

Leidraad voor Systems Engineering binnen de GWW-sector

Voorwoord

In de bouw vindt een verschuiving plaats van rollen en taken. Als opdrachtgevers vragen Rijkswaterstaat en ProRail steeds meer aan marktpartijen invulling te geven aan ontwerpen. De eigen taak concentreert zich op het formuleren van specifieke eisen waaraan de ontwerpen moeten voldoen en het bewaken van die eisen gedurende het ontwerp- en het bouwproces. Een andere belangrijke ontwikkeling in de bouwsector is de roep om transparantie en een betere beheersing van processen zoals verwoord in het rapport van de Parlementaire Enquête Commissie over de bouwfraude.

De ontwikkelingen in de sector vragen om een nieuwe werkwijze die de activiteiten van alle partijen structureert. Een methode die aangeeft wat de betrokkenen op welk tijdstip van elkaar kunnen verwachten. Een methode die bovendien recht doet aan de eisen waarop ProRail en Rijkswaterstaat uiteindelijk worden beoordeeld: verifieerbare en valideerbare producten.

Sinds een aantal jaren experimenteren Rijkswaterstaat en ProRail met Systems Engineering, een werkwijze die de rollen en taken van alle betrokkenen vastlegt binnen de levensloop van een bouwwerk, vanaf de planontwikkeling naar realisatie tot en met vernieuwing of sloop. Een aanpak die op ieder moment – ook na afloop – helder inzicht geeft in de keuzes die tijdens het proces zijn gemaakt.

Systems Engineering wordt door steeds meer partners in de GWW verwelkomd, onder meer door leden van Bouwend Nederland en het ONRI. Daarmee neemt de behoefte toe aan uniformiteit over de werkwijze en overeenstemming over de begrippen die daarin worden gehanteerd. Anders gezegd: dat we samenwerken aan één taal voor de bouw. De EN-normen voor Systems Engineering bieden hiervoor een goed en soms verplicht startpunt. Deze EN-normen hebben als doel een raamwerk te bieden voor het reguleren van de communicatie tussen de partijen die samenwerken in de waardeketen aan complexe infrastructuursystemen.

Belangrijk daarbij is dat de werkwijze van de opdrachtgevers overeenkomt met de werkwijze van de opdrachtnemers, zodat de communicatie tussen de verschillende partijen kan worden geoptimaliseerd. Dat betekent dat opdrachtgevers de werkwijze die zij zichzelf opleggen ook opleggen aan de opdrachtnemers door middel van de contracten voor de aanleg en onderhoud van de infrastructuurnetwerken.

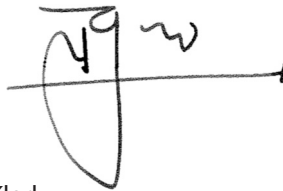
Het schrijven van een leidraad betekent nog niet dat van vandaag op morgen de leidraad volledig kan worden nageleefd. Procesinnovatie vraagt ook om een cultuuromslag. Dat vergt inzet en tijd. Het omgaan met elkaar als zakelijke partners en het samenwerken op basis van vertrouwen zijn belangrijke ingrediënten voor succes.

Voor u ligt de gezamenlijke leidraad Systems Engineering van ProRail en Rijkswaterstaat. Deze eerste versie van de leidraad is opgesteld in nauwe samenwerking met Bouwend Nederland en het ONRI. De leidraad zal door gebruik en evaluatie verbeterd worden tot een standaard voor de GWW-sector. ProRail en Rijkswaterstaat zullen de leidraad actueel houden. Via internet kunt u in de toekomst de laatste versie downloaden. Vanzelfsprekend zullen Rijkswaterstaat en ProRail rekening blijven houden met de wensen uit de markt.

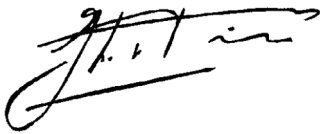
We willen dan ook Bouwend Nederland en ONRI bedanken voor hun bijdragen aan de totstandkoming van deze leidraad. Wij hopen dat deze leidraad een inspirerend voorbeeld is voor andere opdrachtgevers en opdrachtnemers in het publieke domein.



ir. L.H. Keijts
Directeur Generaal RWS



drs. B. Klerk
Voorzitter raad van bestuur ProRail



mr. J.L. van Tuinen
Algemeen directeur Bouwend Nederland



ir. J.G.A. Coppes
Voorzitter ONRI

Leeswijzer

In de afgelopen jaren hebben de partijen in de GWW-sector de nodige ervaringen opgedaan in het gebruik van Systems Engineering voor het specificeren, contracteren en uitvoeren van projecten. Gezien de veranderende context en de goede ervaringen met Systems Engineering is de verwachting dat de toepassing van deze werkwijze nog verder zal toenemen. Het is niet denkbeeldig dat Systems Engineering over een paar jaar dé manier is om projecten voort te brengen.

In de afgelopen periode is nooit een eenduidige beschrijving gemaakt van het hoe, wat, waarom, wie, waar en wanneer van Systems Engineering in de GWW-sector. Met de leidraad proberen we daar een invulling aan te geven.

Systems Engineering is bij infrastructuurprojecten sterk in ontwikkeling. We werken er wel mee maar er is nog geen uniforme werkwijze voorhanden. Dit document voorziet in de groeiende behoefte aan een eenduidige en heldere invulling, die leidt tot een effectieve en efficiënte toepassing.

Daarnaast is dit document voor andere opdrachtgevers een basis om op een vergelijkbare manier te werk te gaan, wanneer men kiest om te werken met Systems Engineering. ProRail en Rijkswaterstaat juichen het toe wanneer andere opdrachtgevers dit doen, omdat daarmee een eenduidig werkkader in de gehele GWW-sector ontstaat.

Om eenduidigheid in de werkwijze van alle partijen te krijgen, is het goed om een momentopname te maken van de stand van zaken. Daarin is beschreven wat partijen in de GWW-sector onder Systems Engineering verstaan, wat van Rijkswaterstaat en ProRail mag worden verwacht en wat Rijkswaterstaat en ProRailverwachten van opdrachtnemers.

De leidraad bestaat uit twee delen:

- Een management deel
- Een technisch deel

Later volgt nog een aantal bijlagen (zoals een werkinstructie al dan niet sector-specifiek)

Het management deel

Het doel van het management deel is om een overzicht op hoofdlijnen te geven van het hoe, wat en waarom van Systems Engineering. De doelgroep van dit document is iedere manager die betrokken is bij de voorbereiding en uitvoering van projecten in de GWW-sector. Dit betreft managers uit de opdrachtgevende organisaties en externe partijen die voor, of namens deze partijen actief zijn. Dat zijn ingenieurs- of adviesbureaus die opdrachtgevers helpen hun studies uit te voeren en contractstukken te maken. Maar ook aannemers en ontwerpers die het ontwerp, de uitvoering en het onderhoud van de infrastructuur invullen.

In hoofdstuk 1 gaan we kort in op het waarom van Systems Engineering bij ProRail en Rijkswaterstaat. Hoofdstuk 2 behandelt de verandering van werken in de sector. De achtergronden van Systems Engineering komen aan bod in hoofdstuk 3.

Het management deel sluiten we af met hoofdstuk 4 waarin de relatie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer centraal staat.

Het technisch deel

Het doel van het technisch deel is allereerst een eerste kennismaking met en oriëntatie op de toepassing van Systems Engineering in de GWW-sector. Daarnaast beoogt dit deel als basis te dienen om zich te ontwikkelen tot een standaard voor de gehele GWW-sector. De leidraad is uitdrukkelijk geen handboek of werkinstructie, maar geeft een globaal overzicht van de toepassing van Systems Engineering in de sector. Voor gedetailleerde informatie verwijzen wij naar het handboek van INCOSE versie 3.0. De doelgroep van dit document is iedere medewerker die betrokken is bij de voorbereiding en uitvoering van projecten in de GWW-sector.

In hoofdstuk 1 van het technisch deel beschrijven we het wat en de geschiedenis van Systems Engineering en de filosofie achter de leidraad. Vervolgens gaan we in op de context van de Systems Engineering en zoomen we in op de systemen van ProRail en Rijkswaterstaat.

Hoofdstuk 2 vormt de inhoudelijke kern van het technisch deel van de Leidraad Systems Engineering. Hierin wordt stap voor stap het levenscyclus model van Systems Engineering opgebouwd, zoals dit binnen de GWW-sector kan worden toegepast. Alle te doorlopen processen komen daarbij ter sprake. Deze opbouw wordt ondersteund met toepassingsvoorbeelden uit de GWW-praktijk. Nadat in paragraaf 2.2 de link is gelegd met de processen uit ISO 15288 wordt in paragraaf 2.3 t/m 2.5 het engineeringproces verder uitgewerkt vanaf de eerste stap tot een top-down model van herhalende engineeringprocessen. In paragraaf 2.6 wordt op dezelfde wijze het realisatieproces behandeld. In paragraaf 2.7 worden de verschillende fasen in de levenscyclus van een systeem toegelicht. Het hoofdstuk wordt in de paragrafen 2.8 en 2.9 afgesloten met een nadere toelichting op respectievelijk de mogelijke structuren die kunnen helpen om de verschillende processen te beheersen en de output die het resultaat van de verschillende processen vormt.

In hoofdstuk 3 wordt een koppeling gemaakt tussen het technische proces van Systems Engineering met de overige gebruikelijke processen binnen een project zoals het omgevingsproces, het inkoopproces, het proces van projectmanagement en projectbeheersing en de projectondersteuning.

Leidraad voor Systems Engineering

Management deel

Inhoudsopgave

1	Waarom Systems Engineering bij ProRail en Rijkswaterstaat	11
2	Naar een andere manier van werken	12
2.1	Van traditioneel naar geïntegreerd	12
2.2	Het traditionele bouwproces	13
2.3	Naar een meer gestructureerde werkwijze	14
3	Achtergronden van Systems Engineering	15
3.1	Geschiedenis van Systems Engineering	15
3.2	Definitie van Systems Engineering	15
3.3	Systeemdenken	16
3.4	Systems Engineering in een notendop	17
3.4.1	Splitsen van specificatie en ontwerpen	17
3.4.2	Verifiëren en Valideren	18
3.4.3	De levenscyclus als uitgangspunt	18
4	Systems Engineering in de relatie opdrachtgever - opdrachtnemer	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Vraagspecificatie	20
4.3	Tweedeling Vraagspecificatie: Eisen en Proces	21
4.4	Procesinteractie	22

1

Waarom Systems Engineering bij ProRail en Rijkswaterstaat?

ProRail en Rijkswaterstaat hebben Systems Engineering in de GWW-sector geïntroduceerd. 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.

In het traditionele ontwerpproces worden afwegingen over de technische oplossingen voor problemen, vaak gemaakt door ontwerpers die op eigen inzicht keuzes maken. Daarmee is niet gezegd dat dit verkeerde keuzes zijn. Wel relevant is dat er geen expliciete en consistente procesgang is, waarin validatie en verificatie van ontwerp oplossingen structureel aan de orde zijn.

De structurele inpassing van validatie en verificatie van ontwerpuitwerkingen is belangrijk om adequaatheid en efficiëntie van oplossingen aan te tonen. Dit versterkt de verantwoording van het functioneren van ProRail en Rijkswaterstaat. Daarnaast is het verplicht om verificatie en validatie in ontwerpprocessen te verankeren, omdat de nieuwe Europese regelgeving dit voorschrijft. De methodiek die wordt voorgeschreven is *Systems Engineering*.

Systems Engineering kan een grote bijdrage leveren om de criteria, zoals in de Compatibiliteitswet genoemd, inzichtelijk te maken. Systems Engineering zet de eisen gedurende de levenscyclus centraal. Aan het eind van elke fase wordt expliciet gekeken of aan de eisen voldaan is. Hiermee waarborgen we rechtmatigheid.

Systems Engineering maakt het mogelijk om de doeltreffendheid en de doelmatigheid te bepalen. Sluit de oplossing maximaal aan bij de klantbehoefte (doeltreffendheid) en is de oplossing gekozen met de beste kwaliteit/prijsverhouding (doelmatigheid)? Systems Engineering gaat uit van de levenscyclusbenadering. Door de hele levenscyclus te beschouwen tijdens het ontwerp, kunnen we de oplossing sturen op maximale prestaties en kwaliteit van de levenscyclus (doelmatigheid). Daarnaast maakt Systems Engineering het mogelijk om de gevolgen van wijzigingen in eisen en randvoorwaarden inzichtelijk te maken.



Naar een andere manier van werken

Een belangrijke aanleiding voor het gebruik van Systems Engineering door ProRail en Rijkswaterstaat was de behoefte aan een methodiek om geïntegreerde contracten functioneel te specificeren. Projecten waarin we deze geïntegreerde werkwijze hanteren, zijn op dit moment het belangrijkste toepassingsgebied voor Systems Engineering. Om die reden gaan we in dit hoofdstuk in op deze context.

2.1 Van traditioneel naar geïntegreerd

In het verleden was de rol van Rijkswaterstaat en ProRail in infrastructuurprojecten en het beheer daarvan dominant. Zelf ontwerpen, tot in detail regie voeren over de uitvoering en uitvoering geven aan het onderhoud. Eenduidig specificeren leek minder van belang omdat Rijkswaterstaat en ProRail zelf de oplossing voor een probleem bedachten. Keuzes konden we impliciet maken, omdat het onze eigen keuzen waren.

Kenmerkend voor het traditionele bouwproces is dat we de (aannemers)markt pas inschakelen als de opdrachtgever (al dan niet bijgestaan door een adviseur) een oplossing voor het probleem heeft gevonden. In deze werkwijze wordt de creativiteit van de markt niet, of beperkt gemobiliseerd. Omdat de opdrachtgever zelf de oplossing voor zijn probleem zoekt, is specificeren minder van belang, dit vond dus ook minder expliciet plaats. Als een probleem was onderkend, zochten we direct naar een (technische) oplossing. Dit proces verliep iteratief (soms met vallen en opstaan). Eerst bedachten we een oplossing. Aansluitend werd deze getoetst aan deels impliciete eisen.

De reductie van onzekerheid had in het traditionele bouwproces een impliciet karakter. De uiteindelijk gekozen oplossing werd in de vorm van een bestek aanbesteed en een aannemer bouwde wat wij voorschreven.

Een belangrijk deel van de traditionele rol van de opdrachtgever verschuift tegenwoordig naar de markt. Meer en meer worden oplossingen voor nieuwbouw, vernieuwing en onderhoud aan de markt gevraagd. ProRail en Rijkswaterstaat doen dit met zogenaamde geïntegreerde contracten (contracten waarin ontwerp, bouw en soms onderhoud in één hand zijn gelegd).

De achtergrond van geïntegreerde contracten ligt in de gedachte dat deze integratie van fasen in het voortbrengingsproces van bouwprojecten voor bepaalde projecten voordelen heeft. Die voordelen zijn een afgeleide van een ander concurrentieplatform voor bedrijven. Waar men van oudsher vooral moest concurreren op prijs, wordt in geïntegreerde contracten een beroep gedaan op de creativiteit van marktpartijen. Dus in plaats van te concurreren op het meest efficiënte werkproces, kan de klus ook worden binnengehaald door met efficiëntere oplossingen te komen.

Meer vrijheid voor de markt impliceert meer verplichtingen voor de markt. Daar waar Rijkswaterstaat en ProRail verantwoordelijk blijven voor de infrastructuur zullen bedrijven hun keuzes expliciet moeten maken, waardoor verificatie en validatie

mogelijk zijn. Dit betekent dat niet alleen ProRail en Rijkswaterstaat Systems Engineering toepassen maar dat ook de marktpartijen tijdens ontwerp, bouw en onderhoud Systems Engineering als basis voor hun processen adopteren.

2.2 Het traditionele bouwproces

Wanneer we van een afstand naar het traditionele bouwproces kijken, zit het heel logisch en gestructureerd in elkaar. Het voortbrengingsproces van een bouwproject verloopt van grof naar fijn. Naarmate het proces vordert, wordt het project gedefinieerd door elkaar opvolgende en steeds gedetailleerdere beslissingen. Elke beslissing brengt zekerheid over de uitgangspunten voor het vervolg en daardoor neemt de onzekerheid af. Elke beslissing is gericht op een verdere inperking van de resterende oplossingsruimte.

Maar de praktijk laat vaak iets anders zien. De traditionele wijze waarop we projecten realiseren, is veelal gekenmerkt door een technocratische benadering. Het probleem is nauwelijks bekend of we werken al aan een oplossing. De standaard manier van werken bij dit soort projecten is dan ook dat we vrijwel direct een ontwerpende afdeling of ingenieursbureau inschakelen, dat voor de oplossing van het gesignaleerde probleem een voorlopig ontwerp, een definitief ontwerp en een bestek maakt. We besteden hierdoor lang niet altijd voldoende aandacht aan het programma van eisen. Het blijvend structureel scheiden van eisen en oplossingen is niet ingebakken in de werkwijze.

De reductie van onzekerheid is vaak een herhalend proces, waarbij ontwerpuitgangspunten en keuzes impliciet blijven. Ontwerpproducten die we gebruiken om financiering, de benodigde publieke toestemmingen en grond(gebruik) te werven, geven soms een vorm van schijnnaauwkeurigheid. Het leidende thema is niet zozeer reductie van onzekerheid, maar vergroten van het detailniveau van de uitwerking. Vooral bij ProRail werd het bestek tenslotte aanbesteed en bouwde een aannemer de door het ingenieursbureau bedachte oplossing, terwijl het betreffende ingenieursbureau over de werkzaamheden van de aannemer directie voerde en daarop toezicht hield. Binnen Rijkswaterstaat werden de activiteiten veelal zelf, of in samenwerking met een ingenieursbureau uitgevoerd.

De ontwerpfase kost vaak veel tijd, waardoor de aannemer – als laatste in de keten – nogal eens een vliegende start moet maken. Daardoor is het vaak moeilijk om voldoende vrij inzetbaar personeel en materieel vrij te maken. Ook ligt het uitvoeringsproces in de besteksdokumentatie voor een groot deel vast, zonder dat dit is afgestemd op de aannemers- en uitvoeringsspecifieke omstandigheden. Na gunning vindt in vrijwel alle gevallen een reeks bestekswijzigingen plaats, omdat we constateren dat het bestek toch niet tot het gewenste resultaat leidt.

Het traditionele proces kenmerkt zich door abrupte (onvolkomen) faseovergangen en voortdurende (kostenverhogende) bijsturing. Partijen in de keten werken in strikt gescheiden verantwoordelijkheden, waardoor efficiëntie door integratie heel lastig is. 'Verspilling' lijkt in het traditionele model een gewoonte geworden.

2.3 Naar een meer gestructureerde werkwijze

Vanaf het midden van de jaren negentig proberen we – mede door in het buitenland opgedane kennis en ervaring - het traditionele model om te vormen tot een model waarin ontwerp en uitvoering zijn geïntegreerd (Design & Construct of D&C). ProRail heeft op grote projecten als de Betuweroute en Amsterdam - Utrecht diverse contracten als Design&Construct op de markt gebracht. Rijkswaterstaat past sinds 2003 D&C standaard toe voor grote incidentele investeringswerken.

In de loop van het afgelopen decennium is dankzij die ervaringen de manier van specificeren en contracteren verbeterd en verfijnd. De komst van de Uniforme Administratieve Voorwaarden voor Geïntegreerde Contracten (UAV-GC) maakte dat er een nationaal eenduidig juridisch kader is ontstaan waarin de toepassing van geïntegreerde contracten goed en uniform is geregeld. Dankzij de vele goede ervaringen met geïntegreerde contracten heeft de toepassing daarvan een vlucht genomen.

In de huidige aanpak om projecten te specificeren en contracteren staat de methodiek van Systems Engineering centraal. Systems Engineering is eigenlijk een gestandaardiseerd specificatie- en ontwerpproces, waarin de begrippen verificatie en validatie centraal staan. Door de procesgang van Systems Engineering kunnen we een project heel gestructureerd ontwikkelen en uitdrukkelijk formuleren.

Deze werkwijze werd in eerste instantie vooral opgepakt omdat het de mogelijkheid biedt om op een adequate manier te komen tot functionele specificaties voor geïntegreerde contracten. Systems Engineering biedt daarin wel de handvatten die het traditionele ontwerpproces niet, of niet op die manier biedt. De manier waarop ProRail en Rijkswaterstaat deze werkwijze invullen, is geworteld in de generieke Systems Engineering aanpak.

De totstandkoming van het ontwerp en de bijbehorende keuzes leggen we nadrukkelijk vast. Dit levert een transparant proces op. Naast het interne belang voor opdrachtgevers om tot een goede vraagspecificatie te komen, is dit in het vervolgtraject voor opdrachtnemers ook van belang om steeds complexer wordende projecten beheersbaar te houden.

Kernpunt van Systems Engineering is het expliciet vastleggen van informatie, iets wat in de traditionele procesgang meestal alleen in de hoofden van de betrokken personen gebeurde. Door de toenemende interne en externe raakvlakken en het feit dat informatie moet worden overdragen tussen partijen en tussen fasen in het bouwproces, is het communiceren van de vastgelegde informatie absoluut noodzakelijk om fouten, en daarmee faalkosten te voorkomen. Uitgangspunten, keuzes en geldende afspraken moeten duidelijk zijn. Om als sector goed verantwoording af te kunnen leggen naar politiek en maatschappij is transparantie en expliciet werken een absolute noodzaak.

De introductie van geïntegreerde contracten en de roep om expliciet en transparant projecten te realiseren, heeft de noodzaak van een goede methodiek ter ondersteuning hiervan alleen maar groter gemaakt. Systems Engineering biedt hiertoe de oplossing.

3

Achtergronden van Systems Engineering

3.1 Geschiedenis van Systems Engineering

Systems Engineering is voor het eerst toegepast in de telefoniesector als methode om operabiliteit tussen de verschillende delen van het telefoonsysteem te realiseren. Gedurende de Tweede Wereldoorlog werd Systems Engineering vooral toegepast bij de ontwikkeling van complexer wordende militaire systemen.

In de jaren vijftig vond een versnelling in de meer algemene toepassing van Systems Engineering plaats. Systems Engineering werd parallel in de lucht-, ruimtevaart en wapenindustrie (Boeing, Lockheed, Rockwell) en in de commerciële sector (AT&T) ontwikkeld tot een methode om in een uiterst competitieve omgeving (wapenwedloop, volkomen mededinging) steeds complexer wordende (R&D) problemen het hoofd te kunnen bieden.

In 1990 werd in de VS door een aantal bedrijven en overheidsinstellingen het eerste professionele platform voor Systems Engineering opgericht, the *National Council on Systems Engineering* (NCOSE). De taak van NCOSE was om Systems Engineering verder te ontwikkelen en opgedane kennis uit te dragen. Door de groeiende internationale belangstelling voor Systems Engineering is in 1995 de naam veranderd in the *International Council on Systems Engineering* (INCOSE), omdat de afdelingen niet alleen meer in de Verenigde Staten zaten maar ook in andere landen. Sinds 1995 wordt Systems Engineering wereldwijd aan een groot aantal universiteiten gedoceerd. In 1996 is de Nederlandse afdeling opgericht (INCOSE-NL).

In Nederland is in 1998/1999 Systems Engineering eerst effectief toegepast bij de ProRail projecten Noordtak Betuweroute, Demka-brug II en Aquaduct Abcoude. Rijkswaterstaat is de ontwikkeling gestart bij het project A4 Burgerveen – Leiden. Inmiddels is Systems Engineering de standaardmethodiek voor geïntegreerde contracten geworden, bij zowel ProRail als Rijkswaterstaat.

3.2 Definitie van Systems Engineering

Systems Engineering biedt een geïntegreerde en gestructureerde set methodieken om projecten succesvol te verwezenlijken en te beheren. De kernelementen uit de gehanteerde definitie die dit beschrijven kunnen we als volgt samenvatten:

- het op een gestructureerde wijze specificeren van een behoefte;
- het op een gestructureerde wijze ontwerpen van een passende oplossing bij de behoefte;
- het op een correcte wijze realiseren van deze oplossing;
- het op een juiste wijze beheren van de gerealiseerde oplossing;
- het op een juiste wijze verifiëren en valideren;
- het op een beheerste wijze managen van het gehele systeem gedurende zijn levensduur.

