

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Gezondheidsscore voor stalen bruggen: een modelgedreven methode richting
sensoregebaseerde evaluatie

Tibo Croonenborghs
Jarne Vandezande

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Eline VERECKEN

PROMOTOR :

Dhr. Vincent WAUTERICKX

COPROMOTOR :

Dhr. Bernard VAN DESSEL

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2024
2025

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

***Gezondheidsscore voor stalen bruggen: een modelgedreven methode richting
sensorgebaseerde evaluatie***

Tibo Croonenborghs
Jarne Vandezande

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Eline VEREECKEN

PROMOTOR :

Dhr. Vincent WAUTERICKX

COPROMOTOR :

Dhr. Bernard VAN DESSEL



KU LEUVEN

WOORD VOORAF

Deze masterproef werd geschreven ter voltooiing van de gezamenlijke masteropleiding Industriële Ingenieurswetenschappen: Bouwkunde aan de Universiteit Hasselt en KU Leuven. De thesis, getiteld “Gezondheidsscore voor stalen bruggen: een modelgedreven methode richting sensorgebaseerde evaluatie”, ontwikkelt een scoringsmethodiek ter beoordeling van de structurele gezondheid van stalen bruggen en verifieert de toepasbaarheid ervan door middel van een eindige-elementenanalyse (EEA). Op deze manier hopen wij bij te dragen aan de visie om gericht preventief onderhoud uit te voeren op bestaande bruggen, om zo de onderhoudskosten te verlagen en de levensduur van deze constructies te verlengen.

Dit onderzoek, uitgevoerd in samenwerking met Stadsbader Contractors NV, bood ons de unieke kans om bij te dragen aan de ontwikkeling van een scoringsmethodiek voor de gezondheidsevaluatie. Dit was voor ons, toekomstige bouwkundig ingenieurs, een uitdagend leertraject. Wij willen graag onze externe promotoren, Vincent Wauterickx en Bernard Van Dessel, hartelijk bedanken voor hun waardevolle begeleiding gedurende dit proces. Daarnaast danken we Samber Benoit voor zijn hulp bij het opstellen van het eindige-elementenmodel.

We wensen in het bijzonder onze interne promotor, prof. dr. ir. Eline Vereecken, te bedanken voor haar academische begeleiding, de grondige opvolging en de waardevolle inzichten die zij ons gedurende het hele proces heeft geboden. Haar betrokkenheid en deskundigheid waren essentieel voor het succes van ons onderzoek. Ook wensen we Bart Dreesen te bedanken voor de organisatie en ondersteuning van het masterproefseminarie.

Tot slot hopen wij dat deze thesis een inspiratie mag zijn voor toekomstige ingenieurs om verder te bouwen op deze methodiek en de gezondheidsscore toe te passen op praktijkgerichte projecten, zodat zij hun bijdrage kunnen leveren aan de verdere ontwikkeling van innovatieve oplossingen binnen de burgerlijke bouwkunde.

INHOUDSOPGAVE

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling	15
1.3 Doelstellingen	16
1.4 Vooruitblik	17
2 Literatuurstudie	19
2.1 Schadefenomenen in staalconstructies	19
2.2 Introductie tot Structural Health Monitoring (SHM)	22
2.2.1 Schade	22
2.2.2 Falen	23
2.3 Opzetten van het SHM-proces	23
2.3.1 SHM-paradigma uit de literatuur	23
2.3.2 SHM-paradigma binnen dit onderzoek	24
2.4 Bruikbaarheidscriteria voor fiets- en voetgangersbruggen op basis van de Eurocodes	25
2.4.1 Doorbuigingscriteria	27
2.4.2 Versnellingscriteria	27
2.5 Sensortechnologieën	28
2.6 Huidige scorings- en inspectiemethodiek	28
2.6.1 Visuele inspecties	28
2.6.2 Normen	31
2.6.3 Voorgaand onderzoek	34
3 Methodologie	37
3.1 Aanpak	37
3.2 Situering onderzoekslocatie	38
3.3 Structurele kenmerken	39
3.4 Inspectie onderzoekslocatie	40
4 Modelling van de brug	43
4.1 Geometrie van het model	43
4.1.1 Lineaire elementen (1D-elementen)	44
4.1.2 Plaat-elementen (2D-elementen)	48

4.1.3	Randvoorwaarden	49
4.1.4	Presentatie en kritische analyse van het model	51
4.2	Belastingsgevallen en lastgroepen	51
4.2.1	Permanente belastingen	52
4.2.2	Variabele belastingen	52
4.2.3	Belastingsgevallen en lastgroepen in SCIA Engineer	59
4.3	Belastingscombinaties	60
4.4	Simulatie van schade	63
4.5	Uitgevoerde analyses	64
4.5.1	Doorbuigingsanalyse	64
4.5.2	Trillingsanalyse	64
4.5.3	Spanningsanalyse	65
5	Gezondheidsscore	67
5.1	Uitgangspunten	67
5.2	Parameters	68
5.3	Opdeling constructiedelen	70
5.4	Scoringssysteem en weging	70
5.4.1	Doorbuiging	70
5.4.2	Trillingen	71
5.4.3	Corrosie	72
5.4.4	Visuele inspectie	75
5.4.5	Wegingsfactoren	76
5.4.6	Combinatiefactoren	79
5.4.7	Correctiefactor	80
5.4.8	Formulering gezondheidsscore	81
5.5	Interpretatie	82
5.6	Toepassing	83
5.6.1	Mijlpalen levensduur brug	83
5.6.2	Analyse huidige situatie	87
6	In de praktijk	89
6.1	Uitgangspunten	89
6.2	Sensorconfiguratie	89
6.2.1	Introductie tot relevante sensoren voor SHM van stalen bruggen	89
6.2.2	Sensorselectie	93
6.2.3	Keuze data-acquisitie en -transmissie	93
6.2.4	Meetopstelling	95
6.3	Praktische overwegingen	98
6.3.1	Impact bevestigingsmiddelen op frequentierespons	98

6.3.2	Visualisatie gezondheidsscore met Power BI-dashboard.....	100
7	Discussie	105
8	Besluit.....	111
	Referentielijst	115
	Bijlagen	119

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Classificatie schade op basis van visuele inspectie	21
Tabel 2: Opdeling klasse II op basis van urgentie onderhoud.....	22
Tabel 3: Waarden van de ψ -factoren voor voetgangersbruggen volgens NBN EN 1990 ANB:2021	26
Tabel 4: Minimale waarden van de verhouding L/δ van de overspanning, L, tot de maximale totale verticale doorbuiging, δ volgens NBN EN 1990 ANB:2021	27
Tabel 5: Conditiecores volgens NEN 2767	31
Tabel 6: Classificatie gebrekenparameter ernst.....	32
Tabel 7: Classificatie gebrekenparameter omvang	32
Tabel 8: Classificatie gebrekenparameter intensiteit.....	33
Tabel 9: Matrix conditiescore voor geringe gebreken	33
Tabel 10: Matrix conditiescore voor serieuze gebreken	33
Tabel 11: Matrix conditiescore voor ernstige gebreken.....	34
Tabel 12: Evaluatieschaal bruggen.....	35
Tabel 13: Materiaaleigenschappen constructiestaal S355J2	47
Tabel 14: Karakteristieke waarden voor de van toepassing zijnde belastingsgroepen	53
Tabel 15: Aangrijpende belastingen ten gevolge van voetgangersbelasting per brugdeel	54
Tabel 16: Overzicht parameters ter bepaling extreme stuwdruk	56
Tabel 17: Overzicht windkrachten op brugdek volgens oriëntatie NBN EN 1991-1-4	57
Tabel 18: Overzicht windkrachten op brugdek volgens oriëntatie eindige-elementenmodel..	57
Tabel 19: Overzicht thermische belastingen op brugdek	58
Tabel 20: Beoordelingsschaal doorbuiging.....	70
Tabel 21: Beoordelingsschaal verticale trillingen	71
Tabel 22: Classificatie corrosiecategorieën en verwacht dikteverlies na één jaar	73
Tabel 23: Tijdsexponent ter voorspelling en inschatting van de aantasting door corrosie	74
Tabel 24: Beoordelingsschaal corrosie na t jaar – geldig voor een constructieleeftijd van 1 – 100 jaar	74
Tabel 25: Beoordelingsschaal visuele inspectie	75
Tabel 26: Gebreken vastgesteld tijdens visuele inspecties en bijhorende score	75
Tabel 27: Bepaling gemiddelde toename van de doorbuiging op basis van simulatie afname doorsnedes	76
Tabel 28: Bepaling gemiddelde toename van de trillingen op basis van simulatie afname doorsnedes	77
Tabel 29: Bepaling gemiddelde toename van de invloed van corrosie op de toename van de spanning	77
Tabel 30: Invloed constructiedeel op doorbuiging.....	79
Tabel 31: Correctiefactor – leeftijd van de constructie	80
Tabel 32: Beoordelingsschaal gezondheidsscore en maatregelen	82
Tabel 33: Gegevens beschouwde brug	84
Tabel 34: Doorbuiging beschouwde brug	84
Tabel 35: Trillingen beschouwde brug	85
Tabel 36: Corrosie beschouwde brug	85
Tabel 37: Inspectie beschouwde brug	86
Tabel 38: Resultaten beschouwde brug	86
Tabel 39: Samenvatting resultaten	86
Tabel 40: Resultaten inspectie huidige situatie	87
Tabel 41: Resultaten huidige situatie	87
Tabel 42: Criteria voor de selectie van bevestigingsmiddel	98
Tabel 43: Jaarlijkse afname gezondheidsscore	106

Tabel 44: Detail resultaten oorspronkelijke toestand	108
Tabel 45: Detail resultaten na 100 jaar	108

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Vermoeiingsscheuren in stalen bruggen.....	19
Figuur 2: Corrosietypen naar aantastingslocatie. (a) Oppervlaktecorrosie (b) Kabelcorrosie	20
Figuur 3: Falen van boutverbindingen in stalen bruggen	20
Figuur 4: Corrosie aan het uiteinde van een ligger	20
Figuur 5: Scheurvorming ter hoogte van verbinding	21
Figuur 6: Scheurvorming betonplaat.....	21
Figuur 7: Organisatieschema beheer kunstwerken.....	30
Figuur 8: Aanpak onderzoek	37
Figuur 9: Geografische situering onderzoekslocatie	38
Figuur 10: Overzicht onderzoekslocatie.....	39
Figuur 11: Oplegging brug.....	40
Figuur 12: Corroderende lasverbinding van langsligger.....	41
Figuur 13: Corrosie ten gevolge van vochtophoping in dwarsligger	41
Figuur 14: Verbindingen steunpunten.....	41
Figuur 15: Spankabels.....	42
Figuur 16: Windverbanden	42
Figuur 17: Zijaanzicht fietsbrug F214.....	43
Figuur 18: Geometrische samenstelling diagonale pijlers	44
Figuur 19: Modellerings diagonale pijlers - SCIA Engineer.....	44
Figuur 20: Geometrische samenstelling dwarsliggers.....	45
Figuur 21: Vereenvoudigde gemodelleerde doorsnede dwarsliggers.....	45
Figuur 22: Modellerings diagonale pijlers en dwarsliggers - SCIA Engineer	46
Figuur 23: Geometrische samenstelling langsligger	46
Figuur 24: Modellerings samengestelde 1D-structuur – SCIA Engineer	47
Figuur 25: Geometrische samenstelling wegdek	48
Figuur 26: Doorsnede opbouw wegdek - SCIA Engineer.....	48
Figuur 27: Ankerdetail verbinding bodemplaat en pijlers.....	49
Figuur 28: Bovenanzicht aanduiding type opleggingen.....	50
Figuur 29: Restricties trogribben.....	50
Figuur 30: Globale model - SCIA Engineer.....	51
Figuur 31: Buitengewone belasting - dienstvoertuig	53
Figuur 32: Aanbrengen van voetgangersbelastingen in aparte belastingsgevallen	54
Figuur 33: Genereren verkeerslast op basis van belastingspatroon voor dienstvoertuigen ...	55
Figuur 34: Visuele weergave van de resulterende verkeerslast	55
Figuur 35: Conventie windbelastingen volgens oriëntatie NBN EN 1991-1-4.....	56
Figuur 36: Conventie windbelastingen volgens oriëntatie eindige-elementenmodel.....	57
Figuur 37: Definieren lastgroepen in SCIA Engineer - lastgroep wind.....	59
Figuur 38: Definieren belastingsgevallen in SCIA Engineer - temperatuurverschilcomponent op het brugdek	60
Figuur 39: Functionaliteit belastingscombinaties voor brugontwerp in SCIA Engineer	60
Figuur 40: Belastingscombinatie quasi – permanente gebruiksgrenstoestand voor voetgangersbruggen	61
Figuur 41: Gegenereerde belastingscombinaties – UGT-B & GGT-Q.....	62
Figuur 42: Ontlede lineaire combinatie - UGT-B	62
Figuur 43: Doorbuiging in GGT-Q – onaangetaste toestand	64
Figuur 44: Trillingen - onaangetaste toestand.....	65
Figuur 45: Spanningen in GGT-Q - onaangetaste toestand.....	65
Figuur 46: Flowchart ontwikkeling gezondheidsscore	68
Figuur 47: Zijaanzicht beschouwde brug	83

Figuur 48: Bovenaanzicht beschouwde brug	83
Figuur 49: ROCK Acceleration - accelerometer	90
Figuur 50: Rosemount™ Wireless Permasense ET410 - Corrosion and Erosion Monitoring System	91
Figuur 51: Werkingsprincipe LVDT	92
Figuur 52: Voorstel meetopstelling vervolgonderzoek (zijaanzicht).....	95
Figuur 53: Voorstel meetopstelling vervolgonderzoek (bovenaanzicht)	95
Figuur 54: Excitatiebronnen voor trillingsmetingen; links impacthamer, rechts: elektrodynamische shaker	97
Figuur 55: Frequentierespons van accelerometers afhankelijk van de verschillende bevestigingsmiddelen	99
Figuur 56: Dashboard - detail 1 (kaart)	101
Figuur 57: Gedetailleerde informatie.....	101
Figuur 58: Dashboard - detail 1 (sensoren)	102
Figuur 59: Dashboard - detail 2	102
Figuur 60: Dashboard - detail 3	103
Figuur 61: Dashboard - detail 4	103
Figuur 62: Samenvatting resultaten in grafiekvorm met aanduiding gezondheidsklassen...	105
Figuur 63: Impact preventief onderhoud	107

ABSTRACT

De bestaande bruggen in Vlaanderen zijn sterk verouderd en behalen vaak hun beoogde levensduur niet, wat leidt tot stijgende onderhoudskosten en risico's voor de veiligheid van weggebruikers. In samenwerking met Stadsbader Contractors NV ontwikkelt deze masterproef een scoringsmethodiek om de gezondheidstoestand van stalen bruggen objectief te evalueren, met als doel preventief onderhoud gericht in te plannen en de onderhoudskosten te beperken.

