

Framework voor lifecycle management van publieke kritieke infrastructuur

Inventarisatie en framework versie 0

Wouter Jan Klerk (Deltares)
Julius van Stokkum (BZIM)
Wouter Zomer (BZIM)
Sander Bakkenist (BZIM)

1220047-002

Titel

Framework voor lifecycle management van publieke kritieke infrastructuur

Opdrachtgever

RWS

Project

1220047-002

Kenmerk

1220047-002-GEO-0005

Pagina's

65

Trefwoorden

lifecycle management, asset management, data, informatie

Samenvatting

ROBAMCI is een meerjarig onderzoeksprogramma met als doel om lifecycle en asset management voor publieke infrastructuur handen en voeten te geven. Dit rapport beschrijft de eerste versie van het framework wat wordt gebruikt voor de verschillende case studies binnen het ROBAMCI-project. Uit de literatuur blijkt dat in veel toepassingsgebieden, aan asset management wordt gedaan, vaak zelfs zonder dit te benoemen. In dit laatste schuilt ook een veelvoorkomend probleem: hoewel vaak een groot deel van de fasen van de levenscyclus op de een of andere manier aan bod komen, gebeurt dit niet op integrale wijze. Oorzaak hiervan is dat actoren uit verschillende fasen niet goed met elkaar communiceren en niet de juiste informatie uitwisselen.

Aan de hand van de literatuur is een framework opgesteld voor asset management van kritieke (publieke) infrastructuur. Dit framework is ingestoken vanuit de inhoudelijke kant, en niet vanuit het proces, wat vaak gebruikelijk is. Reden hiervoor is dat processen vaak beheerdersafhankelijk zijn, en het doel van ROBAMCI is om methoden te ontwikkelen die beheerdersonafhankelijk zijn. Het framework bestaat uit 3 hoofdonderdelen. Het eerste is een processchema voor lifecycle management. In dit schema worden de verschillende fasen van de levenscyclus, die nu vaak nog afzonderlijk beschouwd worden, geïntegreerd. Daarbij is er een verband gelegd tussen asset management van netwerken en individuele assets, en de verschillende rolhouders (asset eigenaar, asset manager en service provider) die in de levenscyclus een rol spelen. Cruciaal in de implementatie van dit framework is de relatie tussen de verschillende fasen in de levenscyclus en met name de uitwisseling van informatie tussen deze fasen, uit de literatuur blijkt immers dat dit vaak mis gaat. Als tweede onderdeel van het framework is daarom een model ontwikkeld voor het definiëren van eisen aan kwaliteit van informatie en het toetsen van informatiekwaliteit. Dit model kan bijdragen aan het beter integreren van verschillende fasen in de levenscyclus.

Het derde onderdeel van het framework is een blauwdruk hoe lifecycle management kwantitatief ondersteund kan worden. Dit is erop gericht om tools en modellen, die veelal al beschikbaar zijn, inzetbaar te maken in een lifecycle management context. De drie onderdelen van het framework zullen in de volgende fasen van ROBAMCI, binnen de ROBAMCI case studies, verder verbeterd en ingevuld worden.

Referenties

Zie hoofdstuk 8

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec. 2015	Wouter Jan Klerk		Marcel van der Doef		Harm Aantjes	

Status

definitief concept

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 ROBAMCI (Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures)	1
1.2 Rol van het framework binnen ROBAMCI	1
1.3 Leeswijzer	1
2 Toepassingen van lifecycle management uit literatuur en praktijk	3
2.1 Terminologie	4
2.2 ISO-richtlijnen voor asset management	5
2.2.1 Inleiding	5
2.2.2 ISO55000: Overview, principles and terminology	5
2.2.3 ISO 55001: Asset Management Systems - Requirements	5
2.2.4 ISO55002: Guidelines for the application of ISO 55001	6
2.3 LCM in de wetenschappelijke literatuur	6
2.3.1 Aanpak	6
2.3.2 Algemene literatuur over asset en lifecycle management	7
2.3.3 Lifecycle management voor bruggen en constructies	8
2.3.4 Lifecycle management van infrastructuursystemen	9
2.3.5 Lifecycle management van stedelijke infrastructuur	10
2.3.6 Lifecycle management voor waterkeringen	11
2.3.7 Lifecycle management in energie en industrie	12
2.3.8 Lifecycle management volgens het Institute of Asset Management	13
2.4 Toepassingen van LCM uit de dagelijkse praktijk in Nederland en daar buiten	14
2.4.1 Lifecycle management bij verschillende organisaties in de Nederlandse infrastructuursector	14
2.4.2 Projecten gerelateerd aan lifecycle management	17
2.4.3 Voorbeelden uit het buitenland	19
2.4.4 Conclusie	19
2.5 De rol van data en informatie in lifecycle management	20
2.6 Discussie & conclusies	22
3 Ontwikkeling van een generiek framework	24
3.1 Doel van het framework	24
3.2 Belangrijke elementen uit de literatuur	24
3.2.1 Het basisprincipe van LCM: de levenscyclus	24
3.2.2 Verschillende rollen tijdens de levenscyclus	25
3.2.3 Assets en netwerken van assets	27
3.2.4 Externe factoren	28
3.3 Bestaande schema's voor lifecycle management	28
3.3.1 Schema's van het Institute of Asset Management (IAM)	28
3.3.2 PDCA-cyclus	30
3.3.3 Schema Engelse waterleidingbedrijven	31
3.4 Discussie & conclusies	31
4 ROBAMCI framework versie 0	32
4.1 Lifecycle management processchema	32
4.2 Van proces naar kwantitatieve onderbouwing	33

4.3	Blauwdruk ondersteunend instrumentarium	34
4.3.1	Blauwdruk ondersteunend instrumentarium voor kwantitatief lifecycle management	35
4.3.2	Overwegingen ten aanzien van de ontwikkeling van D-FRAME	37
4.4	Discussie & Conclusies	39
5	Informatiekwaliteitsmodel	40
5.1	Theoretisch kader	40
5.1.1	Methode	40
5.1.2	Notie van datakwaliteit	40
5.1.3	Kwaliteitsdimensies	43
5.2	Gebruik van data en informatie	43
5.3	Het informatiekwaliteitsmodel	45
5.3.1	Beoordelen van datakwaliteit	45
5.3.2	Gebruik	46
5.3.3	Relevante kwaliteitsdimensies	47
5.4	Vertaling naar lifecycle management	48
5.4.1	De globale levenscyclus van een dijk	48
5.4.2	(Reduceren van) onzekerheden	49
5.4.3	Voorbeeld	50
5.5	Conclusies en aanbevelingen	51
6	Toepassing van het framework	53
6.1	Plaats van ROBAMCI cases binnen het processchema van het framework	53
6.1.1	Kustlijnzorg	53
6.1.2	Kunstwerken	54
6.1.3	Waterkeringen	56
6.2	Ondersteuning met tools	57
7	Conclusies & aanbevelingen	59
8	Referenties	60
9	Lijst van gebruikte afkortingen	65

1 Inleiding

1.1 ROBAMCI (Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures)

ROBAMCI heeft als doel om kennis, methoden en tools te ontwikkelen en implementeren, waarmee significante efficiencywinst kan worden bereikt over de levensduur van 'publieke assets' en waarmee de transparantie van het beslisproces over aanleg, beheer en onderhoud en verbetering/vervanging wordt vergroot. Dit gebeurt op twee manieren: enerzijds door een business case van de kosten en baten van het toepassen van asset management in de heel Nederlandse GWW-sector. Anderzijds door het ontwikkelen van algemene methoden voor deze toepassing. Dit moet leiden tot een breed toepasbare methodiek, uitgerust met tools, die over de hele breedte van de GWW-sector in Nederland (en daarbuiten) toegepast wordt en waarmee de efficiency kan worden verbeterd. Dit wordt bewerkstelligd door ervaringen, methoden en tools uit case studies terug te koppelen naar een centrale methode die ongeacht de toepassing op ieder soort asset wordt toegepast. Dit generieke en toepassing overkoepelende aspect, waar bijvoorbeeld waterkeringbeheerders leren van rioleringsbeheerders, is wat ROBAMCI uniek maakt.

1.2 Rol van het framework binnen ROBAMCI

Een centrale rol hierin is weggelegd voor Werkpakket 2 - Framework of Analysis. Dit werkpakket heeft als doel om aan de hand van de literatuur en de eerste case studies een framework te ontwikkelen om lifecycle management (LCM) concreet handen en voeten te geven voor toepassing in de GWW-sector. Dit maakt het mogelijk cases en bevindingen te structureren, knowledge gaps te identificeren, en het is van belang voor het ontwikkelen van een algemene, generieke aanpak. Daarnaast dient het framework als ondersteuning voor de business case naar de baten van asset management voor de GWW-sector, omdat het duidelijk maakt op welke niveaus en voor welke stappen in de levenscyclus de bevindingen van de cases geldig zijn.

Dit rapport beschrijft de totstandkoming van de eerste versie van het framework. Dit framework is totstandgekomen door het probleem te beschouwen vanuit de assets, en niet zozeer vanuit het proces. Dit is van belang omdat processen per beheerder kunnen verschillen, hoewel de afweging inhoudelijk gezien vaak zeer vergelijkbaar zal zijn. Omdat ROBAMCI als doel heeft de gehele GWW-sector te bedienen is het logischer om het algemene framework inhoudelijk, vanuit de assets, in te steken. In vervolgfases van ROBAMCI kan de aansluiting met primaire processen van beheerders dan nader uitgewerkt worden. Het framework bestaat uit een framework voor lifecycle management, een model om in verschillende fasen van de levenscyclus de kwaliteit van informatie te toetsen op bruikbaarheid voor beslissingen en een blauwdruk voor een instrumentarium wat kan dienen als kwantitatieve ondersteuning van het framework. Versie 0 van het framework is gebaseerd op een inventarisatie van bestaande projecten, wetenschappelijke literatuur en beperkte ervaringen uit cases binnen ROBAMCI. In de vervolgfase van ROBAMCI zullen, aan de hand van ervaringen uit cases, het framework, informatiekwaliteitsmodel en instrumentarium verder worden doorontwikkeld.

1.3 Leeswijzer

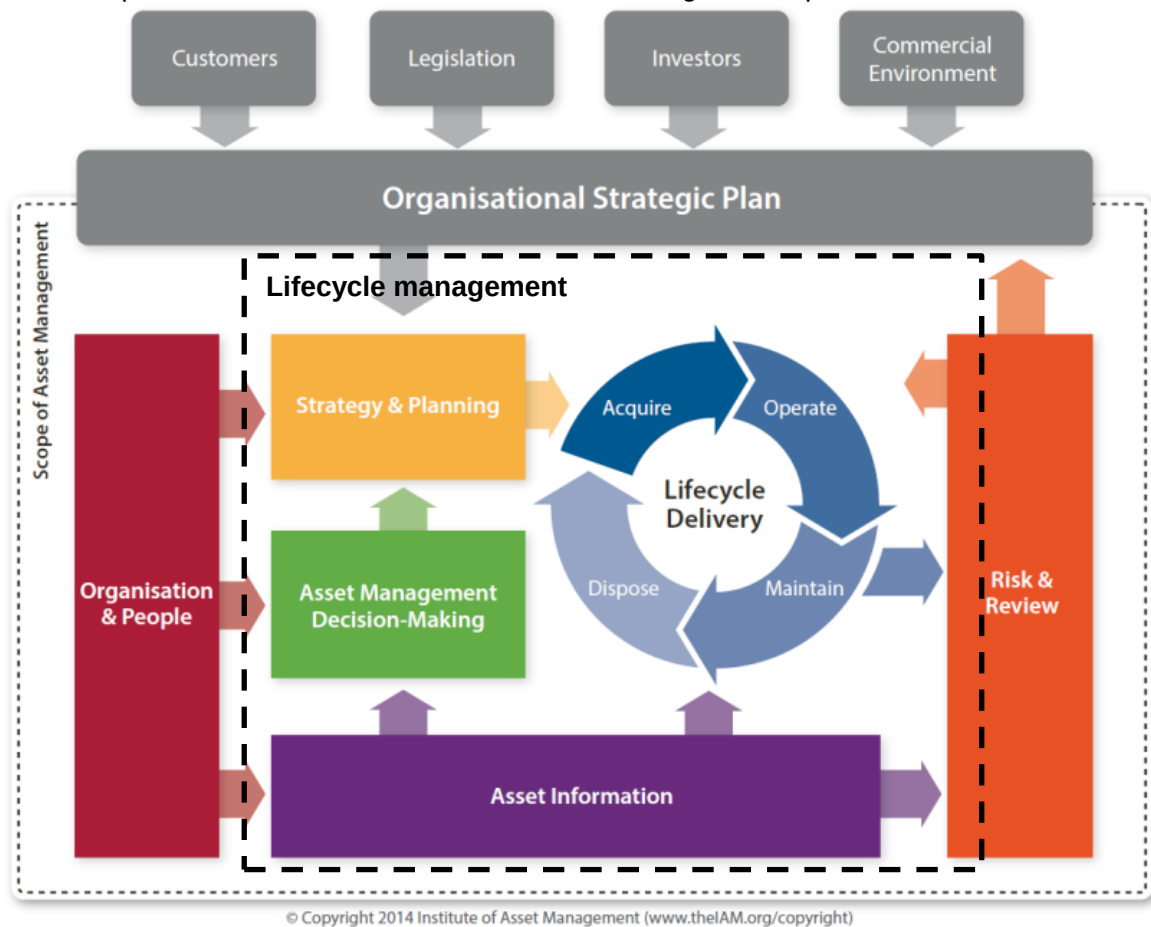
In dit rapport wordt allereerst kort de terminologie van lifecycle management toegelicht en de huidige state-of-the-art uit literatuur en praktijk besproken (Hoofdstuk 2). In Hoofdstuk 3 wordt een aantal afwegingen op basis van deze literatuur en ervaringen uit cases nader toegelicht,

wat resulteert in het framework in Hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 0 wordt dit aangevuld met het informatiekwaliteitsmodel. Hoofdstuk 6 behandelt de toepasbaarheid van het framework op de cases. In het rapport worden veel afkortingen gebruikt, in Hoofdstuk 9 is een lijst van gebruikte afkortingen gegeven.

2 Toepassingen van lifecycle management uit literatuur en praktijk

In dit hoofdstuk worden ervaringen met, technieken voor, en toepassingen van lifecycle management uit literatuur en praktijk besproken. In paragraaf 2.1 wordt een overzicht gegeven van veelgebruikte termen en hoe deze in dit rapport gebruikt worden. In paragraaf 2.2 worden de ISO-richtlijnen voor asset management besproken, paragraaf 2.3 behandelt de wetenschappelijke literatuur over lifecycle management, in paragraaf 2.4 wordt een aantal voorbeelden uit de praktijk besproken. Paragraaf 2.5 gaat meer in op de rol van data en informatie, waarvan blijkt dat deze voor lifecycle management zeer belangrijk is. In paragraaf 2.6 wordt afgesloten met discussie en conclusies.

In het algemeen is voor de opbouw van dit hoofdstuk uitgegaan van de onderstaande (in paragraaf 2.3.8 nader toegelichte) figuur. Beschouwde literatuur en praktijkervaring valt in principe binnen het zwarte kader. Hierbij is in de paragrafen 2.3 en 2.4 gefocust op de gele en groene blokken en de blauwe cyclus. In paragraaf 2.5 draait het vooral om het paarse blok 'Asset Information'. Opgemerkt dient te worden dat er dermate veel literatuur over het onderwerp is dat het hier een inventarisatie betreft, en geen compleet overzicht.



Figuur 2.1 Schema voor asset management volgens het Institute of Asset Management (The Institute of Asset Management, 2014)

2.1 Terminologie

In lifecycle management en gerelateerde vakgebieden is er een grote hoeveelheid terminologie die vanuit verschillende kanten verschillend wordt geïnterpreteerd. De belangrijkste term is *asset management*, wat gedefinieerd is als de 'gecoördineerde activiteit van een organisatie om waarde te realiseren uit haar assets'. Dit is een zeer algemene term aangezien vrijwel iedereen wel een of andere asset beheert. De kwaliteit van asset management is dus afhankelijk van de mate waarin de inspanning gecoördineerd is. Asset management kan gezien worden als de integratie en coördinatie van acties in de drie beslisniveaus in Figuur 2.2, voorheen werd Asset management ook wel *terotechnology* genoemd.

Risk-based asset management is een meer concrete toepassing van asset management. Waar asset management ook alle organisatorische aspecten van het gecoördineerd management van assets omvat heeft risk-based asset management een meer kwantitatieve focus: beslissingen worden gebaseerd op de risiconiveaus van assets. Ook risk-based asset management omvat alle drie de beslisniveaus.

Lifecycle management is het geïntegreerd managen van assets gedurende hun levenscyclus, van 'cradle-to-grave', de analyse hiervan wordt, met name in de productontwikkelingswereld ook wel *lifecycle assessment* genoemd, dit is vaak gericht op bijvoorbeeld milieueffecten tijdens de levensduur. Voor infrastructuur richten studies naar lifecycle management zich doorgaans op het beheren en in stand houden van bestaande assets, doorgaans is de gewenste functionaliteit dus al gedefinieerd. Lifecycle management focust zich dus met name op tactische en operationele beslisvraagstukken: hoe ontwerp, bouw, en beheer ik de gewenste of bestaande constructie optimaal en hoe kan ik de acties in de verschillende fasen van de levenscyclus op elkaar afstemmen. De optimalisatievraag wordt vaak onderbouwd met (*whole*) *life cycle costing* berekeningen, wat een methode is om kosten over een bepaalde tijdsspanne te vergelijken. Hieruit volgt vervolgens weer *life cycle cost management*, waarbij lifecycle management gestuurd wordt op basis van life cycle cost.

Een belangrijk onderdeel van lifecycle management is *onderhoud*, wat de inspanning omvat die geleverd wordt om de asset in stand te houden en te verzekeren dat deze zijn functie blijft vervullen. Er zijn verschillende typen onderhoud, zoals onderhoud gestuurd op risico of betrouwbaarheid en gepland en ongepland onderhoud.

In het vervolg van dit rapport worden bovenstaande definities gebruikt.



Figuur 2.2 Drie rollen in asset management volgens (TenneT, 2013)

2.2 ISO-richtlijnen voor asset management

2.2.1 Inleiding

In 2014 zijn de ISO55000, 55001 and 55002 richtlijnen met betrekking tot de eisen van asset management systemen en implementatie van asset management in organisaties gepubliceerd door de International Organization for Standardization (ISO) (ISO, 2014a, 2014b, 2014c). Deze vervangen de oude PAS55-richtlijnen en geven meer gedetailleerde richtlijnen dan de oude PAS55 (Van den Honert, Schoeman, & Vlok, 2013).

2.2.2 ISO55000: Overview, principles and terminology

In deze richtlijn worden de definities, doelen en potentiële baten van asset management toegelicht (ISO, 2014a). Genoemde baten zijn onder meer betere prestaties en meer inzicht in effecten en baten van gekozen strategieën. Er worden 4 fundamentele aspecten van asset management gedefinieerd, namelijk:

- Value: de waarde van assets voor eigenaar en/of stakeholders.
- Alignment: vertaling van organisatorische doelen naar beslissingen, plannen en activiteiten.
- Leadership: leiderschap en cultuur op de werkvloer, deze zijn bepalend voor realisatie van waarde.
- Assurance: het verkrijgen van zekerheid over de asset prestatie.

Tevens wordt opgemerkt dat niet alle asset management activiteiten binnen een asset management systematiek passen, aangezien vele organisatorisch van aard zijn.

Er valt een kritische noot te plaatsen bij de voor asset management gehanteerde definitie als de 'gecoördineerde activiteit van een organisatie om waarde te realiseren uit haar assets'. Dit is een tamelijk vage definitie aangezien er zonder bijvoorbeeld een kwantitatieve maat, vele verschillende interpretaties mogelijk zijn bij de term 'gecoördineerde activiteit'.

2.2.3 ISO 55001: Asset Management Systems - Requirements

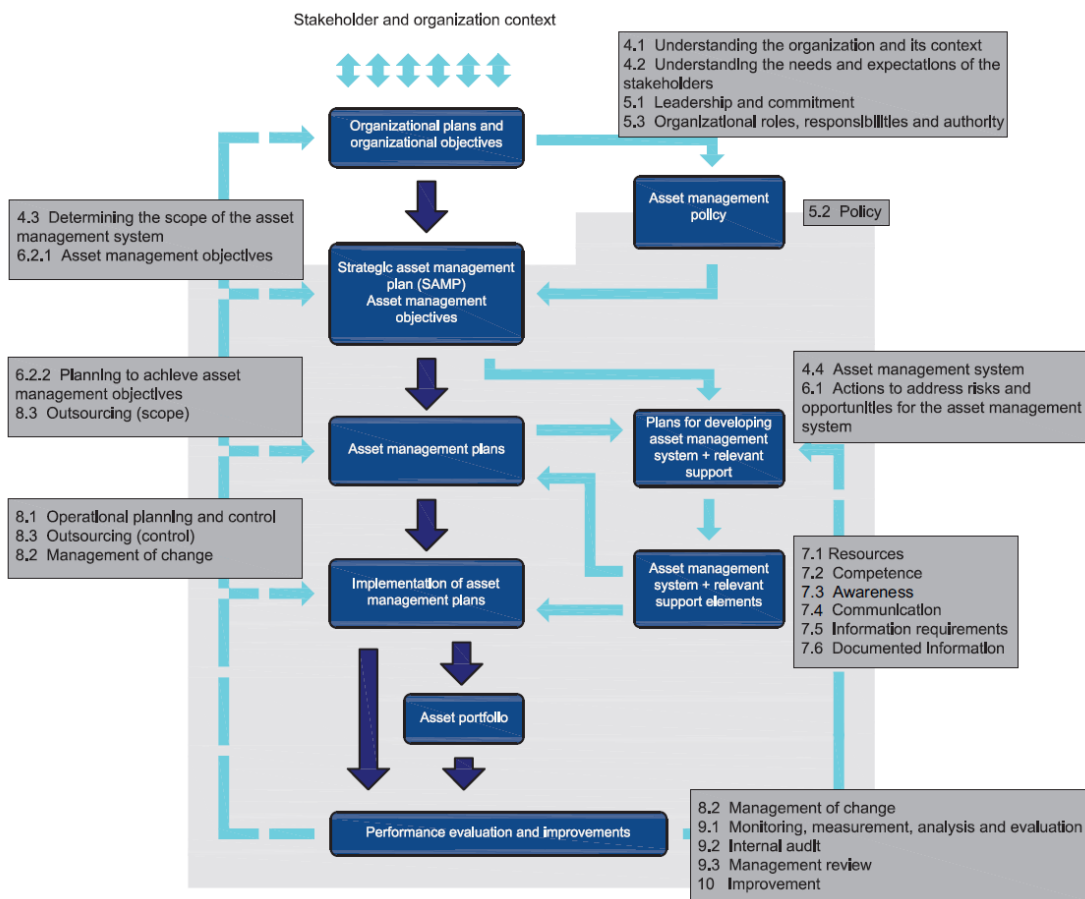
Dit deel van de norm specificeert eisen voor het opzetten, implementeren, onderhouden en verbeteren van management systemen voor asset management (ISO, 2014b).

Verschillende eisen worden benoemd:

- Context van de organisatie: voor een goed systeem is begrip van de organisatie en stakeholders nodig.
- Leiderschap: voor goede implementatie is er commitment van top management nodig.
- Planning: asset management doelen moeten overeenkomen met andere doelen in de organisatie, goed gepland worden in de tijd, met duidelijke verantwoordelijkheden.
- Ondersteuning: als een AMS wordt geïmplementeerd moeten benodigde middelen en benodigde competenties vrij gemaakt worden en beschikbaar zijn, naast duidelijke communicatie, duidelijke eisen aan informatie en bewustzijn binnen de organisatie.
- Gebruik: dit deel stelt richtlijnen voor hoe te plannen, werk uit te besteden en hoe intern te auditen.
- Verbetering: wanneer niet aan de eisen wordt voldaan moet dit gecorrigeerd worden en waar nodig dient het asset management systeem te worden aangepast.

Hoewel het te verwachten is bij een ISO-norm, die vrij algemeen horen te zijn, is ook deze richtlijn tamelijk algemeen en komt deze niet verder dan een aantal kwalitatieve duidingen van wat nodig is voor een asset management systeem. Bij termen als 'benodigd', 'duidelijk' blijft e.e.a. sterk in de proceskant van asset management hangen. Dit is deels ondervangen in ISO55002. Dit wordt ook duidelijk uit Figuur 2.3, een overzicht van wat een asset

management systeem inhoudt. Hieruit blijkt ook dat het sterk gericht is op het proces, en dat de analytische component slechts een kleine plaats inneemt.



Figuur 2.3 Schematische weergave van de opzet van een asset management system met daarbij de bijbehorende punten uit de ISO55001 norm (ISO, 2014b)

2.2.4 ISO55002: Guidelines for the application of ISO 55001

ISO55002 geeft concretere richtlijnen hoe asset management systemen uit ISO 55001 te implementeren (ISO, 2014c). Potentiele problemen en oplossingen daarvoor worden besproken, bijvoorbeeld hoe om te gaan met risico's volgens uit de implementatie van asset management en hoe om te gaan met het niet halen van de gestelde eisen.

2.3 LCM in de wetenschappelijke literatuur

2.3.1 Aanpak

In deze paragraaf wordt een literatuurstudie naar lifecycle management beschreven. Het lijkt geen twijfel dat deze literatuurstudie niet alle literatuur over dit onderwerp beschrijft, het begrip omvat immers nogal veel, en heel veel studies bestrijken minstens een deel van de lifecycle management cyclus en zijn dus relevant. Er zijn een aantal methoden gehanteerd om literatuur te vinden:

- Doorzoeken van referenties van het overzichtspaper van Frangopol & Soliman (2015a).
- Met behulp van Google Scholar doorzoeken van meest geciteerde papers in deze en daaraan gerelateerde papers. Daarnaast kijken naar andere relevante papers van veel geciteerde auteurs.

- Algemeen in Google Scholar zoeken op termen als “lifecycle management”, “asset management” en meer gericht bijvoorbeeld “lifecycle management flood defences”.

2.3.2 Algemene literatuur over asset en lifecycle management

In de literatuur is er een enorm scala aan literatuur met verschillende toepassingen beschikbaar. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van een greep uit de beschikbare literatuur. Hierbij moet opgemerkt worden dat onderzoek naar lifecycle en asset management zeer breed is qua inhoud en toepassing en daarnaast zeer diffuus qua terminologie, er zijn ook publicaties waarin asset management wordt besproken maar waar dit niet expliciet zo wordt benoemd.

Het boek van Campbell *et al* (2011) richt zich met name op onderhoud, en doet dat voor een fors aantal verschillende toepassingen, zie Figuur 2.4. Het boek bespreekt verschillende typen onderhoudsstrategieën, zoals reliability-centered en total productive maintenance. Een interessante vuistregel voor industriële toepassingen die wordt gegeven is onderstaande, deze vat het nut van lifecycle management goed samen:

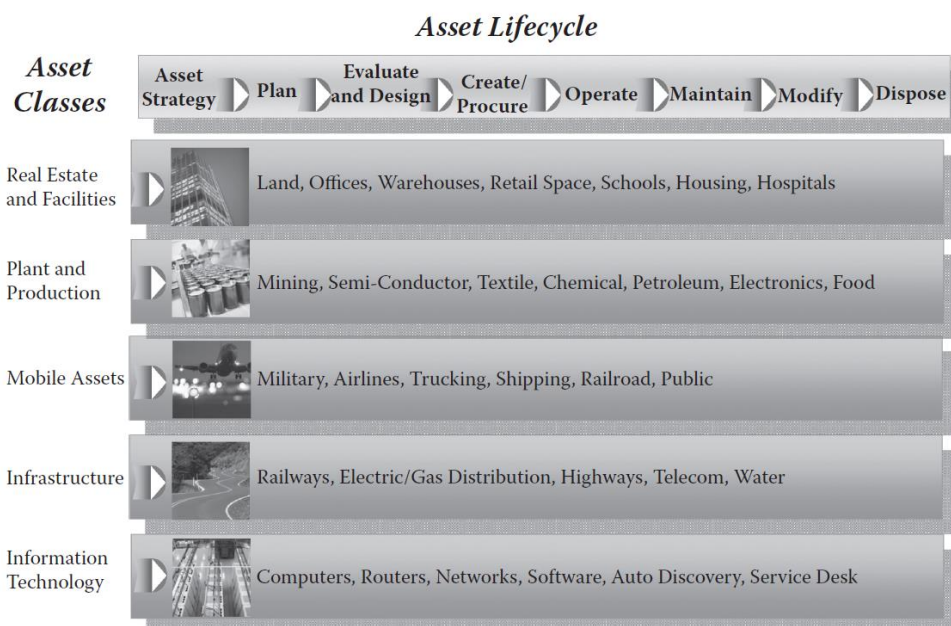
Here's a helpful rule of thumb to roughly estimate cost-saving potential in an industrial environment:

\$1 Predictive, Preventive, Planned = \$1.5 Unplanned, Unscheduled = \$3 Breakdown

Or: accomplishing “one unit” of maintenance effectiveness will cost:

- *\$1 in a planned fashion*
- *\$1.50 in an unplanned way*
- *\$3 if reacting to a breakdown.*

*In other words, you can **pay now**, or you can **pay more later**.*



Figuur 2.4 Asset klassen zoals behandeld door Campbell *et al*. 2011

Waar Campbell *et al* (2011) zeer breed is focussen Amadi-Echendu *et al* (2010) in het boek ‘Engineering Asset Management’ meer op de technische omgeving. Ook hier geldt echter dat

er in de verschillende toepassingen geen duidelijke rode draad zichtbaar is. Daarom wordt in eerste instantie in dit rapport gefocust op toepassingen voor industrie en infrastructuur.

