlemiddel van de opdrachtgever. Er bestaat onvoldoende vertrouwen tussen de vragende en aanbiedende partijen. Daarnaast zijn ProRail en RWS publieke partijen, die een verantwoordelijkheid hebben richting de maatschappij. Hun taak is om de spoor-, weg- en waterinfrastructuur in Nederland op peil te houden zodanig dat sprake is van beschikbare, betrouwbare, duurzame en veilige infrastructuur. De Rijksoverheid is de belangrijkste financier van beide partijen en verlangt daarbij dat er sprake is van een adequaat en efficiënt proces van realisatie. (Bron: Leidraad SE, RWS/ProRail) Om die reden moeten beide partijen kunnen aantonen dat ze rechtmatig, doelmatig en doeltreffend te werk zijn gegaan. Net als bij een traditionele aanbesteding is er bij een D&C-contract een overdrachtsmoment. Dit moment is afhankelijk van de keuze van de opdrachtgever. Echter hoe later de overdracht, hoe kleiner de ontwerprijheid voor de opdrachtnemer. In onderstaande figuur is deze ontwerprijheid schematisch weergegeven:



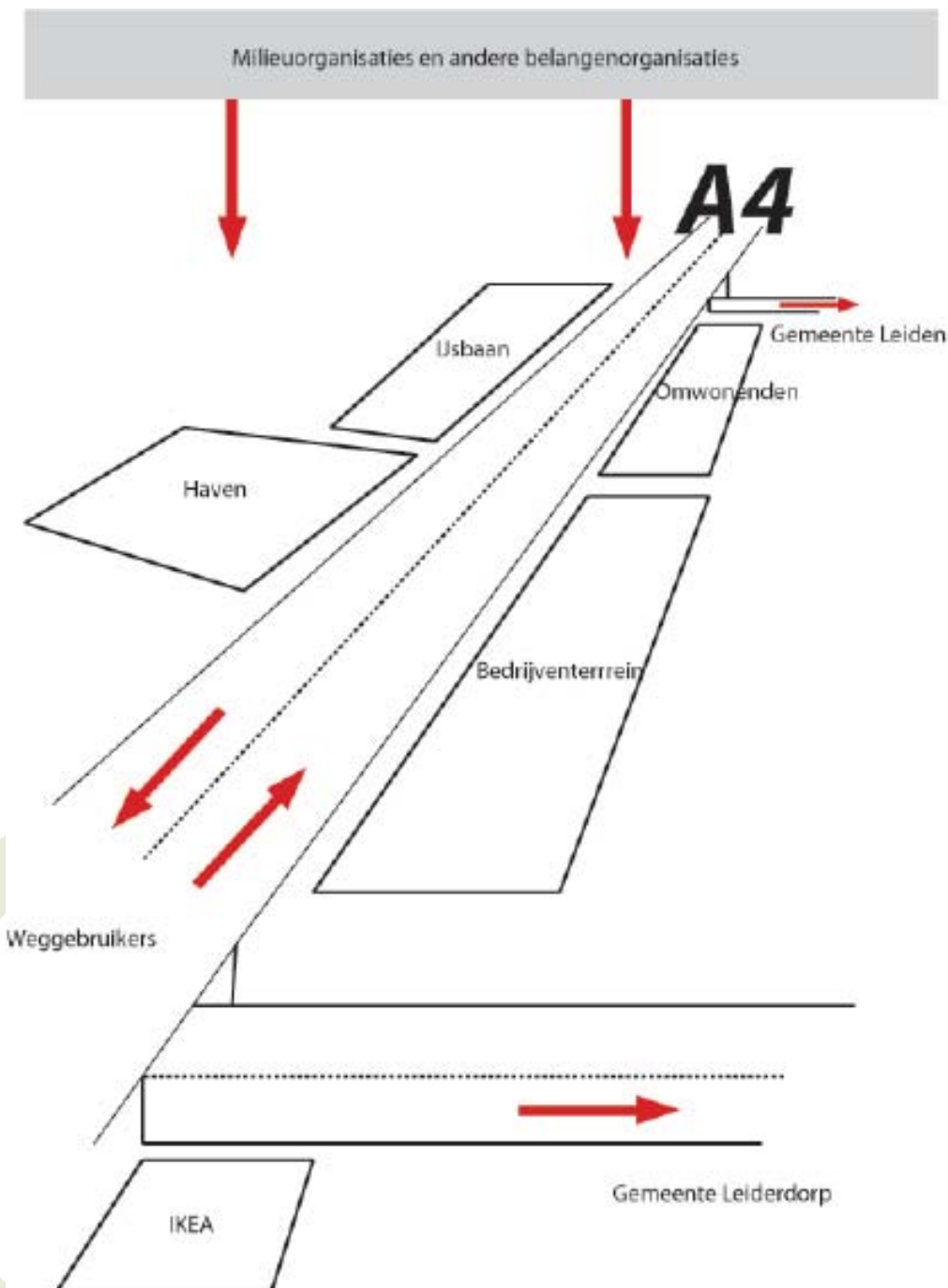
Figuur 23: Ontwerprijheid



Er zal worden ingegaan op het Systems Engineeringsproces zoals dat in het voorgaande hoofdstuk is omschreven. Daarvoor wordt beschreven hoe met dit proces wordt omgegaan bij infrastructurele projecten. Dit proces wordt beschreven vanaf de start van het project en beslaat dus zowel het opdrachtgeversgedeelte als het opdrachtnemersgedeelte. Hierna zal worden ingegaan op de overdracht van de vraag aan de marktpartijen.

4.1.1 Eisenanalyse

In de eisenanalyse worden de actoren en belangen geïnventariseerd om tot functionele en prestatie-eisen te komen. In de bouwsector wordt deze stap in eerste instantie door de opdrachtgever uitgevoerd. Het heeft tot doel het systeem op elk niveau te specificeren. Alle eisen zouden traceerbaar moeten zijn naar een bron. Deze bronnen kunnen bijvoorbeeld stakeholders zijn, zoals omwonenden en weggebruikers, maar kunnen ook indirect van stakeholders afkomstig zijn, zoals regelgeving. De eisen die door de opdrachtgever in de vraagspecificatie worden geplaatst missen vaak deze traceerbaarheid. Aan de hand van onderstaande situatie zal een toelichting worden gegeven op de eisenanalyse, zoals die zou moeten plaatsvinden om tot een structurele opbouw van de vraagspecificatie te komen:



Figuur 24: Schematisatie A4-Leiderdorp



In dit voorbeeld zijn verschillende stakeholders geïdentificeerd. De essentie van de eisenanalyse is de belangen van alle stakeholders definiëren en indien tegenstrijdig met elkaar afwegen.

Zo kan het voorkomen dat de weggebruikers een betere doorstroming willen, maar de milieuorganisatie geen toename wil van de CO₂ uitstoot. Dit zijn twee wensen die in de praktijk vaak tegenstrijdig zijn, omdat een betere doorstroming een aanzuigende werking heeft. In de eisenanalyse worden beide eisen met elkaar afgewogen en kan er waarde aan beide functionele eisen worden toegekend, het worden dan prestatie-eisen. De eis vanuit de weggebruiker kan dan bijvoorbeeld worden: "Een toename van de wegcapaciteit van 6000 pae/u". Van de milieuorganisatie zou het kunnen worden: "De CO₂-uitstoot mag toenemen indien wordt aangetoond dat deze elders wordt gecompenseerd".

Daarnaast moet worden overwogen of de belangen worden meegenomen. Het kan voorkomen dat het opnemen van een eis tot een dusdanige toename van de kosten zou leiden, dat het niet rendabel is de het belang als eis op te nemen.

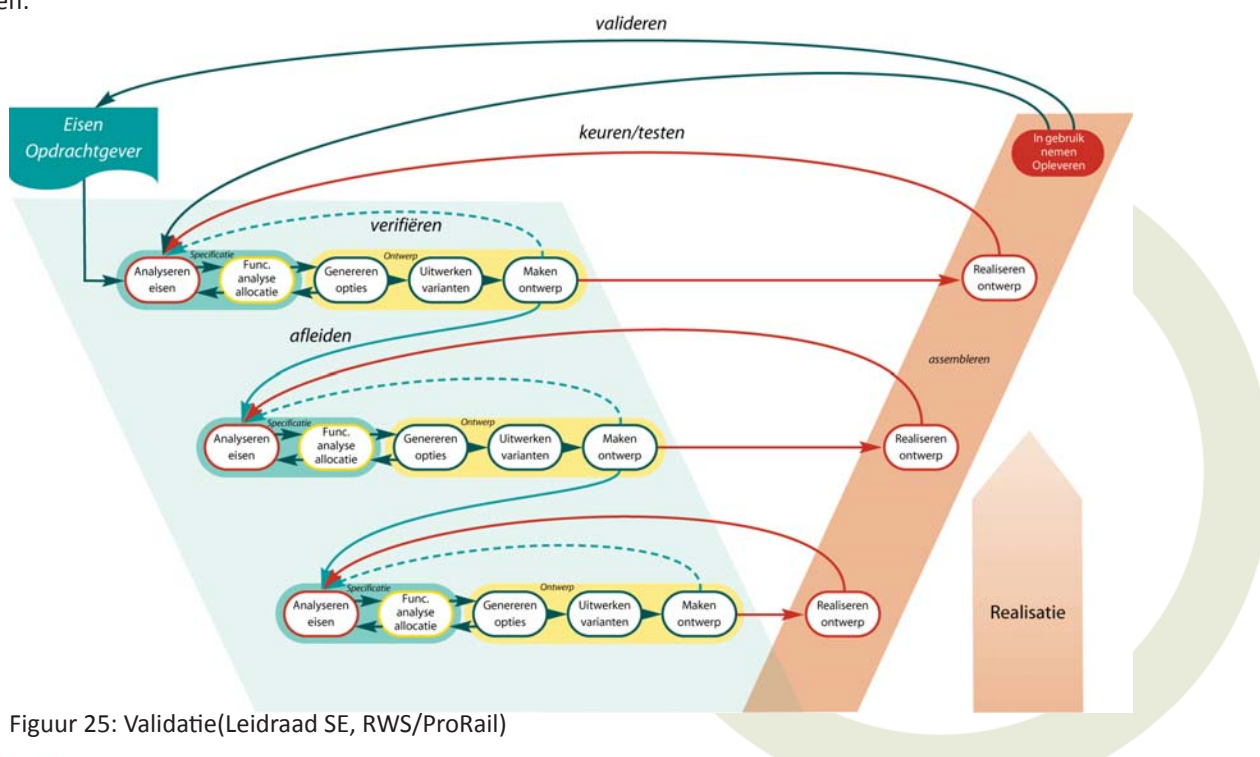
Katasonov(2008) omschrijft de volgende risico's van een onvoldoende uitgevoerde eisenanalyse:

- *Insufficient user involvement*, de gebruikers zijn onvoldoende bij de ontwikkeling van het systeem betrokken, wat kan leiden tot een verkeerd product.
- *Overlooked user classes*, niet alle gebruikers zijn geïdentificeerd wat kan leiden tot ontevreden gebruikers.
- *Minimal specifications*, er wordt zuinig gespecificeerd, hierdoor kunnen belangrijke specificaties worden vergeten.
- *Incompletely defined requirements*, de eisen zijn te summier geformuleerd, hierdoor is het onmogelijk om een accurate begroting en planning te maken en om eisen te traceren.
- *Creeping requirements*, eisen worden gewijzigd waardoor de productkwaliteit niet het gewenst niveau behaald.
- *Ambiguous requirements*, er worden dubbelzinnige eisen opgenomen, hierdoor moet vaak extra werk worden gedaan.
- *Gold-plating*, er worden te veel eisen opgenomen, waardoor het systeem onnodige specificaties meekrijgt.

In deze bouwsector zijn veel voorbeelden te vinden van het onjuist specificeren van de oplossing waardoor bovenstaande risico's optreden. De eisenanalyse is de start van het project en daarmee direct verantwoordelijk voor het vervolg van het project.

4.1.2 Validatie Eisenbasis

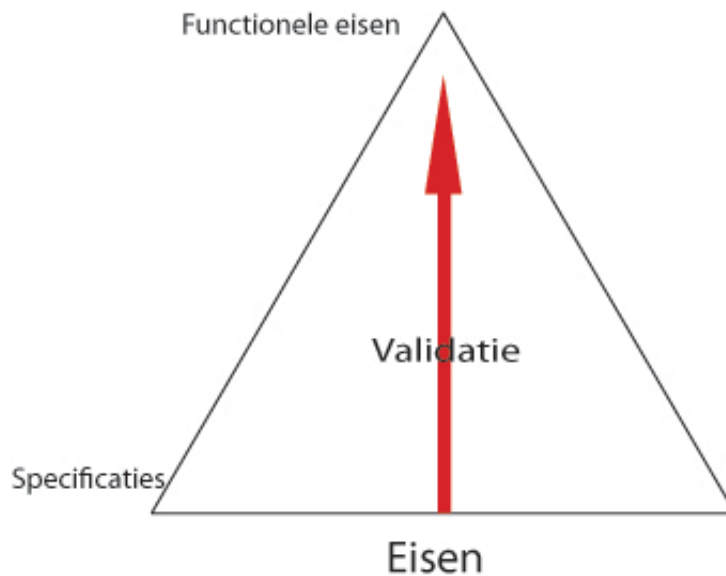
Validatie wordt over het algemeen niet gedaan in de bouwsector. Validatie zou op elk niveau moeten plaatsvinden. In de figuren die te vinden zijn in de interpretatie van de bouwsector wordt validatie geïllustreerd als het achteraf controleren of het gebouwde voldoet aan de wensen van de stakeholders. In onderstaand figuur is een dergelijk invulling van validatie te vinden:



Figuur 25: Validatie(Leidraad SE, RWS/ProRail)



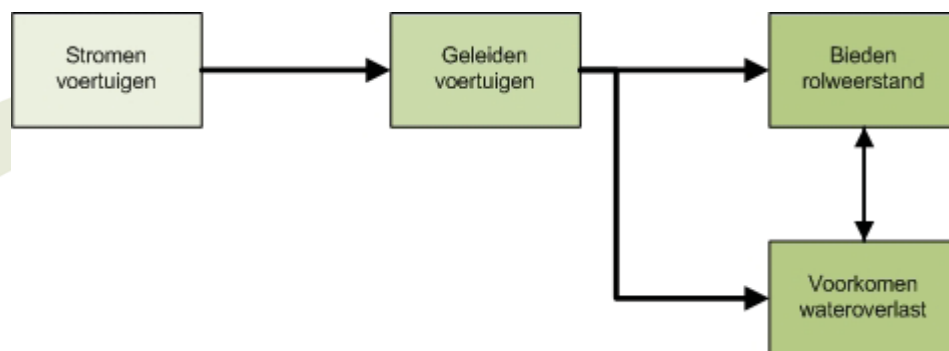
Deze weergave leidt tot verwarring en illustreert slechts een deel van het begrip validatie. Het achteraf controleren of is voldaan aan de gebruikerswensen is een manier die niet leidt tot een afname van de faalkosten. Om vóór de start van de integratie te controleren of in het ontwerp is voldaan aan de gebruikerswensen, wordt in de eisen-validatie gecontroleerd of de eisenbasis uit de eisenanalyse een juiste omzetting is van de stakeholders wensen. Door dit op elk niveau te doen kan worden gecontroleerd of op het laagste niveau nog wordt voldaan aan de wensen van de stakeholders. Dit wordt in de volgende figuur geïllustreerd:



Figuur 26: Validatie eisenbasis(bewerking van CROW)

4.1.3 Functionele analyse

In de functionele analyse worden de hoofdfuncties van het systeem omschreven in deelfuncties. Deze deelfuncties vormen de basis voor de synthese. Het ontwikkelen van de functieboom is van belang om te voorkomen dat al te snel wordt gedacht in oplossingen. De samenstelling van de functieboom is van belang om te voorkomen dat in het ontwerp een groot aantal raakvlakken ontstaat. De samenstellingen worden met elkaar afgewogen in de systeemanalyse en hebben tot doel subsystemen te definiëren die grotendeels onafhankelijk van elkaar te ontwerpen zijn. In de bouwsector wordt de functieboom wel opgesteld, maar over het algemeen niet direct gebruikt voor het genereren van oplossingen. Hiervoor wordt vaak gebruik gemaakt van de generieke functieboom die is opgesteld door de CROW. Deze boom is echter al volledig uitgewerkt en is geen onderdeel van een integraal ontwerpproces. Hieronder is een voorbeeld gegeven van subfuncties die onderdeel kunnen zijn van een afweging, maar onderdeel uitmaken van dezelfde hoofdfunctie:



Figuur 27: Deel functieboom

In dit voorbeeld wordt de rolweerstand bepaald deels bepaald door de dichtheid van het asfalt, dicht asfalt komt de waterafvoer niet ten goede, deze twee functies kunnen in prestatie-eisen verder worden omschreven. In de praktijk zijn deze eisen vastgelegd in regelgeving.

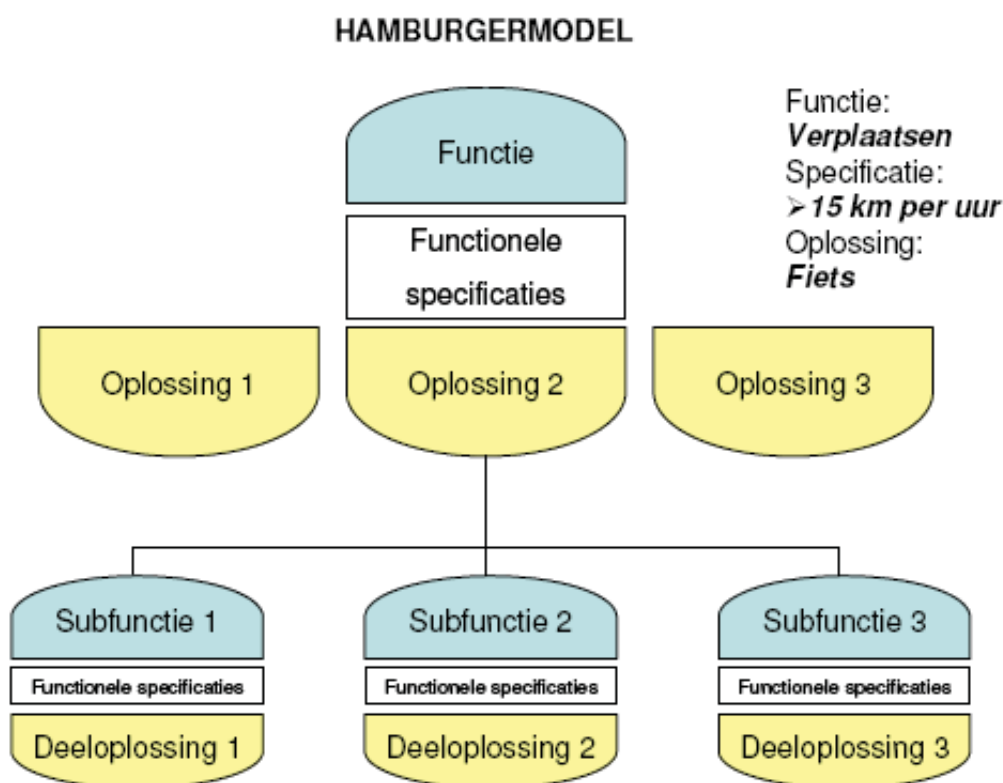


4.1.4 Verificatie functionele analyse

Om te voorkomen dat in de synthese op basis van de onjuiste functies wordt ontworpen is het nodig de functionele decompositie te verifiëren. In deze verificatie wordt bekeken of de functies voldoen aan de eisenbasis die is gevalideerd. In de bouwsector wordt de stap van het genereren van functies vaak los gezien van het ontwikkelen van de objectenboom en wordt dus direct geverifieerd naar de eisen vanuit de objecten. Verificatie wordt in de bouwsector gezien als het aantonen van de eisen van de opdrachtgever verificatie van de functionele decompositie zou in theorie door alle betrokkenen moeten worden gedaan wanneer naar een lager niveau wordt gegaan.

4.1.5 Synthese

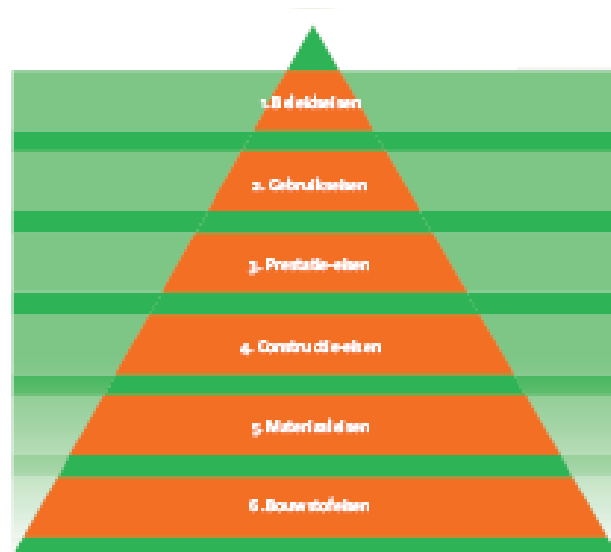
In de synthese wordt het fysieke ontwerp bepaald. Voor het functioneel ontwerp dat is bepaald in de functionele analyse worden verschillende alternatieven gegenereerd. Deze stap wordt vaak geïllustreerd door het Hamburgermodel. Dit model is in onderstaand figuur weergegeven:



Figuur 28: Hamburgermodel(Zaal, 2007)

Het genereren van oplossingen en een keuze maken voor de geschikte oplossing is een belangrijk onderdeel van Systems Engineering. Door gestructureerd het ontwerp op deze manier te detailleren kan voorkomen worden dat uiteindelijk niet het juiste is gebouwd. De decomposities van de functies en objecten worden op een lager niveau gebracht naarmate het ontwerp vordert. De objectenboom groeit dus mee met de detaillering van het ontwerp. De eisen volgen de niveau's die worden ontwikkeld. In de SE-wijzer van de BAM is dit als volgt weergegeven:

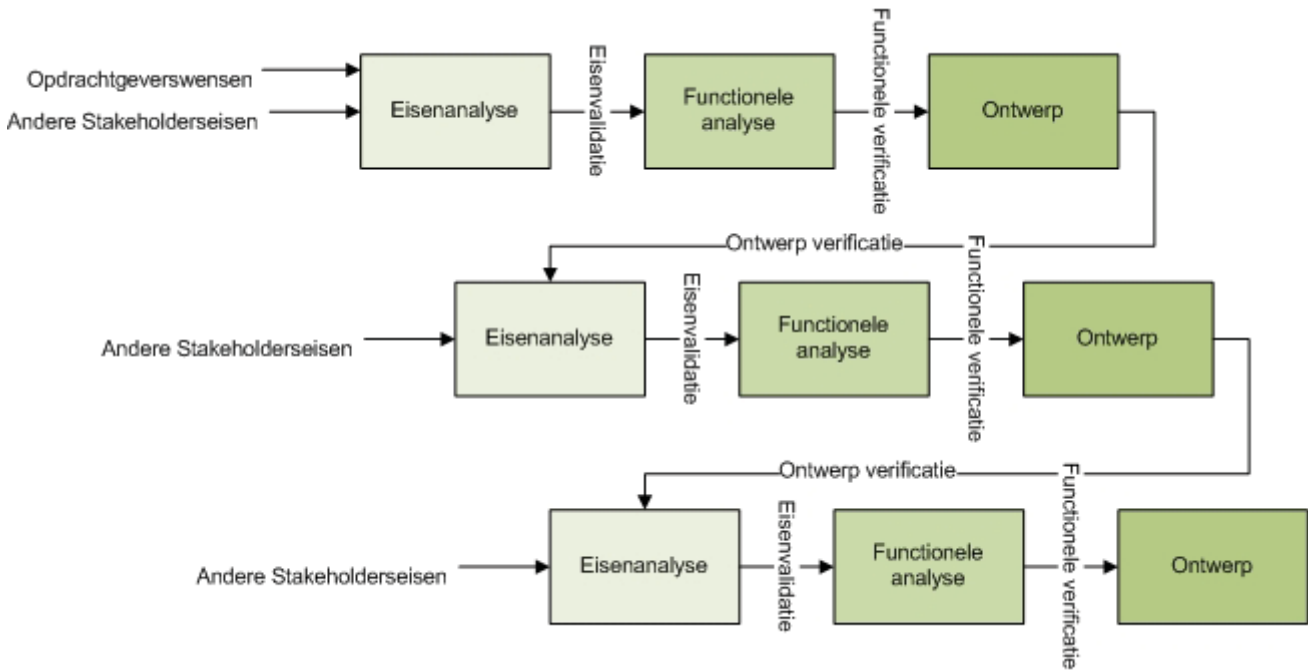
Het ontwerp groeit met de detaillering van de eisen, het uitvoeringsontwerp staat dan gelijk aan de bouwstofeisen. Vanaf dit niveau begint dan de integratie.