De methode werd ontwikkeld en gevalideerd aan de hand van een eindige-elementenanalyse in SCIA Engineer van de fietsbrug F214, onderdeel van het Diabolo-project. Structurele responsen en schadefenomenen zoals doorbuiging, trillingen en corrosie werden gesimuleerd in meerdere degradatiescenario's doorheen de tijd. Op basis van deze parameters werd een gezondheidsscore toegekend aan afzonderlijke constructiedelen. Deze deelscores werden gecorrigeerd op basis van de leeftijd van de brug en samengevoegd tot één algemene score. De methode koppelt deze score aan concrete onderhoudsmaatregelen.

Uit de simulaties blijkt dat de gezondheidsscore afneemt naarmate de brug ouder wordt, waarbij de degradatie in de loop der tijd versnelt. Preventief onderhoud, voornamelijk aan de langs- en dwarsliggers, is cruciaal om de levensduur te verlengen en onderhoudskosten te verlagen. De methode biedt een snelle en objectieve manier om de onderhoudsurgentie en degradatie over de tijd in te schatten. Verder vormt dit onderzoek een basis voor toekomstig sensoronderzoek via de analyse van diverse sensortypes.

ABSTRACT IN ENGLISH

The existing bridges in Flanders are significantly aged and often fail to reach their intended service life, leading to rising maintenance costs and increased safety risks for road users. In collaboration with Stadsbader Contractors NV, this master's thesis develops a scoring methodology to objectively assess the structural health of steel bridges, with the aim of enabling more targeted preventive maintenance and reducing maintenance costs.

The method was developed and validated by means of a finite element analysis of the bicycle bridge F214, part of the Diabolo project, in SCIA Engineer. Structural responses and damage phenomena such as deflection, vibrations, and corrosion were simulated across various degradation scenarios over time. Based on these parameters, a health score was assigned to individual structural components. These partial scores were adjusted based on the bridge's age and combined into an overall structural health score. The method links this score to practical maintenance actions.

Simulations indicate that the health score decreases as the bridge ages, with the rate of degradation accelerating over time. Preventive maintenance, particularly of the longitudinal and transverse girders, is crucial to extend the service life and reduce maintenance costs. The method offers a fast and objective way to determine maintenance urgency and degradation over time. Furthermore, this research forms a basis for future sensor-based studies through the analysis of various sensor types.

1 INLEIDING

1.1 Situering

De bestaande bruggen in Vlaanderen zijn sterk verouderd en behalen vaak hun beoogde levensduur niet, wat leidt tot stijgende onderhoudskosten en risico's voor de veiligheid van weggebruikers. In het kader van deze masterproef wordt er, in samenwerking met Stadsbader Contractors NV, onderzoek verricht naar innovatieve oplossingen om deze problematiek aan te pakken.

Stadsbader Contractors NV, voor hun overname bekend als BAM Contractors, is een Belgisch bedrijf met een rijke geschiedenis in de bouwsector. Het zusterbedrijf van Stadsbader NV, heeft zich door de jaren heen ontwikkeld tot een toonaangevende speler in zowel de openbare als private infrastructuursector. Dit omvat het ontwerp en de realisatie van complexe infrastructuurprojecten zoals bruggen, tunnels, industriële installaties, en waterwerken [1].

Naast het verwezenlijken van dergelijke infrastructuurprojecten streeft Stadsbader Contractors NV ernaar om in de toekomst intensiever te investeren in het monitoren en onderhouden van deze projecten. Deze focus op onderhoud en monitoring is een reactie op de toenemende zorgen over de duurzaamheid en veiligheid van het verouderende infrastructuurpatrimonium.

Bijgevolg is er een groeiende behoefte aan innovatief onderzoek en nieuwe technologieën om de integriteit en veiligheid van deze kunstwerken te waarborgen. Het onderzoek richt zich daarom op de ontwikkeling van een scoringsmethodiek om de gezondheidstoestand van stalen bruggen objectief te evalueren. Deze methodiek is gericht op het optimaliseren van de planning van preventief onderhoud, zodat noodzakelijke interventies tijdig en doelgericht kunnen worden uitgevoerd. Dit onderzoek richt zich specifiek op stalen bruggen, waarbij er een modelgedreven aanpak gehanteerd wordt om de nodige data te simuleren. Concreet wordt er binnen dit onderzoek beroep gedaan op een eindige-elementenmodel van een praktijkvoorbeeld, gemodelleerd in SCIA Engineer. In een latere fase is het de bedoeling om deze data te leveren door middel van sensoren die op locatie worden geïnstalleerd, om zo real-time inzichten te verkrijgen in de structurele toestand van de constructie. Aan het einde van deze thesis wordt er een inleidend kader geschetst over de toepassing van deze sensoren binnen de bepaling van de gezondheidsscore. Deze aanpak draagt niet alleen bij aan de veiligheid, maar ook aan de optimalisatie van onderhoudsbudgetten en de verlenging van de levensduur van de infrastructuur.

De samenwerking met Stadsbader Contractors NV biedt een unieke kans om theoretische kennis toe te passen in een praktische context, waarbij innovatieve oplossingen worden gezocht voor een actueel en urgent probleem in de bouwsector.

1.2 Probleemstelling

De bestaande bruggen in Vlaanderen zijn reeds sterk verouderd en behalen vaak hun beoogde levensduur niet. Meer dan 40% van deze kunstwerken werd gebouwd tussen 1960 en 1980 en zo'n 13,5% van de bruggen dateert zelfs van voor 1960 [2], [3]. Daarnaast blijkt dat de gemiddelde levensduur van de Vlaamse bruggen slechts 64 jaar bedraagt ten opzichte van de beoogde 100 jaar [2]. Dit komt voornamelijk voort uit het gebrek aan regulier onderhoud en de toegenomen verkeersdruk. Aldus verkeren minstens drie op de tien bruggen in Vlaanderen in een matige tot zeer slechte staat, wat het risico op structurele problemen

verhoogt en de veiligheid van weggebruikers in gevaar kan brengen [2]. Het belang van preventief onderhoud is dus niet te onderschatten, vooral gezien het steeds verder verouderende bruggenpatrimonium en de druk om deze constructies binnen hun levensduur zo efficiënt mogelijk te beheren. Tot op heden is de voornaamste methode voor het vaststellen van schade- en degradatiefenomenen een visuele inspectie [3]. Deze traditionele methode kent echter zijn gebreken. Zo speelt vooral de ervaring en subjectiviteit van de inspecteur een aanzienlijke rol in het beoordelingsproces. Daarnaast is een visuele inspectie doorgaans tijdsintensief, is er steeds een gebrek aan toegankelijkheid van bepaalde brugdelen en is veiligheid een belangrijk in acht te nemen aspect. Om deze redenen komen alsmaar vaker innovatieve oplossingen in beeld.

Door het gebrek aan onderhoud en de kortere levensduur dan oorspronkelijk beoogd, is de noodzaak tot onderhoud, renovatie of vervanging binnen het Vlaamse bruggenpatrimonium urgenter dan ooit. Gezien de beschikbare tijd, mankracht en budgetten onvoldoende zijn om alle bruggen in slechte staat gelijktijdig aan te pakken, is het noodzakelijk een methodiek te ontwikkelen die prioritering mogelijk maakt. Deze onderlinge vergelijking maakt het mogelijk om onderhouds- en renovatieplannen te optimaliseren door prioriteit te geven aan de kunstwerken die de grootste risico's vertonen, waardoor een veilige verkeerssituatie gewaarborgd blijft.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van dit onderzoek bestaat uit het ontwikkelen van een objectieve en eenduidige methode die het mogelijk maakt om de kwaliteit van een stalen brug te beoordelen in de vorm van een gezondheidsscore. Het doel van dit onderzoek is om deze score voornamelijk te baseren op éénduidig kwantificeerbare parameters. De voornaamste parameters waarop de nadruk zal liggen, omvatten doorbuigingen en trillingen. Binnen deze studie is deze data hoofdzakelijk afkomstig uit een eindige-elementenmodel. In een later stadium dient deze data voort te komen uit metingen die op locatie worden uitgevoerd. Deze omvangrijke hoofddoelstelling wordt vervolgens opgedeeld in deeldoelstellingen.

In een eerste fase wordt er een literatuurstudie uitgevoerd die zich voornamelijk focust op vier belangrijke aspecten. In eerste instantie wordt er gekeken naar factoren die een impact hebben op de structurele veiligheid van de constructie. Door deze bevindingen van eerder onderzoek te analyseren, wordt er inzicht verkregen in de mogelijke schadefenomenen waarmee in deze onderzoekscontext rekening gehouden moet worden. Ten tweede geeft de literatuurstudie inzichten in bestaande monitoring- en onderhoudsstrategieën, evenals hun tekortkomingen en verbetermogelijkheden. Op deze manier kan een gezondheidsbeoordelingsproces worden ontwikkeld dat relevant is binnen deze context. Daarnaast worden beoordelingscriteria op basis van de Eurocodes geanalyseerd, die de basis zullen vormen voor de vaststelling van grenswaarden binnen de scoringsmethodiek. Tot slot wordt er onderzoek verricht naar reeds bestaande, gelijkaardige scoringsmethodieken, die mogelijks waardevolle inzichten leveren.

De tweede deeldoelstelling richt zich op het ontwikkelen van een eindige-elementenmodel. Dit model wordt vervolgens gebruikt om de structurele staat van de staalconstructie, de brug in kwestie, te beoordelen. Daarnaast is het eindige-elementenmodel geschikt om degradatie van de structuur doorheen de tijd te simuleren, bijvoorbeeld door het plaatselijk verzwakken of volledig wegnemen van een structureel element, het veranderen van materiaaleigenschappen of het verhogen van belastingen.

De meest cruciale deeldoelstelling omvat het opstellen van een methode om de verschillende parameters samen te voegen tot een finale gezondheidsscore. Deze eindwaarde maakt de data vatbaar voor interpretatie en biedt de mogelijkheid om de kwaliteit van de staalconstructie tijdig en eenvoudig in te schatten. Deze gezondheidsscore wordt bepaald op basis van verschillende parameters zoals doorbuigingen en trillingen, waarbij er aan iedere parameter een gewicht wordt gegeven. Deze weging, alsook de grenswaarden voor iedere parameter, worden bepaald met behulp van de geldende Eurocode-richtlijnen die reeds bepaald werden in de literatuurstudie. Daarnaast is het cruciaal om te identificeren welke parameter bijdraagt aan een laag eindcijfer. Op deze manier kan er gericht onderhoud worden uitgevoerd. Verder biedt dit de mogelijkheid om voor een brug in goede staat te voorspellen wanneer onderhoud nodig is. Hierdoor kan men proactief inspelen op mogelijke problemen om zo de levensduur van de brug te optimaliseren.

In een laatste fase worden er belangrijke bevindingen en aandachtspunten besproken die cruciaal zijn om in rekening te brengen bij eventueel vervolgonderzoek. Ook worden er suggesties gegeven voor sensoren die toegepast kunnen worden binnen dit onderzoek. Daarnaast wordt er een voorstel gedaan voor een eerste meetopstelling gebaseerd op de belangrijkste te monitoren risicogebieden die voortkomen uit het eindige-elementenmodel.

1.4 Vooruitblik

In Hoofdstuk 2 volgt een literatuurstudie waarin de huidige stand van zaken rond het onderhoud van bruggen in Vlaanderen en de verschillende evaluatiemethoden voor de gezondheidstoestand van staalconstructies worden besproken.

In Hoofdstuk 3 worden de gebruikte middelen en methoden toegelicht, waarbij de nadruk ligt op de gevolgte aanpak voor het opzetten van de scoringsmethodiek.

Hoofdstuk 4 beschrijft de opbouw van het eindige-elementenmodel van de fietsbrug, gebaseerd op de plaatsbezoeken en as-builtonplannen. Ook de aan te brengen belastingen volgens de geldende Eurocode-richtlijnen worden toegelicht.

In Hoofdstuk 5 wordt de scoringsmethodiek zelf gepresenteerd, inclusief de toepassing ervan op het eindige-elementenmodel en de wijze waarop gezondheidsscores worden berekend.

