

# Data integratie voor tunnelrenovatie

ir. Maarten van den Berg  
iNFRANEA

ir. Johannes Anrijs  
BESIX

Johan Kuppens  
neanex

## Samenvatting

Wegbeheerders laten de komende jaren diverse tunnels renoveren als gevolg van de nieuwe Europese richtlijnen die verankerd zijn in de Landelijke wetgeving. Bij een tunnelrenovatie wordt veelal het beton hersteld, de installaties vervangen en de rijbaan vernieuwd. De tunnelconstructie dient vaak aangepast te worden aan de nieuwe wegprofielen, vluchtwegen, installaties en bedieningssystemen. Tunnelrenovatie vereist een gedetailleerde voorbereiding om de hinder voor de weggebruikers en de omgeving tot een minimum te beperken en de nauwgezette inpassing van de nieuwe systemen in de bestaande constructie te doen slagen. De veiligheidseisen en de uitvoeringsduur vormen de uitgangspunten voor de geïntegreerde contracten die o.a. Rijkswaterstaat opstelt bij tunnelrenovatie.

Bij de renovatie van de Velsertunnel heeft de bouwcombinatie gekozen voor de integratie van *Systems Engineering* en *Building Information Management* (BIM) in één informatiemodel. Deze risico-gestuurde data-integratie helpt het consortium bij de projectbeheersing. Vanuit een ‘pro-actief geometrisch raakvlakkenbeheer’ controleert het BIM-team in opdracht van het Technisch Management de inpassing van de nieuwe wegconstructie en technische installaties in de bestaande tunnelconstructie. Van de tunnelconstructie en dienstgebouwen heeft het BIM team een 3D-model gemaakt op basis van laserscans en de 60 jaar oude bouwtekeningen. Alle disciplines gebruiken het 3D-model van de bestaande tunnel om het ontwerp van hun subsysteem in te passen. Het informatiemodel vormt de basis voor de verificatie van het ontwerp, de levering van geverifieerde en gevalideerde tekeningen, documenten en simulaties.

Dit artikel beschrijft de toegevoegde waarde van een integraal informatiemodel voor de beheersing van complexe infrastructuurprojecten aan de hand van de casestudie ‘Renovatie Velsertunnel’. De dimensies van project complexiteit (hoofdstuk 1) en de integratie van BIM en Systems Engineering (hoofdstuk 2) vormen het theoretisch vertrekpunt. Daarop volgt een beschrijving van de complexiteit van de renovatie van de Velsertunnel (hoofdstuk 3). Het integraal model voor de Velsertunnel (hoofdstuk 4) wordt toegelicht aan de hand van de wijze van samenwerken, het raakvlakbeheer, het gebruik van laserscan-data en de Virtual Reality simulatie. Tot slot beschrijft hoofdstuk 5 de toegevoegde waarde van een integraal model voor projectbeheersing en de aanbevelingen voor de opzet van een dergelijk model voor het beheersbaar maken van aankomende (tunnelrenovatie) projecten.

## Steekwoorden:

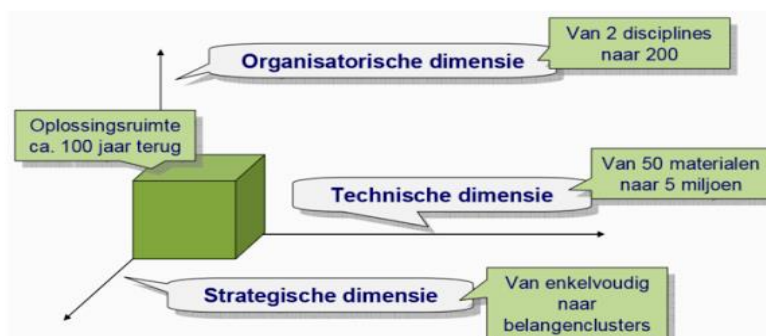
Tunnelrenovatie, Laserscan, Building Information Management BIM, Virtual Design & Construction, Systems Engineering, Raakvlakbeheer, Integratie, Verificatie en Validatie.

## 1. Integrale projectbeheersing

Vanaf de Tweede Wereldoorlog zijn bouwprojecten technisch en organisatorisch complexer geworden [1,2]. In de traditionele bouwkolom, selecteert de opdrachtgever, via een aanbesteding, een uitvoerende partij die het ontwerp van een bouwwerk tegen de laagste prijs realiseert. Dit was ook het geval bij de bouw van de Velsertunnel [3]. De fragmentatie van ontwerp en uitvoering in de traditionele aanbesteding resulteerde veelal in faalkosten [4]. De introductie van de integrale contracten in Nederland (UAV-GC 2005), zoals *Design Build Operate Finance & Maintain* (DBFMO) moeten bijdragen aan het verlagen van de faalkosten.

De opdrachtnemer, vaak een bouwconsortium draagt de integrale verantwoordelijkheid van een bouwwerk gedurende een belangrijk deel van de levenscyclus. Binnen het consortium zal de besluitvorming zich steeds meer toespitsen op de afweging van realisatie- onderhoud- en operationele kosten. Hierdoor neemt de projectcomplexiteit aanzienlijk toe. Maar de groeiende complexiteit is ook het gevolg van de 'uitdijende oplossingsruimte' in drie dimensies op projectniveau [4]:

1. **Technisch**, het aantal materialen, technieken en bouwmethoden neemt sterk toe, net als de eisen omtrent veiligheid, gezondheid en leefmilieu.
2. **Organisatorisch**, het aantal betrokken participanten, disciplines en specialisten neemt toe;
3. **Strategisch**, het aantal belangen neemt toe, bij zowel opdrachtgever, omgeving als opdrachtnemer.



Figuur 1: Schematische weergave uitdijende oplossingsruimte in projecten (Huijbregts, 2007)

Disciplines onderscheiden binnen hun eigen activiteiten vier vormen van complexiteit [2]:

1. **Tijd/dynamiek**, uitgedrukt in projectduur, tijdsplanning en onzekerheid over de scope;
2. **Raakvlakken**, uitgedrukt in diversiteit en aantal; technische disciplines, afhankelijkheden tussen interne raakvlakken, andere projecten, de omgeving, bereikbaarheid en logistiek;
3. **Productiemiddelen**, uitgedrukt in beschikbaarheid, capaciteit en competenties;
4. **Externe belangen**, uitgedrukt in politieke relevantie en externe stakeholders;

De literatuur toont een verschil tussen de beheersing van complexiteit op project- en disciplineniveau. Methoden die de complexiteit op projectniveau beheersbaar maken richten zich veelal op het inperken van de oplossingsruimte [5], het gestructureerd doorlopen van een besluitvormingsproces of het inzichtelijk maken van de complexiteit [6]. De volgende paragrafen verklaren de drie complexiteitsdimensies op projectniveau en benoemen de potentiële beheersmaatregelen.

## ***Technische Integratie***

De toename van de hoeveelheid installatietechniek in bouwprojecten draagt aanzienlijk bij aan een vergroting van de technische complexiteit. Tegenwoordig kunnen de technische installaties al 40% tot 60% van de bouwsom bedragen [7]. Bovendien worden de verschillende installaties veelal geleverd door gespecialiseerde onderaannemers [8] en neemt zo de organisatorische complexiteit toe. Hierbij stelt men vast dat de complexiteit in de taaktoewijzing vaak onvoldoende geanalyseerd en afgebakend wordt in toetsbare raakvlakken tussen de subsystemen van de disciplines [6]. Daarnaast worden bouwprojecten ook complexer omdat zij steeds vaker dienen uitgevoerd te worden binnen een bestaande omgeving [2]. Conceptueel Bouwen streeft naar een beperking van de technische oplossingsruimte door een project in te vullen met voorgeselecteerde bouwelementen uit een product platform die geleverd worden door vaste *co-makers* [5].