Bovenstaande maakt duidelijk dat Systems Engineering een methodiek is die de gehele levenscyclus van projecten ondersteunt.

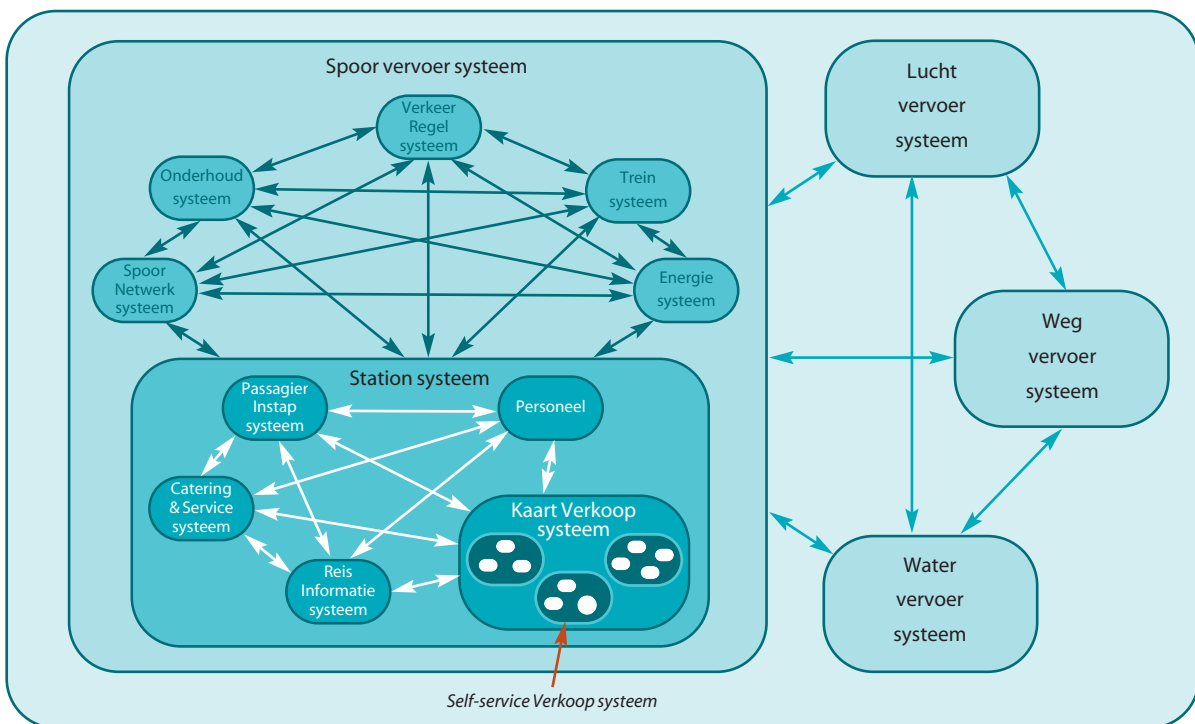
3.3 Systemdenken

De term Systems Engineering zegt het al: een fundamenteel punt is het denken in systemen. Een systeem wordt opgevat als "een set van gerelateerde componenten die op georganiseerde manier bijdragen aan een gezamenlijk doel". Bij systemdenken wordt vanuit een holistische visie, complexe problemen en mogelijke oplossingen beschouwd. Ofwel: we bekijken een probleem binnen de context van het grotere geheel. Systemdenken volgens Systems Engineering biedt een structuur waarbinnen we een project navolgbaar en aantoonbaar kunnen ontwikkelen en beheren.

De systemen waar deze leidraad betrekking op heeft, gebruiken we om diensten te leveren aan gebruikers en andere belanghebbenden van de netwerken van ProRail en Rijkswaterstaat. Vanuit de bedrijfsmodellen van ProRail en Rijkswaterstaat zijn vier primaire systemen zichtbaar die deze organisaties beheren. Dit zijn: hoofdwatersysteem, hoofdspoorwegennet, hoofdwegennet en hoofdvaarwegennet.

Hoe we een systeem zien en definiëren is afhankelijk van de belangen en verantwoordelijkheden van de waarnemer (het zogenaamde 'System of Interest'). Wat voor de ene persoon een systeem is, kan voor een andere persoon gelden als een element van een systeem. Onderstaande figuur illustreert de samenhang tussen systemen, subsystemen, componenten, hun omgeving en raakvlakken.

Figuur 1:
Systeem en systeemcontext



3.4 Systems Engineering in een notendop

Drie belangrijke aspecten binnen Systems Engineering zijn:

- Splitsen van specificatie en ontwerpen;
- Verifiëren en Valideren;
- De levenscyclus als uitgangspunt.

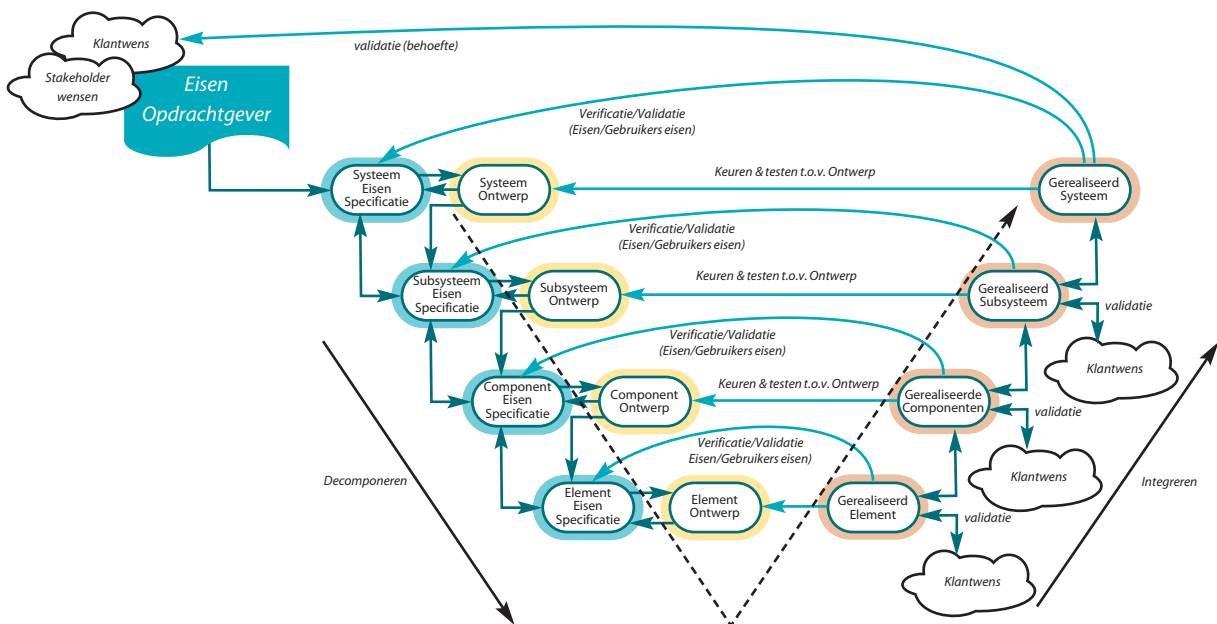
3.4.1 Splitsen van specificatie en ontwerpen

Specificeren omvat de inventarisatie en analyse van eisen en functies. Het startpunt voor een specificatie- en ontwerpproces is de probleemdefinitie. De oplossing van dat probleem vormt de doelstelling van een project. Bijvoorbeeld "De fileproblematiek tussen A en B moet worden verholpen". Deze probleemstelling wordt ook wel de topeis voor het project genoemd. De procesgang binnen Systems Engineering gaat vervolgens uit van twee parallel lopende processen om die doelstelling te realiseren. Het proces van specificeren en dat van ontwerpen: het eisen gestuurd ontwerpen, zoals dat als basisprincipe hierna wordt beschreven.

Voor verdere detaillering van het ontwerp, leiden we van de hoofdeisen en aantal (sub)eisen af, waaraan de systeemoplossing moet voldoen. Dit proces herhaalt zich totdat een ontwerp is ontstaan dat geschikt is om tot uitvoering te brengen. Vaak komen op dat laagste niveau specificatie en ontwerp samen. In dat geval kunnen we de specificatie- en ontwerpblokken ook als één gecombineerd blok beschouwen.

Wanneer we de processen van specificeren, ontwerpen en realiseren in één plaatje combineren, ontstaat onderstaand beeld. In de figuur is tevens het procesverloop gevisualiseerd met een neergaande lijn van detaillering in het specificatie- en

Figuur 2:
het integrale V-model



ontwerpproces en een opgaande lijn in het realisatieproces. De figuur illustreert tevens de relatie tussen de eisen van de opdrachtgever, de wensen van de stakeholders en de klant en het te ontwerpen/realiseren systeem. Het bekende V-model als vereenvoudigde weergave van een voortbrengingsproces is hierin duidelijk herkenbaar

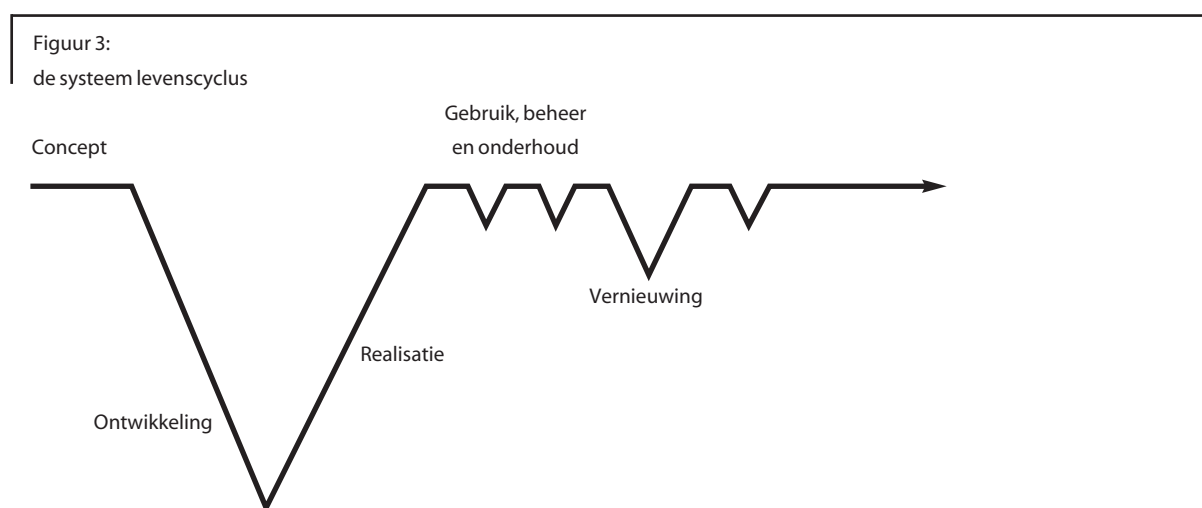
3.4.2 Verifiëren en Valideren

Een systeemontwerp stellen we op aan de hand van de gestelde eisen. Daarna verifiëren we of het ontwerp aan deze eisen voldoet. Ook valideren we om te zien of het voldoet aan de klantwens. Door validatie van de behoefte, bewaken we of het systeem aan de wensen voldoet. Uit de componenten worden de subsystemen geassembleerd en uiteindelijk het totale systeem gerealiseerd. Ook hier is sprake validatie (voldoet het gerealiseerde ook aan de klantwens) en van verificatie (voldoet het gerealiseerde aan het ontwerp), maar in de GWW-sector is het gebruikelijker om over keuren, testen te spreken. In dit verband keuren en testen we, aan de hand van het ontwerp, terwijl we uiteindelijk de eisen moeten verifiëren. Momenten waarop verificatie en validatie plaatsvinden, zijn aangegeven in bovenstaande figuur.

3.4.3 De levenscyclus als uitgangspunt

De levenscyclus als uitgangspunt uit zich op twee manieren. In de eerste plaats omdat we de hiervoor beschreven werkwijze van Systems Engineering gedurende alle fasen van de levenscyclus toegepassen. In de tweede plaats komt dit naar voren in de manier waarop we levenscyclusafwegingen in de specificaties op voorhand gedwongen en expliciet in het ontwerpproces meenemen.

Kenmerkend voor GWW-systemen is dat deze processen tijdens de gebruiksfase hernieuwd en gedurende de levenscyclus van het systeem meerdere malen doorlopen kunnen worden. Dit herhaaldelijk doorlopen van specificatie, ontwerp en realisatie gedurende de levenscyclus is in de volgende figuur grafisch weergegeven.

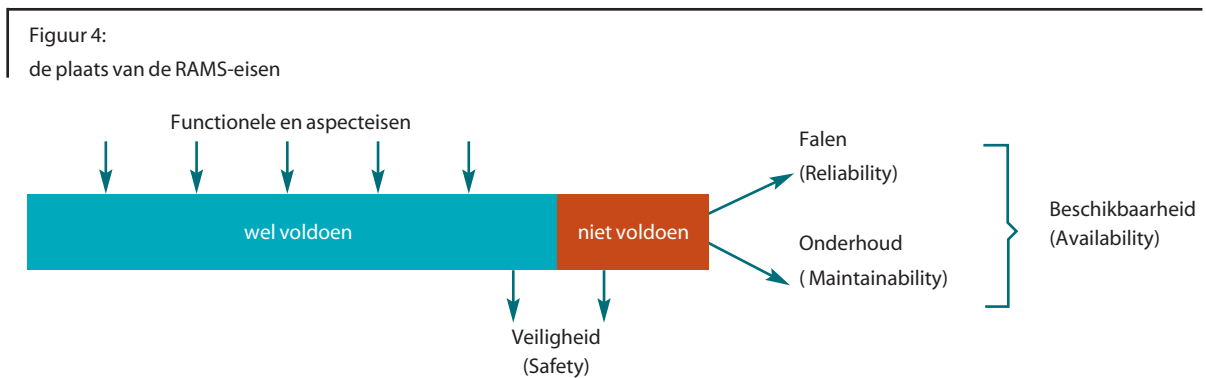


Merk hierbij op dat het opnieuw doorlopen van het specificatie- en ontwerpproces tijdens de gebruiksfase niet betekent dat het gehele proces weer blanco aanvangt.

In het kader van asset management zijn de historische gegevens van het systeem beschikbaar en aangevuld met actuele informatie.

RAMS-eisen (Reliability, Availability, Maintainability en Safety) spelen een centrale rol bij het maken van levenscyclus afwegingen. Het gebruik van RAMS-eisen is algemeen gebruikelijk voor infrastructuursystemen, waarbij voor het spoorvervoersysteem de EN50126 als opgelegde standaard wordt gebruikt. Daarom is het van belang in de specificatie- en ontwerpfase veel aandacht te besteden aan de RAMS-eisen van het systeem. Dit zijn zaken die de functionaliteit van het systeem in het geding kunnen brengen.

In onderstaande brengen we de plaats van RAMS-eisen in beeld.



De totale balk symboliseert het systeem tijdens gebruik, waarbij het blauwe deel het systeem werkend en volgens alle eisen voorstelt, en het rode deel waar dat niet het geval is. Het "niet voldoen" tijdens de gebruiksfase kan een gevolg zijn van falen (onbetrouwbaarheid) of doordat onderhoud nodig is. Beide situaties kunnen leiden tot een verminderde beschikbaarheid van het systeem. Neem als voorbeeld de HSL-Zuid, waar we proberen verminderde beschikbaarheid door onderhoud te beperken, door gerichte ontwerp oplossingen te kiezen die dat tegengaan.

De veiligheidseisen zijn erop gericht om alle mogelijke oorzaken van onveiligheid in de gebruiksfase (en deels tijdens de realisatie) te voorzien en daar bewust mee om te gaan. Dit kan betrekking hebben op zaken die voortvloeien uit het gebruik, zoals voorzien (het "blauwe deel") maar ook als gevolg van falen (bijvoorbeeld ongelukken) en de veiligheid van onderhoudswerk.

4

Systems Engineering in de relatie opdrachtgever - opdrachtnemer

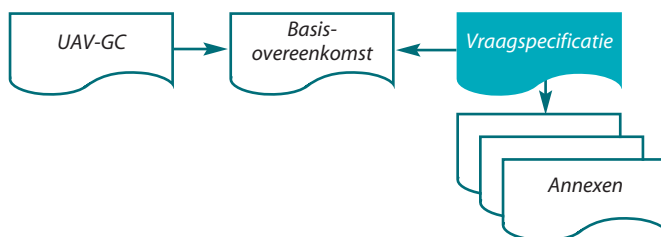
4.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken gingen we op hoofdlijnen in op de methodiek van Systems Engineering en hoe dit leidt tot specificaties, ontwerpen en realisatie van projecten. Hierna geven we aan op welke manier ProRail en Rijkswaterstaat Systems Engineering gebruiken bij geïntegreerde contracten, om de vragen aan de markt te formuleren en op welke manier zij de interactie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer vormgeven.

ProRail en Rijkswaterstaat passen Systems Engineering toe in geïntegreerde contracten. Dat zijn contracten waarop de UAV-GC van toepassing is en waarbij de opdrachtnemer naast de uitvoering, ten minste het voorafgaande deel van het ontwerpproces voor zijn rekening zal nemen. Welk deel dat is, hangt af van de concrete situatie rond het project. Het kan een groot deel van het ontwerpproces omvatten, maar dat kan ook beperkter zijn en voortborduren op een reeds door de opdrachtgever doorlopen deel van het ontwerpproces.

De relatie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer krijgt vorm en inhoud door de geldende afspraken. Die afspraken zijn opgenomen in de bij de UAV-GC horende basisovereenkomst. Door die basisovereenkomst zijn - op het moment dat een aanbestedingsprocedure start - een aantal contractdocumenten van toepassing. Enerzijds de UAV-GC zelf, anderzijds de vraagspecificatie en de door de opdrachtgever opgestelde annexen. Die annexen zijn benoemd in de basisovereenkomst en bevatten specifieke uitwerkingen van in de basisovereenkomst aangeduide onderwerpen. Voorbeelden zijn het acceptatieplan, het toetsingsplan ontwerpwerkzaamheden en de verzekeringen.

Figuur 5:
rangorde bij de UAV-GC

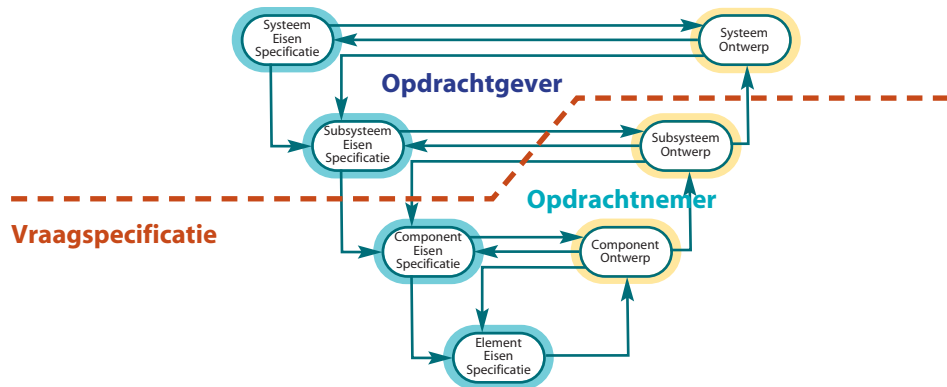


4.2 Vraagspecificatie

In de UAV-GC gebruiken we de term vraagspecificatie om de functionele vraag van opdrachtgever aan opdrachtnemer te duiden. De vraagspecificatie vormt "de basis voor de aanbieding van de opdrachtnemer". Wanneer we dit in termen van de Systems Engineering methodiek plaatsen, dan is de vraagspecificatie de scheidslijn tussen de beslisverantwoordelijkheid van de opdrachtgever en die van de opdrachtnemer. De opdrachtgever is – behoudens de waarschuwingplicht van de opdracht-

nemer – verantwoordelijk voor de inhoud en juistheid van de vraagspecificatie. De opdrachtnemer is vervolgens verantwoordelijk voor de gevolgen van de beslissingen die hij neemt bij de uitwerking van die vraagspecificatie.

Figuur 6:
Projectie van de verantwoordelijkheden op de life-cycle

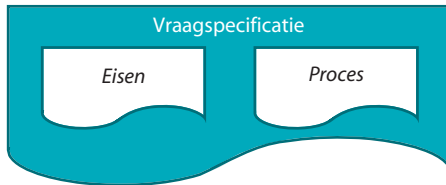


Merk hierbij op dat de scheidslijn lijkt te suggereren dat het uitwerkingsniveau van de vraagspecificatie voor alle onderdelen gelijk is. Dat is niet zo. De uitwerkingsgraad kan per onderdeel verschillen. Zo kunnen eisen voor een gebouw voor bepaalde esthetische elementen tot op een zeer gedetailleerd niveau zijn uitgewerkt, terwijl ten aanzien van de fundering alleen het grondonderzoek is meegegeven, met de eis dat het gebouw moet blijven staan. Anders dan in het traditionele proces, waarbij sprake is van ontwerpfase-volgtijdelijkheid - resulterend in een voorlopig ontwerp, een definitief ontwerp en een bestek - kenmerkt het Systems Engineering-proces zich door paralleliteit in de uitwerking van specificaties en het daarop te projecteren ontwerp. Die uitwerking door de opdrachtgever gaat, waar het de concrete specificaties betreft, niet verder dan uit oogmerk van risico-reducering noodzakelijk is. Dat geldt uiteraard voor zover hij – vanuit zijn gezichtspunt – in staat is de bij die uitwerking horende risico's in te schatten. Op deze wijze is niet alleen de totaal aanwezige oplossingsruimte voor de opdrachtnemer van meet af transparant, maar zijn ook de aan die oplossingsruimte verbonden risico's en onzekerheden, naar het oordeel van de opdrachtgever draagbaar, inzichtelijk en beheersbaar.

4.3 Tweedeling Vraagspecificatie: Eisen en Proces

ProRail en Rijkswaterstaat hebben de Vraagspecificatie gesplitst in twee delen: het deel 'Eisen' (ook wel Eisenspecificatie of deel 1 genoemd) en het deel 'Proces' (ook wel Statement of Work of SoW of deel 2 genoemd). Deze opsplitsing kunnen we zien als een indeling in WAT-eisen en HOE-eisen.

Figuur 8:
samenstelling van de vraagspecificatie



Het deel Eisen van de vraagspecificatie geeft de WAT-eisen weer. Hierin zijn de aan het eindproduct gestelde eisen beschreven (eisen aan de output). Typische WAT-eisen zijn zaken als 'de tunnel moet waterdicht zijn'. In het deel Eisen is de top-level systeemdefinitie en -beschrijving gegeven, inclusief een duiding van de systeemgrenzen. Deze systeemdefinitie is het rechtstreekse product van het Systems Engineering proces, zoals dat in het vorige hoofdstuk is omschreven. Daarnaast zijn in het deel Eisen van de vraagspecificatie de verschillende eisenbomen opgenomen en de relevante - aan oplossingen gestelde - randvoorwaarden benoemd. Het deel Eisen van de vraagspecificatie is een telkens specifiek, ten behoeve van de oplossing van een concreet probleem door de opdrachtgever, te vervaardigen document.