Hoofdstuk 6 introduceert het gebruik van sensoren voor het verzamelen van data die nodig zijn voor het toepassen van de scoringsmethodiek in de praktijk. Daarnaast worden de belangrijkste bevindingen opgesomd die essentieel zijn om mee te nemen in toekomstig onderzoek. Ten slotte wordt een voorstel gepresenteerd voor de ontwikkeling van een real-time visualisatieplatform voor de gezondheidsscore, gekoppeld aan toekomstige sensormetingen.

Hoofdstukken 7 en 8 vatten de resultaten van het onderzoek bondig samen, gevolgd door een conclusie en aanbevelingen voor verder onderzoek alsook de praktische implementatie van de methode.

2 LITERATUURSTUDIE

2.1 Schadefenomenen in staalconstructies

Dit onderzoek richt zich op het beoordelen van de gezondheid en structurele integriteit van staalconstructies. Om deze reden richt het eerste deel van de literatuurstudie zich op het verwerven van inzicht in veelvoorkomende schadepatronen bij bruggen vervaardigd uit constructiestaal.

Volgens [4] zijn er voornamelijk drie verschillende schadefenomenen die verantwoordelijk zijn voor de schade bij stalen bruggen. Het meest voorkomende schadefenomeen is de zogenoemde vermoeiingsscheur. Dit schadefenomeen komt voornamelijk voor ter hoogte van de lasnaden van de staalprofielen. Vermoeiingsscheuren zijn afhankelijk van meerdere factoren, zoals de omgeving waarin het kunstwerk gebouwd is, de grootte van de wisselende belastingen op de brug en eventuele productie- of uitvoeringsfout. Wanneer een vermoeiingsscheur zich voordoet, volgt er een snelle verspreiding met ernstige schade tot gevolg. Figuur 1 geeft een aantal voorbeelden van dit schadefenomeen.



Figuur 1: Vermoeiingsscheuren in stalen bruggen [4]

Een tweede schadefenomeen dat zich voordoet bij stalen bruggen is corrosie. Door langdurige blootstelling aan lucht en water kunnen stalen bruggen corroderen. Dit proces wordt versneld indien de omgevingsinvloeden ongunstig zijn, zoals bij marine klimaten, vochtig en warm weer, zure regen en zoutnevel. Er wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende corrosievormen op basis van hun destructieve impact. De meest voorkomende vormen zijn uniforme corrosie, putcorrosie en spanningscorrosie. Het meest ingrijpende gevolg van corrosie is de resulterende brosheid van het staal. Dit leidt tot een verlies van de plastische capaciteit van het materiaal, waardoor bezwijken abrupt kan optreden. In tegenstelling tot ductiel falen, waarbij vervorming een vroegtijdige indicatie geeft van structurele degradatie, ontbreekt bij bros falen een dergelijke waarneembare waarschuwing.

Volgens [4] wordt, naast de aard van de destructieve aantasting, ook onderscheid gemaakt op basis van de meest voorkomende locaties waar corrosie optreedt. Hierbij worden twee vormen van corrosie onderscheiden op basis van hun locatie (zie Figuur 2): oppervlaktecorrosie en kabelcorrosie. Oppervlaktecorrosie is zichtbaar aan het oppervlak en kan doorgaans visueel worden vastgesteld. Kabelcorrosie daarentegen betreft een verborgen, interne aantasting van de kabelstructuur, die voornamelijk optreedt bij samengestelde kabels bestaande uit meerdere strengen, waarbij vochtophoping tussen deze strengen als voornaamste oorzaak geldt.



Figuur 2: Corrosietypen naar aantastingslocatie. (a) Oppervlaktecorrosie (b) Kabelcorrosie [4]

Het laatste schadefenomeen dat van toepassing is op stalen bruggen, is het loskomen van de verbindingen. Bij vele stalen bruggen worden er bouten gebruikt om de nodige verbindingen te realiseren, omwille van de eenvoudige en betrouwbare verbindingswijze. Echter, onder invloed van dynamische belastingen en temperatuursveranderingen zijn lokale boutverbindingen gevoelig voor loskomen en in een extreem geval zelfs falen. Dit heeft als gevolg dat de voorspanning van de bout vermindert of zelfs volledig verloren gaat, waardoor het draagvermogen van de constructie afneemt. Figuur 3 toont verschillende scenario's waarbij de verbindingsmiddelen falen.



Figuur 3: Falen van boutverbindingen in stalen bruggen [4]

Een onderzoek in Japan richtte zich op de meest voorkomende schadefenomenen bij stalen bruggen op nationale wegen [5]. Hierbij werd, door middel van visuele inspecties, gedurende een periode van tien jaar nauwkeurig bijgehouden welke schadefenomenen optraden. Tijdens deze onderzoeksperiode werden er 4304 stalen bruggen geïnspecteerd, wat overeenkomt met 52,3% van alle stalen bruggen in Japan. Op basis van dit onderzoek werd er vastgesteld dat er hoofdzakelijk drie soorten schade voorkomen bij stalen bruggen.

Een eerste schadefenomeen dat veelvuldig werd vastgesteld is corrosie. Dit fenomeen werd voornamelijk vastgesteld aan het uiteinde van de stalen liggers (zie Figuur 4) of in het midden van overspanningen ter hoogte van verbindingen. Er werd geconcludeerd dat corrosie in de meeste gevallen veroorzaakt werd door lekkage van water uit drainagevoorzieningen, dilatatievoegen of door ophoping van water.



Figuur 4: Corrosie aan het uiteinde van een ligger [5]

Het volgende schadefenomeen is het ontstaan van scheurtjes in het staal (zie Figuur 5), voornamelijk ter hoogte van lasnaden in de verbindingdelen van de hoofd- en dwarsliggers. Dit komt overeen met scheuren op de helft of op een kwart van de overspanningslengte. Verder werd er opgemerkt dat scheurvorming in de meeste gevallen gepaard gaat met corrosie.



Figuur 5: Scheurvorming ter hoogte van verbinding [5]

Het laatste schadefenomeen beschrijft het ontstaan van scheuren in de betonnen plaat, zoals geïllustreerd in Figuur 6. Deze scheuren werden hoofdzakelijk vastgesteld aan het einde van de hoofdliggers, op een kwart van de overspanningslengte en in mindere mate op de helft van de overspanning en op tussenliggende steunpunten. Er werd geconcludeerd dat deze scheuren het gevolg zijn van een verhoogde verkeersintensiteit en de degradatie van de bruggen.



Figuur 6: Scheurvorming betonplaat [5]

Verder werd er in dit onderzoek uit Japan gebruikgemaakt van een eenvoudige methode om de schade te classificeren. Hiervoor werd de schade opgedeeld in een vijfdelige schaal op basis van de bevindingen van de visuele inspecties. In een volgende fase werd elke klasse opgedeeld in een zevendelige schaal om de urgentie van herstelling of onderhoud aan te geven. Tabel 1 en Tabel 2 geven respectievelijk de classificatie van de schade en een verdere opdeling op basis van de onderhoudsurgentie voor klasse II.

Tabel 1: Classificatie schade op basis van visuele inspectie [5]

Damage classification	Condition
I	Damage serious, could become hazard to traffic safety
II	Damage remarkable; detailed examination needed to determine if repair is necessary
III	Damage found, trace research necessary
IV	Damage found, necessary to record level of damage
O.K.	No damage found as a result of inspection

Tabel 2: Opdeling klasse II op basis van urgentie onderhoud [5]

Priority	High ↑	II-1	Immediate repair necessary after immediate detailed study
		II-2	Immediate repair advised
		II-3	Early detailed study advised; repair as needed
		II-4	Repair as needed
		II-5	Consider need for repair, after a detailed examination
	↓ Low	II-6	Repair as part of normal maintenance work
		II-7	Trace study needed (re-inspect within three years)

Volgens deze werkwijze kan op eenvoudige manier de ernst van de schade en de onderhoudsurgentie van een bepaalde brug in kaart worden gebracht. Een nadeel van deze methode is echter de subjectiviteit van de inspecteur, aangezien er geen strikte, objectieve grenswaarden gehanteerd worden.

2.2 Introductie tot Structural Health Monitoring (SHM)

Het implementeren van een strategie die wordt gebruikt om de conditie en veiligheid van constructies, zoals bruggen, gebouwen en vele andere bouwkundige structuren te bewaken, noemt men *Structural Health Monitoring* of kortom SHM. Het hoofddoel van dergelijk proces is het tijdig identificeren van schade die optreedt in een structuur alvorens deze een kritieke toestand zal bereiken die zou kunnen leiden tot (structureel) falen. Om dit doel te bereiken, wordt er technologie ontwikkeld om visuele, tijdrovende en interpreteerbare inspecties (gedeeltelijk) te vervangen door kwantificeerbare en geautomatiseerde processen voor deze schadebeoordeling [6], [7].

Om diepgaander inzicht te verkrijgen in de basisprincipes van SHM is het van belang om enkele van deze begrippen te kaderen, aangezien deze cruciaal zullen zijn voor een helder begrip van de verdere inhoud.

2.2.1 Schade

Uit onderzoek blijkt dat het concept schade in SHM-context een bredere betekenis heeft dan de algemeen gangbare definitie van dit fenomeen. De gangbare definitie van het begrip benadrukt dat schade uitsluitend relevant is wanneer deze resulteert in structurele veranderingen aan de structuur die onmiddellijk of in de toekomst aanleiding geven tot het negatief beïnvloeden van de structuur. Daarnaast zijn er gevallen die niet meteen aanleiding geven tot het structureel falen van een structuur, maar wel het gebruikscomfort nadelig beïnvloeden. Dit is het geval bij overmatige doorbuigingen of trillingen. Hierdoor wordt het fundamentele onderscheid binnen de definitie in SHM-context expliciet duidelijk gemaakt. De meest kritieke structurele veranderingen betreffen onder meer aanpassingen in de randvoorwaarden, zoals veranderingen in verbindingen, funderingszettingen, belastingsomstandigheden en degradatie van materiaaleigenschappen.

Bijkomend is in SHM-context de vergelijking tussen twee toestanden van het systeem essentieel, waarbij één van beide als de oorspronkelijke, vaak onbeschadigde, toestand wordt beschouwd. Op deze manier is het begrip schade kwantificeerbaar en kan een relevante beoordeling tot stand worden gebracht [7].

2.2.2 Falen

Naast schade is het begrip ‘falen’ van belang in SHM-context. Zo betekent falen niet noodzakelijk dat de structuur zal instorten of zijn structurele capaciteit volledig verliest. In plaats daarvan verwijst het naar een punt waarop de structuur niet langer functioneert zoals oorspronkelijk ontworpen. Dit kan zich uiten in ontoelaatbare doorbuiging, verminderde stijfheid of een verhoogd trillingsniveau. Hierdoor ervaren gebruikers de structuur als onveilig, zelfs als de structurele integriteit niet direct in gevaar is.

2.3 Opzetten van het SHM-proces

Het correct opzetten van het SHM-proces vormt een essentiële stap in het organiseren van dit onderzoek. De reeds beschikbare informatie en kennis van SHM-benaderingen geven aanleiding tot het opstellen van een SHM-proces. Een fundamentele eerste fase in dit onderzoek is dan ook het op zoek gaan naar beschikbare literatuur, die dient als wetenschappelijke basis voor de structurering en optimalisatie van het SHM-proces.

2.3.1 SHM-paradigma uit de literatuur

Onderzoek toont aan dat er reeds bepaalde stappenplannen bestaan om aan SHM te doen [6], [7] en [8]. In dit onderzoek is ervoor gekozen om het *Statistical Pattern Recognition (SPR)*-paradigma, zoals beschreven in [6] en [7], als basis te gebruiken. Dit omdat deze onderzoeksmethode, naar eerste inschatting, de meest geschikte aansluiting biedt bij de specifieke toepassingen van deze studie.

In [6] wordt het SPR-paradigma als volgt beschreven:

- operationele evaluatie,
- data acquisitie, normalisatie en opschoning,
- eigenschapsextractie en informatiecondensatie,
- ontwikkeling statistisch model.

Hieronder volgt een beschrijving van deze verschillende stappen van het SPR-paradigma volgens [6].

Een eerste, inleidende stap in dit proces is het evalueren van de huidige staat van de te monitoren structuur. Volgens [6] en [7] is het beantwoorden van volgende vier inleidende onderzoeksvragen een geschikte methode om inzicht te verkrijgen in de omvang van de schade.

- Wat zijn de veiligheids- en/of economische redenen om de structuur te monitoren?
- Hoe wordt schade vastgesteld voor de structuur die wordt gemonitord?
- Wat zijn de operationele en omgevingsomstandigheden waaronder het systeem functioneert?
- Wat zijn de beperkingen bij het verkrijgen van gegevens in de operationele omgeving?

Een tweede stap bestaat uit het verzamelen, normaliseren en opschonen van de data. Alvorens de dataverzameling daadwerkelijk van start kan gaan, ligt de focus op het ontwerpen en implementeren van een sensornetwerk met een bijhorend data-acquisitiesysteem. Hierbij spelen economische en praktische overwegingen een belangrijke rol. Het normaliseren en opschonen van de data kent zijn belang binnen dit proces, aangezien het gericht is op het verwijderen van variabiliteit in de verkregen data omwille van temperatuursveranderingen,

signaalverstoringen, etc. Uit [7] blijkt dat het omzetten van de verzamelde data in concrete, interpreteerbare resultaten gebeurt volgens een 4-ledige procedure:

- datanormalisatie,
- data opschoning,
- datafusie,
- datacompressie.