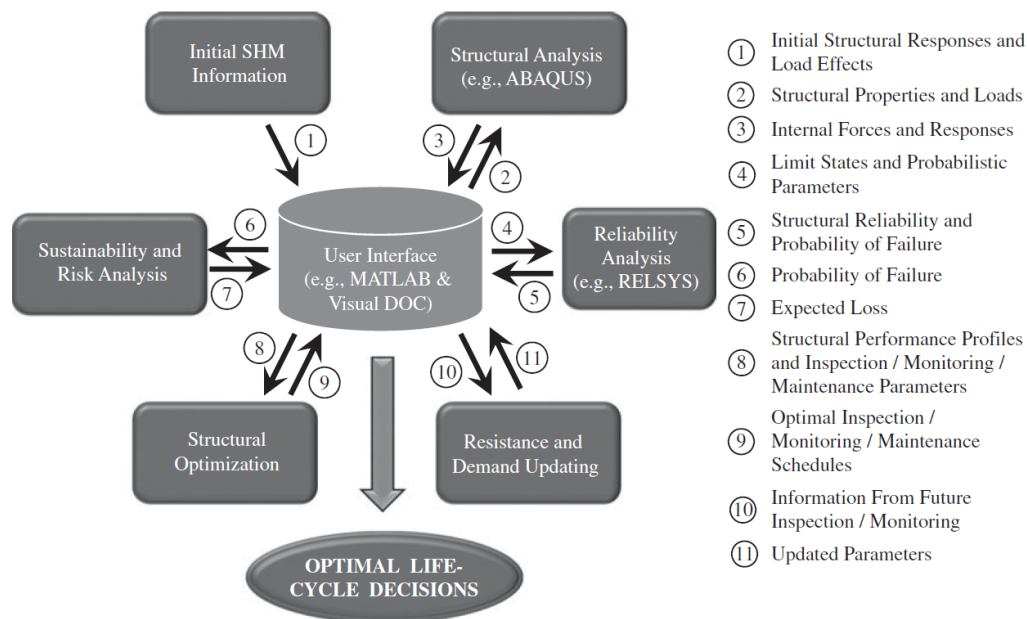
Een belangrijk element in vrijwel alle lifecycle management gerelateerde studie is lifecycle costing. Dit maakt het mogelijk om op basis van kosten verschillende strategieën voor lifecycle management te vergelijken. Verschillende boeken en papers zijn hierover geschreven, zoals door Woodward (1997). Toepassingen zijn ruimschoots beschikbaar in de literatuur. Bijvoorbeeld voor elektriciteit (Li, Peng, & Sun, 2014; Odeh & Cockerill, 2008), infrastructuur (Frangopol, Lin, & Estes, 1997; Furuta, Frangopol, & Nakatsu, 2011; Salem, AbouRizk, & Ariaratnam, 2003) en waterkeringen (Voortman & Vrijling, 2004).

In het algemeen is de literatuur louter positief over lifecycle management. Wat echter lijkt te ontbreken is een generieke tool of rekenmethode om, al is het maar voor een aantal sectoren op eenzelfde manier lifecycle management toe te passen. Er zijn uiteraard wel processchema's, maar er lijkt niet één tool of methode te zijn die voor meerdere toepassingen direct toepasbaar is, mogelijk door de asset-specifieke eigenschappen en eisen die iedere keer weer gelden en heel verschillend zijn.

Hoewel implementatie niet altijd makkelijk is zijn de benefits zeer groot. Vanier (2001) stelt bijvoorbeeld dat asset management zeer relevant is in Noord Amerika omdat uitgaven voor onderhoud en reparatie hoger zijn dan voor vernieuwing, waardoor het integraal kijken naar de levenscyclus veel voordeel op kan leveren. Een gerichte zoekactie op voorbeelden waar lifecycle management negatieve effecten had leverde geen resultaat op. Dit onderschrijft het nut ervan.

2.3.3 Lifecycle management voor bruggen en constructies

In het toepassingsgebied van de constructies wordt veel onderzoek gedaan naar gebruik en baten van 'structural health monitoring' (SHM). Frangopol and Soliman (2015) geven een goed overzicht van de huidige state-of-the-art op lifecycle management gebied. Verschillende prestatie-indicatoren worden gehanteerd: betrouwbaarheid, risico, robuustheid en redundantie (zie bijvoorbeeld: (Furuta et al., 2011; Saydam, Frangopol, & Dong, 2013). Prestatie-indicatoren zijn karakteristieke parameters waarmee een prestatie kan worden gemeten. In deze toepassing zijn ook zogeheten 'lifetime functions' een belangrijke indicator voor prestaties (Barone and Frangopol 2014). 'Lifetime functions' zijn gebaseerd op de kansdichtheid van de tijd tot falen en kunnen bijvoorbeeld de cumulatieve faalkans, 'survivor function' en (cumulatieve) 'hazard function' zijn. Resilience ('veerkracht') is ook een belangrijke prestatie-indicator en wordt beschreven als de capaciteit om gevaren te verminderen en te herstellen van een ramp. Toepassingen in netwerken van bruggen en ziekenhuizen worden onder meer genoemd.



Figuur 2.5 Computational framework voor lifecycle management onder onzekerheid, uit Frangopol & Soliman (2015a)

Een andere belangrijke prestatie-indicator is duurzaamheid, Padgett and Tapia (2013) geeft een aantal indicatoren waarmee dit in een lifecycle analyse kan worden meegenomen. Opgemerkt wordt dat een algemene manier om op basis van verschillend prestatie indicatoren objectief te evalueren nog ontbreekt.

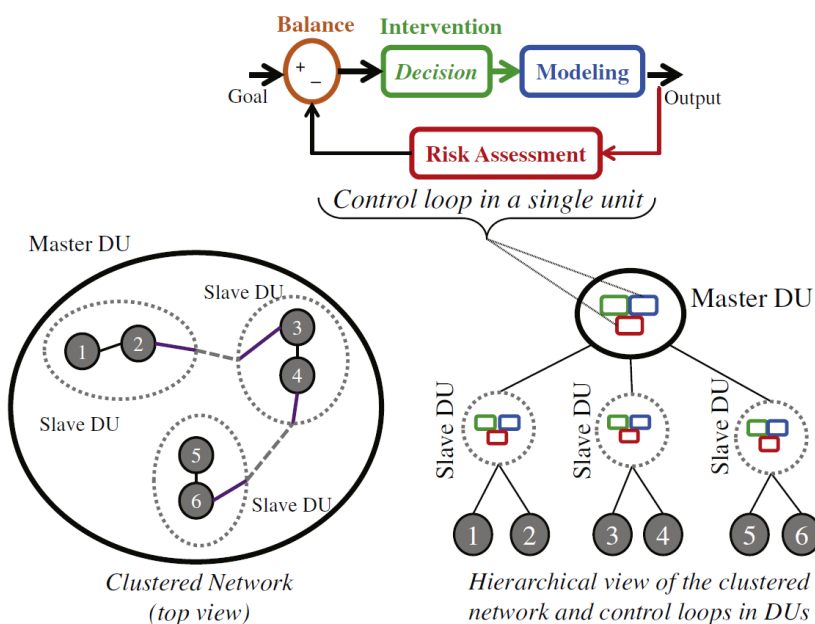
Frangopol and Soliman (2015) geven ook een overzicht van verschillende inspectie- en onderhoudsstrategieën en bespreken de state-of-the-art in het beschrijven van 'post-hazard functionality restoration', ofwel het herstel van functies na falen. Hierbij wordt opgemerkt dat er nog een stap gemaakt moet worden om dit daadwerkelijk in de praktijk bij managers te laten landen.

Kijkend naar de beslisniveaus waarop de verschillende publicaties op dit gebied focussen ligt dit vooral op operationeel en tactisch niveau. Studies naar enkele constructies hebben de overhand (Barone & Frangopol, 2014; Kumar & Gardoni, 2014; Okasha & Frangopol, 2010), hoewel ook netwerken enige aandacht krijgen (zie volgende paragraaf). Publicaties over strategische afwegingen zijn niet gevonden, dit is te verklaren omdat ontwerpbelastingen en bouwcodes voorgeschreven zijn in de Eurocode. Daarom is er weinig speelruimte en aanleiding om te kijken naar andere prestatie-eisen. In het algemeen is de kwantitatieve onderbouwing van lifecycle management voor bruggen en constructies vergesloerd met veel verschillende prestatie-indicatoren. Dit lijkt echter vooral in de academische context te blijven en de volgende stap is derhalve om de kennis om te zetten in beslissondersteunende tools, waarin verschillende prestatie-indicatoren samen kunnen worden afgewogen.

2.3.4 Lifecycle management van infrastructuursystemen

Ook voor systemen van constructies (bruggen, wegen, riolering) zijn verschillende studies naar lifecycle management gedaan. Highways Agency (2010) bestudeerde risico's van geotechnische assets (alle hellingen en andere aarde) in het Engelse snelwegennet. Zo kon men risicogebaseerd prioriteren, een typisch voorbeeld van tactisch asset management in een infrastructuurnetwerk. Gómez *et al* (2014) pasten een Complex Distributed Agent Network (CoDAN) framework toe op het management van snelwegen in Colombia. In dit

framework worden interacties tussen subsystemen (lokale managers) in een groter netwerk gesimuleerd. De managers van subsystemen (sub)optimaliseren hun eigen systeem en dit is verbonden aan het hogere netwerk niveau, dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.6. De 'Master DU' optimaliseert dus de netwerken van de 'Slave DU's' onderling. Deze methode kan bruikbaar zijn voor het simuleren van grotere netwerken en portfolio's van assets, met name op strategisch en/of tactisch niveau. In Piyatrapoomi *et al* (2004) worden op tactisch niveau strategieën voor risk-based asset management van snelwegen vergeleken.



Figuur 2.6 Opzet van het CoDAN framework zoals gebruikt in Gómez *et al.* (2014)

Op netwerkniveau is het onderzoek minder gedetailleerd uitgewerkt dan op objectniveau, dit is ook logisch door de extra complexiteit van de samenhang van objecten in een netwerk. Ontwikkeling op dit gebied is echter wel van belang gezien de toename van vervangingskosten in de toekomst (Alegre & Coelho, 2012; Burns, Hope, & Roorda, 1999), om daar meer grip op te krijgen is beter inzicht in gedrag van netwerken essentieel. De methode van Gómez *et al* (2014) zou hierin een goede stap kunnen zijn, hoewel praktische implementatie lastig blijkt (Alegre & Coelho, 2012; Frangopol *et al.*, 1997; Fuchs, Keuning, Mante, & Bakker, 2014).

Samengevat: lifecycle management voor netwerken is veel lastiger dan voor objecten door de vaak complexe interacties. In het begrip hiervan, en de methoden om dit te beschouwen is progressie. Implementatie in de praktijk lijkt nog verder weg.

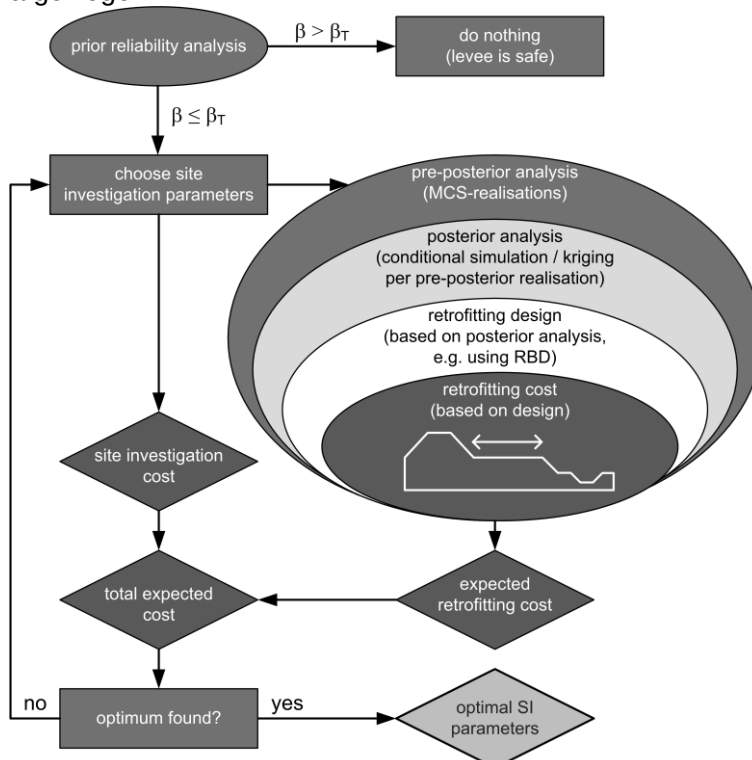
2.3.5 Lifecycle management van stedelijke infrastructuur

Ook binnen de stedelijke infrastructuur zijn ook voorbeelden te vinden van een netwerkbenadering. Alegre & Coelho (2012) bespreken het belang van asset management voor stedelijke waterinfrastructuur als riolering, gezien de vele systemen die kort na de Tweede Wereldoorlog zijn aangelegd en nu hun einde-levensduur naderen. (W. van Riel, van Bueren, Langeveld, Herder, & Clemens, 2015) onderzochten de rationaliteit van vervangingen van riolering. Ze concluderen dat de huidige modellen voor vervangingsbeslissingen de werkelijkheid slecht weergeven, omdat door een omgeving met meerdere actoren het beslisproces nogal onvoorspelbaar is. Daarentegen zijn modellen die hiervoor gebruikt worden vaak rationeel, het proces is dat dus niet. Daarentegen wordt wel

aangegeven dat verbeterde modellen het proces wel gestructureerder en rationeler kunnen maken. De bevindingen zijn begrijpelijk in het licht van (W. A. P. Van Riel, Langeveld, Herder, & Clemens, 2012), waar wordt gesteld dat het gebruik van informatie in het nemen van vervangingsbeslissingen zeer inefficiënt en ongestructureerd verloopt: “Instead of a product of probability and consequence, the risk is determined by ‘feeling times consequence’”. Het beter beoordelen van informatie in deze context zou een goede vervolgstap zijn, en dat krijgt handen en voeten in bijvoorbeeld Rokstad *et al* (2015). Dit sluit ook aan op de bevinding van (W. A. P. Van Riel, Langeveld, Herder, & Clemens, 2014) dat het voor beheerders lastig is om informatiebronnen te vergelijken en te beoordelen. Wanneer de beoordeling van informatie beter verloopt, zal waarschijnlijk het proces in deze context meer rationeel verlopen en dat geeft meer ruimte voor rationele modellen voor vervanging, bijvoorbeeld die van Rokstad and Ugarelli (2015). Deze kijken naar het optimaliseren van ingrepen in de ondergrondse infra door het koppelen van ingrepen. In de bestudeerde casus zijn de baten overigens gering (2,7%).

2.3.6 Lifecycle management voor waterkeringen

Op het gebied van waterkeringen is een behoorlijk scala aan zeer gefragmenteerde kennis beschikbaar. Van Noortwijk (1996) bespreekt verouderingsprocessen en modellen voor natte kunstwerken en dijken, en de relatie hiervan met onderhoud. Buijs *et al* (2009) en Speijker *et al* (2000) beschouwen tijdsafhankelijke processen van dijkveiligheid en de relatie met onderhoud. Structural health monitoring van dijken is ook bestudeerd, hoewel praktische toepassing nog relatief beperkt is, zeker in de context van lifecycle management (Schweckendiek & Calle, 2013; Schweckendiek, 2014). In Schweckendiek (2014) worden de baten van verschillende methoden van grondonderzoek en monitoring geanalyseerd. Het framework weergegeven in Figuur 2.7 is bijvoorbeeld gebruikt voor het bepalen van optimale strategieën voor grondonderzoek. Het is gebaseerd op een Bayesiaanse pre-posterior analyse waarmee de baten van grondonderzoeksstrategieën op voorhand kunnen worden afgewogen.



Figuur 2.7 Framework voor het analyseren en optimaliseren van strategieën voor grondonderzoek
(Schweckendiek, 2014)

In het algemeen is de toepassing van SHM bij waterkeringen nog relatief beperkt, hoewel de laatste jaren grote stappen voorwaarts worden genomen. Lifecycle costing is toegepast bij waterkeringen, bijvoorbeeld door Voortman and Vrijling (2004), voor dijkversterkingsprojecten binnen het HWBP is een LCC-analyse zelfs verplicht en een belangrijk toetscriterium. Daarnaast komt er een levenscyclus gedachte terug in de definitie van de nieuwe waterveiligheidsnormen voor Nederland, die zijn gebaseerd op een kosten-baten analyse (Kind, 2014). Over het algemeen lijkt echter, hoewel veel elementen aanwezig zijn, dat de kennis tamelijk gefragmenteerd is. Er zijn, voor zover bekend, geen analyses waarbij analyses van veroudering, monitoring en life cycle cost zijn gecombineerd. Een eerste aanzet hiervoor is gegeven in Klerk et al (2015).

Een ietwat andere toepassing wordt gemaakt door Ten Veldhuis and Clemens (2011), zij bestuderen reductie van stedelijk overstromingsrisico (met name door overstromingen van riolering) gebaseerd op asset management strategieën. Op basis van data van call centers bepalen zij wat de meest effectieve strategie voor risicoreductie is. Uit de studie blijkt dat het verstoppen van de hoofdriolering niet opgelost kan worden door capaciteitsvergroting, aangezien tekort aan capaciteit niet de voornaamste reden van riooloverstromingen was, maar bijvoorbeeld blokkades in zijaansluitingen vaker problemen veroorzaken. Hieruit blijkt dat wanneer enkel naar het netwerk van hoofdleidingen wordt gekeken, problemen en oplossingen niet inzichtelijk kunnen worden gemaakt. Hieruit blijkt het belang van het goed definiëren van de grenzen van het netwerk.

In het algemeen kan in flood risk management, door de risico-gebaseerde achtergrond van bijvoorbeeld de veiligheidsnormen gesteld worden dat de mogelijkheden voor life cycle management zeer groot zijn. Een aantal van de hierboven genoemde studies tonen dit ook (op deelaspecten) aan. De integratie van de verschillende onderwerpen mist echter nog, en de lifecycle aanpak is nog niet zo gestructureerd als bijvoorbeeld bij bruggen (zie paragraaf 2.3.3). De potentie voor lifecycle management is echter zeer groot en kan dienen om de baten van technieken als monitoring, die nu lastig in te schatten zijn en veelal gebaseerd zijn op expert judgment, meer expliciet te maken.

2.3.7 Lifecycle management in energie en industrie

Lifecycle management in de energie sector is vaak gericht op de milieubelasting van energiebronnen (Matos & Hall, 2007). Odeh and Cockerill (2008) onderzochten de Lifecycle Emission voor kolencentrales, en analyseerden welke technieken geschikt zijn om dit te reduceren. Li et al (2014) onderzochten de lange termijn kosten van windenergie en vergeleken dit met conventionele energiebronnen. Hun conclusie is dat het onwaarschijnlijk is dat op basis van lifecycle cost windenergie de belangrijkste energiebron wordt. Het meest opvallende aan de analyses bij dit onderwerp is de focus op emissie en omgeving, die duidelijk een voorname rol spelen in de energiesector. Voor andere toepassingen kan hieruit geleerd worden dat monetaire kosten niet altijd leidend hoeven te zijn, maar dat ook andere prestatie-indicatoren in een lifecycle context kunnen worden geplaatst en kunnen worden gebruikt voor het maken van een afweging.

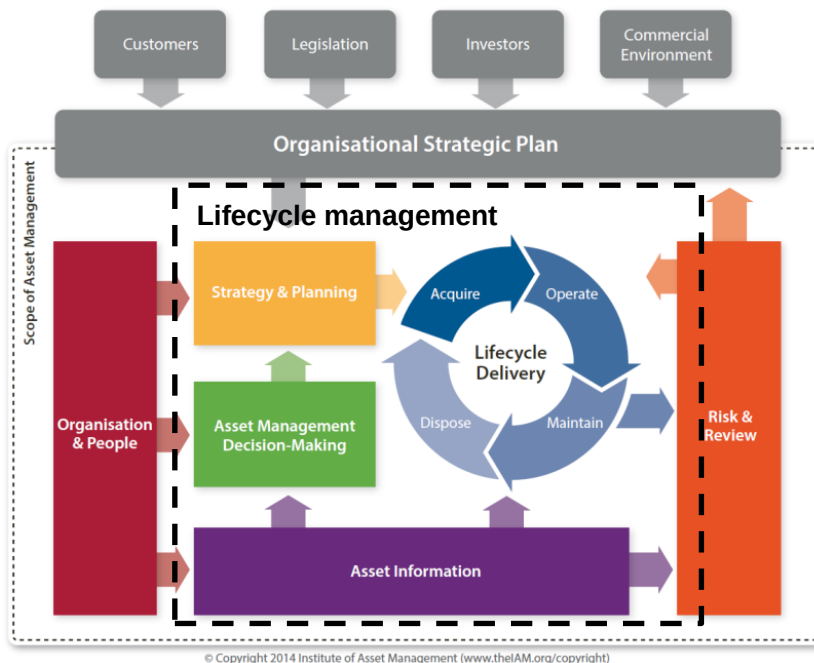
Voor industrie is de IPOP een tool voor het optimaal plannen van investeringen in industriële portfolio's (Lonchampt & Fessart, 2012). De tool maakt het mogelijk om vervanging van de belangrijkste componenten in een industrieel system, maar ook meer strategische beslissingen als de totale capaciteit van een groep kerncentrales te plannen en managen. De

tool is geïntegreerd in de ICLM suite van EPRI en is ontwikkeld door Electricité de France (EDF).

Op een meer operationeel niveau geven Jardine et al (2006) een uitgebreid overzicht van voortgang op het gebied van condition based maintenance voor machines, bijvoorbeeld in energiecentrales. Het paper bespreekt wat te monitoren, hoe te monitoren, hoe monitoringsdata te combineren en hoe op basis hiervan de conditie vast te stellen. Het geeft een uitgebreid overzicht van de voortgang op het gebied van condition based maintenance. Het stelt dat, terwijl doorgaans run-to-failure of as-frequent-as-possible de meest gebruikelijke onderhoudsstrategieën zijn, maar dat condition-based maintenance een veel beter alternatief is. Hierbij moet in acht worden genomen dat dit in 2006 geschreven werd, en dat inmiddels, 9 jaar verder, condition-based maintenance terrein lijkt te hebben gewonnen. Een andere kanttekening die gemaakt moet worden is dat het lifecycle management voor industrie vaak heel ver gevorderd is. Over systemen van grote industriële bedrijven wordt echter doorgaans niet gepubliceerd. Daardoor zal deze paragraaf verre van compleet zijn.

2.3.8 Lifecycle management volgens het Institute of Asset Management

Het Institute of Asset Management (IAM) is een non-profit platform wat kennis en toepassing van asset management probeert te bevorderen. In het rapport "Asset Management - an anatomy" wordt een algemeen overzicht gegeven van wat asset management is, wat het nut is en hoe het gebruikt kan worden. Het richt zich op Asset management in het algemeen, maar daarin vervult de lifecycle van assets uiteraard een belangrijke rol. Asset management wordt toegelicht aan de hand van het schema in Figuur 2.8. In de grijze vlakken bovenin worden externe (niet asset management) invloeden weergegeven. Het rode vlak links betreft de organisatie waarbinnen asset management wordt uitgevoerd, het paarse vlak onder de beschikbare informatie en hoe deze georganiseerd wordt en rechts vindt de evaluatie en risicoanalyse plaats die terugkoppelt naar zowel de gehanteerde aanpak als het algemene plan van de organisatie. Het centrale deel van de figuur is het belangrijkste vanuit een lifecycle management perspectief. Het gele en groene vlak gaan hand in hand en voeden het dagelijks beheer, weergegeven als de blauwe cyclus. Binnen het groene vlak worden beslissingen genomen die, aan de hand van scenario's worden uitgewerkt in het gele vlak en vervolgens uitgevoerd in de blauwe cyclus.



Figuur 2.8 Schema voor asset management volgens het Institute of Asset Management (The Institute of Asset Management, 2014)

Omdat de grijze vlakken en ook het rode vlak met name draaien om de randvoorwaarden voor lifecycle management vindt lifecycle management met name plaats binnen het aangegeven kader in de figuur. Hierin wordt een proces geschetst waarbinnen het georganiseerd kan worden. Omdat binnen ROBAMCI met name gekeken wordt naar het proces an sich, en niet zozeer naar hoe dit in een organisatie te passen is het IAM-schema weliswaar zeer bruikbaar maar niet geheel toepasselijk.

2.4 Toepassingen van LCM uit de dagelijkse praktijk in Nederland en daar buiten

2.4.1 Lifecycle management bij verschillende organisaties in de Nederlandse infrastructuursector

Rijkswaterstaat

Deze paragraaf is deels gebaseerd op literatuur en deels op een interview met Han Roebbers en Jaap Bakker, afdelingshoofd respectievelijk senior adviseur bij de afdeling Instandhouding, Constructies en Onderhoud van Rijkswaterstaat (W.J. Klerk, 2015).

Binnen Rijkswaterstaat wordt veel energie gestoken in het implementeren van lifecycle management in de hele breedte van de organisatie. Sinds 2006 wordt gewerkt aan implementatie van Life Cycle Cost Management, wat nu meer en meer binnen de organisatie wordt gebruikt. Doel is om LCCM uit te breiden naar LCM, waar lifecycle kosten, risico en prestatie als indicatoren worden gebruikt. Binnen Rijkswaterstaat is nog niet iedere afdeling even ver met de implementatie hiervan, wat niet onlogisch is gezien de praktische uitdagingen die ook uit de literatuur in paragraaf 2.3 al naar voren kwamen. Omdat er snel de neiging is vanuit eigen perspectief en modellen naar problemen te kijken wordt vaak de bredere (lifecycle) context uit het oog verloren. Daarom ook de focus op het implementeren van een algemeen raamwerk met drie indicatoren.

Om het denkkader te verbreden is Value Engineering ingevoerd. Hierbij worden mensen uit verschillende fasen van een project samengebracht om te kijken of wensen realiseerbaar zijn en worden deze afgestemd.

Figure 2.9 illustreert dit. De schatting is dat Value Engineering een efficiëntiewinst van ongeveer 10% realiseert. Omdat dit echter vaak achteraf gebeurt is het in feite een reparatie

van het niet direct vanuit een lifecycle management perspectief te werk gaan. Dan zou Value Engineering immers niet nodig zijn omdat alle fasen al in samenhang beschouwd zijn.

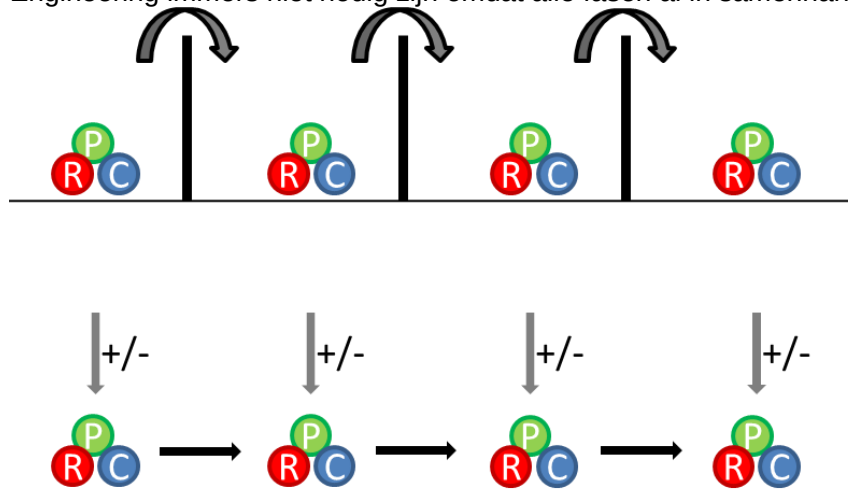
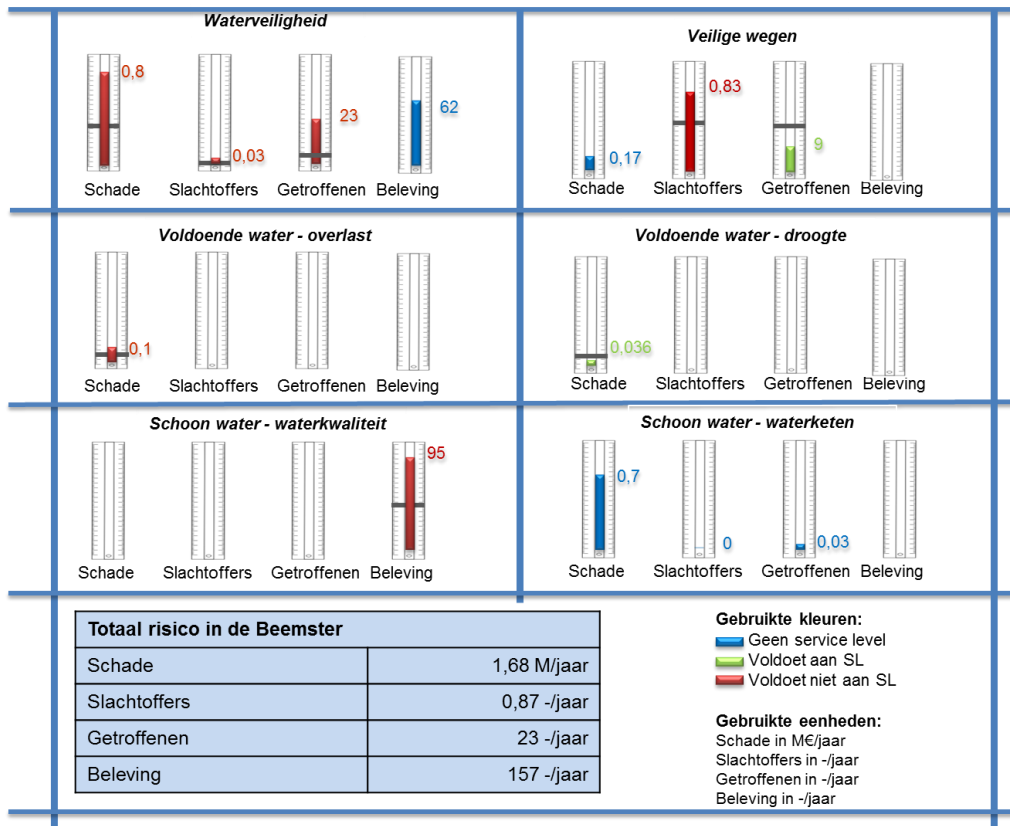


Figure 2.9 Het principe van Value Engineering. In het bovenste geval is geen Value Engineering toegepast en wordt in iedere fase gekeken wat het beste is. In het onderste geval zorgt Value Engineering voor een veel betere onderlinge afstemming van de fasen in het project.