Figuur 29: Niveau eisen(BAM SE-wijzer)



Het ontwerp verloopt dan gestructureerd via de stappen die beschreven zijn in de voorgaande hoofdstukken. In onderstaand figuur zijn deze stappen grafisch weergegeven.

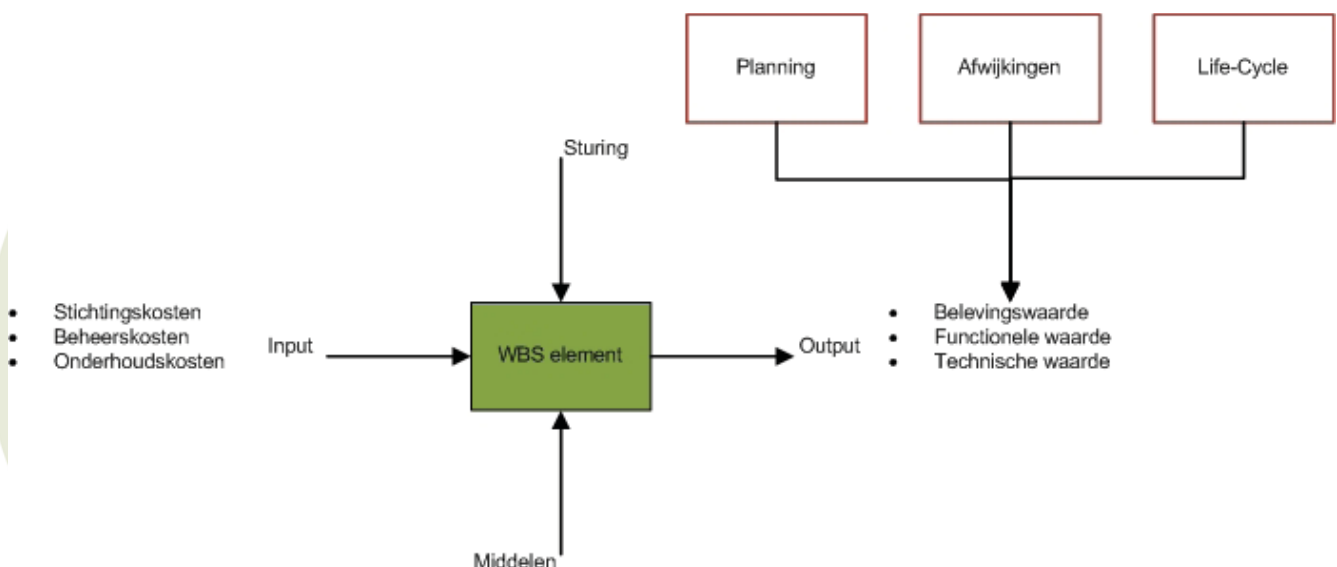


Figuur 30: Ontwerpproces(bewerking IEE1220(2005))

Hierdoor kan de Opdrachtnemer het ontwerp overnemen op het niveau waar de opdrachtgever is gestopt en vindt er een traceerbare overdracht plaats.

De decomposities leiden tevens tot verwarring. Kenmerkend voor de wegebouw is de gefaseerde aanleg van wegen. Elke weg wordt in wegvakken aangelegd, eisen gesteld aan een object worden dan éénmaal in het ontwerp geverifieerd, maar in de realisatiefase meerdere malen gemeten. Hierdoor wordt overwogen om de eisen direct te relateren aan de *Work Breakdown Structure*. De eisen komen dan meerdere keren terug in de verschillende werkpakketten die bij de wegvakken horen. Er zit hier echter geen "sufficient check" ingebouwd. Eisen waarvan wordt "vergeten" een relatie te leggen met het betreffende werkpakket zijn niet te traceren. Een direct gevolg van de ongestructureerde omgang met Systems Engineering.

De WBS is zeer geschikt voor het beheersen van het project. Van elk onderdeel in de WBS is de planning, de kosten en de risico's bekend. Door Systems Engineering als primair proces te zien waarin het projectmanagement is geïntegreerd kan op elk gewenst moment in het project worden gezien hoe het staat met de input en de output. Zoals hieronder weergegeven.

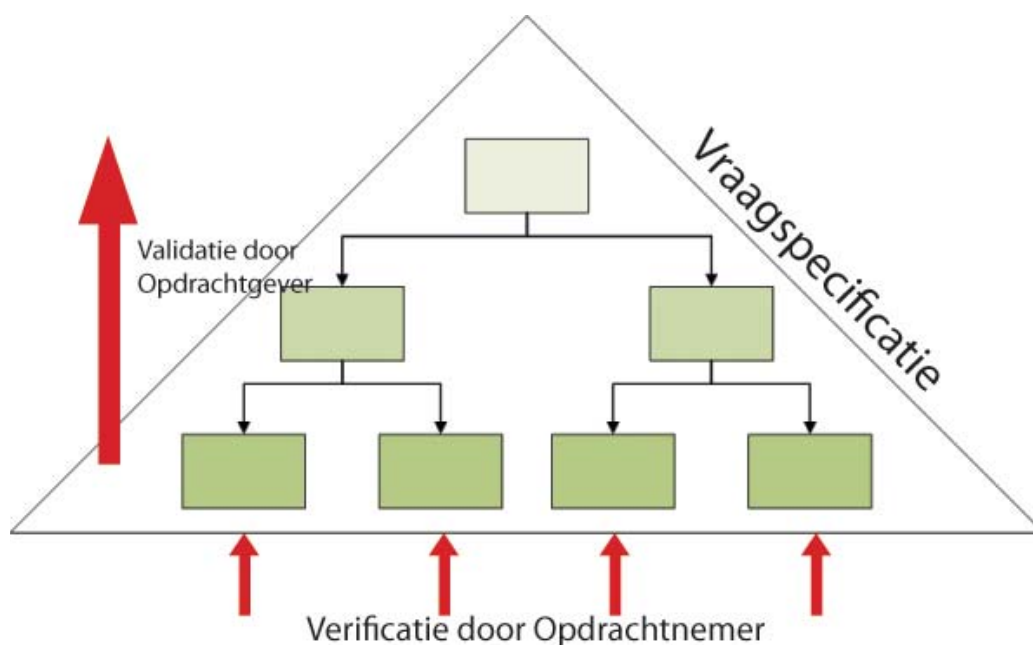


Figuur 31: WBS-element(bewerking van CT3061(2007))



4.1.6 Ontwerpverificatie

De verificatie van het ontwerp wordt in de bouwsector gezien als de belangrijkste stap van Systems Engineering. In deze stap wordt gekeken of het ontwerp op elk niveau voldoet aan de eisen die gesteld zijn aan dat niveau. Dit heeft vooral te maken met de mate van detaillering van de vraagspecificatie. De opdrachtgever werkt het ontwerp vaak al voor een groot deel uit en de eisen die hieruit voortkomen worden in de vraagspecificatie naar de opdrachtnemer gecommuniceerd. Deze eisen moeten worden meegenomen in het vervolgentwerp van de opdrachtnemer. Echter vaak is het zo dat er geen eisvalidatie is uitgevoerd over de vraagspecificatie. De opdrachtnemer heeft al een deel van de objectenboom uitgewerkt en zal dus op het laagste niveau eisen hebben moeten gevalideerd met de topeisen gesteld door de stakeholders. Deze validatie is geïllustreerd in figuur 32.



Figuur 32: Validatie eisen vraagspecificatie

De BAM hanteert voor de verificatie naast de verificatiemethoden die uit de theorie van SE te vinden zijn nog een aantal verificatiemethoden:

- Documentinspectie
- Referentie
- Onderliggende eisen

In de praktijk is een goede verificatie alleen mogelijk wanneer structureel gebruik gemaakt is van Systems Engineering gedurende het ontwerp. Nu is het vaak zo dat eisen van verschillende bronnen direct aan een object zijn toegekend waardoor de traceerbaarheid naar de directe stakeholder beperkt is.

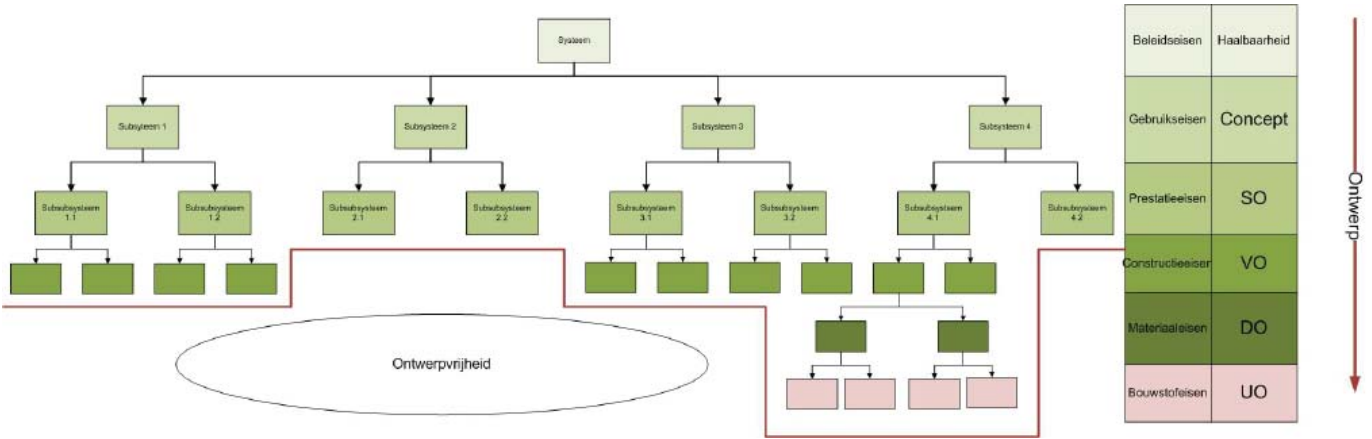
4.1.7 Systeemanalyse

De systeemanalyse is één van de belangrijkste onderdelen van Systems Engineering. In dit proces worden de afwegingen gemaakt, zowel over het opnemen van eisen, de functionele samenstellingen als over het ontwerp. Deze afwegingen bepalen de samenstelling van de uiteindelijke configuratie en zijn daarmee bepalend voor de kosten en waarden van het systeem.

Afwegingen in de bouwsector zijn vooral terug te vinden in het ontwerp. In deze fase worden zowel impliciet als expliciet afwegingen gemaakt. Zo staat het ook omschreven in de theorie zoals die ontwikkeld is door de bouwsector. Belangrijke afwegingen worden vastgelegd in een trade-off matrix. In de huidige situatie worden de meeste afwegingen impliciet gemaakt. Kennis wordt in de bouwsector onvoldoende vastgelegd en keuzes worden zodoende vaak gemaakt op basis van de eigen ervaring. Bij belangrijke afwegingen worden de ontwerpkeuzes wel vaak vastgelegd. Afwegingen over het opnemen van eisen en de functionele decompositie worden over het algemeen tevens impliciet gedaan.

4.1.8 Control

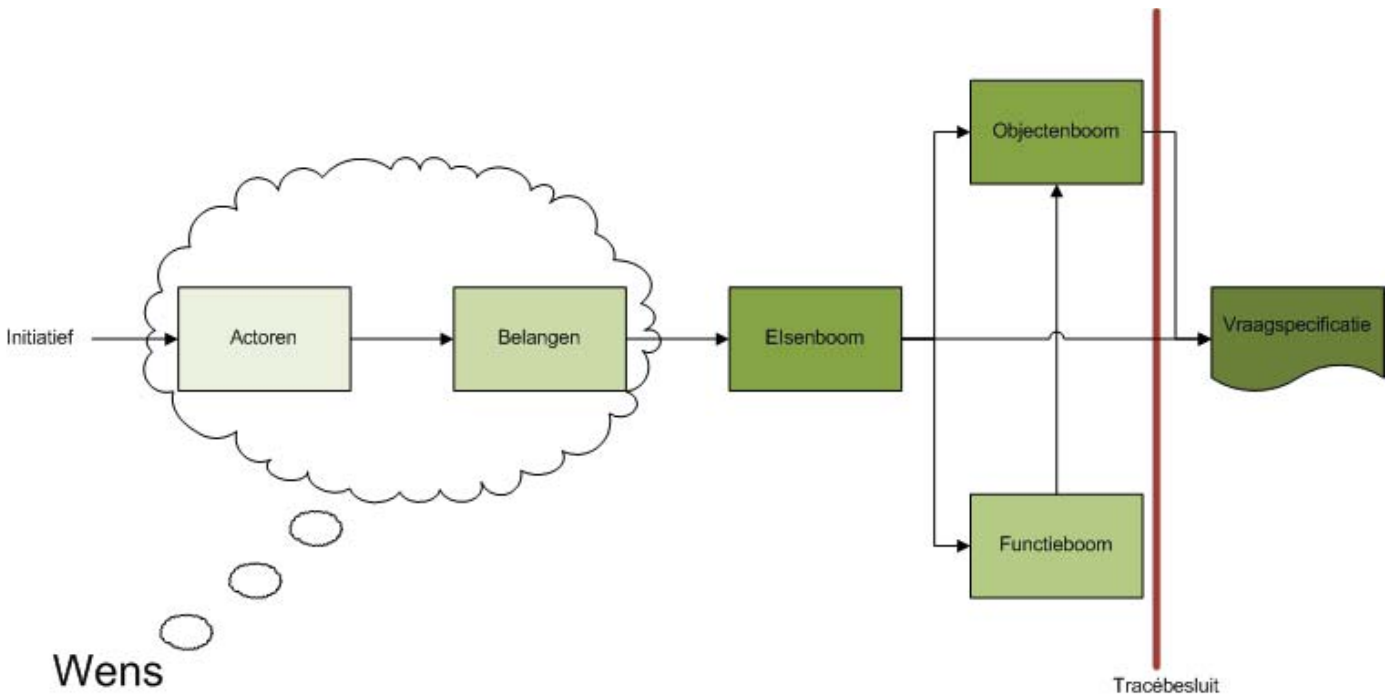
In dit proces wordt het totale Systems Engineering proces beheerst. Alle voorgaande stappen worden herhaald tot voldoende detailniveau is bereikt om tot integratie over te gaan. Om dit proces weer te geven worden er een aantal decomposities ontwikkeld. Hiervan is de functieboom al besproken, daarnaast bestaan er nog de objectenboom(SBS), de activiteitenboom(WBS) en de organisatieboom(OBS). Deze bomen zijn een primair gevolg van de keuzes die gemaakt zijn in de systeemanalyse en het doorlopen van de hierboven omschreven stappen. Met deze decomposities wordt het systeem beheerd. In de vraagspecificaties overheerst over het algemeen de objectenboom. Door de eisen in deze objectenboom te typeren kan ontwerpvrijheid worden gedefinieerd.



Figuur 33: Ontwerpvrijheid in objectenboom

4.2 Overdracht van de vraag

Bij de overdracht naar de marktpartijen wordt een vraagspecificatie opgesteld. In deze vraagspecificatie worden de eisen die door de opdrachtgever aan het systeem worden gesteld beschreven. In het meest ideale geval zijn deze eisen volledig functioneel omschreven en is er dus maximale ontwerpvrijheid voor de opdrachtnemer. In de praktijk echter gaat er voor de aanbesteding vaak een deel besluitvorming aan vooraf. Voor deze besluitvorming is het maken van een (voor)ontwerp vaak noodzakelijk. Hierdoor is een deel van het ontwerp al gedaan door de opdrachtgever. Het proces dat de opdrachtnemer in theorie doorloopt wordt weergegeven in onderstaande figuur:



Wens

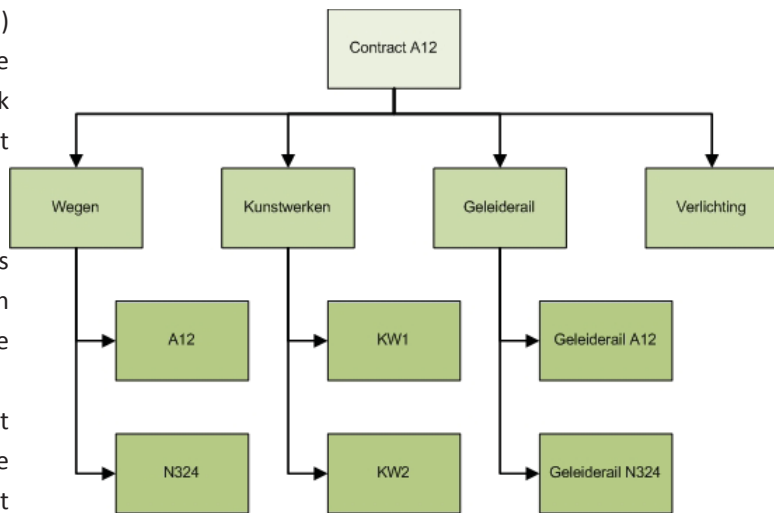
Figuur 34: Processchema opdrachtgever



De opdrachtgever maakt vaak een objectenboom(SBS) met daaraan gerelateerd de afgeleide eisen. De objectenboom die wordt gemaakt is echter vaak disciplinegericht opgezet, zoals in de figuur hiernaast getoond.

Deze objectenboom wordt door de disciplines als goed ervaren, omdat de objecten netjes gesplitst zijn naar discipline. Echter strookt deze opzet niet met de theorie van Systems Engineering.

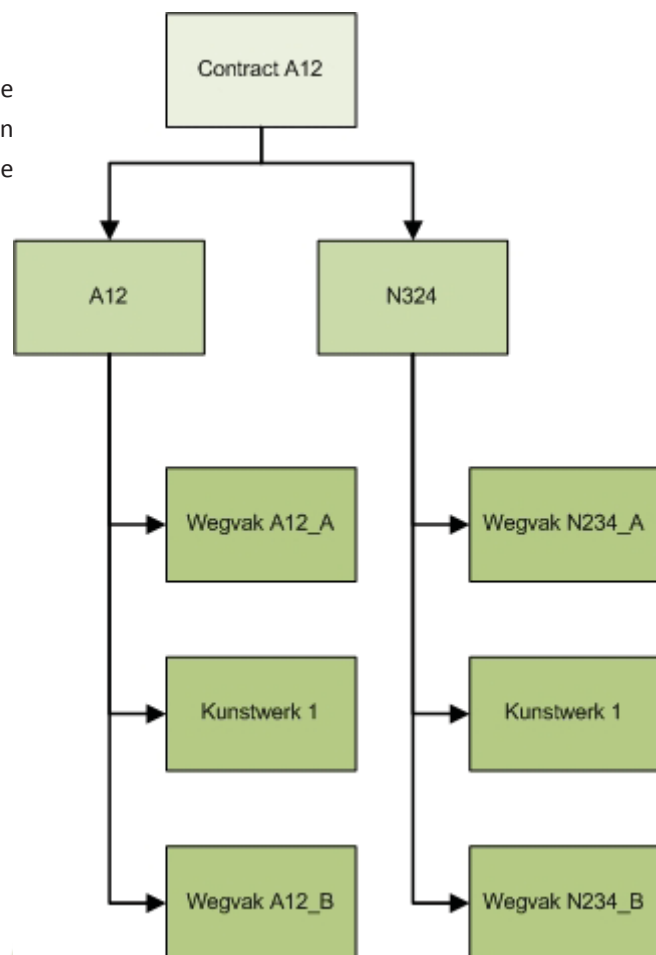
Volgens de theorie zou het immers zo moeten zijn dat de onderliggende objecten samen het bovenliggende (sub)systeem vormen. Dit gaat niet op voor het object "Kunstwerken", omdat twee kunstwerken



Figuur 35: Disciplinegerichte objectenboom

niet samen één kunstwerk maken. En de geleiderail van de A-weg onafhankelijk zijn van die van de secundaire wegen. Hierdoor wordt niet gekeken vanuit het oogpunt van het totale systeem en worden raakvlakken volgens het gebruikelijke raakvlakmanagement onderkend. In het geval van een juist objectenboom wordt de SBS samengesteld zoals getoond in onderstaand figuur.

Een probleem dat zich voordoet in de bouwsector is dat eisen die aan een object weg zijn gesteld in de uitvoering meerdere keren terugkomen in de verschillende wegvakken. Door de boom op de juiste manier op te zetten wordt dit voorkomen.



Figuur 36: Theoretische objectenboom



4.3 Systems Engineering bij de BAM

In de paragraaf hiervoor is het algemene Systems Engineeringsproces beschreven in de bouwsector. De BAM heeft in mei 2008 de SE-wijzer gepubliceerd om de werkmaatschappijen inzicht te geven in de theorie. Deze richtlijn zal worden vergeleken met de theorie zoals omschreven in hoofdstuk 3. Het totale doel wordt in de SE-wijzer als volgt omschreven:

- *Het bereiken van een eenduidige werkwijze voor SE binnen de organisatie van BAM Infra, zodat optimaal kan worden geprofiteerd van de voordelen van deze systematiek;*
- *Het bieden van een praktische (stap-voor-stap) handleiding, ondersteund met voorbeelden en modellen, voor diegenen die concreet met Systems Engineering te maken krijgen;*
- *Inzicht geven in de rolverdeling die past bij Systems Engineering, alsook in de veranderingen ten opzichte van de 'traditionele' werkwijze.*

- BAM SE-wijzer

4.3.1 Eisenanalyse

De eisenanalyse is een stap die meerdere malen wordt herhaald om tot een ontwerp te komen. Op elk niveau in het systeem wordt deze stap herhaald. De stakeholdersanalyse die onderdeel is van de eisenanalyse wordt in de SE-wijzer omschreven als een ander proces dat wordt gedaan door de opdrachtgever. Dit wordt als volgt omschreven:

De eerste stap in het technisch proces is de stakeholdersanalyse. Deze stap wordt vrijwel altijd uitgevoerd door de opdrachtgever, ter voorbereiding op de eisenspecificatie.

- BAM SE-wijzer

Deels klopt deze redenering er vanuit gaande dat de opdrachtgever ook eisen vanuit de laagste niveau's heeft meegenomen in de vraagspecificaties. In de praktijk kunnen er ook eisen komen uit bronnen die op een laag niveau aan het systeem zijn gesteld, maar niet door de opdrachtgever zijn meegenomen in de vraagspecificatie.

De eisenanalyse zoals omschreven in de SE-wijzer is praktisch ingestoken voor de situatie na de huidige opzet van de vraagspecificaties. Deze omschrijft de volgende stappen voor het maken van een eisenanalyse:

- *Analyseren en structureren van eisen*
- *Controleren op eenduidigheid en formulering*
- *Overleggen met de opdrachtgever*
- *Eisen verwerken en beheren*

- BAM SE-wijzer

Dit is een praktische invulling van het eisenanalyse-proces in het geval alle eisen al bekend zijn. Om te voorkomen dat in de vraagspecificatie eisen vanuit andere bronnen ontbreken is het goed om voor elk ontwerpniveau een nieuwe eisenanalyse uit te voeren.

4.3.2 Eisenvalidatie

Er bestaan verschillende soorten validatie. In de meeste gevallen wordt validatie omschreven als de check achteraf of het gebouwde systeem voldoet aan de gebruikerswensen. In de theorie wordt ook nog de eisenvalidatie genoemd. Dit is eigenlijk eenzelfde check, maar dan gedurende het ontwerp. Bij het decomponeren van het systeem naar een lager niveau wordt gecheckt of de decompositie voldoet aan de bovenliggende eisen. Deze check wordt uitgevoerd om te voorkomen dat achteraf niet kan worden voldaan aan de gebruikerseisen. In de BAM SE-wijzer komt deze validatie gedeeltelijk naar voren in het analyseren en structureren van de eisen. Dit wordt impliciet als volgt omschreven in de SE-wijzer:

Steeds vaker leveren opdrachtgevers de vraagspecificatie aan in een formaat waarin relaties tussen eisen tot uitdrukking komen. Toch verdient het aanbeveling om de aangeleverde structuur kritisch tegen het licht te houden en te beoordelen of een duidelijke en werkbaar vraag wordt gesteld.