Volgens bovengenoemde bronnen is een efficiënte technische integratie slechts realiseerbaar met informatiemanagement, raakvlakbeheer en platform gedreven productontwikkeling. Technische integratie is noodzakelijk om te voldoen aan het toenemend aantal eisen die voortkomen uit de steeds complexere omgeving. Daarnaast resulteert een verfijnde afstemming van civiele constructies, installatietechniek en industriële automatisering tot een hogere asset prestatie en meer complexiteit. Een succesvolle technische integratie vereist een nauwere samenwerking en gedegen organisatorische integratie.

### ***1.2 Organisatorische Integratie***

Binnen de bouwsector moeten meer taken, van een groter aantal verschillende disciplines, georganiseerd worden in vergelijking met andere sectoren [9]. *Supply chain* (productieketen) onderzoek over de logistieke afstemming in de organisatorische dimensie resulteert in vier aanbevelingen gericht op integratie;

1. Verbeterde raakvlakafstemming tussen de bouwplaats activiteiten en de middelen in de supply chain. De lean planning methode [11] faciliteert deze aanpak;
2. Verbetering van het bouwproces door productspecificaties concreet vast te leggen, vasthouden aan afgesproken leveringsmomenten en verbetering van montagecondities;
3. Verplaatsing van bouwplaats activiteiten naar de bouwkolom in geïndustrialiseerde processen, waarbij complexiteit afneemt t.g.v. extra prefab ontwerpafstemming.
4. Voor unieke complexe projecten is een *agile* benadering geschikter dan het standaard conceptueel platform [5]. Het *agile paradigma* leert dat o.a. virtuele samenwerking kan resulteren in winstgevende projecten binnen een vluchtige markt [12].

Organisatorische integratie richt zich voornamelijk op de overdracht van informatie en producten tussen verschillende disciplines, door de beheersing van het procesraakvlak. De aard van een project bepaalt de mate waarin een industriële platform gedreven benadering of een *agile* maatwerk aanpak rendeert. Bij renovatie van een bestaande constructie zal een *agile* benadering op het systeemniveau het best passen, waarbij de onderliggende subsystemen met herhalende componenten ruimte bieden voor een geïndustrialiseerde *Lean* aanpak.

### ***1.3 Strategische Integratie***

Binnen het bouwproces is de integratie van techniek, organisatie en strategie niet eenvoudig omdat partijen steeds samenwerken in wisselende samenstellingen. Men identificeert dit fenomeen als "*loosely coupled systems*" en constateert dat het daardoor moeilijk is om

innovaties en leercurves te ontwikkelen binnen de project georiënteerde bouwsector, in vergelijking met de industriële sectoren [13].

Het gebrek aan strategische planning en eenduidige kwaliteitssystemen bemoeilijken de adoptie van strategische ICT innovaties in de bouwsector [14]. Deze omstandigheden beperken de opvolging van kennis- en marktontwikkeling in deze projectgeoriënteerde sector. ICT biedt projectmanagers de mogelijkheden om zich te verdiepen in de kennis achter hun producten waardoor zij sneller kunnen inspelen op veranderingen in de markt [15]. Door de ICT-ontwikkelingen kan het projectmanagement haar aandacht verleggen van project- naar procesbeheersing. De gefragmenteerde bouwsector kan ICT-middelen aangrijpen om de kennisontwikkeling op projecten te verankeren binnen de eigen organisatie. De ontwikkeling van kennis stelt het bouwmanagement instaat om adequaat te reageren op nieuwe projecten in de markt. Bij de invoering van een strategische integratie moet men nagaan in welke mate het een radicale verandering voor de organisatie betreft [16].

#### ***1.4 Data integratie als beheersinstrument voor projectcomplexiteit***

De complexiteit van een project wordt sterk bepaald door het aantal differentiaties en afhankelijkheden. Deze worden het best beheerst door een integratie van coördinatie, communicatie en controle [1]. ICT in de bouw kan bijdragen aan het beheersbaar maken van de projectcomplexiteit, door integratie van data wat resulteert in drie veranderingen [17]:

1. De snelheid en samenloop van besluitvorming verbeterd;
2. Organisaties kunnen informatie direct beschikbaar stellen, zodra dit vereist is;
3. De besluitvorming van disciplines wordt inzichtelijk en toegankelijk gemaakt.

Volgens onderzoek, naar het gebruik van software in de bouwsector, heeft de invoering en ontwikkeling van geïntegreerde ontwerpsoftware de grootste prioriteit [18].

Geïntegreerde ontwerpsoftware, verder in dit artikel 'Bouwwerk Informatie Management' genoemd, is een methode om de projectcomplexiteit beheersbaar te maken [19]. BIM levert veel voordelen: verhoogde productiviteit, toename van prefabricage, afname in *rework*, minder tijdrovende *Requests For Information* (RFI), minder wijzigingen, minder faalkosten en een verkorting van de bouwtijd [7]. Het weergeven van 3D CAD-modellen in een *Virtual Reality* (VR) omgeving levert een collectieve project beeldvorming [20].

De dimensies van complexiteit vertonen een mate van overlapping. Meer techniek resulteert in een toename van het aantal gespecialiseerde disciplines. Unieke projecten met een *agile* karakter vragen om een virtuele samenwerking, waarbij de complexiteit afneemt als partijen langer met elkaar samenwerken. Iedere dimensie van complexiteit beroept zich op informatie management als beheersmaatregel, waarbij raakvlakbeheer een terugkerend begrip is bij techniek en organisatie.

## ***2. Risicogestuurd Bouwwerk Informatie Management***

Bij de aanbesteding met een integraal contract wenst de opdrachtgever zich maximaal te vrijwaren van zorgen. Het bouwconsortium heeft, binnen de functionele en contractuele eisen, ruimte om innovatief te ontwerpen, het werk te organiseren en een eigen strategie te ontwikkelen. De succesvolle uitwerking van het project binnen deze sterk 'uitgedijde'

oplossingsruimte wordt het best bereikt door de ontwerp oplossingen van de verschillende disciplines te integreren binnen één geïntegreerd ontwerp- en informatiemodel. Uit deze vaststelling ontwikkelde zich de afgelopen jaren het concept van Bouwwerk Informatie Model (BIM).

### ***2.1 Risicobeheersing is de essentie van elk ontwerpproces***

In fine dient het ontwerpproces om elk risico op het niet behalen van de projectdoelstellingen te voorkomen of te minimaliseren. Zou men een bouwwerk - met al zijn doelen, functies en eisen - kunnen realiseren zonder enige berekening, tekening of vergunning, dan zou ook de behoefte aan een ontwerp(proces) vervallen. Vandaag zijn goed geïntegreerde processen onontbeerlijk om alle bouwrisico's, door de technische en organisatorische complexiteit en de diversiteit aan ontwerpdisciplines, te beheersen.

De aandachtspunten die centraal moeten staan bij een goed geïntegreerde ontwerpproces kunnen samengevat worden volgens het zogenaamde KIS-model [21]:

1. **Kwaliteit:** aantoonbaar voldoen aan alle functionele, technische en contractuele eisen;
2. **Integraliteit:** het transparant afstemmen en coördineren van alle ontwerp-oplossingen;
3. **Samenwerking:** het traceerbaar communiceren en vastleggen van besluiten en kennis.