Er zijn een aantal succesverhalen van een lifecycle approach bij Rijkswaterstaat. Een voorbeeld is de golfbreker bij IJmuiden. Deze was afgekeurd en moest verbeterd worden, maar door ervaringen uit de beheersfase werd besloten eerst te monitoren. Hierdoor werd 65% van de vooraf geschatte kosten bespaard (150-200 miljoen € totaal), omdat het gedrag van de golfbreker beter bekend was (de Baar & Schravendeel, 2013). Dit is echter een uitschieter, de schatting is dat een efficiëntiewinst van 20% wel haalbaar is. Overigens worden succesverhalen vaak niet gecommuniceerd, omdat dit vaak leidt tot budgetverlaging. In principe is het echter ook geen kostenbesparing maar een toename van de prestatie. Het geld kan immers in andere urgente projecten van de beheerder worden gestoken.

Waterschappen

Asset management is een van de speerpunten van veel waterschappen. Dit richt zich vaak op het inrichten van de organisatie zodat asset management daarin past, kwantitatieve invullen gebeurt over het algemeen enkel nog op operationeel niveau. Als voorbeeld het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, waar meerdere studies naar asset management zijn uitgevoerd. Zo heeft het Cluster Beheer Waterketen asset management geïmplementeerd op een operationeel niveau, ook voor waterkeringen lopen dergelijke acties. Deltares heeft twee fasen van een studie naar vergelijkbaarheid van functies op strategisch niveau uitgevoerd, gebruikmakend van een set universele Key Performance Indicators (Den Heijer & IJmker, 2013; W.J. Klerk, van Veen, & den Heijer, 2015). De conclusie hiervan is dat het met KPI's mogelijk is verschillende functies, bijvoorbeeld waterkwaliteit, waterveiligheid en verkeersveiligheid te vergelijken. Belangrijk is ook dat dit op basis van beschikbare data al aardig mogelijk is. Figuur 2.10 toont het resultaat voor de Beemster. In een mogelijke volgende fase kan dit vertaald worden naar hoofdstrategieën voor het verbeteren of instandhouden van verschillende functies. Zo kunnen waterschappen functies die vaak afzonderlijk worden beschouwd op een inzichtelijke manier toch vergelijken. Andere studies naar kwantitatief asset management op strategisch niveau zijn echter (bij de auteurs) niet bekend.



Figuur 2.10 Overzicht voor prestaties en risico's voor functies in de Beemster. Niet alle functies zijn uitgedrukt in alle KPI's, maar ook op basis van enkel bestaande data is er een beeld verkregen van prestaties voor verschillende functies (Klerk et al. 2015).

ProRail

ProRail beheert het overgrote deel van de Nederlandse spoorinfra. Asset management wordt gebruikt in management en vooral in onderhoudscontracten met onderaannemers, met als doel om deze meer efficiënt in te vullen. Met onder meer prestatiecontracten is een kostenbesparing op bijvoorbeeld wissels van ongeveer 15 a 20 % gerealiseerd. Voor introductie van prestatiecontracten waren onderhoudskosten met een factor 2,5 gestegen. De huidige aanpak heeft echter ook nadelen, aangezien het grootste deel van de kennis van de infrastructuur nu bij onderaannemers zit. Daarnaast hebben onderaannemers geen baten van het investeren in ingrepen die goed zijn op lange termijn, maar niet perse gedurende het contract. In het algemeen zijn de baten van asset management voor railinfra echter duidelijk: de kosten zijn gedaald, en de beschikbaarheid is toegenomen.

TenneT: asset management voor elektriciteitsnetwerken

TenneT is een van de grote netbeheerders in Europa en beheert het grootste deel van het elektriciteitsnet in Nederland en Duitsland (TenneT, 2013). Met de implementatie van asset management, en het optimaliseren van hun portfolio op asset- en netwerkniveau, op basis van risico en kosten hebben ze 200 miljoen euro aan investeringen op 'low-risk activities' kunnen besparen.

Uiteraard is het bovenstaande overzicht slechts een bloemlezing. Ook bij drinkwaterbedrijven als Evides, rioolwaterzuiveringen als Delfluent, andere waterschappen, netbeheerders,

wegbeheerders en in de industrie wordt asset management als speerpunt gezien. Het voert echter te ver om deze hier allemaal te benoemen.

2.4.2 Projecten gerelateerd aan lifecycle management

In deze paragraaf worden vier relevante lifecycle management (gerelateerde) projecten kort beschreven.

VONK

Rijkswaterstaat beheert 650 waterbouwkundige constructies in het hoofdvaarwegen- en hoofdwatersysteem in Nederland. Omdat veel van deze constructies het einde van hun levensduur naderen zullen vervangingskosten hard oplopen in de komende jaren. VONK ('Vervangingsopgave Natte Kunstwerken') is een systematische aanpak om de opgave van de vervanging te bepalen. Er zijn twee hoofdproducten voorzien:

- Gevoeligheidstest Natte Kunstwerken: Deze test maakt end-of-life time bepalingen voor constructies mogelijk, voor zowel technische als functionele levensduur.
- Integrale en systeemgebaseerde aanpak: In VONK worden constructies ook in samenhang met de omgeving beschouwd. Bekeken wordt wat nodig is om functieniveaus te behouden.

VONK richt zich met name op de omvang van de opgave, maar nog niet specifiek op hoe dit vanuit een lifecycle benadering uit te gaan voeren. Dat zou een volgende stap kunnen zijn.

Risico Inventarisatie Natte Kunstwerken (RINK)

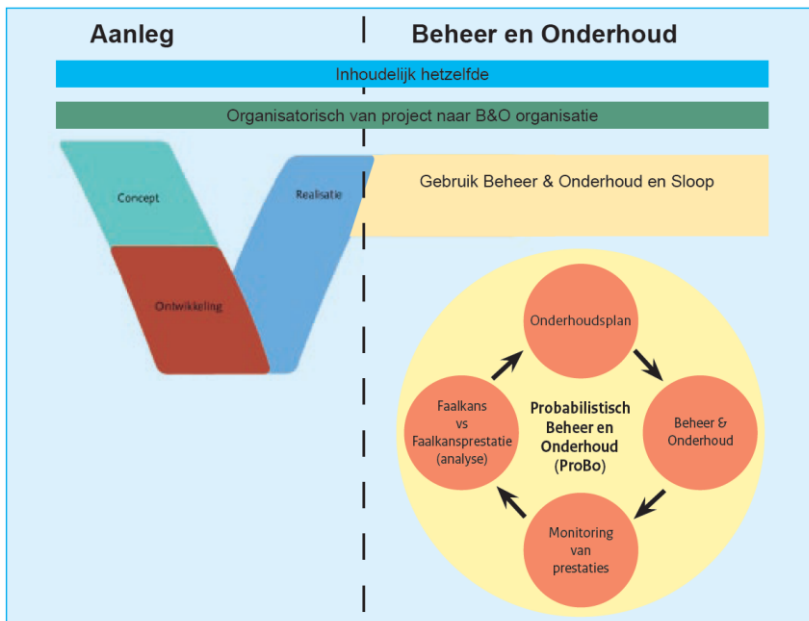
Doel van dit project was om risico's van natte kunstwerken te bepalen vanuit de RAMS-systematiek (betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid, veiligheid) (Rijkswaterstaat, 2010). Binnen het project waren twee sporen:

- Inspectie en analyse: wat is de huidige prestatie in RAMS-criteria
- Maatregelen: het vertalen van objectprestatie naar corridorprestatie (prestatie in een netwerk van kunstwerken) en verschillende beheersstrategieën met maatregelen en kosten.

RINK werd begin 2014 afgerond.

ProBO

Rijkswaterstaat beheert stormvloedkeringen aan de hand van de Leidraad Risicogestuurd Beheer en Onderhoud (Rijkswaterstaat, 2011), ook bekend als probabilistisch beheer & onderhoud (ProBO). Meer informatie kan worden gevonden in de Leidraad Risicogestuurd Beheer en Onderhoud. Figuur 2.11 geeft de plaats van ProBO in de levenscyclus weer.



Figuur 2.11 Positionering van ProBo in de cyclus van aanleg, beheer en onderhoud (Rijkswaterstaat, 2011).

Programma Vervanging & Renovatie (V&R)

Het programma V&R is een programma waar objecten worden geselecteerd voor vervanging of renovatie. Op basis van inspectie en analyse van het hele portfolio worden ze geselecteerd. Na selectie worden de volgende vragen beantwoord:

- Welke oplossingen zijn mogelijk per object, wat is het technische probleem, de lifecycle cost en de invloed op de omgeving?
- Wat is het effect van het bereiken van de end-of-life time van het object op de functie van het network, nu en in de toekomst?
- Wordt het object in het V&R of MIRT programma opgenomen?
- Kan gecombineerd worden met andere onderhouds- en bouwprojecten?

Naast het beschreven onderzoeksdeel bestaat het V&R-programma ook uit twee uitvoeringsprogramma's.

2.4.3 Voorbeelden uit het buitenland

Verenigde Staten

In 2014 hebben ENO Center for Transportation en de American Society of Civil Engineers een rapport uitgebracht gericht op toepassingen van lifecycle costing toepassingen in de Verenigde Staten. Een aantal voorbeelden van toepassingen op verschillende schalen (lokaal, regionaal) worden hieronder benoemd:

- Pennsylvania Department of Transportation: Het Pennsylvania Dept. of Transportations geeft ongeveer 4 miljard USD per jaar uit aan beheer en verbetering van het wegennetwerk in de staat Pennsylvania. Voor snelweg projecten met kosten boven de 1 miljoen USD en andere projecten met kosten boven 10 miljoen is Life Cycle Costing gebruikt (15-20 projecten per jaar). Dit heeft in de afgelopen 30 jaar 30 M\$ gescheeld. Dit is niet veel, maar dit valt te verklaren aangezien LCC enkel is gebruikt voor het optimaliseren van ontwerpen, niet voor het prioriteren van projecten. De toepassing is dus zeer gelimiteerd. Overigens is het belangrijkste effect wat gesignaleerd wordt niet de kostenbesparing maar de grote kwaliteitsverbetering van de weg.
- Metropolitan Transportation Commission (San Francisco Bay Area): De MTC gebruikt ook LCCA om projecten te evalueren. Een voorbeeld van toepassing is het niet uitvoeren van een project ter waarde van 200 miljoen US\$, omdat de lifecycle kosten niet opwogen tegen de baten.
- Port Authority of New York and New Jersey: Voor de PANYNJ zijn er een aantal zeer concrete voorbeelden van kostenbesparingen. Als eerste de JFK Airport Bay Runway, waar, door het gebruik van LCCA 140 miljoen US\$ werden bespaard over een periode van 40 jaar. Tweede voorbeeld is de reparatie van de George Washington Bridge, waar 100 miljoen US\$ werden bespaard over een periode van 20 jaar. Door het gebruik van een generieke methode voor LCCA bij PANYNJ, kosten van ontwikkeling 67.000 US\$, is een besparing gerealiseerd van circa 37 miljoen US\$ op lopende projecten. Dit laat zien dat een gestructureerde methode niet duur hoeft te zijn maar veel voordeel kan bieden.
- Denver Regional Transit District (RTD): Een ander voorbeeld van de baten van LCCA is het Denver Eagle P3 project, en nieuwe spoorlijn van 50 kilometer. Door gebruik van een op LCCA gebaseerd lange termijn contract werd een kostenbesparing van 30 miljoen US\$ gerealiseerd, ongeveer 10% van de totale kosten.

Australië

In het artikel 'Buried Riches', uit het 'Assets' magazine van The Institute of Asset Management wordt een voorbeeld van lifecycle management van een zinkmijn in Australië aangehaald. De mijninfrastructuur naderde zijn einde levensduur. Door analyse van de faalgegevens van componenten en het optimaliseren van de onderhoudsstrategie hierop zodat belangrijke componenten niet zouden falen voor het einde van de levensduur van de mijn als geheel. Over het geheel gezien, met alle aanpassingen die gedaan werden, werd een lifecycle cost besparing van 17% gerealiseerd.

2.4.4 Conclusie

Asset management en een lifecycle benadering zijn inmiddels qua onderwerp gemeengoed in de infrastructuursector. Implementatie hiervan in het dagelijks werk gaat langzaam, een van de redenen is dat niet altijd even duidelijk is wat de baten zijn en dat het veel tijd en energie kost om organisaties hierop in te richten. Belangrijk onderdeel hiervan is het afstemmen van

fasen in de levenscyclus, waarbij het delen van de juiste informatie op de juiste manier een belangrijke factor is. Vanuit de literatuur zijn er verschillende methoden beschikbaar, maar een coherente samenhang, over de verschillende asset typen is nog weinig concreet ingevuld. Toch zijn er voldoende voorbeelden van toepassingen die voor iedere organisatie een sterke drijfveer zouden moeten zijn om meer vanuit een lifecycle management gedachte te gaan werken. Showcases van het nut van lifecycle management kunnen naast het genereren van inhoudelijke kennis ook inzicht geven in de baten van LCM, wat draagvlak kan vergroten.

2.5 De rol van data en informatie in lifecycle management

Uit eerdere paragrafen blijkt dat data en informatie een centrale rol spelen bij lifecycle management. Om dit iets verder uit te werken is in deze paragraaf gekeken naar de rol van data en informatie bij waterkeringen.

STOWA werkt sinds een aantal jaren aan het programma Professionalisering Inspecties Waterkeringen (voorheen Verbetering Inspecties Waterkeringen geheten). In dit programma wordt voor verschillende niveaus (strategisch, tactisch, operationeel) beschreven welke informatie gevraagd wordt door verschillende organisatieniveaus (bestuur, management, beheer/inspectie).

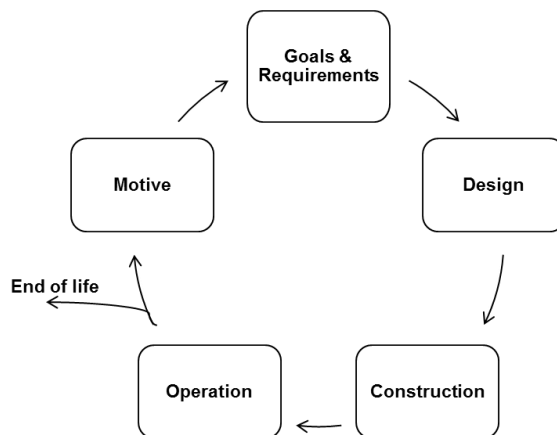
Een waterschapsbestuur neemt als eindverantwoordelijke beslissingen op strategisch niveau. Het management vertaalt dit naar tactische plannen om de strategische doelen te halen. De uitvoering van het beheer is een taak van de beheerafdeling, waarvoor tactische beheerdoelen vertaald worden naar operationele doelstellingen (Bakkenist, van Dam, van der Nat, Thijs, & de Vries, 2012)

De uitwerking van deze doelen beïnvloeden elkaar onderling. Het management bewaakt de onderlinge relatie tussen de verschillende doelstellingen. Opgeroepen wordt om de doelstellingen meetbaar te formuleren en te relateren aan de organisatieprocessen en – aspecten. Aan de meetbaarheid wordt voldaan door indicatoren te formuleren die worden gebruikt om prestaties aan te toetsen en het al dan niet hieraan voldoen te vermelden in rapportages. Op deze wijze wordt het beheerproces van waterkeringen in concrete en gekwantificeerde parameters gevat (Bakkenist et al., 2012)

Inspecties vormen de primaire bron van data en informatie van het beheerproces van waterkeringen. Door het vertalen van de data die verkregen wordt tijdens inspecties van waterkeringen wordt informatie verkregen voor het operationele niveau. De informatie van het operationele niveau vormt de data voor het tactisch niveau, enzovoorts.

Het verzamelen van data in het veld middels verschillende vormen van inspecties start reeds op het moment dat het idee ontstaat om infrastructuur te realiseren. In iedere fase van de levenscyclus van de infrastructuur vindt dit plaats en iedere fase stelt zijn eigen eisen aan de in te winnen data en informatie. Idealiter wordt in iedere levensfase eerst bepaald of alle benodigde data en informatie is verkregen en goed is opgeslagen voordat de volgende levensfase begint (Boussabaine & Kirkham, 2004). Alle verzamelde data en informatie wordt idealiter zorgvuldig opgeslagen en voor toekomstig gebruik zeker gesteld zodat nieuwe informatie steeds inzicht kan opleveren in de ontwikkelingen in de staat van de beschouwde infrastructuur. Hiermee worden voorspellingen gedaan van verwachte ontwikkelingen, resterende levensduur, noodzaak voor onderhoud, etc. (Bakkenist et al., 2012; Boussabaine & Kirkham, 2004; Sarja, 2006). Door data en informatie steeds op te slaan wordt parallel aan de levenscyclus van infrastructuur (Figuur 2.12) een data- en informatiecyclus doorlopen. Het aantal keren dat deze cyclus wordt doorlopen is niet bekend, maar start bij de eerste

motivatie-fase en eindigt wanneer de beschouwde infrastructuur wordt gesloopt. Als de infrastructuur wordt gesloopt is het van belang ook dan de data en informatie te bewaren zodat opgedane ervaring bewaard blijft en nuttig gebruikt kan worden.



Figuur 2.12 Verschillende fasen in de levenscyclus

De Commissie ten Heuvelhof adviseerde in 2010 het gebruik van lifecycle costing methoden voor de hoogwaterbescherming. Uitgebreide literatuurstudie bracht aan het licht dat life cycle costing en management methoden in verschillende sectoren van de civiele techniek worden toegepast, maar nog niet expliciet in het dijkbeheer. Voor nauwkeurig en betrouwbaar lifecycle costing en management is betrouwbare en nauwkeurige data en informatie benodigd in voldoende hoeveelheid (Boussabaine & Kirkham, 2004).

In de motivatiefase en de '*requirements and goals*'-fase zijn data en informatie op hoofdlijnen vaak al voldoende om de doelstellingen in deze fasen te realiseren. De fase waarin theoretisch gezien de meeste data en informatie benodigd zijn, is de ontwerp fase. Data-acquisitie vindt plaats in veldonderzoek, laboratorium onderzoek, bureau- en archiefonderzoek, etc. In de ontwerpfase worden de wensen en eisen die zijn gesteld in de motivatie en '*requirements and goals*'-fase gerealiseerd (ENW, 2007).

Ondanks dat er data en informatie van hoge kwaliteit in de ontwerpfase wordt verzameld, kan bij de realisatie blijken dat de situatie op de locatie anders is dan was aangenomen. Daarom vormen data en informatie verkregen tijdens de realisatie van projecten een belangrijke aanvullende informatiebron die bewaard moet worden voor toekomstig gebruik. De combinatie van deze verschillende databronnen verbetert het inzicht in de dijk en het begrip van het gedrag van de dijk. Door het vergrote begrip kunnen onderhouds- en versterkingswerken worden geoptimaliseerd of zijn niet meer nodig.

De wettelijk verplichte toets op veiligheid is onderdeel van de beheerfase. Om een kwalitatief goede toetsing op veiligheid uit te kunnen voeren zijn nauwkeurige en betrouwbare data en informatie benodigd in voldoende kwantiteit. Als dat nodig is kunnen hiervoor aanvullende meetgegevens worden ingewonnen (van Putten, 2013). Als de dijk vervolgens wordt afgekeurd waarna versterking volgt, worden ook in de versterkingsfase data en informatie ingewonnen. Op deze wijze loopt parallel aan de levenscyclus de dijkdata- en informatiecyclus door wat resulteert in een steeds completere set data. Van belang is om op deze data goede kwaliteitsborging toe te passen zodat bij het gebruik steeds uitgegaan kan worden van de juistheid ervan. Data en informatie in deze zijn zowel digitale meetgegevens, foto's, aantekeningen op schrift, hardcopy rapporten, etc.etc.

Voor verschillende faalmechanismen is onderzoek uitgevoerd naar de invloed van datahoeveelheid op het toetsresultaat (Oldhoff, 2013). Voor verschillende dominante parameters blijkt dat het gebruik van relatief weinig data leidt tot forse onzekerheidsmarges die het toetsresultaat sterk kunnen beïnvloeden. Het toestaan van deze mate van onzekerheid in de toetsresultaten kan leiden tot

- dijken die ten onrechte worden afgekeurd
- dijken die ten onrechte worden goedgekeurd
- dijken die worden terecht worden goed-/afgekeurd.

Met name de eerste twee situaties zijn onwenselijk. In het eerste geval worden dijken versterkt die wellicht een lagere prioriteit voor versterking hadden moeten krijgen dan andere, er wordt dus verkeerd geïnvesteerd. In het tweede geval worden onbedoeld concessies gedaan aan het niveau van waterveiligheid en wordt een onacceptabel hoog risico gelopen. Om een zo betrouwbaar mogelijk inzicht te krijgen in de actuele staat van het beschouwde asset (in dit geval een dijk) te verkrijgen moet er daarom voor worden gezorgd dat relevante data beschikbaar is, steeds aanvullend wordt ingewonnen en wordt bewaard voor toekomstig gebruik. Een continue kwaliteitsverbetering wordt daarmee mogelijk (Boussabaine & Kirkham, 2004).

Uit voorgaande stukken blijkt steeds dat voor iedere fase in de levenscyclus en iedere ingreep die wordt gedaan de vraag is: welke informatie nodig is voor een beslissing, wat de kwaliteit van deze informatie is en welke informatie bewaard moet blijven voor de volgende fase in de levenscyclus. Het antwoord op deze vragen bepaalt de kwaliteit van een beslissing tot het doen van een ingreep en in hoeverre de fasen van de levenscyclus op elkaar afgestemd zijn. Om deze vraag beter te kunnen beantwoorden is in Hoofdstuk 0 een aanzet gegeven voor een model om de kwaliteit van informatie te beoordelen.

2.6 Discussie & conclusies

Internationaal gezien is er zowel vanuit praktijk als literatuur consensus over het nut van lifecycle management. Zowel uit academische studies als uit praktijkervaring blijkt het nut van een benadering uitgaande van de levenscyclus als geheel. Het verschilt sterk per sector en toepassingsgebied hoe ver men is met kennisontwikkeling en implementatie. Waar bijvoorbeeld in het 'structural engineering' gebied veel kennis is over lifecycle management voor enkele assets is deze invalshoek voor andere gebieden, zoals riolering minder interessant. Daar ligt een netwerkbenadering meer voor de hand. In het algemeen lijkt met name de overgang tussen verschillende fasen van de levenscyclus problematisch te zijn. Inhoudelijk gezien, omdat dit het 'wat is mijn optimale strategie'-vraagstuk veel complexer maakt, maar ook praktisch gezien, omdat organisaties vaak niet ingericht zijn op een lifecycle benadering maar de fasen in aparte hokjes worden uitgevoerd. Naast het inrichten van organisaties op een lifecycle benadering, is het daarom van belang om methoden te ontwikkelen om de overdracht van data en informatie tussen verschillende fasen goed te laten verlopen. Zoals gezegd wordt in verschillende toepassingsgebieden veelal een andere invalshoek gehanteerd. Een van de belangrijkste aspecten van het framework moet daarom zijn dat ieder toepassingsgebied er binnen valt, zonder te algemeen en niet-specifiek te worden. Daarom is het onderscheid tussen de volgende twee vragen van groot belang en deze moet goed naar voren komen in het framework en met name de bijbehorende tools:

- Welk onderdeel van mijn lifecycle management vraagstuk is specifiek voor deze toepassing?
- Welk onderdeel van mijn lifecycle management vraagstuk zal op dezelfde manier gesteld worden in een totaal andere toepassing?

Deze twee vragen omvatten het asset-specifieke en het generieke deel van lifecycle management. Bij de toepassing van een generiek framework moeten deze goed ontvlochten worden.

3 Ontwikkeling van een generiek framework

In dit hoofdstuk wordt de ontwikkeling van het generieke framework nader besproken. In paragraaf 3.1 wordt het doel van het framework gedefinieerd, in paragraaf 3.2 worden de belangrijkste elementen uit de literatuur op een rij gezet. Paragraaf 3.3 bespreekt een aantal bestaande schema's voor lifecycle management en de toepasbaarheid in de context van ROBAMCI. Paragraaf 3.4 sluit af met conclusies

3.1 Doel van het framework

Vanuit de literatuur is er een breed scala aan toepassingsgebieden en toepassingsniveaus geïdentificeerd. Doel van het generiek framework binnen ROBAMCI is om een structuur te bieden waarin verschillende typen studies voor publieke en kritieke infrastructuur kunnen worden geplaatst. Vanuit de literatuur is al een scala aan frameworks, richtlijnen en dergelijke beschikbaar, maar deze zijn veelal toegespitst op een specifieke toepassing of te algemeen om concreet te worden. Daarom wordt voor ROBAMCI een apart framework ontwikkeld, wat gebruik maakt van de bruikbare elementen uit bestaande schema's en deze in een voor ROBAMCI bruikbare structuur brengt. Doel is dat het framework voor alle ROBAMCI cases uitgangspunt is om te komen tot een goede en kwantitatief onderbouwde analyse van lifecycle management, waarbij een duidelijk onderscheid ontstaat tussen het asset-specifieke en het generiek deel van de vraag.

3.2 Belangrijke elementen uit de literatuur

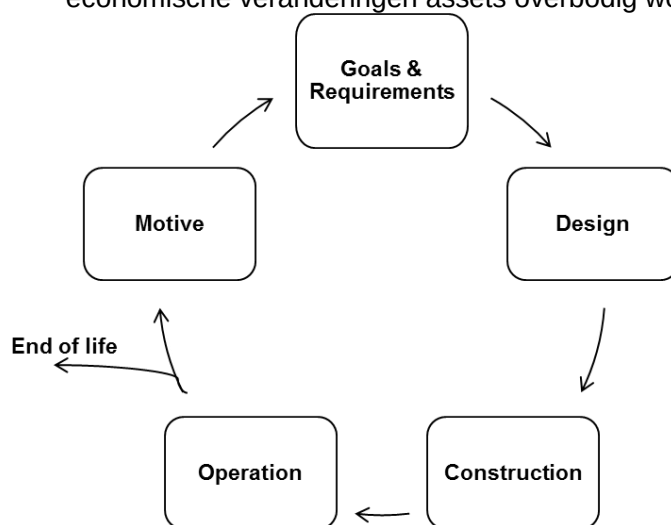
3.2.1 Het basisprincipe van LCM: de levenscyclus

Het hoofdprincipe van lifecycle management is dat er niet meer in een fase maar in een cyclus wordt gedacht. Bij een ontwerp wordt niet alleen gedacht aan welke functie een asset moet vervullen op de dag van oplevering (Campbell et al., 2011), maar ook in de gehele levensduur daarna, met zelfs een doorkijk naar de nog langere termijn. Voor infrastructuur heeft de levenscyclus globaal een structuur als weergegeven in Figuur 3.1, dit bestaat uit de volgende fasen (de betekenis van iedere fase wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeld):

- **Motive:** de eerste fase (hoewel er strikt genomen geen sprake is van een eerste fase) waarin een motivatie wordt gegeven voor het bouwen, opwaarderen, versterken of aanpassen van een asset. Dit kan bijvoorbeeld een motief zijn als: 'De waterkeringen in Nederland moeten voor iedere Nederlander eenzelfde basisveiligheidsniveau bieden'.
- **Goals & Requirements:** Aan de hand van het motief om actie te ondernemen wordt de tweede fase begonnen. Hierin worden de wensen uit de voorgaande fase omgezet in eisen en randvoorwaarden waaraan het systeem of de asset moet gaan voldoen. Dit kan bijvoorbeeld een eis zijn als: 'Waar dan ook in Nederland mag de kans om te overlijden door een overstroming maximaal 10^{-5} /jaar zijn'. Dit zijn de eisen op basis waarvan de asset vervolgens ontworpen kan worden. Wanneer we dit dus toepassen op een dijktraject kan dit betekenen dat de overstromingskans bijvoorbeeld maximaal 1/10.000 jaar mag zijn.
- **Design:** In deze fase worden de eisen omgezet in een ontwerp. In dit geval betekent dit dat het dijktraject dusdanig wordt ontworpen dat in de in de vorige fase vastgestelde norm wordt voldaan.
- **Construction:** Wanneer nodig (het kan ook zijn dat een asset al aan de eisen voldoet!) wordt de asset aangepast naar de nieuwste eisen.
- **Operation:** Nadat de asset klaar is en op het gewenste niveau wordt deze beheerd om ook op dat niveau te blijven. Dit betekent dat een beheerder de norm regelmatig

evalueert en de asset onderhoudt. Bij goed lifecycle management wordt het stramien waarin beheer wordt gevoerd al bepaald in de requirements en design fasen. Immers: uiteindelijk draait LCM om het integreren van de fasen in de levenscyclus. Wanneer, in het geval van het voorbeeld, de beheerder concludeert dat de overstromingskans groter is geworden dan de norm geeft dit een nieuwe motivatie en keert het proces terug naar de eerste fase 'Motive'.