Het deel Proces van de vraagspecificatie beschrijft de HOE-eisen. Hierin zijn de eisen aan het proces van totstandkoming van het te realiseren eindproduct gesteld (eisen aan de throughput). Centraal daarin staat dat we het object volgens de methode Systems Engineering moeten uitwerken, verifiëren, bouwen en valideren. Daarnaast bevat dit deel specifieke proceseisen, bijvoorbeeld dat we de ontwerpwerkzaamheden moeten uitvoeren conform bepaalde standaarden. In het deel Proces van de vraagspecificatie benoemt de opdrachtgever tevens – op hoofdlijnen – de door de opdrachtnemer uit te voeren werkzaamheden. Deze, door de opdrachtgever voorgeschreven indeling van werkzaamheden van de opdrachtnemer, noemen we de contractueel voorgeschreven Work Breakdown Structure (contract-WBS). De contract-WBS is in het deel Proces uitgewerkt in de vorm van werkpakketten. Voor ieder werkpakket beschrijven we wat de doelstelling is en welke activiteiten daarbinnen worden voorzien. Daarnaast beschrijven we welke input en output voor een werkpakket van belang is, in termen van informatie en producten. Tenslotte beschrijven we de eisen aan de processen en producten van een werkpakket. Het deel Proces van de vraagspecificatie is een meer generieke (statischer) beschrijving van de processen waarlangs we een oplossing tot stand moet brengen.

4.4 Procesinteractie

Behalve structurering van de vraagspecificatie in het contract, vormt de methodiek van Systems Engineering bij geïntegreerde contracten ook de basis voor de procesinteractie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer. Dit geldt zowel voor de aanbestedingsfase, waar die interactie is vastgelegd in de aanbestedingsdocumenten, als tijdens de contractfase, waar de proceseisen in het deel Proces van de vraagspecificatie zijn vervat.

Het komt erop neer dat de opdrachtnemer zijn eigen procesvoering net zo organiseert en structureert als de opdrachtgever dat in een eerdere fase heeft gedaan. En dat geldt in de volle breedte, zowel in de structurering van de werkwijze als in de structurering van de te produceren documenten.

In de aanbestedingsfase betekent dit dat de opdrachtnemer de verdere uitwerking van de vraagspecificatie van de opdrachtgever ter hand neemt. Hij genereert alternatieve oplossingen, weegt die tegen elkaar af en verifieert de gekozen oplossing. Vervolgens formuleert hij bij verdere uitwerking zelf de afgeleide eisen aan het gekozen alternatief. Die eerste decompositieslag zal doorgaans het niveau hebben van de aanbidding: een één slag dieper uitgewerkt deel.

In de fase na gunning vindt verdere decompositie plaats en herhalen de specificatie- en ontwerpstappen zich. Daardoor groeit het deel Eisen van de vraagspecificatie in de details, maar het geheel blijft steeds te herleiden tot de hoger liggende eisen. In de bouwfase vindt tenslotte op elk decompositieniveau validatie van de gerealiseerde oplossing plaats.

Leidraad voor Systems Engineering

Technische deel

Inhoudsopgave

1	Inleiding	29
1.1	Wat is Systems Engineering?	29
1.2	Geschiedenis van Systems Engineering	29
1.3	Wat zijn de systemen van ProRail en Rijkswaterstaat?	30
1.4	Filosofie van de leidraad	32
1.5	De context van Systems Engineering	32
2	Systems Engineering als werkwijze in de GWW-sector	35
2.1	Inleiding	35
2.2	Technische processen uit de ISO 15288	35
2.3	Engineeringproces	36
2.3.1	Analyseren eisen	37
2.3.2	Functionele Analyse en Allocatie	37
2.3.3	Eisenloop	39
2.3.4	Ontwerpproces	39
2.3.5	Ontwerploop	40
2.3.6	Verifiëren	40
2.4	Stappen in het ontwerpproces	40
2.4.1	Genereren opties en reduceren opties	40
2.4.2	Uitwerken varianten en kiezen beste variant	41
2.4.3	Het uitwerken van het ontwerp	42
2.5	Topdown benadering voor het engineeringproces	42
2.5.1	Decomponeren	44
2.5.2	Afleiden	45
2.5.3	Traceren	45
2.5.4	Integreren	46
2.5.5	Baselines	46
2.6	Realisatieproces	47
2.6.1	Realisatie van objecten	48
2.6.2	Realiseren objecten tot een systeem	48
2.6.3	Keuren/testen	48
2.6.4	Validatie	49
2.7	Fasering van de levenscyclus	49
2.8	Beheersen processen door structureren	51
2.8.1	Functieboom	52
2.8.2	Eisenboom	53
2.8.3	Objectenboom	54
2.8.4	Work breakdown structure (WBS)	55
2.8.5	Bomen met ontwerpproducten	57
2.9	Output van de processen	58
2.9.1	Output eisenanalyse	58
2.9.2	Output functionele analyse	59
2.9.3	Output van het ontwerpproces	59
2.9.4	Output van het realisatieproces	60
2.9.5	Output van de processen in de levenscyclusfase	60

3	Koppeling technische processen met overige processen	61
3.1	De context van het technisch proces	61
3.2	Relatie technisch proces met omgevingsproces	62
3.3	Relatie technisch proces met inkoopproces	63
3.4	Relatie technisch proces met projectmanagement en projectbeheersing ..	65
3.5	Relatie technisch proces met projectondersteuning	66
Bijlage 1:	Definitielijst	68
Bijlage 2:	Afkortingen en literatuurlijst	75
Bijlage 3:	Personen die een bijdrage hebben geleverd	76

Overzicht met figuren:

Figuur 1:	illustratie van een systeemcontext	31
Figuur 2:	relatie tussen transportsystemen	32
Figuur 3:	systems engineering in IPM	33
Figuur 4:	het engineeringproces	36
Figuur 5:	voorbeeld van functionele analyse en allocatie bij een stuw- en sluizencomplex	39
Figuur 6:	het engineeringproces in de GWW-sector	41
Figuur 7:	het iteratieve engineeringproces op verschillende detailniveaus	44
Figuur 8:	traceerbaarheid van eisen	46
Figuur 9:	het realisatieproces	47
Figuur 10:	de schommel	49
Figuur 11:	de levenscyclusfasen	50
Figuur 12:	systemen in de levenscyclus	51
Figuur 13:	de functieboom	52
Figuur 14:	uitgewerkte functieboom	53
Figuur 15:	objectenboom	54
Figuur 16:	voorbeeld van een objectenboom	55
Figuur 17:	voorbeeld van een activiteitenboom (1)	55
Figuur 18:	voorbeeld van een WBS (2)	56
Figuur 19:	specificatieboom	57
Figuur 20:	uitgewerkt voorbeeld van een specificatieboom	57
Figuur 21:	de belangrijkste producten van het engineering-, ontwerp- en realisatieproces	60
Figuur 22:	integraal projectmanagement	61
Figuur 23:	sturen op tijd, geld en kwaliteit met IPM	62
Figuur 24:	koppeling technisch proces naar omgevingsproces	63
Figuur 25:	koppeling technisch proces en inkoopproces	64
Figuur 26:	relatie tussen bomen	65

1

Inleiding

1.1 Wat is Systems Engineering?

Systems Engineering is in essentie een gestructureerde specificatie- en ontwerp-methode. Systems Engineering heeft tot doel structuur te geven aan en inzicht te verschaffen in de complexiteit van het te realiseren object. Met behulp van Systems Engineering kunnen risico's die ontstaan door verkeerde of niet volledige informatie en uitgangspunten worden beheerst. Het gaat erom dat het systeem als totaal wordt beschouwd, over de gehele levenscyclus, inclusief de samenhang met zijn omgeving.

Systems Engineering biedt een geïntegreerde en gestructureerde set methodieken om projecten succesvol te verwezenlijken en te beheren. De kernelementen uit de gehanteerde definitie die dit beschrijven kunnen ook als volgt worden samengevat:

- het op een gestructureerde wijze *specificeren* van een behoefte;
- het op een gestructureerde wijze *ontwerpen* van een passende oplossing bij de behoefte;
- het op een correcte wijze *realiseren* van deze oplossing;
- het op een juiste wijze *beheren* van de gerealiseerde oplossing
- het op een juiste wijze *verifiëren* en *valideren*
- het op een beheerste wijze *managen* van het gehele project gedurende zijn levensduur.

Daarmee wordt inzichtelijk gemaakt dat Systems Engineering een methodiek is die de gehele levenscyclus van projecten ondersteunt.

1.2 Geschiedenis van Systems Engineering

Systems Engineering is voor het eerst toegepast in de telefoniesector als methode om operabiliteit tussen de verschillende delen van het telefoonsysteem te realiseren. Gedurende de Tweede Wereldoorlog werd Systems Engineering vooral toegepast bij de ontwikkeling van in toenemende mate complexer wordende militaire systemen.

In de vijftiger jaren vond een versnelling in de meer algemene toepassing van Systems Engineering plaats. Systems Engineering werd parallel in de lucht-, ruimtevaart en wapenindustrie (Boeing, Lockheed, Rockwell) en in de commerciële sector (AT&T) ontwikkeld tot een methode om in een uiterst competitieve omgeving (wapenwedloop, volkomen mededinging) steeds complexer wordende (R&D) problemen het hoofd te kunnen bieden.

In 1990 werd in de VS door een aantal bedrijven en overheidsinstellingen het eerste professionele platform voor Systems Engineering opgericht, *the National Council on Systems Engineering* (NCOSE). De taak van NCOSE was om Systems Engineering verder te ontwikkelen en opgedane kennis uit te dragen. Door de groeiende internationale belangstelling voor Systems Engineering is in 1995 de naam veranderd in *the International Council on Systems Engineering* (INCOSE), omdat de afdelingen niet alleen meer in de Verenigde Staten zaten maar ook in andere landen. Sinds 1995 wordt Systems Engineering wereldwijd aan een groot aantal universiteiten gedoceerd. In 1996 is de Nederlandse afdeling opgericht (INCOSE-NL).

In Nederland is in 1998/1999 Systems Engineering eerst effectief toegepast bij de ProRail projecten Noordtak Betuweroute, Demka-brug II en Aquaduct Abcoude. Bij Rijkswaterstaat is de ontwikkeling gestart bij het project A4 Burgerveen – Leiden. En inmiddels is Systems Engineering de standaardmethodiek bij zowel ProRail als Rijkswaterstaat geworden voor geïntegreerde contracten.

1.3 Wat zijn de systemen van ProRail en Rijkswaterstaat?

Wat is een systeem? Een systeem is een set van gerelateerde componenten bedoeld om in uitvoering van een gespecificeerde functie een bepaald doel te realiseren. De systemen waar deze leidraad betrekking op heeft, worden gebruikt om diensten te leveren aan gebruikers en andere belanghebbenden van de netwerken van ProRail en Rijkswaterstaat. Vanuit de bedrijfsmodellen van ProRail en Rijkswaterstaat zijn een viertal primaire systemen zichtbaar die door de genoemde organisaties beheerd moeten worden. Dit zijn: hoofdwatersysteem, hoofdspoorwegennet, hoofdwegenet en hoofdvaarwegennet.

Hoe een systeem kan worden gezien en gedefinieerd is afhankelijk van de belangen en verantwoordelijkheden van de waarnemer (het zogenaamde 'System of interest'). Wat voor de ene persoon een systeem is, kan voor een andere persoon gelden als een component van een systeem.

Voorbeeld:

Een tunnel kan gezien worden als systeem bestaande uit fundering, hoofd draagconstructie en veiligheidssystemen. In het totale hoofdspoorwegen- of hoofdwegenennetwerk is een tunnel echter niet meer dan een component van het systeem hoofdspoorwegen- of hoofdwegenennetwerk.

Het is hierbij belangrijk de samenhang van de verschillende systeemelementen zo lang mogelijk mee te nemen binnen het engineeringproces. Vaak worden complexe systemen opgedeeld in objecten die weer als systeem worden beschouwd. Dit om ervoor te zorgen dat via een overeenkomst de verantwoordelijkheid voor de uitvoering van de objecten aan een andere partij over te dragen is. Maar het te snel ontkoppelen van objecten zonder de samenhang te bewaken, kan een risico voor het goed functioneren van een systeem betekenen en innovatieve oplossingen onnodig belemmeren.

De systemen in de GWW-sector kunnen bestaan uit één of meer van de volgende componenten: apparatuur, programmatuur, personen, processen, procedures, voorzieningen en andere van nature voorkomende entiteiten (in het Engels: products, processes en people). In een project is het mogelijk dat er één systeemcomponent overheerst, denk aan een onderhoudsproject waar asfalt vervangen wordt. Vaak zal het echter zo zijn dat er binnen projecten meerdere systeemcomponenten aanwezig zijn, of dat het mogelijk is langs verschillende manieren aan de eisen te voldoen. Als er bij meerdere systeemcomponenten ontwerpvrijheid is, neemt de kans op innovatieve oplossingen toe.

Voorbeeld:

Het communiceren van verkeersmanagementmaatregelen kan door middel van systemen rond de weg (matrixborden, drips). Een alternatieve oplossing kan bijvoorbeeld zijn om deze maatregelen via de navigatiesystemen in het voertuig te communiceren.

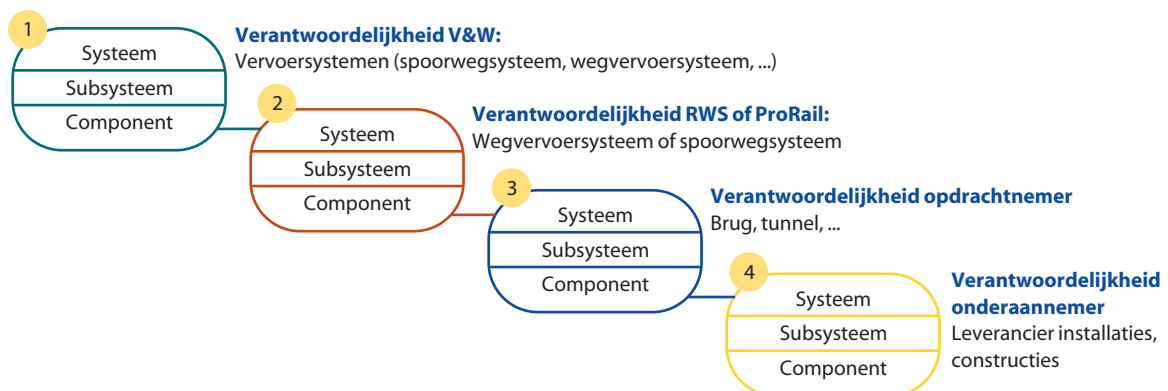
Voorbeeld:

Processen, infrastructuur en vervoersmiddel horen op elkaar afgestemd te zijn om tot een optimaal resultaat te komen. Om op het spoor de klant te kunnen vervoeren is het noodzakelijk dat processen (dienstregeling), de infrastructuur (het spoor) en de vervoersmiddelen (treinen) op elkaar aan sluiten.

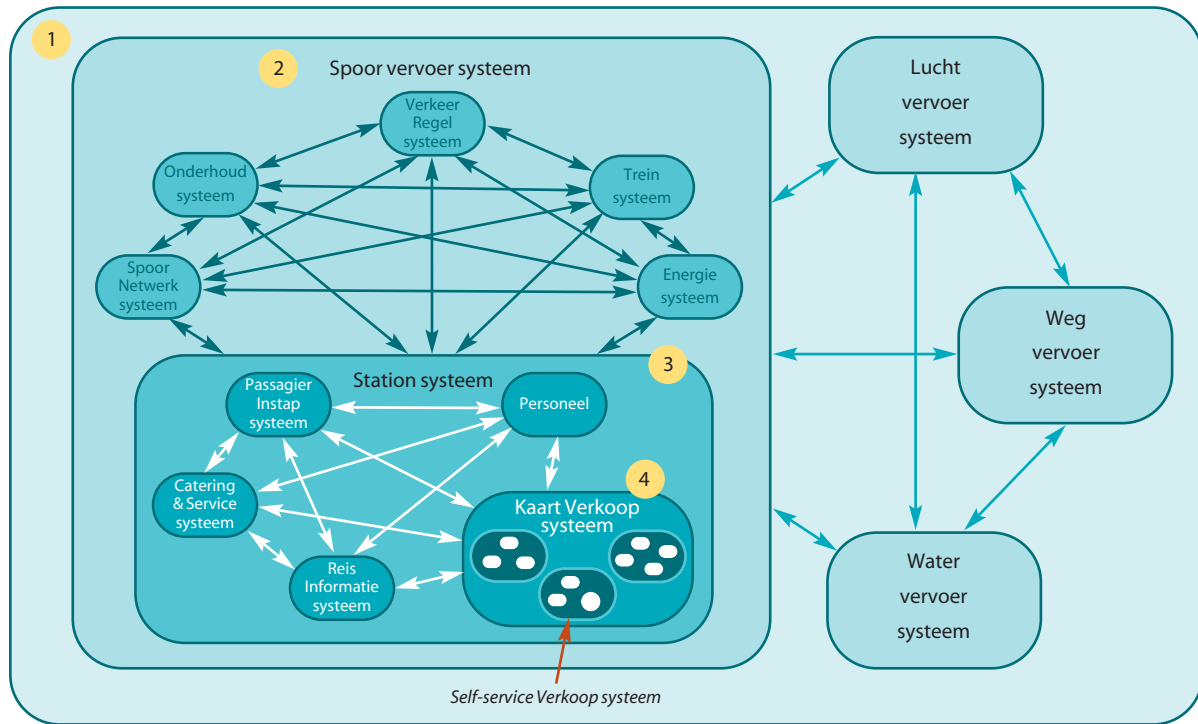
In de GWW-sector werken we veel op projectbasis. Het is dan belangrijk om het verschil te zien tussen de projectscope en de systemscope. Vaak is zichtbaar dat een discussie over de systeemcontext voortkomt uit het niet onderscheiden van de systemscope en de projectscope.

Ook bij de wisseling van verantwoordelijkheid ontstaat er soms discussie over de systeemcontext. Dit valt te illustreren met de onderstaande figuur, waarin we als voorbeeld hebben weergegeven hoe deze wisseling van verantwoordelijkheden kan liggen. Het is belangrijk om altijd de totale systemscope in het oog te houden, er is op dit gebied nog veel winst te behalen. In de ideale situatie gaan er bij de wisseling van verantwoordelijkheid geen informatie verloren door een gebrekkige overdracht.

Figuur 1: illustratie van een systeemcontext



Figuur 2:
relatie tussen vervoersystemen



1.4 Filosofie van de leidraad

De filosofie van deze leidraad is dat de toegepaste methode van Systems Engineering bij ProRail en Rijkswaterstaat aan de volgende kenmerken voldoet:

- Geschikt voor alle systemen in de GWW sector;
- Hetzelfde voor elke partij of elk organisatieonderdeel in de waardeketens van ProRail en Rijkswaterstaat: opdrachtgevers, hoofdaannemers, onderaannemers, grondstoffenleveranciers en ingenieursbureaus;
- Geschikt voor technische processen in elke fase van de levenscyclus van de systemen van ProRail en Rijkswaterstaat, dus van ontwikkeling tot en met sloop. Systems Engineering voorziet daarmee dus ook in de behoefte van de beheerders van de netwerken aan een beheerste procesgang voor alle objecten gedurende de gehele levenscyclus;
- Gebaseerd op een open en internationale standaard, te weten de ISO/IEC 15288:2002 "Systems Engineering – System life cycle processes".

1.5 De context van Systems Engineering

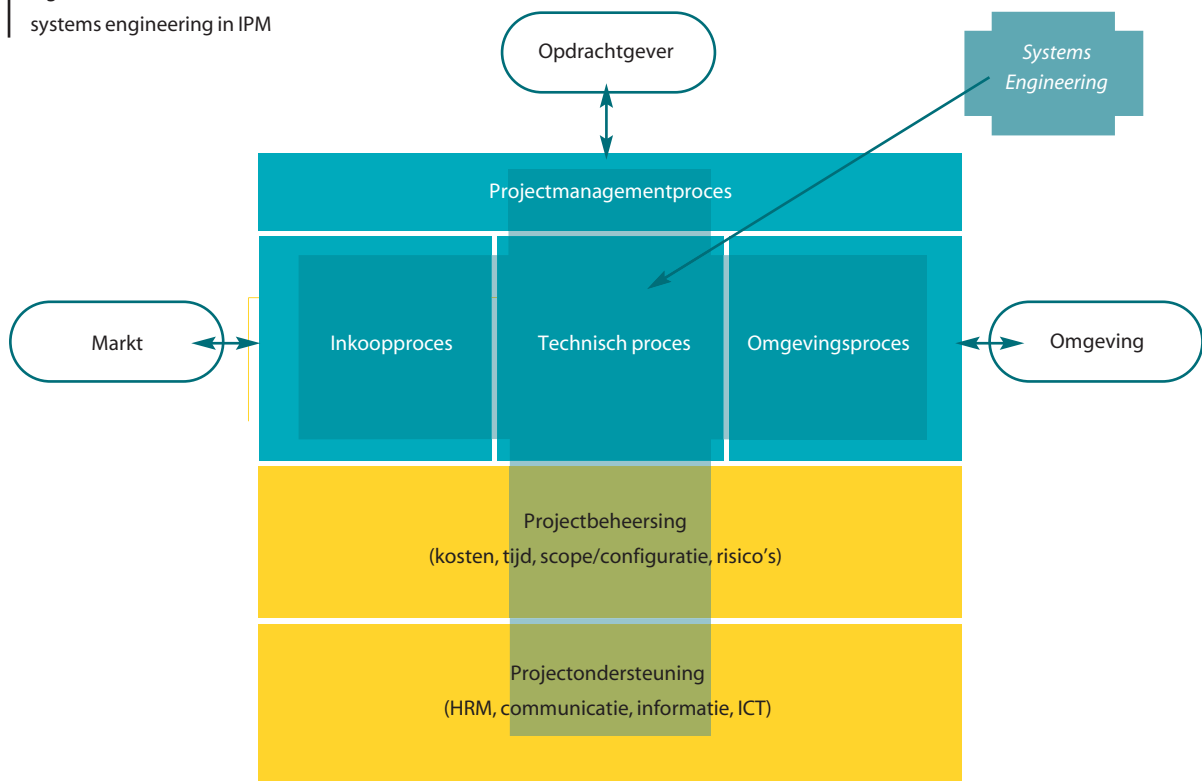
Binnen een project kunnen de volgende processen worden onderscheiden: projectmanagementproces, omgevingsproces, technisch proces, inkoopproces, projectbeheersing en projectondersteuning. Deze processen worden samengevat in het zogenaamde Integraal Project Managementmodel (IPM)¹. Elk proces kent een eigen fasering en werkwijze. Het inkoopproces begint bijvoorbeeld met het vaststellen van

¹ Het Integraal Projectmanagementmodel wordt bij ProRail en Rijkswaterstaat gebruikt als kapstok voor de Statement of Work respectievelijk Vraagspecificatie deel 2 bij D&C-contracten. Daarnaast worden projecten binnen Rijkswaterstaat volgens het Integraal Projectmanagementmodel georganiseerd.

de inkoopbehoefte en eindigt met het goedkeuren van het product of de dienst. Systems Engineering is binnen de context van het IPM-model voornamelijk een werkwijze voor het technisch proces (zie onderstaande figuur).

Tussen het technisch proces en de overige processen vindt interactie plaats. Systems Engineering vormt de basis voor deze interactie. Het technisch proces levert bijvoorbeeld documentatie voor het doorlopen van de Tracéwetprocedure of bijvoorbeeld een eisenspecificatie voor een aanbesteding. Deze relaties komen verder aan de orde in hoofdstuk 3.

Figuur 3:
systems engineering in IPM



2

Systems Engineering als werkwijze in de GWW-sector

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een aanzet gegeven voor de werkwijze met Systems Engineering in de GWW-sector. Het zwaartepunt in dit hoofdstuk ligt hierbij primair op het technisch proces. In paragraaf 2.2 worden de technische processen geïntroduceerd. Het engineeringproces is het onderwerp van paragraaf 2.3, terwijl in paragraaf 2.4 ingezoomd wordt op het ontwerpproces als onderdeel van het engineeringproces. Het engineeringproces wordt meestal niet één maal, maar verschillende malen doorlopen. Dit is het iteratieproces welke is opgenomen in paragraaf 2.5. Na de engineering wordt het realisatieproces behandeld in paragraaf 2.6. Paragraaf 2.7 behandelt de processen en de levenscyclus. De verschillende boomstructuren zoals objectenboom en Work Breakdown Structure zijn onderwerp van paragraaf 2.8. In paragraaf 2.9 wordt ten slotte een overzicht gegeven van de producten die voortkomen uit alle behandelde processen.