Datanormalisatie is het proces waarbij veranderingen in de sensormetingen veroorzaakt door schade gescheiden worden van veranderingen in de sensormetingen veroorzaakt door variërende omgevingscondities. Het opschonen van data is het selectief kiezen van gegevens om door te geven of te verwerpen voor latere data interpretatie. Hierbij wordt vooral aandacht geschonken aan aanzienlijke veranderingen in de data, die duidelijk voor interpretatie vatbaar zijn. Datafusie is het proces waarbij de informatie van meerdere sensoren aan elkaar wordt gekoppeld. Op die manier is het mogelijk de betrouwbaarheid van het schadedetectieproces te verbeteren. Tot slot is er het zogeheten proces van datacompressie. Dit heeft als doel het efficiënt opslaan van informatie en het verbeteren van de kwantificering van de data.

Na het verzamelen van de data in de vorm van concrete resultaten, dient de derde stap zich aan in het proces. In deze fase wordt er bepaald hoe onderscheid gemaakt kan worden tussen twee verschillende systeemtoestanden. Enerzijds de oorspronkelijke, onaangetaste toestand vlak na constructie en anderzijds de huidige, aangetaste toestand. Om een onderscheid te kunnen maken tussen deze twee toestanden wordt vandaag de dag steeds vaker gebruik gemaakt van een modelgedreven aanpak om de oorspronkelijke toestand te simuleren, aangezien data van oude bruggen, zoals hoogtemetingen, vaak ontbreekt. Volgens de volgorde van de stappen in dit paradigma is er echter op dit moment nog geen model voor handen.

Een laatste stap, beschreven in voorgaande onderzoeken, is het opzetten van een statistisch model. In [6] en [7] wordt hieraan echter weinig aandacht besteed, aangezien zowel de kennis over als het gebruik van eindige-elementensoftware begin jaren 2000 nog relatief beperkt was.

Omwille van de bemerkingen in de laatste twee stappen van dit paradigma, wordt er in volgende alinea een herwerkte volgorde van het stappenplan opgesteld.

2.3.2 SHM-paradigma binnen dit onderzoek

Aangezien dit onderzoek zich richt op het onderzoeken van de structurele gezondheid van één specifieke brug om zo in verder onderzoek een methodologie te creëren die kan worden toegepast op meerdere bruggen, is het van belang inzicht te verkrijgen in de meest kritieke structurele componenten van de brug. Een gestructureerde aanpak is noodzakelijk om deze kritieke punten te identificeren. In plaats van een iteratieve procedure waarbij sensoren voortdurend worden verplaatst om optimale meetposities te vinden, lijkt het opstellen van een vereenvoudigd eindige-elementenmodel een meer geschikte benadering. Op deze manier kunnen de meest kritische locaties worden achterhaald aan de hand van simulaties in het numeriek model, om op deze manier over te kunnen gaan tot een gerichtere plaatsing van de sensoren. Bijgevolg wordt er een wijziging in de volgorde van voorgaand stappenplan doorgevoerd.

Het aangepaste stappenplan ziet er als volgt uit:

- operationele evaluatie,
- ontwikkeling statistisch model,
- data-acquisitie, normalisatie en opschoning,
- eigenschapsextractie en informatiecondensatie.

Ook zorgt de aanpassing van deze benadering ervoor dat er reeds een model beschikbaar is om gedurende de eigenschapsextractie gebruik te maken van het numeriek model om zo de initiële en huidige toestand te kunnen vergelijken, hetgeen voorheen niet mogelijk was.

2.4 Bruikbaarheidscriteria voor fiets- en voetgangersbruggen op basis van de Eurocodes

In dit onderzoek ligt de focus op de bruikbaarheidscriteria van fiets- en voetgangersbruggen, aangezien er gekozen wordt om één specifieke casus van een fiets- en voetgangersbrug te bestuderen. Dit maakt het mogelijk om de theoretische kaders te verbinden aan een praktijkvoorbeeld, wat bijdraagt aan een diepgaander inzicht en een meer gerichte toepassing van de onderzoeksresultaten in verder onderzoek.

Aangezien de Eurocodes geen expliciet onderscheid maken tussen fiets- en voetgangersbruggen, zijn binnen dit onderzoek de ontwerpregels voor voetgangersbruggen relevant. In de praktijk worden fietsbruggen namelijk vaak ook door voetgangers gebruikt, terwijl voetgangersbruggen eveneens toegankelijk zijn voor fietsers. Bovendien worden voetgangersbelastingen beschouwd als de meest kritische factor bij het bepalen van de dynamische respons van de constructie en dus het comfort van de gebruiker. Hieruit blijkt dat het onderscheid tussen voetgangers- en fietsbruggen minimaal is, waardoor er in de ontwerpregels en controles geen onderscheid wordt gemaakt tussen beide brugtypen. Daarom wordt deze brugtypologie in het verdere verloop van deze thesis consequent benoemd als een fiets- en voetgangersbrug.

De volgende Eurocodes en bijhorende nationale bijlages werden geraadpleegd in het kader van het bepalen van de bruikbaarheidscriteria voor fiets- en voetgangersbruggen:

- NBN EN 1990 + ANB: Grondslagen constructief ontwerp [9];
- NBN EN 1991-2 + ANB: Verkeersbelasting op bruggen (Specifiek H5) [10], [11];
- NBN EN 1993-2 + ANB: Ontwerp en berekening van staalconstructies - bruggen [12], [13].

In de Nationale bijlage van NBN EN 1990 zijn er specifiek voor voetgangersbruggen waarden vastgesteld voor de ψ -factoren, die afwijken van die voor gebouwen (zie Tabel 3). Deze ψ -factoren, beter bekend als combinatiefactoren, corrigeren belastingswaarden door rekening te houden met de kans dat meerdere belastingen gelijktijdig optreden, zodat een veilige, conservatieve combinatie van belastingen mogelijk is.

Tabel 3: Waarden van de ψ -factoren voor voetgangersbruggen volgens NBN EN 1990 ANB:2021 [9]

Belasting	Symbool	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Verkeersbelastingen	gr1	0,40	0,40	0
	$Q_{f_{wk}}$	0	0	0
	gr2	0	0	0
Windbelastingen	F_{Wk} - blijvende ontwerpsituaties	0,6 ²⁾	0,2	0
	- tijdens de uitvoering	0,8 ²⁾	-	0
Thermische belastingen	T_k	0,6 ^{1,2)}	0,6	0,5
Sneeuwbelastingen	$Q_{Sn,k}$ - tijdens de uitvoering	0,8 ²⁾	-	0
	- voor overdekte voetbruggen voor blijvende ontwerpsituaties	0,5 ²⁾		
Belastingen tijdens de uitvoering	Q_c	1,0	-	1,0
1) De aanbevolen waarde ψ_0 voor de thermische belastingen kan in de meeste gevallen tot nul worden herleid voor de uiterstegrenstoestanden EQU, STR en GEO. Zie ook de project-Eurocodes. 2) Wanneer een belasting van korte duur (korter dan 1 maand), bijv. gebruiksbelasting, sneeuwbelasting, windbelasting, thermische belasting, in een combinatie wordt gevolgd door een andere belasting van korte duur, mag een waarde $\psi_0 = 0,3$ worden gebruikt voor de tweede veranderlijke belasting wanneer dit een sneeuwbelasting, een windbelasting of een belasting veroorzaakt door een verandering van de temperatuur van de lucht is. Zie ook A1.1 ANB (3) voor de achtergrond.				

NBN EN 1991-2 en bijhorende nationale bijlage omvatten de richtlijnen rondom verkeersbelasting op bruggen, waarbij hoofdstuk 5 specifiek gericht is op belastingen op bruggen voor langzaam verkeer. De aan te brengen verkeersbelastingen worden uitvoerig besproken in sectie 4.2.2.1.

De dynamische krachten die door voetgangers worden uitgeoefend, genereren frequenties die vaak overeenkomen met de eigenfrequenties van de brug. Dit kan leiden tot resonantie, met mogelijk ontoelaatbare trillingen als gevolg. Een normaal lopende voetganger oefent periodieke krachten uit, wat trillingen veroorzaakt binnen de volgende frequentiegebieden:

- 1 - 3 Hz in verticale richting,
- 0,5 - 1,5 Hz in horizontale richting.

Tenslotte leggen NBN EN 1993-2 en de bijhorende nationale bijlage de ontwerp- en berekeningscriteria voor stalen bruggen vast.

In het ontwerp van bruggen zijn doorgaans de eisen in gebruiksgrenstoestand (GGT) reeds doorslaggevend, aldus zijn volgende bruikbaarheidscriteria het meest relevant om gedurende schadebeoordeling te monitoren:

- begrenzing van het elastisch gedrag,
- beperking van doorbuigingen en krommingen,
- beperking van eigenfrequenties,
- begrenzing plaatslankheid (risico op plooiën),
- verbetering duurzaamheid om corrosie en overmatige slijtage te verminderen,
- gemak van onderhoud en herstel.

Daarnaast stelt de norm dat een vermoeiingsbeoordeling niet van toepassing is op voetbruggen aangezien deze overwegend statisch belast worden. Echter zijn er uitzonderingen op deze regel, bijvoorbeeld wanneer deze door windbelasting of voetgangers in trilling kunnen worden gebracht.

2.4.1 Doorbuigingscriteria

In de nationale bijlage van NBN EN 1990 worden de limietwaarden voor verticale doorbuigingen toegelicht. In België is er echter tot op heden geen specifieke norm beschikbaar die grenzen stelt aan de doorbuiging van fiets- en voetgangersbruggen.

Volgens Tabel 4, uit bijlage A van deze norm, worden grenswaarden bepaald op basis van de verkeerssnelheid en het aantal opeenvolgende brugdekken. Het is belangrijk te benadrukken dat deze tabel van toepassing is voor spoorverkeer en dus niet rechte reeks geldig is voor fiets- en voetgangersbruggen.

Tabel 4 geeft de minimale waarden voor de verhouding L/δ , waarbij δ staat voor de maximale verticale doorbuiging en L voor de lengte van de overspanning. Deze verhouding is afhankelijk van het aantal opeenvolgende brugdekken en de snelheid waarmee het verkeer zich verplaatst. De uit deze tabel afgeleide limietwaarde resulteert in een maximale verticale doorbuiging van $L/900$ voor verkeer met een snelheid kleiner dan of gelijk aan 120 km/u.

Tabel 4: Minimale waarden van de verhouding L/δ van de overspanning, L , tot de maximale totale verticale doorbuiging, δ volgens NBN EN 1990 ANB:2021 [9]

Snelheid V (km/u)	Minimale verhouding L / δ			
	1 of 2 opeenvolgende brugdekken		3 tot 5 opeenvolgende brugdekken	
	$L \leq 25 \text{ m}$	$30 \text{ m} \geq L$	$L \leq 25 \text{ m}$	$30 \text{ m} \geq L$
$V \leq 120$	600	600	600	900
$120 < V \leq 200$	600	800	1000	2200
$V > 200$	800	1000	1200	2200

Een andere norm die hierbij een richtlijn geeft is de AASHTO LRFD uit de Verenigde Staten [14]. Deze norm geeft een limietwaarde specifiek voor stalen bruggen onderhevig aan een belasting bestaande uit voertuigen, met of zonder voetgangersbelasting. Voor de limietwaarde van de verticale doorbuiging met voetgangersbelasting geldt er een strengere waarde van $L/1000$ ten opzichte van de $L/800$ voor enkel voertuigen, aangezien voetgangers gevoeliger zijn voor doorbuigingen omwille van het gebruikscomfort.

Op basis van deze normen wordt de meest kritische grenswaarde voor de verticale doorbuiging aangenomen, namelijk $L/1000$.

2.4.2 Versnellingscriteria

Daarnaast worden er in de nationale bijlage van NBN EN 1990 volgende bovengrenzen gesteld aan de maximale versnelling van het brugdek van fiets- en voetgangersbruggen onder invloed van de belasting van voetgangersverkeer. De maximaal toegelaten versnellingen van het brugdek bedragen:

- $0,7 \text{ m/s}^2$ voor trillingen in de verticale richting,
- $0,2 \text{ m/s}^2$ voor trillingen in de horizontale richting,
- $0,4 \text{ m/s}^2$ voor uitzonderlijke omstandigheden met een menigte.

Binnen dit onderzoek worden de maximale versnellingen ten gevolge van verticale trillingen in rekening gebracht bij de bepaling van de gezondheidsscore van stalen bruggen.

2.5 Sensortechnologieën

Na het identificeren en afbakenen van de te monitoren bruikbaarheidscriteria is een logische vervolgstap het op zoek gaan naar reeds bekende sensortechnologieën en toepassingen om deze te monitoren.

Uit [6] blijkt dat deze sensorsystemen veelal op een niet-gestandaardiseerde wijze worden ontworpen. Dit mede omwille van de afhankelijkheid van de specifieke projecteisen.

Volgens [6] is het toch enigszins mogelijk een algemeen stappenplan te volgen in het ontwerp van dergelijk sensorsysteem. Volgende criteria worden vastgelegd om een eerste ontwerp te bekomen:

- sensorconfiguratie: type sensoren, aantal en locaties,
- gegevensacquisitie- en opslagsysteem,
- energievereisten,
- meetintervallen,
- geheugencapaciteit,
- excitatiebron.

Daarnaast stelt [6] dat er vier bijkomende, beperkende factoren zijn die de keuze van de hardware beperken:

- de tijdschaal waarop schade gedetecteerd wordt,
- de tijdschaal waarop schade zich ontwikkelt,
- invloed van variërende en/of ongunstige omgevingsomstandigheden op het systeem,
- kosten.

Bovenstaande criteria en beperkende factoren vormen een goede basis voor het samenstellen van een initieel sensorsysteem.