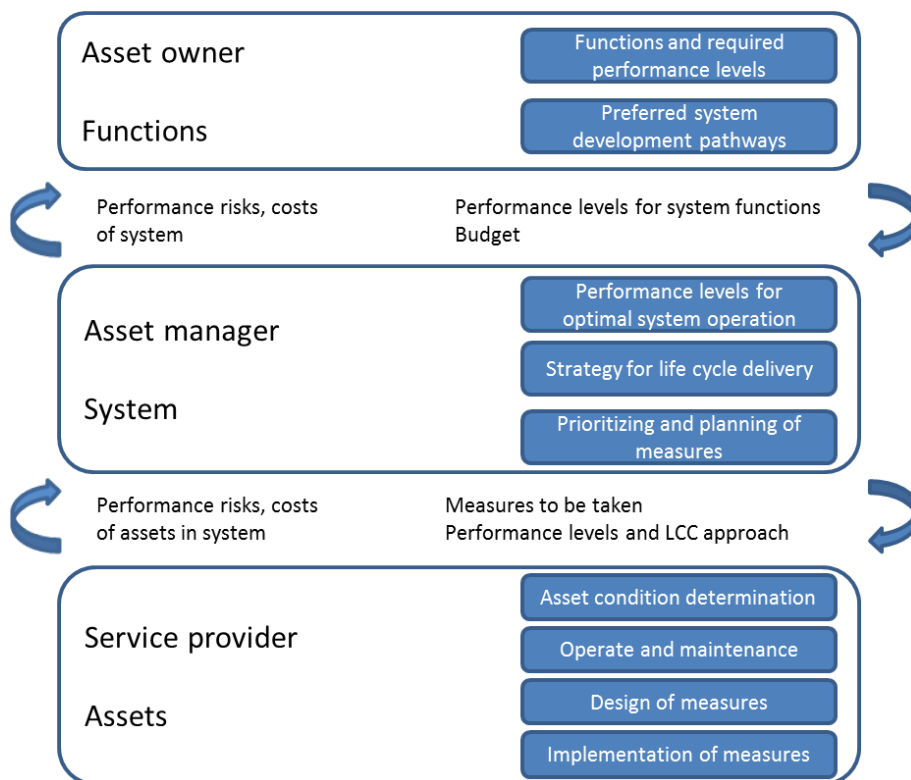
- End of life: In principe kan bij het einde van de levensduur van een asset (of al daarvoor) worden besloten dat een asset overbodig is geworden. In dat geval betekent het dat de 'end of life' is bereikt, en wordt de asset afgedankt. In het gehanteerde voorbeeld van een waterkering zal dit zelden voorkomen, maar in bijvoorbeeld een netwerk van bruggen of sluizen is het denkbaar dat door bijvoorbeeld socio-economische veranderingen assets overbodig worden.



Figuur 3.1 Levenscyclus voor infrastructuur

3.2.2 Verschillende rollen tijdens de levenscyclus

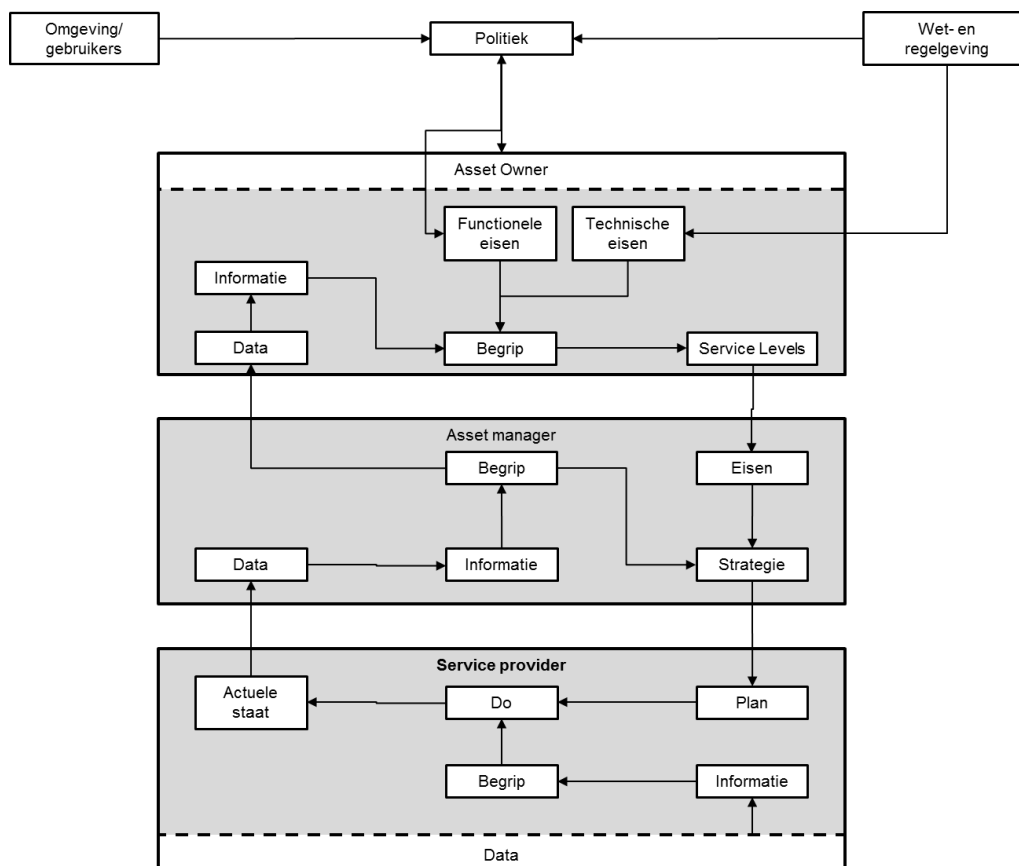
Tijdens de levenscyclus spelen in de verschillende fasen andere partijen een rol. In het Koepelplan van ROBAMCI is Figuur 3.2 weergegeven, hierin staan rolhouders op 3 niveaus met elk verschillende taken. Op het bovenste niveau bepaalt de asset eigenaar de vereiste functies en bedenkt deze een lange termijn visie op de ontwikkeling van assets of systemen van assets. Op het tweede niveau vult de asset manager deze visie en functie-eisen nader in door maatregelen te plannen, prioriteren en optimaliseren om zo de vereiste functionaliteit zo optimaal mogelijk te bereiken. Deze maatregelen worden vervolgens uitgevoerd door de service provider(s) van de asset(s). Uit de taken die rechts (in de blauwe blokken) weergegeven staan in de figuur blijkt al dat de verschillende rolhouders op een verschillende plaats in de levenscyclus zitten. Teruggrijpend op voorgaande paragraaf zal een asset owner veel meer betrokken zijn bij de 'Motive' en 'Goals & Requirements' fasen dan bij de 'Construction'-fase. Aan de andere kant zal de service provider vooral gericht zijn op 'Construction' en 'Operation'.



Figuur 3.2 Verschillende rollen, taken en informatie-uitwisseling in de levenscyclus.

Tussen de niveaus vindt uitwisseling van kennis plaats. Zo levert de asset manager informatie over het functioneren van het systeem aan de asset owner en levert de service provider informatie over de actuele staat van het systeem aan de asset manager. Voor lifecycle management is met name deze uitwisseling van informatie van belang, omdat deze bepaalt in hoeverre de verschillende fasen in de levenscyclus kunnen worden geïntegreerd. Wanneer we deze informatiestroom verder invullen leidt dat tot Figuur 3.3. Hierin levert de politiek, omgeving en wet- en regelgeving van buiten input aan de asset owner. Deze definieert vervolgens op basis van zijn (van de asset manager ontvangen) kennis van het systeem realistische service levels ('Motive', 'Goals & Requirements'). Die worden vervolgens door de asset manager vertaald naar een concrete strategie voor LCM ('Design'). Deze wordt dan uitgevoerd door de service provider ('Construction', 'Operation'). Belangrijk hierin is de kwaliteit en het detailniveau van de informatie. Een asset owner zal zijn beslissingen baseren op andere informatie dan een asset manager of een service provider. Waar een asset owner bijvoorbeeld denkt in faalkansen van dijktrajecten zal een asset manager zijn beslissingen baseren op faalkansen van dijktrajecten voor individuele faalmechanismen en een service provider op bijvoorbeeld stabiliteitsfactoren. Deze zijn aan elkaar gerelateerd maar niet hetzelfde. Zo kan het bijvoorbeeld zo zijn dat de data die de asset owner gebruikt hetzelfde is de informatie waarop de asset manager zijn beslissing baseert. Op de informatiestromen wordt nader ingegaan in Hoofdstuk 0.

In Figuur 3.3 is de stroom van informatie tussen de rolhouders wat verder uitgewerkt. Wanneer dit in de context van de levenscyclus wordt geplaatst wordt er eerst een motief gegeven vanuit de omgeving, waarna de asset owner hiermee aan de slag gaat en de levenscyclus doorlopen wordt. De asset owner heeft relatief globale informatie nodig en de service provider, aangezien deze dicht op de uitvoering en het beheer zit, gedetailleerdere informatie op een kleiner schaalniveau.

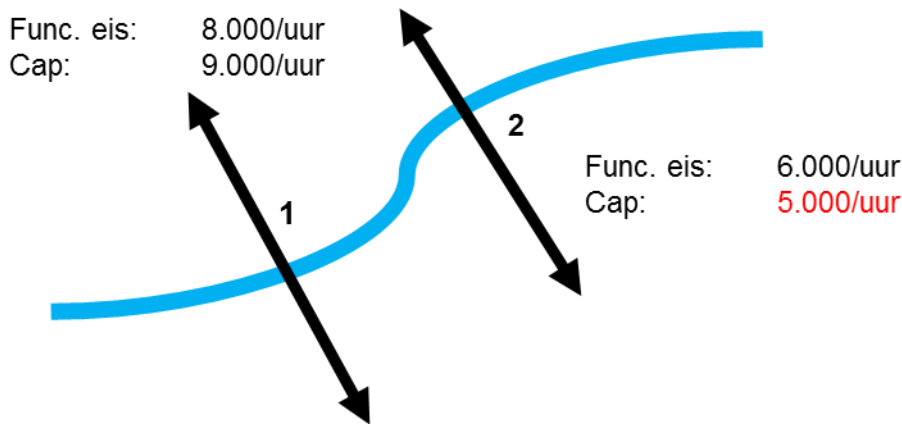


Figuur 3.3 Stromen en status van informatie voor verschillende rolhouders.

3.2.3 Assets en netwerken van assets

Een groot deel van de publieke infrastructuur bestaat niet uit op zichzelf staande objecten maar uit netwerken van objecten die een bepaalde functie vervullen (Frangopol, Kong, & Gharaibeh, 2001; Gómez et al., 2014). Het onderscheid van schaalniveaus is belangrijk voor lifecycle management, omdat dit bepaalt welke informatie relevant is. Zie bijvoorbeeld het onderscheid in de aanpak van Gómez *et al* (2014) die op netwerkniveau kijken en Barone and Frangopol (2014) die zich richten op een individuele asset, deze hebben een heel ander detailniveau qua modellering en gebruikte informatie.

In het onderscheid tussen assets en netwerken van assets is vooral de soort eis die gesteld wordt van belang. Waar het bij netwerken vooral gaat om het functioneren van het netwerk en dus de functionele eisen, gaat het bij assets vooral om het blijven functioneren van de asset zelf. Op netwerkniveau gelden dus functionele eisen, op asset niveau gelden naast functionele eisen ook technische eisen (denk aan bijvoorbeeld de Eurocode). Het kan ook voorkomen dat een asset niet voldoet aan de vanuit het netwerk gestelde functionele eis, maar dat het netwerk wel voldoet aan de functionele eis. Ter illustratie de situatie uit Figuur 3.4. Hierin verbinden 2 bruggen de oevers van een rivier. De totale functionele eis is dat per uur er een capaciteit is van 14.000 auto's voor de bruggen samen, wat precies gerealiseerd wordt. Echter, de capaciteit van brug 2 is ontoereikend voor de gestelde functionele eis op asset niveau. In dit geval functioneert het netwerk dus, maar de individuele asset functioneert niet als gewenst. Dit kan opgelost worden door de functionele eisen op netwerkniveau te herverdelen, wat een belangrijk onderdeel is van het handelingsperspectief van de asset owner.



Figuur 3.4 Voorbeeld van een netwerk van assets en het verband tussen functionele eisen op netwerk en asset niveau.

Dit tekent ook het belang van het op netwerkniveau kijken naar assets. Immers, het afzonderlijk beschouwen van de bruggen zou zeer waarschijnlijk leiden tot een verbetering van brug 2, terwijl er bij brug 1 voldoende capaciteit is om het tekort op te vangen. Teruggrijpend op de rollen zal een asset owner doorgaans meer nadenken over netwerkfuncties en zal een service provider op asset niveau zijn werk doen. De asset manager heeft de taak deze twee niveaus te verbinden.

3.2.4 Externe factoren

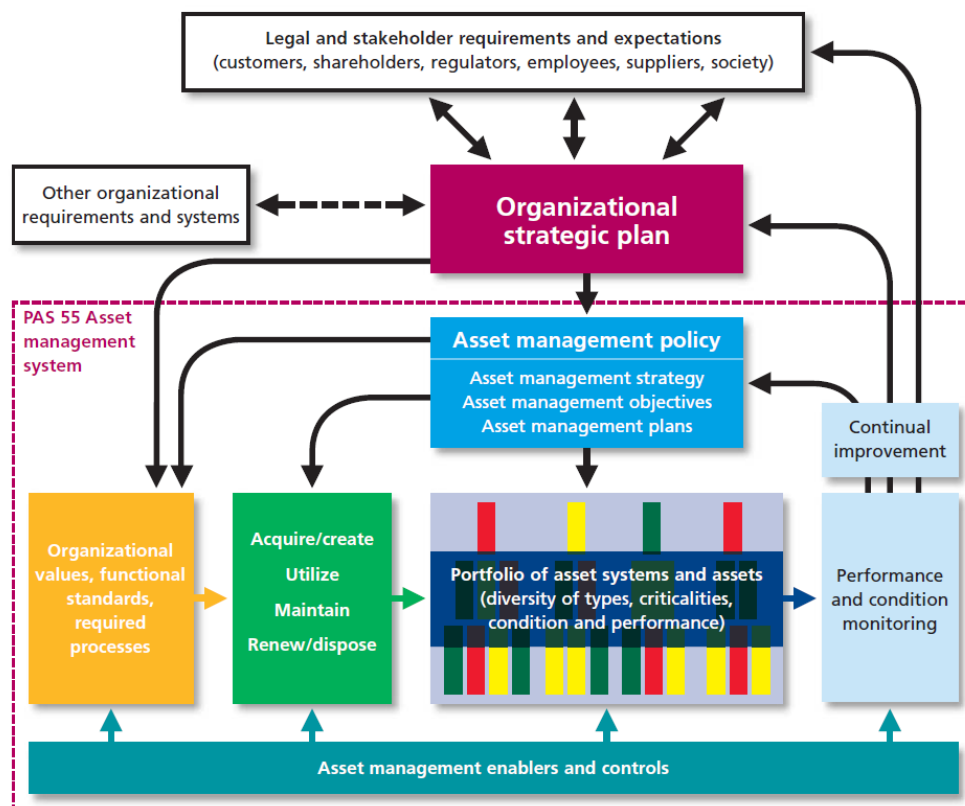
Een Motive in lifecycle management komt vaak voort uit een externe factor. Een voorbeeld hiervan is nieuws over extreme zeespiegelstijging. Dit kan aanzetten tot een herevaluatie van de normen. Een ander voorbeeld is een ramp, waarna men, als in 1953 met de watersnoodramp zegt: “dit nooit weer”, wat kan resulteren in grote investeringen. Dergelijke externe factoren zijn een zeer belangrijke aanzet voor de ‘Motive’ fase.

3.3 Bestaande schema's voor lifecycle management

Tot op heden zijn talloze schema's voor lifecycle management en asset management gemaakt. Tot de voornaamste en meest gebruikte zijn die van het Institute of Asset Management (IAM), deze worden in onderstaande paragrafen kort besproken. Daarnaast wordt een meer toegespitst schema voor Engelse waterleidingbedrijven kort toegelicht.

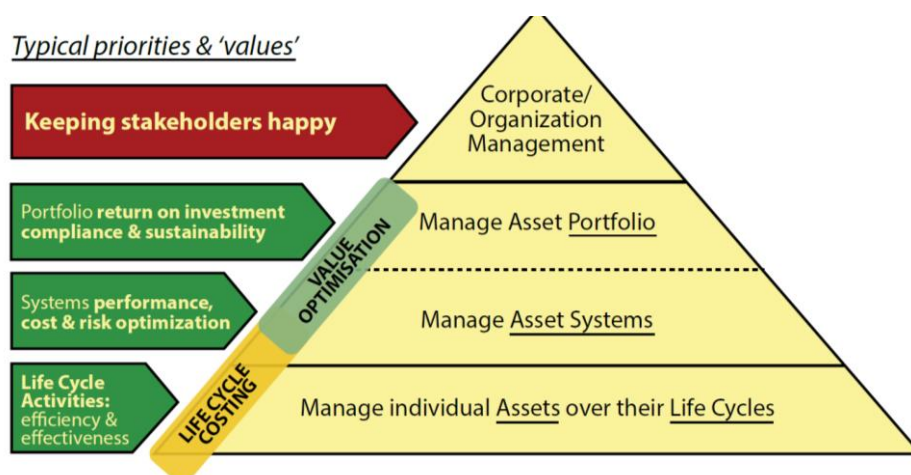
3.3.1 Schema's van het Institute of Asset Management (IAM)

Voor totstandkoming van de ISO55000 normen waren de PAS55-normen de vigerende normen voor asset management (Van den Honert et al., 2013). Daarbij past het schema uit Figuur 3.5. Het eerste wat opvalt is dat dit schema uit lijkt te gaan van 1 stakeholder of in ieder geval 1 organisatie. Voor de publieke infrastructuur met al haar politiek-bestuurlijke complexiteit is het daarom wellicht wat eenvoudig. Het gedeelte wat onder asset management valt is in de figuur het paars omlijnde gedeelte. Daarbinnen zijn een aantal stappen te onderscheiden maar in principe valt ook hier de cyclus van motief, eisen, bouw, beheer, evaluatie van prestaties en bijsturing te herkennen. Dit schema maakt geen onderscheid tussen netwerken, assets en componenten en, zoals al eerder gezegd ook niet tussen verschillende rolhouders.



Figuur 3.5 Framework voor asset management met PAS 55 volgens Institute of Asset Management

In het rapport 'Asset Management - an anatomy' (The Institute of Asset Management, 2014), wat uitgebracht is na introductie van de ISO55000 normen staan een aantal andere figuren. Figuur 3.6 laat de pyramide zien die vaak ingevuld wordt met de 3 niveaus van strategisch, tactisch en operationeel asset management. In dit geval is dat echter concreter ingevuld. De top is in feite wederom de bestuurlijke omgeving, daaronder zit de Asset Owner die een groot portfolio aan assets managet, daaronder de Asset Manager die systemen van assets managet en daaronder de Service Provider die zich richt op individuele assets. Hierin is dus ook duidelijk de relatie tussen schaalniveau (netwerk versus asset) en beslisniveau (strategisch versus operationeel) zichtbaar.



Figuur 3.6 Verschillende niveaus van asset management volgens IAM

In Figuur 3.7 is het zogeheten 'IAM conceptual model' weergegeven. Te zien is wederom een invloed van buitenaf (grijze vlakken), en een cyclus van het voortdurend bijsturen van de lifecycle delivery vanaf verschillende kanten. Ook hier geldt dat de rolhouders niet duidelijk naar voren komen en dat er geen schaalniveaus zichtbaar zijn.



Figuur 3.7 Conceptueel model voor de opzet van asset management (The Institute of Asset Management, 2014)

3.3.2 PDCA-cyclus

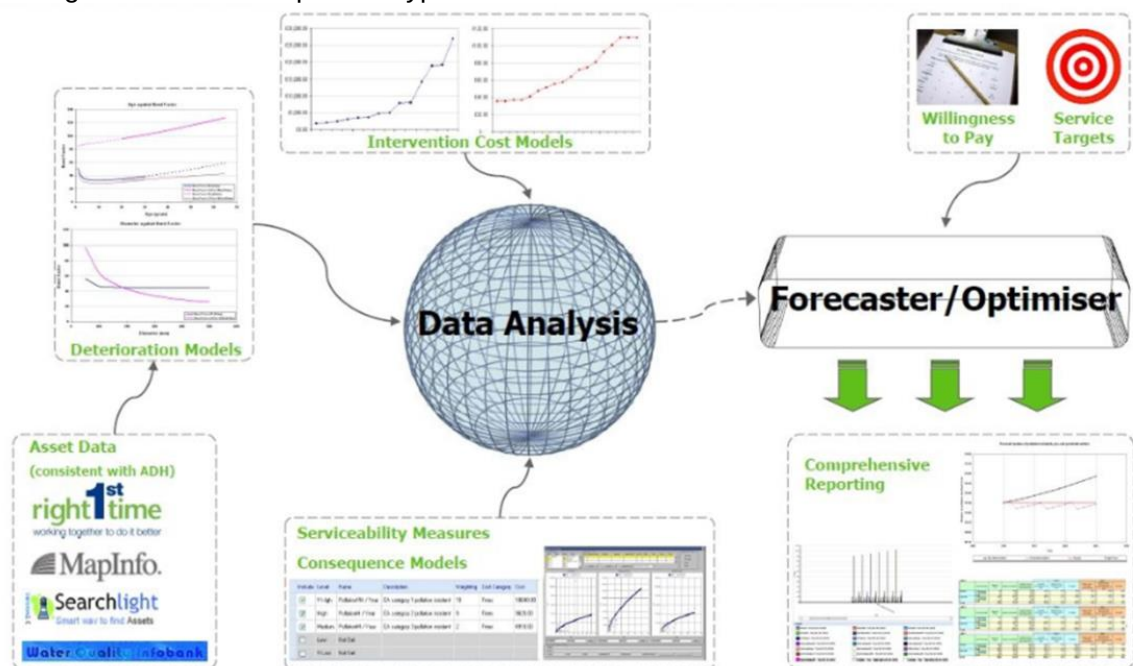
De PDCA-cyclus is ontwikkeld door William Edwards Deming. Het is een cyclus die gericht is op het verbeteren van een proces door het doorlopen van 4 stappen:

- Plan: beoordeel huidige werkzaamheden en stel een verbeterplan vast. Stel doelstellingen voor verbetering vast.
- Do: Voer de geplande verbetering uit in een gecontroleerde proef.
- Check: Meet het resultaat van de verbetering en vergelijk deze met de oorspronkelijke situatie en toets deze aan de vastgestelde doelstellingen.
- Act: Stuur bij aan de hand van de gevonden resultaten bij de check.

De PDCA-cyclus heeft zich al in veel organisaties als zeer bruikbaar bewezen. Echter, de insteek ervan is erg breed, en daardoor is hij niet specifiek geschikt voor toepassing als framework bij ROBAMCI.

3.3.3 Schema Engelse waterleidingbedrijven

Figuur 3.8 toont een asset management schema zoals gebruikt bij Engelse waterleidingbedrijven (van Meerveld & Wessels, 2014). Dit is een meer tactische en operationele invulling van asset management. De kern draait om het analyseren van data van gedrag in de tijd, kosten van interventies en onderhoud. Dit wordt, met als randvoorwaarden de 'Willingness to pay' en de service levels, geoptimaliseerd wat een strategie voor investeringen geeft. Uiteindelijk leidt uitvoering hiervan tot het updaten van de data, waardoor de strategie bijgesteld kan worden. Dit is een voorbeeld van een concrete invulling van asset management voor een specifiek type asset.



Figuur 3.8 Model voor toepassing van asset management op investeringsbeslissingen voor waterleidingen (van Meerveld & Wessels, 2014)

3.4 Discussie & conclusies

In dit hoofdstuk zijn een aantal belangrijke elementen van lifecycle management op een rij gezet. Vanuit de literatuur zijn vier hoofdonderdelen geïdentificeerd die in een framework zouden moeten worden opgenomen:

- De fasen van de levenscyclus van een asset
- Verschillende rolhouders in het asset management proces
- Het onderscheid tussen assets en netwerken van assets
- De invloed van externe factoren op lifecycle management

Er zijn een aantal schema's voor lifecycle management besproken, waarbij is aangeduid op welke vlakken deze geschikt zijn voor ROBAMCI en op welke vlakken niet. Zo is het schema van het Institute of Asset Management niet zo duidelijk in het onderscheid tussen assets en netwerken van assets, de PDCA-cyclus is in het algemeen bruikbaar maar niet concreet genoeg. Het besproken schema van de Engelse waterleidingbedrijven is een goed voorbeeld van een concreet schema, maar is in dit geval weer sterk op 1 toepassing gericht. Concluderend kan gesteld worden dat de vragen die binnen ROBAMCI gesteld worden in geen van de schema's op een concrete manier, compleet worden ingevuld. In het volgende hoofdstuk wordt een versie 0 besproken van een framework wat dit wel beoogt te doen.

4 ROBAMCI framework versie 0

In dit hoofdstuk wordt de kennis uit literatuur en voorgaande hoofdstukken gecombineerd tot een voor ROBAMCI bruikbaar generiek framework. Dit hoofdstuk bestaat uit een aantal aparte onderdelen. Paragraaf 4.1 geeft een lifecycle management processchema waarin onder meer de verschillende lifecycle fasen en rolhouders terug komen. Paragraaf 4.2 geeft een schema voor kwantitatieve lifecycle analyses. Dit is meer gericht op de analyses die in veel van de ROBAMCI cases gedaan worden en dient als verbinding met de in paragraaf 4.3 gegeven blauwdruk van het bij het framework horende instrumentarium.

4.1 Lifecycle management processchema

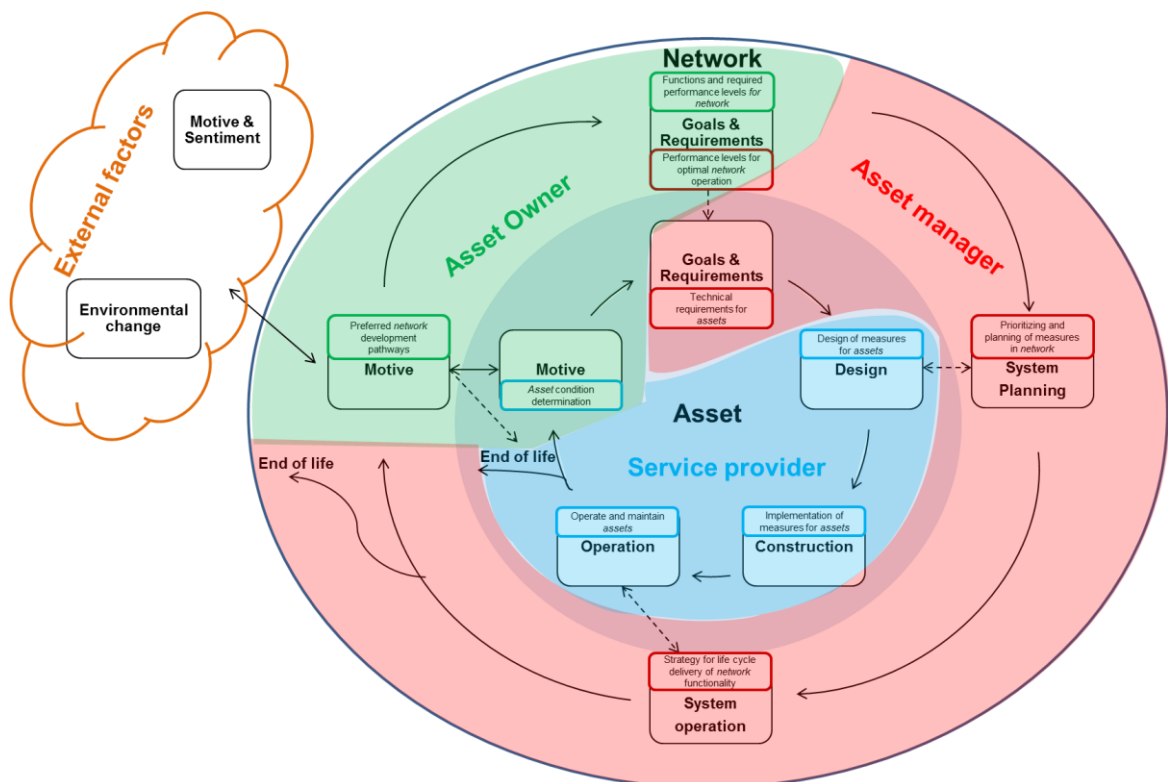
In het vorige hoofdstuk zijn een aantal belangrijke aspecten van asset en lifecycle management geïdentificeerd, namelijk:

- Rolhouders: asset owner, asset manager en service providers
- Schaalniveau: asset management van netwerken, assets en componenten
- De levenscyclus en de fasen daarin
- De invloed van de externe factoren

Dit hoofdstuk heeft als doel om deze aspecten te integreren in één framework, wat concreet genoeg is om in vervolgfases ROBAMCI cases op een heldere manier te ondersteunen. Hierbij worden de bovenstaande aspecten geïntegreerd in één schema. Dit is altijd enigszins arbitrair, waarvan de verscheidenheid aan beschikbare schema's voor asset en lifecycle management getuigen. In dit geval zal het framework dus ook enigszins arbitrair zijn, dit wordt ondervangen door het aan te vullen met een concrete blauwdruk voor instrumentatie en in vervolgfases bij te sturen met ervaringen vanuit cases. Dit moet op lange termijn leiden tot een framework wat breed toepasbaar, concreet en goed kwantitatief te onderbouwen is.