Het platform om deze aandachtspunten effectief te beheersen is het centraal Bouwwerk Informatie Model. De wijze waarop het BIM model wordt ingericht en de BIM methode wordt toegepast legt men vast in het zogenaamde *BIM Execution Plan* (BEP). Kwaliteit gekoppeld aan operationele efficiëntie is het ultieme doel, de obstakels om dit te bereiken zijn projectrisico's. Risicobeheersing is hierdoor de sturende strategie.

### ***2.2 BIM Ontwikkelingsniveaus - van Modelling naar Management***

Het toepassen van BIM wordt stilaan gemeengoed voor complexe projecten, ook in de Grond Wegen- & Waterbouw (GWW). Maar meestal betreft het de toepassing van *Building Information Modelling*, waarbij de nadruk ligt op het driedimensionaal modelleren en integreren van ontwerp oplossingen. Deze methode draagt zeker bij tot geometrische coördinatie en beheersing van raakvlakrisico's. Van een volledig integraal en beheerst ontwerpproces is hier evenwel nog geen sprake. De raakvlakbeheersing verloopt meestal noch systematisch, noch op een risico-gestuurde wijze. Bovendien bestaat er geen geïntegreerde werkwijze voor de specificatie en verificatie, of validatie, van de functionele en technische eisen tijdens het ontwerp en bouwproces. De beheersing van het programma van eisen enerzijds, en de ontwerp oplossingen anderzijds, zijn niet met elkaar verbonden. Hierin schuilt een groot en onbeheerst risico dat de ontwerp oplossing niet strookt met de specificaties van de klant. Dit risico verhoudt zich recht evenredig met de omvang van het project.

Deze vaststelling sluit aan bij de '*BIM maturity levels*' volgens de *UK BIM Task Group* [22]:

- 1) Bij **BIM Level 1** gebruikt elke discipline een 2D of 3D CAD-systeem. Voor de ontwerp-coördinatie en het 'raakvlakbeheer' wisselen de disciplines onderling CAD-bestanden uit.
- 2) Bij **BIM Level 2** worden de (3D) disciplin modellen geïntegreerd in één BIM integratiemodel, zodat ontwerpcoördinatie en raakvlakbeheer effectiever wordt. Maar een integratie met ontwerp- en raakvlakeisen bestaat nog niet. Evenmin ontbreekt een (risico-gestuurd) proces voor verificatie en raakvlakbeheer. Het BIM-model is *in se* louter geometrisch.
- 3) Bij **BIM Level 3** - waarvan de definitie in de UK nog uitgewerkt wordt - streeft men naar een volledig geïntegreerd en *interoperable* BIM-plaform, zodat alle *Lifecycle Information*

van het bouwwerk integraal beheerst wordt, gedurende de gehele levenscyclus. De nadruk ligt hierbij veel meer op de niet-geometrische projectinformatie, waaronder de functionele en technische eisen en, vooral van belang voor BIM, de raakvlakeisen.

Omdat de huidige CAD en BIM software hoofdzakelijk gericht zijn op het modelleren en beheren van geometrische informatie is er dus nood aan een externe relationele database voor de niet-geometrische projectinformatie.

### 2.3 Systems Engineering (SE)

Systems Engineering is “een interdisciplinaire benadering met bijbehorende middelen die zich richt op het realiseren van succesvolle systemen over hun volledige levenscyclus”. SE focust op het vroegtijdig definiëren van klantbehoeften en gevraagde functionaliteit, het vastleggen van eisen, de ontwerpsynthese en systeemvalidatie, bij het beschouwen van het complete vraagstuk. SE ontstond bij de ontwikkeling van complexe kleinserie systemen voor lucht- en ruimtevaartindustrie en beschouwt zowel de bedrijfsdoelen als de technische behoeften van alle *stakeholders*. Dit met het doel een kwaliteitsproduct te realiseren dat voldoet aan de gebruikersbehoefte [23].

De niet-geometrische informatie die SE-processen beheersen zijn o.a.; functies en eisen, verificaties en validaties, scope en configuratie, objecten en activiteiten, raakvlakken en risico's. Een aanzienlijk deel van deze informatie heeft een rechtstreekse relatie tot het ontwerpproces, waarbij de geometrische projectinformatie van de ontwerp oplossingen integraal beheerst wordt in het BIM-model. Er bestaat dus een behoefte om een rechtstreekse relatie te leggen tussen de informatie in de SE-database en de 3D-objecten in het BIM-model.

Raakvlakbeheer is een SE-proces dat een gestructureerde decompositie van het ontwerp borgt in de *Systems Breakdown Structure* (SBS). Het beheerbaar maken van raakvlakken borgt de werking van het systeem – het bouwwerk - bij de integratie in de realisatiefase.

Binnen het raakvlakbeheer worden drie hoofdprocessen onderscheiden [24]:

1. De decompositie van een systeem in elementen naar functionele of fysieke objecten;
2. De documentatie van de interactie tussen de elementen als raakvlak;
3. De clustering van elementen naar de werkpakketten van de disciplines.

Onderzoekers onderscheiden vier typen raakvlakken [24]:

1. **Geometrie:** identificeert de relatie of oriëntatie van nabij gelegen elementen;
2. **Energie/belasting:** identificeert de energie of belastingoverdracht tussen elementen;
3. **Informatie:** identificeert de informatieoverdracht tussen elementen;
4. **Materiaaltype:** identificeert de materiaal uitwisseling tussen elementen.

Voor het identificeren van raakvlakken en raakvlak-afhankelijkheden werd de *Design Structure Matrix* geïntroduceerd [25]. Deze matrixbenadering, in Nederland beter bekend als  $N^2$ -matrix, is een effectieve methode om raakvlakken beheersbaar te maken, zowel bij systeem-decompositie als –integratie [26]. De belangrijkste voordelen van de  $N^2$ -matrix zijn: 1) reductie van complexiteit, 2) inzichtelijk maken van informatiestromen tussen disciplines, 3) ontdekken van onzichtbare patronen tussen producten en processen en 4) begrijpen van de dynamiek in het aantal uit te werken ontwerp problemen [27].

### **3. Casestudie Renovatie Velsertunnel**

#### **3.1 Stragische en Organisatorische Integratie, van Coentunnel naar Velsertunnel**

Bouwcombinatie Hyacint (Besix, Dura Vermeer, Spie en Croon) voert de renovatie van de Velsertunnel uit in opdracht van Rijkswaterstaat. Deels was dit consortium al betrokken bij de renovatie van de Eerste Coentunnel. Die ervaring (*lessons learned*) werd gericht toegepast en doorontwikkeld voor het project Velsertunnel. Bij de Coentunnel constateerde het ontwerpteam dat een integrale afstemming van het ontwerp essentieel is om een goed functionerend tunnelsysteem op te leveren. Zo kan de wegontwerp-discipline het profiel van vrije ruimte (PvR) alleen borgen als alle objecten van de VTTI-discipline (Verkeers-Technische en Tunnel Installaties) ruimtelijk op exacte posities worden gemodelleerd en gemonteerd. Een 3D-model van de verkeersbuizen (in AutoCAD) vormde bij de renovatie van de Eerste Coentunnel de basis voor de inpassing van de VTTI-installaties. Gedurende het project is de scope uitgebreid van louter 3D-modelleren naar data-integratie door het koppelen van enkele specificaties in de SE-database (Relatics) aan de 3D-tunnelgeometrie in het 3D model (Civil 3D).