2.2 Technische processen uit de ISO 15288

Over Systems Engineering zijn de afgelopen decennia vele normen geschreven. Deze normen zijn in de afgelopen jaren steeds verder geharmoniseerd en hebben zich ontwikkeld tot een universele internationale standaard, te weten de ISO/IEC 15288:2002 "Systems Engineering – System life cycle processes" (ISO 15288). Als we kijken naar de ISO 15288 kunnen we constateren dat Systems Engineering zeer breed is opgevat. De meeste handboeken Systems Engineering beschrijven enkel het engineeringproces, terwijl de ISO 15288 processen uit de gehele levenscyclus beschrijft. Deze norm kent ook een overlap met de bekendere ISO 9001, die betrekking heeft op kwaliteitsmanagement.

De technische processen uit de ISO 15288 zijn:

- a Specificatieproces van eisen van belanghebbenden: zet de behoeften en wensen van belanghebbenden om in een gezamenlijke reeks eisen;
- b Eisenanalyseproces: vertaal deze eisen in meetbare systeemvereisten en functies van het systeem;
- c Architectuurontwerpproces: breng de oplossing tot stand die aan de systeemvereisten voldoet;
- d Invoeringsproces: bouw de systeemonderdelen;
- e Integratieproces: stel het systeem samen uit de systeemonderdelen conform het architectuurontwerp;
- f Verificatieproces: controleer of het systeem en de onderdelen daarvan voldoen aan de eisen;
- g Overgangsproces: maak het systeem gebruiksklaar;
- h Validatieproces: controleer of het systeem de geëiste functionaliteit biedt;
- i Operationeel bedrijfsproces: maak gebruik van het systeem;
- j Beheer- en onderhoudsproces: onderhoud het systeem, inclusief verbetering en hergebruik;
- k Verwijderingsproces: einde levenscyclus, sloop het systeem.

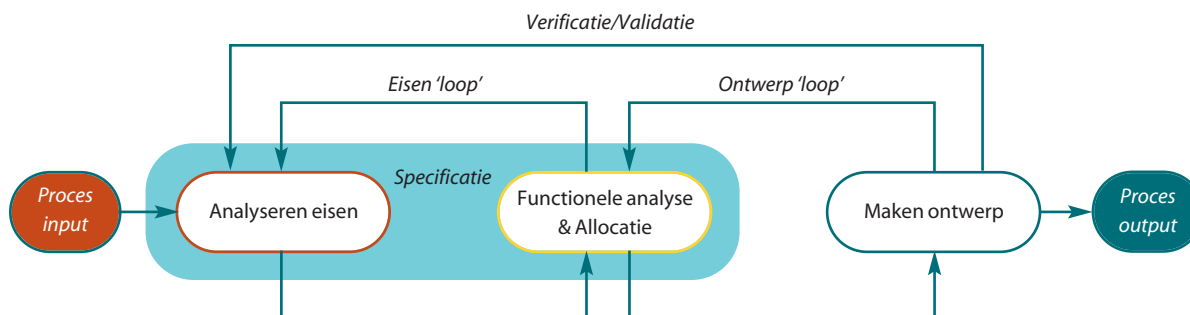
In onderstaande tabel is een relatie gelegd tussen bovengenoemde processen uit de ISO 15288 en de gangbare procesbenamingen uit de GWW-sector

ISO 15288	GWW-sector	
a Specificatieproces van eisen belanghebbenden	Specificatieproces van eisen belanghebbenden	
b Eisenanalyseproces	Eisenanalyseproces en Functionele analyse en allocatie	Engineeringproces
c Architectuurontwerpproces	Ontwerpproces	
d Invoeringsproces	Uitvoeringsproces	
e Integratieproces	Uitvoeringsproces	
f Verificatieproces ²	Verificatieproces	Realisatieproces
g Overgangproces	Opleveringsproces	
h Validatieproces ²	Validatieproces	
i Operationeel bedrijfsproces	Operationeel bedrijfsproces	
j Beheer- en onderhoudsproces	Beheer - en onderhoudsproces	Life cycle proces
k Verwijderingsproces	Sloopproces	

2.3 Engineeringproces

Het engineeringproces bekend uit de theorie over Systems Engineering (Systems Engineering Fundamentals) is een algemeen toepasbaar proces. Dit proces bestaat uit een drietal deelprocessen, namelijk de eisenanalyse, de functionele analyse en het maken van het ontwerp. Tussen twee opeenvolgende deelprocessen is een loop zichtbaar. Aan het eind van het proces wordt het ontwerp afgezet tegen de geformuleerde eisen. Dit is de verificatie van het ontwerp aan de eisen. Hieronder lichten we de deelprocessen en de loops toe aan de hand van figuur 3 toe.

Figuur 4:
het engineeringproces



² Zowel het verificatie- als validatieproces vindt plaats in alle fasen van de levenscyclus.

Deze figuur is een verdere uitwerking van de processen die we in het management-deel van de Leidraad Systems Engineering het 'specificeren' en het 'eisengestuurd ontwerpen' hebben genoemd.

De *input* voor het engineeringproces is het resultaat van het specificatieproces van eisen belanghebbenden, waarin de behoefte van belanghebbenden (opdrachtgever en stakeholders) worden omgezet in eisen. Dit proces begint altijd met een probleem en de daaraan gerelateerde behoefte(n) van de klant/opdrachtgever en overige belanghebbenden.

2.3.1 Analyseren eisen

Het doel van het eisenanalyseproces is het vertalen van de eisen van belanghebbenden in meetbare systeemvereisten en functies van het systeem. In deze fase worden dan ook de functies omgezet in eisen en worden eisen waar nodig doorvertaald naar meer gedetailleerde eisen, afgeleid van de ontwerpkeuzes die zijn vastgesteld.

Voorbeeld:

Het verkeersaanbod op de verbinding Schiphol - Den Haag is te groot voor de bestaande weg. De Minister van Verkeer en Waterstaat wil dat dit vervoersprobleem op de verbinding (het systeem) wordt opgelost. Hiertoe verstrekt het ministerie een opdracht aan Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat vertaalt deze opdracht verder in meetbare eisen aan het systeem.

Eisen aan de functies van het te ontwerpen systeem bepalen wat het systeem moet kunnen en dienen functioneel te worden geformuleerd. De functionele eisen moeten "SMART" zijn en uitgedrukt in bijvoorbeeld hoeveelheden, beschikbaarheid en prestatie. Van al de eisen wordt de structuur weergegeven in bovenliggende en onderliggende eisen ofwel hoofdeisen en afgeleide eisen.

Tegelijkertijd komen er ook beperkingen aan bod, die de grenzen bepalen voor de ontwerpruimte, zoals omgevingsfactoren en regelgeving. Deze beperkingen vinden we terug in de verschillende randvoorwaarden die aan een te ontwerpen systeem worden gesteld.

Naast functionele eisen randvoorwaarden worden ook andere eisen aan een systeem gesteld. Verschillende objecten binnen een systeem hebben onderlinge raakvlakken (bijvoorbeeld tussen enerzijds een weg en anderzijds een viaduct) en/of raakvlakken met de omgeving. Dergelijke raakvlakken worden beschreven in de interne of externe raakvlakeisen. Daarnaast zijn er voor een aantal aspecten, zoals veiligheid, vormgeving en dergelijke (zie paragraaf 2.9.1), eisen te stellen die los van de primaire functie van het project en de objecten binnen het project staan. Deze eisen staan in de aspecteisen.

2.3.2 Functionele Analyse en Allocatie

Het doel van de functionele analyse en allocatie is om de functies van een systeem om te zetten in objecten (functievullers) en het opstellen van een specificatie, waarin de eisen aan het betreffende object zijn vastgelegd.

Bij een functionele analyse en allocatie worden de volgende stappen genomen:

- het uitwerken van alle functies van het systeem
- objecten (functie vervullers) afleiden uit deze functies
- structuur en samenhang aanbrengen in deze objecten
- eisen uit de eisenanalyse koppelen aan deze objecten

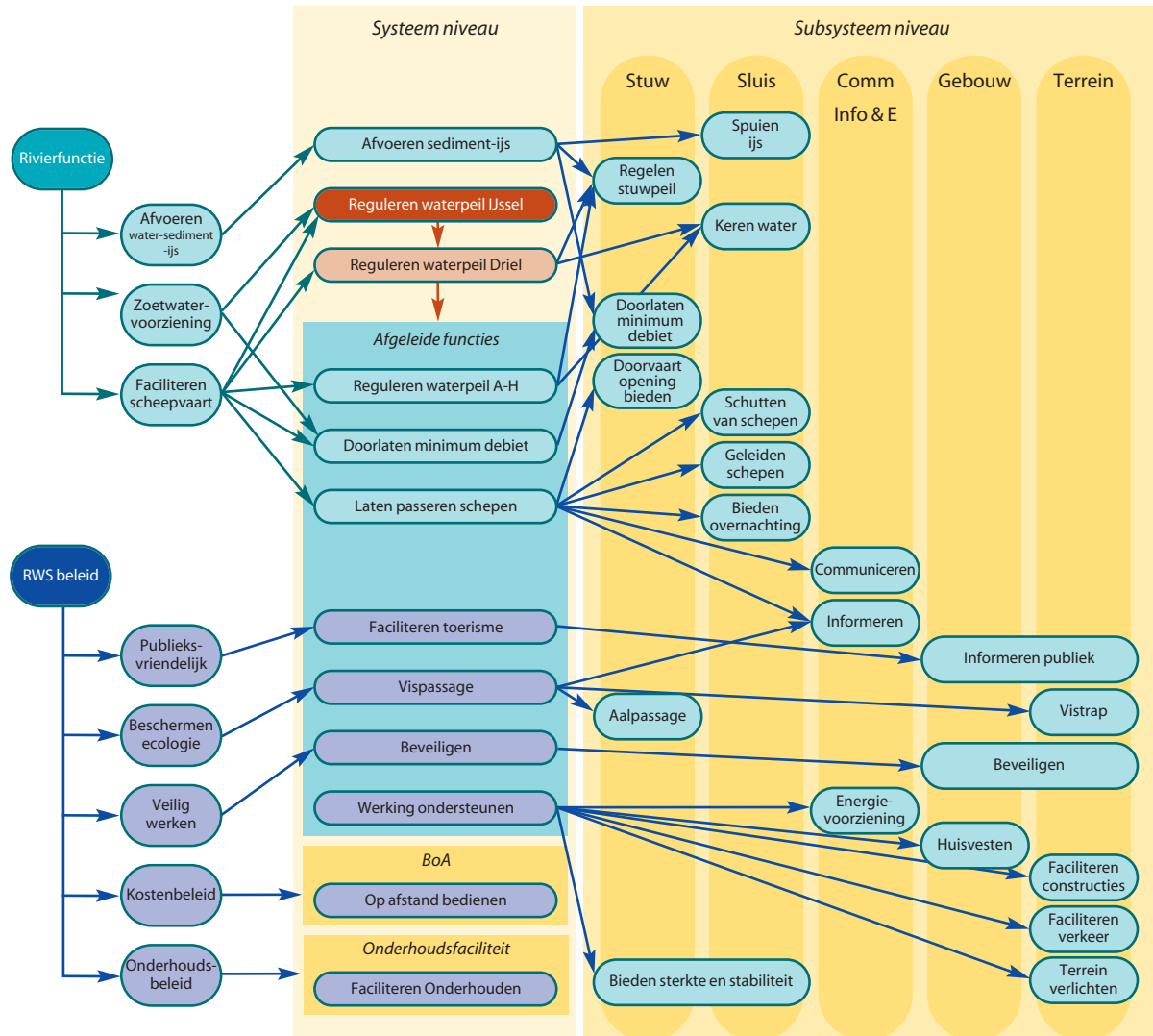
De input voor dit proces zijn de functies van het te ontwerpen systeem bepaald vanuit de behoefte van de opdrachtgever en/of stakeholder. Deze hoofdfuncties kunnen verder ontleed of afgeleid worden in subfuncties. In hoeverre we deze functies ontleden hangt af van de beschikbare informatie en de gevraagde behoefte in een bepaalde fase van het project. Door deze ontleding ontstaat er een structuur in functies.

Voorbeeld:

Eén van de in beeld gebrachte functies van het systeem is “het verbinden van oevers”. Hieruit wordt het oplossingsvrije object “oeververbinding” afgeleid, waar vervolgens prestatie-eisen aan worden gekoppeld.

Vervolgens worden genoemde functies omgezet in oplossingsvrije objecten. Eén object kan meerdere functies vervullen. Ook in deze objecten is een structuur aanwezig. Het resultaat van de eisenanalyse is een overzicht van alle, op dat moment bekende, eisen en raakvlakken. Deze eisen, raakvlakken en eventueel andere informatie, worden gekoppeld aan deze objecten. Hierdoor ontstaat een specificatie per object, die de basis is voor het maken van het ontwerp.

Figuur 5:
voorbeeld van functionele analyse en allocatie bij een stuwen- en sluizencomplex



2.3.3 Eisenloop

Bij de functionele analyse ontstaat het inzicht op welke punten het resultaat van het eisenanalyseproces niet volledig is geweest. Via de eisenloop wordt weer terug gegaan naar de eisenanalyse en wordt deze analyse opnieuw doorlopen. Dit maakt de eisenanalyse en de functionele analyse tot een zich herhalend proces dat we meerdere malen kunnen doorlopen. Dit iteratief proces wordt eisenloop genoemd.

2.3.4 Ontwerpproces

In deze fase geven we een daadwerkelijk invulling aan een object zoals die bepaald is in de functionele analyse. Met andere woorden: een oplossingsvrij object wordt omgezet naar een concreet object.

Voorbeeld:

Het oplossingsvrije object “oeververbinding” wordt tijdens het ontwerpproces omgezet in een concreet object. Dit zou o.a. een brug, een tunnel of een veerpont kunnen zijn.

Het ontwerpproces resulteert in de keuze voor het ontwerp dat het beste voldoet aan de vraag- en doelstellingen van de klant, dus van probleem naar oplossing. Het ontwerp beschrijft de oplossing voor het probleem of de doelstelling. Het ontwerp moet uiteraard voldoen aan de hele set van eisen, zoals dit per object is bepaald in de functionele analyse. Dit houdt in dat het ontwerp niet alleen moet voldoen aan de functionele eisen, maar ook tijdens de hele levenscyclus moet voldoen aan de diverse aspecteisen, bijvoorbeeld onderhoudbaarheid en inspecteerbaarheid. Het ontwerp is met andere woorden een “integraal ontwerp”.

2.3.5 Ontwerploop

Ook tussen het maken van een ontwerp en de functionele analyse en allocatie is een loop zichtbaar, de ontwerploop. De ontwerploop representeert de afstemming van het ontwerp en de objecten met eisen. Gedurende het maken van het ontwerp kan duidelijk worden dat een bepaalde allocatie van eisen of functies niet wenselijk is. Ook kunnen functies naar voren komen die nog niet beschreven zijn. In al deze gevallen is het nodig om terug te keren naar de functionele analyse en de nieuwe inzichten te verwerken in de functionele specificatie. Vervolgens kunnen we weer starten, of verder gaan, met het ontwerp. Omdat het terug keren naar de functionele analyse meerdere malen kan gebeuren, ontstaat er een ontwerploop.

2.3.6 Verifiëren

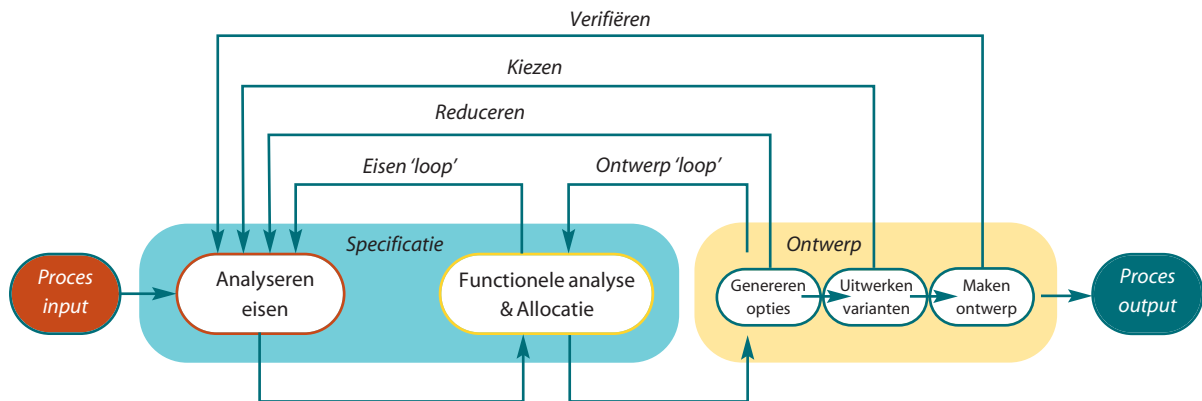
Na het ontwerpproces vindt verificatie plaats. Het doel van de verificatie is objectief aantonen dat het ontwerp in overeenstemming is met de eisen. Afwijkingen van de eisen, die in de verificatie worden opgemerkt, leiden tot een voorstel tot corrigerende maatregelen. Over het algemeen maken we bij het opstellen van een specificatie voor een object tegelijkertijd een verificatieplan voor dat object. Nadat we het object vervolgens hebben ontworpen, leggen we in een verificatierapport vast of het ontwerp al dan niet aan alle gestelde eisen voldoet. Het verificatieproces vindt niet alleen plaats in het engineeringproces. Verificatie vindt ook in realisatieproces plaats (we spreken dan van keuren c.q. testen) en in het beheer- en onderhoudsproces plaats (inspecteren).

2.4 Stappen in het ontwerpproces.

In de voorgaande paragrafen gaven we een algemene toepasbare omschrijving van het engineeringproces. Binnen de GWW-sector maken we niet direct vanuit de eisen-specificatie één ontwerp. Het ontwerpproces wordt in een aantal tussenstappen opgedeeld. Dit bevordert de beheersbaarheid, reproduceerbaarheid en efficiency van het ontwerpproces. De in deze leidraad gemaakte keuze voor de tussenstappen is:

- genereren opties
- uitwerken varianten
- uitwerken van het gekozen ontwerp

Figuur 6:
het engineeringproces in de GWW-sector



2.4.1 Genereren opties en reduceren opties

Het doel van het genereren en reduceren van opties is om de verschillende oplossingsmogelijkheden voor een systeem te bepalen en van daaruit te komen tot een beperkt aantal (haalbare) varianten die onderzocht kunnen worden. Onder het genereren van opties verstaan we: het bedenken van alle mogelijke oplossingsrichtingen voor het systeem. Om te komen tot een totaalijst waarbij we geen potentieel goede oplossingen 'vergeten', is het belangrijk dat een eerste inventarisatie van opties geheel waarde vrij plaatsvindt en het 'out-of-the-box' denken tijdens de optiefase wordt gestimuleerd. Dat kan bijvoorbeeld door het organiseren van brainstormsessies.

Deze gegenereerde opties reduceren we vervolgens tot een beperkt aantal haalbare oplossingen die nader uitgewerkt worden tot varianten. Deze reductieslag van de verzameling denkbare opties tot haalbare opties vindt plaats door eliminatie op basis van één of meerdere eisen en randvoorwaarden. Oftewel: alleen die opties die de mogelijkheid in zich hebben om aan alle eisen te voldoen, werken we uit tot varianten. Het gehele proces wordt gedocumenteerd.

Voorbeeld:

Voor het oplossingsvrije object "oeververbinding" zijn drie oplossingsmogelijkheden gegenereerd, de opties brug, tunnel en veerpont. Omdat de optie "veerpont" bij voorbaat niet aan de doorstromingseisen kan voldoen, wordt het aantal opties gereduceerd tot twee haalbare varianten: brug en tunnel.

2.4.2 Uitwerken varianten en kiezen beste variant

Doel van de variantenfase is om met geselecteerde varianten een keuze te kunnen maken voor het ontwerp van het beschouwde systeem dat het beste voldoet aan de eisen en andere criteria.

Het nader uitwerken van varianten is noodzakelijk om de als haalbaar beoordeelde opties op een zodanig detailniveau te brengen, dat we ze, op basis van de vastge-

stelde eisen en criteria, onderling kunnen vergelijken. Belangrijk is dat naast de specificatie vastgestelde eisen ook andere criteria een rol kunnen spelen bij de beoordeling, zoals milieueffecten of kosten. Hier komt het begrip “waarde” om de hoek kijken. “Waarde” is een abstract begrip en is in essentie een maatstaf om de gestelde eisen en “wensen” en de daarvoor benodigde financiële middelen met elkaar in verband te brengen.

Als de varianten nader zijn uitgewerkt, kunnen we de effecten van de varianten ten opzichte van de beoordelingscriteria berekenen. Om varianten onderling te vergelijken maken we gebruik van een scoringsmatrix of trade-off matrix. Daarbij krijgen de verschillende beoordelingscriteria een wegingsfactor. De variant die het beste scoort (ofwel die de hoogste “waarde” vertegenwoordigt), wordt uiteindelijk gekozen tot oplossing voor het systeem. De methodiek van dit afwegingsproces, waarmee we deze keuze kunnen maken, staat ook bekend als Value Engineering of Value Management. Value Engineering is dus opgesloten in het ontwerpproces.

Voorbeeld:

De haalbare oplossingsmogelijkheden voor de “oeververbinding”, de brug en de tunnel, worden nader uitgewerkt en onderling vergeleken. De brug scoort bijvoorbeeld beter dan de tunnel op de veiligheidseisen, maar minder op de leefbaarheidseisen. Daarnaast scoort de brug veel beter op bijvoorbeeld het criteria kosten en bouwfaserings. Na weging van alle scores wordt gekozen voor de oplossing “brug”.

2.4.3 Het uitwerken van het ontwerp

In deze fase wordt het gekozen ontwerp als oplossing voor het systeem nader uitgewerkt en gedimensioneerd. Hierbij geven we de aan het object of het proces gestelde eisen en toegeschreven functies een definitieve invulling tot op het gewenste detailniveau.

Voorbeeld:

De oplossing “brug” wordt uitgewerkt in een ontwerp, dusdanig dat in een verificatierapport voor alle eisen kan worden aangetoond dat het ontwerp van de brug voldoet.

2.5 Topdown benadering voor het engineeringproces

De GWW-sector bouwt veelal complexe systemen. Om de complexiteit van een systeem goed te kunnen beheersen is een topdown benadering voor het engineeringproces noodzakelijk. Afhankelijk van de complexiteit van een systeem en het detailniveau waarop het zich bevindt, wordt het engineeringproces, zoals in paragraaf 2.4 beschreven, één of meerdere keren van grof naar fijn herhaald.

Een GWW-project start met een probleem, dat om een oplossing vraagt. Op elk willekeurig detailniveau valt een probleem te constateren. Het te ontwerpen systeem is de oplossing voor gedefinieerde probleem.

Voorbeeld:

De probleemstelling van project X betreft het vervoersprobleem op een bepaalde autosnelwegverbinding. Het te ontwerpen systeem is in dat geval een gedeelte uit het hoofdwegennet.

De probleemstelling van project Y betreft onvoldoende stroefheid van een stuk wegverharding. Het te ontwerpen systeem is in dat geval de wegverharding in het wegvak.