Wanneer we de geïdentificeerde hoofdaspecten combineren levert dat het schema uit Figuur 4.1 op. Hierin zijn zowel individuele assets als netwerken, de levenscyclus en de verschillende rolhouders vertegenwoordigd. De buitenste schil van de cirkel draait om de lifecycle van het netwerk. De fasen hierin verschillen enigszins van die voor een asset. Het verschil is het beste te duiden vanuit de rolhouder: op netwerkniveau wordt meer over strategische en tactische vraagstukken nagedacht, wat zich uit in de belangrijke rol van de asset manager hierin. Automatisch is bijvoorbeeld de 'Construction' fase op netwerkniveau meer een planfase, daarom is deze hier samengevoegd met 'System Planning', de uitvoering van de planning gebeurt immers op het niveau van individuele assets. In diverse fasen vindt er uitwisseling van informatie plaats tussen netwerk en asset niveau. Zo zijn de eisen aan het netwerk zeer bepalend voor de eisen aan de individuele assets en bepaalt de planning van het netwerk het ontwerp en moment van aanleg van de individuele assets. Hetzelfde geldt voor de 'operation' van netwerk en assets. Een eventuele aanpassing aan een asset moet altijd voortkomen uit:

- Het niet voldoen aan de gestelde eisen voor de asset
- Een aanpassing aan de eisen door een aanpassing aan de vereiste functionaliteit van het netwerk.

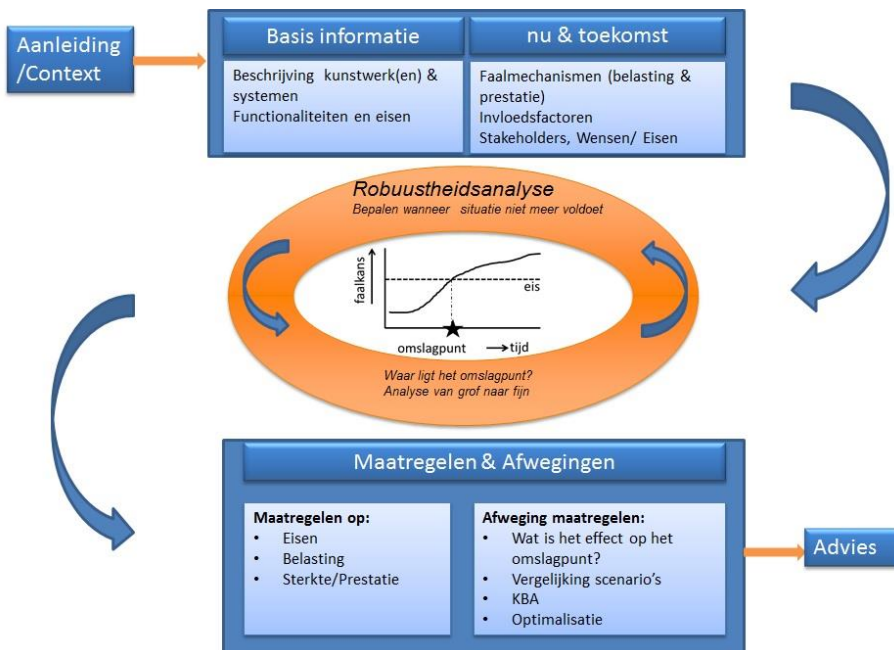


Figuur 4.1 Processchema voor lifecycle management van infrastructuur.

Als gezegd is een van de belangrijkste aspecten van het toepassen van lifecycle management de uitwisseling van informatie tussen de verschillende niveaus. In de praktijk blijkt dat dit vaak het grootste obstakel bij invoering is, daarom wordt hier in Hoofdstuk 0 nader op ingegaan. In paragraaf 6.1 worden de cases uit ROBAMCI fase 1 in het perspectief van het framework geplaatst om zo de positionering en toepasbaarheid te laten zien.

4.2 Van proces naar kwantitatieve onderbouwing

Wanneer bijvoorbeeld een strategie voor de levenscyclus wordt doorgerekend is bovenstaande figuur teveel een omschrijving van lifecycle management als proces. Daarom is het zaak om uit dit schema ook een schema af te leiden waarin de stap van proces naar kwantitatieve onderbouwing wordt gemaakt. Het schema uit Figuur 4.2 is hiervoor gebruikt in het project TO2 Natte Kunstwerken van de Toekomst. Hoewel het zeer gericht is op natte kunstwerken en niet alle dimensies uit Figuur 4.1 bevat is het bruikbaar voor de vertaling naar kwantitatieve onderbouwing. Bij een analyse van toekomststrategieën wordt bepaalde basisinformatie en een voorspelling van de toekomst gebruikt om te schetsen wat de optimale manier is om hier op in te spelen. Dit gebeurt met een lifecycle analyse van maatregelen, op asset- of netwerkniveau, in de oranje cirkel. Hierbij worden op een bepaald moment de gegevens over heden en scenario's voor de toekomst gebruikt als uitgangspunt voor de analyse. Op deze manier wordt een schema als het processchema uit voorgaande paragraaf hanteerbaar in een kwantitatieve analyse.



Figuur 4.2 Schema voor systeemanalyse uit TO2 Natte Kunstwerken van de Toekomst

De oranje cirkel in bovenstaande figuur is voor meerdere interpretaties vatbaar, in algemene zin gaat het echter om het met behulp van fysische modellen vertalen van de huidige toestand en verwachte toekomstscenario's naar een aantal indicatoren voor de prestaties, kosten en risico's en hun verloop gedurende de zichtperiode. Prestatie kan hierbij meerdere dimensies hebben, RAMS-criteria¹ zijn daarvoor een gangbare indeling die ook bij Rijkswaterstaat wordt gehanteerd (Rijkswaterstaat, 2010).

De procedure is in feite als volgt: gedurende het LCM-proces wordt op een bepaald moment het 'Motive' en de autonome ontwikkeling bevroren in een huidige staat, scenario's en een opdracht. Vervolgens wordt een analyse uitgevoerd om optimale of voorkeursstrategie te bepalen gegeven de bevroren staat van het systeem. Omdat de minuit na de analyse de externe factoren en randvoorwaarden al weer veranderd kunnen zijn, is het in feite zo dat deze analyse constant moet worden uitgevoerd (als in Figuur 4.1). Uitvoerbaarheid is daarbij uiteraard een probleem, waardoor in de praktijk bijvoorbeeld eens per 10 jaar, of als eisen significant veranderen de analyse in de oranje cirkel wordt uitgevoerd.

Deze analyse krijgt meer handen en voeten in de beschrijving van de blauwdruk van het instrumentarium in de volgende paragraaf. Deze blauwdruk dient om concreter te maken hoe dergelijke analyses kunnen worden vormgegeven. Het gaat er hierbij specifiek om, om duidelijk te maken hoe bestaande (fysische) modellen in een lifecycle analyse kunnen worden gebruikt.

4.3 Blauwdruk ondersteunend instrumentarium

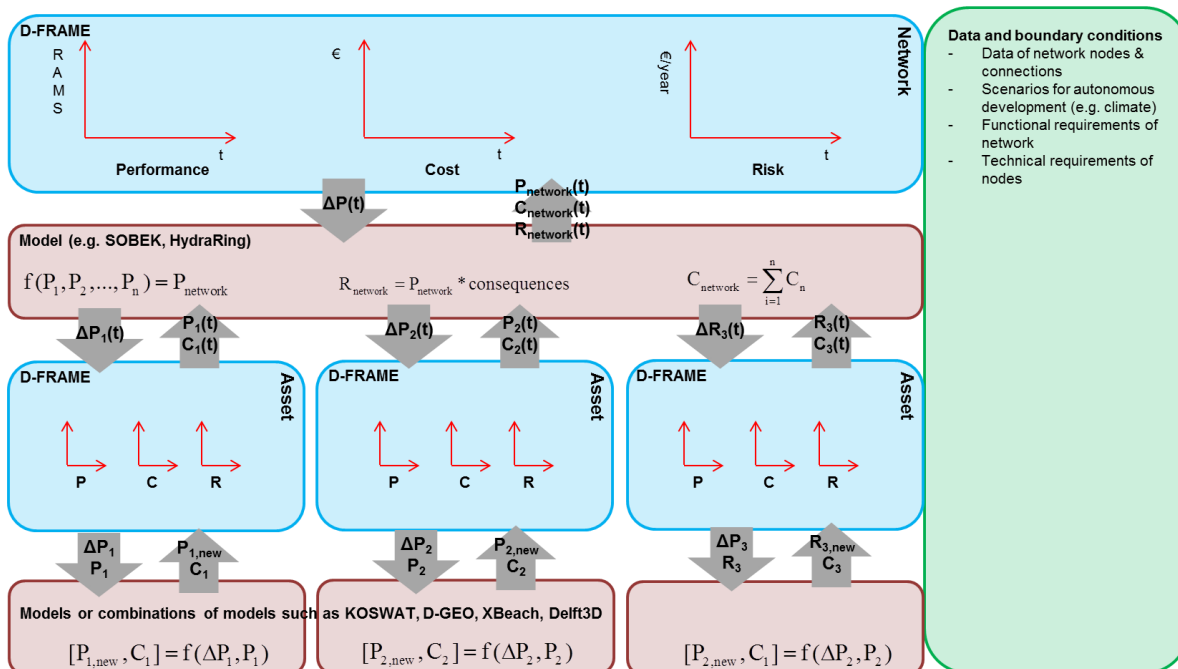
De analyse uit voorgaande paragraaf is vaak complex om door te rekenen. Zeker op netwerkniveau, maar ook op asset niveau wordt het aantal variabelen en opties al snel extreem groot, simpelweg omdat de beslisruimte een gigantische vrijheid kent. Hoe een instrumentarium ingericht kan worden waarin met goede fysische modellen als basis, complexe lifecycle analyses kunnen worden uitgevoerd wordt in dit hoofdstuk verkend.

¹ RAMS(SHEEP) is een gangbare indeling voor prestaties van infrastructuur. Het staat voor Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Security, Health, Environment, Economics en Politics. Meestal wordt dit ingeperkt tot RAMS.

4.3.1 Blauwdruk ondersteunend instrumentarium voor kwantitatief lifecycle management

Een gebruikelijke manier om lifecycle analyses in te steken is op basis van Prestatie (P), Kosten (C) en Risico (R), in asset management studies wordt deze indeling bijvoorbeeld veelvuldig gebruikt. Het is dus zaak om indicatoren voor bijvoorbeeld de prestatie van een waterkering (bijv. kwelweglengte, kruinhoogte, stabiliteitsfactor) te vertalen naar een algemene prestatie, in dit geval is van de RAMS-criteria voor prestaties (Rijkswaterstaat, 2010) 'Reliability' het meest gepast. Hetzelfde kan gedaan worden met bijvoorbeeld riolering, waar de prestatie waarschijnlijk de dimensie van Availability zal krijgen. Op deze manier wordt voor ieder soort infrastructuur de prestatie vertaald naar een algemeen kental dat goed te relateren is aan kosten en risico's. Centraal punt hierin is dus het goed scheiden van een generiek deel en het asset specifieke deel. Dit klinkt relatief eenvoudig, maar in een netwerk is de netwerkprestatie afhankelijk van de prestaties van de assets. En zo is de prestatie van de assets afhankelijk van de prestaties van de componenten van die asset, etcetera. Voor publieke infra zijn die eerste twee niveaus echter maatgevend, zoals al eerder aangegeven in het processchema. Dit zijn ook de niveaus waarop grote investeringen gedaan worden. De samenhang in een netwerk is echter voor verschillende typen netwerken verschillend en dus netwerk/assetspecifiek. De prestatie van individuele assets is echter (vaak) wel weer in generieke termen als faalkansen en risico's uit te drukken. Er ontstaat dus een soort gelaagdheid in de berekening, waarbij ieder niveau in de decompositie van het netwerk een generiek en specifiek deel bevat. Een voorbeeld van een aanpak om prestaties, kosten en risico's van lifecycle management strategieën voor (netwerken van) publieke infrastructuur te bepalen is gegeven in Figuur 4.3.

Lifecycle analysis of network using D-FRAME

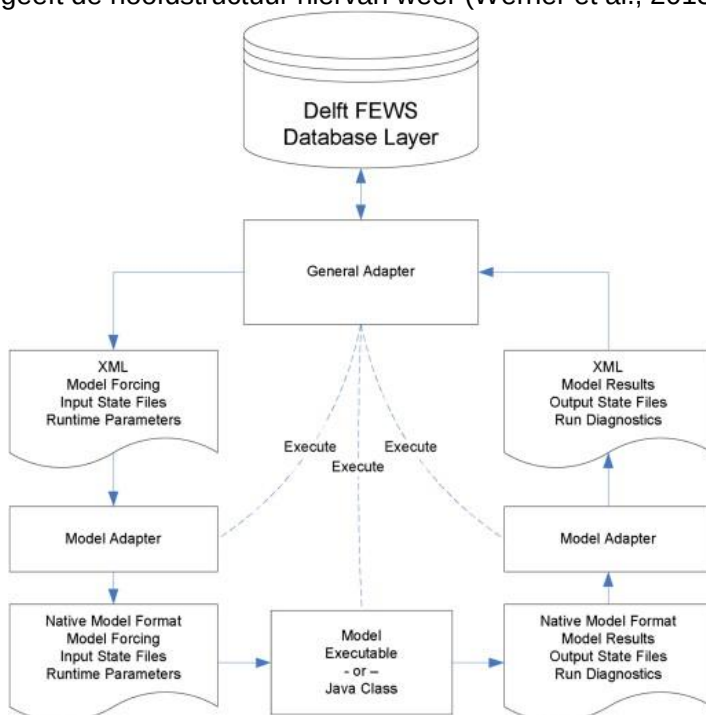


Figuur 4.3 Voorbeeld opzet lifecycle management tool

Deze figuur bestaat uit een aantal lagen/vlakken. Deze worden hieronder kort besproken: In het groene vlak aan de rechterkant staan algemene invoerwaarden die van belang (kunnen) zijn voor alle niveaus in de analyse (dit kan uiteraard naar believen verder opgesplitst worden in de verschillende niveaus). De bovenste laag (in lichtblauw) is een algemene evaluatie van prestatie, kosten en risico in het netwerk. Daaronder hangt (in rood) een (set) model(len) waarin de relatie wordt gelegd tussen prestaties, kosten en risico's van

objecten met de prestatie, kosten en risico's van het netwerk. Daaronder hangt weer een algemene evaluatie van prestatie, kosten en risico op asset niveau, waaronder weer een laag modellen hangt die investeringen relateert in een toename van de prestatie of afname van het risico.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de blauwe vlakken in feite hetzelfde doen: beiden leggen de relatie tussen een verandering in prestatie en de invloed daarvan op prestaties, kosten en risico. Dit deel van de analyse is dus in te vullen met een generiek instrument, in dit geval D-FRAME genoemd. De uitdaging in het invullen met tools is om te zorgen dat de rode blokken, dus de modellen, de juiste uitvoer geven waar het generieke deel mee overweg kan. Delft-FEWS² is een goed voorbeeld van een softwarepakket waarin dit gebeurt. Figuur 4.4 geeft de hoofdstructuur hiervan weer (Werner et al., 2013).



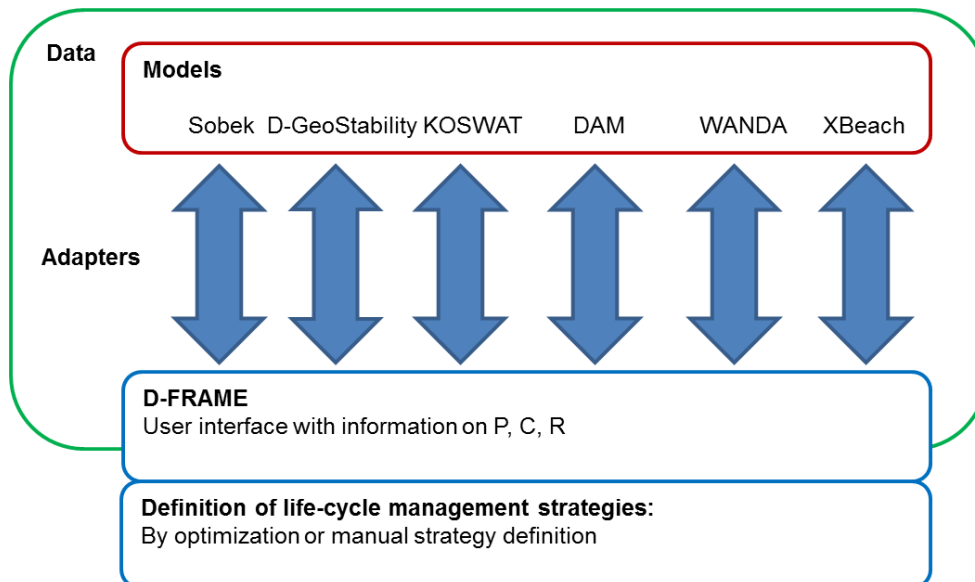
Figuur 4.4 Structuur van Delft FEWS. Modellen worden via adapters aan een centrale 'kern' gekoppeld (Werner et al., 2013)

Dit is zo opgebouwd dat ieder model gekoppeld kan worden aan de basisstructuur van FEWS. Dit gebeurt met zogeheten adapters die modeluitvoer vertalen naar voor FEWS begrijpelijke gegevens. Omgekeerd wordt door het adapter ook bepaald hoe de algemene invoer uit FEWS te vertalen naar voor het model begrijpelijke invoer. Deze opzet zorgt ervoor dat ieder model waarvoor een adapter beschikbaar is of gemaakt zou kunnen worden te koppelen is aan het centrale systeem, wat ervoor zorgt dat het zeer breed toepasbaar zou zijn.

Voor D-FRAME is dit, gezien de variëteit aan typen infrastructuur waarvoor dit toepasbaar moet zijn een zeer interessante opzet zijn. Wanneer we het schetsen resulteert dat in een plaatje als Figuur 4.5. Op basis van algemene data, ingevoerd in D-Frame wordt dit middels adapters gekoppeld naar modellen en vice versa voor model uitkomsten, let wel, de adapters zijn hier extreem vereenvoudigd weergegeven. Op deze manier kan echter in principe met ieder willekeurig model een lifecycle strategie of maatregel doorgerekend worden. Mogelijk

² Delft-FEWS is een open platform opgezet voor het opzetten van hydrologische voorspellingssystemen. Het wordt ontwikkeld bij Deltares en gebruikt in meer dan 30 landen voor operationele systemen.

dat modellen daarin ook gekoppeld moeten worden. Een voorbeeld hiervan zou de optimale investeringsstrategie voor een waterkering kunnen zijn. Hierin worden bijvoorbeeld D-GeoStability en KOSWAT gecombineerd gebruikt, D-GeoStability voor het bepalen van de prestatie, KOSWAT voor het bepalen van bijbehorende kosten.



Figuur 4.5 Schematische opzet van D-FRAME en de relatie met adapters en modellen

4.3.2 Overwegingen ten aanzien van de ontwikkeling van D-FRAME

De schema's op de voorgaande pagina's zijn relatief eenvoudig, vanzelfsprekend is de uitvoering minder eenvoudig. Ook voor Delft-FEWS heeft het veel inspanning gekost eer het zich ontwikkeld had tot een wereldwijd gebruikt early warning system. Een aantal van de belangrijkste uitdagingen voor een eventueel D-FRAME pakket worden hieronder op een rij gezet en kort toegelicht.

Omgaan met grote aantallen vrijheidsgraden in optimalisatievraagstukken

Wanneer strategieën in de tijd doorgerekend worden geeft dat, zeker voor netwerken, een probleem met een haast oneindig aantal vrijheidsgraden. Stel, we kijken naar een optimale strategie voor een dijkvak van 200 jaar, zoals bij de casus waterkeringen in fase 1 van ROBAMCI gebeurt, dan is het goed behapbaar. Wanneer we kijken naar de optimale verdeling van de overstromingskans van een dijktraject over 20 dijkvakken met elk 3 dominante faalmechanismen, en dat over 200 jaar, explodeert het aantal variabelen. Niet in de laatste plaats omdat hierin geoptimaliseerd wordt. Wanneer blind, alle mogelijke faalkansverdelingen doorgerekend worden zijn er al $20 \times 3 = 60$ plaatsen waar ingegrepen kan worden, keer 200 jaar dus in totaal 12000 investeringsopties die afzonderlijk ook nog zeer veel verschillende groottes kunnen hebben (kleine versterking, grote versterking). Daarbij moet ook opgemerkt worden dat hierin enkel versterkingen zijn meegenomen, geen zaken als monitoring, intensief beheer enzovoorts. Bij optimalisaties wordt uiteraard zelden iedere optie doorgerekend maar worden efficiënte algoritmes gebruikt om oplossingen te vinden. Grofweg zijn er om het probleem van de grote aantallen vrijheidsgraden op te lossen drie typen oplossingen die afzonderlijk of samen het probleem kunnen inperken: efficiënte optimalisatietechnieken gebruiken, het vereenvoudigen van de relatie tussen prestatie en kosten (bijvoorbeeld met een vaste kostencurve) of het handmatig definiëren van een beperkt aantal strategieën en geen gebruik maken van optimalisatie.

- Efficiënte optimalisatietechnieken: Als gezegd zijn voor optimalisaties zeer veel verschillende methoden beschikbaar om efficiënt een optimum te zoeken. Door enkel te zoeken naar het relevante deel van de oplossingsruimte kan een optimalisatie veel sneller uitgevoerd worden. Dit kan ook gedaan worden door combineren van technieken en gebruiken van constraints om het aantal mogelijke combinaties van variabelen in te dammen. Twee mogelijke opties zijn:
 - Particle Swarm Optimization: door het genereren van steeds nieuwe realisaties in de probleemruimte kan bepaald worden waar het globale optimum zou moeten liggen. In volgende iteraties convergeren de realisaties in de richting van dit optimum. Het verloop van een optimalisatie is te vergelijken met een zwerm vogels die convergeren naar een optimale positionering van alle individuele vogels in de zwerm (Kennedy & Eberhart, 1995)
 - Artificial Neural Networks: een Artificial Neural Network is geïnspireerd op de werking van het brein, met als achterliggende gedachte dat een brein veel makkelijker de oplossing vindt van een probleem met veel variabelen dan een computermodel. Dit wordt gedaan op basis van ervaringen en daaruit volgende benaderingsfuncties. Eerst wordt het netwerk 'getraind' met een aantal cases, waarna hij andere, vergelijkbare problemen snel kan oplossen. Het gebruik van ervaring en benaderingsfuncties maakt het geschikt om grote en complexe optimalisatieproblemen op te lossen, voorbeelden in de civiele techniek en constructies zijn daarvan ook voor handen (Flood & Kartam, 1994; Moselhi, Hegazy, & Fazio, 1991). De gedachte achter een Neural Network is ook in lijn met de hypothese achter ROBAMCI: het generieke deel van asset management is voor iedere toepassing ongeveer hetzelfde, waardoor het mogelijk is om van andere toepassingen te leren. Een ANN zou daarom ideaal zijn om de resultaten van een toepassing te kunnen vertalen naar een andere toepassing ('enkele' mogelijke praktische problemen daargelaten).

Opgemerkt dient te worden dat een PSO algoritme ook met een Neural Network gecombineerd kan worden (Das, Pattnaik, & Padhy, 2014), bijvoorbeeld om deze te trainen.
- Gebruik van benaderingsfuncties: door het gebruik van benaderingsfuncties in plaats van het draaien van modellen kan de optimalisatie sneller uitgevoerd worden. Een voorbeeld van een geschikte techniek is die van de Adaptive Response Surface (ARS) (Steenackers, Presezniak, & Guillaume, 2009). Nadeel is dat mogelijk tweede orde effecten door bepaalde combinaties van parameters hierin minder goed worden weergegeven. Ook dit kan echter bijvoorbeeld gebruikt worden in combinatie met een van bovenstaande optimalisatietechnieken.
- Niet optimaliseren: Het is natuurlijk de vraag of in een instrumentarium als D-FRAME, wat vooral beheerders moet faciliteren, het optimaliseren nodig en/of gewenst is. Wanneer een beheerder zelf strategieën definieert en doorrekent kan het immers ook buitengewoon bruikbaar zijn. Overigens betekent dat niet dat bovenstaande technieken, zoals ARS niet nuttig zijn, maar de optimalisatieslag is dan niet nodig. Dit heeft als voordeel dat de kennis van de beheerder goed benut wordt. Een nadeel is dat een beheerder nog steeds vanuit zijn eigen kennis redeneert, waardoor het intrinsiek onzeker is of hij een (bijna) optimale strategie zal kiezen.

Presentatie van resultaten die specifiek is maar toch generiek op te zetten

Een belangrijk onderdeel van D-FRAME is het inzichtelijk presenteren van resultaten, maar dit wel op een generieke manier. Een onderdeel hiervan is bijvoorbeeld waarop geoptimaliseerd wordt en hoe economische eenheden worden weergegeven. Uit ervaringen

met bijvoorbeeld de casus Waterkeren blijkt dat Netto Contante Waarde voor een beheerder helemaal niet perse een bruikbare eenheid is. Naar de verschillende economische eenheden en hun relevantie voor verschillende beheerders wordt in het vervolg op dit rapport nog een kort onderzoek gedaan.

4.4 Discussie & Conclusies

In dit hoofdstuk is het ROBAMCI framework versie 0 gepresenteerd en toegelicht. Het framework bestaat uit 3 onderdelen: een processchema, een blauwdruk voor een instrumentarium voor kwantitatieve onderbouwing en een model voor het beoordelen van de kwaliteit van informatie (zie volgend hoofdstuk). Met de eerste twee onderdelen is geïllustreerd hoe de fasen in levenscycli van netwerken en assets procesmatig samenhangen, en hoe dit te vertalen valt naar een kwantitatieve analyse, met het gebruik van (al bestaande) (fysische) modellen. Het processchema kan in vervolgfases van ROBAMCI worden gebruikt om sturing te geven aan cases. Vice versa kan het worden aangescherpt met ervaringen uit cases, in deze cases kan ook het instrumentarium ontwikkeld worden. Er is een aantal overwegingen gegeven van uitdagingen die bij de opzet van het instrumentarium spelen, deze kunnen in cases verder verkend en uitgewerkt worden.

5 Informatiekwaliteitsmodel

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de beoordeling van kwaliteit van data en informatie bij beheer van assets in het algemeen, en dijken in het bijzonder. Als onderdeel van het generieke framework is een generiek informatiekwaliteitsmodel ontwikkeld. Het model biedt handvatten aan de gebruiker van data en informatie om hiaten in de kwaliteit van data en informatie inzichtelijk en hanteerbaar te maken. Het doel van het informatiekwaliteitsmodel is om stapsgewijs tot verbetering van het beheerproces te komen, waarbij verworven inzichten steeds opnieuw gebruikt worden in volgende projecten en fasen van de levenscyclus. Om dit te concretiseren is de toepassing gemaakt voor een waterkering. In principe zijn de algemene theorieën over datakwaliteit echter op iedere soort infrastructuur toepasbaar. In paragraaf 5.1 wordt een theoretisch kader gegeven voor de beschrijving van kwaliteit van data en informatie. Vervolgens wordt in paragraaf 5.2 ingegaan op de communicatie van data en informatie tussen verschillende niveaus in een organisatie. In paragraaf 5.3 wordt het model gepresenteerd waarbij wordt aangeduid wanneer en waarop het model toepasbaar is. Hier wordt ook de bruikbaarheid van het model geïllustreerd met een voorbeeld vanuit het perspectief van een veiligheidstoetsing van een waterkering.