2.6 Huidige scorings- en inspectiemethodiek

Om inzicht te verkrijgen in de wijze waarop bruggen in het verleden en hedendaags worden geïnspecteerd en beoordeeld, worden reeds beschikbare inspectiemethoden en normeringen bestudeerd. Er wordt hierbij rekening gehouden met zowel de Belgische als de internationale context.

2.6.1 Visuele inspecties

Een cruciale stap bij het beoordelen van de structurele integriteit van een constructie is het toekennen van een gezondheidsscore. Op deze manier is het mogelijk om op een gerichte manier de gezondheid van een constructie in te schatten en eventuele maatregelen door te voeren. Het is hierbij cruciaal om dit op een eenduidige en objectieve manier uit te voeren, zodat de resultaten onderling vergeleken kunnen worden. In België is er op dit moment geen genormaliseerde methode voorhanden die een richtlijn vormt voor het bepalen van een gezondheidsscore voor staalconstructies. Daarentegen zijn er wel een aantal principes die de conditie van een constructie proberen in te schatten op basis van visuele waarnemingen. Onderstaande opsomming geeft een overzicht van de verschillende inspecties voor kunstwerken, geadviseerd door Expertise Beton en Staal (EBS). Deze richtlijnen zijn gebundeld in Dienstorder LI 93/50 van 1 juli 1993 [15].

Een eerste vorm van inspecties, zijn de zogeheten routine-inspecties. Bij dit type inspectie gelden er geen vaste voorschriften en zijn er geen speciale middelen nodig. De routine-inspecties gebeuren regelmatig door het personeel van de beherende dienst. Het doel van deze inspecties omvat het vaststellen of de veiligheid van de gebruikers al dan niet in gedrang is, of dat er zich een abnormale evolutie voordoet in het gedrag van bepaalde constructieonderdelen. Bij eventuele onregelmatigheden brengt het personeel de ingenieur-beheerder op de hoogte, waarna de nodige maatregelen getroffen worden. Bij ernstige gebreken wordt er een occasionele inspectie uitgevoerd.

De algemene inspectie, ook wel A-inspectie genoemd, omvat een grondige inspectie en een controle waterpassing van het kunstwerk [15]. Deze inspectie vindt systematisch om de drie jaar plaats, door gespecialiseerde ploegen van de beherende dienst. Het tijdstip van de controlewaterpassing wordt zo gekozen dat er hoogstens 12 maanden zitten tussen het uitvoeren van de controlewaterpassing en de eigenlijke inspectie. Aan het einde van deze twee controles wordt er een A-inspectiedossier opgesteld, dat als advies dient voor het beheercentrum. Het beheercentrum deelt op zijn beurt zijn advies mee aan de beherende dienst.

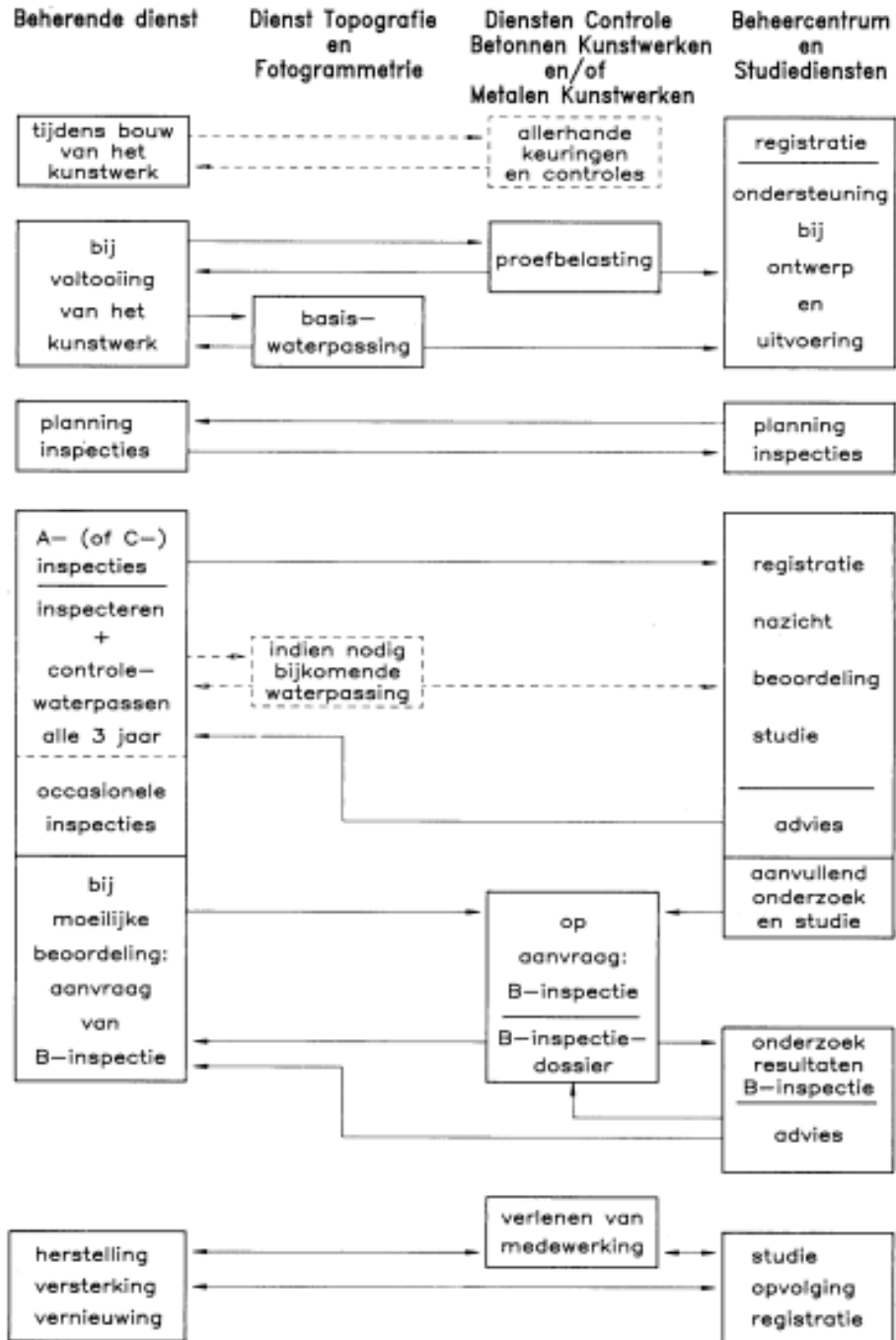
De controle-inspectie, beter bekend als de C-inspectie, wordt toegepast bij kunstwerken waarvoor weinig problemen worden verwacht omwille van hun bouwtype en waarvan de gebreken niet in slechte zin evolueren. Indien aan deze voorwaarden wordt voldaan kunnen deze controle-inspecties eventueel om de 6 jaar worden uitgevoerd. Bij de C-inspectie worden zoals bij de A-inspectie, alle elementen geïnspecteerd. Het verschil hierbij is dat het inspecteren sneller kan gaan en er minder hulpmiddelen dienen ingezet te worden. De controlewaterpassing gebeurt op identieke wijze. Tot slot wordt er een C-inspectiedossier opgesteld.

De bijzondere of B-inspectie, is een verder doorgedreven inspectie dan de A-inspectie voor welbepaalde elementen van het kunstwerk. Hierbij worden er extra hulpmiddelen ingeschakeld in de vorm van gespecialiseerd materieel en aangepaste apparatuur. B-inspecties vinden enkel plaats op vraag van de beherende dienst of van het beheercentrum en worden opnieuw uitgevoerd door de dienst EBS. Deze gespecialiseerde dienst is uitgerust om meer geavanceerde onderzoeken uit te voeren zoals het nemen van betonmonsters, bepalen van het carbonatatiefront, betondruksterkte, hoekverdraaiingen en doorbuigingen. Gelijkaardig aan de voorgaande inspecties, wordt er ook hier een inspectiedossier opgesteld en bezorgd aan het beheercentrum als advies, ditmaal met afschrift aan de dienst EBS.

Een laatste inspectievorm omvat de occasionele of O-inspecties. Dit zijn inspecties die worden ingezet indien de systematische termijnen van 3 en 6 jaar voor respectievelijk de A- en C-inspecties onvoldoende blijken. Bij de O-inspecties wordt het volledige kunstwerk of een deel ervan aan een inspectie onderworpen.

Figuur 7 geeft een schematisch overzicht van de betrokken partijen en verschillende stappen bij het beheerproces van kunstwerken. Hierbij valt vast te stellen dat dit een tijdrovend proces omvat, waarbij veel verschillende partijen aan bod komen. Daarnaast vereisen deze verschillende soorten inspecties veel apparatuur en personeel om de grote hoeveelheid bruggen in Vlaanderen om de 3 (of 6) jaar te inspecteren. Daarbij komt het feit dat er door deze systematische inspectiecycli regelmatig onnodige of laattijdige inspecties worden uitgevoerd. Een data-gestuurde aanpak waarbij er vanop afstand bepaald kan worden in welke mate een inspectie of onderhoud nodig is, zou bijgevolg een significante tijdwinst opleveren.

ORGANISATIESCHEMA



Figuur 7: Organisatieschema beheer kunstwerken [15]

Daarnaast stelt men vast dat deze manier van werken voornamelijk berust op het visueel inspecteren van een structuur, waardoor de subjectiviteit van de inspecteur een rol kan spelen. Verder zijn de inspecties enkel relevant voor de specifieke kunstwerken waarop ze werden uitgevoerd om de conditie en degradatiesnelheid in te schatten. Deze methode is niet geschikt voor het bepalen van de onderhoudsprioriteit van alle bruggen in Vlaanderen, aangezien deze uitsluitend rekening houdt met de veranderingen in de structurele kwaliteit van één individuele brug.

2.6.2 Normen

In België is er tot op heden geen norm beschikbaar die de structurele kwaliteit van een constructie beoordeelt en weergeeft in een eindscore. In Nederland bestaat er een norm die verschillende gebrekenparameters samenvoegt in één enkele conditiescore. Deze Nederlandse norm, NEN 2767, biedt in het kader van dit onderzoek enkele inzichten die een meerwaarde bieden bij het beoordelen van de structurele integriteit van constructies.

Deze norm heeft volgende doelstellingen [16]:

- uniformiteit scheppen in de conditiescore per bouwdeel door definitie van een waarde die de technische toestand van het bouwdeel uitdrukt. Deze waarde is een combinatie van ernst, omvang en intensiteit van een gebrek;
- inzicht en eenheid brengen in de soorten gebreken op basis van de gebrekenparameters ernst, omvang en intensiteit;
- de aangetroffen gebreken classificeren en ondersteunen bij de prioriteitsstelling: een rangorde aanbrengen in de noodzaak van herstel van de aangetroffen gebreken;
- een hulpmiddel bieden voor toetsing, sturing en uitvoering voor organisatieonderdelen die gericht zijn op beheer en onderhoud.

Dankzij deze norm kunnen allerhande schadefenomenen en gebreken eenduidig worden geclassificeerd. Op deze manier kunnen er prioriteiten gesteld worden waarbij de noodzaak tot herstel in rekening wordt gebracht. De classificatie gebeurt door middel van de zogenaamde gebrekenparameters, die zorgen voor eenduidigheid en inzicht. Deze gebrekenparameters omvatten de intensiteit, omvang en ernst van een gebrek. Binnen deze norm wordt er een 6-puntenschaal gehanteerd, waarbij een score van 1 overeenkomt met een 'uitstekende conditie' en een score van 6 met een 'zeer slechte conditie'. Tabel 5 toont de verschillende conditiescores en de bijhorende omschrijving volgens NEN 2767.

Tabel 5: Conditiescores volgens NEN 2767 [16]

Conditiescore	Omschrijving
1	Uitstekende conditie
2	Goede conditie
3	Redelijke conditie
4	Matige conditie
5	Slechte conditie
6	Zeer slechte conditie

Een conditiescore van 1 (uitstekende conditie) komt overeen met een situatie waarbij er zeer beperkte veroudering aanwezig is. Eventuele gebreken doen zich enkel accidenteel voor. Bij een conditiescore van 2 (goede conditie) is er sprake van beginnende veroudering. Er treedt incidentele materiaal aantasting en veroudering van de afwerkingslagen op. Daarnaast neemt men verouderingsverschijnselen waar. Een conditiescore van 3 (redelijke conditie) komt overeen met een situatie waarbij het verouderingsproces plaatselijk op gang is gekomen en waarbij de bouwdeelen plaatselijk tot regelmatig tekenen van veroudering en schade vertonen. Een score van 4 (matige conditie) treedt op wanneer men het verouderingsproces op regelmatige basis waarneemt. Hierbij vertonen de bouwdeelen in aanzienlijke mate gebreken en kunnen de primaire functies van deze bouwdeelen in het gedrang komen. Een conditiescore van 5 (slechte conditie) doet zich voor wanneer het degradatieproces zich in een vergevorderd stadium bevindt en de schadefenomenen min of meer onomkeerbaar zijn geworden.

De bouwdelen vertonen aanzienlijke gebreken, waardoor er functieverlies optreedt. De meest drastische conditiescore, conditiescore 6 (zeer slechte conditie) treedt op wanneer er een maximaal gebrekenbeeld wordt waargenomen. Er treden in dit geval voortdurend storingen op en de bouwdelen kunnen hun functie niet meer vervullen. De conditiescore wordt bepaald aan de hand van drie parameters, hierna gebrekenparameters genoemd. Deze gebrekenparameters worden hieronder kort besproken.

De eerste gebrekenparameter is ernst. De ernst van een bepaald schadegeval kan worden opgedeeld in drie niveaus, respectievelijk ernstige, serieuze en geringe gebreken. Tabel 6 geeft toelichting bij deze niveaus.