- BAM SE-wijzer



Eisvalidatie wordt verder niet expliciet omschreven in de SE-wijzer. Overigens wordt het wel zijdelings genoemd in de verificatiemethode "Onderliggende eisen":

"Als een eis onderliggende eisen heeft, dan hanteert BAM Infra de verificatiemethode 'onderliggende eisen'. Hiermee wordt gecontroleerd of een bovenliggende eis volledig wordt afgedekt door de onderliggende eisen. Is dit niet het geval, dan moet er een aanvullende eis worden geformuleerd om dit te compenseren. Als de opdrachtgever de vraagspecificatie heeft opgesteld, mag ervan worden uitgegaan dat hij ervoor gezorgd heeft dat de onderliggende eisen de bovenliggende eis volledig afdekken. Als (bij de eisenanalyse) blijkt dat dit niet zo is, moet de opdrachtgever hierover geïnformeerd worden."

- BAM SE-Wijzer

4.3.3 Functionele analyse

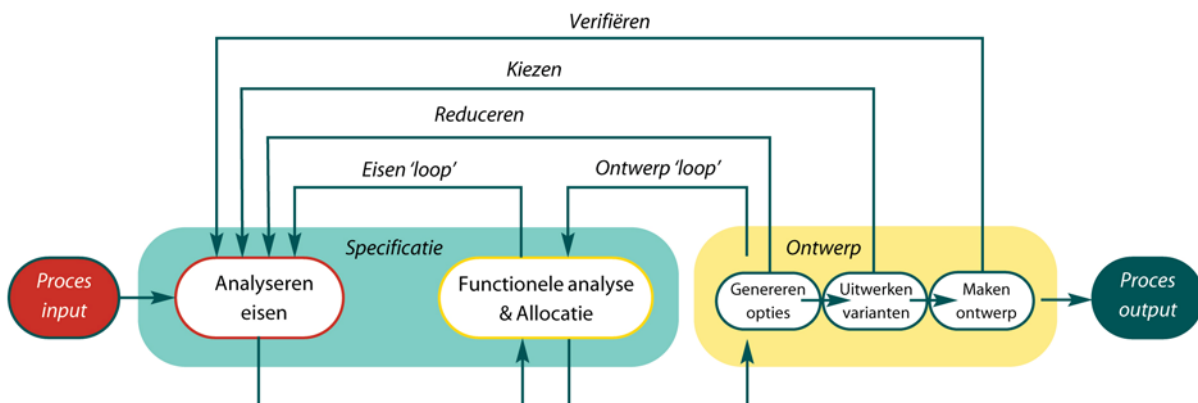
De functionele analyse wordt gebruikt om het systeem te definiëren zonder van te voren te denken in oplossingen. Dit wordt op de juiste manier omschreven in de theorie van de SE-wijzer:

Probeer de functies en subfuncties te ontdekken en te benoemen door telkens de vraag te stellen waartoe iets dient of wat er met een oplossing bereikt moet worden. Het is van belang hierbij zo abstract mogelijk te denken. Door de aandacht te concentreren op de functies in plaats van op gebruikelijke (standaard) oplossingen, ontstaat er zicht op andere manieren om dezelfde functies in te vullen.

- BAM SE-Wijzer

In de praktijk wordt hiervan vooral op hogere niveau's impliciet gebruik gemaakt. Toch zou het van waarde kunnen zijn deze functionele analyse tot op het laagste niveau uit te voeren. Elk klein onderdeel van een systeem heeft een bepaalde functie, door deze functie te omschrijven kan worden gedacht in alternatieve conceptoplossingen. In de Infrasector waar veel herhaling optreedt, kunnen kleine verbeteringen ook een grote kostenbesparing opleveren. Het uitvoeren van de functionele analyse is van belang om niet direct te denken in al bestaande oplossingen. Dit betekent overigens wel dat bestaande oplossingen mee moeten worden genomen in de afweging.

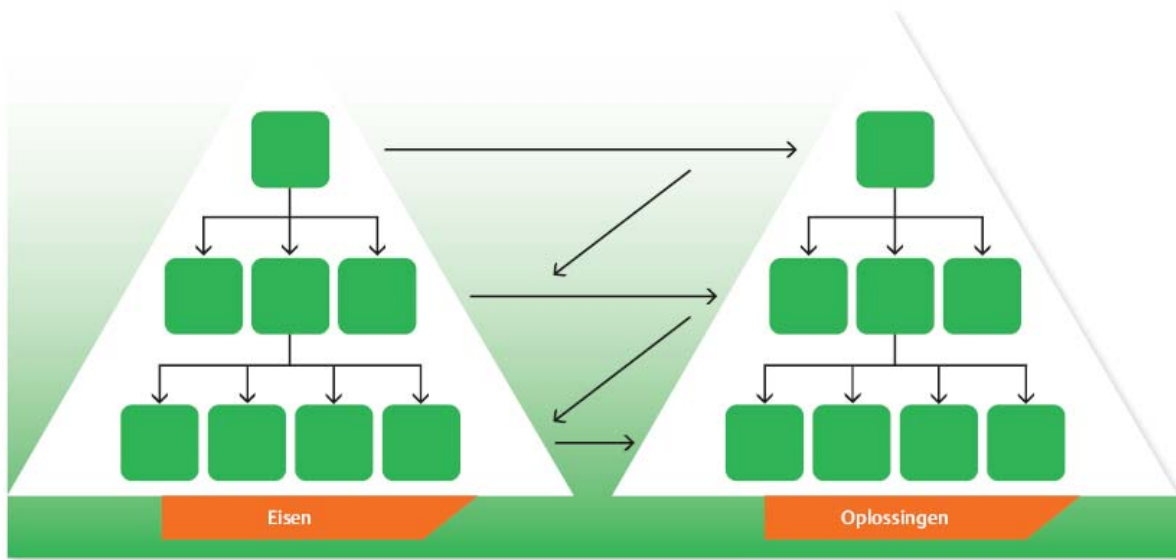
In de SE-wijzer van de BAM wordt de stap van eisen naar functionele analyse naar het genereren van oplossingen niet weergegeven, maar worden oplossingen rechtstreeks gerelateerd aan eisen. In de figuur hieronder uit de leidraad SE wordt dit juist weergegeven:



Figuur 37: V-Model(leidraad SE)

Deze verschillen komen voort uit het beperkt functioneel specificeren van de opdrachtgever. BAM heeft voor deze vorm gekozen vanwege het detailleringsniveau van de vraagspecificaties. Hierdoor wordt de oplossingsruimte zo beperkt dat het uitvoeren van een functionele analyse vaak niet voldoende opleverd. BAM heeft deze stap in het Systems Engineeringsproces dan ook beperkt toegelicht. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de functionele analyse voor de belangrijkste oplossing door de opdrachtgever is uitgevoerd. Bij contracten met grotere ontwerpvrijheid kan dit echter wel van betekenis zijn. In figuur 38 op de volgende pagina is de weergave uit de SE-wijzer te vinden die de stap van eisen naar oplossingen illustreert.





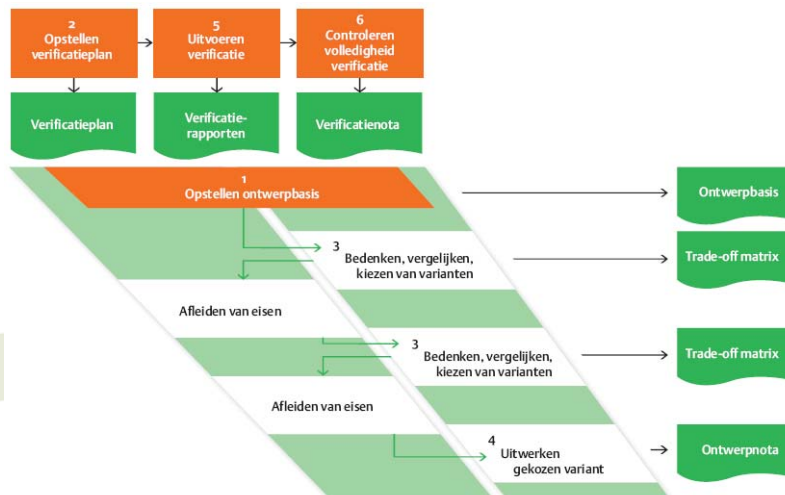
Figuur 38: SBS-Eisenboom(BAM SE-wijzer)

4.3.4 Functionele verificatie

Functionele verificatie is een controle van de functionele analyse. Vertaalt de decompositie naar subfuncties op de juiste manier de hoofdfunctie? In de BAM SE-wijzer wordt deze verificatie niet omschreven. Dit is een logisch gevolg van het beperkt uitvoeren van de functionele analyse. Daarnaast wordt het maken van een functionele analyse vaak alleen noodzakelijk geacht bij afwegingen op hoog niveau. Keuzes die in de infrasector al door de opdrachtgever zijn gemaakt.

4.3.5 Synthese

De synthese is het proces van het omzetten van de functionele architectuur in een fysiek ontwerp. Dit wordt in de SE-wijzer vrij gedetailleerd beschreven, met dien verstande dat ook hier wordt uitgegaan van een gedetailleerde vraagspecificatie. Het ontwerpproces wordt in de SE-wijzer in de volgende figuur weergegeven:



Figuur 39: Ontwerpproces(BAM-SE-wijzer)

Hierbij worden in de ontwerpbasis worden per object de volgende zaken opgenomen:

- a. (ontwerp)uitgangspunten;
- b. normen en richtlijnen;
- c. bindende en niet-bindende documenten;
- d. (afgeleide) eisen;
- e. raakvlakken;
- f. risico's die voor een onderdeel relevant zijn;
- g. belasting en belastinggevallen;
- h. schematisaties en berekeningsmethoden.

- BAM SE-wijzer



Dit vormt het uitgangspunt voor het object. Hierin wordt het functioneel ontwerp niet meegenomen. Ondanks dat dit volgens de theorie het uitgangspunt is voor het genereren van alternatieven.

De overige zaken vormen overigens wel een goed uitgangspunt voor het ontwerp in de huidige situatie van impliciet specificeren. Daar waar het ontwerp al grotendeels gespecificeerd is, is het noodzakelijk structuur te brengen in deze specificaties.

4.3.6 Ontwerp verificatie

Vanwege de gedetailleerde omschrijvingen van de opdrachtgever wordt de verificatie van het ontwerp als de belangrijkste stap gezien van het Systems Engineeringsproces. In deze stap wordt aangetoond dat kan worden voldaan aan de eisen van de opdrachtgever. Omdat voor gunning een prijs moet worden neergelegd is het van belang dat aan alle eisen uit de vraagspecificatie kan worden voldaan. Deze stap wordt dan ook vrij gedetailleerd omschreven in de BAM SE-wijzer.

Verificatie omvat alle activiteiten die erop gericht zijn om aan te tonen dat aan alle eisen (en normen) wordt voldaan.

- BAM SE-Wijzer

4.3.7 Systeem analyse

De systeemanalyse wordt in de theorie omschreven als het proces voor het maken van afwegingen. In de theorie worden drie verschillende soorten afwegingen genoemd:

- Eisen
- Functies
- Concepten

De laatste is terug te vinden in de BAM SE-wijzer en is ook terug te vinden in figuur 39. In deze fase worden afwegingen gemaakt tussen verschillende fysieke ontwerpen. Een afweging wordt vastgelegd in een trade-off matrix. In veel gevallen worden afwegingen echter impliciet gemaakt op basis van ervaring. Dit gebeurt voornamelijk vanwege de beperkte tijd die beschikbaar is voor het maken van een ontwerp. Het zou voor de transparantie van het proces goed zijn wanneer wel wordt vastgelegd dat er is gekozen voor een informele afweging en waarom daarvoor gekozen is.

4.3.8 Control

In het controlproces van Systems Engineering wordt het totale proces beheerst. In dit proces komen de 7 hierboven genoemde stappen samen. Hieronder vallen bijvoorbeeld:

- Risicomanagement
- Raakvlakkenmanagement
- Configuratiemanagement
- Data management
- Prestatie management (Hieronder vallen bijvoorbeeld Financieel en Planningsmanagement)

Deze processen worden allemaal in de BAM SE-wijzer beschreven. Hiermee wordt duidelijk dat Systems Engineering een totale methode is voor het projectmanagement en ook als zodanig moet worden gezien.

Voor het structureren van de projecten worden de verschillende Breakdown Structures opgebouwd door middel van de 7 stappen hierboven omschreven. In het ontwerp is de System Breakdown Structure het belangrijkste, in de uitvoering wordt deze onder de Work Breakdown Structure gehangen.



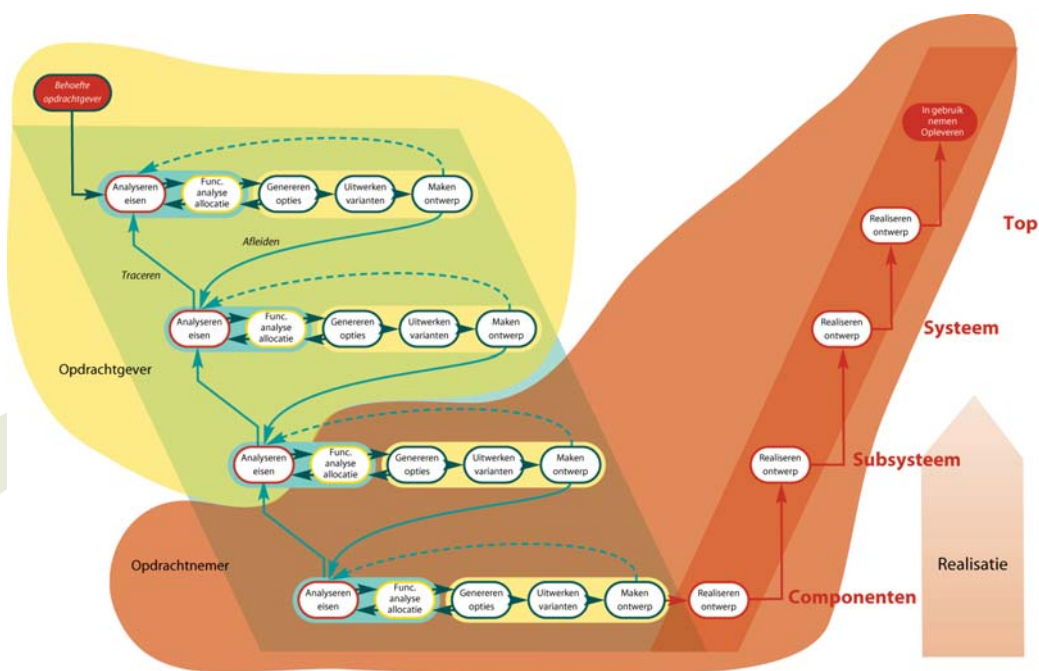
4.4 Deelconclusie

In dit hoofdstuk is enerzijds de theorie omschreven zoals die in het algemeen door de bouwsector is overgenomen, anderzijds wordt ook de theorie toegelicht zoals die door de BAM is omschreven in de SE-wijzer, die in de zomer van 2008 is gepubliceerd. Beide trachten ze antwoord te geven op deelvraag II-a:

II-a Op welke manier wordt Systems Engineering op dit moment toegepast in de bouwsector en specifiek bij de BAM(beschrijvend)?

De theorie in de bouwsector onderscheidt zich op een aantal punten van de theorie die in de andere sectoren is ontwikkeld. Dit wordt hier puntsgewijs toegelicht:

- De nadruk in de bouwsector ligt vooral op de ontwerpverificatie. Dit komt voornamelijk door de samenstelling van de vraagspecificatie.
- Er is nog onvoldoende transparantie in de overdracht van het contract om goed gebruik te kunnen maken van Systems Engineering na overdracht.
- Eisen in de vraagspecificatie bevatten vaak eisen die slecht traceerbaar zijn naar de bron(stakeholder) en bevatten tevens vaak tegenstrijdige eisen of incomplete afleidingen.
- Regelgeving in Nederland is bepalend voor het deel voor het ontwerp dat al wordt gemaakt door de Opdrachtgever en verwoord wordt in de vraagspecificatie.
- Het ontwerp van de Opdrachtgever wordt vaak niet of als referentieontwerp verschaft en de eisen in de vraagspecificatie passen bij dit ontwerp.
- Systems Engineering wordt nog onvoldoende gebruikt om het ontwerpproces te sturen, het wordt nog gezien als secundair proces voor het aantonen van eisen.
- De theorie wordt in de stukken over het algemeen wel op de juiste manier weergegeven, zoals in het V-model uit de SE-leidraad van ONRI, ProRail en Rijkswaterstaat in onderstaand figuur:

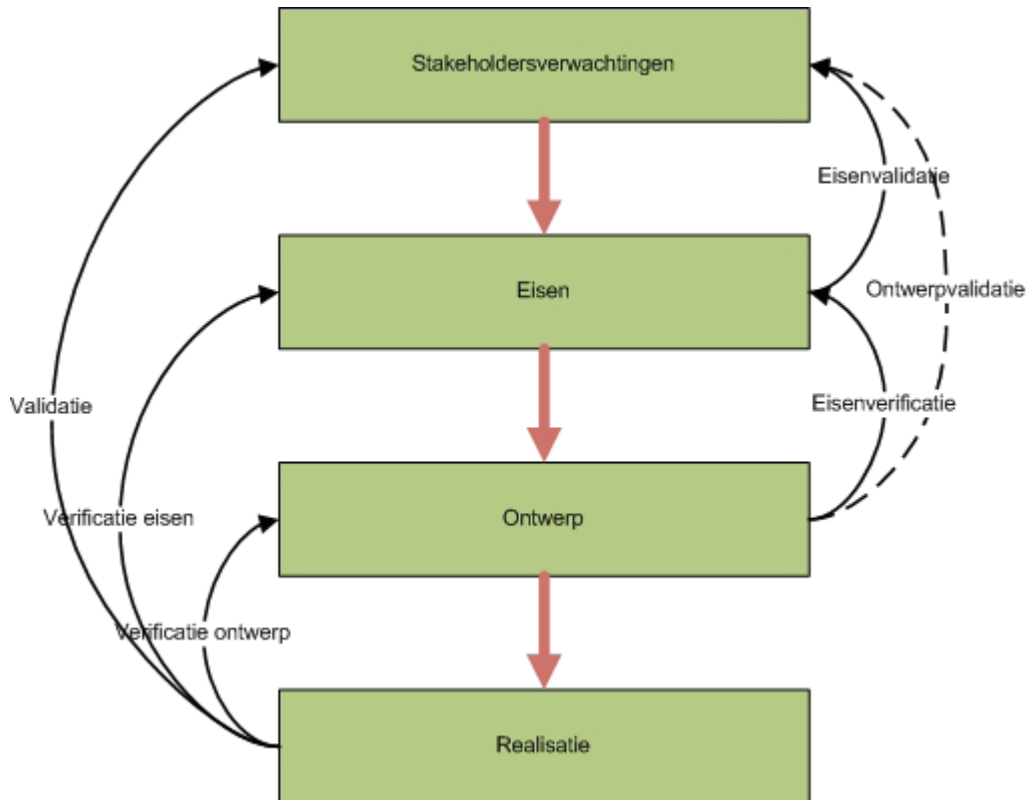


Figuur 40: V-Model(SE-leidraad)

- Trade-offs gemaakt in de Systeemanalyse worden in de bouwsector slechts gemaakt op het gebied van het kiezen van een alternatieve fysieke oplossing.
- Er wordt weinig tot geen gebruik gemaakt van een zuivere functionele analyse. De hierop volgende functionele verificatie wordt nergens gebruikt.
- Er wordt weinig onderscheid gemaakt in de vormen van verificatie en validatie. Het belangrijkste onderdeel is het aantonen van eisen. Eisen worden aangetoond in verschillende fasen door een ontwerpverificatie toe te passen.



In onderstaand figuur is dit onderscheid weergegeven:



Figuur 41: Verificatie en validatie(Katsonov(2008))

De grootste overeenkomst in de algemene theorie en de theorie in de bouwsector zit in de ontwerpverificatie en in het controlproces. Deze twee deelprocessen worden uitgevoerd zoals ze zijn omschreven in de bouwsector. Van de overige processen valt vooral op dat het verifiëren van de functionele omschrijving nergens is terug te vinden. De andere processen worden voor een deel omschreven maar missen essentiële onderdelen om in de praktijk goed te worden uitgevoerd. De verschillen die zijn geconstateerd worden in onderstaande tabel grafisch weergegeven.

	Eisenanalyse	Eisenvalidatie	Functioneel ontwerp	Functionele verificatie	Synthese	Ontwerpverificatie	Control	Systeemanalyse
Verschillen theorie - Bouwsector	Komt deels overeen	Komt deels overeen	Komt deels overeen	Komt niet overeen	Komt deels overeen	Komt overeen	Komt overeen	Komt deels overeen

Tabel 2: Verschillen algemene theorie en theorie bouwsector

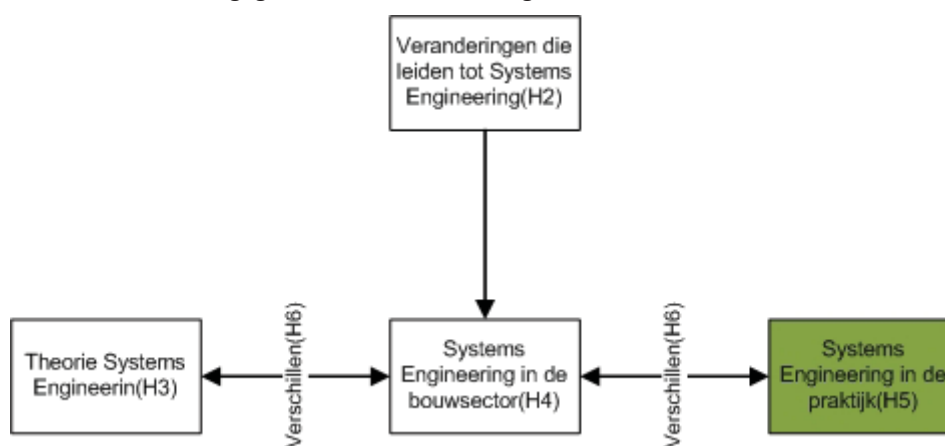


5 Casestudies

In de literatuurstudie is de theorie die ontwikkeld is in andere sectoren onder de loep genomen. Om een goed beeld te krijgen van de huidige toepassing van SE in de bouwsector worden een tweetal casestudies bekeken. Deze casestudie worden eerst beschreven, vervolgens wordt gekeken naar de SE toepassing en wordt de study in de context geplaatst van het kennisniveau van het moment van projectinitiatie. Beide projecten zijn in de uitvoeringsfase en zijn één van de eerste projecten waar Systems Engineering werd toegepast in de bouwsector. In deze casestudies wordt ingegaan op het gedeelte dat door de opdrachtnemer wordt gedaan. Over het proces voorafgaand aan de vraagspecificatie kan door de Opdrachtnemer geen directe invloed worden uitgeoefend. De constatering in dit hoofdstuk zijn gedaan naar aanleiding van interviews die zijn afgenomen bij beide projecten door Eric van Rooijen (Trainee van de BAM Groep). Deze interviews zijn te vinden in bijlage A. Dit gedeelte moet antwoord geven op deelvraag II-b:

II-b Welke constatering kunnen worden gedaan en welke knelpunten kunnen worden geïdentificeerd over de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de toepassing van Systems Engineering binnen de casus A4 Burgerveen-Leiden (evaluatief)?