5.1 Theoretisch kader

5.1.1 Methode

Voor de infrastructuursector is weinig literatuur beschikbaar met betrekking tot kwaliteit van data en informatie. In de infrastructuursector wordt veel op projectbasis gewerkt, waarbij veel aandacht is voor het eindresultaat en minder voor het proces en procesoptimalisatie (ingegeven door de uniekheid en eenmaligheid van het project). Heel anders is dit in de industrie, bij bedrijven met een continu 'productieproces', waar van nature veel meer een lifecycle management gedacht is. Productie kenmerkt zich door repeterende processen waarbij steeds een gelijk eindresultaat wordt gerealiseerd (of in elk geval nagestreefd). Hierbij kan een optimalisatie in het proces direct grote efficiëntieverbeteringen opleveren. In de tweede helft van de 20ste eeuw groeide de aandacht voor de rol van data en informatie in procesoptimalisatie. In deze context zijn verschillende onderzoeken naar kwaliteit van data en informatie uitgevoerd (beschreven in loop van deze sectie). Dit heeft geresulteerd in een beschrijving van kwaliteit van data en informatie middels definities en kwaliteitsdimensies (meetbare grootheden).

In dit hoofdstuk wordt de analogie getrokken tussen de productiesector/maakindustrie en het beheer/versterken van waterkeringen. Ondanks de grote verscheidenheid aan infrastructuur is steeds dezelfde generieke soort data en informatie nodig. Door beheeropgaven, en meer specifiek de versterkingsprojecten, als een repeterend 'productieproces' te beschouwen kan de hiervoor beschikbare literatuur vanuit de informatie-, sociale-, economische- en managementwetenschappen worden benut om kwaliteit van data en informatie bij beheer van infrastructuur te beschrijven. Door het beheer van informatie als een proces te zien kan ook in projecten veel winst geboekt worden.

5.1.2 Notie van datakwaliteit

In de literatuur wordt datakwaliteit gepresenteerd als een multidimensionaal concept. Vaak genoemde dimensies zijn accuraatheid (of nauwkeurigheid), compleetheid, consistentie en tijdigheid (of actualiteit). De keuze van deze dimensies is voornamelijk gebaseerd op intuïtief begrip, bedrijfservaring of literatuurreviews. Een beschouwing van de literatuur laat echter zien dat er geen algemeen consensus over datakwaliteitsdimensies is. In dit theoretisch

kader worden daarom verschillende invalshoeken belicht: de database aanpak, het informatiesysteem en het gebruikersperspectief.

5.1.2.1 De database aanpak

Fox et al. (1994) gebruiken een concept dat is ontwikkeld vanuit onderzoek naar databases. Hierbij wordt gewerkt met een abstract beeld (model) van de wereld. Een beeld bestaat uit entiteiten die dienen als model representaties van hun tegenhangers in de werkelijkheid. In de klassieke database aanpak is een entiteit een element uit een entiteitsklasse gedefinieerd door een set attributen. Elk attribuut heeft een domein, een set van mogelijke waarden voor dat attribuut in het model. Binnen dit kader wordt een datum (of data item) gedefinieerd als een triple $\langle e, a, v \rangle$ waarbij de waarde v is geselecteerd uit het domein van attribuut a om de waarde van attribuut a voor entiteit e te representeren. Data is gedefinieerd als een collectie van data items.

Een voorbeeld: dijken kunnen worden gezien als entiteitsklasse. Specifieke dijken, zoals bijvoorbeeld de Hondsbossche zeewering, zijn hierin een entiteit. Attributen van deze dijk zijn bijvoorbeeld de kruinhoogte, lengte, bekleding, etc. De waarde van de attributen voor de specifieke entiteit zouden bijvoorbeeld 11 m +NAP, 5.5 kilometer en asphalt kunnen zijn.

Bovenstaande definitie zegt dat alle data is gebaseerd op een model van een deel van de werkelijkheid. Dit heeft tot gevolg dat volledige beoordeling van datakwaliteit ook bestaat uit een beoordeling van het model waar de data onderdeel van uit maakt. In de praktijk is kwaliteitsbeoordeling vaak gelimiteerd tot kwaliteit van datawaarden (Fox et al., 1994).

De notie van data- of informatiekwaliteit is afhankelijk van het gebruik van de data. Wat in een bepaald geval als kwalitatief goede data beschouwd wordt, kan in een ander geval onvoldoende zijn (Wand & Wang, 1996). Het blijkt dat kwaliteit van data betrekking heeft op drie aspecten: 1) de kwaliteit van de datawaarden op zichzelf, los van de context waarin de data gebruik wordt, 2) de kwaliteit van het model of het systeem waarin data wordt geproduceerd en gebruikt met het oog op de context waarin dit gebeurt en 3) de kwaliteit van de representatie en registratie van data waarbij het gaat om hoe data wordt overgebracht op de gebruiker (Fox et al., 1994).

Fox et al. (1994) definiëren en bediscussiëren de dimensies van data gerelateerd aan de kwaliteit van data waarden. Deze dimensies kunnen volgens de auteurs worden gegroepeerd in vier categorieën: accuraatheid, actualiteit, compleetheid en consistentie. Ook al gaat datakwaliteitsbeoordeling niet alleen over data waarden, toch zijn dat de dimensies die het meest met datakwaliteit geassocieerd worden.

5.1.2.1 Het informatiesysteem

Wand & Wang (1996) gebruiken bij het definiëren van datakwaliteit een systeemontwerp georiënteerde aanpak. Zij baseren de aanpak op de notie dat een informatiesysteem de rol heeft een representatie van een systeem uit de werkelijkheid te geven. Gebreken in de representatie zijn gedefinieerd als het verschil tussen het beeld van het systeem zoals onttrokken uit het informatiesysteem, en het beeld van het systeem door direct naar de werkelijkheid te kijken. Vanuit verschillende typen representatiegebreken zijn datakwaliteitsdimensies afgeleid.

Bij het ontwikkelen en gebruiken van een informatiesysteem vinden twee transformaties plaats. Ten eerste de representatietransformatie waarin het beeld van de werkelijkheid wordt vertaald naar data. Vervolgens is er de interpretatietransformatie waarin de representatieve data wordt vertaald naar een beeld van de werkelijkheid. Het informatiesysteem functioneert goed als beide transformaties 'vlekkeloos' verlopen (Wand & Wang, 1996). De interpretatietransformatie is afhankelijk van de gebruiker, maar de representatietransformatie ligt verscholen in het systeemontwerp. De gebreken hierin worden gebruikt om intrinsieke kwaliteitsdimensies te definiëren.

Wand & Wang (1996) onderscheiden 3 ontwerpgebreken. De eerste is 'incomplete representatie' (niet uitputtend) waarbij niet alle rechtmatige toestanden van de werkelijkheid naar het informatiesysteem vertaald (kunnen) worden. Een voorbeeld hiervan bij een waterkering is dat er een faalmechanisme over het hoofd wordt gezien. De tweede is 'dubbelzinnige representatie' waarin twee toestanden uit de werkelijkheid worden vertaald naar een toestand in het informatiesysteem. Hierdoor is er onvoldoende informatie om vanuit de data de gerepresenteerde werkelijkheid terug te vertalen. Een voorbeeld hiervan dat speelt bij waterkeringen is het vertalen van parameter eigenschappen naar representatieve dwarsdoorsneden. Tot slot is er de 'betekenisloze toestand' waarbij er toestanden in het informatiesysteem voorkomen die geen betrekking hebben op toestanden in de werkelijkheid. Bij waterkering heeft deze toestand bijvoorbeeld betrekking op data met betrekking tot grondeigenschappen die niet relevant zijn voor ontwerp of toetsing.

Naast drie ontwerp gebreken zijn er twee typen operatiefouten te onderscheiden: 1) een toestand uit de werkelijkheid wordt vertaald naar een rechtmatige maar foute toestand in het informatiesysteem of 2) een toestand uit de werkelijkheid wordt vertaald naar een betekenisloze toestand in het informatiesysteem. Operatiegebreken zijn typisch fouten die ontstaan door foutief menselijk handelen tijdens de operatie (Wand & Wang, 1996).

5.1.2.2 *Gebruikersperspectief*

Wang & Strong (1996) gebruiken het concept 'geschiktheid voor gebruik' bij het beschrijven van kwaliteit van data. Dit concept benadrukt het belang van het gebruikersperspectief. Uiteindelijk bepaalt de datagebruiker of data wel of niet geschikt is voor gebruik en hiermee de kwaliteit van de data specifiek voor de gebruiker. De auteurs definiëren datakwaliteit zodoende als 'data die geschikt is voor gebruik door data gebruikers'. Verder worden datakwaliteitsdimensies gedefinieerd als een set attributen die een enkel aspect van datakwaliteit representeren. De attributen van datakwaliteit worden op basis van empirisch onderzoek verzameld bij datagebruikers. Hiertoe is bij gebruikers geïdentificeerd welke karakteristieken zij gebruiken om te toetsen of data geschikt is om te gebruiken in de taak waar zij voor staan.

Op basis van relevante literatuur en ervaring met datagebruikers hebben Wang & Strong (1996) een conceptueel kader opgesteld waarin datakwaliteit wordt beschreven in de volgende aspecten:

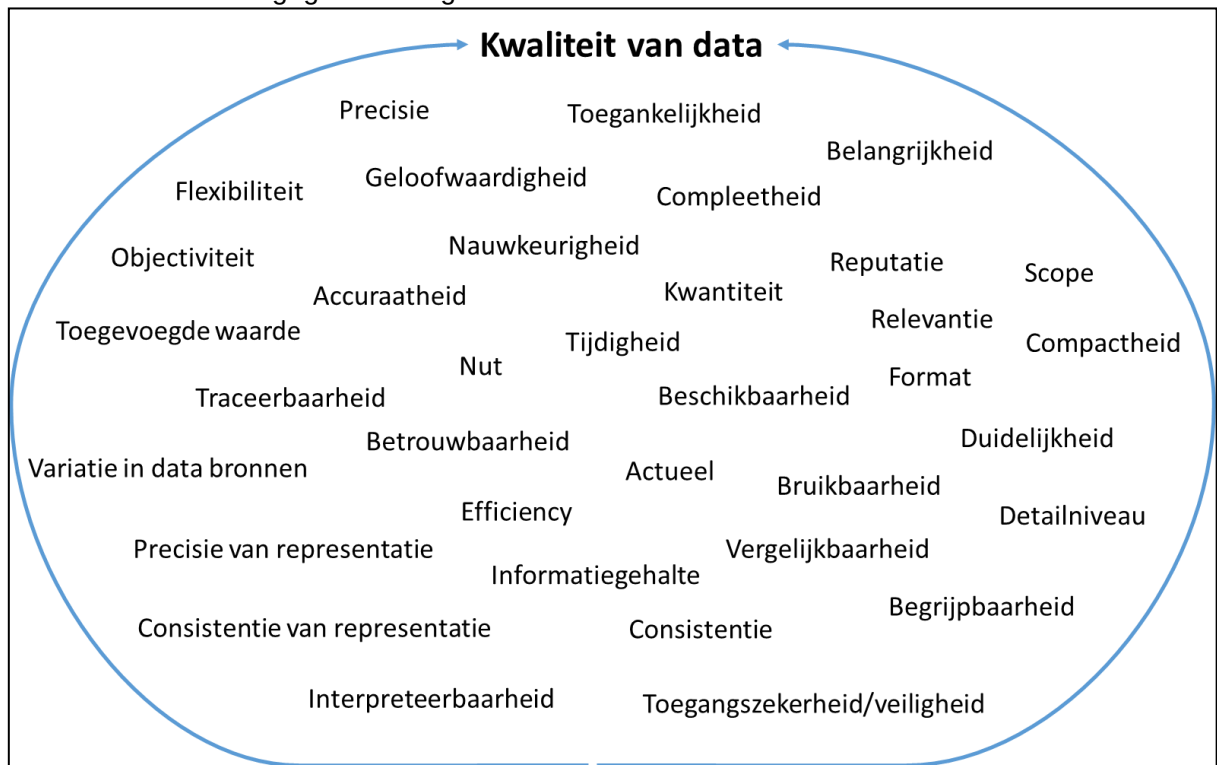
- Data moet toegankelijk zijn voor de datagebruiker. De gebruiker weet hoe data te achterhalen.
- De gebruiker is in staat de data te interpreteren.
- De data is relevant en op tijd beschikbaar voor gebruik in het besluitvormingsproces.
- De gebruiker beoordeelt de data als accuraat. Hiermee is de data correct, objectief en afkomstig van betrouwbare bronnen.

Het conceptuele kader en de empirische resultaten leiden tot vier onderscheidende kwaliteitseigenschappen die samen de algemene kwaliteit van data voor gebruikers bepalen: intrinsieke datakwaliteit, contextuele datakwaliteit, representatieve datakwaliteit en toegankelijkheidskwaliteit.

Intrinsieke kwaliteit geeft aan dat data op zichzelfstaande kwaliteit heeft. Contextuele kwaliteit benadrukt de noodzaak om data kwaliteit binnen de context van de taak te zien waar de gebruiker voor staat. Representatieve kwaliteit en toegankelijkheidskwaliteit onderstreept het belang van de rol van systemen waar data onderdeel van is (Wang & Strong, 1996).

5.1.3 Kwaliteitsdimensies

In de literatuur worden een groot aantal kwaliteitsdimensies onderscheiden en beschreven. Een overzicht is weergegeven in Figuur 5.1.



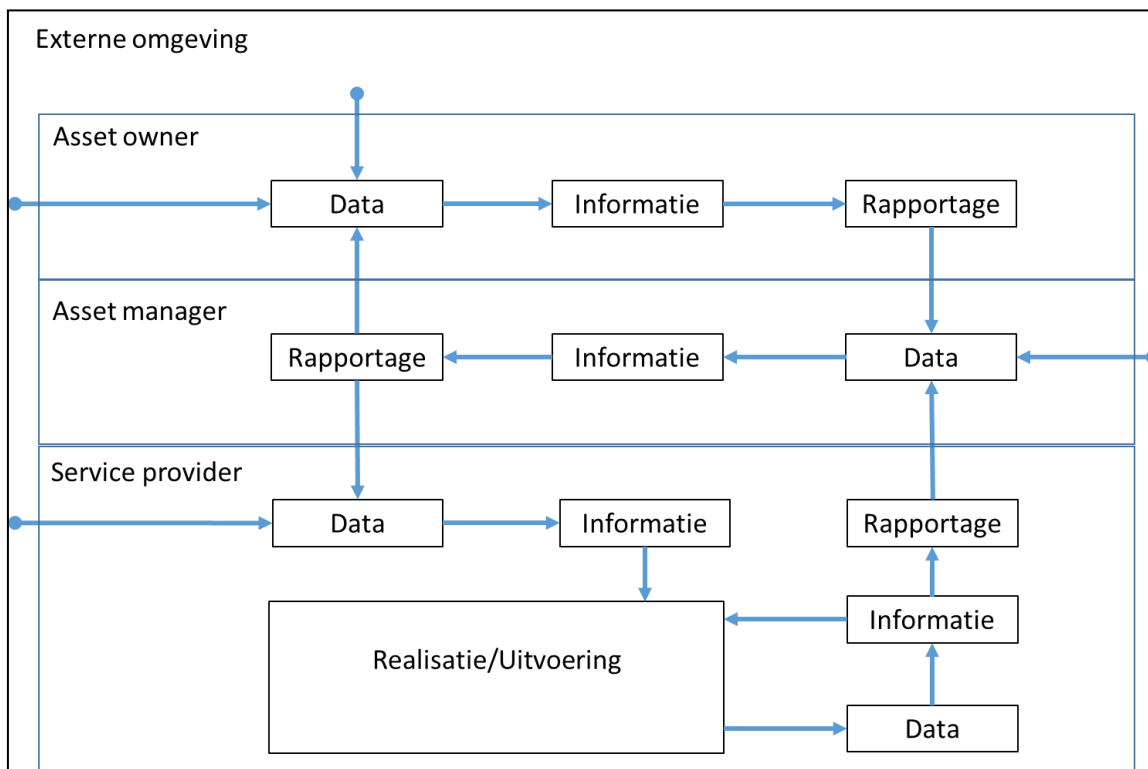
Figuur 5.1 Kwaliteitsdimensies van data

Bij het indelen van de dimensies wordt in de literatuur veelal onderscheid gemaakt in intrinsieke kwaliteit, contextuele kwaliteit, representatieve kwaliteit en toegangskwaliteit. Lee et al. (2002) geven een overzicht van de toekenning van dimensies aan deze vier categorieën voor zowel de wetenschap als de data gebruiker.

In dit onderzoek worden de dimensies ingedeeld vanuit het perspectief relevantie voor de organisatorische niveaus. In paragraaf 5.3.3 worden aan elk niveau de meest relevante dimensies toegekend.

5.2 Gebruik van data en informatie

In Figuur 5.2 is de rol van data en informatie in de beheerorganisatie geduid. Met de term 'data' wordt gerefereerd naar *onbewerkte* gegevens. Op elk niveau wordt data door de betrokken actor getransformeerd tot bruikbare informatie. Dit gebeurt met de op elk niveau beschikbare kennis en ervaring m.b.t. de taken en verantwoordelijkheden van het betreffende niveau. De informatie wordt vervolgens vastgelegd in een rapportage (mondeling/schriftelijk) en doorgegeven aan het volgende organisatorische niveau. Voor elk niveau is de rapportage vanuit het voorgaande niveau input voor de beschikbare data. Deze rapportage is data die vanzelf beschikbaar komt vanuit het voorgaande niveau, bijvoorbeeld bij het geven van doelen, taken en opdrachten. Of anderzijds data die zelf bij het voorgaande niveau ingewonnen moet worden, als bijvoorbeeld verduidelijking gewenst is.

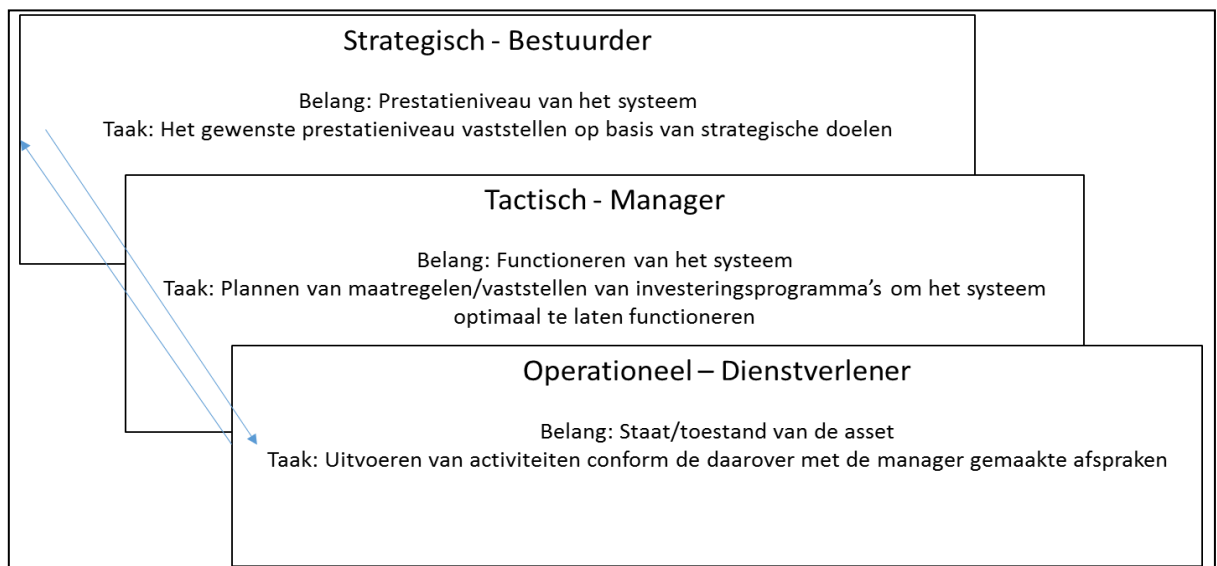


Figuur 5.2 Data- en informatiestromen in de beheerorganisatie

In de figuur zijn toestanden aangegeven in vierkante blokken. Processen die een product als resultaat hebben, zijn geschematiseerd middels pijlen. Het informatiekwaliteitsmodel is erop gericht kwaliteit van data te verbeteren waardoor de basis van het transformatieproces tot informatie op orde is. De kwaliteit van de informatie is naast de kwaliteit van de data ook afhankelijk van de kwaliteit van de transformatie. De kwaliteit hiervan hangt nauw samen met de kwaliteit van de organisatie en de kwaliteit, kunde, ervaring en expertise van de datagebruiker.

Uit de figuur wordt duidelijk dat de drie onderscheiden organisatorische niveaus data uitwisselen. Elk niveau gebruikt de vastgelegde processen of besluitvoering vanuit aanliggende niveaus om de eigen taken uit te voeren. De taken en belangen die op elk niveau gelden zijn samengevat in Figuur 5.3.

Door het verschil in belangen, taken en verantwoordelijkheden is voor elk niveau een ander type informatie relevant. Zo zal de dienstverlener vooral geïnteresseerd zijn in operationele informatie. Deze kan worden verkregen vanuit metingen en observaties van het systeem/het object of registratie van de (aan het systeem/object) verrichte handelingen. De manager is vooral geïnteresseerd in tactische informatie die het mogelijk maakt maatregelen te plannen en prioriteren. De rapportages vanuit de dienstverleners geven de manager inzicht in de staat, toestand en het functioneren van het systeem/het netwerk. Met name bij integrale projecten bestaat een deel van de data uit informatie verschaft door managers (zelfde niveau) van andere disciplines/andere netwerken die het eigen systeem/netwerk raken/beïnvloeden. De bestuurder is voornamelijk geïnteresseerd in strategische informatie. Relevante data is het prestatieniveau van het systeem/netwerk die wordt gerapporteerd door de manager. Verder houdt de bestuurder op strategisch niveau rekening met ontwikkelingen vanuit rakende systemen/netwerken en krijgt hij wensen en eisen vanuit de politiek opgelegd.



Figuur 5.3 Belangen en taken op elk organisatorisch niveau

5.3 Het informatiekwaliteitsmodel

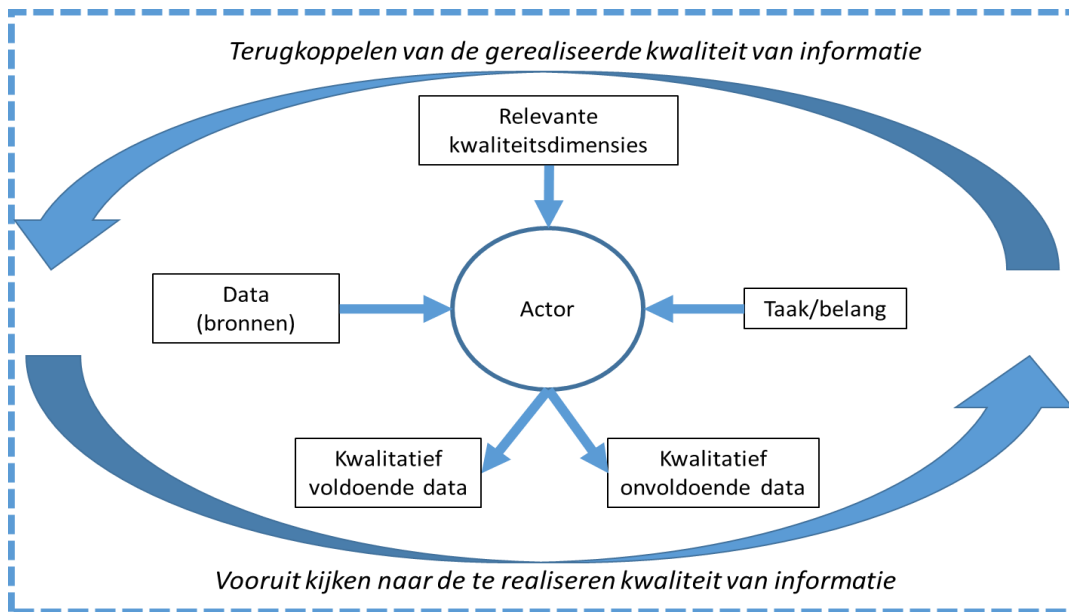
Om kwaliteit van data en informatie te beoordelen worden data- en informatiestromen en theoretische kwaliteitsdimensies bij elkaar gebracht.

5.3.1 Beoordelen van datakwaliteit

De essentie van het informatiekwaliteitsmodel is het onderbouwen wanneer data van voldoende kwaliteit is om deze te transformeren naar goede en bruikbare informatie als onderbouwing van een goede robuuste beslissing. Het realiseren van data van voldoende kwaliteit draagt zodoende bij aan kwaliteit van informatie. Het beoordelingsproces is geschematiseerd in Figuur 5.4.

Centraal in het proces staat de verantwoordelijke actor, ofwel de datagebruiker, die de koppeling tussen data, informatie en kwaliteit legt. De datagebruiker bepaalt de taak m.b.t. het organisatorische niveau, inventariseert de data(bronnen) en bepaalt de voor zijn vraagstuk relevante kwaliteitsdimensies. Per databron checkt de gebruiker in hoeverre de kwaliteitsdimensies gelden, en wat er is gedaan om de data van voldoende kwaliteit te laten zijn.. De taak bepaalt welk kwaliteitsniveau door de actor als voldoende wordt beoordeeld.

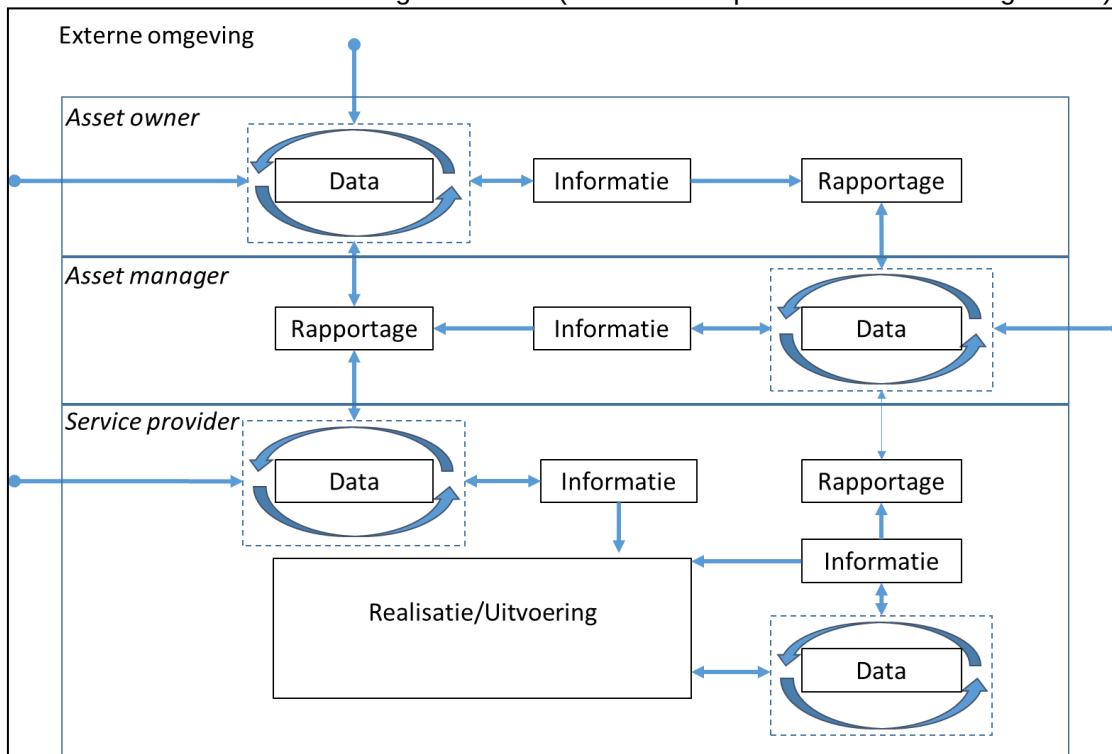
Door de beoordeling te maken wordt kwalitatief goede data gescheiden van kwalitatief slechte data. De slechte data is data die voor de taak wel nodig is maar eerst verbeterd moet worden voordat deze gebruikt kan worden. De goede data dient als input voor het transformatieproces en leidt zodoende, mits de overige condities goed zijn, tot kwalitatief goede informatie en onderbouwde besluiten. Het realiseren van data met een voor de taak voldoende kwaliteitsniveau is een iteratief proces. Dit betekent dat bevindingen over datakwaliteit worden teruggekoppeld naar de databronnen en/of dataverstrekters. Maar ook dat er vooruit wordt gekeken naar de informatie die uiteindelijk beschikbaar moet komen en weer gebruikt gaat worden door het aangrenzende organisatorische niveau.



Figuur 5.4 Processchema voor realiseren van kwaliteit van data en informatie

5.3.2 Gebruik

Het schema uit Figuur 5.4 kan worden toegepast op elk niveau in de beheersorganisatie. Op elk niveau wordt, weliswaar op verschillende abstractieniveaus, data gebruikt. Door het schema voor de realisatie van kwalitatief hoogwaardige data in te voegen in de data- en informatiestromen (Figuur 5.2) wordt het stroomschema van Figuur 5.5 verkregen. In de kaders wordt kwaliteit van data gerealiseerd (zie hierin het processchema van Figuur 5.4).