Het 3D BIM-model heeft bij de renovatie van de Coentunnel het inzicht vergoot in de hiërarchie en afhankelijkheden tussen de raakvlakken van de verkeersbuizen, het PvR en de VTTI-objecten. Daarnaast hielp het BIM-model o.a. bij de validatie van het wegontwerp, de inpassing van de *barrier* en de positionering van de vluchtdeuren. Bij de Coentunnel bestond het 3D-model enkel uit de verkeersbuizen, de dienstgebouwen vielen buiten de BIM-scope. Echter, tijdens de renovatie bleek het ontbreken van een integraal 3D-model van de dienstgebouwen een handicap bij de inpassing van de installaties. De positionering, controle en uitvoering van de sparingen voor de leidingtracés bleek een tijdrovend proces. Daarnaast was de afstelling van het camerasysteem (CCTV) een tijdrovende klus, al was die al vereenvoudigd door de 3D-inpassing in de verkeersbuizen. De coördinatie van sparingen en de camerasimulatie vormden bij de aanpak van de Velsertunnel een toevoeging op de bewezen BIM raakvlakcoördinatie van de Coentunnel.

#### **3.2 Technische integratie Velsertunnel - vroeger en nu**

De Velsertunnel werd, als eerste Nederlandse snelwegtunnel, eind 1957 geopend na vijf bouwjaren. Het succes was, volgens de toenmalige Hoofd Ingenieur Directeur van Rijkswaterstaat, Ir. A. Eggink, “Te danken aan de zorgvuldige voorbereiding van de hoofdamtenaar en zijn staf van 25 technisch-ambtenaren”. Zij werden bijgestaan door een tiental ‘adviseurs’, vaak professoren. Het ‘Tunnelbureau’ van Rijkswaterstaat hield het ontwerpproces strak in handen. Het project werd aanbesteed volgens een klassiek bestek. De Britse aannemers waren zestig jaar geleden terecht trots op deze bouwkundige realisatie. De grootste uitdagingen lagen echter vooral bij de voorbereiding van de vernieuwende uitvoeringstechnieken voor de grond- en betonwerken. Het aandeel elektromechanische systemen (VTTI-installaties) en werktuigbouwkundige systemen was eerder beperkt te noemen. Hierdoor was de controle tijdens exploitatie hoofdzakelijk visueel en de bediening volledig manueel. In totaal werkten er op de Velsertunnel permanent, dag en nacht, minstens een half dozijn werknemers. Tabel 3 toont de verschillen in het VTTI aandeel van de Velsertunnel na de bouw in 1957 en de renovatie in 2016. De centralisatie van de tunnelbediening in een nieuwe verkeerscentrale (1996) en de aangescherpte veiligheidseisen resulteerden in een toename van het aantal installaties door de jaren heen.

<b>VTTI-systeem</b>	<b>Bouw Velsertunnel 1957 [3]</b>	<b>Renovatie Velsertunnel 2016 (Bron Hyacint)</b>
<b>ventilatie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dwarsventilatie, aanvoer verse lucht via perskanaal, afvoer vuile lucht via zuigkanaal;</li> <li>- pers- en zuigventilatoren in ventilatiegebouwen;</li> <li>- twee snelheden en schoepen-verstelmechanisme;</li> <li>- ventilatorschacht werd manueel afgesloten met een vlinderklep;</li> <li>- luchtkwaliteit gemeten met controle-apparatuur in afvoerkanalen, weergegeven in controlekamer;</li> <li>- rookconcentratie door visuele waarneming vanuit controlekamer door 'schakelwachter'.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Langsventilatie met 21 ventilatoren (doorblaassysteem);</li> <li>- ventilatoren geplaatst bij de tunnelportalen;</li> <li>- dwarsventilatie verbindingen naar de verkeersbuizen worden afgesloten;</li> <li>- de oude ventilatiekanalen in het middentunnelkanaal worden hergebruikt voor de ventilatie van de veilige ruimten;</li> <li>- de veilige ruimten zijn afzonderlijk van de tunnelbuizen geventileerd;</li> <li>- klimaatinstallaties dienstgebouwen en eindportalen.</li> </ul>
<b>Vuilwater pompinstallatie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 x 3 centrifugaalpomp in middenpomp kelder en 'waterkelders' aan tunneluiteinden;</li> <li>- manuele bediening door 'schakelwachter'.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Centrifugaalpomp met overdruk voorziening in een aangrenzende ruimte;</li> <li>- Centrale aansturing van 3 pompkelders.</li> </ul>
<b>verlichting verkeersbuizen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TL-buis-armaturen in plafondnissen kon voor 50% of 25% uitgezet worden;</li> <li>- 2 noodstroomgeneratoren, batterijen, accumulatoren en transformators in ventilatiegebouwen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LED verlichting langs de tunnelwanden;</li> <li>- Tunnelverlichting is schakelbaar vanuit de dienstgebouwen, eindportalen en verkeerscentrale;</li> <li>- Noodstroom generatoren en accu's.</li> </ul>
<b>beveiliging</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visueel vanuit controlekamer (geen camera's);</li> <li>- bewaking toegangswegen vanuit uitkijkposten nabij tunnelmonden;</li> <li>- om de circa 60 meter bevonden zich 'hulpposten' met, naast een brandslang en schuimblusser, een alarmknop en een telefoon. In de controlekamer kon men vaststellen waar het alarm gegeven was of een brandblusser in gebruik werd genomen;</li> <li>- Bluswaterreservoir van 60m<sup>2</sup> met twee pompen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CCTV gebouwen en verkeersbuizen;</li> <li>- Vluchtdeurindicatie en vergrendeling;</li> <li>- Bluswaterreservoir 120m<sup>2</sup> met 2 pompen;</li> <li>- Hulpkast met meer slanglengte;</li> <li>- Indicatie vluchtwegen en blusmiddelen;</li> <li>- Zichtmeetsysteem met afzonderlijke meetpunten;</li> <li>- SOS systeem per verkeersbuis;</li> <li>- Hoogtedetectie en aanrijdbeveiliging;</li> <li>- MTM verkeerssignalering;</li> <li>- C2000 communicatie Hulpdiensten;</li> <li>- Omroepinstallatie (blijft behouden);</li> <li>- Audiorecorder en eventrecorder;</li> <li>- Telefoonverbinding;</li> <li>- Toegangscontrole systeem per ruimte;</li> <li>- Electronisch beveiligingssysteem;</li> <li>- Brandmeldsysteem;</li> <li>- Blusvoorzieningen per gebouwsectie;</li> <li>- Transmissienetwerk;</li> <li>- Bedienings- en besturingssysteem met centrale;</li> <li>- Intercom met verkeerscentrale verbinding.</li> </ul>
<b>signalisatie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verkeerslichten en verlichte verkeersborden, worden manueel geschakeld in functie van de locatie van het obstakel;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matrixborden voor en in de tunnel;</li> <li>- Verkeerslichten an afsluitbomen;</li> <li>- Verrijdbare Vangrails (VEVA) voor rijbaanwissel bij calamiteiten.</li> </ul>

*Tabel 3 Vergelijking VTTI systemen Velsertunnel bij de bouw en na de renovatie;*

Het kostenaandeel voor de elektromechanische (VTTI) systemen bedroeg in 1957 slechts 5% van de totale bouwkosten voor de autotunnel. Uiteraard werden er sindsdien allerlei systemen gemoderniseerd en toegevoegd. Ter vergelijking; voor de renovatie van de Velsertunnel bedraagt het VTTI-aandeel 60%. Voor de bouw van een nieuwe verkeerstunnel, zoals de Tweede Coentunnel, loopt dit al snel op tot 20-30%. Men kan dus concluderen dat de sterke toename in technische complexiteit, bij de bouw of renovatie van verkeerstunnels mede door de spectaculaire toename van de VTTI-systemen gedreven wordt.