De context van dit hoofdstuk is weergegeven in onderstaande figuur:



Figuur 42: Indeling Hoofdstukken

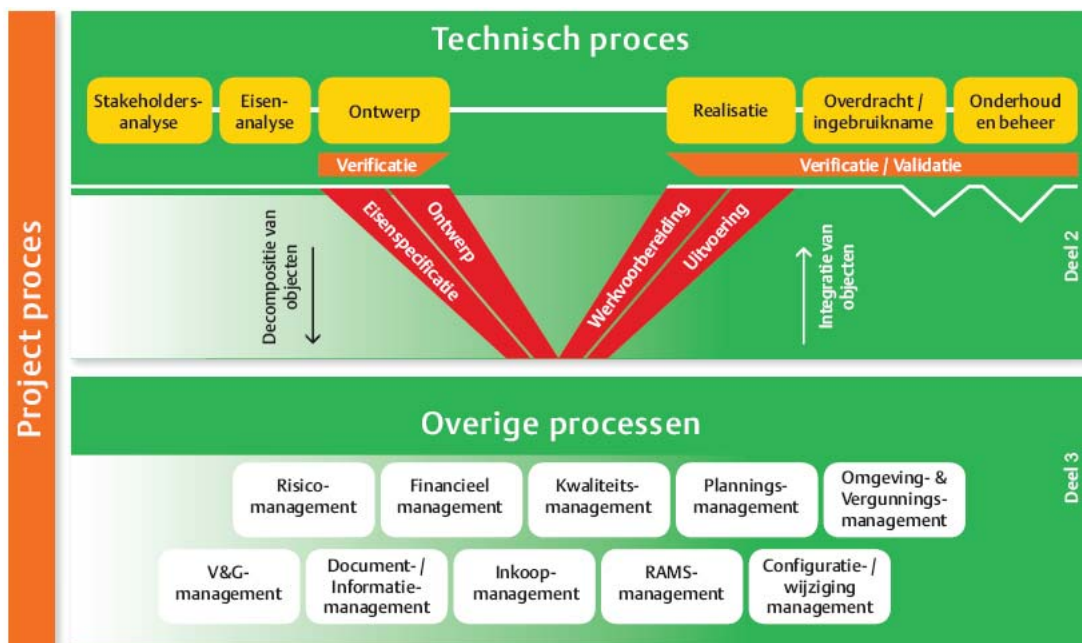
In de literatuurstudie is de algemene SE-theorie vergeleken met de SE-wijzer. In de casestudies zal de praktijk worden vergeleken met de SE-wijzer. Hierin is de theorie beschreven zoals die ook is weergegeven in paragraaf 4.3 en die is vergeleken met de algemene theorie van Systems Engineering. Daarnaast zal ook worden gekeken naar de structuur van de verschillende *Breakdown Structures* die voor het project zijn gebruikt. Daarbij moet worden opgemerkt dat de SE-wijzer een praktische insteek heeft, die het mogelijk moet maken Systems Engineering te kunnen implementeren in de bestaande bouwprocessen.

De SE-wijzer maakt onderscheid tussen de volgende stappen:

1. Stakeholderanalyse
2. Eisenanalyse
 - 2.1. Analyseren en structureren van eisen.
 - 2.2. Controleren op eenduidigheid en formulering.
 - 2.3. Overleggen met de opdrachtgever.
 - 2.4. Eisen verwerken en beheren.
3. Ontwerp
 - 3.1. Opstellen ontwerpbasis
 - 3.2. Opstellen verificatieplan
 - 3.3. Bedenken varianten, vergelijken en kiezen
 - 3.4. Uitwerken gekozen variant en vastleggen in ontwerpnota
 - 3.5. Uitvoeren verificatie
 - 3.6. Controleren volledigheid



In de casestudies zullen deze stappen worden doorgenomen om te bepalen in hoeverre binnen de projecten de SE-wijzer is gevolgd. Het totale proces wordt in onderstaand figuur weergegeven:



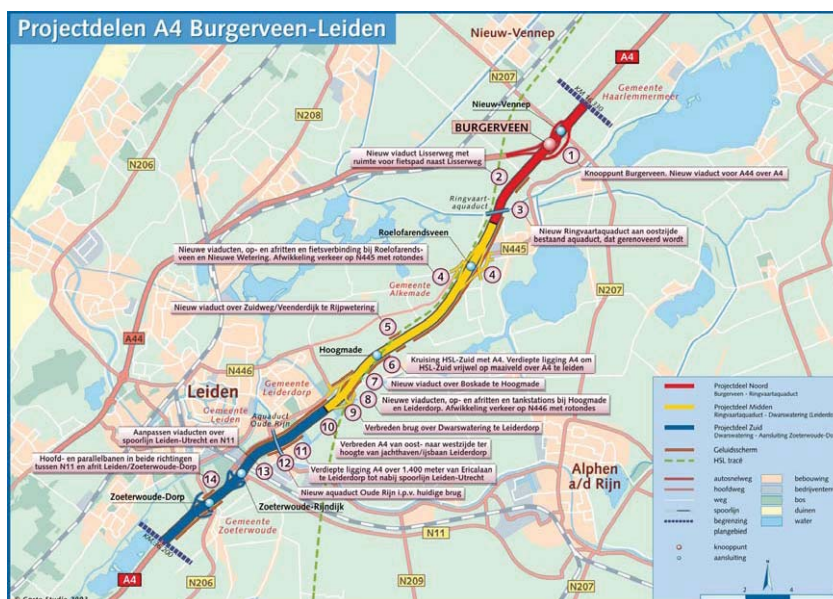
Figuur 43: Overzicht tracé A4 Burgerveen-Leiden(bron:BAM SE-wijzer)

In deze figuur is ook het V-model te herkennen zoals dat is omschreven in hoofdstuk 4. In paragraaf 4.4 is deze figuur vergeleken met de figuur zoals die in de algemene theorie is weergegeven.

5.1 Casestudy A4 Burgerveen

5.1.1 Beschrijving

De Combinatie A4 Burgerveen -Leiden, een samenwerking tussen BAM Civiel, BAM Wegen, VTN en Van Oord, realiseert in het kader van de verbetering van de bereikbaarheid en de leefomgeving de verbreding en verdiepte ligging van de A4 tussen Burgerveen en Leiden. De weg wordt verbreed van 2 x 2 naar 2 x 3 rijstroken. In de oude situatie vormen de twee tracés een flessenhals waardoor files ontstaan. Daarnaast loopt de A4 bij Leiden, Zoeterwoude en Leiderdorp dicht langs de bebouwing. Dit veroorzaakt geluidsoverlast en vormt bovendien een fysieke scheiding tussen de steden. Op aandringen van de omwonenden wordt de A4 over een traject van 1400 meter verdiept aangelegd. Door deze verdiepte ligging neemt de geluidshinder sterk af en ontstaat er een meer open gebied tussen de woonkernen Leiderdorp, Leiden en Zoeterwoude-Rijndijk. Dit geeft de hele omgeving een mooiere en prettiger uitstraling. Het tracé bestaat uit twee onderdelen, het noordelijke en het zuidelijke tracé. Het middenstuk is al verbreed, gelijktijdig met de aanleg van de HSL. Voor een goede afwikkeling van het kruisende verkeer bouwt het consortium grote kunstwerken op beide tracés. In het noordelijke tracé, dat loopt van knooppunt Burgerveen tot en met het Ringvaartaquaduct, worden de viaducten van de Lisserweg en van het knooppunt Burgerveen vervangen. Het bestaande aquaduct wordt gerenoveerd nadat er een nieuw aquaduct naast is gebouwd. Het zuidelijke tracé loopt van de Dwarswating in Leiderdorp tot aan de afrit Leiden/Zoeterwoude-Dorp.



Figuur 44: Overzicht tracé A4 Burgerveen-Leiden(bron: RWS.nl)

De A4 over een traject van 1400 meter verdiept aangelegd. Door deze verdiepte ligging neemt de geluidshinder sterk af en ontstaat er een meer open gebied tussen de woonkernen Leiderdorp, Leiden en Zoeterwoude-Rijndijk. Dit geeft de hele omgeving een mooiere en prettiger uitstraling. Het tracé bestaat uit twee onderdelen, het noordelijke en het zuidelijke tracé. Het middenstuk is al verbreed, gelijktijdig met de aanleg van de HSL. Voor een goede afwikkeling van het kruisende verkeer bouwt het consortium grote kunstwerken op beide tracés. In het noordelijke tracé, dat loopt van knooppunt Burgerveen tot en met het Ringvaartaquaduct, worden de viaducten van de Lisserweg en van het knooppunt Burgerveen vervangen. Het bestaande aquaduct wordt gerenoveerd nadat er een nieuw aquaduct naast is gebouwd. Het zuidelijke tracé loopt van de Dwarswating in Leiderdorp tot aan de afrit Leiden/Zoeterwoude-Dorp.



Het viaduct over de Dwarswating wordt geheel vernieuwd en opgehoogd. Ter hoogte van het viaduct bij de Ericalaan wordt de A4 onder de Ericalaan door geleid. De brug over de Oude Rijn wordt vervangen door een aquaduct. De toeritten hiervan worden verdiept aangelegd. De verdiepte bak van 1400 meter wordt door BAM Civiel midden in dichtbevolkt gebied aangelegd. Verder worden ook de viaducten bij de spoorlijn Leiden-Utrecht en bij de N11 aangepast. Tot slot komt tussen de nieuw ontwikkelde woonlocatie Roomburg in Leiden en de nader in te vullen Meerburgerpolder een dwarsverbinding over de A4.

BAM Civiel is verantwoordelijk voor het ontwerp en de uitvoering van de bouw en aanpassingen van de viaducten en aquaducten. BAM Wegen is verantwoordelijk voor het ontwerp en de uitvoering van de verbreding van het weggedeelte. VTN verzorgt de wegverlichting, signalering en bewegwijzering. De verbreding van de A4 is een uitdagend project voor de aannemerscombinatie. Niet alleen qua techniek en ontwerp, maar ook omdat het project in een dichtbevolkte omgeving ligt. Er worden innovatieve technieken toegepast, het verkeer blijft gedurende het hele project gebruik maken van de A4 en er worden vele maatregelen genomen om de hinder voor de omgeving en de weggebruikers te minimaliseren.

5.1.2 Systems Engineering toepassing

1. Stakeholdersanalyse

In de SE-wijzer van de BAM wordt de Stakeholderanalyse omschreven als de eerste stap van het Systems Engineeringsproces. In de praktijk wordt deze stap door de opdrachtgever in de initiatieffase gezet. In deze stap worden de stakeholders geïdentificeerd en de belangen in de vorm van eisen in de vraagspecificatie opgenomen. Deze stap kan wel van belang zijn bij belangrijke keuzes, voornamelijk om bezwaren en vertraging te voorkomen. Bij de A4 Burgerveen-Leiden is geen stakeholderanalyse uitgevoerd. De stakeholderanalyse maakt impliciet onderdeel uit van het omgevingsmanagement en dit wordt niet gezien als Systems Engineering.

2. Eisenanalyse

De eisenanalyse is de eerste stap die door de opdrachtnemer wordt gezet. De opdrachtgever heeft zijn eigen eisen en die van de relevante stakeholders zo goed mogelijk weergegeven in een (vraag)specificatie. De BAM SE-wijzer omschrijft een 4-tal zaken die onder de eisenanalyse vallen:

- Analyseren en structureren van eisen.
In deze analyse worden de eisen getypeerd en wordt het detailniveau aangegeven om structuur te brengen in de vraagspecificatie. Bij het project A4 Burgerveen-Leiden is deze typering al door de opdrachtgever gedaan. Ook is het detailniveau niet aangegeven. De eisen zijn verdeeld over de disciplines en ontwerp en uitvoering. Hier is de fragmentatie van de organisatie al direct zichtbaar.
- Controleren op eenduidigheid en formulering.
In deze fase worden de eisen gecontroleerd op de SMART-formulering (Specifiek, Meetbaar, Acceptabel, Realistisch en Tijdgebonden). Hierdoor wordt voorkomen dat er discussie kan ontstaan over het uitvoeren van een eis. Bij de A4 Burgerveen-Leiden is dit niet expliciet gebeurd. Hierdoor kan in een later moment onduidelijkheid ontstaan over de resultaten die volgen uit de eisen.
- Overleggen met de opdrachtgever.
Deze stap is specifiek voor het SE-proces in de bouwsector en is ingebouwd om vragen te stellen over eisen die onduidelijk zijn of niet SMART geformuleerd zijn. Bij de A4 Burgerveen-Leiden is er geen overleg geweest met de opdrachtgever over de eisen. Er zijn ook geen voorbehouden geweest wanneer er een mogelijkheid bestond dat er niet aan de eisen kon worden voldaan.
- Eisen verwerken en beheren.
De eisen worden beheerd in een softwarepakket. Dit verschilt per project, maar over het algemeen wordt gewerkt met het programma Relatics van ontwikkelaar PKM. Bij A4 Burgerveen-Leiden is gewerkt met RiAF en op Access gebaseerde database. Uit de PKM database kunnen verschillende rapporten worden gegenereerd, zoals Verificatieplannen en Keuringsrapporten.



3. Ontwerp

De ontwerpstappen zoals die in de SE-theorie staan beschreven zijn in de BAM SE-wijzer meer naar de praktijk van de BAM Infra bedrijven vertaald. In de SE-wijzer worden dan ook een activiteiten genoemd die onderdeel uit maken van het ontwerpproces:

1. Opstellen ontwerpbasis

De ontwerpbasis worden per ontwerpobject de eisen, normen en richtlijnen, randvoorwaarden, raakvlakken en risico's overzichtelijk weergegeven. Voor de belangrijke objecten is bij A4 Burgerveen-Leiden een ontwerpbasis opgesteld. Alle voorgeschreven inhoud is daar in opgenomen.

2. Opstellen verificatieplan

In het verificatieplan wordt vastgelegd, wie, wat, hoe en wanneer een verificatie wordt uitgevoerd. In de SE-wijzer staat voorgeschreven dat dit voor het maken van een ontwerp gebeurt. In de praktijk wordt dit achteraf gedaan. De verificatieplannen worden grotendeels wel in het voorgeschreven format opgesteld.

3. Bedenken varianten, vergelijken en kiezen

In de SE-wijzer staat voorgeschreven dat alternatieven moeten worden bedacht voor het object. In de SE theorie worden alternatieven gegenereerd op basis van de functie die zij vervullen. Voor belangrijke keuzes zijn trade-offs gemaakt bij de A4 Burgerveen-Leiden. Andere keuzes zijn vaak impliciet gemaakt.

4. Uitwerken gekozen variant en vastleggen in ontwerpnota

Het gekozen ontwerp moet worden uitgewerkt tot een niveau waar standaard producten van bestaan. Deze uitwerking wordt vastgelegd in de ontwerpnota. Dit was al een onderdeel van het gebruikelijke ontwerpproces en is dus ook uitgevoerd bij de A4 Burgerveen-Leiden.

5. Uitvoeren verificatie

Bij afronding van een ontwerpfase vindt verificatie plaats volgens het verificatieplan. Verificatieresultaten worden vastgelegd in een verificatierapport, waarin per eis de volgende informatie wordt geregistreerd:

- uniek identificatienummer (eiscode);
- omschrijving eis (met eisnummer);
- verificatieresultaat (wordt wel of niet voldaan aan de eis?);
- (verwijzing naar) bewijsdocument;
- een beschrijving van de wijze waarop de relevante risico's worden beheerst;
- aanduiding van de functionaris die de verificatie heeft uitgevoerd;

Dit is onderdeel van de ontwerpverificatie zoals die in de SE-theorie wordt omschreven. Bij de A4 Burgerveen-Leiden zijn de eerste 4 elementen opgenomen in de verificatieplannen. De functionaris wordt wel weergegeven, maar deze taak wordt vaak bij de Systems Engineer neergelegd, terwijl deze niet direct verantwoordelijk is voor de verificatie. De risico's zoals omschreven in punt 5 worden los gezien van de verificaties. Risicomanagement wordt als een apart proces gezien dat los staat van Systems Engineering.

6. Controleren volledigheid

In de verificatienota worden alle verificatierapporten samengevoegd. Deze nota dient te worden gecontroleerd op volledigheid om te voorkomen dat eisen worden vergeten. Deze is bij de A4 Burgerveen-Leiden gemaakt.

Deze stappen onderstrepen wat eerder is geconcludeerd, de nadruk van het SE-proces in de bouwsector ligt op het aantonen van eisen.

Voor de structuur in het project wordt er gebruik gemaakt van verschillende decomposities. In de meeste gevallen wordt vooral de SBS gebruikt.

a. SBS

De SBS bij A4 Burgerveen-Leiden is geografischgericht opgezet. De elementen uit de SBS zijn naar discipline verdeelt. Tevens worden de objecten als betaalproducten gebruikt.

b. WBS

Er is geen WBS gemaakt, de planning zou wel kunnen worden gezien als een opbouw van activiteiten, maar dit vloeit niet direct voort uit het Systems Engineering principe.

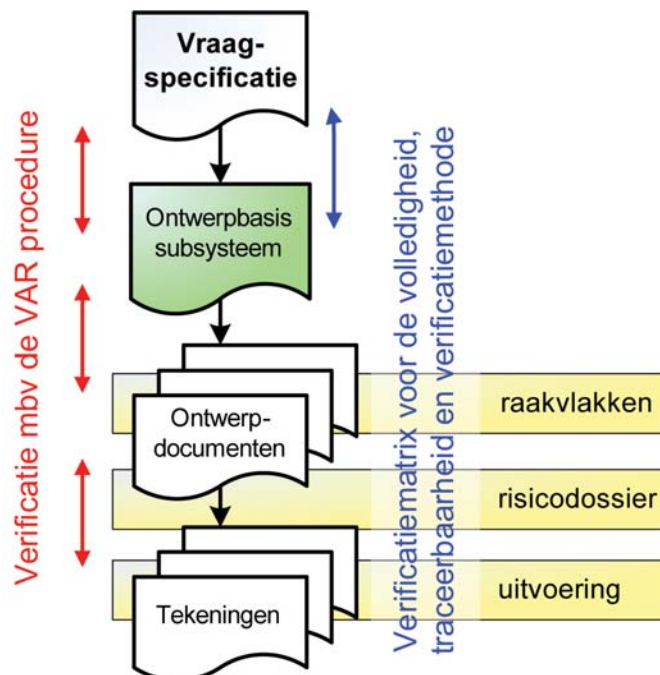


Verificatie en Validatie

Verificatie wordt gedetailleerd omschreven in de SE-wijzer, dit wordt ook praktische ingestoken in verificatieplannen, -rapporten en -nota. Hier ligt de nadruk wel op de ontwerpverificatie, voldoet het ontwerp aan de eisen en voldoet de realisatie aan de eisen? Validatie wordt gezien als een check op het gebouwde voldoet, zo omschrijft de SE-wijzer het ook:

“Vooral na de realisatiefase, dus vlak voor de oplevering, is validatie van belang.” -BAM SE-Wijzer

Er wordt geen onderscheid gemaakt in de verschillende soort verificatie en validatie zoals deze in de theorie zijn omschreven. Bij de A4 Burgerveen-Leiden zijn alle eisen in de ontwerpbasis van het subsysteem geplaatst. Vervolgens is deze ontwerpbasis getoetst en aan de vraagspecificatie. De ontwerpdocumenten worden getoetst aan deze ontwerpbases en op hun beurt worden de tekeningen getoetst aan de ontwerpdocumenten. Dit is weergegeven in onderstaande figuur uit het DKP van het ontwerp.



Figuur 45: VAR-procedure A4(DKP Ontwerp)

Validatie wordt in de uitvoering uitgevoerd met het testen of datgene op tekening ook daadwerkelijk buiten op de juiste manier is uitgevoerd. Deze metingen en testen zijn onderdeel van de KAM procedure en worden niet gezien als een onderdeel van het SE-proces. Met het opnemen van de eisen in de ontwerpbasis wordt uitgegaan van een Programma van Eisen die geen directe relatie heeft met het Systems Engineeringprincipe.

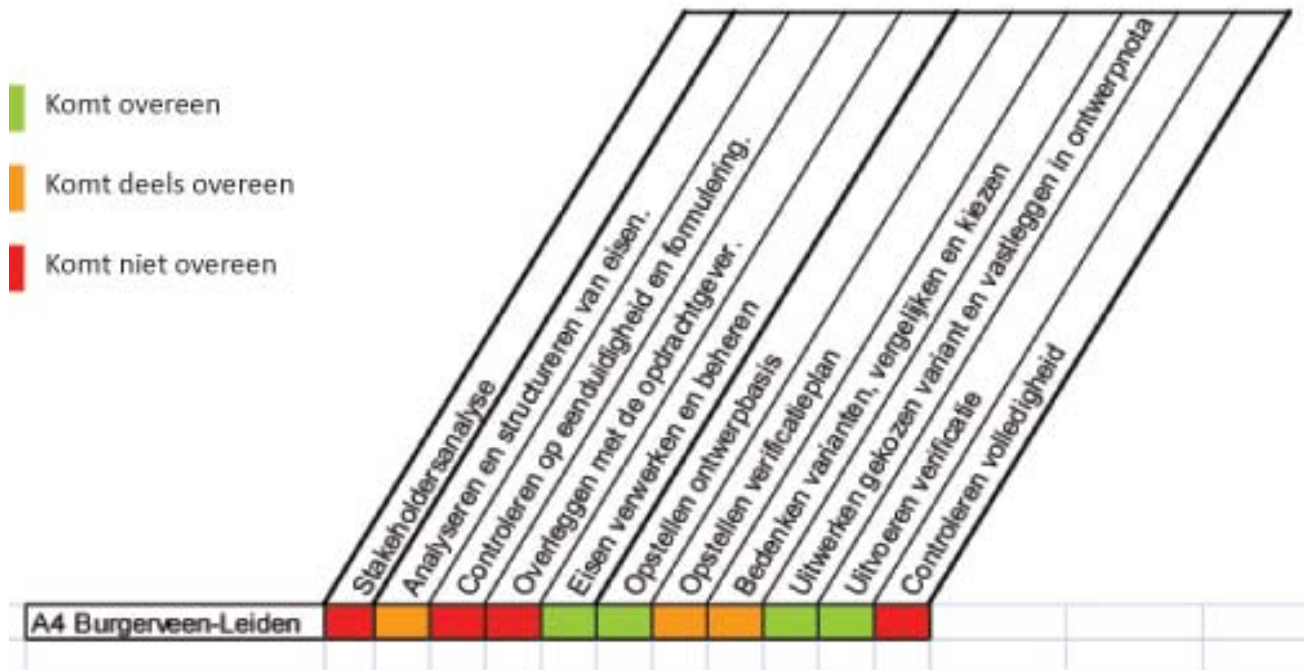
5.2 Deelconclusie A4 Burgerveen-Leiden

In deze paragraaf is de de case A4 Burgerveen-Leiden bekeken. In deze case in een vorm van Systems Engineering toegepast die als “SE-light” kan worden beschreven. De eisen zijn opgenomen in de ontwerpbasis en hiermee wordt ervan uitgegaan dat ze vervolgens ook in het ontwerp zijn opgenomen. toch kan er geleerd worden van de toepassing van de A4 Burgerveen-Leiden. Hiermee wordt antwoord gegeven op deelvraag II-b:

II-b Welke constatering kunnen worden gedaan en welke knelpunten kunnen worden geïdentificeerd over de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de toepassing van Systems Engineering binnen de casus A4 Burgerveen-Leiden(evaluatief)?



Het project A4 Burgerveen-Leiden is gestart voor publicatie van de SE-wijzer. De toepassing van Systems Engineering was nog vrij nieuw. Om een duidelijk beeld te krijgen van de overeenkomsten met de SE-wijzer van de uiteindelijke toepassing van Systems Engineering is een samenvatting gemaakt in de vorm van onderstaande tabel:



Tabel 3: Verschillen en overeenkomsten SE-wijzer A4 Burgerveen-Leiden

- Wat opvalt is dat ook hier de nadruk ligt op het beheren van de eisen. Dit heeft te maken met de mate van detaillering van de vraagspecificatie.
- Het ontwerp is al zo ver uitgewerkt dat er voor de opdrachtnemer weinig speelruimte overblijft. Hierdoor is gekozen voor deze vorm. Hierdoor bevat het totale proces delen van het Systems Engineeringsprincipe, maar is er weinig samenhang tussen de onderdelen.
- Bij de start van het project is er voor gekozen eisen onder te verdelen in eisen voor de uitvoering en voor het ontwerp. Omdat het ontwerp geen rekening heeft gehouden met de eisen die zijn toebedeeld aan de uitvoering kan er in de uitvoering niet altijd worden voldaan aan deze eisen, zonder aanpassing van het ontwerp.
- Van zowel opdrachtgeverskant als van de zijde van de opdrachtnemer is te weinig gebruik gemaakt van de structuur die Systems Engineering biedt. Hierdoor is het proces zowel voor de verschillende partijen in de combinatie als voor de opdrachtgever minder transparant geworden.
- De tijdsdruk wordt als één van de oorzaken aangevoerd waardoor het proces niet altijd verloopt zoals voorgeschreven.
- Er wordt een beperkte eisenanalyse uitgevoerd, keuzes worden beperkt vastgelegd en trade-offs worden al gemaakt zonder dat er goed inzicht is in de risico's en alle eisen.
- Daarnaast is fragmentatie nog steeds een groot struikelblok bij een goede uitvoering van de projecten. Systems Engineering heeft hier in dit project nog geen concrete oplossingen voor aangedragen.
- Bij het project A4 Burgerveen-Leiden valt op dat het project in eerste instantie als RAW-contract zou worden aanbesteed, later is dit "omgebouwd" naar een D&C-contract.
- Binnen het project is overeenstemming bereikt met de opdrachtgever over de mate waarin eisen worden aangetoond in de uitvoeringsfase. Door goed contact met de opdrachtgever heeft dit goed uitgekapt.