Tabel 6: Classificatie gebrekenparameter ernst [16]

Ernst	Toelichting	Voorbeeld
Ernstig gebrek	Veroorzaakt afbreuk aan de functie van het bouwdeel	Bijvoorbeeld: houtrot, barsten in een rookgasafvoer van een ketel
Serieus gebrek	Veroorzaakt degradatie van het bouwdeel zonder de functionaliteit direct aan te tasten	Bijvoorbeeld: verwerking, erosie, een gebrek dat leidt tot lekkage bij installaties
Gering gebrek	Veroorzaakt geen afbreuk aan de functionaliteit van het bouwdeel	Bijvoorbeeld: verkleuring door veroudering, ondeugdelijke bevestiging van componenten

Een tweede gebrekenparameter is de omvang van een bepaald schadeverschijnsel. Deze indeling gebeurt op basis van de oppervlakte van een bepaalde constructie of bouwdeel die aangetast is door het te onderzoeken schadefenomeen. Op deze manier worden er vijf verschillende situaties gedefinieerd. Tabel 7 geeft een overzicht van deze situaties.

Tabel 7: Classificatie gebrekenparameter omvang [16]

Omvangscore	Percentage	Beschrijving
Omvang 1	< 2 %	Het gebrek komt <u>incidenteel</u> voor
Omvang 2	2 % tot 10 %	Het gebrek komt <u>plaatselijk</u> voor
Omvang 3	10 % tot 30 %	Het gebrek komt <u>regelmatig</u> voor
Omvang 4	30 % tot 70 %	Het gebrek komt <u>aanzienlijk</u> voor
Omvang 5	≥ 70 %	Het gebrek komt <u>algemeen</u> voor

De laatste gebrekenparameter die gebruikt wordt in de bepaling van de conditiescore is de intensiteit. Deze parameter wordt onderverdeeld in drie gevallen. Deze indeling gebeurt op basis van het stadium waarin het schadegeval zich bevindt en op basis van de mate waarin dit schadegeval waarneembaar is.

Tabel 8 geeft de verschillende situaties voor de intensiteit.

Tabel 8: Classificatie gebrekenparameter intensiteit [16]

Intensiteitsscore	Benaming	Toelichting
Intensiteit 1	Beginstadium	Het gebrek is doorgaans nauwelijks waarneembaar en oppervlakkig aanwezig
Intensiteit 2	Gevorderd stadium	Het gebrek is duidelijk waarneembaar en in het oppervlak aanwezig
Intensiteit 3	Eindstadium	Het gebrek is zeer duidelijk waarneembaar, onomkeerbaar en kan niet of nauwelijks toenemen

Door deze drie gebrekenparameters met elkaar te combineren, is men in staat om de conditie van een constructie geheel of gedeeltelijk vast te leggen. Het samenvoegen van deze parameters gebeurt op basis van Tabel 9 tot en met Tabel 11.

Tabel 9: Matrix conditiescore voor geringe gebreken [16]

Geringe gebreken					
Omvang Intensiteit	1) Incidenteel (< 2 %)	2) Plaatselijk (2 % tot 10 %)	3) Regelmatig (10 % tot 30 %)	4) Aanzienlijk (30 % tot 70 %)	5) Algemeen (≥ 70 %)
1) Beginstadium	1	1	1	1	2
2) Gevorderd stadium	1	1	1	2	3
3) Eindstadium	1	1	2	3	4

Tabel 10: Matrix conditiescore voor serieuze gebreken [16]

Serieuze gebreken					
Omvang Intensiteit	1) Incidenteel (< 2 %)	2) Plaatselijk (2 % tot 10 %)	3) Regelmatig (10 % tot 30 %)	4) Aanzienlijk (30 % tot 70 %)	5) Algemeen (≥ 70 %)
1) Beginstadium	1	1	1	2	3
2) Gevorderd stadium	1	1	2	3	4
3) Eindstadium	1	2	3	4	5

Tabel 11: Matrix conditiescore voor ernstige gebreken [16]

Ernstige gebreken					
Omvang Intensiteit	1) Incidenteel (< 2 %)	2) Plaatselijk (2 % tot 10 %)	3) Regelmatig (10 % tot 30 %)	4) Aanzienlijk (30 % tot 70 %)	5) Algemeen (≥ 70 %)
1) Beginstadium	1	1	2	3	4
2) Gevorderd stadium	1	2	3	4	5
3) Eindstadium	2	3	4	5	6

Uit deze tabellen is af te leiden dat het enkel mogelijk is om de hoogste conditiescore van 6 te bereiken indien zowel de ernst, intensiteit en omvang het hoogste niveau hebben behaald. De scoringsmethodiek volgens NEN 2767 maakt het mogelijk om op een eenvoudige manier een conditiescore toe te kennen aan een constructie of een deel ervan. Er dient echter opgemerkt te worden dat bovenstaande methode louter en alleen gebruikmaakt van visuele waarnemingen en er geen experimentele data aan te pas komt. Net zoals bij de visuele inspecties, is deze methode uitermate vatbaar voor subjectiviteit van de uitvoerder.

2.6.3 Voorgaand onderzoek

In het verleden werd er in beperkte mate onderzoek gedaan naar een methode om de gezondheid van een constructie op een eenduidige manier in kaart te brengen. Volgens een studie uitgevoerd aan de universiteit van Wuhan, is het van groot belang om een netwerk uit te bouwen waarmee de conditie van bestaande bruggen in real-time kan worden gemonitord [17]. Met dit netwerk is het mogelijk om tijdig signalen te sturen indien er onderhoud nodig is, zodat de normale werking van de brug behouden blijft. Deze studie stelt dat er verschillende sensoren ingezet kunnen worden voor de monitoring van bruggen. Enerzijds meten deze sensoren de fenomenen die voor het gebruikscomfort zorgen, maar niet meteen aanleiding geven tot structureel falen. Het gaat hierbij voornamelijk over scheurvorming. Anderzijds meten deze sensoren in welke mate de structurele capaciteit van een brug afneemt, om het structureel falen van de brug te vermijden. Daarnaast benadrukt dit onderzoek dat monitoringsmogelijkheden van de sensoren hun gebreken kennen. Hierdoor is het in de praktijk gewenst om de sensordata op regelmatige basis te verifiëren door inspecties.

Verder geeft [17] een richtlijn voor de verschillende soorten sensoren die relevant zijn voor het bepalen van de gezondheid van bruggen. Allereerst worden de temperatuursensoren aangehaald om de invloed van de temperatuur en relatieve vochtigheid op de doorbuiging van de brug in kaart te brengen. De volgende parameter die interessant is voor de bepaling van de gezondheidsscore is de doorbuiging. Deze wordt gemonitord met een doorbuigingssensor of bepaald met behulp van een inclinometer. Tenslotte worden trillingssensoren en rekstrookjes beschouwd als relevante toevoegingen aan de sensorconfiguratie.

Tot slot geeft [17] een aanzet tot het opzetten van een scoringsmethodiek voor de bepaling van de structurele gezondheid van de brug. Hiervoor worden er verschillende indicatoren beschouwd. Elke indicator wordt bepaald op basis van een bepaalde parameter afkomstig van de sensor, zoals doorbuigingen of trillingen. Vervolgens wordt er een bepaald gewicht toegekend aan elke indicator, afhankelijk van het belang en de mogelijke gevolgen. Aan elke indicator wordt er een score toegekend. Dit gebeurt aan de hand van een tiendelige schaal, gaande van 0 tot 9. Hierbij komt een hoge score overeen met een goede structurele kwaliteit

van de brug. Tabel 12 geeft een overzicht van de verschillende scores en nodige veiligheidsmaatregelen.

Tabel 12: Evaluatieschaal bruggen, naar Tabel 1 in [17]

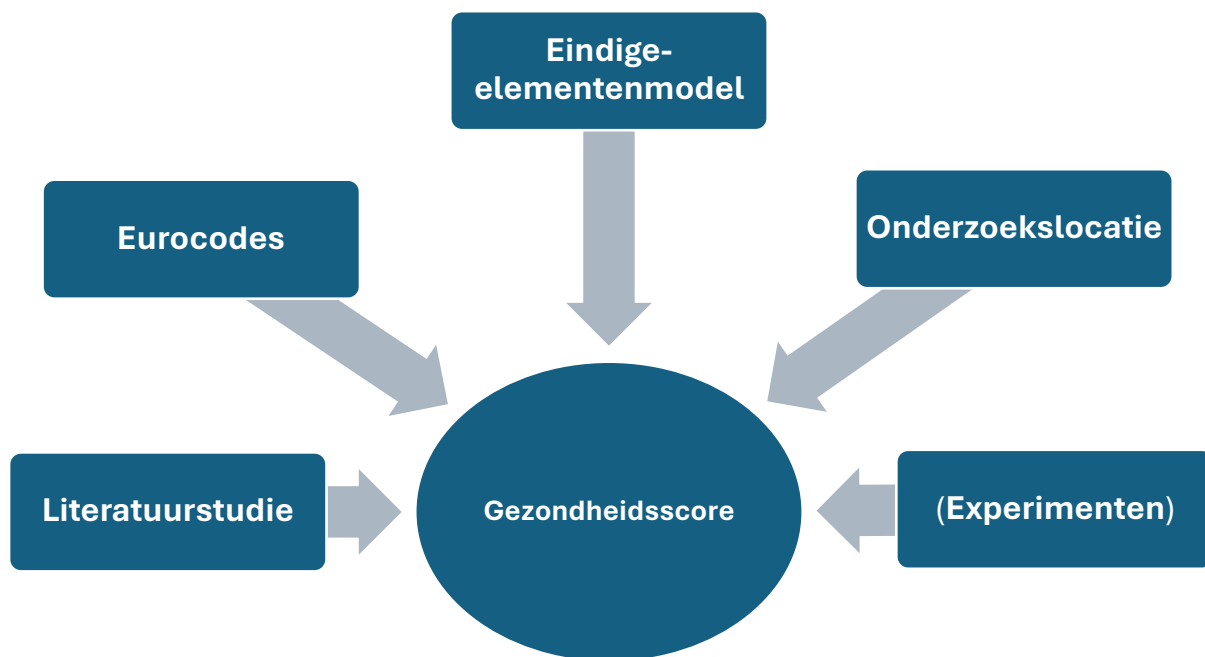
Score	Description of state	Description of structural health monitoring results	Description of applicability	Measures of safeguard
9	Excellent	The overall state of the bridge is better than the "initial state"	Better than current norms	No need to repair
8	Very good	The overall state of the bridge is equivalent to the "initial state"	Corresponding to current standards	Without repair; List the items that need special attention during the next inspection cycle
7	Good, but it has a few small questions	The overall state of the bridge is the same as the "initial state", and no defects are found	That's better than the current minimum standards	No immediate repair plan; Check for the possibility of further testing
6	Fine, there is a slight degradation of the structural unit	The overall state of the bridge is the same as the "initial state". Although minor "damage" occurs in the secondary components, the overall performance is not affected	Corresponding to the current minimum standards	Repaired at the end of next quarter; Add it to the work program
5	Acceptable - All major components are in good condition, but there may be small section losses, cracks, or scour	The overall state of the bridge is slightly lower than the "initial state", and no damage is found in the main components, while large damage appears in the secondary components, but it has little influence on the overall performance	A little better than the acceptable minimum affluence	Put in the current plan; Repair in the current quarter, and choose the first fix
4	Poor - section has a loss, degradation, peeling, or corrosion	The overall state of the bridge is lower than the "initial state", and the main components are damaged, which has a great impact on the overall performance	Meet the minimum affluence	Priority. Repair in this quarter, review the relative priority of the work plan and adjust the worksheet if possible
3	Severe - Section has had a loss, degradation, or scouring has seriously affected the main structural elements. Local damage may occur. Fatigue cracks may occur in steel structures or shear cracks may occur in concrete structures	The overall state of the bridge is lower than the "initial state" to a large extent, and the main components are seriously damaged, which has a great impact on the overall performance	Unacceptable and it needs major repair	High priority; Repair in this season and schedule repairs as early as possible
2	Hazard - Major components have had Serious degradation. Fatigue cracks in the steel structure may have existed, or erosion may have displaced the substructure. Unless close observation is carried out, the bridge will need to be closed until repair measures are completed.	There are serious defects in the overall state of the bridge, and the damage of the main components is very serious, which seriously affects the overall performance	Unacceptable, it needs more replacement	Highest priority; Interrupt other work if necessary; take basic or emergency supplementary measures (notice, ban truck, limit speed, etc.)
1	Immediate" failure - major degradation or severe loss has occurred in critical structural components, and significant vertical or horizontal displacement affects the stability of the structure. Bridges need to be closed to traffic, but repairs can be delayed depending on service.	The overall performance of the bridge is lost, and the carrying capacity of the main components has been seriously lost	The score value cannot be used	Shut down the service and wait for repair
0	Close the bridge	The overall performance of the bridge is completely lost	Close the bridge	Close the bridge and cannot be maintained.

De gezondheidsscore die van toepassing is op de gehele brug wordt vervolgens verkregen door de scores van de beschouwde onderdelen van de brug met elkaar te combineren. Hierbij dient er rekening te worden gehouden met het gewicht van elke indicator, zodat de som van deze afzonderlijke wegingsfactoren gelijk is aan één. Indien de analyse van de verschillende brugcomponenten uiteenlopende resultaten oplevert, dient de meest negatieve waarde te worden gehanteerd als bepalende factor. Indien er gebruikgemaakt wordt van een hybride methode, waarbij sensordata wordt gecombineerd met visuele inspecties, dienen er twee verschillende scores te worden bepaald. In de laatste stap worden deze twee scores samengevoegd, waarbij rekening wordt gehouden met de wegingsfactoren die specifiek gelden voor respectievelijk de sensor- en inspectiedata. De methode waarmee deze wegingsfactoren zijn vastgesteld en toegepast, wordt niet toegelicht in deze bron. Vermoedelijk zijn deze projectafhankelijk en, in het geval van een algemene methode, afhankelijk van de nauwkeurigheid van de sensordata. Deze benadering zorgt ervoor dat eventuele tekortkomingen van de sensordata gecompenseerd worden om een correct resultaat te verzekeren.