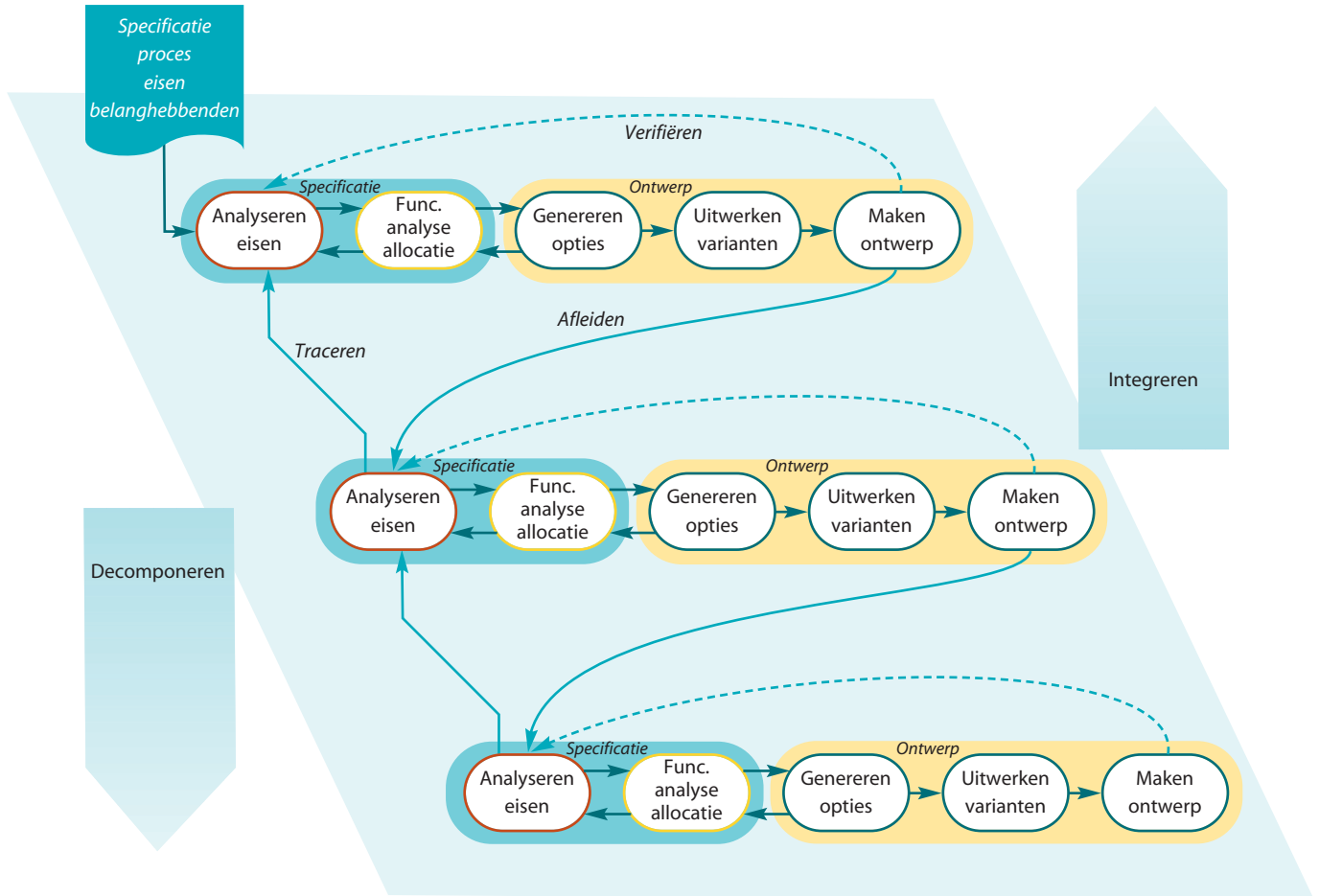
Het uiteindelijke resultaat van het engineeringproces is een uitvoeringsgereed ontwerp van het te bouwen systeem. Op voorhand is echter niet te zeggen hoeveel ontwerpplagen nodig zijn om tot een uitvoeringsgereed ontwerp te komen. Dit kan per onderdeel van het systeem verschillen. De keuze om een slag dieper te ontwerpen, is gebaseerd op een inschatting of het ontwerp is te realiseren (uitvoerbareheid), te onderhouden en te beheersen op het gebied van tijd, geld, kwaliteit en risico's.

Voorbeeld:

Binnen een project is de kwaliteit van de wegverharding voldoende beheersbaar indien de toe te passen asfaltmengsels bekend zijn. Voor dat onderdeel van het systeem is het ontwerp daarmee uitvoeringsgereed.

Figuur 7 geeft de koppeling weer tussen de herhalende engineeringprocessen op verschillende detailniveaus.

Figuur 7:
het iteratieve engineeringproces op verschillende detailniveaus



Het herhalende engineeringproces op verschillende detailniveaus valt aan elkaar te koppelen door middel van decomponeren, traceren, integreren ontwerp en afleiden van eisen.

2.5.1 Decomponeren

Het engineeringproces een slag dieper herhalen, brengt met zich mee dat we het systeem opdelen in kleinere subsystemen op een lager detailniveau. Dit proces noemen we decomponeren. Op elk detailniveau lager in het engineeringproces decomponeren we het systeem weer verder, tot aan het detailniveau van een uitvoeringsgereed ontwerp.

Het decomponeren gebeurt voor het volledige engineeringproces op een bepaald detailniveau. Oftewel: zowel functies, eisen als de objecten worden gedecomposeerd.

Voorbeeld Decomponeren functies;

Uit de functie “beheersen verkeersstromen” kunnen we onder andere de subfuncties “sturen verkeer”, “informer verkeer” en “faciliteren incident management” afleiden.

Voorbeeld decomponeren objecten:

Het “verkeersmanagementsysteem” kunnen we onder andere opdelen in “signalering”, “route-informatie” en “incident management maatregelen”.

Als gevolg van het decomponeren ontstaan tijdens het engineeringproces de zogenaamde ‘boomstructuren’ van functies, eisen en objecten. In paragraaf 2.8 wordt nader toegelicht hoe we met behulp van deze “boomstructuren” het decomponeren van een systeem beheerst en overzichtelijk houden.

2.5.2 Afleiden

Het decomponeren van een systeem heeft tot gevolg dat we op een lager detailniveau nieuwe functies en eisen afleiden uit de gemaakte keuzes in het engineeringproces op het bovenliggende detailniveau. Dit proces heet ‘het afleiden van eisen en functies’.

Functies en eisen op een lager detailniveau kunnen we afleiden uit de gekozen objecten in het ontwerp op het bovenliggende detailniveau en uit de processen die als gevolg van het gekozen ontwerp binnen het systeem plaatsvinden.

Voorbeeld afleiden uit gekozen objecten:

Voor de invulling van de functie kruisen kunnen we kiezen voor een tunnel of een viaduct. Kiezen we voor een tunnel, dan volgen er randvoorwaarden voor de atmosfeer in de tunnel. Er is dan een ventilatiefunctie nodig waaruit nieuwe eisen voortkomen.

Voorbeeld afleiden uit processen:

Bij een beweegbare brug mogen de slagbomen pas neer als de stoplichten een bepaalde tijd op rood staan. Een afgeleide functie is dan het “detecteren” van het rode licht, binnen een vereiste tijdspanne.

2.5.3 Traceren

Het afleiden van eisen heeft tot gevolg dat eisen op een lager detailniveau gezamenlijk invulling moeten geven aan de eisen op het bovenliggende detailniveau. Om inzichtelijk te maken welke subsysteemeisen invulling geven aan welke systeem-eisen, koppelen we de eisen aan elkaar. Dit proces heet traceren.

Het traceerbaar maken van eisen helpt bij de beheersing van het systeem. Alle eisen die we kunnen koppelen aan bovenliggende eisen zijn immers gerechtvaardigd. Tevens maakt het zichtbaar of een gewijzigde eis aan een subsysteem nog steeds past binnen de eisen aan het totale systeem. In paragraaf 2.8.2 lichten we nader toe hoe we met een “eisenboom” de traceerbaarheid van eisen zichtbaar kunnen maken.

Figuur 8:
traceerbaarheid van eisen

ID	Eistitel	Bovenliggende eis	Onderliggende eisen	Bron	Bijlage
1.1.1	Snelheid wegverkeer A4	1.1	1.1.1.2	RWS	n.v.t.
1.1.1.2	Wegverkeer dient met een snelheid van 120 km/h over de A4 te kunnen rijden	1.1	1.1.1.2	RWS	n.v.t.
ID	Eistitel	Bovenliggende eis	Onderliggende eisen	Bron	Bijlage
1.1.1.2	Snelheid wegverkeer A4	1.1.1	3.1.1	RWS	n.v.t.
1.1.1.2	De horizontale boogstralen van de A4 dienen minimaal 1.500 meter te zijn	1.1.1	3.1.1	RWS	n.v.t.

2.5.4 Integreeren

Het decomponeren van een systeem heeft tot gevolg dat alle ontworpen onderdelen op een lager detailniveau met elkaar het totale ontwerp op het bovenliggende niveau vormen. We moeten controleren of we de ontworpen subsystemen samen kunnen voegen in het systeemontwerp. Dit proces heet integreren.

Ook het integreren van het ontwerp helpt bij de beheersing van het systeem. Met bijvoorbeeld een 3-dimensionaal digitaal ontwerp of een prototype van het systeem, maken we zichtbaar of de ontworpen subsystemen goed in elkaar passen en samen een compleet en goedwerkend systeem vormen.

Voorbeeld:
Een geluidsscherm kan zijn functie pas goed vervullen als de fundering, de stijlen en de panelen goed op elkaar passen en de belastingen kunnen verdragen. Om dit te controleren, kan een prototype van het geïntegreerde ontwerp in het veld gebouwd worden, alvorens het gehele geluidsscherm wordt geproduceerd.

2.5.5 Baselines

De overgangen tussen verschillende processtappen kunnen producten opleveren zoals een specificatie die formeel als “baseline” wordt bevroren, zodat bijvoorbeeld

deze in een contract of in een bestuursovereenkomst kan worden opgenomen. Ook op de overgang tussen bepaalde detailniveaus (in het engineeringproces wordt deze overgang gemarkeerd door een ontwerpnota) kunnen we producten bevriezen in een "baseline". Een voorbeeld is een aanbiederontwerp van een opdrachtnemer.

Voordat een baseline wordt bevroren, is altijd sprake van een beslismoment (een go/no go beslissing). Dit kan intern binnen een organisatie plaatsvinden of met externe partijen zoals een opdrachtgever of gemeentes.

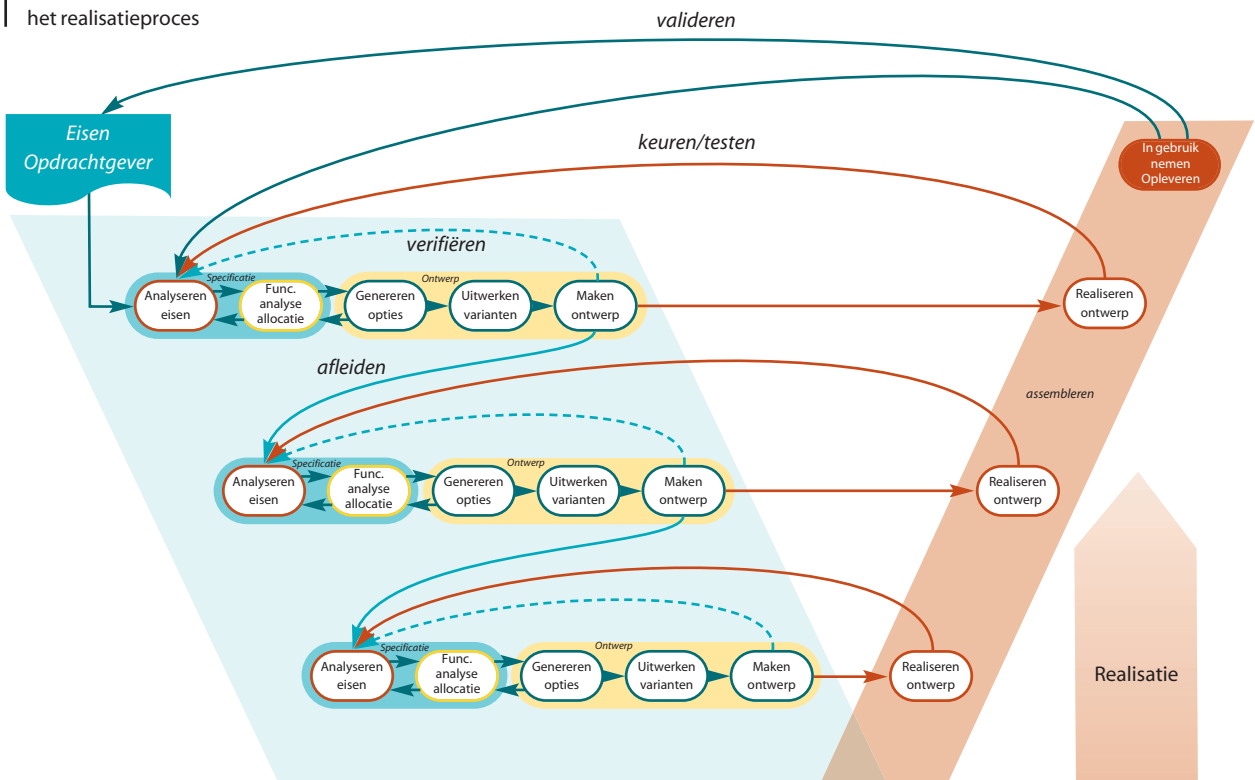
Voorbeelden

zijn het vaststellen van een variantennota als onderdeel van een trajectnota of het accepteren of toetsen van een bepaald ontwerp als onderdeel van de contractbeheersing.

2.6 Realisatieproces

Na het engineeringproces, waarin het te realiseren ontwerp is gedefinieerd, volgt het realisatieproces. In deze fase wordt het systeem daadwerkelijk fysiek gerealiseerd. Het realiseren van complexe systemen vindt evenals het engineeringproces gelaagd plaats. Waar we het engineeringproces top-down (van grof naar fijn) doorlopen, doorlopen we het realisatieproces bottom-up (van fijn naar grof). Het realisatieproces

Figuur 9:
het realisatieproces



bestaat uit een aantal deelprocessen of activiteiten: het samenvoegen of assembleren van de objecten, het keuren en testen van de objecten en het valideren van het systeem. Het keuren en testen is het verifiëren in het realisatieproces. In onderstaand schema zijn de verschillende deelprocessen weergegeven met hun relatie tot het engineeringproces.

2.6.1 Realisatie van objecten

In deze fase wordt het systeem gebouwd en/of gerealiseerd. Een systeem bestaat uit verschillende objecten, deze worden dikwijls afzonderlijk gerealiseerd zowel qua tijd als locatie.

Voorbeeld:

Voor een viaduct worden bijvoorbeeld de prefab betonnen brugliggers gemaakt in een betonfabriek en de landhoofden worden op de bouwplaats gerealiseerd.

Het (uitvoeringsgereed) ontwerp, inclusief de eisen aan het uitvoeringsproces, leveren vanuit het engineeringproces de input voor dit proces. De eisen aan het uitvoeringsproces worden ingevuld in uitvoeringsplannen (werkplannen).

2.6.2 Realiseren objecten tot een systeem

De afzonderlijke objecten worden in dit proces samengevoegd of geassembleerd tot de objecten die gezamenlijk het systeem vormen.

Voorbeeld:

De prefab betonnen brugliggers uit het vorige voorbeeld worden gemonteerd op de landhoofden en vormen nu samen het viaduct.

Het beheersen van de raakvlakken hierbij is een vereiste. De basis voor deze raakvlakken is gelegd in het engineeringproces. Tijdens dit proces zijn de raakvlakken gekoppeld aan de verschillende te realiseren objecten. Het gestructureerd vastleggen van deze gegevens waarborgt dat de juiste informatie op het juiste moment beschikbaar is voor de realisatie.

2.6.3 Keuren/testen

Ook in het realisatieproces is sprake van verificatie. Verificatie van eisen in het realisatieproces staat in de GWW-sector ook wel bekend als keuren ofwel testen. Bij verificatie in het realisatieproces toetsen we of het systeem zich gedraagt zoals het is ontworpen en zoals het is geëist.

Voor verificatie tijdens realisatie zijn diverse methoden op de diverse detailniveaus beschikbaar, denk aan:

- kalenderen van heipalen ter toetsing van de draagkracht
- toetsen van het gebruik van gecertificeerde bouwstoffen
- meten van zettingen middels zakbakens
- site integration test: testen van besturingssystemen in zijn werkelijke omgeving

Om alle systeemonderdelen te kunnen verifiëren, is het belangrijk om al bij het opstellen van de eisen te beschrijven welke verificatiemethode(n) voldoen. Bij keuren/testen wordt getoetst tegen de eisen, hierbij wordt vaak gebruik gemaakt van de ontwerpdocumentatie.

2.6.4 Validatie

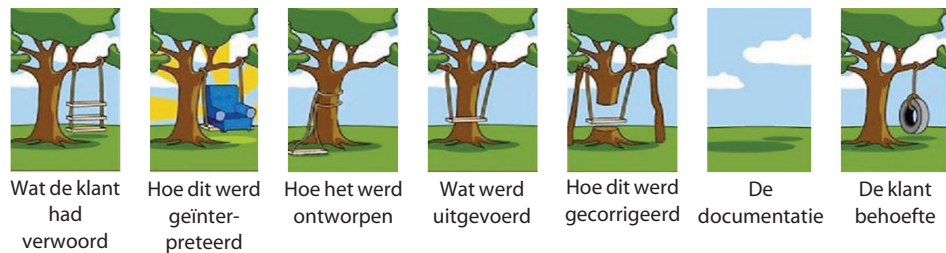
Nadat het systeem of prototype (lees: proefopstelling) gerealiseerd en geverifieerd is, volgt de validatie. Het validatieproces is bedoeld om objectief aan te tonen dat de prestaties die een systeem levert, voldoen aan de eisen of verwachtingen van de stakeholders. In dit proces voeren we een vergelijkende beoordeling uit dat de formuleerde eisen geleid hebben tot het juiste systeem. Zoals hierboven is aangegeven, volgt de validatie na de realisatie. Echter bij het opstellen van de eisen in de eisenanalyse moeten we wel constant de vraag stellen of de gekozen eisen tot het gewenste systeem (juiste product) leiden.

Verificatie versus validatie;

Verificatie = een check of het juist gebouwd is.

Validatie = een check of het juiste gebouwd is.

Figuur 10:
de schommel



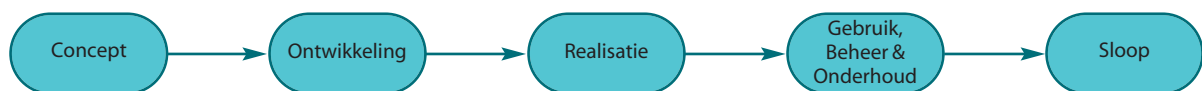
2.7 Fasering van de levenscyclus

Systems Engineering stuurt op de behoefte van de gebruiker of stakeholder gedurende de gehele levenscyclus. De ISO 15288 norm beschrijft de volgende levenscyclusfasen:

- *De conceptfase* wordt uitgevoerd om nieuwe zakelijke mogelijkheden te beoordelen en voorlopige systeemvereisten en een haalbare ontwerpoplossing te ontwikkelen. De resultaten zijn een haalbaarheidsbeoordeling en een grove opzet van de gebruikerseisen en eisenspecificatie.
- In *de ontwikkelingsfase* wordt een systeem ontwikkeld dat voldoet aan de eisen van de opdrachtgever en kan worden geproduceerd, beproefd, geëvalueerd, bediend, ondersteund en afgebouwd. Aan het eind van de ontwikkelingsfase is er een ontwerp voor het gehele systeem.
- In *de realisatiefase* wordt het systeem vervaardigd en beproefd en worden hiermee samenhangende ondersteunende systemen naar behoefte geproduceerd.
- *De gebruiksfase* is bedoeld om met het systeem te werken, binnen de beoogde omgeving diensten te leveren en te zorgen voor een constante effectiviteit qua bedrijfsvoering.

- *De beheer- en onderhoudsfase* is bedoeld om te zorgen voor logistiek, onderhoud en hulpdiensten, en om een constante werking op duurzame basis van het systeem in kwestie mogelijk te maken.
- *De sloopfase* is bedoeld om een systeem met bijbehorende operationele diensten en functies buiten werking te stellen en te verwijderen, en ter ondersteuning van het afbouwsysteem als zodanig.

Figuur 11:
de levenscyclusfasen

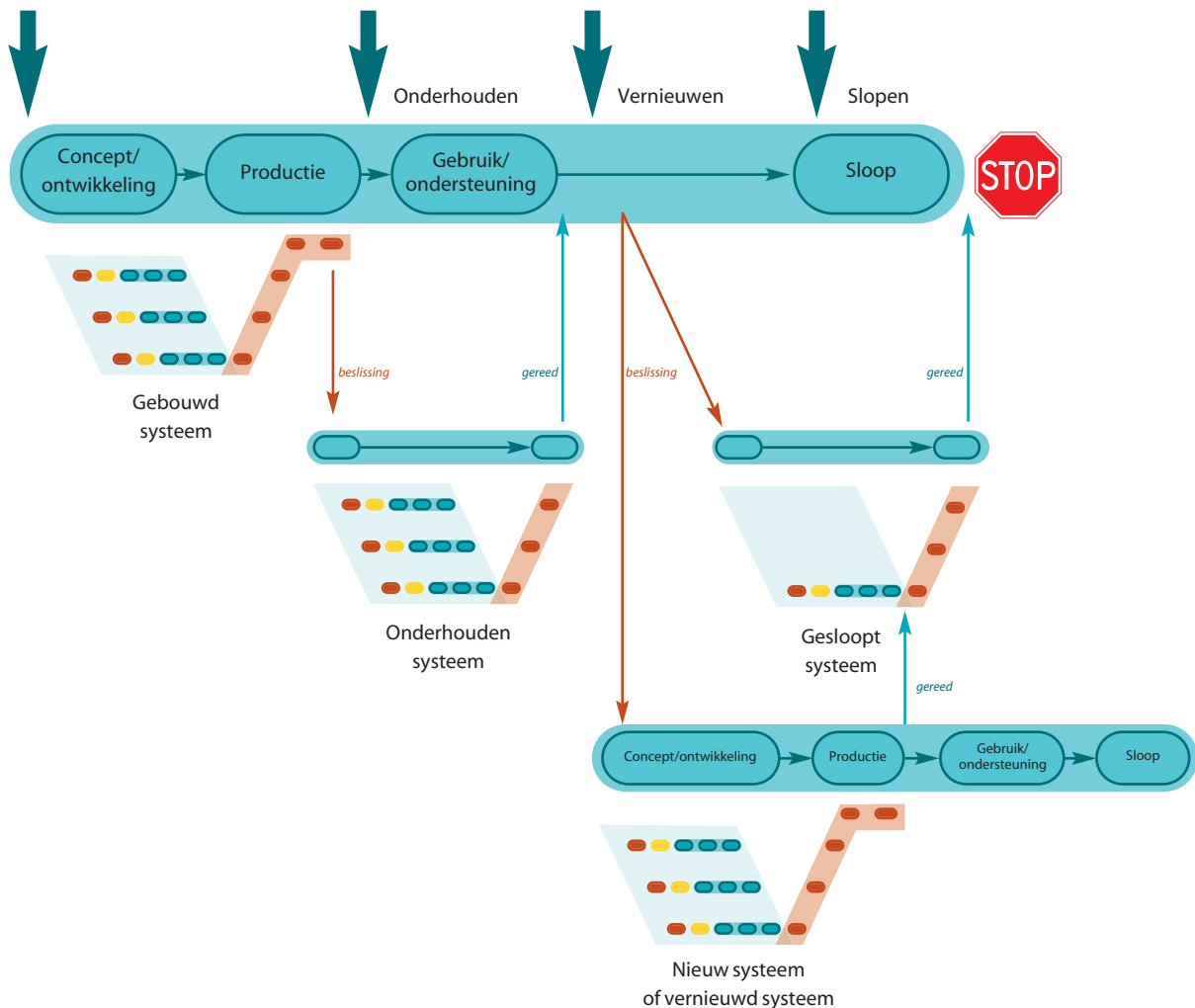


Bovenstaande fasering worden gedurende de levenscyclus van een systeem doorlopen. Kenmerkend voor GWW-systemen is dat we het engineeringproces en realisatieproces, dat in de vorige paragrafen beschreven is, meerdere malen kunnen doorlopen gedurende de levenscyclus van het systeem.