5.3 Casestudy A2 Zaltbommel-Maasbrug

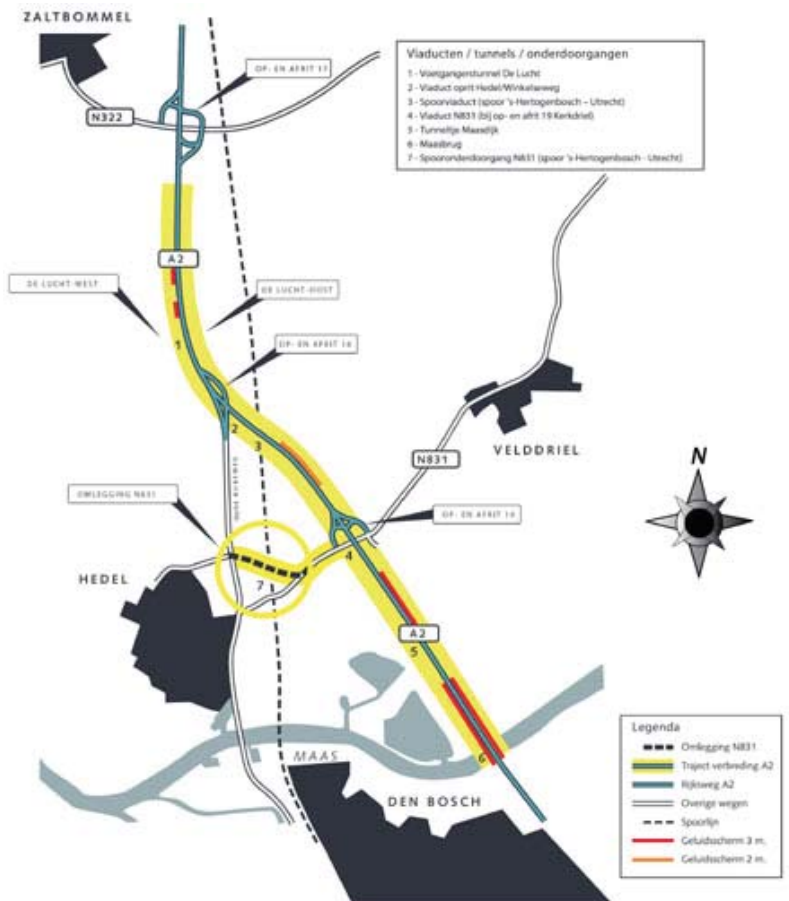
Naast de A4 Burgerveen-Leiden is de A2 Zaltbommel-Maasbrug bekeken. Dit project is volop in uitvoering. De toepassing van Systems Engineering was bij de start van het project al verder ontwikkeld dan bij de A4 Burgerveen-Leiden. Dit geeft antwoord op deelvraag II-c:

II-c Welke constatering kunnen worden gedaan en welke knelpunten kunnen worden geïdentificeerd over de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de toepassing van Systems Engineering binnen de casus A2 Zaltbommel-Maas(A2-ZaMa)(evaluatief)?

5.3.1 Beschrijving

Vanaf Zaltbommel tot en met de Maasbrug wordt de A2 verbreed van 2x2 rijstroken tot 2x3 rijstroken. Op de Maasbrug wordt de vluchtstrook omgebouwd tot derde rijstrook. De verzorgingsplaatsen De Lucht-Oost en De Lucht-West worden onder handen genomen. Bij Hedel wordt op- en afrit 18 van en naar de A2 opgeheven. Aan de zuidkant van de Maasbrug gaat de nieuwe verbrede A2 over in de rondweg 's-Hertogenbosch. Bij knooppunt Everdingen worden twee kunstwerken vervangen door viaducten met een lengte van 120 meter. Door de aanleg van een tijdelijke omleidingsweg is de combinatie in staat een groot deel van de werkzaamheden zonder hinder voor het verkeer uit te voeren. In totaal wordt 1,5 miljoen m³ grond verzet en 210.000 ton asfalt aangebracht. De grootste knelpunten in dit project liggen in de doorstroming van het verkeer en de veiligheid tijdens de werkzaamheden.

De uitvoering is in handen van BAM Wegen, BAM Civiel en Van den Berg Infrastructures. Het ontwerp wordt verzorgd door het ingenieursbureau BAM Infraconsult. Het project moet op 1 april 2010 gereed zijn.



Figuur 46: Overzicht tracé A2 Zaltbommel-Maasbrug(bron: RWS.nl)

5.3.2 Systems Engineering toepassing

1. Stakeholdersanalyse

Zoals omschreven in het stuk over A4 Burgerveen-Leiden wordt de stakeholdersanalyse niet expliciet uitgevoerd door de opdrachtnemer in het kader van Systems Engineering. Wanneer de eisen van de opdrachtgever traceerbaar waren naar de stakeholders zou een stakeholdersanalyse wel van meerwaarde kunnen zijn voor de opdrachtnemers in de bouwsector. Dit vraagt transparantie van beide partijen.

2. Eisenanalyse

- Analyseren en structureren van eisen.

Er is geen directe eisenanalyse gedaan zoals het in de SE-wijzer is omschreven. Wel is er gekeken naar de structuur van de eisen met betrekking tot detaillering van de eisen. Uit deze analyse is gebleken dat onderliggende eisen vaak niet de bovenliggende eis afdekte. In de vragenronde zijn hier vragen over gesteld. De OG zag het gebruik van onderliggende eisen als een middel bepaalde zaken die binnen een bovenliggende eis (bijvoorbeeld: veiligheid) vallen zeer nauwgezet te specificeren (bijvoorbeeld: geleiderail) en de rest van de zaken die bij dezelfde eis hoorden, vrij te laten.



- Controleren op eenduidigheid en formulering.
Deels zijn de eisen wel gecontroleerd op een SMART-formulering. Dit is afhankelijk van het deel van de organisatie die hier verantwoordelijk voor was. Een aantal hebben dat wel gedaan een aantal niet. Dit is een gevolg van de verdeling van de organisatie in verschillende ontwerporganisaties die zelf een eigen deel van het ontwerp op zich nemen.
- Overleggen met de opdrachtgever.
Er was een lijst met eisen die niet klopte. Verwijzingen van bovenliggende en onderliggende eisen kwamen niet overeen. Alle incorrecte verwijzingen zijn geïnventariseerd, overlegd en eventueel door middel van een Verzoek tot Wijziging gewijzigd. Op deze manier staat het ook voorgeschreven in de SE-wijzer. Bij eisen waar nog onduidelijkheid over bestond is geen voorbehoud opgenomen in het contract.
- Eisen verwerken en beheren.
Bij A2 Zaltbommel-Maasbrug worden de eisen beheerst in een excelbestand. Hierdoor is de structuur van de verschillende bomen slecht inzichtelijk. Ook hier ligt de nadruk op het aantonen van eisen, waardoor een excel in principe voldoende om dit te beheren.

3. Ontwerp

1. Opstellen ontwerpbasis

Ook bij A2 Zaltbommel-Maasbrug is een ontwerpbasis geschreven. De invulling hiervan is afhankelijk van de ontwerporganisatie. De risico's zijn wel in deze ontwerpbasis opgenomen. Vanwege de disciplinegerichte structuur zijn ook raakvlakken tussen de disciplines opgenomen.

2. Opstellen verificatieplan

Voor A2 Zaltbommel-Maasbrug zijn verificatieplannen opgesteld. Dit is gedaan volgens de SE-wijzer, er is alleen geen verwijzing opgenomen naar de werkpakketten. De verificatie wordt uitgevoerd door diegene die daar verantwoordelijk voor is. De ontwerpleider of de projectleider. Er is voor gekozen om alleen verificatie uit te voeren in het ontwerp en werkvoorbereiding.

3. Bedenken varianten, vergelijken en kiezen

Bij de A2 Zaltbommel-Maasbrug zijn weinig expliciete afwegingen gemaakt. Wel werden er zo nu en dan verschillende varianten opgesomd en argumenten voor en tegen. De opdrachtgever kon uit deze varianten een keuze maken. Voor het maken van deze keuzes werd geen gebruik gemaakt van de structuur en handvaten die SE biedt.

4. Uitwerken gekozen variant en vastleggen in ontwerpnota

Er is een ontwerpnota uitgewerkt voor het ontwerp. Deze ontwerpnota verwijst naar plannen met betrekking tot raakvlakmanagement en risicomangement. Ook is hier een verwijzing in opgenomen van de verificaties.

5. Uitvoeren verificatie

Bij afronding van een ontwerpfase vindt verificatie plaats volgens het verificatieplan. Verificatieresultaten worden vastgelegd in een verificatierapport, waarin per eis de volgende informatie wordt geregistreerd:

- uniek identificatienummer (eiscode);
- omschrijving eis (met eisnummer);
- verificatieresultaat (wordt wel of niet voldaan aan de eis?);
- (verwijzing naar) bewijsdocument;
- een beschrijving van de wijze waarop de relevante risico's worden beheerst;
- aanduiding van de functionaris die de verificatie heeft uitgevoerd;

Dit is onderdeel van de ontwerpverificatie zoals die in de SE-theorie wordt omschreven. Net als bij de A4 Burgerveen-Leiden zijn er geen risico's opgenomen in de verificatierapporten. Om dezelfde reden als bij de A4.

6. Controleren volledigheid

Het ontwerp is gecheckt op volledigheid. Het resultaat van het ontwerp is een uitvoeringsgereed ontwerp. Alle verificaties zijn in de ontwerpnota opgenomen.

a. SBS

De SBS is opgesteld zoals het project wordt uitgevoerd. Min of meer een WBS die is omgevormd tot een SBS. Dit werkt makkelijk voor de uitvoering, maar minder goed voor het ontwerp.



b. WBS

Zoals hierboven omschreven is de WBS gelijk aan de SBS.

5.4 Deelconclusie A2 Zaltbommel-Maasbrug

Bij de A2 Zaltbommel-Maasbrug was Systems Engineering al verder ontwikkeld. De filosofie van Systems Engineering is dus ook meer terug te vinden in de Project- en Deelkwaliteitplannen. In deze paragraaf wordt antwoord gegeven op deelvraag II-c:

II-c Welke constatering kunnen worden gedaan en welke knelpunten kunnen worden geïdentificeerd over de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de toepassing van Systems Engineering binnen de casus A2 Zaltbommel-Maas(A2-ZaMa)(evaluatief)?

Zoals gezegd is er meer van het theoretische SE-proces en de voorgeschreven methode terug te vinden bij de toepassing van SE bij het project A2 Zaltbommel-Maas. Dit is ook terug te vinden in onderstaande tabel waarin de verschillen en overeenkomsten zijn terug te vinden.

	Stakeholdersanalyse	Analyseren en structureren van eisen.	Controleren op eenduidigheid en formulering.	Eisen verwerken met de opdrachtgever.	Opstellen ontwerpbaseis	Bedenken verificatieplan	Uitwerken varianten, vergelijken en kiezen	Uitvoeren gekozen variant en vastleggen in ontwerpnota	Controleren volledigheid
A2 Zaltbommel-Maas	Komt niet overeen	Komt deels overeen	Komt deels overeen	Komt overeen	Komt overeen	Komt deels overeen	Komt overeen	Komt overeen	Komt overeen

Tabel 4: Verschillen en overeenkomsten bij A2 Zaltbommel-Maas

- Op het gebied van de systeem analyse, het maken van keuzes, is meer gedaan met Systems Engineering dan in het geval van de A4 Burgerveen-Leiden. In het Deel Kwaliteitsplan Ontwerp staat dit als volgt omschreven:

“Tijdens het ontwerpproces worden in de verschillende ontwerpfasen ontwerpkeuzes gemaakt. De Combinatie A2 Zaltbommel-Maas streeft ernaar deze ontwerpkeuzes te baseren op het reduceren van risico’s voor de ontwerp-bouw- en gebruiksfase.”

- DKP Ontwerp

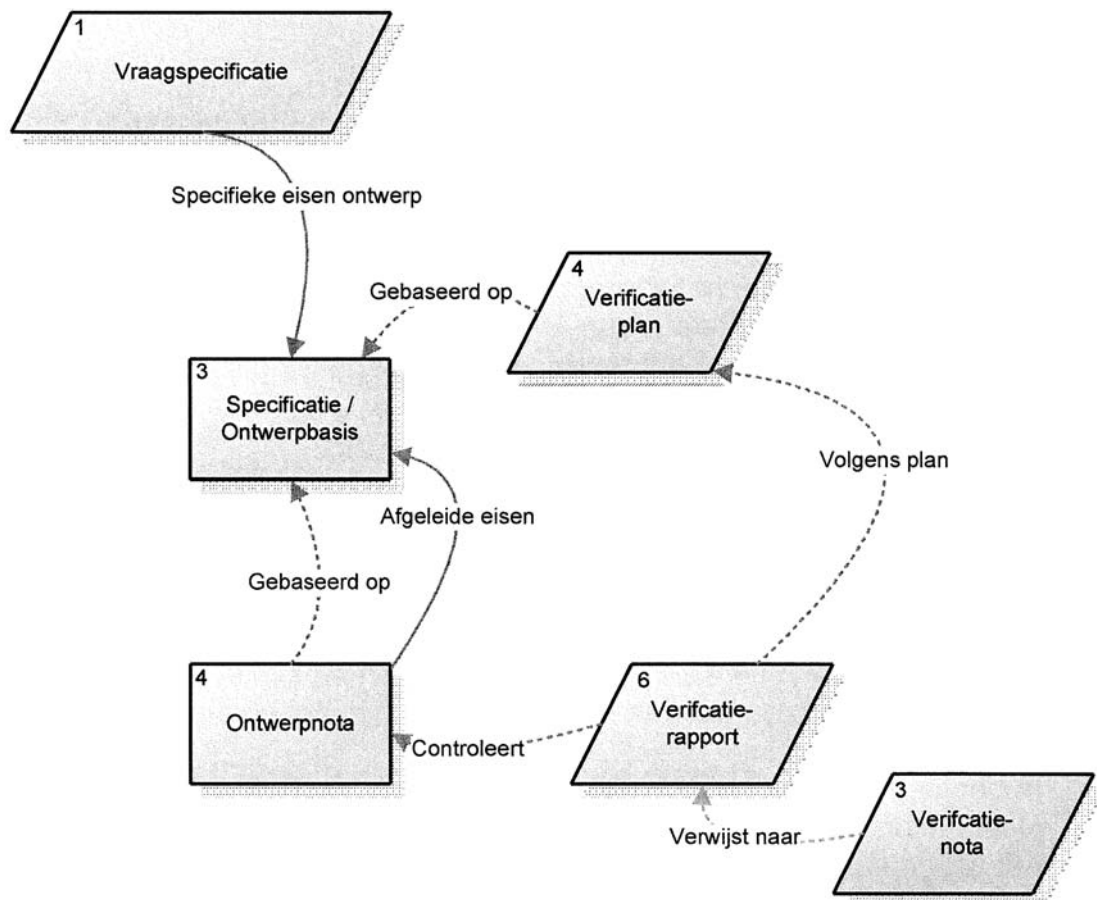
- De randvoorwaarden voor het maken van een trade-off worden vastgelegd. Hierin wordt het ontwerp omschreven van het subsysteem. In het DKP Ontwerp is dat als volgt vastgelegd:

“De ontwerpnota beschrijft hoe wordt voldaan aan de eisen gesteld in de Vraagspecificatie deel 1, de afgeleide eisen en de extra eisen. Daarnaast staat in de ontwerpnota hoe is omgegaan met relevant risico’s, raakvlakken, normen en richtlijnen die zijn geïdentificeerd in de ontwerpbaseis. Daar waar relevant wordt in de ontwerpnota naar deze zaken verwezen.”

- DKP Ontwerp



- De nadruk ligt op het proces van de ontwerpverificatie en de daarop volgende verificatie/validatie in de uitvoeringsfase.
- Zoals voorgeschreven in de SE-wijzer van de BAM wordt er gebruik gemaakt van de verificatiemethode “onderliggende eisen”. Dit terwijl de ontwerpniveau’s volgens de SE filosofie moeten worden getoetst aan het niveau waaraan ze zijn gesteld en dat de decomposities moeten worden gevalideerd en geverifieerd.
- Bij de Combinatie A2 Zaltbommel-Maas is een heldere structuur aangebracht om de eisen uit de vraagspecificatie en de eisen uit de ontwerpkeuzen te verifiëren. In onderstaande figuur is dit schema te vinden:



Figuur 47: Verificatie(DKP Ontwerp A2 Zaltbommel-Maas)

- Het grote nadeel van de A2 Zaltbommel-Maas is dat een bestaand RAW contract onder politieke druk is omgebouwd tot een D&C contract. Hierdoor is er eigenlijk al een ontwerp dat nu niet uitgeschreven is, maar verwoordt in eisen.
- De eisenboom is in korte tijd opgezet door de opdrachtgever waardoor veel fouten zijn ontstaan. Hierdoor zit er geen juiste structuur in de eisen en moest het worden behandeld als een groep losse eisen.



6 Verbetervoorstel SE-proces

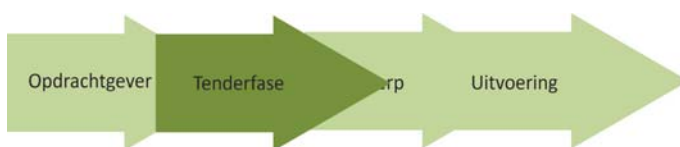
6.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is uitvoerig beschreven wat de algemene theorie is van Systems Engineering en wat de huidige toepassing is van Systems Engineering in de bouwsector. Voor de geconstateerde verschillen worden verbeterpunten aangedragen die zich voornamelijk richten op gebruik van Systems Engineering in het primaire proces. In dit hoofdstuk zullen gericht op de stappen omschreven in de theorie verbeterpunten worden aangedragen voor het toepassen van Systems Engineering de bouwsector. Het verbetervoorstel is opgedeeld in drie stukken, om te beginnen een praktische handreiking voor een verbeterde toepassing van Systems Engineering bij D&C-projecten van de BAM, dit is tot stand gekomen door een vergelijking te maken tussen de SE-wijzer en de praktijktoepassing. Vervolgens aanbevelingen voor het verbeteren van de SE-wijzer en ten slotte een kritische beschouwing van de toepassing van Systems Engineering in de bouwsector. Hierin is ook de huidige toepassing vanuit opdrachtgeverszijde meegenomen. Dit hoofdstuk moet antwoord geven op onderzoeksvraag III:

III. Welke punten kunnen op basis van de theorie en onderzoeksubjecten worden aangedragen om de toepassing van Systems Engineering in de infrasector van de BAM te verbeteren(evaluatief)?

6.2 Verbeterpunten huidige manier van werken binnen BAM

In de BAM SE-wijzer is getracht een praktische invulling te geven aan het Systems Engineeringsproces zoals het is omschreven in de Leidraad SE die is gepubliceerd door ONRI, ProRail, Rijkswaterstaat en Bouwend Nederland. Bij de start van dit onderzoek was de SE-wijzer net gepubliceerd. De onderzochte projecten waren al gestart voor publicatie van de SE-wijzer. Om te kijken hoe de werkwijze in de praktijk aansloot op de SE-wijzer zijn deze projecten toch onderzocht. In de praktijksituatie loopt men echter tegen situaties aan waar de SE-wijzer niet altijd antwoord op geeft. In onderstaand hoofdstuk worden een aantal praktische handreikingen gegeven die de praktijktoepassing kunnen verbeteren. Dit eerste gedeelte is opgesplitst in 3 delen, per fase in het bouwproces worden een aantal verbeteringen opgesomd.



In de tenderfase is het van belang de belangrijkste eisen te halen uit de vraagspecificatie. Het is onmogelijk in korte tijd alle eisen te bekijken. Hiervoor is het dus noodzakelijk om een selectie te kunnen maken. Wanneer er door de Opdrachtgever weinig structuur in de vraagspecificatie is

aangebracht is het van belang deze structuur zelf op te bouwen. Door deze structuur wordt een beter overzicht over de delen van het werk gecreëerd. Een belangrijke stap hierin is vinden van de bron van de eis. Door de bron(de directe stakeholder) van alle eisen te bepalen is het mogelijk aan de hand van de EMVI-criteria de belangrijkste eisen te definiëren. Hiervoor is het noodzakelijk een stakeholdersanalyse te maken. Door de eisen te relateren aan deze stakeholders kan worden bepaald welke stakeholders de meeste invloed hebben op het proces en welke eisen daaraan ten grondslag liggen. Daarnaast is het mogelijk de "vraag achter de vraag" te definiëren. Door terug te gaan naar de stakeholderswens kan meer oplossingsruimte worden gecreëerd. Hierbij speelt ook een functionele analyse een rol. Door te redeneren vanuit de functie wordt een breder beeld gecreëerd voor de te kiezen oplossingen. Verder is van elke eis te controleren of het mogelijk is er aan te voldoen. Dit kan door direct een verificatiefase en - methode aan te geven bij de eis. Doordat nagedacht moet worden over deze fase en methode kunnen eisen waar niet aan kan worden voldaan al in een vroeg stadium ontdekt.

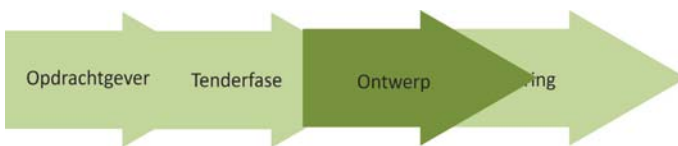


Dit leidt tot de volgende verbeterpunten:

1. Geef alle objecten een functie en probeer de eisen te traceren naar een bron, zo kan ontwerprijheid en belangrijke eisen worden gevonden.
2. Maak gebruik van de objectenboom als belangrijkste structuur voor het ontwerpproces, door deze verder uit te werken volgens de SE-methode kan voldoende detaillering worden bereikt voor inschrijving.
3. EMVI-criteria zijn vaak te herleiden naar stakeholders. Hierdoor is het mogelijk de belangrijkste stakeholders en daaruit voortkomende eisen te definiëren.
4. Geef een detailniveau aan van de eisen, zoals ook omschreven in de SE-wijzer van BAM, waardoor per tak van de boom de mate van detaillering van het ontwerp kan worden bepaald. (zie hiervoor §4.1.8)
5. Maak gebruik van de handvaten die gegeven zijn in de systeemanalyse voor het maken van keuzes en leg deze vast zodat het proces inzichtelijk blijft. Houd hier ook rekening met standaardoplossingen en leg ook van minder belangrijke eisen de procesgang vast.
6. Leg al in de tenderfase de verificatiemethode en verificatiefase van de eis vast.

EMVI-criteria

Rijkswaterstaat gebruikt het gunningcriterium Economisch Meest Voordelige Inschrijving (EMVI) om – als aanbesteder van (infrastructurele) werken, leveringen en diensten - inschrijvingen te krijgen met een optimale waarde / prijs verhouding. Bij EMVI worden naast de inschrijvingsprijs ook andere criteria gehanteerd om de winnende inschrijving te bepalen. De totale EMVI-waarde van een inschrijving wordt met een fictieve inschrijvingsprijs tot uitdrukking gebracht. Hiertoe wordt de EMVI-waarde van elk criterium uiteindelijk monetair in euro's uitgedrukt. (Handreiking EMVI, Min V&W(2006))



In het ontwerp staan valideren en verifiëren centraal. Ontwerpen is eigenlijk het uitwerken van de objectenboom. Dit gebeurt nu impliciet, er worden keuzes gemaakt voor het materiaal, de constructiewijze

en de uitvoeringsmethode. Door deze keuzes vast te leggen wordt het proces inzichtelijker en kan de bron van ontstane faalkosten worden gevonden. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat er gegeven de tijdsdruk in de bouwsector vaak meerdere activiteiten tegelijk plaatsvinden. De uitvoering is vaak al gestart voordat het ontwerp is afgerond. Een verbeterde samenwerking tussen beide partijen is dus van groot belang. Systems Engineering kan bijdragen in een verbeterde overdracht door de gedachtengang van alle partijen inzichtelijk te maken.