#### **4 Een risicogestuurde BIM strategie op de Velsertunnel**

De technische en organisatorische verantwoordelijkheden, en bijhorende financiële risico's, van Hyacint zijn aanzienlijk. Dit vereist een centraal informatiesysteem voor projectbeheersing, gericht op kwaliteit, integraliteit en samenwerking. Een essentieel



onderdeel hiervan is een gemeenschappelijke informatie omgeving, gebaseerd op een risico-gestuurde BIM-strategie, voor de beheersing van (raakvlak)eisen.

#### 4.1 Integrale afstemming met Opdrachtgever via Scrum sessies

Vanaf de gunning van de Velsertunnel wist het Hyacint-ontwerpteam de opgedane leerervaring uit de Eerste Coentunnel te verwerken in een verdieping van de integrale aanpak. In de periode tussen de voorlopige en definitieve gunning, de zogenaamde convergentiefase, hebben Hyacint en Rijkswaterstaat de functionele specificaties en eisen doorlopen in *scrum*-sessies. *Scrum* is een ontwikkelingsmethodiek uit de software-industrie. Tijdens de *scrum*-sessie werden systeemfuncties, door de betrokken disciplines, vertaald naar een integraal ontwerp voor de subsystemen. De *scrum*-sessies hebben het inzicht in de raakvlakken, afhankelijkheden en ontwerprisico's vergroot en bijgedragen aan de definitie van de beheersmaatregelen. Na de definitieve gunning is de *scrum*-aanpak consequent voortgezet tijdens het ontwerp.

#### 4.2 Integrale samenwerking via iBIM; geïntegreerde data en geometrie

Om de integraliteit te waarborgen is een ontwerpteam samengesteld dat alle disciplines en projectfases integreert en zo, o.l.v. de 'Integraal Technisch Manager' het ontwerpproces nauwgezet kan coördineren. Enerzijds wordt het project inzichtelijk gemaakt via een 3D-integratiemodel, het BIM-model, waarin alle afzonderlijke monodisciplinaire modellen samengevoegd worden, voor een permanente raakvlakbeheersing. Elk disciplinemodel is een digitale (CAD) weergave van de functionele en geometrische eigenschappen van het discipline-ontwerp, wat op zichzelf dient te voldoen aan de functionele en technische eisen. Anderzijds wordt in de SE-database (Relatics) alle niet-geometrische projectdata beheert, waaronder; eisen, uitgangspunten, raakvlakken, risico's, bouwactiviteiten en documenten. Al deze informatie is gerelateerd aan de SE-objecten van het bouwwerk (volgens de SBS). Dit faciliteert een open communicatie tussen opdrachtgever, opdrachtnemers en overige belanghebbenden. Bovenstaand beschreven systeem helpt om *issues*, conflicten en afwijkingen in een vroeg stadium vast te stellen, bijhorende faalkosten te reduceren en de integraliteit te borgen. Het BIM-model groeit zo uit tot dé informatiebron voor alle bouw- en onderhoudswerkzaamheden.

De objectenboom bevat 64 '*as-required*' objecttypes (aangevuld met 67 subtypes). Deze type objecten kennen 1.371 '*as-designed*' objectinstanties. Bijna 97% van de objectinstanties heeft een grafische representatie in een 3D-model, d.m.v. 18.175 CAD-objecten (Tabel 4.3).

# objecttypes	met ... instanties	# objecttypes	met ... raakvlakken
11	[1]	29	[0]
15	[2-5]	4	[1]
19	[6-20]	11	[2-5]
10	[21-49]	14	[6-9]
9	[50+]	6	[10+]

Tabel 4.3: Spreiding van aantal objectinstanties en raakvlakken t.o.v. objecttypes

Op de Velsertunnel werd een koppeling gecreëerd tussen de SE-data (uit Relatics) en de 3D-geometrie in de verschillende CAD-omgevingen (met behulp van de iBIM Connectoren van neanex). Een iBIM Connector is een software plug-in voor de vertrouwde CAD-software van de ontwerpers. Via een iBIM Connector wordt elk geometrisch CAD-object gekoppeld aan een objectinstantie uit de SE-objectenboom. Zo krijgt elk uniek SE-object een geometrische 'representatie' (locatie/dimensies) in de ruimte, eventueel in meerdere systemen (Autocad, Civil 3D, Revit) voor de disciplinemodellen en het integratiemodel (Navisworks). Doordat elk relevant CAD-object gekoppeld is aan het overeenkomstige SE-object wordt alle bijhorende data ontsloten en kan de ontwerper o.a. eisen en raakvlakken opvragen. De iBIM Connector biedt daarmee een bi-directionele koppeling tussen de disciplinemodellen en het integratiemodel enerzijds en de SE-database (Relatics) anderzijds.

### 4.3 Geometrisch Raakvlakkenbeheer

Een gestroomlijnde informatie-uitwisseling tussen alle disciplines is essentieel. Bij aanvang van het project heeft de BIM-manager per discipline een inventarisatie gemaakt van de te produceren output (*deliverables*), de gebruikte software en benodigde inputdata. De interviews, projectrisico's en 'BIM maturity level' van de ontwerpende partijen vormden de basis voor een gemeenschappelijke BIM-ambitie, beschreven in het *BIM Execution Plan*. Dit plan, dat zeer vroeg tot stand kwam, beschrijft o.a.: de demarcatielijn van object-eigenaarschap; het *Level Of Development* (LOD) per objecttype, per fase; de raakvlakken en afhankelijkheden; en de afspraken m.b.t. data-uitwisseling.

#### 4.3.1 Design Structure Matrix ( $N^2$ -matrix)

Door gebruik van een  $N^2$ -matrix (figuur 4.1) werden de onderlinge geometrische raakvlakken tussen objecten inzichtelijk gemaakt. Bij de opmaak van het *BIM Execution Plan* dient deze matrix als hulpmiddel voor het bepalen van het gewenste detailniveau (LOD) van de verschillende 'as required' objecttypes. In de conceptfase verklaarde de  $N^2$ -matrix op basis van het aantal raakvlakken dat de Verkeersbuizen en CCTV-installatie kritieke objecttypes zijn die een risico-gestuurde BIM-toepassing vereisen (zie 4.4 en 4.5). Van de 64 objecttypes uit de SBS werden er 35 opgenomen in de  $N^2$ -matrix (dit is 55%, maar wel goed voor 90% van alle objectinstanties). Tijdens de Definitieve Ontwerpfase (DO) werden tijdens integrale ontwerp-overleggen (*design scrums*) beheersmaatregelen toegekend aan 99 van de 173 initieel aangeduide raakvlakken (57%, of gemiddeld circa 6 per objecttype). Deze werden beheerd vanuit de SE-database en na elke ontwerpfase gevalideerd door een *clash test* in Navisworks (74%) of in ontwerpdocumenten (26%).