- Bij de aanleg van het systeem doorlopen we het engineering- en realisatieproces voor de eerste maal. Dit betreft de levenscyclusfasen concept, ontwikkeling en productie. Dit is het “gebouwd systeem” in figuur 11.
- Als het systeem in gebruik is, zal er na verloop van tijd onderhoud nodig zijn. Onderhoud c.q. vervanging is het systeem zo in conditie houden dat het aan de oorspronkelijk gestelde eisen voldoet. Voor het onderhoud zullen we het engineering- en realisatieproces deels opnieuw moeten doorlopen. Dit is de tweede maal dat we deze processen doorlopen. Dit is het “onderhouden systeem” in figuur 11.
- Systemen in de GWW worden ook vernieuwd c.q. verbeterd. Vernieuwen of verbeteren is het systeem aanpassen aan nieuwe, gewijzigde eisen. Capaciteit is bijvoorbeeld een eis die regelmatig in vernieuwing of verbetering (ook wel: renovatie) resulteert. We doorlopen het engineering- en realisatieproces opnieuw om het ontwerp te maken op basis van de vernieuwde eisen. Vernieuwing of verbeteren van een systeem kan meerdere malen voorkomen in de levenscyclus van een systeem. Dit is het “vernieuwd systeem” in figuur 11. De meeste grote projecten in de GWW-sector betreffen vernieuwing van een reeds bestaande situatie.
- Bij sloop doorlopen we de laatste maal het engineering- en realisatieproces. In een goed engineeringproces zullen al eisen voor de sloop van het systeem meegenomen zijn bij de aanleg. ‘Extra eisen’ komen vooral uit de nieuwe situatie die na het verdwijnen van het systeem zal ontstaan. Deze eisen worden meegenomen in het engineeringproces. Dit is het “gesloopt systeem” in figuur 11.

In figuur 11 is het meerdere malen doorlopen van het engineering- en realisatieproces grafisch weergegeven. Merk hierbij op dat het opnieuw doorlopen van het engineering- en realisatieproces niet betekent dat het gehele proces weer blanco aanvangt. Bij goed “asset management” zijn alle gegevens van het systeem nog beschikbaar. We doorlopen het engineering- en realisatieproces om waar nodig eisen aan te passen, nieuwe opties en varianten te overwegen en het ontwerp aan te passen aan de uitkomsten van de wijzigingen.

Figuur 12:
systemen in de levenscyclus



Consequentie van het feit dat we het engineering- en realisatieproces meerdere malen doorlopen, is dat het systeem zich op een bepaald tijdstip in meerdere levenscyclusfasen kan bevinden. Een systeem kan zich in de gebruiksfase bevinden, maar gelijk ook in de ontwikkelings- of productiefase.

2.8 Beheersen processen door structureren

In paragraaf 2.3 en 2.4 bleek dat we het engineeringproces meerdere malen doorlopen. Hierdoor ontstaat een complexe verzameling van eisen, functies en objecten. Door hier een duidelijke structuur in aan te brengen, bewaren we het overzicht. Dit helpt om de compleetheit van een systeem en de raakvlakken tussen subsystemen inzichtelijk te maken. Als hulpmiddel voor het structureren van het systeem, introdu-

ceren we drie zogenaamde “boomstructuren”:

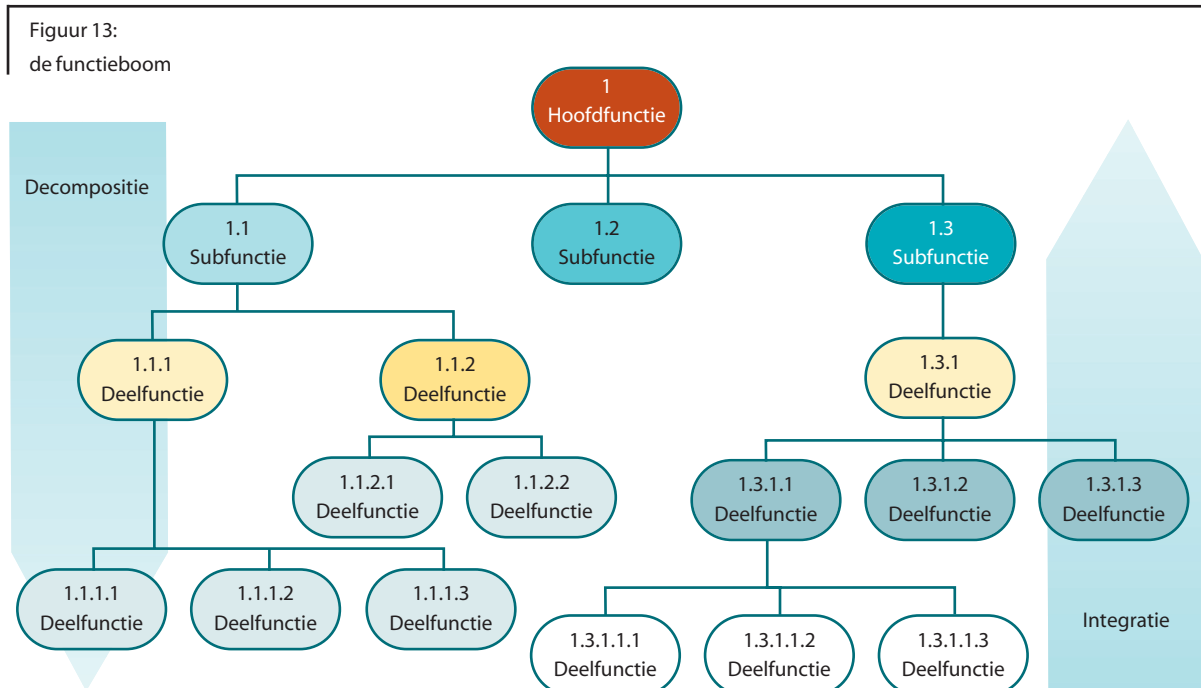
- de functieboom (FBS of Functional Breakdown Structure)
- de eisenboom (RBS of Requirements Breakdown Structure)
- de objectenboom (SBS of System Breakdown Structure)

Naast bovengenoemde boomstructuren, die we met name gebruiken bij het beheersen van het engineeringproces, zijn er nog een aantal veel gebruikte boomstructuren:

- de activiteitenboom (WBS of Work Breakdown Structure), deze geeft een structuur van alle activiteiten die we voor een project moeten doorlopen. Een belangrijk hulpmiddel bij het beheersen van projecten.
- Bomen met gegroepede eisen gekoppeld aan een subsysteem zoals bijvoorbeeld de specificatieboom. In een specificatieboom worden de eisen, raakvlakken en randvoorwaarden, gegroepeerd per object.

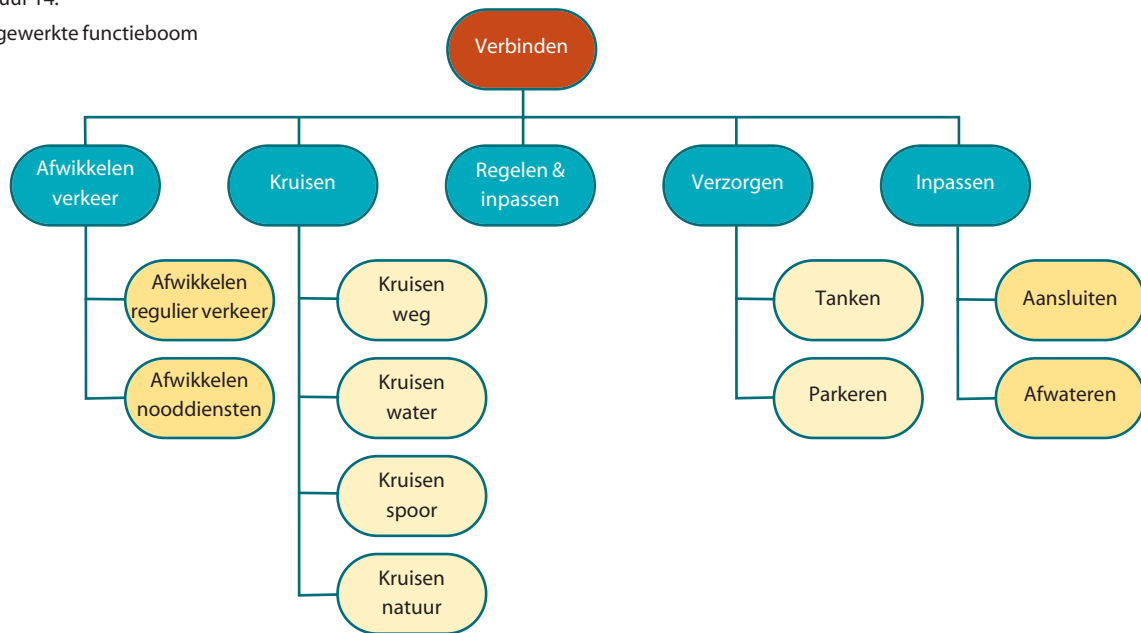
Deze structuren ondersteunen de top-down benadering van complexe systemen en helpen om de complexiteit van een systeem te beheersen. Een systeem decomponeren moet zorgvuldig gebeuren. Enerzijds zorgt het decomponeren van het systeem voor een betere beheersbaarheid, anderzijds leidt opdeling tot extra raakvlakken tussen de objecten die op hun beurt weer beheerst moeten worden. Het is belangrijk om de samenhang van het systeem zorgvuldig te bewaken. Doel is daarom een optimum te vinden tussen de opdeling van het systeem en het voorkomen van onnodige raakvlakken.

2.8.1 Functieboom



Deze structuur beschrijft de functionaliteit het systeem, zonder daarbij een object te noemen. De afzonderlijke functies worden van grof naar fijn in de functionele analyse gedecomposeerd. Een functieboom is dusdanig opgebouwd, dat functies lager in de boom tezamen invulling geven aan de functies hoger in de boom.

Figuur 14:
uitgewerkte functieboom



2.8.2 Eisenboom

De eisenboom geeft de samenhang tussen de eisen weer gestructureerd naar de verschillende detailniveaus. Een eis is altijd traceerbaar tot een eis op een hoger detailniveau, behalve op het hoogste detailniveau. Op het hoogste detailniveau komen eisen voort uit functies of operationele processen. Traceerbaarheid van eisen is een essentieel hulpmiddel om de gevolgen van scope- (of configuratie-) wijzigingen volledig in kaart te brengen. Niet alle eisen worden tot op hetzelfde detailniveau uitgewerkt. We werken de eisen uit tot op het detailniveau dat de wensen en behoeften van de stakeholder gewaarborgd en verifieerbaar zijn. In een systeem kan er ook sprake zijn van een eisenstructuur, waarin meerdere eisenbomen uitgewerkt zijn.

Voorbeeld:

Eis bovenliggend detailniveau:

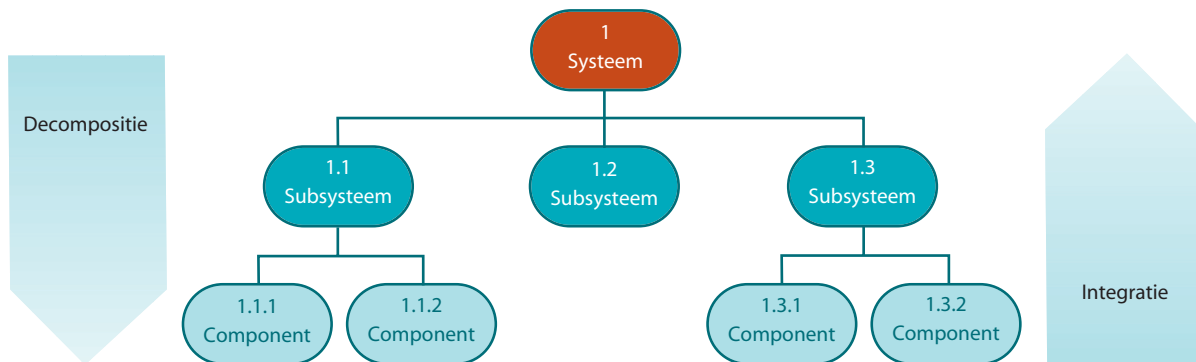
- Het systeem dient in staat te zijn grond- en hemelwater af te voeren, zodanig dat het treinverkeer hierdoor geen vertraging oploopt.

Eis onderliggend detailniveau:

- Het systeem dient in staat te zijn regenwater af te voeren, met een capaciteit niet minder dan de hoeveelheid water volgens de kromme van Braak
- Het systeem dient in staat te zijn grondwater af te voeren, tot en met de maximale grondwaterstand zoals vastgesteld in grondwater rapport (GWR-.....)

2.8.3 Objectenboom

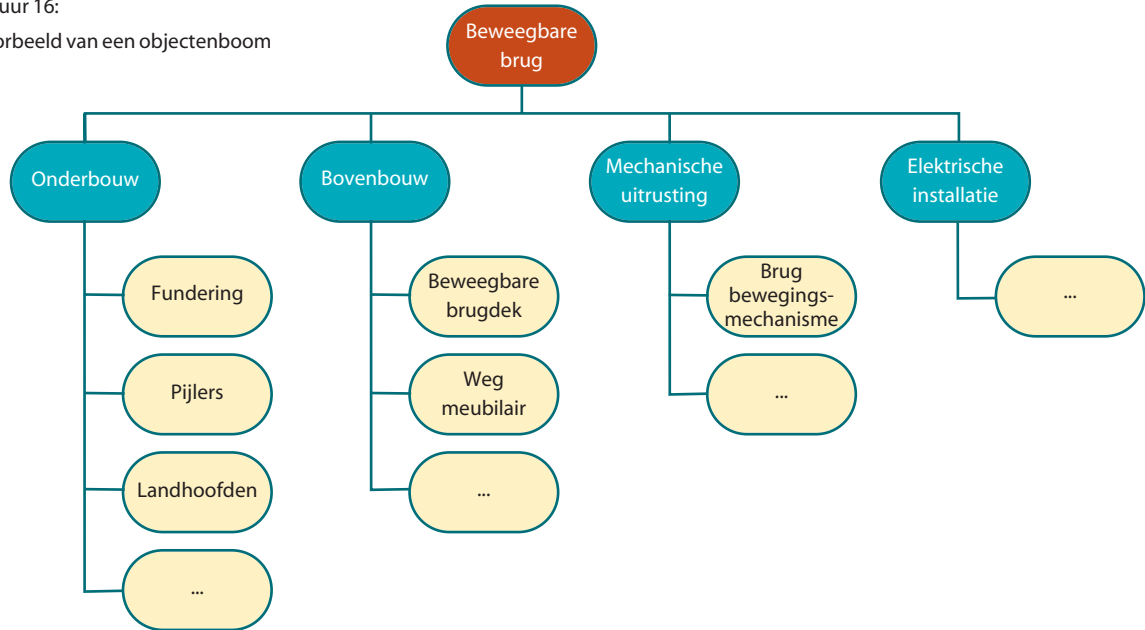
Figuur 15:
objectenboom



De decompositie van een systeem geven we weer met de objectenboom. De objectenboom is een structuur waarin alle te ontwerpen, te bouwen, te onderhouden en te slopen onderdelen in een hiërarchische opdeling worden weergegeven. De objectenboom loopt in detaillering vaak gelijk op met het detailniveau van het ontwerp. Aandachtspunten die we kunnen meenemen bij het decomponeren van een systeem in objecten zijn:

- Functies van de objecten: verschillende objecten van een systeem vervullen verschillende functies. Zo is de voornaamste functie van een weg het afwikkelen van verkeer en is de functie van een viaduct het kruisen van twee wegen.
- De fysieke indeling van het voorliggend ontwerp: uit welke onderdelen bestaat het ontwerp? Bijvoorbeeld: brug / landhoofd noord, dek, landhoofd zuid / keermuur, fundering, etc.
- Organisatorische indeling, bijvoorbeeld naar discipline of marktsegment: om extra organisatorische raakvlakken te vermijden is het zinvol om te kijken hoe het project is georganiseerd of samengesteld en om hier zoveel mogelijk op aan te sluiten. Bijvoorbeeld: wegen en asfalt, betonwerk, spoorwerk etc.

Figuur 16:
voorbeeld van een objectenboom



2.8.4 Work breakdown structure (WBS)

De Nederlandse term voor work breakdown structure is activiteitenboom. De activiteitenboom is een structuur van de onderling samenhangende activiteiten. Hierbij rangschikken we de activiteiten op basis van tijd en/of plaats. Alle werkzaamheden in het kader van het systeem zijn op een gestructureerde wijze afgebakend. Vergelijkbaar met de objectenboom worden ook aan deze activiteiten eisen gekoppeld. Naast deze eisen kunnen we ook kosten of ramingen aan de activiteiten koppelen.

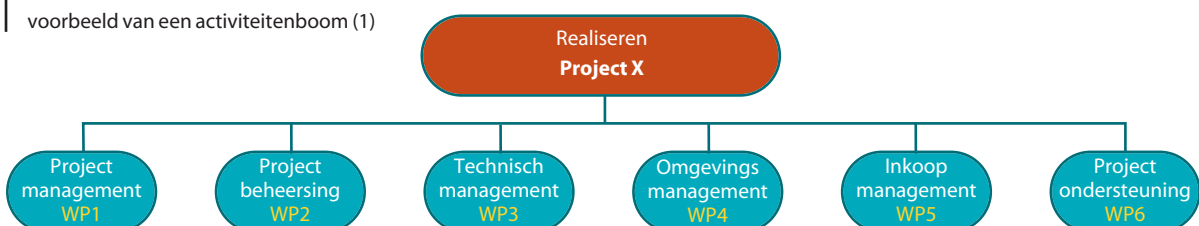
De activiteiten kunnen we vaak groeperen in werkpakketten. Een werkpakket bestaat dan ook uit het samenhangend geheel van activiteiten die we moeten verrichten om het systeem of een deel van het systeem te realiseren, inclusief aanduiding van bijbehorende input en output. De betalingen/vergoedingen van een project, door opdrachtgever aan opdrachtnemers, gebeurt dikwijls op basis van deze werkpakketten.

Basis voor het opstellen en decomponeren van de activiteitenboom kunnen zijn:

- de (project)planning (indeling op basis van tijd)
- de objecten in de objectenboom (bepalen de benodigde werkzaamheden voor een object)
- geografische indeling (op basis van plaats)

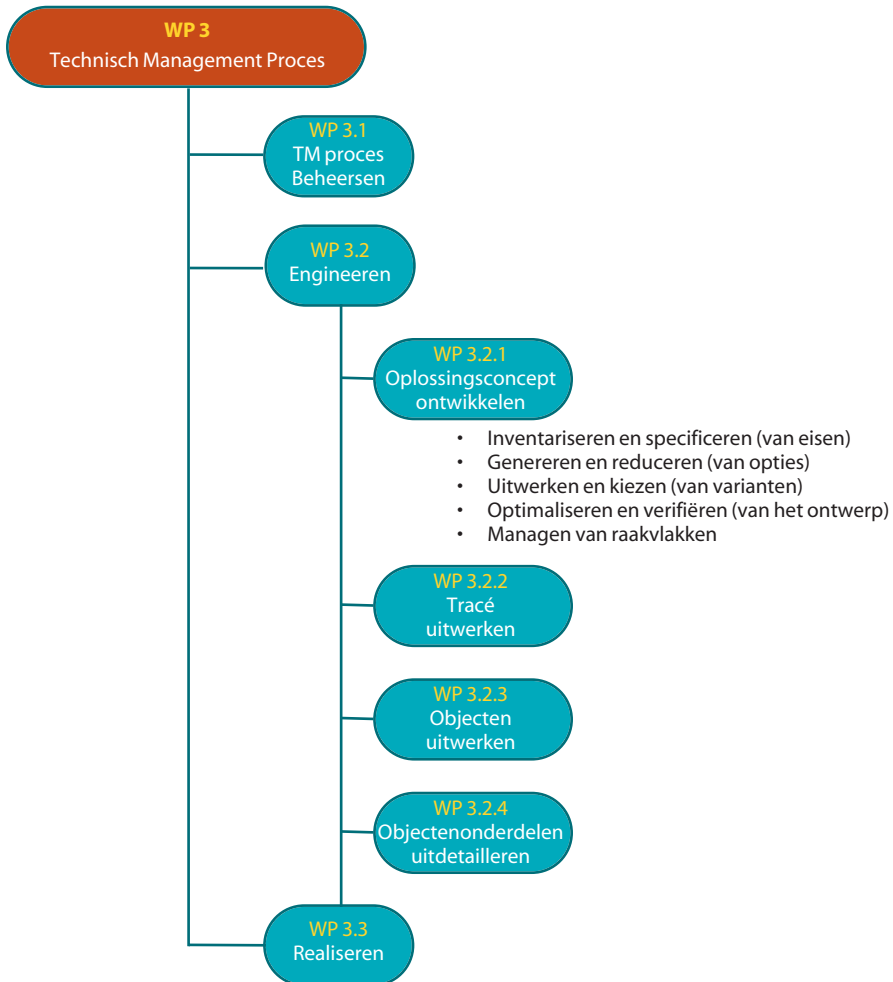
Figuur 17:
voorbeeld van een activiteitenboom (1)

WP = werkpakket



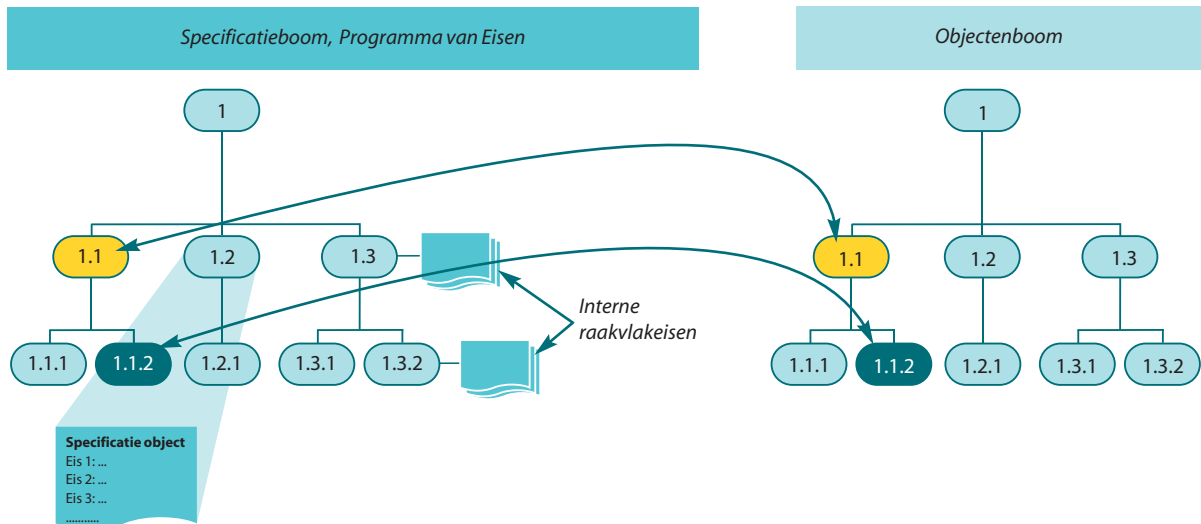
Figuur 18:
voorbeeld van een WBS (2)

WP = werkpakket



2.8.5 Bomen met ontwerpproducten

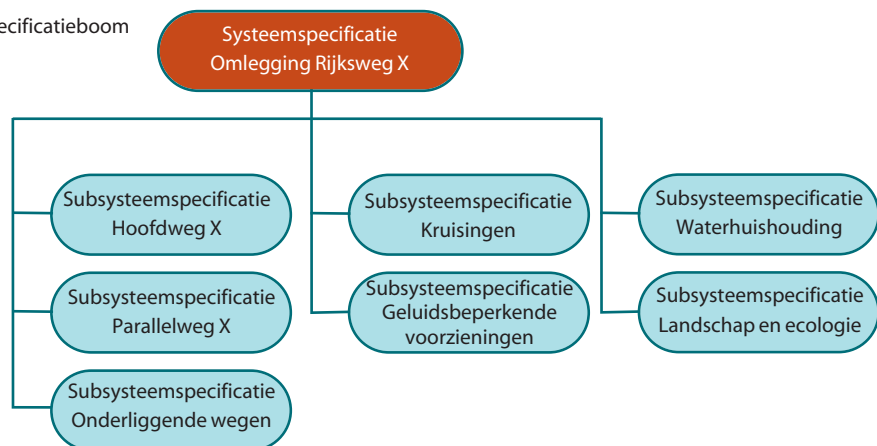
Figuur 19:
specificatieboom



Alle ontwerp-, realisatie- en beheer- en onderhoudsproducten (zoals specificatie, verificatieplan, optienota, ontwerpnota, keuringsrapport, as-built documentatie of inspectierapport) koppelen we aan de objectenboom. Dit is voor specificaties weergegeven in figuur 19. In figuur 20 werken we een voorbeeld van een specificatieboom uit.