Bij het maken van afwegingen spelen risico's, planning en begroting een belangrijke rol, het management hiervan wordt al gedaan in de bouwsector, maar maakt nog maar gedeeltelijk onderdeel uit van het Systems Engineeringsproces. Door dit te integreren kunnen keuzes beter onderbouwd worden en eventuele gevolgen van afwijkingen direct worden getraceerd. Een transparant proces van de ontwerpkeuzes kan op zijn beurt weer leiden tot begrip bij de uitvoeringsorganisatie die de oplossingen moet realiseren. Met deze overwegingen is gekomen tot de volgende verbeterpunten:

1. Maak gebruik van de methodes die SE biedt om de objectenboom te detailleren, de systeemanalyse en het integreren van raakvlakken- en risicomangement.
2. Houd het proces inzichtelijk door gebruik te maken van gefundeerde trade-offs of leg vast waarom voor de verkorte procedure is gekozen.
3. Maak in het ontwerp gebruik van de SBS. In de uitvoering kan gebruik worden gemaakt van de WBS, die parallel loopt aan de planning.
4. Het ontwerpproces hangt sterk samen met risicomangement, planningsmanagement en raakvlakkenmanagement. Deze processen moeten dus ook in het ontwerpproces zijn geïntegreerd. Hieraan ontleent SE voor een deel zijn waarde.
5. De structuur van Systems Engineering is opgebouwd rond multidisciplinaire ontwerpteams. Een structuur met een multidisciplinaire ontwerpleider past daar beter in dan de huidige structuur.
6. Net als de opdrachtgever moet ook de opdrachtnemer de eisen op het lagere niveau valideren met de stakeholderswensen.





In de uitvoering moeten de ontworpen objecten worden gerealiseerd. De verificatie hiervan moet dan ook los gezien worden van de ontwerpverificatie. De eisen die in het ontwerp aan het object zijn toegekend zijn in de

ontwerpverificatie geverifieerd en opgenomen in tekeningen en andere documenten. In de uitvoering moet getoetst worden of de gerealiseerde oplossing ook voldoet aan wat is omschreven. Hiervoor worden de gerealiseerde objecten getoetst aan de documenten. Daarbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen ontwerp-eisen en uitvoeringseisen. Wel staan er in de huidige vraagspecificaties vaak verificatievoorschriften die worden gezien als eisen. Hier is een duidelijk onderscheid in. Eisen horen bij objecten en zeggen iets over het object. Een voorbeeld hiervan is de stroefheid van het asfalt. Hierover zijn meerdere eisen opgenomen, waarvan één de stroefheid voorschrijft en de ander een meting voorschrijft na realisatie. De tweede is eigenlijk een verificatievoorschrift voor de verificatie van de eerste eis. Hier moet duidelijk onderscheid in gemaakt worden, maar de eis moet wel in beide fasen worden geverifieerd. De realisatie van de objecten loopt parallel aan de activiteiten die omschreven zijn in de *Work Breakdown Structure* (WBS), een logische keuze zou dan ook zijn de ontwerpverificatie in de SBS uit te voeren en de verificatie in de realisatiefase over de WBS. Deze WBS kan tevens gebruikt worden voor de controle van het systeem. Deze structuur is opgebouwd uit activiteiten met bekende input (planning, begroting en risico's) en kan zodoende worden vergeleken met de gerealiseerde output.

Verbeterpunten voor de uitvoering:

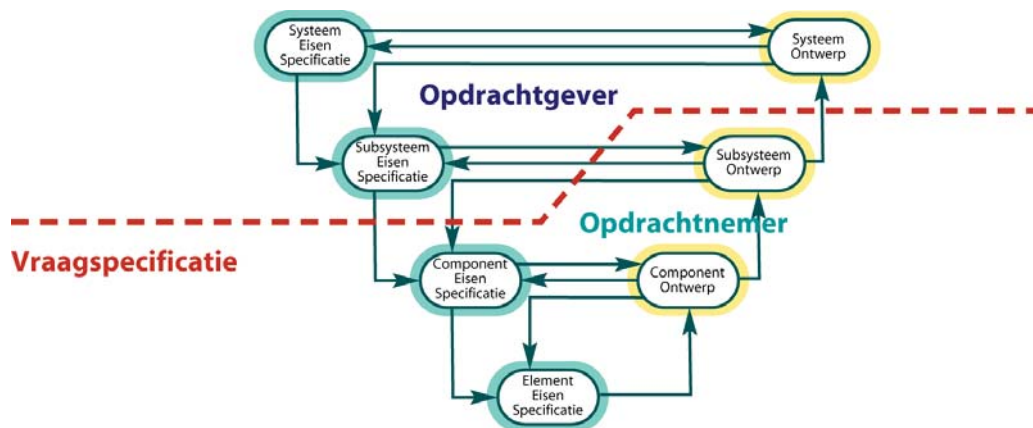
1. Maak onderscheid tussen de ontwerpverificatie en de verificatie in de realisatiefase. Dit maakt het proces inzichtelijker.
2. Voer de verificatie in de uitvoeringsfase uit door de eisen te relateren aan de WBS structuur.
3. Maak onderscheid tussen proceseisen en eisen aan objecten. Voorbeeld stroefheid: stroefheidseis en meting.
4. Gebruik de WBS als structuur voor het managen van het systeem met als belangrijkste factoren de eisen, planning, begroting en de risico's.
5. Laat het proces in de uitvoering begeleiden door een Systems Engineer die overzicht heeft over het totale project en zondig kan bijsturen.

6.3 Verbeterpunten opdrachtgever in de bouwsector



De Opdrachtgevers in de bouw initiëren de contracten en zijn dus een belangrijke schakel in de toepassing van Systems Engineering in de bouwsector. De overdracht van het contract speelt daarin een belangrijke rol. De gemaakte keuzes en decomposities in de Voorontwerpfase moeten duidelijk zijn terug te vinden in de vraagspecificatie om een goede overdracht te kunnen waarborgen. Wanneer helder in het contract is terug te vinden tot welk niveau de Opdrachtgever heeft ontworpen kan de Opdrachtnemer vanuit dat punt verder ontwerpen. De daarvoor gemaakte keuzes zijn inzichtelijk en van elke eis is zichtbaar waarom deze is opgenomen en wie de eis heeft geïnitieerd. Vaak zijn de huidige contracten nog onvoldoende doorzichtig op dit vlak. Hierdoor is het voor de Opdrachtnemer lastig gebruik te maken van de ontwerp-vrijheid die D&C-contracten beogen. Door de grote hoeveelheid aan eisen in de vraagspecificatie heeft de opdrachtnemer in de aanbestedingsfase al de handen vol aan het kunnen aantonen dat aan al deze eisen kan worden voldaan. Daarnaast wordt de Opdrachtnemer nog gedwongen om de eisen uit de vraagspecificatie te valideren. Deze bevat vaak tegenstrijdige en incomplete eisen. Wanneer de opdrachtgever een ontwerp-slag doet, voor aanbesteding van het contract, moet de Opdrachtgever de verantwoordelijkheid nemen over deze ontwerp-slag en dus ook een validatie van de eisenbasis uitvoeren. Wanneer deze ontwerp-slag helder in het contract is opgenomen kan de opdrachtnemer hier goed inspelen in het uitwerken van een Definitief of Uitvoerings Ontwerp. Tevens wordt hierdoor een juiste toepassing van Systems Engineering gestimuleerd.

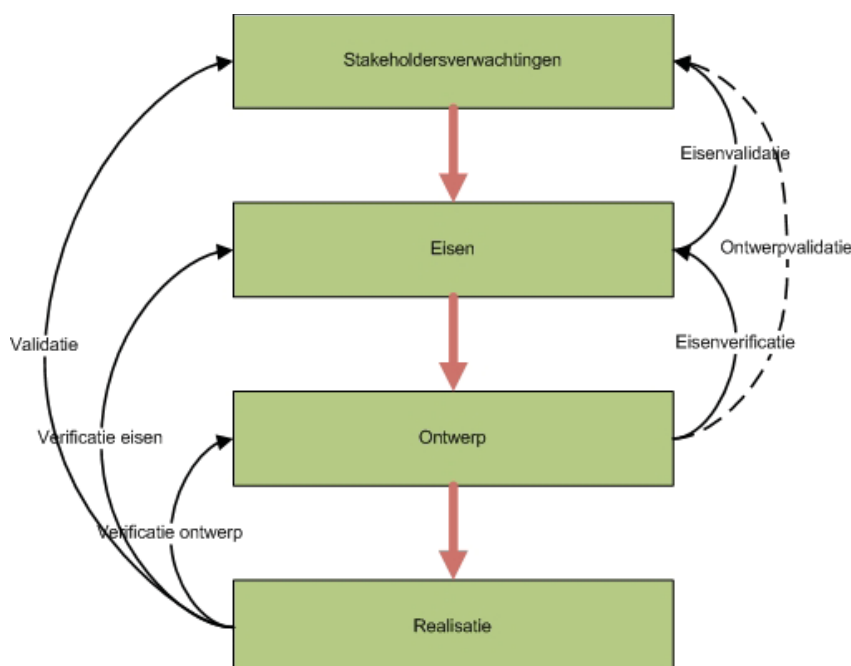
Een belangrijke stap hierin is het op de juiste manier toepassen van decomposities. Juist de opbouw van deze decomposities in de bouwsector leidt nog vaak tot verwarring. Het ontwerpen van een systeem loopt parallel aan het maken van een eisenboom, functieboom en objectenboom. Zoals ook genoemd in paragraaf 4.1.8 bepaald het niveau van de objectenboom het niveau van het ontwerp. In de Leidraad Systems Engineering wordt het overdragen van een ontwerp op de juiste manier weergegeven:



Figuur 48: Overdracht ontwerp(Leidraad SE)

In deze illustratie heeft de opdrachtgever het systeem bepaald en de eerste stap van het 2e niveau gedaan, de eisenanalyse. Dit is een heldere manier van het overdragen van het ontwerp. De Opdrachtgever is verantwoordelijk voor de keuzes gemaakt om tot het systeem te komen en de Opdrachtnemer voor de overige keuzes in het ontwerp. De eisen en keuzes moeten in dat geval wel traceerbaar en transparant zijn voor beide partijen. In de huidige contracten is deze transparantie vrij beperkt. Door een transparant proces kan ook een duidelijk traceerbare verdeling van risico's plaatsvinden. De opdrachtgever kan dit doen door de verantwoordelijkheid te nemen voor dat deel waar voor een objectenboom is opgesteld. De verdere uitwerking van de objectenboom gebeurt onder verantwoordelijkheid van de Opdrachtnemer.

Daarnaast moet er meer onderscheid gemaakt worden tussen verificatie en validatie. Onderscheid tussen verificatie en validatie is van belang om de methode voor alle partijen begrijpelijk te houden en te maken. Het meerdere malen verifiëren maakt het SE-proces nu vaak complex en onderzichtig. Door de stapsgewijze opbouw en de verschillende vaststellingen wordt het proces duidelijker. Dit vraagt ook een extra inspanning van de opdrachtgever, die de eisenbasis moet valideren. Hierdoor wordt het voor de Opdrachtnemer overzichtelijker aan welke eisen moet worden voldaan en wordt voorkomen dat de vraagspecificatie tegenstrijdige eisen bevat. Door de toenemende structuur wordt de traceerbaarheid en transparantie van het proces vergroot. In onderstaand figuur staan de verschillende soorten verificatie en validatie nogmaals geïllustreerd.



Figuur 49: Verificatie en validatie(Katsonov(2008))



De Opdrachtgever heeft een belangrijke rol in het Systems Engineeringsproces. Zij kunnen het proces sturen middels de vraagspecificatie. Nu is het vaak zo dat de huidige projecten al vaak liepen alvorens Systems Engineering werd geïntroduceerd en voor een aantal projecten geldt voor de invoering van innovatieve contracten. Hierdoor zijn RAW-contracten omgebouwd naar D&C-contracten en bestekken omgeschreven naar functionele specificaties. Hierdoor komt het vaak voor dat eisen al een vrij gedetailleerde oplossing impliceren. Daar komt bij dat de Opdrachtgevers in de publieke sector zijn gebonden aan regelgeving voor het verkrijgen van een tracébesluit. Voor het verkrijgen van dit besluit is een gedeeltelijk ontwerp nodig, waardoor ontwerpruimte wordt beperkt. Ondanks deze beperkingen is het mogelijk de opdrachtnemers meer ontwerpvrijheid te geven. Een belangrijke stap hierin is het traceerbaar houden van de eisen in de vraagspecificatie naar de directe bron. Hierdoor kunnen de Opdrachtnemers inzicht krijgen in de gedachtegang van de betreffende actor. Daarnaast is het ook voor de Opdrachtgever van belang het proces transparant te houden. Ontwerpbeslissingen die al zijn genomen kunnen naar de Opdrachtnemer worden gecommuniceerd met de overwegingen die aan deze keuze ten grondslag liggen.

Door structureel vanuit de stakeholderswensen te formuleren en ontwerpbeslissingen inzichtelijk te maken worden de Opdrachtnemers meer gestimuleerd gebruik te maken van de methode Systems Engineering. Daarnaast stimuleert transparantie ook meer openheid bij de Opdrachtnemers.

Uitgaande van de huidige toepassing kan de Opdrachtgever het opstellen van de vraagspecificatie verbeteren door de volgende verbeterpunten in acht te nemen:

1. Ga op zoek naar de vraag achter de vraag van de stakeholders. Een voorbeeld hiervan is de volgende eis van een milieuorganisatie: "Geen toepassing van loodhoudende geleiderail". Deze eis komt voort uit de wens van stakeholder om het milieu niet extra te belasten. De eis impliceert een toepassing van geleiderail, daar waar de Opdrachtnemer ook een innovatieve oplossing kan toepassen met dezelfde functionaliteit als een geleiderail.
2. Maak alle eisen in de vraagspecificatie traceerbaar naar de directe bron, de stakeholder die een direct belang heeft bij het opnemen van de eis in de vraagspecificatie.
3. Neem de verantwoordelijkheid over het deel van het ontwerp dat al is gemaakt en laat zien hoe tot dat ontwerp is gekomen. Laat duidelijk zien tot welk niveau is ontworpen en welke keuzes al genomen zijn.
4. Valideer eisen bij decomponeren naar een lager niveau. Hierdoor worden conflicterende eisen en overbodige eisen geëlimineerd.
5. Stap af van vaste contracten met leveranciers. Hierdoor wordt de keuze voor de aannemer beperkt.

6.4 Verbeterpunten overname van theorie in de bouwsector



De methode Systems Engineering zoals die is overgenomen in de bouwsector is een interpretatie van de theorie uit de andere sectoren waar al langer van Systems Engineering gebruik wordt gemaakt. Uit deze theorie is een groot deel overgenomen en een groot deel is wel opgenomen in de beschrijvingen van Systems Engineering in de bouwsector, maar wordt niet op de juiste manier toegepast. In deze paragraaf zal een toelichting worden gegeven van de stapsgewijze toepassing van Systems Engineering, zoals omschreven in hoofdstuk 3, in de bouwsector. Hiervoor wordt de stap toegelicht op basis van de situatie in de bouwsector, er worden verbeterpunten aangedragen en er zal per stap een voorbeeld worden gegeven. Deze paragraaf tracht een overzicht te geven van de mogelijkheden voor een bredere toepassing van Systems Engineering in de bouwsector.

6.2.1 Eisenanalyse

De eisenanalyse is een belangrijk onderdeel van het Systems Engineeringsproces. Deze stap moet dan ook zorgvuldig worden uitgevoerd om te voorkomen dat uiteindelijk niet kan worden voldaan aan de wensen van de klant. Hiervoor is het noodzakelijk op elk niveau van het systeem de stakeholders te identificeren. Dit onderdeel wordt op het hoogste niveau vaak gedaan door de opdrachtgevers, maar kan ook op lagere niveau's worden toegepast. Om te voorkomen dat eisen in de eisenbasis conflicteren is het noodzakelijk eisen met elkaar af te wegen. Het komt vaak voor dat verschillende actoren verschillende belangen hebben die het nodig maken eisen bepaalde waarde mee te geven, waardoor prestatie-eisen ontstaan. Door dit structureel uit te voeren kunnen eisen worden getraceerd naar de bron(stakeholder). Hiervoor is het van belang de gemaakte keuzes te traceren. Waarom is er voor gekozen een eis op te nemen? Hierdoor wordt het voor de opdrachtnemers mogelijk alternatieven aan te dragen. De keuze voor een geluidscherm kan door een innovatieve opdrachtnemer anders worden opgelost met eenzelfde resultaat voor de stakeholder.

Verbeterpunten

1. Voer bij elke decompositie een eisenanalyse uit waarin alle relevante stakeholders zijn genomen.
2. Maak alle eisen traceerbaar van de directe bron van waaruit deze volgt.

Voorbeeld Stakeholdersanalyse

De opdrachtgever heeft gekozen voor het kruisen van de hoofdvaart met een tunnel, maar heeft de uitvoering hiervan overgelaten aan de opdrachtnemer. Na zorgvuldige toepassing van Systems Engineering heeft de aannemer gekozen voor een open bouwput. Voor de methode van het aanbrengen van de damwand zullen de actoren moeten worden geïnventariseerd. De omwonenden, leverancier enz. zijn bepalend voor de gekozen methode. Voor het maken van een keuze moet ook op dit niveau een stakeholdersanalyse worden uitgevoerd.

6.2.2 Eisenvalidatie

De validatie zoals het wordt juist weergegeven in de verschillende illustraties en geformuleerd:

“Validatie = Hebben we het juiste gebouwd?”

-BAM SE-wijzer

Dit is een correcte omschrijving van het principe van validatie. Echter in de vorm zoals het nu wordt toegepast is het niet van meerwaarde voor het ontwerpen van een systeem. Achteraf is het immers niet mogelijk om het gebouwde aan te passen zonder kosten te maken. Het controleren van de afleiding van eisen vanuit de stakeholderswens moet kunnen voorkomen dat op het laagste niveau niet kan worden voldaan aan de wensen van de diverse stakeholders. Dit kan tevens op elk niveau worden gecontroleerd.

Verbeterpunten

1. Controleer de verkregen eisenbasis op volledigheid. Zorg dat de wensen van alle betrokken stakeholders hierbij zijn meegenomen.
2. Controleer de eisenbasis op conflicterende eisen. Conflicterende eisen moeten met elkaar afgewogen volgens het proces dat is beschreven in de System Analyse.
3. Plaats de eisen in het juiste perspectief. Eisen aan grondstoffen zijn niet direct relevant bij de keuze voor de oplossing voor het totale systeem. In de eisenbasis voor de keuze van het totale systeem moeten detaileisen worden weggelaten indien niet relevant voor de te kiezen alternatieven.



Voorbeeld Eisenvalidatie

De waterschappen(stakeholders) hebben de wens uitgesproken dat er vanwege de bijzondere flora en fauna niet direct boven het water mag worden gebouwd. De opdrachtgever vertaald dit in de eis dat de gekozen brug een minimale hoogte van 3 m boven het wateroppervlakte mag hebben, maar neemt geen eis op met betrekking tot de plaatsing van de brugpeilers. Tijdens de validatie wordt ontdekt dat de afleiding van de eisen niet compleet is.

6.2.3 Functioneel ontwerp

Het maken van een functioneel ontwerp is van belang om te voorkomen dat de keuze wordt beperkt. Door de functies achter een object te onderkennen wordt de ontwerpvrijheid vergroot. Vaak wordt de meerwaarde alleen gezien op hoge niveau's, zoals de functie: "Kruisen Vaarweg". Toch kan het ook op lagere niveau's van waarde zijn. Een enkel schroefje heeft de functie van verbinden. Komt dit enkele schroefje velen malen voor in het ontwerp dan kan het zijn dat er voor dit schroefje een andere goedkopere of duurzamere oplossing is die dezelfde functie kan vervullen.

Daarnaast is het toekennen van functies aan een object onderdeel van een afwegingen proces. Het object hoeft niet per definitie alle functies te vervullen die hem kunnen toebedeeld. De functie "scheiden verkeersstromen" kan in sommige gevallen de functie "geleiden verkeer" doen vervallen. Deze afweging wordt gemaakt tijdens het functioneel ontwerp, mede door het alloceren van de eisen uit de eisenbasis.

Verbeterpunten

1. Voer voor belangrijke onderdelen een functionele analyse uit. Deze analyse zorgt voor een bredere kijk op het probleem.
2. Maak verschillende samenstellingen van functies. De keuze voor deze samenstelling bepaald de uiteindelijke alternatieven en moet dus zorgvuldig gebeuren.

Voorbeeld Funtioneel ontwerp

De opdrachtgever heeft gekozen voor een beweegbare brug vanwege de wens van onbeperkte doorvaarthoogte. De opdrachtnemer kent verschillende functies toe aan deze brug: Openen dek, dragen verkeer en scheiden verkeersstromen. Het openen van het dek kan met een basculebrug, een draaibrug enz. De opdrachtnemer heeft echter een innovatieafdeling die komt met een opvouwbrug, die dezelfde functie kan vervullen.

6.2.4 Functionele verificatie

In de functionele verificatie is van belang om te bekijken of de decompositie naar functies op de juiste manier is uitgevoerd. elk object dat gekozen is als uiteindelijke functievervuller op een hoger niveau dan het laagste heeft meerdere functies. In de functionele analyse zijn deze functies bepaald en in verschillende samenstellingen met elkaar afgewogen. Om te voorkomen dat te veel functies zijn opgenomen of juist te weinig wordt het functioneel ontwerp geverifieerd. Het is goed om onderscheid te maken in de verschillende vormen van validatie en verificatie. Het verifiëren van het functioneel ontwerp is een andere vorm van verifiëren dan de ontwerpverificatie.

Verbeterpunten

1. Controleer de functionele decompositie op volledigheid. Dit voorkomt dat het object functionaliteiten mist die wel door de stakeholders zijn aangegeven
2. Contoleer de functies op tegenstrijdigheden en vertaal deze indien nodig in prestatie-eisen.



Voorbeeld Functionele verificatie

De opdrachtnemer heeft een object “Wegvak C”, hij voert netjes de functionele decompositie uit en kent een aantal functies toe aan de weg: “Dragen verkeer”, “Geleiden verkeer”, “Afvoeren water” en “Zichtbaar houden weg”. Bij de functionele verificatie komt aan het licht dat het object “Wegvak C” ook de functie heeft “Voorkomen persoonlijk letsel”, voortkomend uit wensen van de actor Veilig Verkeer Nederland.

6.2.5 Synthese

In de synthese wordt het uiteindelijke fysieke object bepaald. Dit proces vindt in de bouwsector al plaatst alleen vaak niet op basis van de methode Systems Engineering. Hiervoor worden alternatieve concepten gegenereerd die de geverifieerde functie kunnen vervullen. Deze alternatieven worden in de Systeem analyse met elkaar afgewogen (zie §6.2.8). De gegenereerde alternatieven houden rekening met de eisen uit de eisenbasis. In de standaard IEEE1220 wordt dit als volgt omschreven:

Synthesis translates the functional architecture into a design architecture that provides an arrangement of system elements, their decomposition, interfaces (internal and external), and design constraints. The activities of synthesis involve selecting a preferred solution or arrangement from a set of alternatives and understanding associated cost, schedule, performance, and risk implications.

- IEEE1220

Hierin wordt duidelijk omschreven wat er wordt verwacht van het SE-proces gedurende het omzetten van een functie in een object. Met het uitvoeren van deze analyse kan de meest efficiënte en effectieve oplossing worden geselecteerd. Bij belangrijke beslissingen moet een volledige analyse worden uitgevoerd, bij kleine afwegingen kan worden volstaan met het aangeven waarom geen volledige analyse is uitgevoerd. Bij het genereren van oplossingen moet rekening worden gehouden met nieuwe innovatieve mogelijkheden, maar ook met standaardoplossingen die direct voor handen zijn.

Verbeterpunten

1. Maak gebruik van de handvaten die Systems Engineering biedt om functies om te zetten in alternatieven.
2. Houd rekening met verschillende mogelijkheden bij het genereren van alternatieven: standaard oplossingen en nieuw te ontwerpen oplossingen.
3. Vermeld bij een directe keuze voor een oplossingen de reden voor het niet uitvoeren van een volledige analyse.

Voorbeeld Synthese

De opdrachtnemer moet een oplossing gaan zoeken voor de functie “geleiden verkeer”. Hij heeft hiervoor een aantal alternatieven: De standaard geleiderail, een nieuw soort geleiderail van de vaste leverancier en hij heeft zelf een innovatieve oplossing gegenereerd die dezelfde functie vervuld: Een opblaasbare geleiderail die wordt geactiveerd als er over een bepaald gedeelte van de weg wordt gereden. Alle drie de alternatieven voldoen aan de eisen en kunnen de functie vervullen. Voor alle alternatieven wordt een RAMS-analyse gemaakt en risico's, planning en budget bepaald. Deze input wordt in de systeem analyse met elkaar afgewogen. Vanwege de grote risico's van het innovatieve plan wordt uiteindelijk gekozen voor de nieuwe soort geleiderail.