3 METHODOLOGIE

3.1 Aanpak

Zoals reeds vermeld in de inleiding en de literatuurstudie van deze thesis, bestaat het hoofddoel van dit onderzoek uit het samenstellen van een methode om de gezondheid van bestaande bruggen in kaart te brengen. Op deze manier wordt het mogelijk om preventief onderhoud uit te voeren op gerichte wijze, om zo het verouderende bruggenpatrimonium op een efficiënte manier te onderhouden. Om deze doelstelling tot een goed einde te brengen, worden er verschillende materialen en methoden ingezet. Figuur 8 geeft een visuele weergave van de aanpak van deze thesis, met daarbij de gebruikte materialen en methoden.



Figuur 8: Aanpak onderzoek

Dit onderzoek maakt gebruik van een modelgedreven aanpak. Concreet wordt in dit onderzoek een eindige-elementenanalyse uitgevoerd met SCIA Engineer [18]. Binnen dit onderzoek levert dit model de nodige fictieve, gesimuleerde data om in een later stadium een gezondheidsscore op te stellen. Zo worden er verschillende soorten degradatieverschijnselen en schadegevallen gesimuleerd door structurele onderdelen van het model lokaal te verzwakken of verwijderen.

Voor de bepaling van de gezondheidsscore wordt er voornamelijk beroep gedaan op de bestaande Eurocodes en gebruiksgrenstoestanden die het comfort van de gebruikers waarborgen. Door gebruik te maken van deze verschillende eisen en deze te combineren tot één gezondheidsscore, verkrijgt men op een eenvoudige manier inzicht in de urgentie van onderhoud.

Voor dit onderzoek wordt er een concrete onderzoekslocatie bestudeerd, waarin dieper wordt ingegaan in het volgende deel. Aldus is er een concreet praktijkgeval beschikbaar waarvan de verschillende schadepatronen kunnen worden onderzocht. Het eindige-elementenmodel dat in dit onderzoek wordt gebruikt, is gebaseerd op dit specifieke project. Op deze manier kan de reële en gesimuleerde situatie op termijn in verder onderzoek met elkaar vergeleken worden.

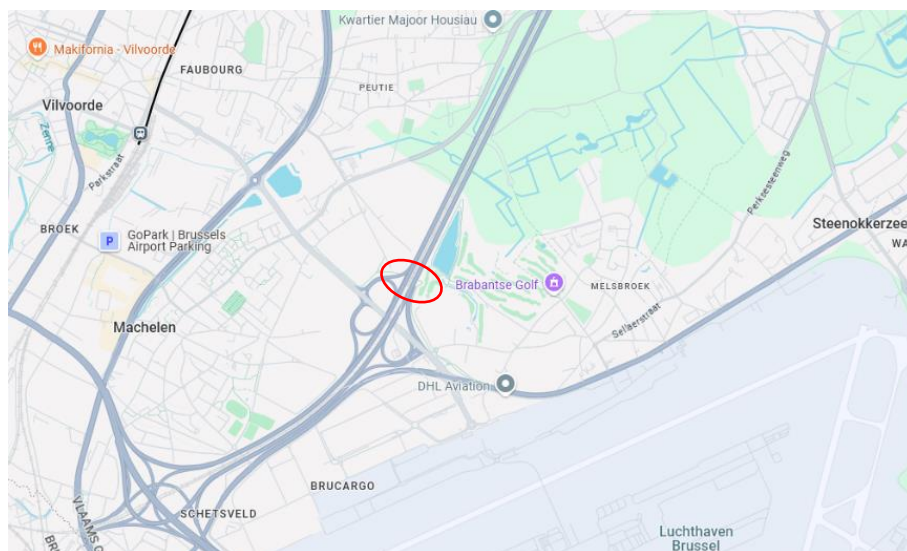
Deze masterproef richt zich op het simuleren van de bestaande onderzoekslocatie en op het bepalen van een gezondheidsscore op basis van deze gesimuleerde data. In een later stadium is het de intentie om deze waarde te verifiëren door middel van experimenten die op locatie worden uitgevoerd. Om dit toekomstig onderzoek te versnellen, eindigt deze masterproef met een analyse omtrent de mogelijke sensoren om deze experimenten uit te voeren. Daarnaast wordt er een locatieschema gegeven dat een richtlijn vormt voor de meest geschikte locaties om deze sensoren te monteren.

3.2 Situering onderzoekslocatie

De onderzoekslocatie die in dit onderzoek beschouwd wordt, maakt deel uit van het Diabolo-project, gerealiseerd door het bouwconsortium THV DIALINK. THV DIALINK is de private partner die verantwoordelijk was voor de realisatie van dit project onder een *Design, Build, Finance and Maintain*-contract (DBFM-contract). Leden van dit consortium waren CFE, CEI en Smet Tunneling [19]. Na de fusie van CEI – De Meyer en Betonac werd dit vennootschap verdergezet onder de naam BAM Contractors. In de loop der tijd onderging het bedrijf een verdere transformatie, waarbij het werd verworven door de Stadsbader Group. Als gevolg van deze overname opereert de onderneming tegenwoordig onder de naam Stadsbader Contractors NV [1].

Door de DBFM-samenwerkingsvorm is het bouwconsortium, waar Stadsbader Contractors NV deel van uitmaakt, in opdracht van AWW en PMV gedurende 30 jaar verantwoordelijk voor het onderhoud van dit project [19], [20]. Om het onderhoud van zowel dit project als toekomstige projecten zo efficiënt mogelijk te doen verlopen, is Stadsbader Contractors NV op zoek naar een manier om de structurele kwaliteit van dit type projecten te evalueren.

Figuur 9 toont de geografische situering van de onderzoekslocatie. De fietsbrug F214 bevindt zich in Machelen, ten noorden van de verkeerswisselaar van de E19 Melsbroek-Vilvoorde en de N211. Hierbij vormt de brug een overspanning over de autosnelweg in beide richtingen, inclusief de afrit in zuidelijke richting. Daarnaast bevindt er zich een spoorweg tussen de twee rijrichtingen van de autosnelweg.



Figuur 9: Geografische situering onderzoekslocatie [21]

3.3 Structurele kenmerken

Deze paragraaf gaat dieper in op de structurele kenmerken van deze onderzoekslocatie. Het is namelijk van belang om een klaar beeld te hebben over de technische opbouw van deze brug, aangezien dit een fundamentele basis vormt voor het bepalen van mogelijke schadepatronen en het opstellen van het eindige-elementenmodel in een volgende fase.

De stalen fietsbrug kan beschreven worden als een brug samengesteld uit twee brugtypologieën. De overspanning die de boogbrug aan de linkerzijde van Figuur 10 en de fietssnelweg aan de rechterzijde van de afrit verbindt betreft een liggerbrug met diagonale pijlers. De boogbrug met trekband, ook bekend als *bowstringbrug*, wordt middels spankabels verbonden met het wegdek. Deze spankabels hebben als doel een effectieve boogwerking in de brug te realiseren ter vervanging van een massieve onderbouw.

Na ingebruikname van de fietsbrug werd vastgesteld dat de zijdelingse uitwijking als gevolg van externe belastingen, zoals passages van zwaar vrachtverkeer over de onderliggende rijbaan en windbelasting, groter was dan oorspronkelijk begroot. Als oplossing werden er meerdere windverbanden geplaatst om de stijfheid van het geheel te verbeteren en zo de zijdelingse uitwijking te beperken.

Wat betreft de opleggingen, rust de brug aan beide uiteinden op neopreenopleggingen. Daarnaast zijn de nodige dilatatievoegen aangebracht, om ervoor te zorgen dat spanningsconcentraties ten gevolge van temperatuursafhankelijke uitzettingen niet tot schade kunnen leiden.

Figuur 10 toont dat enkel het bruggedeelte voorzien van de diagonale pijlers relatief eenvoudig bereikbaar is, zonder hinder voor weg- of bruggebruikers en met waarborging van de veiligheid tijdens de plaatsing van de sensoren.



Figuur 10: Overzicht onderzoekslocatie [21]

3.4 Inspectie onderzoekslocatie

Bij aanvang van dit onderzoek werd er een eerste plaatsbezoek uitgevoerd. Dit bezoek had als doel een duidelijk beeld te verkrijgen van de onderzoekslocatie, waarbij de structurele onderdelen werden geobserveerd en de toegankelijkheid van potentiële sensorlocaties werd geëvalueerd. Daarnaast vormde dit plaatsbezoek een uitgelezen mogelijkheid om een eerste visuele inspectie uit te voeren en op zoek te gaan naar (beginnende) schade aan de brug. Tenslotte werden er van opmerkelijke waarnemingen foto's genomen zodat deze in de toekomst vergeleken kunnen worden met de huidige situatie. Hierdoor verkrijgt men een idee over de snelheid waarmee de eventuele schade verergert. De volgende secties behandelen de belangrijkste bevindingen voortkomend uit dit plaatsbezoek met betrekking tot zowel de opbouw van de brugstructuur als eventuele zichtbare schade.

Tijdens het verkennend plaatsbezoek werd er in eerste instantie gekeken naar de brugopleggingen (zie Figuur 11). Hierbij werd vastgesteld dat de oplegging aan de westzijde van de brug eenvoudig bereikbaar is. Daarnaast biedt deze locatie voldoende ruimte om in de toekomst sensoren te installeren, evenals het bijbehorende data-acquisitie- en transmissiesysteem op een droge en van gebruikers afgeschermd plek te plaatsen. Aan de bovenzijde van het brugdek werd ter hoogte van de oplegging een dilatatievoeg gerealiseerd. Dit om vervormingen door o.a. seizoensgebonden temperatuurschommelingen op te vangen.



Figuur 11: Oplegging brug

Bij het analyseren van de structurele integriteit van een constructie is het cruciaal om een duidelijk beeld te hebben van de gebruikte verbindingsmiddelen, aangezien gebleken is uit het vooronderzoek dat deze doorgaans als eerste schade vertonen. Gedurende het plaatsbezoek werd vastgesteld dat de verbindingen in de brugstructuur in grote mate bestaan uit lasverbindingen. Deze lasverbindingen worden voornamelijk gebruikt voor het haaks verbinden van de diagonale pijlers onderling, het verbinden van de voetplaten en de pijlers, het samenstellen van de langsliggers, ter realisatie van de ondersteunende dwarsliggers en tot slot voor het verbinden van deze benoemde onderdelen tot een globale structuur. Onmiddellijk werd vastgesteld dat er reeds corrosie aanwezig was ter hoogte van deze verbindingen. Figuur 12 en Figuur 13 geven een visuele weergave van de waargenomen corrosie als gevolg van vochtophoping, respectievelijk in de langs- en dwarsliggers.



Figuur 12: Corroderende lasverbinding van langsligger



Figuur 13: Corrosie ten gevolge van vochtophoping in dwarsligger

Daarnaast werd vastgesteld dat de verbindingen tussen de voetplaten van de structuur en de betonnen steunpunten, bestaan uit gebetonneerde boutverbindingen. Hierbij bleek dat deze verbindingen gevoelig zijn voor ophoping van bladeren en andere materialen, wat kan leiden tot vochtaccumulatie. Op termijn kan dit resulteren in een vergelijkbare aantasting als waargenomen in Figuur 12. Figuur 14 geeft een visuele weergave van deze verbinding.



Figuur 14: Verbindingen steunpunten

Figuur 15 toont de spankabels die de karakteristieke boogstructuur van de brug verbinden met het wegdek. Deze structuur maakt het mogelijk om grote overspanning te realiseren zonder hiervoor zware funderingsmassieven te moeten voorzien. Bij het beoordelen van de gezondheid van deze constructie kan het interessant zijn om de mate van belasting van de spankabels te monitoren, om zo na te gaan in hoeverre de spanningen gelijkmatig over de verscheidene kabels zijn verdeeld en of deze binnen de voorziene veiligheidsmarge blijven.



Figuur 15: Spankabels

Zoals reeds eerder aangegeven, werd er na de ingebruikname van de brug vastgesteld dat de zijdelingse uitwijking onder invloed van (gebruiks)belastingen buitengewoon grote proporties aannam. De getroffen maatregelen om dit fenomeen te beperken, bestonden uit het toevoegen van een aantal windverbanden, om van de brug een stijver geheel te maken (zie Figuur 16). Door deze maatregel worden de zijdelingse uitwijkingen beperkt om het comfort van de gebruikers te verzekeren.



Figuur 16: Windverbanden

Op basis van dit plaatsbezoek werd er een concreet beeld gevormd van de projectsituatie. Het identificeren van eventuele schadefenomenen die op termijn zouden kunnen leiden tot structurele problemen vormde een aanzienlijke meerwaarde, aangezien er duidelijk werd welke locaties bijkomende aandacht vereisen bij het opstellen van het model in de volgende fase. Bijkomend biedt dit inzichten in welke sensoren er voor vervolgonderzoek relevant kunnen zijn om de geobserveerde schade te monitoren.