Gedurende het engineeringproces kan een groot aantal eisen, raakvlakken en randvoorwaarden ontstaan. Om hieraan structuur te geven groeperen we deze eisen per object in een specificatie. De specificatieboom geeft de samenhang weer tussen de specificaties gestructureerd naar de verschillende detailniveaus.

Figuur 20:
uitgewerkt voorbeeld van een specificatieboom



Ook het proces van genereren, reduceren en kiezen van opties en varianten voor een systeem kunnen we ondersteunen middels een boomstructuur: de optie- en variantenboom. De optie- en variantenboom geeft gestructureerd het besluitvormingstraject weer van gekozen en afgevalen opties en varianten tot en met het uiteindelijk gekozen ontwerp.

2.9 Output van de processen

2.9.1 Output eisenanalyse

In het eisenanalyseproces worden de eisen van belanghebbenden vertaald in meetbare eisen aan het systeem. Deze samenhang van de eisen leggen we vast in een eisenboom. De eisen zijn te verdelen in de volgende categorieën:

- *Functionele eisen*
In de functionele eisen ligt vast wat het systeem of object dient te kunnen. We krijgen antwoord op vragen als: wie, wat, waar, wanneer, hoeveel en welke.

Voorbeeld functionele eis:

De / Het <stelsysteem> dient in staat zijn om <functie> met niet minder dan <hoeveelheid> <object> in <prestatie> <eenheid>.

Voorbeeld functionele eis:

De brug dient in staat zijn om de **waterweg te kruisen** met niet minder dan **1000 auto's in 1 uur**.

- *Externe raakvlakeisen*
Externe raakvlakeisen zijn eisen die worden gesteld aan de interactie van het systeem met de omgeving, oftewel de eisen die de omgeving aan het systeem stelt. Is aan de externe raakvlakeisen niet voldaan, dan kan of mag het systeem niet in zijn omgeving functioneren.
- *Interne raakvlakeisen*
Dit zijn eisen die worden gesteld aan de interactie tussen de verschillende objecten binnen het systeem. Deze ontstaan bij het decomponeren van het systeem in objecten of onderdelen. Deze onderdelen moeten uiteraard goed op elkaar aansluiten.

Voorbeeld:

Het systeem Verbreding A4 wordt opgesplitst in o.a. de subsystemen kunstwerken en weg(lichaam). Tussen deze subsystemen kunnen (interne) raakvlakken bestaan, bijvoorbeeld: kunstwerk moet aansluiten op de weg.

- *Aspecteisen*
Aspecteisen beschrijven specifieke eigenschappen van het te ontwikkelen systeem die niet direct bijdragen aan de primaire functie. We kunnen de volgende aspecten onderscheiden:
 - uitvoering
 - vormgeving
 - veiligheid
 - gezondheid
 - beschikbaarheid
 - betrouwbaarheid
 - onderhoud
 - beheer
 - toekomstvastheid
 - omgevingshinder
 - sloop

Voorbeeld:

Tijdens de realisatie moet de openbare verlichting van de bestaande weg in bedrijf blijven.

- *Randvoorwaarden*
Randvoorwaarden zijn van buiten het te realiseren systeem opgelegde voorwaarden die beperkingen voor de te ontwerpen oplossingen vormen. Randvoorwaarden kunnen we zien als de expliciete grens van de oplossingsruimte.

Voorbeeld:

De geluidsschermen dienen te passen binnen de in het bestemmingsplan beschreven maximale hoogte.

2.9.2 Output functionele analyse

In de functionele analyse zetten we functies om in oplossingsvrije objecten en koppelen we hieraan eisen vanuit de eisenanalyse. De functionele analyse kent onder meer de volgende output:

- functieboom
- objectenboom
- specificatie(s) en specificatieboom
- verificatieplan(nen)

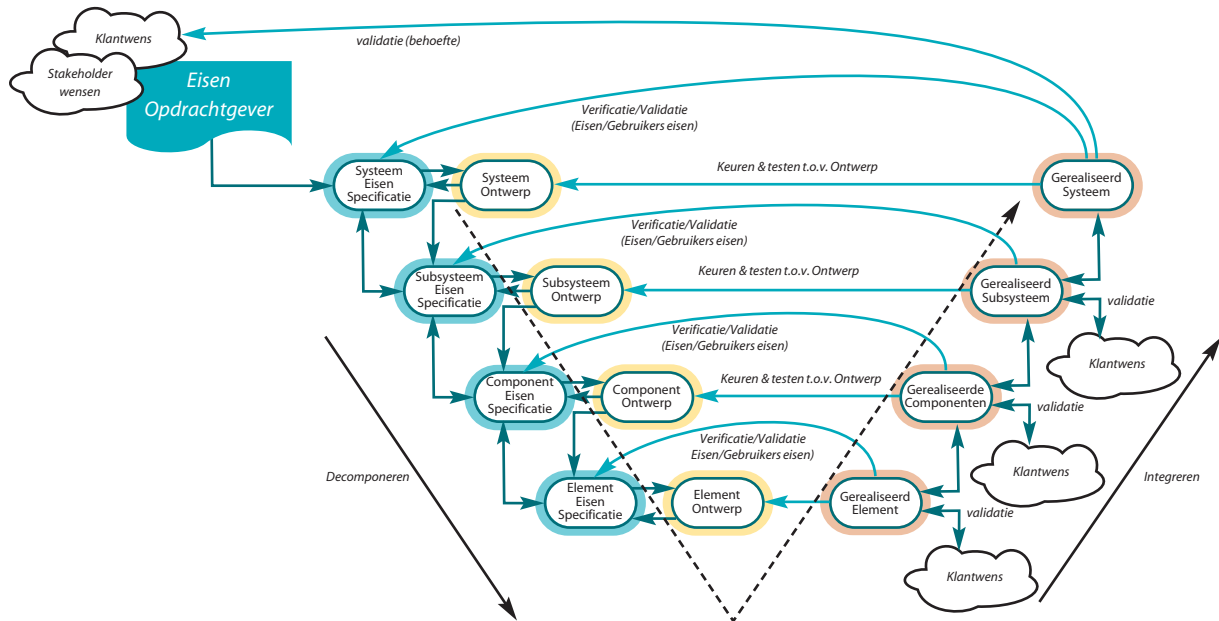
2.9.3 Output van het ontwerpproces

In het ontwerpproces geven we concrete invulling aan de oplossingsvrije objecten. Hierbij worden de objecten uitgewerkt tot specifieke ontwerpen. In het ontwerpproces zijn de volgende producten of output te onderscheiden:

optienota('s) en variantennota('s) incl. scoringsmatrix of trade-off matrix

- ontwerpnota('s)
- verificatierapport(en)
- activiteitenboom

Figuur 21:
de belangrijkste producten van het ontwerp- en realisatieproces



2.9.4 Output van het realisatieproces

In deze fase wordt het systeem daadwerkelijk fysiek gerealiseerd. Naast het te realiseren product of dienst stellen we onder meer de volgende producten op:

- gerealiseerd systeem
- keuringsplan
- keuringsrapport
- as-built documentatie
- beheer- en onderhoudsplan
- inspectieplan
- sloopplan

2.9.5 Output van de processen in de levenscyclusfase

Tijdens de overige fasen in de levenscyclusfasen, zoals onderhoud, vervanging, vernieuwing en/of sloop kunnen we onder meer de volgende producten opgeleverd:

- beheer- en onderhoudsrapportages
- inspectierapportages
- slooppportages

3

Koppeling technische processen met overige processen

In dit hoofdstuk lichten we de belangrijkste relaties tussen het technisch proces en de overige processen uit het IPM-model kort toe.

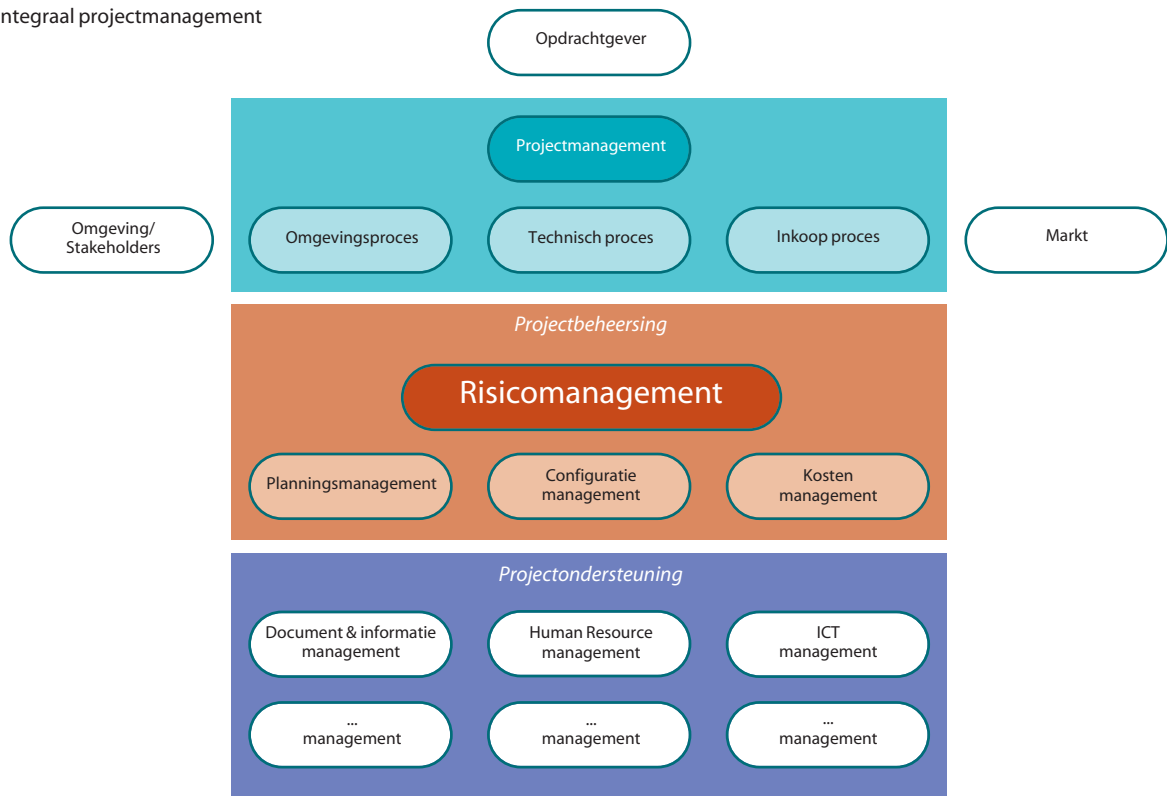
3.1 De context van het technisch proces

Binnen het technisch proces stuurt Systems Engineering op eisen gedurende de levenscyclus van een systeem. Het technisch proces is onderdeel van de methode Integraal Projectmanagement (IPM). Deze methode is ontwikkeld om infrastructurele projecten op een integrale wijze beheerst te realiseren.

De hoofdprocessen in een project zijn gegroepeerd in: project-management, omgevingsproces, technisch proces en inkoopproces, projectbeheersing (kwaliteit, geld, tijd en risico) en projectondersteuning (HRM, documenten, ICT, kennis-borging etc.).

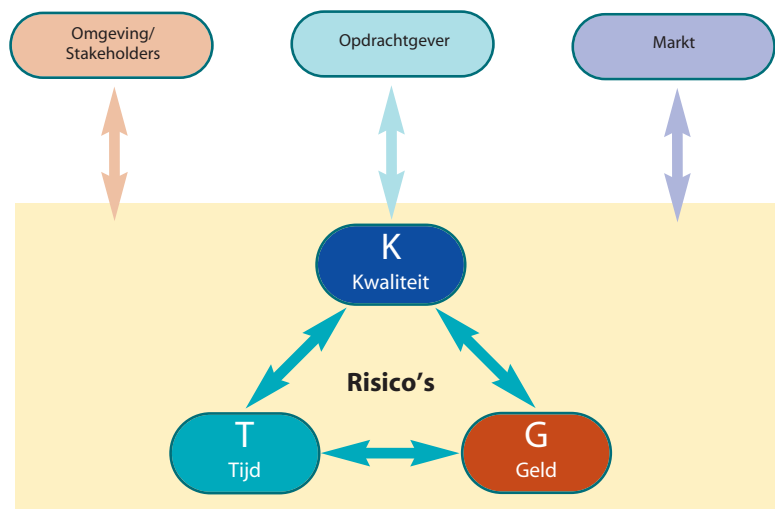
Rijkswaterstaat en ProRail beheersen hun projecten om een systeem (kwaliteit) te realiseren binnen budget (geld) en planning (tijd). De kwaliteit wordt gevat in eisen. Op tijd en geld worden via andere beheersmaatregelen gestuurd.

Figuur 22:
integraal projectmanagement



De schaarste van tijd, geld en kwaliteit brengt met zich mee dat deze in onderlinge samenhang benaderd en afgewogen moeten worden. Om de gewenste kwaliteit te behalen, worden activiteiten uitgevoerd. Aan iedere activiteit zijn risico's verbonden. Afwijkingen in tijd, geld of kwaliteit worden veroorzaakt door risico's die optreden: niet-geplande gebeurtenissen of onbeheerste processen. De effecten van opgetreden afwijkingen in kwaliteit zullen doorgaans zijn op te heffen ten koste van tijd en geld.

Figuur 23:
sturen op tijd, geld en kwaliteit met IPM



3.2 Relatie technisch proces met omgevingsproces

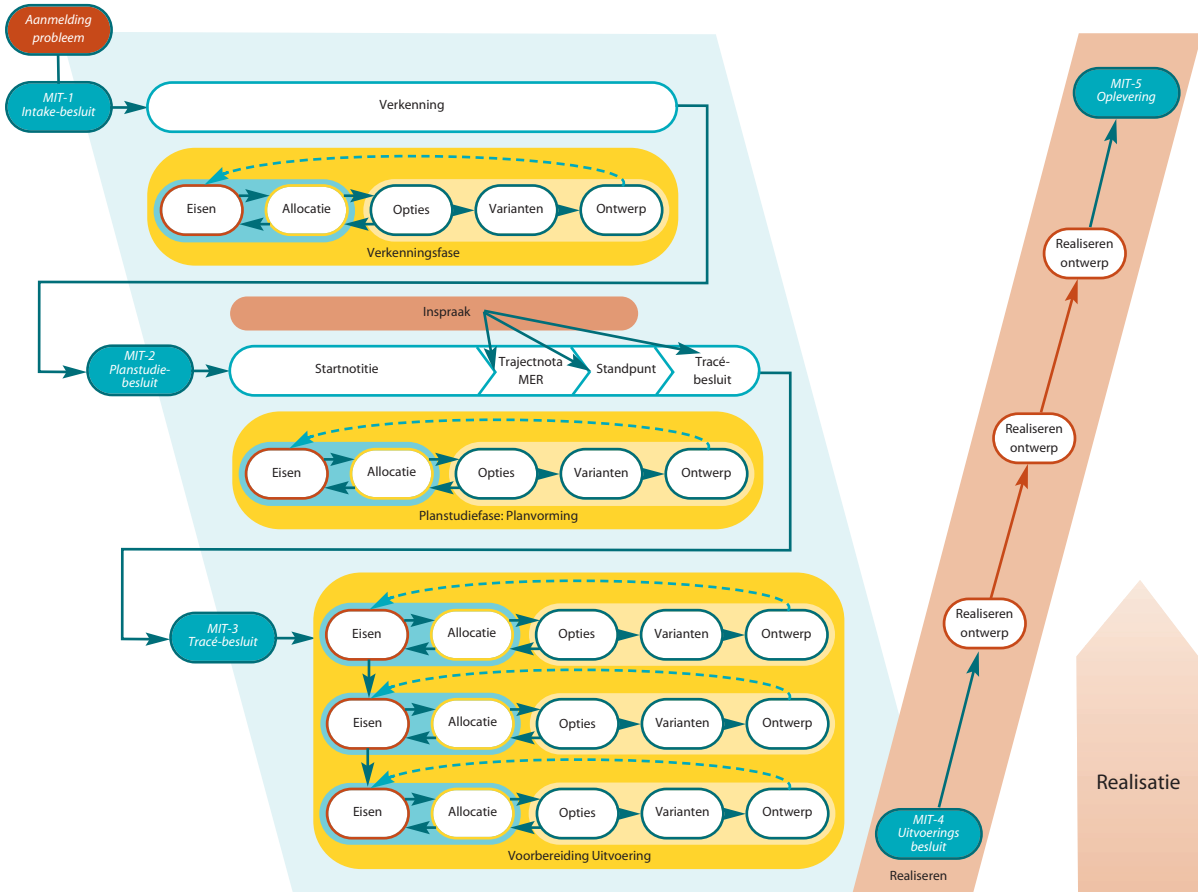
Het omgevingsproces zorgt voor de wettelijke acceptatie door de stakeholders van de inpassing van het systeem in de fysieke omgeving, binnen de randvoorwaarden van kwaliteit, tijd, geld en risico's. Alle partijen die een belang hebben bij het project vormen deze omgeving.

Het omgevingsmanagement levert de eisen en afspraken met de stakeholders aan het technisch management.

Technisch management is in alle fasen van een systeem faciliterend voor omgevingsmanagement. Dit begint met input voor verkenningnota, trajectnota/MER, projectbesluit of tracébesluit tot aan input voor projectovereenstemmingen met kabels- en leidingeigenaren. Onderstaande figuur laat de relatie tussen het technisch proces en het omgevingsproces voor een project dat de Tracéwetprocedure moet doorlopen zien. De uitwerking van de varianten op systeemniveau is bijvoorbeeld de input voor de trajectnota/MER. En het ontwerp op systeemniveau is input voor het (Ontwerp) Tracébesluit.

Rijkswaterstaat en ProRail zijn publieke opdrachtgevers. Het is belangrijk om de belangen van de burgers op een transparante manier bij de besluitvorming te betrekken. Daarom zijn publieke opdrachtgevers gebonden aan besluitvormingsprocedures.

Figuur 24:
koppeling technisch proces naar omgevingsproces



ProRail en Rijkswaterstaat kennen verschillende besluit vormingprocedures. Projecten met betrekking tot het spoorwegennet, hoofdwegennet en de kunstwerken binnen het hoofdvaarwegennet hebben te maken met de MIT-fasering. Projecten met betrekking tot het hoofdvaarwegennet en de hoofdwatersystemen te maken met de SNIP-fasering.

3.3 Relatie technisch proces met inkoopproces

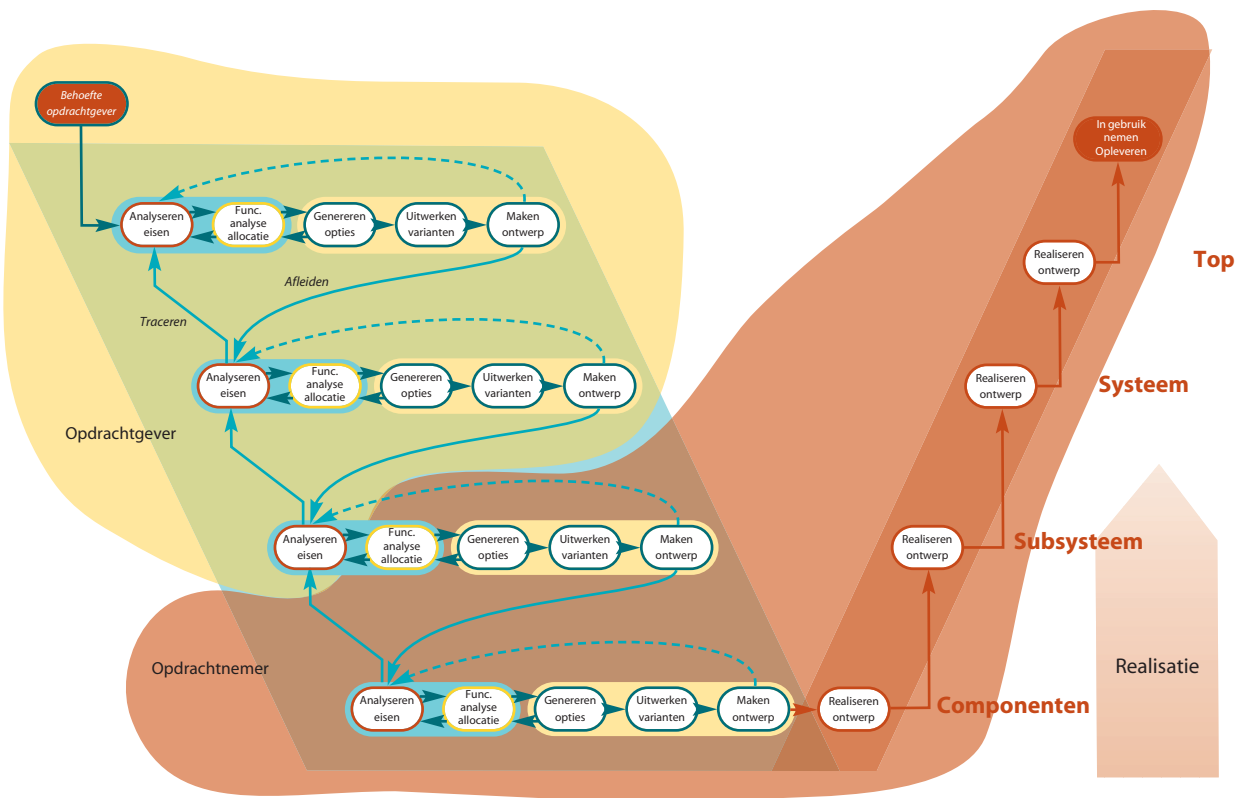
De condities in het inkoopproces leiden tot een optimale inkoop. Systems Engineering legt een koppeling tussen de eisen vanuit opdrachtgever en omgeving. Hierdoor kunnen we in het inkoopproces de mogelijkheden van de markt optimaal benutten en tegelijkertijd de risico's vanuit de markt beheersen.

Met de input vanuit technisch management stellen we de inkoopbehoefte vast. Deze input bestaat uit bijvoorbeeld het programma van eisen. Alle eisen die hierin zijn opgenomen definiëren de prestatie die het systeem uiteindelijk moet leveren en de samenhang tussen de objecten die het systeem maakt, gedurende de levenscyclus.

Dit proces bevat ook ontwerpen. Bij het vaststellen van de inkoopbehoefte bepaalt de opdrachtgever welke levenscyclusfasen van welke objecten door de marktpartij worden uitgevoerd.

Bij het toepassen van Systems Engineering maakt het inhoudelijk geen verschil of de opdrachtgever of de opdrachtnemer de processen uitvoert. Het is daarmee mogelijk om op elk gewenst moment in de levenscyclus de markt in te schakelen. Onderstaande figuur laat een principe voor een Design & Build contract na Tracébesluit zien. Hier wordt de marktpartij ingeschakeld voor het engineerings- en realisatieproces vanaf subsysteemniveau (dat wil zeggen na Tracébesluit, zie figuur 22). Een hoofdaannemer kan bijvoorbeeld het engineeringsproces weer uitbesteden aan een ingenieursbureau.