6.2.6 Ontwerpverificatie

De ontwerpverificatie wordt op dit moment als het belangrijkste onderdeel gezien van het Systems Engineeringproces in de bouwsector. Dit onderdeel is in de afgelopen jaren steeds verder ontwikkeld. Hierbij wordt veelal aangelopen tegen de beperkte structuur en transparantie die er op dit moment is. Bij verdere ontwikkeling van Systems Engineering tot primaire methode van ontwerpen worden de problemen, die nu worden ervaren, ondervangen. Echter ook hier is het van belang onderscheid te maken tussen ontwerpverificatie en verificatie en validatie in de uitvoering. Nu wordt er onderscheid gemaakt tussen ontwerp en werkvoorbereiding. In de werkvoorbereiding worden plannen geschreven voor de uitvoering van verschillende objecten, in deze plannen worden de methode voorgeschreven voor de verificatie en validatie van de eisen in de realisatiefase.

Verbeterpunten

1. Verifieer het ontwerp met eisen gesteld aan objecten. Proceseisen worden niet gesteld aan objecten.
2. Ontwerpen is het uitwerken van de objectenboom, de eisen die voortkomen uit de klantwens moeten geverifieerd worden aan het niveau van het object.

Voorbeeld Ontwerpverificatie

De ontwerpleider heeft een ontwerpkeuze gemaakt. Om te kijken of hiermee wordt voldaan aan de functie en de eisenbasis wordt een verificatie uitgevoerd. Hiermee wordt het ontwerp goedgekeurd. De uitvoering van het ontwerp wordt door de werkvoorbereiding toegelicht en de realisatie wordt geverifieerd met het ontwerp. Het controleren van eisen in de realisatie wordt validatie genoemd.

6.2.7 Control

Het controlproces is het centrale proces van het SE-proces. Hieronder vallen zaken als raakvlakkenmanagement, risicomangement en planningsmanagement. Dit zijn zaken die voor de invoering van Systems Engineering ook al werden gedaan. Toch is dit een belangrijk onderdeel. De keuzes die gemaakt worden om het systeem naar een lager niveau te ontwerpen worden op basis gemaakt van de input van de deelprocessen van het controlproces. In die zin zijn ze input van de systeem analyse (zie §6.2.8). Een belangrijk aspect hiervan is dat deze processen ook als onderdeel van het primaire proces worden behandeld. Door integrale afwegingen te maken op basis van de juiste input kan voorkomen worden dat achteraf tegen hogere kosten wordt aangelopen.

Verbeterpunten

1. Integreer onderdelen als risicomangement, raakvlakkenmanagement en planningsmanagement in het Systems Engineeringproces. De resultaten hiervan zijn input voor de keuzes die in de systeemanalyse worden gemaakt.
2. Zet Systems Engineering centraal in het projectmanagement. Het controlproces is daar een centraal onderdeel van.

Voorbeeld Control

Naast risicomangement, raakvlakkenmanagement en planningsmanagement wordt ook configuratiemanagement uitgevoerd. Bij afronding van het project wordt het gerealiseerde object gecontroleerd op afwijkingen van de specificaties. Tijdens de realisatie wordt de status van de afwijkingen gecontroleerd door middel van audits.



6.2.8 Systeem analyse

De systeem analyse is een centraal onderdeel van het SE-proces om het systeem tot een lager niveau te ontwikkelen. In dit proces worden eisen, functies en concepten met elkaar afgewogen. In de praktijk worden voor grote beslissingen al trade-offs van verschillende concepten gemaakt. Voor de traceerbaarheid is het echter van belang alle keuzes vast te leggen. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van een verkorte procedure voor kleine keuzes. Dit kan bijvoorbeeld worden vastgelegd door aan te geven dat geen uitgebreide trade-off wordt gemaakt, met daarbij een korte argumentatie. Dit vraagt transparantie van zowel opdrachtgever als opdrachtnemer.

Verbeterpunten

1. Maak afwegingen voor eisen, functionele decomposities en alternatieven en leg deze keuze vast in een trade-off.
2. Leg vast waarom geen gebruik is gemaakt van een trade-off.
3. Maak afwegingen op basis van kosten, risico's, planning en de life cycle.

Voorbeeld Systeem analyse

De ontwerpleider heeft in de synthese verschillende alternatieven gegenereerd. Van alle alternatieven zijn de risico's, planning en budget bepaald. In de systeem analyse worden de alternatieven beoordeeld op efficiëntie en effectiviteit. Hierin worden niet alleen de kosten, risico's en planning meegenomen, maar ook de levenscyclus en de gevolgen voor het milieu.



7.1 Inleiding

Het vorige hoofdstuk heeft geresulteerd in een verbetervoorstel, dat voortgekomen is uit een vergelijking van het theoretisch (hoofdstuk 3) en het huidige (hoofdstuk 4 en 5) Systems Engineeringproces. Door integratie van beide onderdelen, wordt verwacht dat een haalbare implementatie van de procesbeschrijving mogelijk zal zijn. Of dit ook daadwerkelijk zo is en of dit ook in de praktijk succesvol blijkt te zijn, zal nog moeten blijken. Om hierover meer duidelijkheid te krijgen, is in het kader hiervan als afsluitend onderdeel een expert meeting georganiseerd. Het centrale thema zal zijn:

Systems Engineering als primair ontwerpproces in plaats van alleen methode voor het aantonen van eisen, haalbaar of niet?

In de expertmeeting wordt eerst een toelichting gegeven op het onderzoek. Dit is gedaan in de vorm van een presentatie waarin de bevindingen gedaan in het onderzoek zijn toegelicht. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van de experts is de presentatie per mail verzonden. Er zijn aan het expertpanel 8 stellingen voorgelegd. Deze stellingen komen voort uit het onderzoek en worden kort toegelicht om te voorkomen dat er een verschillen van interpretatie kan optreden. De experts wordt gevraagd commentaar te geven op deze stellingen. Uit dit commentaar kan een bevestiging of een afkeuring komen van de stelling. Daarbij moet worden opgemerkt dat in de presentatie de stellingen met vraagteken een negatieve bevestiging zoeken. De presentatie is te vinden in bijlage B. Dit hoofdstuk moet antwoord geven op centrale vraag IV:

IV. In hoeverre is implementatie van de verbeterde procesbeschrijving uit centrale vraag III haalbaar in de bouwsector(evaluatief)?

7.2 Opbouw expertmeeting

De virtuele expertmeeting wordt vooraf gegaan aan een presentatie van de resultaten van het onderzoek. Deze presentatie geeft de experts een beeld van de resultaten van het onderzoek. Op basis van deze resultaten wordt de experts gevraagd op deze bevindingen te reageren.

Introductie: In de presentatie wordt ingegaan op de achtergrond van het onderzoek. Tevens wordt de ondervraagden gevraagd iets te vertellen over hun achtergrond. Hier wordt tevens gevraagd naar de ervaring met Systems Engineering.

Presentatie: Daarop volgt de presentatie waarin het onderzoek wordt toegelicht. Hierin is in het kort het onderzoek aan de respondenten gepresenteerd en zijn de resultaten uit het onderzoek aan de respondenten voorgelegd. Vervolgens is middels een aantal stellingen de belangrijkste conclusies uit het onderzoek voorgelegd.

Discussie: Tot slot is aan de hand van een aantal stellingen een discussie opgestart met als doel te valideren in hoeverre de praktische verbeterpunten volgens de respondenten in de expertmeeting toepasbaar is in de praktijk en overeenkomt met de werkelijkheid.

7.3 Resultaten expertmeeting

In de expertmeeting zijn een aantal experts geraadpleegd. In de presentatie worden deze stellingen toegelicht. Hierbij moet worden opgemerkt dat de stellingen in de vragende vorm naar een negatieve bevestiging zoeken. De experts is gevraagd op deze stellingen te reageren. Hier zullen de resultaten van deze consultatie worden samengevat. De volledige resultaten van de expertmeeting zijn te vinden in bijlage C. In onderstaand overzicht is de stellingname van de experts te zien en een samenvatting van de opmerkingen die de experts hierbij hebben geplaatst. Ten slotte zal een conclusie worden verbonden aan de validatie van de stellingen.



Stelling 1:

“De opdrachtgever moet de eisenbasis die wordt aangeleverd in de vorm van de vraagspecificatie valideren.”

Toelichting:

In veel gevallen bevat de vraagspecificatie tegenstijdige eisen die vanuit meerdere bronnen afkomstig zijn. Hierdoor is het voor de ON onmogelijk een ontwerp te maken dat binnen deze oplossingsruimte valt. Door de vraagspecificatie structureel vanuit de SE-methode uit te werken kan dit worden voorkomen en kan een gevalideerde eisenbasis worden aangeleverd.

Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	ja	
2	ja	
3	ja	
4	ja	
5	ja	Afhankelijk van het niveau van de vraagspecificatie
6	ja	
7	ja	
8	ja	
9	ja	
10	ja	

De ondervraagden zijn het met deze stelling eens, maar er wordt wel geconstateerd dat dit een behoorlijke inspanning vraagt van de Opdrachtgevers. Daarnaast wordt opgemerkt dat dit tevens afhankelijk is van het niveau van detaillering in de vraagspecificatie. In veel van de huidige gevallen heeft de opdrachtgever al een deel van het ontwerp gemaakt en is hij dus ook verantwoordelijk voor de validatie van de eisendecompositie die bij dit ontwerp hoort. Worden er alleen eisen geformuleerd op een hoog niveau, dan is de Opdrachtnemer verantwoordelijk voor validatie van zijn zelf verkregen eisenbasis. Veel van de ondervraagden zien wel een meerwaarde in het valideren van de vraagspecificatie door de opdrachtgever. Met name om te voorkomen dat tegenstrijdigheden ontstaan tussen de eisen uit de vraagspecificatie onderling en in relatie tot de bindende documenten. Vaak wil de Opdrachtgever zelf geen keuze maken bij aanwezigheid van tegenstrijdige eisen van verschillende stakeholders.

Stelling 2:

“Systems Engineering is een ontwerpmethode geen secundair proces voor het aantonen van eisen.”

Toelichting:

In de huidige toepassing wordt SE vooral gebruikt voor het aantonen van eisen uit de vraagspecificatie. Hierdoor wordt SE vooral als een administratieve methode ervaren die weinig meerwaarde biedt ten opzichte van de voorgaande werkwijze. Door structureel gebruik te maken van SE in de ontwerpfase en realisatiefase kunnen faalkosten worden voorkomen.



Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	ja	
2	ja	Maar meer dan een ontwerpmethodie
3	ja	
4	ja	Maar meer dan een ontwerpmethodie
5	nee	SE is ondersteunend aan het primaire proces
6	ja	
7	nee	SE is een vorm van projectmanagement
8	deels	SE is een geïntegreerde ontwerp- en projectmanagementmethodiek
9	deels	SE is een geïntegreerde ontwerp- en projectmanagementmethodiek
10	ja	Afhankelijk van de fase van het project

Over stelling 2 is meer verdeeldheid. Dit heeft voornamelijk te maken met de nauwe formulering van de stelling. Het doel van deze stelling was te toetsen of de experts de constatering, dat Systems Engineering nog onvoldoende in het primaire proces is verankert, deelden. De resultaten van de stelling geven nu een verdeeld beeld echter de strekking van de antwoorden is gelijk. Systems Engineering combineert een geïntegreerde ontwerpmethodie met het projectmanagement. Op dit moment wordt het nog vooral ingezet als contractbeheersingsmiddel bij UAVgc-contracten, om de doelmatigheid en rechtmatigheid te toetsen. Er wordt wel opgemerkt dat SE in de huidige toepassing met hoge detaillering in de vraagspecificatie nog onvoldoende ruimte biedt voor een bredere toepassing.

Stelling 3:

“Eisen moeten worden gekoppeld aan hetzelfde niveau in de objectenboom als het niveau van de eis.”

Toelichting:

In de huidige toepassing wordt de objectenboom slechts beperkt gedetailleerd, bouwstofeisen worden op hetzelfde niveau gekoppeld als prestatie-eisen, hierdoor is er slechts beperkte structuur aanwezig. Door van de eisen het niveau te kenmerken kan dit worden ondervangen. Het uitwerken van de objectenboom is ook eigenlijk het verder uitwerken van het ontwerp tot aan het uitvoeringsontwerp(UO).

Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	ja	Alleen bij complexe projecten
2	ja	
3	deels	Geen uitgebreidere objectenboom, maar een label dat het niveau van de eis aangeeft
4	ja	Ontstaat bij juiste toepassing vanzelf
5	ja	
6	ja	Indien het het proces niet onnodig complex maakt
7	ja	
8	ja	
9	ja	Geen vast gegeven
10	ja	

Over stelling 3 is vrijwel iedereen het eens. In de theoretische benadering van Systems Engineering worden de eisen naarmate het ontwerp vordert verder gedetailleerd. Daarbij wordt wel opgemerkt dat dit alleen nuttig is bij grote complexe projecten. De extra tijd die nodig is om de eisen af te leiden moet wel opwegen tegen de voordelen van deze verdere specificatie van het ontwerp.

De koppeling van eisen zoals dit hier gechargeerd wordt genoemd komt voort uit het gebruik van ICT om het proces te structureren. Wanneer er volledig volgens SE wordt ontworpen dan vloeien eisen voort uit functies, waarbij de eis de kwaliteit van de functie vastlegt en uit ontwerpkeuzes en processen. Deze koppeling komt alleen voor wanneer al een ontwerp is gemaakt en de eisen naderhand nog moet worden “gekoppeld” aan het object waar ze bijhoren. Dit is de huidige praktijk, maar dit komt niet voort uit de SE-systematiek.

Stelling 4:

“Systems Engineering leent zich niet voor een meer uitgebreide toepassing in de bouwsector?”

Toelichting:

De opdrachtgevers in de GWW-sector bevinden zich in een spagaat, aan de ene kant willen ze zelf bepalen wat ze krijgen, maar aan de andere kant willen ze meer risico’s bij de opdrachtnemer neerleggen. Om meer gebruik te maken van SE zal de OG meer functioneel moeten specificeren of meer SE verweven in zijn eigen proces en hiermee transparant zijn richting de ON’ers. Nu zoekt de ON veelal het ontwerp bij de eisen en draagt tevens de risico’s voor dit ontwerp.

Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	nee	Vanwege de Tracewet is de OG in de GWW-sector gebonden
2	nee	
3	deels	Contracten met een principe ontwerp zijn minder geschikt
4	nee	Bij juiste insteek van de OG is veel mogelijk
5	nee	Mogelijk wanneer het deel van de OG bij de ON komt te liggen
6	nee	Uitstekend voor integrale aanpak in multidisciplinaire projecten
7	nee	Mits voldoende begeleiding en vroegtijdige implementatie
8	nee	Mits verandering in de huidige toepassing
9	nee	Mits juiste toepassing van SE
10	nee	

Deze stelling zoekt naar een negatieve bevestiging. Alle experts zijn het er over eens dat Systems Engineering wel geschikt is voor een bredere toepassing in de bouwsector. Systems Engineering zou van waarde kunnen zijn voor het proces in de bouwsector, er is nu nog sprake van te veel faalkosten, matige communicatie, weinig inbreng van ICT, matig kwaliteitsmanagement en onderling wantrouwen. Veel van de ondervraagden zijn van mening dat de Opdrachtgever een belangrijke rol speelt in de toepassing van Systems Engineering. Een verbetering van de vraagspecificatie zou hier aan kunnen bijdragen.

Stelling 5:

“Transparantie is van belang voor een goede overdracht van het contract.”

Toelichting:

De fragmentatie in de bouwsector vraagt een voor alle partijen inzichtelijk proces. Op dit moment worden gemaakte keuzes nog onvoldoende inzichtelijk gemaakt om een juiste overdracht van het contract te waarborgen. Dit kan ook meespelen in de overdracht van ontwerp op uitvoering, wanneer voor de uitvoering onvoldoende duidelijk is waarom een bepaalde keuze is gemaakt, wordt er sneller van deze keuze afgeweken. Systems Engineering schrijft ook voor om deze keuzes vast te leggen.



Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	ja	Vooral van belang bij afwijkingen
2	ja	
3	ja	Meer draagvlak bij bekendheid van keuzes
4	ja	
5	ja	
6	ja	Vooral om het verwachtingspatroon duidelijk te maken
7	ja	Voldoende proactieve houding ON kan daar aan bijdragen
8	ja	Onderling vertrouwen is van groot belang
9	ja	
10	ja	

Over stelling 5 zijn de ondervraagden het tevens eens. Zonder een goede transparantie hebben de opdrachtnemers onvoldoende inzicht in de herkomst van het Voorontwerp en de eisen. Deze transparantie zit in meer zaken:

- De opdrachtnemers moeten goed weten wat de opdrachtgever wil en belangrijk vindt.
- De opdrachtnemers moeten de kennisachterstand van het project in (makkelijker) in kunnen halen
- Eisen zijn minder interpreteerbaar.

Als één van de belangrijkste punten voor een transparant proces wordt het inzichtelijk maken van de keuzes genoemd door een aantal van de ondervraagden. De onderbouwing en traceerbaarheid van deze keuzes zijn van belang voor goede communicatie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer.

Stelling 6:

“Verificatie in de ontwerpfase over de objectenboom in de realisatie over de activiteitenboom.”

Toelichting:

Er bestaat nog veel verwarring over verificatie en validatie. Het wordt vaak juist geformuleerd, maar niet juist toegepast. Tevens worden eisen meerdere malen geverifieerd. Door onderscheid te maken in verschillende verificatiemomenten kan dit onderscheid goed worden gemaakt. In de ontwerpfase wordt het ontworpen object getoetst aan de eisen, in de realisatie wordt de gerealiseerde activiteit getoetst. Het ligt dus voor de hand dat de verificatie in de ontwerpfase aan de SBS is gekoppeld en in de realisatie aan de WBS. Daarnaast bestaat er een onderscheid tussen een verificatie en een verificatievoorschrift. De OG schrijft in een aantal gevallen ook dit voorschrift voor. Een voorbeeld is een stroefheidseis en een eis die de meting voor deze stroefheid voorschrijft. Beide worden behandeld als een aparte eis, maar eigenlijk is het tweede een verificatievoorschrift voor het verifiëren van de eerste eis.

Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	ja	
2	ja	De toepassing van SE moet aansluiten bij de werkwijze.
3	deels	De tussenproducten die het eindproduct verifiëren moeten worden geverifieerd
4	nee	Eisen worden met verschillende verificatiemethoden geverifieerd
5	nee	Maak een keuze tussen of SBS óf WBS
6	ja	
7	nee	Aantonen met verschillende verificatiemethoden
8	nee	Verificatie van het produkt, niet star object en activiteit
9	nee	De eisen worden in meerdere fasen getoetst.
10	ja	



In stelling 6 zijn een aantal verschillende meningen terug te vinden. De belangrijkste opmerking die wordt gemaakt is dat de verificatie een toetsing aan eisen is. Afhankelijk van wat je wil toetsten kan dit een object of een activiteit zijn, maar ook bijvoorbeeld een functie. Deze stelling is dus ook een praktische interpretatie van de Systems Engineeringmethode. Eisen in de ontwerpfase zijn vaak eisen die aan een object worden getoetst. Eisen in de uitvoeringsfase zijn vaak eisen die aan activiteiten worden getoetst. Een aantal experts vindt dat er duidelijker onderscheid moet worden gemaakt in het benoemen van het type eis, er bestaan product- en proceseisen, dit maakt al gelijk een onderscheid in de eisen.

Stelling 7:

“Functionele analyse kan alleen worden gebruikt op een hoog niveau?”

Toelichting:

Het uitvoeren van een functionele analyse wordt nu slechts noodzakelijk geacht voor keuzes op een hoog niveau. Toch kan het ook van waarde zijn voor toepassing op een lager niveau. Elk klein onderdeel in een systeem vervult een bepaalde functie. Zeker in de GWW-sector waar veel repetitie optreedt kan een verbetering van een klein onderdeel veel meerwaarde opleveren.

Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	nee	Ook kleine onderdelen vervullen een functie
2	nee	
3	nee	Ter ondersteuning van keuzes, dus niet altijd efficiënt toepasbaar
4	nee	Hamburgermodel is universeel toepasbaar op alle niveau's
5	nee	Kan op alle niveau's, alleen indien nodig
6	nee	In de installatiesector wordt al een functionele analyse uitgevoerd tot op een laag niveau
7	nee	Inherent aan de beperkte oplossingsvrije vraagspecificatie
8	nee	Noodzakelijk om te komen tot innovatieve oplossingen
9	nee	Maar alleen als het ook helpt om het te doen
10	nee	

Ook deze stelling zoekt naar een negatieve bevestiging. Functionele analyse wordt in de huidige toepassing slechts sporadisch toegepast. Als oorzaak daar voor wordt de mate van detaillering van de vraagspecificatie genoemd. Veel van de ondervraagden zijn van mening dat het ook op lagere niveau's toepasbaar is, maar dat dat niet altijd efficiënt toepasbaar is. Tevens wordt opgemerkt dat het uitvoeren van een Functionele analyse noodzakelijk is om te komen tot innovatieve oplossingen. Één van de ondervraagden die werkzaam is in de installatiesector merkt op dat de Functionele analyse in die sector ook al op een laag niveau wordt toegepast.

Stelling 8:

“Systems Engineering biedt vooral meerwaarde voor de Opdrachtgever?”

Toelichting:

Systems Engineering in de huidige toepassing is vooral een controlemiddel voor de opdrachtgever. De meerwaarde wordt aan de opdrachtnemerskant minder als zodanig ervaren. Door meer gebruik te maken van het totale proces van SE, zowel door de ON als de OG kan meer gebruik worden gemaakt van de meerwaarde ervan, zowel voor OG als ON.



Expert	Eens/Oneens	Opmerking
1	nee	Wel in de huidige toepassing, maar bij meer adoptie ook voor ON
2	nee	Voor efficiënter werken en beter uitvoerbaar ontwerpen
3	nee	Bij vroegtijdig gebruik in het ontwerpproces
4	nee	Betere beheersing van het project en reduceren van faalkosten
5	nee	Bij toepassing gedurende alle fasen
6	nee	Zowel toetsmiddel als voor beheersen eigen processen
7	nee	Voor bij PPP achtige projecten voorwaarde voor succes
8	nee	In de huidige toepassing behulpzaam bij het scherp krijgen van eisen en explicieter maken van raakvlakken
9	nee	Het verbeterd het proces en het resultaat
10	nee	Door explicieter werken worden processen meer beheersbaar

Ook over deze stelling zijn de ondervraagden het eens. Systems Engineering is zeker ook van meerwaarde voor de Opdrachtnemer. Daarbij wordt wel opgemerkt dat deze meerwaarde in de huidige toepassing nog beperkt is. Maar bij een juiste en tijdige toepassing kan Systems Engineering zeker van meerwaarde zijn voor het proces van de Opdrachtnemer. Als meerwaarde voor de Opdrachtnemer worden genoemd:

- Betere beheersing van het project
- Reduceren van faalkosten
- Explicieter werken
- Efficiënter werken.

In de toekomst zal de Opdrachtnemer waarschijnlijk meer baat hebben bij toepassen van Systems Engineering, omdat zij flexibeler zijn in het aanpassen van processen dan de publieke opdrachtgevers.

7.4 Conclusie

Dit hoofdstuk had tot doel de onderzoeksresultaten te valideren en antwoord te geven op onderzoeksvraag IV:

IV. In hoeverre is implementatie van de verbeterde procesbeschrijving uit centrale vraag III haalbaar in de bouwsector(evaluatie)?

De volgende stellingen zijn gevalideerd:

Stelling 1: *“De opdrachtgever moet de eisenbasis die wordt aangeleverd in de vorm van de vraagspecificatie valideren.”*

Stelling 3: *“Eisen moeten worden gekoppeld aan hetzelfde niveau in de objectenboom als het niveau van de eis.”*

Stelling 4: *“Systems Engineering leent zich niet voor een meer uitgebreide toepassing in de bouwsector?”*

Stelling 5: *“Transparantie is van belang voor een goede overdracht van het contract.”*

Stelling 7: *“Functionele analyse kan alleen worden gebruikt op een hoog niveau?”*

Stelling 8: *“Systems Engineering biedt vooral meerwaarde voor de Opdrachtgever?”*

Over de stellingen 2 en 6 bestaat nog discussie:

Stelling 2: *“Systems Engineering is een ontwerpmethodode geen secundair proces voor het aantonen van eisen.”*

Deze stelling is te nauw geformuleerd voor validatie. Systems Engineering is meer dan een ontwerpmethodode, het is een geïntegreerde ontwerp- en projectmanagementmethodiek.

Stelling 6: *“Verificatie in de ontwerpfase over de objectenboom in de realisatie over de activiteitenboom.”*

Deze stelling is een praktische insteek van het SE-proces en wordt niet door iedereen als dé manier gezien. Afhankelijk van een object, activiteit of functie moet hetgene worden getoetst aan de eisen.