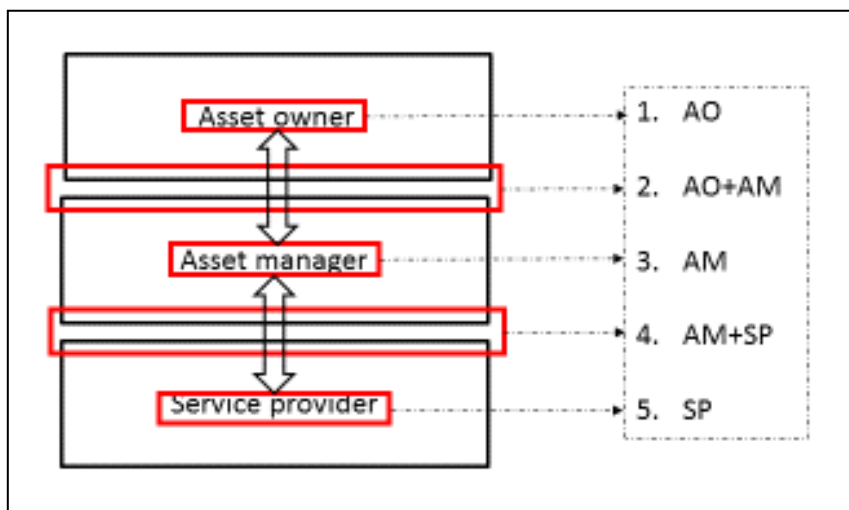


Figuur 5.5 Schematisering van data- en informatiestromen in combinatie met het beoordelen van de kwaliteit van data

Op vier plaatsen in het stroomschema is de beoordeling van kwaliteit opgenomen. Dit zijn de locaties waar data wordt ingewonnen en waarbij de kwaliteit van die data dus aan de orde is. Bij goed doorlopen van de cyclus komt aan het licht wanneer data aangevuld of kwalitatief verbeterd moet worden om tot een goede rapportage of beslissing te komen

Iedere organisatorisch niveau is primair zelf verantwoordelijk voor de kwaliteit van de geproduceerde informatie en daardoor dus verantwoordelijk voor de kwaliteit van gebruikte data. Op elk niveau zal de datagebruiker voor gebruik moeten nagaan of de data van voldoende kwaliteit is om te leiden tot informatie op basis waarvan hij zijn taak kan uitvoeren.

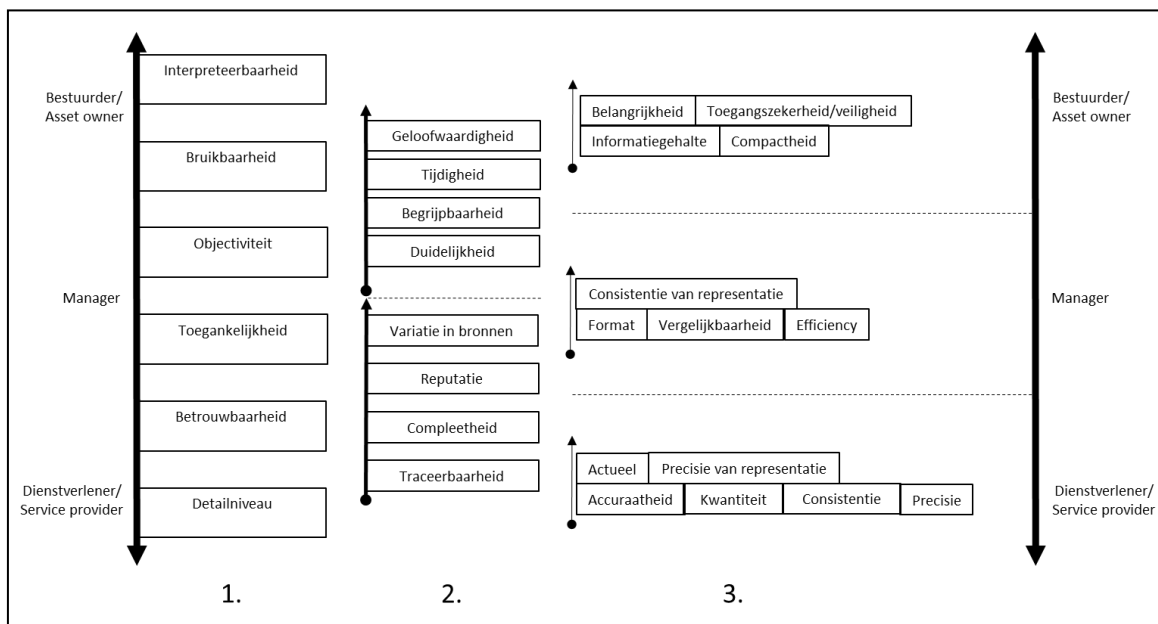
Afgezien van het eigen niveau speelt data en informatie ook een rol tussen de niveaus. Informatie is namelijk in de vorm van een rapportage weer data voor het aangrenzende niveau, omdat verschillende rolhouders verschillende typen data en informatie nodig hebben voor hun taken. Dit betekent dat de kwaliteit van data ook tussen de niveaus een rol speelt en het voor de verzender zaak is de kwaliteit van rapportage af te stemmen op gebruik door het ontvangende niveau. Aan de ontvanger de taak om de kwaliteit van de informatie opnieuw te toetsen en hierover terugkoppeling te verschaffen aan de verzender. Deze kan hierop eventueel het eigen proces en de rapportage verbeteren. De tweezijdige pijlen van en naar het dataproduct (Figuur 5.5) benadrukken het iteratieve karakter en de samenhang tussen rapportage, data en informatie. De rode blokken in Figuur 5.6 geven aan waar in de organisatie het informatiekwaliteitsmodel van toepassing is. Dus tussen de niveaus om de kwaliteit van data en informatie die wordt uitgewisseld te beoordelen voordat deze door het aangrenzende niveau wordt gebruikt en per niveau om te zorgen voor kwalitatief voldoende data met betrekking tot de taak eigen: het omzetten van data in relevante en bruikbare informatie



Figuur 5.6 Rollen en combinaties van rollen die verantwoordelijk zijn voor kwaliteit van data en informatie

5.3.3 Relevante kwaliteitsdimensies

Niet alle geïdentificeerde datakwaliteitsdimensies (Figuur 5.1) zijn even relevant voor de verschillende niveaus. In Figuur 5.7 is een voorstel voor verdere indeling weergegeven.



Figuur 5.7 Indeling van kwaliteitsdimensies naar organisatorische niveaus

Een aantal dimensies zijn voor alle drie de niveaus toepasbaar, deze staan in de eerste kolom. Voor alle data geldt op ieder niveau dat deze bruikbaar, objectief, betrouwbaar, toegankelijk, te interpreteren en van het juiste detailniveau moet zijn. Of aan de kwaliteitseisen voor deze dimensies wordt voldaan is wel sterk afhankelijk van het betreffende niveau. Zo zal het detailniveau op operationeel niveau hoog moeten zijn en op strategisch niveau juist laag.

In de tweede kolom staan dimensies die voor twee niveaus van belang zijn. Enerzijds geldt voor het operationele en tactische niveau dat data traceerbaar, compleet, van goede reputatie en op basis van verschillende bronnen moet zijn. Anderzijds geldt voor het tactische en strategische niveau dat data geloofwaardig, tijdig, begrijpelijk en duidelijk moet zijn. De pijlen geven aan dat het om dimensies van kwaliteit gaat die spelen bij data die verkregen is vanuit een rapportage vanuit een lager organisatorisch niveau.

In de derde kolom worden dimensies geschaard die belangrijk zijn voor beslissing op een bepaald niveau. Voor de data die de dienstverlener verzamelt geldt dat deze actueel, accuraat, van voldoende kwantiteit, precisie en precies gerepresenteerd moet zijn. Voor de data die de manager van de dienstverlener ontvangt geldt dat deze vergelijkbaar, consistent gerepresenteerd, efficiënt en van juist format moet zijn. De data die door de bestuurder wordt ontvangen van de manager moet belangrijk en compact zijn, een hoog informatiegehalte hebben en veilig zijn (alleen beschikbaar voor diegene waar dit voor bedoeld is).

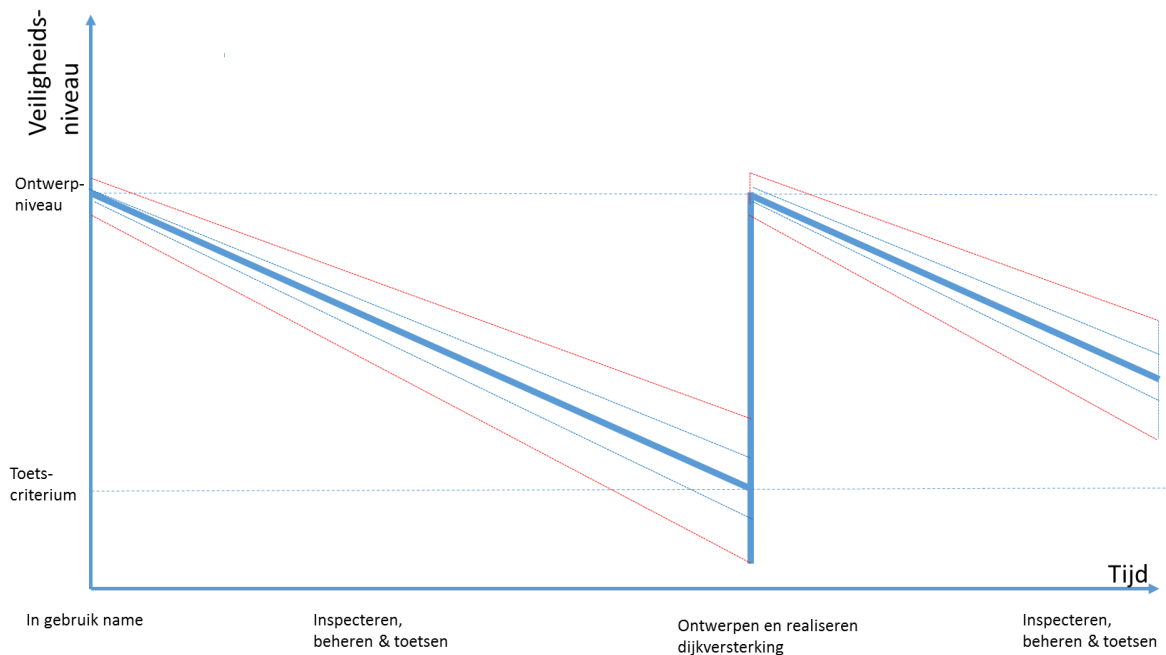
5.4 Vertaling naar lifecycle management

In deze paragraaf wordt het gebruik van het informatiekwaliteitsmodel gekoppeld aan lifecycle management. Dit wordt gedaan met behulp van het 'zaagtand model', dat schematisch is weergegeven in Figuur 5.8, en met een dijk(versterkingsopgave) als voorbeeld.

5.4.1 De globale levenscyclus van een dijk

In de figuur is het verloop van het veiligheidsniveau van een dijk uitgezet tegen de tijd. De dikke blauwe lijnen geven het verwachte verloop aan. Na aanleg wordt verwacht dat het veiligheidsniveau op ontwerpniveau is. Dit niveau daalt in de tijd als gevolg van bijvoorbeeld schades aan de dijk, verzakkingen en/of stijgende hydraulische belastingen. Na aanleg vindt een cyclus van inspecteren, onderhouden en toetsen plaats. Inspectie vindt plaats om de

onderhoudsbehoefte vast te stellen. Onderhoud wordt uitgevoerd om het veiligheidsniveau zo veel mogelijk in stand te houden. Op basis van een vaste frequentie wordt tevens een veiligheidstoets uitgevoerd om te beoordelen of het veiligheidsniveau nog boven het wettelijk toegestane niveau (toetscriterium) is.



Figuur 5.8 Schematische weergave van het veiligheidsniveau van een dijk gedurende de levenscyclus

Idealiter wordt door middel van inspectie en toetsing het exacte moment waarop het veiligheidsniveau niet langer voldoet vastgesteld. Als dit gebeurt, kan een dijkversterking worden uitgevoerd net voor of op het moment dat het toetscriterium wordt bereikt. Na de versterking springt het verwachte veiligheidsniveau weer naar ontwerpniveau en begint de levenscyclus als het ware opnieuw.

5.4.2 (Reduceren van) onzekerheden

Bij perfecte informatie kunnen onderhoud en versterkingen optimaal worden gepland. Echter als gevolg van onzekerheden (imperfecte informatie) bevindt het daadwerkelijke veiligheidsniveau zich mogelijk onder of boven het verwachte niveau. Er is sprake van een bandbreedte van het daadwerkelijk veiligheidsniveau rondom de verwachte waarde. Deze bandbreedte is met rode lijnen weergegeven in de figuur. Als gevolg van de onzekerheden bereikt het veiligheidsniveau mogelijk eerder of later het toetscriterium dan op basis van het verwachte niveau voorspeld zou worden. De beslissingen op basis van het verwachte niveau zijn dus mogelijk niet optimaal. Als het daadwerkelijke niveau wordt gerepresenteerd door de onderste rode lijn wordt een versterking mogelijk veel te laat uitgevoerd waardoor er een onverantwoord hoog risico wordt gelopen. Als het daadwerkelijke niveau door de bovenste rode lijn gerepresenteerd wordt, wordt een versterking mogelijk onnodig (vroeg) uitgevoerd waardoor schaarse middelen niet effectief worden ingezet.

Door middel van betere data en informatie kan de onzekerheid over het werkelijke veiligheidsniveau worden verkleind. Als de data en informatie kwalitatief goed is, zal het verwachte veiligheidsniveau veel dichter in de buurt liggen bij het daadwerkelijk niveau. Met andere woorden: met kwalitatief goede data en informatie kan het daadwerkelijk veiligheidsniveau beter ingeschat worden. De onzekerheden worden gereduceerd waardoor

de mogelijke afwijking (de bandbreedte) wordt verkleind. De gereduceerde bandbreedte is in de figuur weergegeven middels blauwe stippellijnen.

5.4.3 Voorbeeld

In deze paragraaf wordt een voorbeeld voor invulling van het informatiekwaliteitsmodel en de invloed op lifecycle beslissingen gegeven. Het uitgangspunt hier is een dijkvak dat op faalmechanismen moet worden getoetst (wettelijke veiligheidstoetsing). Het uitvoeren van een toets op dijkvakniveau is een typisch voorbeeld van een taak op het niveau van de dienstverlener: het operationele niveau.

Het model beoordeelt de kwaliteit van databronnen met betrekking tot de taak en de daaraan gerelateerde informatiebehoeften. In Tabel 5.1 is een voorbeeld van een datakwaliteitsbeoordeling gegeven voor het bepalen van grondeigenschappen in een toetsing. Bij de beoordeling wordt voor elke informatiegroep (in dit voorbeeld dus grondeigenschappen) een inventarisatie van relevante databronnen gemaakt. Een relevante bron is gedefinieerd als een bron waarvan de beschikbaarheid resulteert in minder onzekerheid. Als de bron beschikbaar is, wordt in de volgende stap voor elke bron gekeken naar een aantal relevante kwaliteitsdimensies. Bij elke dimensie wordt een korte toelichting/interpretatie gevraagd waarmee de aanwezigheid van het betreffende kwaliteitsonderdeel concreet beoordeeld/onderbouwd kan worden. Als de data slecht scoort op deze dimensies moet de data verbeterd worden voordat deze gebruikt kan worden. Als verbetering niet haalbaar is, moet worden afgewogen of verwerping van de bron tot meer of minder onzekerheid leidt dan het gebruik van een kwalitatief slechte bron (op een of meerdere dimensies). Als de data goed scoort op de onderkende dimensies betekent dit dat met kwalitatief goede data wordt gewerkt. Dit heeft tot gevolg dat de informatie (in dit geval grondeigenschappen) kwalitatief goed is. Met kwalitatief goede informatie wordt een accurater toetsresultaat verkregen. Dit leidt in Figuur 5.8 tot een smallere bandbreedte en daardoor tot beter lifecycle management: dijkversterkingsmaatregelen zijn effectiever omdat de juiste maatregelen op het juiste moment in de tijd bij de juiste dijken worden uitgevoerd.

Een relevante bron die niet beschikbaar is resulteert mogelijk in blijvende onzekerheid. Dit is met name het geval als het gaat om een bron die informatie bevat die niet via een andere bron getraceerd kan worden. In veel gevallen zijn bronnen echter aanvullend op elkaar en/of inwisselbaar. Dit is bijvoorbeeld het geval met gedocumenteerd grondonderzoek. De beschikbaarheid helpt bij het achterhalen van grondeigenschappen, maar deze kunnen ook achterhaald worden middels veldonderzoek. Het is de taak van de betrokken actor een gedegen afweging te maken tussen onzekerheidsreductie door het gebruik van meer databronnen en middelen. Hierbij speelt tevens dat de actor de consistentie van de databronnen moet bewaken. Gedocumenteerd grondonderzoek dat een beeld over grondeigenschappen geeft dat niet consistent is met het beeld dat volgt uit veldonderzoek, is mogelijk niet bruikbaar. Als de data volgend uit veldonderzoek echter van slechte kwaliteit is, is het veldonderzoek mogelijk niet bruikbaar en het gedocumenteerde grondonderzoek juist wel. Hiermee is consistentie van data uit verschillende bronnen dus een extra kwaliteitscheck.

Tabel 5.1 Kwaliteitsdimensies voor informatie en databronnen

Informatie-behoefte	Databron	Kwaliteitsdimensies	Toelichting/interpretatie
Grondeigen-schappen	Laboratorium-onderzoek	Betrouwbaarheid	Is het proces in lab naar behoren/naar protocol uitgevoerd?
		Kwantiteit	Doet aantal monsters en analyses recht aan omvang en karakteristiek van het dijkvak?
		Compleetheid	Zijn de relevante grootheden/parameters allemaal onderzocht?
		Traceerbaarheid	Kunnen de locaties en omstandigheden van grondmonsters worden herleid?
		Toegankelijkheid	Wordt de data gedocumenteerd?
	In situ grond-onderzoek	Betrouwbaarheid	Is het proces naar behoren/naar protocol uitgevoerd?
		Kwantiteit	Doet aantal metingen en analyses recht aan omvang en karakteristiek van het dijkvak?
		Compleetheid	Zijn de relevante grootheden/parameters allemaal onderzocht?
		Traceerbaarheid	Kunnen de locaties en omstandigheden van de metingen worden herleid?
		Interpreteerbaarheid	Mogelijk om meeteenheden te interpreteren en om te zetten naar rekenparameters?
		Bruikbaarheid	Mogelijk om puntmetingen te vertalen naar dwarsdoornede interpretaties en lengteprofielen?
		Toegankelijkheid	Wordt de data gedocumenteerd?
	Gedocumenteerd grondonderzoek	Beschikbaarheid	Is er gedocumenteerd grondonderzoek beschikbaar?
		Consistentie van representatie	Strookt de representatie met recent grondonderzoek: is het format bruikbaar?
		Traceerbaarheid	Zijn monsters en metingen terug te leiden naar locaties en omstandigheden?
		Vergelijkbaarheid	Is de data op dezelfde manier ingewonnen, en vergelijkbaar met recent onderzoek?

5.5 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk is het informatiekwaliteitsmodel conceptueel uitgewerkt en heeft het een plaats gekregen binnen assetmanagement en lifecycle management. Dit model kan dienen om de term 'data op orde', die vaak in relatie tot lifecycle management gebruikt wordt handen en voeten te geven. Met het voorbeeld in paragraaf 5.4 is een aanzet voor verdere uitwerking van het model gegeven. Voor vervolgstappen wordt aanbevolen invulling aan het model te geven voor verschillende fasen in de levenscyclus en voor de drie organisatorische niveaus. Dit betekent dat ingezoomd moet worden op zowel aanleg, inspectie, onderhoud, toetsing en versterking waarbij voor iedere fase een inventarisatie van relevante databronnen, kwaliteitsdimensies en informatiebehoefte wordt gemaakt. Dit niet alleen voor het operationele niveau, dus objectgebaseerd, maar ook voor het tactische en strategische niveau waarbij netwerken in ogenschouw worden genomen. Daarnaast wordt aanbevolen het model te valideren in praktijkcases. Hierin kan samen met de betrokken actoren invulling

worden gegeven aan de vraag wat in welke situatie relevante kwaliteitsdimensies zijn en hoe kwalitatief goede data op die dimensie gerealiseerd kan worden of zou moeten worden.

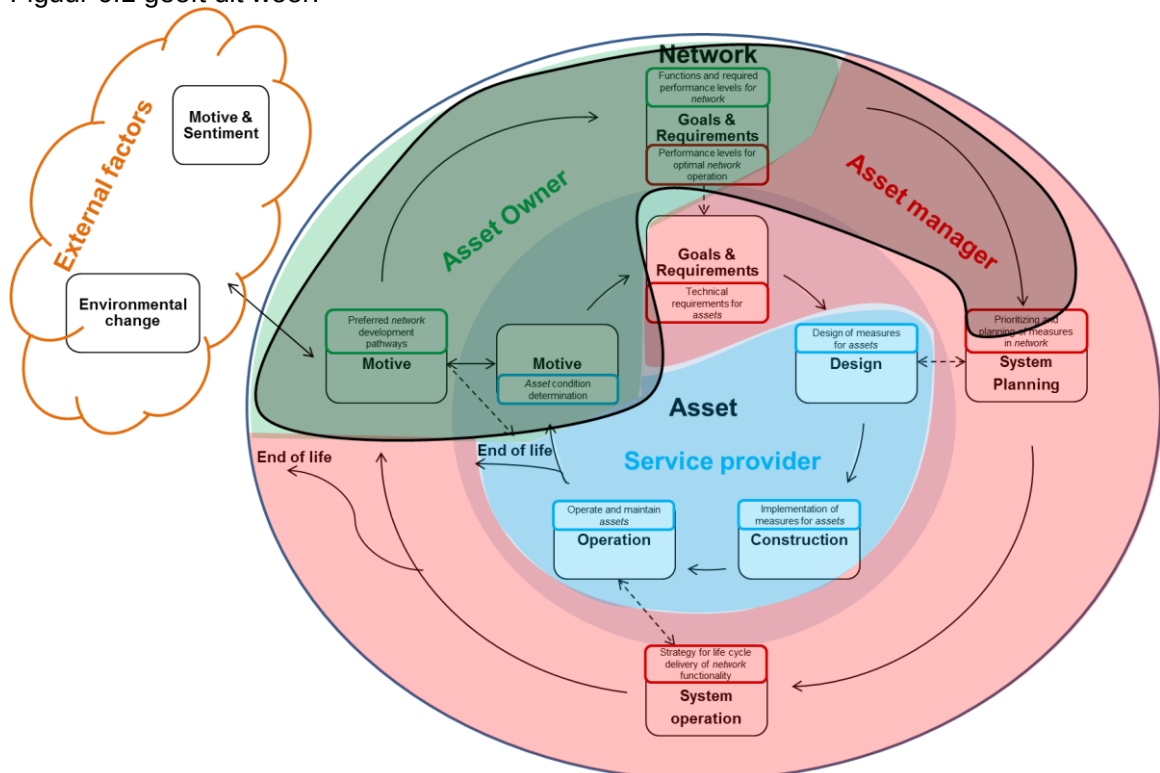
6 Toepassing van het framework

In dit hoofdstuk wordt geschetst welke plaats de verschillende cases innemen in het framework. In paragraaf 6.1 wordt dit voor de bestaande cases gedaan, in paragraaf 6.2 wordt voor de casus kustlijninzorg verder uitgewerkt hoe deze casus in het voorgestelde instrumentarium zou passen.

6.1 Plaats van ROBAMCI cases binnen het processchema van het framework

6.1.1 Kustlijninzorg

Voor de casus Kustlijninzorg is het Nederlandse kustlijninzorg beleid geëvalueerd. Dit is gedaan door een kosten-/batenanalyse van enerzijds de kosten van zandsuppleties en anderzijds de baten die dit oplevert op het gebied van recreatie (breed strand) en veiligheid (groter afslagprofiel). Momenteel is het beleid om de basiskustlijn te handhaven, op ieder vak waar deze dreigt te worden overschreden wordt daarom de benodigde hoeveelheid zand gesuppleerd. In de casus Kustlijninzorg wordt op twee manieren hiernaar gekeken: hoeveel moet er gesuppleerd worden zodat de kosten en baten in evenwicht zijn (dus aan de hand van de baten voor recreatie en veiligheid) en welk effect hebben deze en andere suppletie strategieën op netwerkniveau. Ook hier geldt dus dat er typisch wordt gekeken naar verschillende typen Goals & Requirements en dat de huidige doelen en normen worden geëvalueerd. Dit geeft veel inzicht in de doelmatigheid van de huidige praktijk. Dit is typisch een analyse op netwerkniveau omdat ook de relatie tussen duinvakken wordt beschouwd. Figuur 6.1 geeft dit weer.



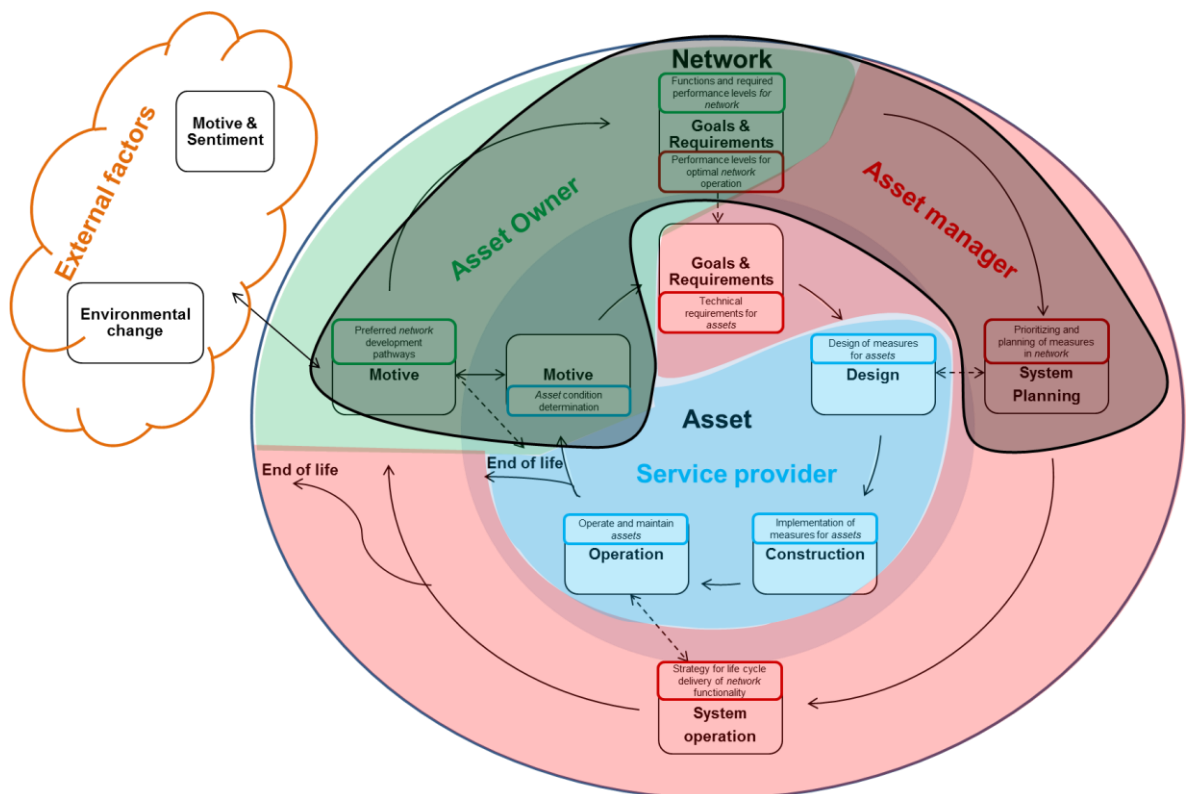
Figuur 6.1 Positionering van de casus Kustlijninzorg uit fase 1 van ROBAMCI binnen het framework.

De casus beschouwt een aantal algemene strategieën voor zandsuppleties, zonder daarbij expliciet de tijdstippen van investeren mee te nemen. Vandaar dat het vlak 'System Planning' slechts deels meegenomen is.

Opgemerkt dient te worden dat door Rijkswaterstaat enkele jaren terug is besloten om suppletiecontracten voor een duur van 4 jaar op de markt te zetten. Dit geeft uitvoerders de mogelijkheid zelf te optimaliseren en heeft geresulteerd in een besparing in de orde van 20%. Dit is een optimalisatie op asset niveau, de casus Kustlijn zorg vult dit aan vanuit het netwerkperspectief en kan bijvoorbeeld leiden tot het scherper formuleren van de suppletiecontracten (niet meer hold the line maar kosten/baten gestuurd). Vanuit het framework beschouwd zou een afstemming tussen deze twee niveaus, naast een verdere uitwerking van de afweging op netwerkniveau, een volgende stap kunnen zijn. Dit zou netwerk- en assetniveau aan elkaar verbinden.