Figuur 25:
koppeling technisch proces en inkoopproces



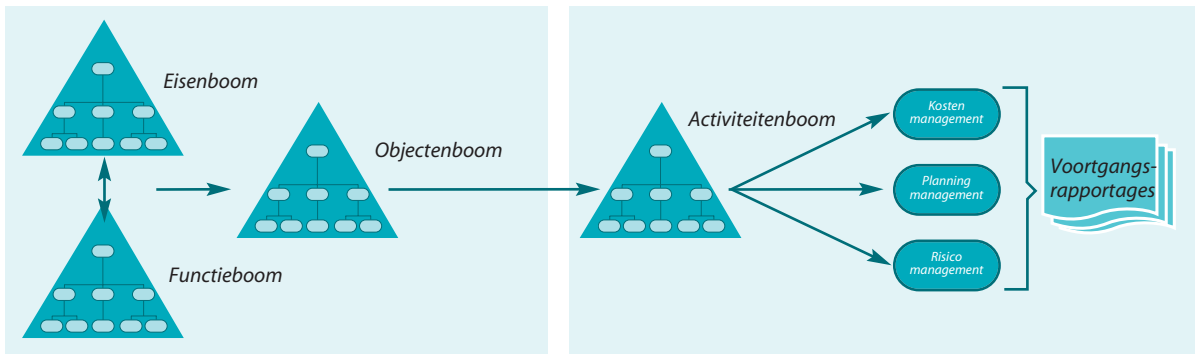
De opdrachtgever kan er ook voor kiezen om de markt nog eerder in te schakelen dan in bovenstaande figuur is geïllustreerd. Bijvoorbeeld door het engineering- en realisatieproces vanaf het ontwerp op systeemniveau uit te besteden. Dit staat ook wel bekend als vervlechten, omdat dan de aanbestedingsprocedure, het technische proces en de tracéwetprocedure worden vervlechten.

3.4 Relatie technisch proces met projectmanagement en projectbeheersing

Bepaalde gereedschappen van Systems Engineering kunnen we ook buiten het technisch proces gebruiken, bijvoorbeeld voor projectmanagement en projectbeheersing. Het technisch proces heeft belangrijke raakvlakken met projectmanagement en projectbeheersing. Zorgvuldig projectmanagement betekent voor de projectmanagers inzicht in de stand van zaken op het gebied van kwaliteit, geld en tijd, op ieder moment in het project. Een projectmanager moet van iedere activiteit aan kunnen tonen wat deze heeft opgeleverd, wat deze heeft gekost en hoe lang deze heeft geduurd. Projectbeheersing zorgt voor de controle van tijd, geld en kwaliteit (techniek) gedurende de levenscyclus. Sturing is gebaseerd op risicomanagement. Risico's worden gekoppeld aan activiteiten. Centraal in projectbeheersing staat de activiteitenboom. Aan de activiteitenboom zijn risico's, tijd en geld gekoppeld. Configuratiemanagement is gekoppeld aan de objectenboom.

Projectbeheersing betekent vooral een inschatting van risico's in tijd, geld en kwaliteit op het juiste detailniveau. De koppeling tussen planning en budget maakt duidelijk wanneer een risico een rol speelt en wat de omvang is. Hierdoor kunnen beheersmaatregelen efficiënt en effectief worden ingezet. Met de activiteitenboom kunnen we de risico's koppelen aan tijd en geld. De activiteitenboom hebben we in hoofdstuk 2 behandeld. Onderstaande figuur geeft de relatie tussen het technisch proces en projectmanagement en projectbeheersing weer.

Figuur 26:
relatie tussen bomen



Projectbeheersing is opgebouwd uit:

- Configuratiemanagement, de boekhouding van de inhoud, de techniek, van het project
- Financieel management, de controle op uitgaven en inkomsten in heden, verleden en toekomst
- Planningmanagement, de bewaking van het aspect tijd gedurende de levenscyclus van een systeem
- Risicomanagement, de identificatie en beheersing van de risico's van een project, over de aspecten kwaliteit, geld en tijd heen.

Met deze vier managementprocessen kunnen we de activiteiten binnen een project verantwoorden. Deze informatie vormt het uitgangspunt voor projectmanagement. Een belangrijk aspect hierin is het principe dat de check op deze beheersaspecten apart wordt geïdentificeerd en geen integraal onderdeel is van de werkzaamheden van de acterende partij. Op deze manier is onafhankelijk en objectief inzicht in de status quo van een project mogelijk. Wanneer we activiteiten koppelen aan tijd, geld, kwaliteit en risico's, is het eenvoudiger aan te tonen wanneer en waaraan geld en tijd beschikbaar zijn gesteld.

Configuratiemanagement is de internationale term voor wat in de GWW-sector ook wel bekend staat als scopemanagement. De definitie van configuratie is: de functionele en fysieke eigenschappen van een product, zoals omschreven in technische documentatie en gerealiseerd in het product. De configuratie is dus de inhoud of scope van het project. Het doel van configuratiemanagement is er altijd voor te zorgen dat iedereen met de juiste uitgangspunten en gegevens werkt en dat wijziging van deze uitgangspunten via beheerste procedures verloopt. Ook is het belangrijk om regelmatig momenten in het ontwerp- en uitvoeringsproces in te lassen om de gegevens en uitgangspunten te 'bevroeren'.

De kern van configuratiemanagement is dat we vier stappen doorlopen: het identificeren van de configuratie, het wijzigingsproces, het bijhouden van de boekhouding van de configuratie en het auditeren van de configuratie. Configuratiemanagement is een verzwaring van de eisen in de ISO 9001:2000. Zo'n zware vorm van beheersing is alleen gerechtvaardigd bij projecten waar het bijhouden van wijzigingen en versiebeheer van kritiek belang is. De complexiteit van de hedendaagse vraagstukken en de noodzaak om expliciet te werken maakt de behoefte aan configuratiemanagement in de GWW-sector steeds groter.

3.5 Relatie technisch proces met projectondersteuning

Projectondersteuning zorgt voor de levering van de mensen, middelen en processen om de projectdoelstellingen te realiseren. Projectondersteuning maakt de uitvoering van activiteiten, zoals het technisch proces, tijdens de levenscyclus mogelijk. Het niet goed beheersen van de projectondersteuning levert risico's op. Het vertrek van personeel, de afhankelijkheid van software en het niet naleven van veiligheidsvoorschriften kan de continuïteit van een project in gevaar brengen. Een koppeling tussen projectondersteuning en Projectmanagement maakt het verband tussen het project en mensen, middelen en processen inzichtelijk en beheersbaar.

Om de kwaliteit van een product, dienst of proces te garanderen, speelt kwaliteitsmanagement een rol. Vanuit kwaliteitsmanagement worden processen gestandaardiseerd of geformaliseerd. Afspraken over het proces verkleinen de kans op mislukken. Een belangrijk onderdeel van kwaliteitsmanagement is werken onder kwaliteitsborging. Deze methode stelt eisen aan de manier waarop opdrachtgevers en opdrachtnemers met elkaar communiceren ten behoeve van de verificatie. ISO 15288 bezit ook elementen van verificatie, maar niet alle elementen van de borging worden in ISO 15288 uitgewerkt. We moeten zoeken naar een kwaliteitssysteem met een borging die alle processen in de GWW-sector afdekt. Waarschijnlijk zullen hiervoor zowel de ISO 15288 als de ISO9001:2000 van belang zijn, daarnaast zijn wellicht ook andere normen nodig. De uitdaging voor de GWW-sector is om gezamenlijk te

komen tot een geschikt kwaliteitsmanagementsysteem. Alleen dan is het mogelijk om kwaliteit, en daarmee doeltreffendheid en doelmatigheid, te verantwoorden.

Bijlage 1: Definitielijst

Begrip	Definitie [en bron]
Activiteiten boom (= <i>Work Breakdown Structure</i>), (WBS)	Beschrijft de hiërarchie van taken (gegroepeerd in werkpakketten) die moeten worden uitgevoerd in een project. (gebaseerd op: ESA PSS-50-0)
Afleiden	Het afleiden van functies of eisen vanuit een bovenliggend detailniveau.
Alloceren	Toewijzen van de gewenste functie of eisen aan één of meerdere objecten die deze functie vervullen.
Aspect	Specifieke functie of eigenschap van het te ontwikkelen systeem die niet direct bijdraagt aan de primaire functie.
Aspecteis	De beschrijving van een gewenste functie of eigenschap van een product of dienst aangaande een aspect.
Asset Management	Het systematische proces van op effectieve en efficiënte wijze exploiteren, instandhouden en functioneel opwaarderen van infrastructuur. [ASR]
Baseline	Formeel "bevroren" status van een product die dient als referentie voor verdere werkzaamheden.
Beheer	Het gepland en financieel verantwoord treffen van maatregelen en activiteiten waarmee de functie beschikbaar blijft.
Belanghebbende (= Stakeholder)	Een partij die een recht heeft in of belang heeft bij een systeem.
Beschikbaarheid (= <i>Availability</i>)	Het vermogen van een product in een toestand te zijn om de vereiste functie onder bepaalde omstandigheid op een bepaald moment of gedurende een bepaald tijdsinterval uit te voeren, ervan uitgaande dat de vereiste externe hulpbronnen zijn verschaft. [EN50126]
Beslismoment	Punt waarop expliciet wordt besloten om door te gaan, nog niet door te gaan of te stoppen.
Betrouwbaarheid (= <i>Reliability</i>)	De waarschijnlijkheid dat een product een vereiste functie kan uitvoeren onder gegeven omstandigheden gedurende een bepaald tijdsinterval. [EN50126]
Boomstructuur	Een hiërarchisch gestructureerde verzameling gelijksoortige grootheden volgens de regel "is onderdeel van" of "is afgeleid van", met een enkelvoudige top.
Bovenliggende eis	De eis die ten grondslag ligt aan de betreffende eis.

Begrip	Definitie [en bron]
Component	Een samenwerkende combinatie van elementen bedoeld om in uitvoering van een gespecificeerde functie een bepaald doel te realiseren, maar die op zichzelf geen klantbehoefte vervult.
Configuratie	Functionele en materiële eigenschappen van een product, zoals omschreven in technische documentatie en gerealiseerd in het product. [ISO 10007]
Configuratie management	Activiteit om consistente beschrijvingen van de prestatie indicatoren van een product en zijn functionele en materiële eigenschappen te: <ul style="list-style-type: none"> • definiëren en onderhouden; • vergelijken met het ontwerp en de eisen. (gebaseerd op: ECSS)
Decomponeren	Het proces waarin het hoger gelegen detailniveau wordt opgedeeld in meer gedetailleerde afgeleide eisen, functies en bijbehorende objecten.
Eis	Beschrijving van een gewenste eigenschap van het te leveren product of dienst.
Eisenanalyse	Proces dat op complete wijze de behoefte van belanghebbenden identificeert en beschrijft en deze behoefte systematisch omzet naar gestructureerde eisen.
Eisenboom (= <i>Requirements Breakdown Structure</i>), (RBS)	De hiërarchische structuur van de eisen waaruit een (top)eis is samengesteld.
Engineeringproces	Zich herhalend proces waarbij de eisen en functies worden gestructureerd en vertaald naar (deel)oplossingen die aan deze eisen voldoen.
Expliciet werken	Werkwijze waarbij afwegingen, keuzes, definities, wijzigingen en afspraken worden vastgelegd zodat er zo min mogelijk onzekerheden en onduidelijkheden optreden.
Faalkosten	Alle kosten die voorhet eindproduct zijn gemaakt, ontstaan door vermijdbaar tekortschieten. [SBR]
Functie	Beoogde werking en verrichting van een product of dienst. [“Van Dale”]
Functieboom (= <i>Functional Break-down Structure</i>), (FBS)	De hiërarchische structuur van de functies waaruit een (hoofd)functie is samengesteld.
Functieervuller	Object of dienst dat de gewenste functie vervult.
Functionele analyse	Proces dat op complete wijze de functies en hun relaties identificeert en beschrijft en deze functies systematisch karakteriseert, classificeert en evalueert. (gebaseerd op: ISO/DIS 21351-2001)

Begrip	Definitie [en bron]
Functionele eis	De beschrijving van een gewenste eigenschap aangaande de primaire functie van een product.
Functionele levensduur	Beoogd tijdsbestek waarbinnen een functie in stand wordt gehouden en dient te voldoen aan de gestelde eisen onder de ter plaatse geldende gebruiksomstandigheden.
Functionele specificatie	Document dat het voorgenomen doel van een product beschrijft, inclusief de bijbehorende beperkingen en omgeving van dat product, de operationele en prestatie eigenschappen voor iedere fase van de levenscyclus met de toegestane flexibiliteit. (gebaseerd op: ISO/DIS 21351-2001)
Gebruiksfase	Tijdsbestek tussen oplevering en sloop waarin een object zijn functie vervult.
Gezondheid	Welzijn van personen die een relatie hebben tot het systeem.
Integraal Project Management	Zie project management.
Integreren	De samenvoeging van de ontwerpen van de onderliggende objecten op dusdanige wijze dat deze passen in het ontwerp van het bovenliggende object.
Klant	Gebruiker of opdrachtgever van het systeem.
Levenscyclus (= Life cycle)	De evolutie in de tijd van een object van probleem tot sloop.
Object	Een afzonderlijk identificeerbaar onderdeel van een fysiek geheel.
Objectenboom (= <i>System Break-down Structure</i>), (SBS)	De hiërarchische structuur van de objecten waaruit een (hoofd)object is samengesteld.
Omgeving	De omgeving (natuurlijk of aangelegd) waarin het betreffende systeem wordt gebruikt en beheerd; of waarin het systeem wordt ontwikkeld, gebouwd of gesloopt. (gebaseerd op: INCOSE)
Omgevingshinder	Mate van hinder die het object oplevert voor zijn omgeving.
Onderhoud	Activiteiten die voor het object worden uitgevoerd met het doel de functies van het object gedurende de functionele levensduur op het vereiste kwaliteitsniveau in stand te houden.
Onderhoudbaarheid	De waarschijnlijkheid dat een onderhoudsactiviteit voor een product bij gegeven bedrijfsomstandigheden kan worden uitgevoerd binnen de daarvoor vastgestelde tijd. Hierbij mag worden uitgegaan van vastgestelde voorwaarden, procedures en hulpbronnen. (gebaseerd op: IEC 60050(191)) [EN50126]

Begrip	Definitie [en bron]
Onderliggende eis	Een eis afgeleid uit de desbetreffende eis.
Ontwerp	De in documenten vastgelegde definitie van de eigenschappen van een product zoals deze gerealiseerd kunnen (gaan) worden in het feitelijke product in antwoord op de desbetreffende eisen.
Ontwerploop	Proces waarbij de functionele analyse en het ontwerpproces herhaald wordt doorlopen om eisen en functies op de meest efficiënte wijze in een ontwerp te vertalen.
Ontwerpproces	De zich herhalend voortschrijdende activiteiten om te komen van een functieervuller tot een concreet object.
Opties	De in documenten vastgelegde oplossingsrichtingen, inclusief een beschouwing of deze wel of niet kunnen voldoen aan de eisen.
Proces	Verzameling van onderling gerelateerde of op elkaar inwerkende activiteiten die input vertalen naar output. (gebaseerd op: EN-ISO 9000:2005)
Programma van eisen	Een selectie van specificaties uit de specificatieboom voor een speciaal doel.
Project Management	Het op zo'n manier organiseren en managen van middelen dat deze middelen zodanig worden ingezet dat een project wordt voltooid binnen de gedefinieerde scope en de afgesproken planning en budget. (gebaseerd op: Wikipedia)
Projectscope	Het totaal van producten en diensten dat in het kader van een project dient te worden geleverd.
Raakvlak	De functionele en fysieke eigenschappen die dienen te bestaan voor het in samenhang functioneren van delen op een gemeenschappelijke grens.
Raakvlakeis (extern)	Eis die wordt gesteld aan de interactie van het te beschouwen systeem met de omgeving op het grensvlak.
Raakvlakeis (intern)	Eis die wordt gesteld aan de interactie tussen objecten binnen het te beschouwen systeem op het grensvlak.
Randvoorwaarde	Buiten het project bestaande condities waarbinnen het project zich moet afspelen.
S.M.A.R.T.	Acroniem van Specifiek, Meetbaar, Acceptabel, Realistisch en Tijdsgebonden.

Begrip	Definitie [en bron]
Scope	Zie projectscope of systeemscope.
Scoringsmatrix (= <i>Trade-Off Matrix</i>)	Tabel om varianten onderling te vergelijken op hoogste waarde.
Sloop	Activiteiten gericht op het ontmantelen van een object dat zijn functie niet meer hoeft te of kan vervullen.
Specificatie	Een document met daarin de verzameling geordende eisen die gelden voor een (deel)product, of dienst.
Specificatieboom	Een hiërarchische geordende verzameling specificaties.
Specificeren	Het bijeenbrengen van relevante onderwerpen voor een specificatie, het formuleren van de bijbehorende eisen en het geordend vastleggen van de eisen in de specificatie.
Stakeholder	Zie belanghebbende.
Statement of Work	Zie vraagspecificatie deel II
Subsysteem	Een samenwerkende combinatie van elementen bedoeld om in uitvoering van een gespecificeerde functie een bepaald doel te realiseren, maar dat op zichzelf geen klantbehoefte vervult. [ECSS, PMS00475]
Systeem	Een samenwerkende combinatie van elementen bedoeld om in uitvoering van een gespecificeerde functie een bepaald doel te realiseren. [ECSS, PMS00475]
Systeemscope	Het totaal van producten en diensten dat nodig is om de gewenste functie van het systeem te vervullen.
Systems Engineering	De interdisciplinaire aanpak en de middelen die nodig zijn om de realisatie van succesvolle systemen mogelijk te maken. De aanpak focust op: <ul style="list-style-type: none"> • het vroeg in de ontwikkelingsfase definiëren van de klantbehoeften en gewenste functionaliteit; • het documenteren van de eisen op basis waarvan het ontwerpproces wordt doorlopen, het systeem wordt gevalideerd en waarbij altijd vanuit het complete probleem wordt geredeneerd. (gebaseerd op: INCOSE)
Toekomstvastheid	Mate waarin bij het ontwerp van het object is geanticipeerd op toekomstige ontwikkelingen.
Traceerbaarheid, naspeurbaarheid	De mogelijkheid om het verloop van keuzen, besluiten en bedoelingen eenduidig te kunnen volgen.

Begrip	Definitie [en bron]
Uitgangspunt	Veronderstellingen die men hanteert om met het ontwerp proces te kunnen beginnen. Gedurende het ontwerpproces moet worden aangetoond dat de uitgangspunten juist zijn, of dat deze veranderd moeten worden.
Uitvoering	Het proces van realisatie van het ontwerp.
Valideren	Het door daadwerkelijk gebruik nagaan of het gerealiseerde product voldoet aan de behoeften van de klant, in aanvulling op de verificatie.
Value Engineering	Ontwerpproces waarbij expliciet kostengericht en risicobewust ontwerpkeuzes worden gemaakt.
Varianten	De in documenten vastgelegde mogelijke oplossingsrichtingen, inclusief een onderzoek naar de oplossingsrichting die het best voldoet aan de eisen.
Veiligheid	De mate waarin iemand (of iets) is gevrijwaard van (de effecten van) gevaarlijke situaties.
Verificatiematrix	Een matrix waarin het verband vanaf de eisen naar het ontwerp en het verifiërend bewijs(methode) wordt vastgelegd.
Verificatiemethode	Middel voor het aantonen van de overeenkomstigheid van ontwerp- c.q. realisatieresultaten aan de ten grondslag liggende eisen met behulp van objectief bewijs.
Verifiëren	Bevestiging door onderzoek en verstrekking van objectief bewijs dat aan de gespecificeerde eisen is voldaan. [EN-ISO 9000:2005]
Vormgeving	De esthetische kwaliteit van het systeem in samenhang met zijn omgeving en passend bij de gewenste ambitie.
Vraagspecificatie	Het als zodanig in de basisovereenkomst aangemerkte contractdocument dat door of namens de opdrachtgever is vervaardigd, op basis waarvan de opdrachtnemer zijn aanbieding heeft opgesteld en ingediend. [UAVGC 2005]
Vraagspecificatie deel I	Contractdocument waarin de eisen aan het (deel)product zijn verwoord.
Vraagspecificatie deel II (= Statement of Work)	Contractdocument waarin de eisen aan de uit te voeren werkzaamheden zijn verwoord.
Waarde	De mate waarin het systeem voldoet aan de behoeften van de klant.

Begrip**Definitie [en bron]**

Wens

Een beoogde eigenschap van een product, geformuleerd als eis, echter zonder verplichting.

Werkpakket

Set van samenhangende activiteiten voor een object met gedefinieerde input en output.

Bijlage 2: Afkortingen en literatuurlijst

Verklaring afkortingen bronnen

ASR: Asset Rail

DCMA: Defense Contract Management Agency

DSMC: Defense Contract Management Command (obsolete - see DCMA)

ECSS: European Cooperation for Space Standardization

PMS: Project Management Systeem (van best practices bij Nieuwbouw van ProRail)

RWS: Rijkswaterstaat en Werkgroep Leidraad Systems Engineering.

SBR: Stichting Bouwresearch

Van Dale: Nederlands woordenboek Van Dale

Wikipedia: Internet Encyclopedie Wikipedia

Gebruikte literatuur

EN50126: Spoorwegtoepassingen - De specificatie en het bewijs van de betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid en veiligheid (RAMS). European Standard, CENELEC, September 1999

EN-ISO 9000:2005: ISO 9000:2005

ESA PSS-05-0 ESA Software Engineering Standards, Issue 2, February 1991, die verwijst naar zijn bron": ANSI

IEEE Std 729-1983 "IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology

INCOSE: Systems Engineering Handbook, INCOSE, Release 1, January 1998

ISO 10007: NEN-EN-ISO 10007: Richtlijn voor configuratiebeheer (ISO 10007:1995, IDT)

INCOSE Systems Engineering Handbook, version 3; June 2006

ISO/IEC 15288 Systems Engineering – System life cycle processes, first edition; November 2002

ISO/DIS 21351-2001 Space systems — Functional and technical specifications; ECSS, Date: 2001-06-11

MIL-STD-499: MIL-STD-499 "Engineering Management")

MIL-STD-973: Military Standard Configuration Management, April 1992

Systems Engineering Fundamentals, Department of Defence; January 2001

UAV GC 2005; CROW

Bijlage 3: Personen die een bijdrage hebben geleverd

Martin Anneeze (Rijkswaterstaat)
Johan Asscheman (Vakgroep Civiele Betonbouw - Bouwend Nederland)
Martijn Blom (Rijkswaterstaat)
Tonny Boerkamp (Hegeman Beton- en Industriebouw; Bouwend Nederland)
Fred Bouwmeester (Rijkswaterstaat)
Paul Brouwer (ProRail)
Hans Bruinsma (Grontmij; ONRI)
Ton Buijink (Arcadis; ONRI)
Timo Giling (Movares; ONRI)
Sikko Jansen (Rijkswaterstaat)
Wim Janssen (Rijkswaterstaat)
Geert van der Linde (Strukton Betonbouw; Bouwend Nederland)
Bart van Luling (Rijkswaterstaat)
Kees Marijnissen (Heijmans Beton- en waterbouw; Bouwend Nederland)
Niels Nijenhuis (Grontmij; ONRI)
Arend Nagel (Rijkswaterstaat)
Harry de Rijk (Vobi Vinkeveen; Bouwend Nederland)
Paul Schreinemakers (SEPIAdvies BV; ProRail)
Jeroen van Veldhuizen (ProRail)
Peter Vermey (Grontmij; ONRI)
Jan Visser (T&E Consult; Bouwend Nederland)
Willem-Jan de Vlieger (Four Elements NL; Rijkswaterstaat)
Dino Gaya Walters (ProRail)
Ger van der Wal (ProRail)
Herman Walta (ONRI)
Gerrit Wemeijer (TBI Haverkort Voormolen; Bouwend Nederland)
Wiebe Witteveen (Rijkswaterstaat)
Frank van der Woerd (Infraconsult + Engineering; Bouwend Nederland)
Theo Zwakhals (BAM Civiel; Bouwend Nederland)