8 Final Discussion

8.1 Constateringen

In de hoofdstukken zijn verschillende constateringingen gedaan. In deze paragraaf zullen die worden opgesomd.

Hoofdstuk 2 Veranderingen in de bouwsector

1. De veranderende omgeving en opdrachtgever hebben in combinatie geleid tot de toepassing van Systems Engineering in de bouwsector. Toenemende complexiteit van de bouwopgave staat daar in centraal.
2. De verschuiving van verantwoordelijkheden hebben geleid tot een aantal nieuwe contracten die meer taken bij de opdrachtnemers leggen.
3. De regelgeving in Nederland leidt ertoe dat de opdrachtgever vaak al een deel van het ontwerp heeft gemaakt.
4. De organisatie van het project speelt een belangrijke rol bij de complexe bouwopgave.
5. De bouwsector is een gefragmenteerde sector waar veranderingen langzaam op gang komen.

Hoofdstuk 3 Algemene theorie Systems Engineering

1. De SE-methode wordt in de theorie duidelijk omschreven en heeft zich in verschillende sectoren verder ontwikkeld.
2. De SE-methode omvat verschillende stappen om tot een compleet en juist ontwerp te komen:
 - Eisenanalyse
 - Eisenvalidatie
 - Functionele analyse
 - Functionele verificatie
 - Synthese
 - Ontwerpverificatie
 - En de ondersteunde processen control en systeemanalyse.
3. Systems Engineering is een gestructureerde methode om gebruikerswensen te vertalen in een product dat voldoet aan deze wensen.
4. Systems Engineering is een methode die kan worden gebruikt om het gehele project te organiseren en te sturen op tijd, geld en kwaliteit.
5. Systems Engineering kan worden gebruikt om de wensen zo te omschrijven dat de keuze nog niet vastligt.
6. De lucht-en ruimtevaartsector kent een aantal overeenkomsten met de bouwsector, maar ook een aantal verschillen. De belangrijkste hiervan is dat de bouwsector weinig opdrachtnemers kent waardoor eerder in het traject voor een bepaalde aanbieder kan worden gekozen.
7. In de lucht-en ruimtevaartsector wordt er in veel gevallen gewerkt met geïntegreerde projectteams. In de bouwsector zijn projecten vaak disciplinegericht opgezet.
8. Een overeenkomst is de enkelstuks productie in zowel de bouwsector als in de ruimtevaartsector. Beide sectoren maken over het algemeen unieke producten.

Hoofdstuk 4 Systems Engineering in de bouwsector

Hoofdstuk 4 kent een tweetal interpretaties van SE, vanuit de opdrachtgever en vanuit de opdrachtnemer. Beide worden vergeleken met de methode zoals die is omschreven in hoofdstuk 3.

1. Eisen in de vraagspecificatie moeten traceerbaar zijn naar de stakeholder die deze heeft ingebracht.
2. De omgeving speelt een belangrijke rol in de bouwsector, hierdoor hebben veel actoren verschillende belangen bij een project. SE kan worden gebruikt om deze belangen te structureren en met elkaar af te wegen en gedurende het project traceerbaar te houden.
3. Validatie van de eisenbasis is van belang bij een overdracht naar de marktpartijen.
4. Eisen worden zijn gebonden aan systeemniveau's, door verdere detaillering van het ontwerp worden eisen ontwikkeld die de bovenliggende eisen afdekken en op het juiste niveau zijn gesteld.
5. SE is een methode die ondersteuning biedt aan het ontwerp zonder de gebruikerseisen uit het zicht te verliezen.
6. Ontwerpverificatie wordt in de bouwsector gezien als de belangrijkste stap van het Systems Engineeringsproces.



7. Validatie is tevens een check om te bekijken of de eisenbasis juist is weergegeven en of deze consistent is. Hiermee wordt voorkomen dat achteraf niet kan worden voldaan aan de gebruikerswensen.
8. Traceerbaarheid is een belangrijk onderdeel van Systems Engineering, het vastleggen van keuzes en motivering hiervan speelt hierin een rol.
9. Systems Engineering is een methode waarbij de ondersteunende processen, zoals risicomangement en raakvlakkenmanagement, onderdeel zijn van het ontwerpproces. Dit is terug te vinden in de systeemanalyse, waarin keuzes worden gebaseerd op risico's, tijd, geld en kwaliteit.

Hoofdstuk 5 Systems Engineering in de praktijk

In hoofdstuk 5 is de theorie zoals die door de BAM is beschreven in de SE-wijzer vergeleken met de toepassing van Systems Engineering in praktijksituaties.

1. Bij beide cases ligt de nadruk van het SE-proces op de ontwerpverificatie
2. Als grootste oorzaak voor het niet uitvoeren van stappen wordt de beperkt beschikbare tijd genoemd.
3. De overgang van ontwerp op uitvoering wordt als een struikelblok genoemd voor de juiste toepassing van Systems Engineering.

8.2 Mogelijkheid tot verder onderzoek

De bouwsector verandert niet snel, maar is wel constant in beweging. De toepassing van Systems Engineering in de bouwsector is dat eveneens. Door tijdgebrek en onvoldoende kennis van Systems Engineering wordt er nu onvoldoende gebruik gemaakt van de methode. De vraag blijft staan of de theoretische toepassing van Systems Engineering voldoende op de bouwsector kan worden toegesneden, zodat er voor alle betrokkenen meerwaarde kan worden behaald. Een onderzoek naar het anders verdelen van de tijd zou daar aan bij kunnen dragen. Nu wordt er vaak onvoldoende tijd genomen voor het ontwerp, waardoor gedurende de uitvoering problemen ontstaan die uiteindelijk ook leiden tot een uitloop van het totale project. Hierdoor komt er tegelijk meer tijd beschikbaar voor het gebruik van SE als primaire methode voor de beheersing van het project.

Door uitvoering van een pilotproject kan worden bekeken of een primaire toepassing van Systems Engineering door de Opdrachtgever leidt tot een verbetering van de overdracht naar de marktpartijen. Transparantie en traceerbaarheid van eisen op alle niveau's spelen hierbij een belangrijke rol. Een verbeterde overdracht kan leiden tot een toename van het gebruik van Systems Engineering vanuit de Opdrachtnemers.

8.3 Wat mist er aan dit onderzoek?

Dit onderzoek richt zich voornamelijk op de theoretische toepassing van Systems Engineering en de implementatie hiervan in de bouwsector. De praktische toepassing van de theorie zoals omschreven in hoofdstuk 3 is buiten beschouwing gelaten. Praktisch gezien kunnen er complicaties ontstaan bij een toepassing van Systems Engineering zoals omschreven. Aan deze complicaties is slechts zijdelings aandacht besteedt.

8.4 Nieuwe ontwikkelingen

Parallel aan dit onderzoek zijn sectorbreed ontwikkelingen geweest die tot een verbetering van de toepassing van SE hebben geleid. Zo is er bij BAM een softwareprogramma in gebruik genomen dat risico's, raakvlakken en eisen integreert. Daarnaast wordt gewerkt aan een werkinstructie die een praktische toelichting nastreeft op datgene omschreven in de SE-wijzer. Daarbij moet worden opgemerkt dat dit losstaand niet zal leiden tot een bredere toepassing van SE. Hiervoor moet aandacht worden besteedt aan een aanpassing van de cultuur en werkwijze binnen de Infrabedrijven. Om dit te bewerkstelligen is inzet gewenst van alle betrokken actoren, zowel vanuit de Opdrachtgever als vanuit de Opdrachtnemer.



9 Conclusies en aanbevelingen

Ter afronding van de rapportage, kunnen conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan. Dit moet antwoord geven op het probleem dat centraal staat in het onderzoek, dat als volgt luidt:

“Systems Engineering wordt ervaren als een administratieve methode met weinig meerwaarde. De meerwaarde van Systems Engineering bij toepassen in het primaire ontwerpproces wordt niet volledig benut.”

In navolging hiervan, is het volgende ten doel gesteld:

*“Hoe kan SE in het **primaire** proces worden opgenomen zodat het eisenpakket van de OG **doelmatig en doeltreffend** kan worden omgezet in een systeem dat voldoet aan de specificaties.”*

De achtergronden van het niet toepassen van Systems Engineering als primaire proces voor het omzetten van de klantwensen in een werkende oplossing zijn onderzocht en in hoofdstuk 6 zijn handvaten gegeven om dit meer te stimuleren. Onderstaand de conclusies van deze achtergronden.

9.1 Conclusies

Op basis van de 6 stellingen die zijn gevalideerd in de expertmeeting kunnen verschillende conclusies worden getrokken. Deze conclusies leiden tot een aantal aanbevelingen die op hun beurt moeten leiden tot een verbeterde toepassing van Systems Engineering in de bouwsector en kunnen leiden tot de opname van Systems Engineering in het primaire proces van zowel Opdrachtnemer als Opdrachtgever.

Stelling 1: *“De opdrachtgever moet de eisenbasis die wordt aangeleverd in de vorm van de vraagspecificatie valideren.”*

De opdrachtgever verstrekt voor aanbesteding vaak een vraagspecificatie die tegenstrijdigheden bevat. De eisen in de vraagspecificatie bevatten vaak een onderliggend ontwerp gemaakt door de Opdrachtgever. De Opdrachtgever is dan ook verantwoordelijk voor dat deel van het ontwerp en moet dus ook de eisen behorend bij dat deel van het ontwerp valideren. Op deze basis kan de Opdrachtnemer verder met het vervolg van dit ontwerp.

Stelling 3: *“Eisen moeten worden gekoppeld aan hetzelfde niveau in de objectenboom als het niveau van de eis.”*

In de huidige toepassing is er vaak weinig hiërarchie in de eisen. Alle eisen worden op een enkel niveau in de eisenboom geplaatst. Hierdoor blijft de winst beperkt die wordt gehaald uit de structuur die SE beoogd.

Stelling 4: *“Systems Engineering leent zich niet voor een meer uitgebreide toepassing in de bouwsector?”*

Systems Engineering is wel degelijk een methode die geschikt is voor toepassing in de bouwsector. Dit vraagt alleen inzet en energie van alle betrokkenen. Op dit moment wordt er nog onvoldoende gebruik gemaakt van de handvaten die Systems Engineering biedt om de stakeholderswens efficiënt en effectief om te zetten in een werkend systeem die aan deze wensen voldoet.

Stelling 5: *“Transparantie is van belang voor een goede overdracht van het contract.”*

Door onvoldoende gebruik van Systems Engineering aan is er nu nog onvoldoende transparantie in het proces. Transparantie betekent het inzichtelijk maken van keuzes en het traceerbaar maken van de eisen naar de bron(stakeholder). Nu wordt de opdrachtgever als de bron voor de eis gezien, daar waar vaak nog een achterliggende bron aanwezig is.

Stelling 7: *“Functionele analyse kan alleen worden gebruikt op een hoog niveau?”*

Er wordt nu nog onvoldoende gebruik gemaakt van de functionele analyse. Men ziet over het algemeen alleen waarde in de functionele analyse voor keuzes op een hoog niveau, maar ook op een laag niveau kan het van waarde zijn om het ontwerp te optimaliseren.

Stelling 8: *“Systems Engineering biedt vooral meerwaarde voor de Opdrachtgever?”*

In de huidige toepassing wordt Systems Engineering vooral ervaren als een controlemiddel van de Opdrachtgever. Bij een goede toepassing van Systems Engineering kan het echter ook van waarde zijn voor de Opdrachtnemer. Met name in het voorkomen van faalkosten, het stroomlijnen van het proces en explicieter werken, waardoor achteraf fouten kunnen worden gelocaliseerd.



Ten slotte kan worden geconcludeerd dat elke verandering van welk proces dan ook in welke sector dan ook tijd nodig heeft om door iedereen op de juiste manier te worden opgenomen in de standaardwerkwijze. Voordeel voor de private partijen is dat zij over het algemeen te maken hebben met een flexibelere organisatie dan de publieke partijen en zich dus sneller zullen kunnen aanpassen. Bij een goede inpassing van Systems Engineering kunnen zij de Opdrachtgevers dus een stap voor zijn.

9.2 Aanbevelingen

De conclusies leiden tot verschillende aanbevelingen en geven antwoord op centrale vraag III:

III. Welke aanbevelingen kunnen op basis van de theorie en onderzoeksobjecten worden gedaan om de toepassing van Systems Engineering in de infrasector van de BAM te verbeteren(evaluatief)?

In hoofdstuk 6 zijn puntsgewijs verbeterpunten aangegeven voor het SE-proces in de bouwsector. Veel van deze zijn gebaseerd op de opinie dat er meer gebruik moet worden gemaakt van Systems Engineering dan alleen het gebruik van de methode voor het aantonen van de eisen uit de vraagspecificatie. Om dit te veranderen is zowel een inspanning van de opdrachtgever vereist als van de opdrachtnemer. Door beide gebruik te maken van de methode Systems Engineering in het ontwerpproces worden beslissingen van de andere partij voor zowel opdrachtgever als opdrachtnemer inzichtelijker. Hiervoor moet de opdrachtgever de vraagspecificatie inrichten volgens de methode en de opdrachtnemer structureel het ontwerpproces inrichten rondom SE.

Door structureel gebruik te maken van Systems Engineering in het ontwerpproces, zowel door opdrachtgever als door opdrachtnemer kan dit probleem worden ondervangen. Door transparantie van alle partijen kan een verbeterde overdracht van het contract plaatsvinden. Tevens moet de opdrachtgever moet zich realiseren dat een grotere mate van detaillering van een vraagspecificatie leidt tot een kleinere ontwerprijheid en indirect ook tot een grotere verantwoordelijkheid. De opdrachtgever heeft immers al een deel van het ontwerp gemaakt en draagt daar dan ook de risico's van. Wanneer de opdrachtgever een gedetailleerde eisenbasis aanlevert moet de opdrachtnemer daaraan voldoen. De opdrachtnemer mag er dan vanuitgaan dat deze eisenbasis(vraagspecificatie) zorgvuldig is samengesteld en voert de eisen uit zoals omschreven. Wanneer uiteindelijk blijkt dat de eisen uit de eisenbasis geen juiste vertaling zijn van de stakeholderswensen dan is de opdrachtgever daar verantwoordelijk voor.

In hoofdstuk 7 zijn verbeterpunten aangegeven voor een verbeterde toepassing van Systems Engineering de bouwsector. Per fase van het bouwproces zijn verbeteringen aangegeven voor de toepassing van SE. Deze spitsen zich met voornamelijk toe op het gebruik van Systems Engineering bij het maken van ontwerpbeslissingen en het structureel uitwerken van de klantwens. Hiervoor is het noodzakelijk meer tijd te nemen voor het ontwerpproces om te voorkomen dat in de uitvoering alsnog tijd wordt verloren. Nu is het vaak zo dat gehaast en parallel met de uitvoering wordt ontworpen. Vaak komen ontwerpfouten dan in de uitvoering aan het licht en leiden uiteindelijk alsnog tot tijdverlies waarvan men dacht dat die in de ontwerpfase was gewonnen.

Implementatie van SE in het primaire ontwerpproces is afhankelijk van de inzet van zowel opdrachtnemer als opdrachtgever. Daarbij moeten de opdrachtgevers uit de spagaat zien te komen tussen aan de ene kant ontwerprijheid en aan de andere kant krijgen wat ze willen. Nu wordt de oplossing nog te specifiek voorgeschreven om te voorkomen dat ze niet krijgen waar ze op gehoopt hadden. Door niet te specifiek voor te schrijven kunnen opdrachtgevers komen met verrassende oplossingen die boven verwachting zijn. Daarnaast zou een standaard voor zowel de opdrachtnemers als voor de opdrachtgevers wenselijk zijn. Nu wisselt de insteek van het Systems Engineeringsproject per project. Deels is deze standaard al verwoord in de diverse handleidingen, maar vaak wordt niet volgens deze beschrijving gewerkt.

Ten slotte heeft de implementatie van Systems Engineering twee kanten, die van kennis en van cultuur. De kennis is in de bouwsector nog volop in ontwikkeling en met behulp van de opgedane ervaringen kan worden gekomen tot een standaardwerkwijze. Van de andere kant moet ook iedereen bereid zijn de werkwijze te gaan gebruiken, daarvoor zijn veranderingen nodig die in de bouwwereld dikwijls met argusogen worden bekeken.

9



Bronvermelding

- Beam, W.R. (1990), *Systems Engineering: Architecture and Design*, McGraw-Hill
- Bijl, N.(2008), *Een aanbod gedreven wegenbouw*, TU Delft ism Heijmans
- Blanchard, B.S. & Fabrycky W.J. (1997) *Systems Engineering and Analysis*. Second Edition: Englewood Cliffs: Prentice Hall
- Brunson, J (2001), *Project Management and System Engineering Handbook*, NASA
- De Bruijn, PJM and Maas, N (2005) *Innovatie in de bouw*. TNO, Delft.
- Dell'Isola, A (1997), *Value Engineering: Practical application for Design, Construction, Maintenance & Operations*, RS Means Kingston, MA
- Duvivier, T.J.(2007) *Waarde van het Ontwerp*, TU Delft ism Royal Haskoning
- Economisch Instituut voor de Bouwnijverheid(EIB)(1996), *Architect, Bouwproces en Bouwtechniek*, Amsterdam: EIB.
- Fernie, S., Green, S., Newcombe, R., Weller, S. (2004), *Learning across Business Sectors*, The University of Reading
- Fisher, N. (1997), *Project Modelling in Construction: --seeing is Believing*, Thomas Telford
- Hamann R.J. ir., Tooren, M.J.L. van (2004), *Systems Engineering & Technical Management Techniques part I*, Universiteit Delft
- Hamann R.J. ir., Tooren, M.J.L. van (2005), *Systems Engineering & Technical Management Techniques part II*, Universiteit Delft
- Hull, E, Jackson, K., Dick, J (2005), *Requirements Engineering*, Springer
- In 't Veld, J (2002) *Analyse van Organisatieproblemen: Een toepassing van denken in systemen en processen*. Stenfert Kroese, Groningen/Houten.
- IEEE(2005), *IEEE1220 Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process*, IEEE
- INCOSE(2002), *Systems Engineering Handbook*, INCOSE
- ISO/IEC (2002) *ISO/IEC 15288, Systeemtechniek – Processen van levenscycli van systemen*, ISO
- Jansen, C.E.C.(2009), *Leidraad aanbesteden voor de bouw*, Regieraad Bouw
- Kamara, J.M., Anumba J., Egbuomwan, N.F.O (2002), *Capturing Client requirements in Construction Projects*, Thomas Telford
- Koskela, L (2003) *Is structural change the primary solution to the problems of construction?* *Building Research & Information*, vol. 31, no. 2, pp. 85-96.
- Kossiakoff, A. & Sweet, W.N. (2003). *Systems Engineering. Principles and Practice*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.
- Leeuw, A.C.J. de (1994), *Besturen van veranderingsprocessen*, Koninklijke Van Gorcum, Assen.
- Leeuw, A.C.J. de (2002), *Bedrijfskundig management; Primair proces, strategie en organisatie*, Koninklijke Van Gorcum, Assen
- Lever, A.W.(2006), *Functioneel specificeren bij projecten van Rijkswaterstaat*, TU Delft en RWS
- McCurdy, H.E. (2001), *Faster, Better, Cheaper: Low-cost Innovation in the U.S. Space Program*, JHU Press
- Mintzberg (1994), *Structure in fives: designing effective organizations*, Prentice Hall, Englewood Cliff s
- Mintzberg, H. (1979), *The structuring of Organizatons*, Prentice Hall, Englewood Cliff s, N,J
- Pijpers, D.H.J., Woude, I.R. van der, 2004,*Jellema 1: Inleiding Bouwnijverheid*, ThiemeMeulenhoff NV
- Ridder, H.A.J. de (2008), *CT3061: Systems Engineering*, TU Delft
- RWS en Prorail (2007), *Leidraad voor Systems Engineering binnen de GWW-sector*, RWS en ProRail
- Stevens, R.,Brook, P., Jackson, K., Arnold, S. (1999), *Systems Engineering: Copying with complexity*, Prentice Hall
- Verschuuren, P en Doorewaard, H. (2007). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Lemma, Utrecht.
- Vrijhoef ,R and Koskela, L (2000) *The four roles of supply chain management in construction*. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, vol. 6, no. 3-4, pp. 169-178.

Wentzel, P.L., Jellema Hogere bouwkunde dl. 10, Bouwproces – Ontwerpen, Utrecht, ThiemeMeulenhoff, 2005.

Zaal, T.M.E.(2007), Nieuw Integraal Bouwen vraagt om Innovatief Aanbesteden, Hogeschool van Utrecht.

Presentaties

Katsonov, A,(2007) Presentaties Requirements Management and Systems Engineering, University of Jyväskylä

Internet

books.google.nl

www.wikipedia.nl

www.crow.nl

www.pianoo.nl

www.cobouw.nl

www.rws.nl

www.bouwendnederland.nl

www.leidraadse.nl

Figurenlijst

- Figuur 1: Onderzoeksmodel
- Figuur 2: Opbouw rapport
- Figuur 3: Hoofdstukken
- Figuur 4: Veranderingen in de bouwsector
- Figuur 5: Organisatiemodel(bewerking van dictaat CT1210, CiTG, TUDelft(2005)
- Figuur 6: Verandering in de bouwsector
- Figuur 7: Opbouw van hoofdstukken
- Figuur 8: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220
- Figuur 9: Eisenanalyse(Bewerking van IEEE1220)
- Figuur 10: Eisenherkomst(Afkomstig uit standaard EIA632)
- Figuur 11: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 12: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 13: Functionele analyse(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 14: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 15: Synthese(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 16: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 17: Ontwerpverificatiebewerking van IEEE1220)
- Figuur 18: Systems Engineeringsproces(bewerking van IEEE1220)
- Figuur 19: Controlproces(afkomstig uit IEEE1220)
- Figuur 20: Cost-effective(SE-handbook NASA)
- Figuur 21: Systems Engineeringsproces (bewerking van IEEE1220)
- Figuur 22: Opbouw van hoofdstukken
- Figuur 23: Ontwerpvrijheid
- Figuur 24: Schematisatie A4-Leiderdorp
- Figuur 25: Validatie(Leidraad SE, RWS/ProRail)
- Figuur 26: Validatie eisenbasis(bewerking van CROW)
- Figuur 27: Deel functieboom
- Figuur 28: Hamburgermodel(Zaal, 2007)
- Figuur 29: Niveau eisen(BAM SE-wijzer)
- Figuur 30: Ontwerpproces(bewerking IEE1220(2005))
- Figuur 31: WBS-element(bewerking van CT3061(2007))
- Figuur 32: Validatie eisen vraagspecificati
- Figuur 33: Ontwerpvrijheid in objectenboom
- Figuur 34: Processchema opdrachtgever
- Figuur 35: Disciplinegerichte objectenboom
- Figuur 36: Theoretische objectenboom
- Figuur 37: V-Model(leidraad SE)
- Figuur 38: SBS-Eisenboom(BAM SE-wijzer)
- Figuur 39: Ontwerpproces(BAM-SE-wijzer)
- Figuur 40: V-Model(SE-leidraad)
- Figuur 41: Verificatie en validatie(Katsonov(2008))
- Figuur 42: Indeling Hoofdstukken
- Figuur 43: Overzicht tracé A4 Burgerveen-Leiden(bron:BAM SE-wijzer)
- Figuur 44: Overzicht tracé A4 Burgerveen-Leiden(bron: RWS.nl)
- Figuur 45: VAR-procedure A4(DKP Ontwerp)
- Figuur 46: Overzicht tracé A2 Zaltbommel-Maasbrug(bron: RWS.nl)
- Figuur 47: Verificatie(DKP Ontwerp A2 Zaltbommel-Maas)
- Figuur 48: Overdracht ontwerp(Leidraad SE)

Tabellen

Tabel 1: Kernpunten Systems Engineeringsproces

Tabel 2: Verschillen algemene theorie en theorie bouwsector

Tabel 3: Verschillen en overeenkomsten SE-wijzer A4 Burgerveen-Leiden

Tabel 4: Verschillen en overeenkomsten bij A2 Zaltbommel-Maas

Inhoudsopgave Bijlagen

Bijlage A: Interviews Eric van Rooijen, A4 Burgerveen-Leiden en A1 Zaltbommel-Maasbrug

Bijlage B: Presentatie Expertmeeting

Bijlage C: Resultaten Expertmeeting





Systems Engineering

Van secundair proces naar primaire toepassing

Door C.J. van Leeuwen