6.1.2 Kunstwerken

Voor de casus kunstwerken ligt de focus op de relatie tussen netwerk en asset. De situatie is dat binnen het systeem van het Noordzeekanaal en Amsterdam Rijnkanaal, de impressie is dat een aantal van de kunstwerken die water afvoeren niet meer aan de functionele eis voldoen. Daarnaast zullen op diverse momenten in de komende 50 jaar kunstwerken moeten worden opgewaardeerd of vervangen. Dit is puur vanuit de asset data ingegeven en komt niet uit bijvoorbeeld een wens van de asset owner om het netwerk in een bepaalde richting te ontwikkelen. Hierbij is dus begonnen met het uitgangspunt dat de conditie van assets niet voldoende is. In de casus is, aan de hand van een sterk vereenvoudigde versie van dit systeem, vanuit een netwerkperspectief gekeken of dit ook daadwerkelijk zo is, en of dit met adaptatiestrategieën voor het netwerk (en dus niet voor de individuele assets!) op te lossen is. Uit de analyse blijkt dat er geen eenduidige eis op netwerkniveau is waaraan moet worden voldaan. Aangezien deze eis bepaalt of de prestatie van een kunstwerk al dan niet voldoende is, is het zaak eerst een goede eis voor het netwerk vast te stellen: deze kan vervolgens vertaald worden naar specifieke eisen voor de assets. Een schatting voor deze eis is uit geschatte schades bij verschillende peilen af te leiden. Eindproduct is een adaptatiestrategie die de planning van ingrepen in het systeem uitzet en zorgt dat de prestatie-eisen voor het netwerk worden gehaald. Deze prestatie-eis wordt in de analyse ook bepaald. Wanneer de casus kunstwerken wordt ingetekend in de figuur geeft dat het beeld in Figuur 6.2.



Figuur 6.2 Positionering van de casus Kunstwerken uit fase 1 van ROBAMCI binnen het framework.

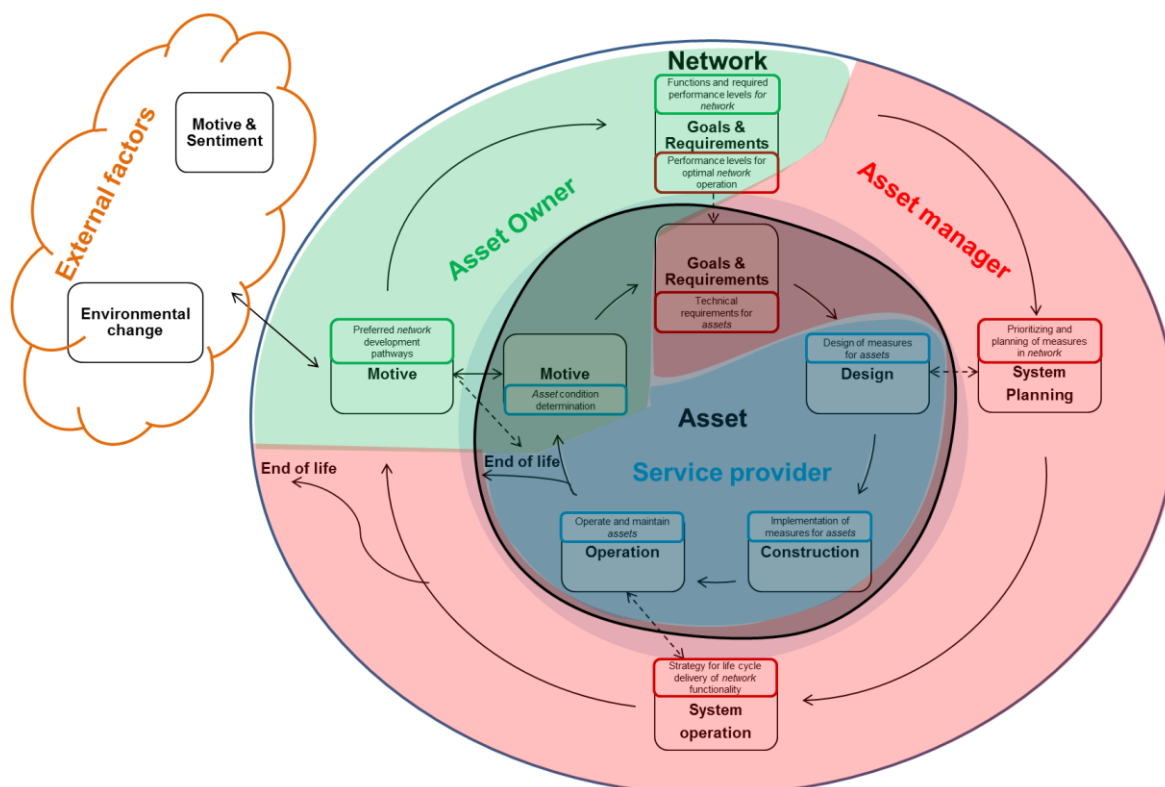
De stappen die worden doorlopen in de casus zijn dus eenvoudig in te tekenen in de figuur. In de casus worden zo een aantal algemene oplossingsrichtingen op netwerkniveau uitgewerkt. De positie van de case in de figuur lijkt zeer op de positie van de casus Kustlijn zorg. Dit is ook logisch, aangezien het type afweging: “hoe behaal ik een optimale prestatie in mijn netwerk” voor beiden hetzelfde is. In de casus Kunstwerken wordt hierin de system planning in de tijd meer uitdrukkelijk meegenomen dan voor de casus Kustlijn zorg.

6.1.3 Waterkeringen

Voor waterkeringen bestaat de casus uit twee, vergelijkbare, afwegingen. De eerste afweging is voor LiveDijkXL Noorderzijlvest, en is retrospectief van aard. De LiveDijkXL is een geïnstrumenteerde dijk waar in 2011 is besloten te gaan monitoren nadat deze was afgekeurd op macrostabiliteit. De casus beschouwt de effecten van monitoring op macrostabiliteit, waarbij het effect van aardbevingen en andere mechanismen buiten beschouwing is gelaten. Door de monitoringsinspanning is de benodigde bermbreedte voor het mechanisme macrostabiliteit flink afgenomen. De vraag die speelt is: wat zijn de kosten en baten van de LiveDijkXL en wanneer we terug zouden gaan naar het jaar 2012, zonder de kennis van nu, zou deze beslissing vanuit kosten-baten oogpunt dan nog steeds verstandig zijn?

Hoewel door de relatie tussen dijkvakken en dijktrajecten deze afweging prima op netwerkniveau gemaakt zou kunnen worden (denk aan vragen als: hoe beïnvloedt monitoring op een vak de kennis over een traject?), is in dit geval gebruik gemaakt van gegevens voor de hele strekking, niet voor de individuele vakken. Daarom is deze casus typisch gericht op asset niveau. In de casus worden verschillende uitgangssituaties beschouwd, bijvoorbeeld een afgekeurde of een recent versterkte dijk en worden verschillende lifecycle strategieën, bestaande uit combinaties van monitoring en versterking vergeleken. Monitoring kan hierbij (als bij Noorderzijlvest) plaatsvinden vlak na afkeuren, maar ook bijvoorbeeld tijdens de levenscyclus. De casus geeft een goed beeld van het effect van monitoring als onderdeel van de ontwerpfase maar ook als onderdeel van de Operation-fase. Daarom omvat dit deel van de casus alle onderdelen van de levenscyclus, hoewel bijvoorbeeld de norm (Goals & Requirements) als gegeven wordt beschouwd.

De tweede afweging betreft de LiveDijk Veessen. Hier is over een lengte van ongeveer 100 meter een DMC-buis geïnstalleerd, die op een actieve manier waterspanningen verlaagt en zo het pipingprobleem bij deze kering oplost. Dit was een alternatief voor de aanleg van een forse pipingberm, waarvoor meerdere panden gesloopt moesten worden. In de casus wordt de onderhoudsarme, maar relatief dure, pipingberm vergeleken met een innovatieve, goedkopere, maar onderhoudsrijkere DMC-buis. Dit geeft inzicht in de lange termijn lifecycle cost van beide maatregelen. Ook dit is een typische integrale lifecycle afweging voor de gehele levenscyclus. Ook hiervoor geldt dat de norm als gegeven is beschouwd, en dat op een relatief grove wijze is gekeken naar bijvoorbeeld de Design fase (op basis van een aantal simpele regels met betrekking tot de faalkans, zonder gedetailleerd faalmodel). Wanneer we de afwegingen van de casus waterkeringen intekenen in het framework resulteert dat in het beeld in Figuur 6.3. Hierbij geldt dat niet alle stappen in dezelfde mate van detail, of als vrijheidsgraad zijn beschouwd, maar dat wel de gehele cyclus is doorlopen, voor beide cases. Omdat de Goals & Requirements als gegeven zijn beschouwd is er slechts 1 betrokken rolhouder, te weten de asset owner. Dit is het betreffende waterschap.



Figuur 6.3 Positionering van de casus Waterkeren uit fase 1 van ROBAMCI binnen het framework.

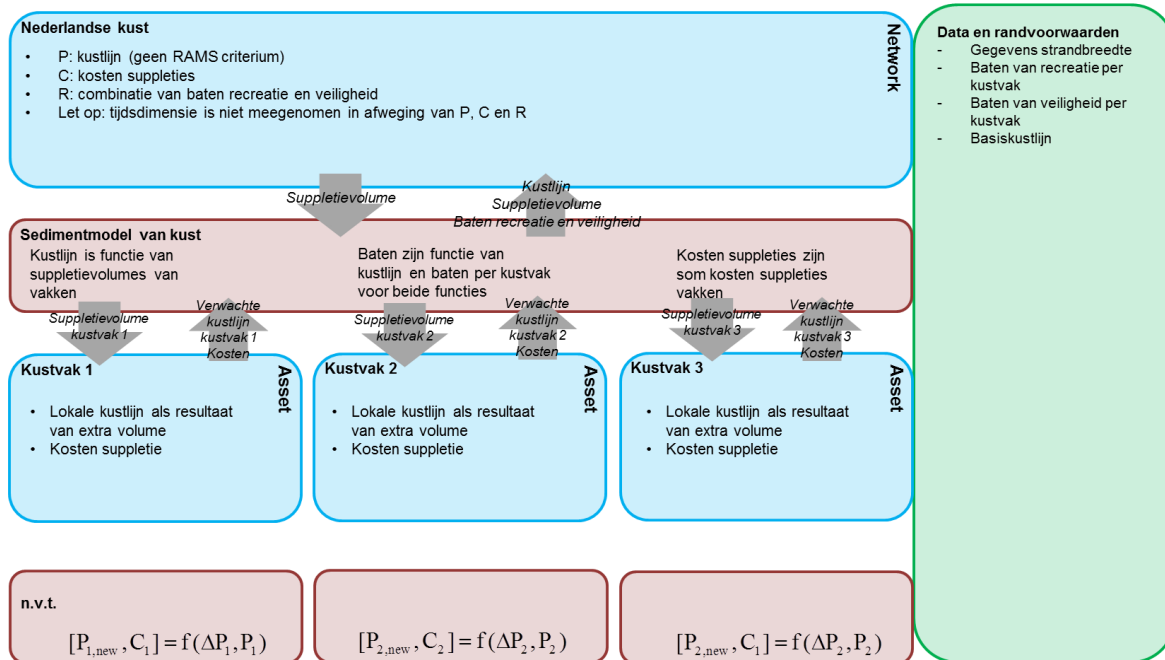
In de waterkeringen casus is sterk gefocust op asset niveau. De resultaten zijn echter vertaalbaar naar het netwerkniveau van bijvoorbeeld dijktrajecten. De nieuwe normeringssystematiek biedt uitstekende kansen hiervoor door bijvoorbeeld het benutten van de flexibele faalkansbegroting. De stappen die zijn doorlopen, zijn doorlopen voor een deel van een traject en voor 1 faalmechanisme. Door meerdere faalmechanismen en meerdere trajectdelen of vakken in samenhang te beschouwen kan vanuit een levenscyclusperspectief een optimale faalkansbegroting op ieder moment in de tijd worden bepaald. Met deze faalkansbegroting kunnen suboptimalisaties op faalmechanisme en dijkvakniveau worden gerelateerd aan het netwerkperspectief. Hierin kan ook de 'meetbaarheid' van bepaalde mechanismen een rol spelen. Waar een freatische lijn in veel gevallen goed te monitoren is, geldt dat voor andere invloeden wellicht minder.

6.2 Ondersteuning met tools

In de voorgaande paragraaf is toegelicht hoe de cases binnen ROBAMCI binnen het framework passen. In deze paragraaf wordt dat nader toegelicht aan de hand van de casus Kustlijnzorg.

Voor de casus Kustlijnzorg is gekeken naar de relatie tussen verschillende suppletiestrategieën. Figuur 6.4 geeft weer hoe dit is geïnstrumenteerd voor deze cases, vanuit het perspectief van de opzet uit Figuur 4.3. Het draait hierin om de koppeling van enerzijds de kust als geheel, aan anderzijds ingrepen op kustvakken. Dit gebeurt met een kustmodel, waarin ingrepen op verschillende plaatsen en momenten worden gedaan. Voor de ingrepen op kustvakken is geen apart model gebruikt. Wat hieruit te leren valt, is dat het in principe mogelijk is om voor de kust de analyse vanuit het voorgestelde generieke framework vorm te geven, met gebruik van de bestaande modellen.

Kustlijnzorg



Figuur 6.4 Invulling tool voor lifecycle management met de analyse gedaan voor de casus Kustlijnzorg.

Opgemerkt dient te worden dat in dit geval de gegevens die uitgewisseld worden tussen de lagen (bijv. suppletievolumes), geen prestaties, kosten en risico's zijn zoals toegelicht in paragraaf 4.3. Een transformatie van suppletievolumes en kustlijnpositie naar prestatie en risico zou in een adapter voor het betreffende kustlijnmodel gemaakt kunnen worden.

7 Conclusies

In dit rapport zijn voor lifecycle management van publieke infrastructuur best practices en ervaringen uit zowel praktijk als wetenschappelijke literatuur geïnventariseerd. De hoeveelheid literatuur die van toepassing is op dit onderwerp is enorm. In de stap naar lifecycle management wordt echter vaak slechts een deel van de levenscyclus beschouwd. Daarnaast worden verschillende niveaus (strategisch, tactisch en operationeel) vaak onvoldoende verbonden, waardoor het lifecycle management niet altijd optimaal is. Daarnaast blijkt dat er bij de implementatie van lifecycle management een aantal praktische belemmeringen zijn. De eerste is een organisatorische belemmering doordat teveel in hokjes gedacht wordt. De tweede is het koppelen van informatie uit, en uitwisselen tussen, verschillende fasen van de levenscyclus. Een derde belemmering is dat voorbeelden van de kwantificering in de wetenschappelijke literatuur voor handen zijn, maar dat toepassing in de praktijk complex blijkt.

In de literatuur zijn veel schema's voor asset en lifecycle management beschikbaar. Deze zijn echter zelden concreet en praktisch toepasbaar, in ieder geval niet voor de doelen die ROBAMCI nastreeft: het concreet handen en voeten geven van asset en lifecycle management voor publieke infrastructuur. Om de cases binnen ROBAMCI te faciliteren is een framework ontwikkeld waarvan de praktische toepasbaarheid is geschetst aan de hand van de uitgevoerde cases. Dit framework bestaat uit een processchema, een informatiekwaliteitsmodel en een blauwdruk voor een kwantitatief instrumentarium voor lifecycle management. Het processchema dient om het proces van lifecycle management, voor de toepassing van publieke kritieke infrastructuur explicieter te maken. Het informatiekwaliteitsmodel is ontwikkeld om de rol van informatie in het beslisproces beter inzichtelijk te maken. Zo kan de term 'data op orde' beter onderbouwd worden, omdat het ook daadwerkelijk mogelijk wordt om in de context van een te nemen beslissing of uit te voeren taak te beoordelen of de juiste informatie beschikbaar is voor een doelmatige uitvoering hiervan. Met de blauwdruk voor een instrumentarium is een aanzet gedaan om lifecycle management concreet kwantitatief handen en voeten te gaan geven in het vervolg van ROBAMCI.

Met het framework, een totaalpakket van processchema, informatiekwaliteitsmodel en blauwdruk voor een te ontwikkelen instrumentarium kunnen de cases in volgende fasen van ROBAMCI worden gefaciliteerd. Omgekeerd kunnen deze cases verder bijdragen aan een ontwikkeling van het framework. Dit kan zowel door hiaten in het processchema aan te wijzen en op te lossen, als door delen van het instrumentarium te ontwikkelen.

8 Referenties

- Alegre, H., & Coelho, S. T. (2012). *Infrastructure Asset Management of Urban Water Systems*. (A. Ostfeld, Ed.). InTech. doi:10.5772/2882
- Amadi-Echendu, J. E., Brown, K., Willett, R., & Mathew, J. (2010). *Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management* (Vol. 2, p. 416). Springer Science & Business Media.
- Bakkenist, S., van Dam, O., van der Nat, A., Thijs, F., & de Vries, W. (2012). *Bouwstenen professionele inspecties*.
- Barone, G., & Frangopol, D. M. (2014). Reliability, risk and lifetime distributions as performance indicators for life-cycle maintenance of deteriorating structures. *Reliability Engineering & System Safety*, 123, 21–37. doi:10.1016/j.ress.2013.09.013
- Boussabaine, H., & Kirkham, R. (2004). *Whole Life-cycle Costing, Risk and risk responses*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Buijs, F. A., Hall, J. W., Sayers, P. B., & Van Gelder, P. H. A. J. M. (2009). Time-dependent reliability analysis of flood defences. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(12), 1942–1953.
- Burns, P., Hope, D., & Roorda, J. (1999). Managing infrastructure for the next generation. *Automation in Construction*, 8(6), 689–703. doi:10.1016/S0926-5805(98)00115-0
- Campbell, J. D., Jardine, A. K. S., & McGlynn, J. (Eds.). (2011). *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions, Second Edition*. CRC Press.
- Das, G., Pattnaik, P. K., & Padhy, S. K. (2014). Artificial Neural Network trained by Particle Swarm Optimization for non-linear channel equalization. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3491–3496. doi:10.1016/j.eswa.2013.10.053
- De Baar, A., & Schravendeel, R. (2013). Nieuwe onderhoudsstrategie voor pieren van IJmuiden. *Land+Water*, 24–25.
- Den Heijer, F., & IJmker, J. (2013). *Showcase asset management HHNK: voorbeeldstudie polder Beemster*. Deltares project no. 1208320-000.
- ENW. (2007). *Leidraad Rivieren. Ministerie van Verkeer en Waterstaat Rijkswaterstaat sGravenhage Ministerie van Verkeer en Waterkeren*.
- Flood, I., & Kartam, N. (1994). Neural Networks in Civil Engineering. I: Principles and Understanding. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8(2), 131–148. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(1994)8:2(131)
- Fox, C., Levitin, A., & Redman, T. (1994). The notion of data and its quality dimensions. *Information Processing & Management*, 30(1), 9–19. doi:10.1016/0306-4573(94)90020-5
- Frangopol, D. M., Kong, J. S., & Gharaibeh, E. S. (2001). Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(1), 27–34. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:1(27)

- Frangopol, D. M., Lin, K.-Y., & Estes, A. C. (1997). Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures. *Journal of Structural Engineering*, 123(10), 1390–1401. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:10(1390)
- Frangopol, D. M., & Soliman, M. (2015a). Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions. *Structure and Infrastructure Engineering*.
- Frangopol, D. M., & Soliman, M. (2015b). Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions. *Structure and Infrastructure Engineering*.
- Fuchs, G. H. A. M., Keuning, I., Mante, B. R., & Bakker, J. D. (2014). A business case of the estimated profit of Life Cycle Management principles. In H. Furuta, D. M. Frangopol, & M. Akiyama (Eds.), *Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management*. CRC Press.
- Furuta, H., Frangopol, D. M., & Nakatsu, K. (2011). Life-cycle cost of civil infrastructure with emphasis on balancing structural performance and seismic risk of road network. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(1-2), 65–74. doi:10.1080/15732471003588346
- Gómez, C., Sánchez-Silva, M., & Dueñas-Osorio, L. (2014). An applied complex systems framework for risk-based decision-making in infrastructure engineering. *Structural Safety*, 50, 66–77. doi:10.1016/j.strusafe.2014.03.011
- Highways Agency. (2010). *A risk-based framework for geotechnical asset management. Phase 2 Report*.
- ISO. (2014a). *NEN-ISO 55000: Asset management - Overview, principles and terminology (ISO55000:2014 (corr. 2014-03), IDT)*. Delft.
- ISO. (2014b). *NEN-ISO 55001: Asset management - Management systems - Requirements (ISO 55001:2014, IDT)*. Delft.
- ISO. (2014c). *NEN-ISO 55002: Asset management - Management systems - Guidelines for the application of ISO 55001 (ISO 55002:2014, IDT)*. Delft.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. doi:10.1016/j.ymssp.2005.09.012
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE. doi:10.1109/ICNN.1995.488968
- Kind, J. M. (2014). Economically efficient flood protection standards for the Netherlands. *Journal of Flood Risk Management*, 7(2), 103–117. doi:10.1111/jfr3.12026
- Klerk, W. J. (2015). Interview with Jaap Bakker & Han Roebers, RWS-GPO. 27th March 2015.
- Klerk, W. J., Heijer, F. den, & Schweckendiek, T. (2015). Value of information in life-cycle management of flood defences. In *ESREL 2015*.
- Klerk, W. J., van Veen, N. J., & den Heijer, F. (2015). *Toepassen van asset management op strategisch niveau Case studie Beemster - Onderdeel: actuele risico's*. Deltares project no. 1210261-000.

- Kumar, R., & Gardoni, P. (2014). Renewal theory-based life-cycle analysis of deteriorating engineering systems. *Structural Safety*, 50, 94–102.
- Lee, Y. W., Strong, D. M., Kahn, B. K., & Wang, R. Y. (2002). AIMQ: a methodology for information quality assessment. *Information & Management*, 40(2), 133–146. doi:10.1016/S0378-7206(02)00043-5
- Li, C.-T., Peng, H., & Sun, J. (2014). Life cycle cost analysis of wind power considering stochastic uncertainties. *Energy*, 75, 411–418. doi:10.1016/j.energy.2014.07.090
- Lonchamp, J., & Fessart, K. (2012). Investments Portfolio Optimal Planning for industrial assets management : Method and Tool.
- Matos, S., & Hall, J. (2007). Integrating sustainable development in the supply chain: The case of life cycle assessment in oil and gas and agricultural biotechnology. *Journal of Operations Management*, 25(6), 1083–1102. doi:10.1016/j.jom.2007.01.013
- Moselhi, O., Hegazy, T., & Fazio, P. (1991). Neural Networks as Tools in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 117(4), 606–625. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1991)117:4(606)
- Odeh, N. A., & Cockerill, T. T. (2008). Life cycle analysis of UK coal fired power plants. *Energy Conversion and Management*, 49(2), 212–220. doi:10.1016/j.enconman.2007.06.014
- Okasha, N. M., & Frangopol, D. M. (2010). Novel Approach for Multicriteria Optimization of Life-Cycle Preventive and Essential Maintenance of Deteriorating Structures. *Journal of Structural Engineering*, 136(8), 1009–1022. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000198
- Oldhoff, R. J. (2013). *Meetkwantiteit versus toetsingskwaliteit, Onderzoek naar de invloed van informatiedichtheid op het toetsresultaat van de rekenregel van Sellmeijer voor de toetsing op piping*. BZ Innovatiemanagement.
- Padgett, J. E., & Tapia, C. (2013). Sustainability of Natural Hazard Risk Mitigation: Life Cycle Analysis of Environmental Indicators for Bridge Infrastructure.
- Piyatrapoomi, N., Kumar, A., & Setunge, S. (2004). Framework for investment decision-making under risk and uncertainty for infrastructure asset management. *Research in Transportation Economics*, 8, 199–214. doi:10.1016/S0739-8859(04)08010-2
- Rijkswaterstaat. (2010). *Leidraad RAMS - Sturen op prestaties van systemen*.
- Rijkswaterstaat. (2011). *Leidraad Risicogestuurd Beheer en Onderhoud (conform de ProBO werkwijze)*.
- Rokstad, M. M., & Ugarelli, R. M. (2015). Minimising the total cost of renewal and risk of water infrastructure assets by grouping renewal interventions. *Reliability Engineering & System Safety*, 142, 148–160. doi:10.1016/j.ress.2015.05.014
- Rokstad, M. M., Ugarelli, R. M., & Sægvog, S. (2015). Improving data collection strategies and infrastructure asset management tool utilisation through cost benefit considerations. *Urban Water Journal*, 1–17. doi:10.1080/1573062X.2015.1024692

- Salem, O., AbouRizk, S., & Ariaratnam, S. (2003). Risk-based Life-cycle Costing of Infrastructure Rehabilitation and Construction Alternatives. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(1), 6–15. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:1(6)
- Sarja, A. (2006). *Predictive and Optimised Life Cycle Management: Buildings and Infrastructure* (p. 688). Routledge.
- Saydam, D., Frangopol, D. M., & Dong, Y. (2013). Assessment of Risk Using Bridge Element Condition Ratings. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(3), 252–265. doi:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000131
- Schweckendiek, T. (2014, July 4). On reducing piping uncertainties: A Bayesian decision approach. PhD thesis, Delft University of Technology. doi:10.4233/uuid:f9be2f7e-7009-4c73-afe5-8b4bb16e956f
- Schweckendiek, T., & Calle, E. O. F. (2013). Updating levee reliability with performance observations, 359–368.
- Speijker, L. J. ., van Noortwijk, J. M., Kok, M., & Cooke, R. M. (2000). Optimal maintenance decisions for dikes. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 14(1), 101–121.
- Steenackers, G., Presezniak, F., & Guillaume, P. (2009). Development of an adaptive response surface method for optimization of computation-intensive models. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 847–855. doi:10.1016/j.cie.2009.02.016
- Ten Veldhuis, J. A. E., & Clemens, F. H. L. R. (2011). The efficiency of asset management strategies to reduce urban flood risk. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 64(6), 1317–24.
- TenneT. (2013). *Asset Management-Model: Visie op investeren in en het onderhouden van het hoogspanningsnet*. Arnhem.
- The Institute of Asset Management. (2014). *Asset Management - an anatomy*. Bristol, UK.
- Van den Honert, A. F., Schoeman, J. S., & Vlok, P. J. (2013). Correlating the content and context of PAS 55 with the ISO 55000 series. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 24(2), 24. doi:10.7166/24-2-585
- Van Meerveld, H., & Wessels, J. (2014). *Quick Scan Asset Management projecten InfraQuest*. 060.02385/01.03.
- Van Noortwijk, J. M. (1996, May 28). Optimal maintenance decisions for hydraulic structures. TU Delft, Delft University of Technology.
- Van Putten, R. D. (2013). Dijken optimaliseren met sensoren. *Geotechniek, 2013 SRC -*, 54–56.
- Van Riel, W. A. P., Langeveld, J. G., Herder, P. M., & Clemens, F. H. L. R. (2012, December 31). Information use in Dutch sewer asset management. *7th World Congress on Engineering Asset Management, WCEAM 2012, Daejeon City, Korea, 8-9 Oct., 2012*.
- Van Riel, W. A. P., Langeveld, J. G., Herder, P. M., & Clemens, F. H. L. R. (2014, December 31). Value of Information for Sewer Replacement Decisions. *13th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia, 7-12 September 2014*.

- Van Riel, W., van Bueren, E., Langeveld, J., Herder, P., & Clemens, F. (2015). Decision-making for sewer asset management: Theory and practice. *Urban Water Journal*, 13(1), 57–68. doi:10.1080/1573062X.2015.1011667
- Vanier, D. J. (2001). Why Industry Needs Asset Management Tools. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(1), 35–43.
- Voortman, H. G., & Vrijling, J. K. (2004). Optimal design of flood defence systems in a changing climate. *Heron*, 49 (1).
- Wand, Y., & Wang, R. Y. (1996). Data quality dimensions in ontological foundations. *Communications of the ACM*, 39(11), 86–95.
- Wang, R. Y., & Strong, D. M. (1996). Beyond Accuracy: What data quality means to Data Consumers. *Journal of Management Information Systems*, 12(4), 5–33.
- Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van den Akker, O., & Heynert, K. (2013). The Delft-FEWS flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software*, 40, 65–77. doi:10.1016/j.envsoft.2012.07.010
- Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344. doi:10.1016/S0263-7863(96)00089-0

9 Lijst van gebruikte afkortingen

Tabel 9.1 Lijst van gebruikte afkortingen

Afktoring	Beschrijving
ANN	Artificial Neural Network
ARS	Adaptive Response Surface
DMC	Dike Monitoring and Conditioning
ENW	Expertise Netwerk Waterveiligheid
FEWS	Flood Early Warning System
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
GWW	Grond- weg- en waterbouw
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma
IAM	The Institute of Asset Management
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Kern Prestatie Indicator
LCC	Life Cycle Costing
LCCA	Life Cycle Cost Analysis
LCCM	Life Cycle Cost Management
LCM	Life Cycle Management
MIRT	Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport
PAS55	Publicly Available Specification
PDCA	Plan - Do - Check - Act
ProBO	Probabilistisch Beheer en Onderhoud
PSO	Particle Swarm Optimization
RAMS	Reliability Availability Maintainability Safety
RINK	Risico Inventarisatie Natte Kunstwerken
ROBAMCI	Risk and Opportunity Based Asset Management for Critical Infrastructures
SHM	Structural Health Monitoring
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
V&R	Vervanging en Renovatie
VONK	Vervangingsopgave Natte Kunstwerken