#### 4.3.2 Geometrisch raakvlakkenbeheer via iBIM

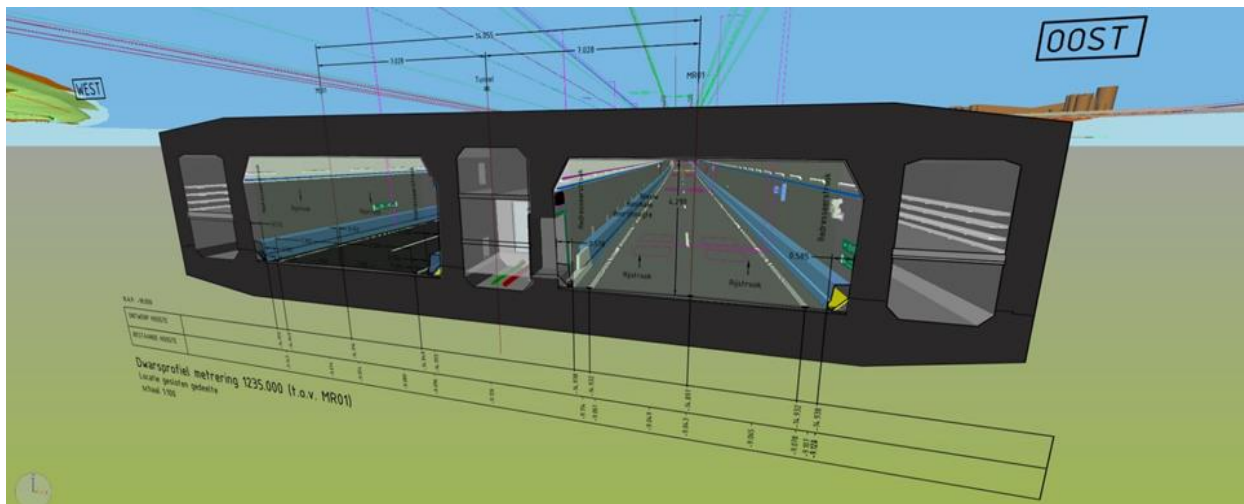
Voor de validatie werden type raakvlakken, tussen telkens twee objecttypes, en de bijhorende beheersmaatregelen, automatisch omgevormd tot Navisworks *clash tests* tussen twee groepen van objectinstanties. Alle relevante *clashes* worden via de iBIM Connector uit Navisworks naar de SE-database gekopieerd. Dankzij de iBIM connectie wordt een *clash* tussen twee 'ongerelateerde' CAD-objecten (in Navisworks) vertaald in een *clash* tussen twee 'gerelateerde' SE-objectinstanties (in Relatics). Daar kunnen de ontwerp(leid)ers steeds nagaan of hun disciplinemodellen nog actieve *clashes* bevatten. Naast een algemene raakvlakbeoordeling en actiebeschrijving vinden ze hier ook snapshots en specifieke clashdata terug. Ontwerpende partijen koppelen hun communicatie eveneens terug via deze gemeenschappelijke SE-



De iBIM Connector gaat echter verder en integreert alle projectdata zoals eisen, risico's en vergaderbesluiten in het BIM-model. Zo creëert het een volwaardige bi-directionele koppeling tussen geometrische en niet-geometrische projectinformatie.

Raakvlakken tussen een koppel objecten kunnen ook onderlinge afhankelijkheden vertonen (Figuur 4.3); als één van hen wijzigt kan dit grote invloed hebben op het ontwerp van andere disciplines. Hierbij is het dus belangrijk om de werkvolgorde goed op elkaar af te stemmen. Bijvoorbeeld, nabij de nieuw te bouwen 'veilige ruimtes' in het middentunnelkanaal ontstaat zo reeks van afhankelijke raakvlakken;

- |   |   |
|---|---|
| 1. Verkeersbuis & MTM/SOS:              | minimale afstand tussen wapening en verkeersslussen.  |
| 2. MTM/SOS & Verharding:                | minimale afstand tussen verkeersslussen en toplaag verharding.                                |
| 3. Verharding & Vluchruiimte:           | maximale afstand tussen toplaag verharding en nieuw aan te brengen sparing naar vluchtruimte. |
| 4. Vluchruiimte & Techn. kanaal:        | minimale afstand sparing vluchtruimte en tussenvloer technisch kanaal.                        |
| 5. Techn. kanaal & VLD-vergrendeling:   | minimale afstand tussen tussenvloer technisch kanaal en mechanisch sluitsysteem vluchtdeur    |
| 6. VLD-vergrendeling & Vluchruiimte:    | minimale afstand tussen mechanisch sluitsysteem vluchtdeur en roostervloer vluchtruimte       |
| 7. Vluchruiimte & Brandblusinstallatie: | minimale afstand tussen roostervloer vluchtruimte en brandbluswaterleiding                    |
| 8. Brandblusinstallatie & Hulpkast:     | afstemming brandbluswaterleiding en aansluiting in hulpkast.                                  |



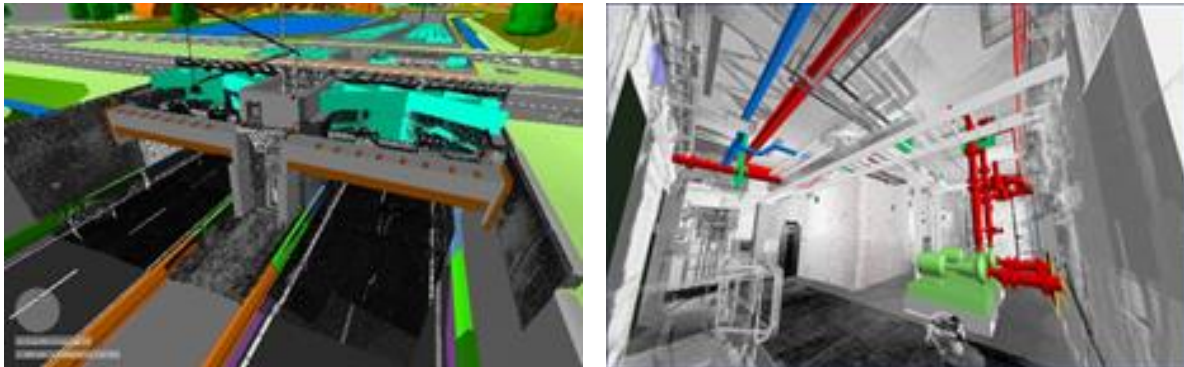
Figuur 4.3: Raakvlak-afhankelijkheden nabij vluchtruimtes in de Velsertunnel

#### 4.4 Laserscanning als betrouwbare basis

Voorgaande paragraaf introduceert een pro-actief raakvlakkenbeheer. Deze methodiek geeft enkel een betrouwbaar resultaat als de gebruikte inputdata in de modellen voldoende kwaliteit heeft. Bij aanvang van het project beschikte Hyacint enkel over het zestig jaar oude gescande *as-built* dossier, enkele digitale revisietekeningen en een laserscan op hoofdlijnen. De verruiming van de doorrijhoogte met 12 centimeter, en de inpassing van nieuwe VTTI-installaties vereist echter een zeer nauwkeurige opname van de actuele situatie. Hyacint heeft daarom besloten beide verkeersbuizen nauwkeurig in te meten via statische *laserscanning*. De kosten hiervan zijn bij grote risicovolle infrastructuur projecten zeker te verantwoorden. Ter illustratie; bij de renovatie van de Velsertunnel bedroeg de scankost minder als 1 *euro/m<sup>2</sup> nuttige wegoppervlak* ten opzichte van respectievelijk 185, 850 en 18 *euro/m<sup>2</sup> ontwerp-, bouw- en onderhoudskosten*.

Door middel van enkele statische *laserscans* (figuur 4.4) werden beide 1.6 km lange verkeersbuizen tijdens twee onderhoudsnachten opgemeten met een nauwkeurigheid van circa 5 millimeter (kleiner dan maximaal opgelegde tolerantie). Zonder grote verkeershinder wordt zo via één meting de geometrische van en verkeersbuis exact vastgelegd, welke achteraf

flexibel geconsulteerd kan worden door alle belanghebbenden. Deze geometrische databron wordt echter pas echt waardevol als het risico-gestuurd, volgens het ‘need-to-know’ principe, omgezet wordt naar een 3D object-model. Of zoals een marketeer ooit zei: “Data is just like crude oil. It’s valuable, but if unrefined it cannot really be used” [28].



*Figuur 4.4: Laserscan puntenwolk geïntegreerd in 3D-object-model. Tunnelingang met beschermingsconstructie (links) en dienstgebouw met brandblusinstallatie (rechts)*

#### **4.5 Virtual Reality Omgeving als communicatiehulpmiddel**

Door het toepassen van BIM als communicatiehulpmiddel (d.m.v. visualisaties, animaties en simulaties) kunnen belanghebbenden reeds aan het begin van het bouwproces zien hoe de toekomstige situatie eruit zal zien. Dit verhoogt de betrokkenheid, versnelt het vergunningsproces en geeft inzicht in de maakbaarheid. Voor de controle van het CCTV camera-systeem is een *Virtual Reality* (VR)-omgeving ingericht om de *presets* van iedere afzonderlijke camera (virtueel) te toetsen. De camera-applicatie CamSim van iNFRANEA (Figuur 4.5) helpt bij het correct positioneren en instellen van de camera’s, trekt discussies met de verkeerscentrale naar voren in het ontwerpproces, weg van het kritiek pad en verkort zo de uitvoeringsduur van het project.



*Figuur 4.5: Het centrale 3D-model verwerkt in een VR-omgeving voor de camerasimulatie*

De ontwikkelkosten van deze VR-omgeving zijn eenvoudig te verantwoorden, t.o.v. de maatschappelijke kosten voor elke dag dat de Velsertunnel langer gesloten zou blijven. Bovendien worden zo discussies over hoogoplopende meerwerkkosten tijdens uitvoeringsfase vermeden. Het is immers haast onmogelijk, voor de wegverkeersleiding, om het gewenste camerabeeld in contractuele eisen te omschrijven. Hierdoor kon bij de Eerste Coentunnel pas bijgestuurd worden tijdens de uitvoeringsfase. De bijhorende extra kosten, voor opdrachtgever en opdrachtnemer, worden op minstens een half miljoen euro geschat.

De VR-toepassing is ook een meerwaarde bij de communicatie met opdrachtgever en hulpverlenende instanties op vlak van verkeersveiligheid. Verschillende rijervaringen worden gesimuleerd en zo kunnen ontwerp mogelijkheden, zoals o.a. de geometrische inpassing van de verplaatsbare vangrails (VEVA), visueel gevalideerd worden.

## 5 Conclusie en aanbevelingen

Dit artikel illustreert dat, bij complexe (renovatie)projecten, de nog vaak gehoorde uitspraak “we bouwden vroeger toch zonder computers” niet langer opgaat. Tussen de bouw en de renovatie van de Velsertunnel liggen bijna zestig jaren. De focus verschoof van ‘bouwproject’ naar ‘bouwproces’. Aangepaste ICT-oplossingen, zoals iBIM, dragen bij aan de verbetering van de kwaliteit en efficiëntie van het bouwproces. ICT vergroot de voorspelbaarheid van het bouwproces waardoor de afstemming op de omgevingsbehoeften kan verbeteren.

### 5.1 Geconstateerde complexiteit bij Tunnelrenovatie

Bij de renovatie van de Velsertunnel werd de volgende complexiteit geconstateerd:

1. **Organisatorisch:** 3 disciplines verantwoordelijk voor 64 subsystemen. In totaal bevat de SE-database 326 unieke personen die verbonden zijn aan 17 organisaties;
2. **Technisch:** De verruiming van de doorrijhoogte in combinatie met de inpassing van allerlei nieuwe VTTI-installaties. Het project bevat 1.371 ‘as-designed’ objectinstanties, geclusterd in 67 verschillende disciplinmodellen;
3. **Strategisch:** Hyacint deed veel ervaring op bij de renovatie van Coentunnel 1 (mei 2013 - juli 2014) en kon een ervaren multidisciplinair ontwerp team inzetten op Velsertunnel;
4. **Tijd/dynamiek:** slechts 9 maanden tijd voor het verwijderen van de bestaande inrichting het aanbrengen van nieuwe installaties, wegconstructie, vluchtruimten en het testproces;
5. **Raakvlakken/interfaces:** 99 raakvlakken gedefinieerd in de SE-database, waarvan 73 gevalideerd via een iBIM-connector.
6. **Productiemiddelen:** beperkte ruimte in de dienstgebouwen en de tunnelbuizen. Voorafgaand aan de tunnelsluiting worden zoveel mogelijk voorbereidende werkzaamheden uitgevoerd in de dienstgebouwen. Tijdens de afsluiting worden vanuit veiligheidsoverweging twee buizen tegelijk aangepakt. Bij een nachtelijke afsluiting zijn testen gedaan met het freesmateriaal;
7. **Externe belangen:** 10 Regionale overheden, 12 landelijke overheden, 11 hulpdiensten, 3 vervoersbedrijven, 25 Kabels & Leiding beheerders, 7 belangenverenigingen, een druk nabijgelegen bedrijventerrein met zware industrie en 4 sportverenigingen.

### 5.2 Top 10 (iBIM) aanbevelingen voor complexe (tunnel)renovatieprojecten

De volgende 10 iBIM functies hebben de renovatie van de Velsertunnel vereenvoudigd:

1. *Laserscan input:* Scan bestaande bouwwerken via (statische) laserscans, zeker wanneer het ontwerp van de renovatie plaatsvindt terwijl het bouwwerk nog operationeel is.
2. *Connecteer Functie-ervullende objecten:* Koppel CAD-objecten in het 3D-model aan de objectenboom in de SE-database, zodat een hechte verbinding ontstaat tussen alle kritieke geometrische objectinstanties en de expliciet, centraal vastgelegde eisen en specificaties.
3. *Raakvlak is leidend voor het Level of Development (LOD):* Na de identificatie van de kritieke raakvlakken definieert de BIM-manager, in nauw overleg met de betrokken disciplines, de LOD-eisen per ontwerpfase, in het *BIM Excection Plan*.

4. *Raakvlak-beheersmaatregelen volgen uit ontwerpessies:* Leg de raakvlakbeheersmaatregelen, per discipline, vast tijdens de ontwerp-vergaderingen in de SE-database.
5. *Raakvlak identificatie stuurt clash-controle;* De afhankelijkheden tussen de raakvlakken uit de  $N^2$ -matrix worden hiërarchisch uitgewerkt in de SE-database. Dit bepaalt de logische volgorde van de uitvoering van de *clash-tests* in het 3D integratiemodel.
6. *Sparingen modelleren en connecteren:* Modelleer alle sparingen in de betonconstructie na het vaststellen van de leidings-tracés, en koppel deze in de SE-database om status en afwerkingseigenschappen integraal te monitoren.
7. *Geometrische validatie:* Werk de locaties, waar meerdere raakvlakken samenkomen, uit in 3D-doorsnedes en aanzichten, ter controle van de inpassing. Dit biedt inzicht voor alle partijen en vereenvoudigt de validatie.
8. *Clash coördinatie clusteren in de SE-database als alternatief voor BCF:* Verzamel de clashes en wijzigingsacties in de SE-database zodat de revisie van disciplin modellen geclusterd kan worden en de wijzigingshistoriek centraal bewaard en traceerbaar blijft. Raakvlak identificatie en model demarcatie borgen de consistentie van het ontwerp.
9. *Camera pre-set instellingen virtueel simuleren:* Virtuele camerasimulatie reduceert de bouw- en acceptatietijd van het CCTV-systeem.
10. *Virtual Reality als communicatie:* Het VR-model helpt bij de communicatie met uitvoerend personeel en andere hulpverlenende instanties.

### 5.3 Strategische BIM ontwikkelbehoeften

Bij de voorbereiding van een volgend (tunnelrenovatie) project kunnen de processen mogelijk beter beheersbaar gemaakt worden met de volgende ICT-ontwikkelingen:

1. Door integratie van de  $N^2$ -matrix, en raakvlakafhankelijkheden, in de SE-database vereenvoudigt men het raakvlakbeheersproces aanzienlijk (24).
2. Naast de louter fysieke raakvlakken kunnen nog andere type raakvlakken beheerd worden, bv. op het vlak van bouwactiviteiten, vergunningen, energieprestaties, informatie-voorziening, etc. Deze zijn mede bepalend in de ontwerpbesluitvorming, maar vaak niet traceerbaar opgenomen in het informatiemodel.
3. Een raakvlak met ruimte-voor-verdieping is tussen het ‘logische ontwerp’ van de VTTI-systemen, gericht op functionele scenario’s enerzijds, en de ‘geometrische inpassing’ van de VTTI-objecten anderzijds. De eerste discipline wil zo laat mogelijk ‘materialiseren’, de tweede zo vroeg mogelijk.
4. Door connectie van de CAD/BIM-objecten in de SE-database, met hun ontwerpstatus, kan men de voortgang van het ontwerp monitoren, via een *dashboard*. Ontwerpleider(s) kunnen zo ‘*management by exception*’ toepassen, om grip te houden op de kritieke ontwerppaden. Deze ontwikkeling sluit aan op het paradigma waarbij het takenpakket van managers verschuift van projectbeheersing naar kennisontwikkeling (16).

Dit artikel kwantificeert de complexiteit van het project “Velsertunnel” en geeft een beeld van bewezen BIM-toepassingen die bijdragen aan een beheersbaar renovatieproces. Een bijzonder woord van dank gaat uit naar Kees Neele, Joost Weijers, Niels Boon, André de Groen en Victor Malvar voor de energie die zij investeerden in de opzet van het totale informatie model. Daarnaast moet de visie en daadkracht van Jan van Steirteghem en Bart Ranke, vanuit het projectmanagement, vermeld worden; zij hebben de middelen vrijgemaakt om de BIM-leercurve succesvol voort te zetten. Tot slot ook dank aan alle projectmedewerkers van combinatie Hyacint en opdrachtgever Rijkswaterstaat voor de boeiende samenwerking.

## **Bibliografie** – in chronologische volgorde

- [1] **Baccarini**, D. (1996). The concept of project complexity—a review. *International Journal of Project Management*, 14(4), 201-204.
- [2] **Bosch-Rekvelde**, M.G.C. (2013). Complexiteit grote Bouwprojecten. Onderzoeksrapportage TU Delft.
- [3] **Maris**, A.G. (1957) De Velsertunnels. Technische uitgeverij H. Stam.
- [4] **Egan**, J. (1998). Rethinking Construction. Construction Task Force Report for Dept. of the Environment, Transport and Regions.
- [5] **Huijbregts**, P. (2007). Wat betekent Conceptueel Bouwen voor u? Netwerk Conceptueel Bouwen.
- [6] **Löhnert**, G., **A. Dalkowski**, and **W. Sutter**, (2003). Integrated Design Process; a guideline for sustainable and solar-optimised building design, Internat. Energy Agency.
- [7] **Staub-French**, S., & **Khanzode**, A. (2007). 3D and 4D modeling for design and construction coordination: issues and lessons learned. *ITcon*, 12, 381-407.
- [8] **Hartmann**, T., **Fischer**, M., & **Haymaker**, J. (2009). Implementing information Systems with project teams using ethnographic-action research. *Advanced Engineering Informatics*, 23(1), 57-67.
- [9] **Liberatore**, M. J., **Pollack-Johnson**, B., & **Smith**, C. A. (2001). Project management in construction: Software use and research directions. *Journal of construction engineering and management*, 127(2), 101-107.
- [10] **Vrijhoef**, R., & **Koskela**, L. (2000). The four roles of supply chain management in construction. *European journal of purchasing & supply management*, 6(3), 169-178.
- [11] **Ballard**, G., & **Howell**, G. (1994). Implementing lean construction: stabilizing work flow. *Lean construction*, 101-110.
- [12] **Naim**, M., **Naylor**, J., & **Barlow**, J. (1999). Developing lean and agile supply chains in the UK housebuilding industry. In *Proceedings of IGLC (Vol. 7, pp. 26-28)*.
- [13] **Dubois**, A., & **Gadde**, L. E. (2002). The construction industry as a loosely coupled system: implications for productivity and innovation. *Construction Management & Economics*, 20(7), 621-631.
- [14] **Stewart**, R. A., **Mohamed**, S., & **Daet**, R. (2002). Strategic implementation of IT-IS projects in construction, a case study. *Automation in Construction*, 11(6), 681-694.
- [15] **Baldwin**, C. Y., & **Clark**, K. B. (2003). Managing in an age of modularity. *Managing in the Modular Age: Architectures, Networks, and Organizations*, 149.
- [16] **Mintzberg**, H. (1987). *Crafting strategy* (pp. 66-75). Boston, MA: Harvard Business School Press.
- [17] **Gann**, D. M., & **Salter**, A. J. (2000). Innovation in project-based, service-enhanced firms: the construction of complex products and systems. *Research policy*, 29(7).
- [18] **Rivar**, H. (2000). A survey on the impact of information technology on the Canadian architecture, engineering and construction industry. *Electronic journal of information technology in construction*, 5, 37-56.
- [19] **Grilo**, A., & **Jardim-Goncalves**, R. (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in Construction*, 19(5).
- [20] **Whyte**, J., **Bouchlaghem**, N., **Thorpe**, A., & **McCaffer**, R. (2000). From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in Construction*, 10(1), 43-55.
- [21] **Gemeentewerken Rotterdam** (2015). Dossier renovatie maastunnel.
- [22] **Bew**, M., & **Richards**, M. (2008). BIM Maturity Model. In *Construct IT Autumn 2008 Members' Meeting*. Brighton, UK.
- [23] **Leidraad**, S. E. (2013). Leidraad voor Systems Engineering binnen de GWW-sector.
- [24] **Pimmler**, T. U., & **Eppinger**, S. D. (1994). Integration analysis of product decompositions.
- [25] **Steward**, D. V. (1981). The design structure system: a method for managing the design of complex systems. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, (3), 71-74.
- [26] **Browning**, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 48(3), 292-306.
- [27] **Yassine**, A., & **Braha**, D. (2003). Complex concurrent engineering and the design structure matrix method. *Concurrent Engineering*, 11(3), 165-176.
- [28] **Palmer**, M. (2006). Data is the new Oil, CMO News, [ana.blogs.com/maestros/2006/11/](http://ana.blogs.com/maestros/2006/11/)