4 MODELLERING VAN DE BRUG

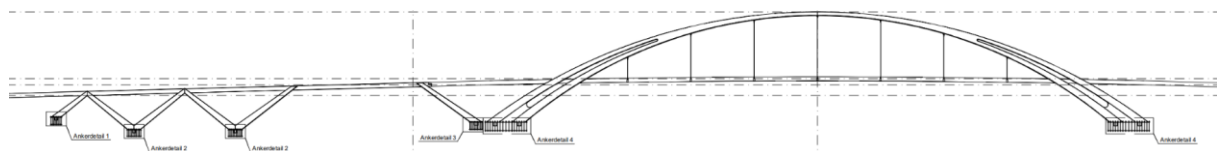
Naar aanleiding van het in de literatuurstudie besproken SPR-paradigma en deze specifieke casus, is het opstellen van een eindige-elementenmodel een logische eerste stap om schade te simuleren en zodoende kritieke locaties in de structuur vast te stellen. Ook draagt dergelijk model bij tot het simuleren van de werkelijkheid. Op deze manier kan worden onderzocht welke invloed de evolutie van specifieke schadefenomenen in de tijd heeft op de structurele integriteit van de brug. Daarnaast draagt het model bij aan een efficiëntere opzet van het sensorsysteem, aangezien de sensoren gericht geplaatst kunnen worden op basis van de kritieke locaties die voortkomen uit het model, in plaats van locaties enkel te selecteren op basis van beperkte *casestudies* uit het verleden.

4.1 Geometrie van het model

Zoals reeds aangehaald zal er in dit onderzoek een eindige-elementenmodel van de fietsbrug ter hoogte van het Diabolo-project opgesteld worden om de gezondheidsscore op toe te passen. Het is hierbij echter van belang te benadrukken dat het eindige-elementenmodel niet de hoofdzaak is, maar louter een hulpmiddel bij het ontwikkelen van de gezondheidsscore. Voor verder onderzoek is het een noodzaak om metingen op locatie uit te voeren, alsook meerdere casussen te onderzoeken, om zo een betrouwbare gezondheidsscore te ontwikkelen.

In wat hierop volgt worden de relevante brugdelen besproken, hoe deze zijn gemodelleerd en welke vereenvoudigingen er doorgevoerd zijn in de eindige-elementensoftware.

De te beschouwen brug bestaat uit een samenvoeging van twee brugtypologieën, zoals te zien in Figuur 17. Aan de linkerzijde bestaat de brug uit een liggerbrug met diagonale pijlers, en aan de rechterzijde uit een boogbrug met spankabels.



Figuur 17: Zijaanzicht fietsbrug F214

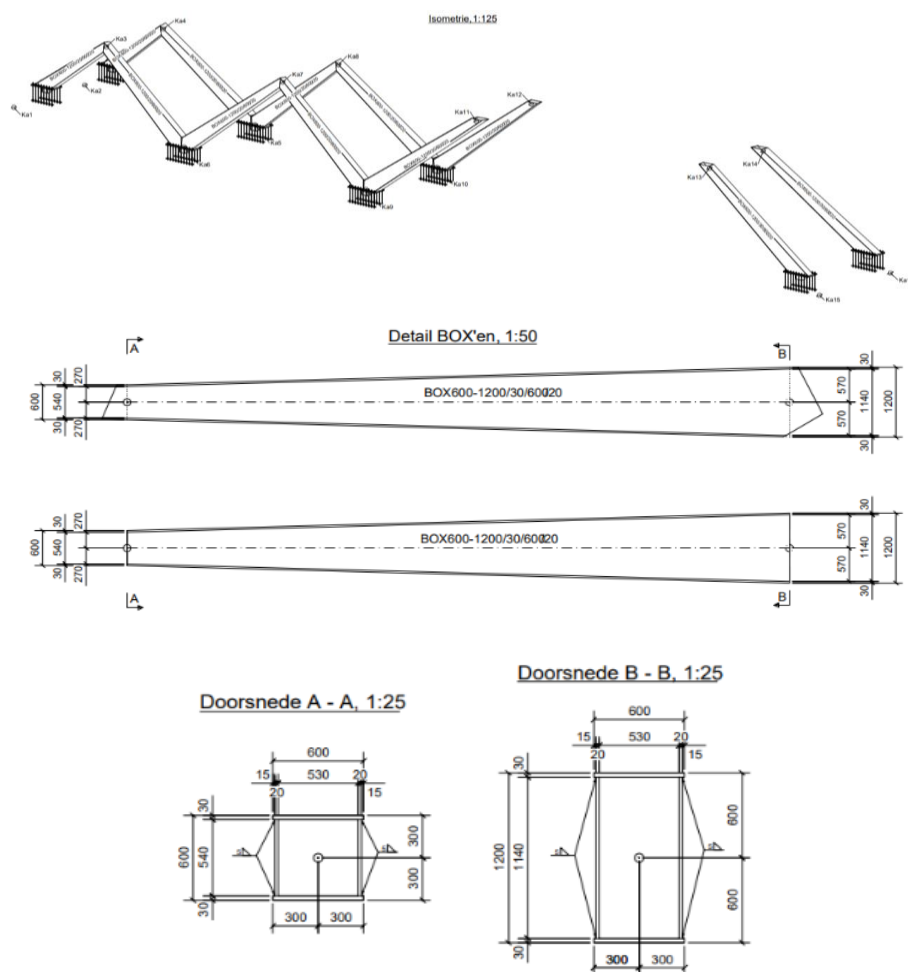
Het is essentieel om te benadrukken dat voor het verdere onderzoek enkel de diagonale structuur in beschouwing wordt genomen. Uit vooronderzoek en in samenspraak met de opdrachtgever werd namelijk besloten geen onderzoek uit te voeren op de boogbrug met trekband. Dit voornamelijk omwille van veiligheids- en financiële overwegingen. De plaatsing van sensoren op dit gedeelte van de brug vereist immers het tijdelijk afsluiten van de autosnelweg en spoorweg om, met behulp van een hoogwerker, de sensoren op een veilige en correcte manier te kunnen bevestigen. Daarnaast beperkt de keuze om enkel de linkerzijde te bestuderen de complexiteit en rekentijd van het eindige-elementenmodel.

Hoewel binnen dit onderzoek de nadruk niet zozeer ligt op het ontwikkelen van een gedetailleerd model wordt er toch gestreefd naar een zo nauwkeurig mogelijke benadering van de werkelijke situatie. Het eindige-elementenmodel is daarom opgesteld op basis van de beschikbare as-buit-plannen en aangevuld met gegevens verzameld tijdens de plaatsbezoeken.

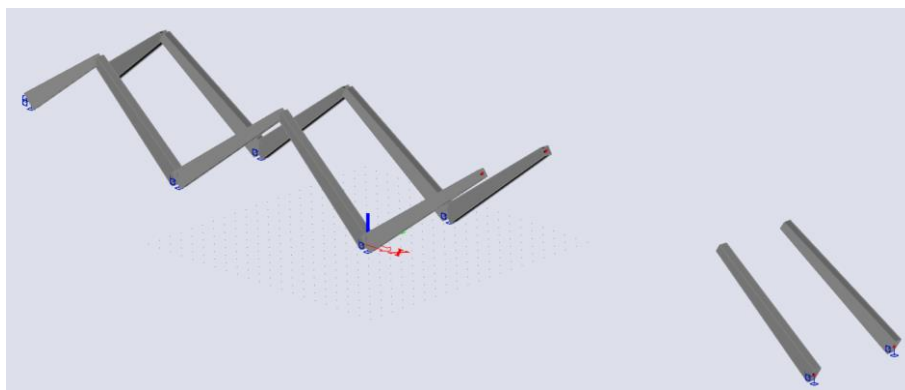
4.1.1 Lineaire elementen (1D-elementen)

De lineaire elementen, betreffende de diagonale pijlers, langs- en dwarsliggers, zijn opgebouwd uit 20-30mm dikke, stalen platen die aan elkaar gelast werden tot holle, in sectie variabele, profielen.

De diagonale pijlers, zoals weergegeven in Figuur 18, variëren in doorsnede en lopen taps toe van de onderzijde naar de bovenzijde. Dit werd als dusdanig gemodelleerd in het model, zoals geïllustreerd in Figuur 19. Bijkomend zijn deze pijlers zowel bovenaan als onderaan vlak afgewerkt volgens de hoek die ze maken met de grondankers. Dit laatste werd achterwege gelaten in het model aangezien dit irrelevant was voor een correcte werking van het model.

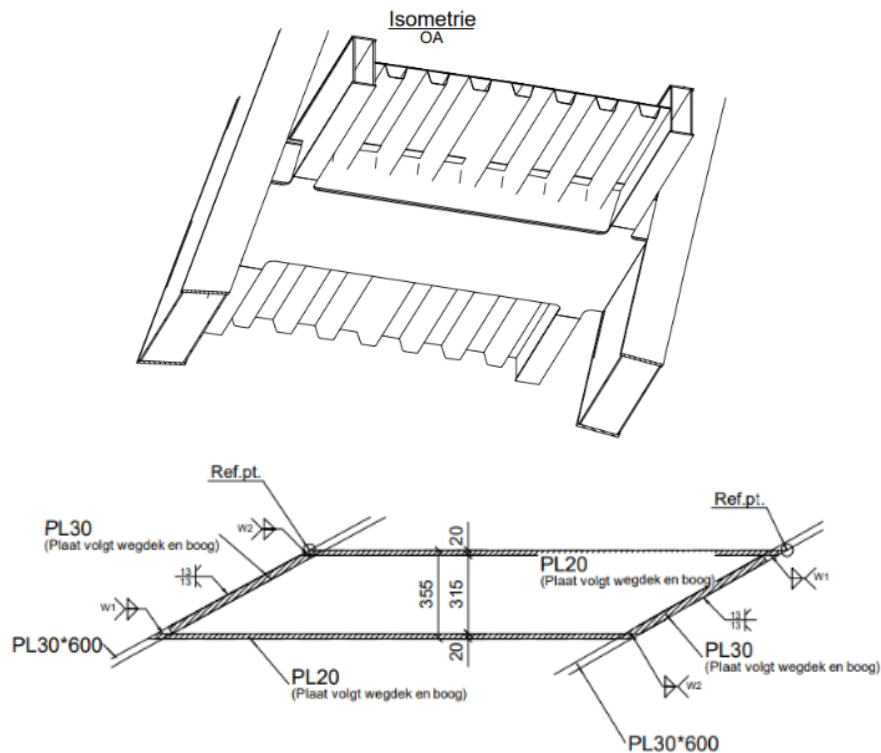


Figuur 18: Geometrische samenstelling diagonale pijlers

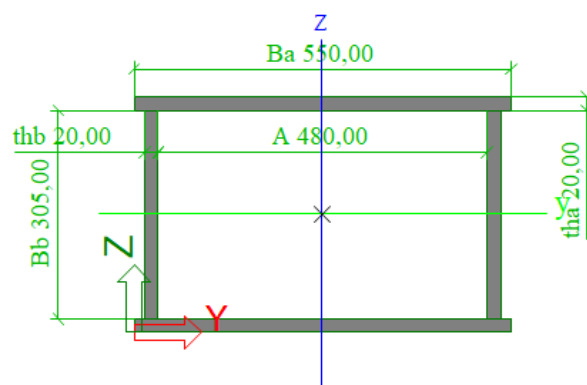


Figuur 19: Modellering diagonale pijlers - SCIA Engineer

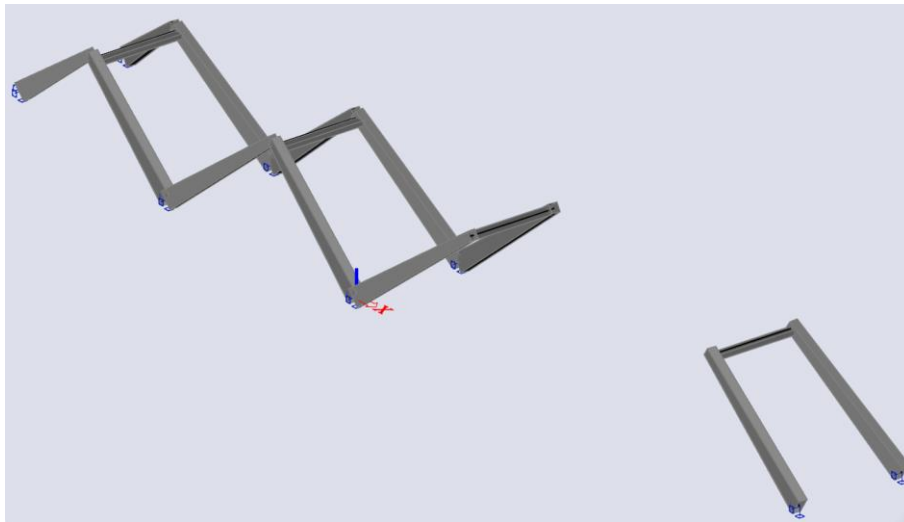
Ook de dwarsliggers vereisen enige specifieke aandacht, aangezien deze niet variabel zijn in doorsnede, maar wel een atypische sectie hebben (zie Figuur 20). Dit heeft te maken met het feit dat de diagonale zijden van de dwarsliggers de hoek van de pijlers dienen te volgen. In het model werden de dwarsliggers echter niet als dusdanig gemodelleerd, omdat een vereenvoudigde geometrische benadering werd gehanteerd (zie Figuur 21). Deze keuze werd gemaakt om de complexiteit van de modellering te beperken, waarbij de focus lag op de globale structurele respons in plaats van op gedetailleerde lokale aansluitingen. Daarnaast heeft de keuze voor een ruitvormige sectie in het ontwerp eerder een esthetische dan een structurele functie. Figuur 22 toont het model na toevoeging van de dwarsliggers.



Figuur 20: Geometrische samenstelling dwarsliggers

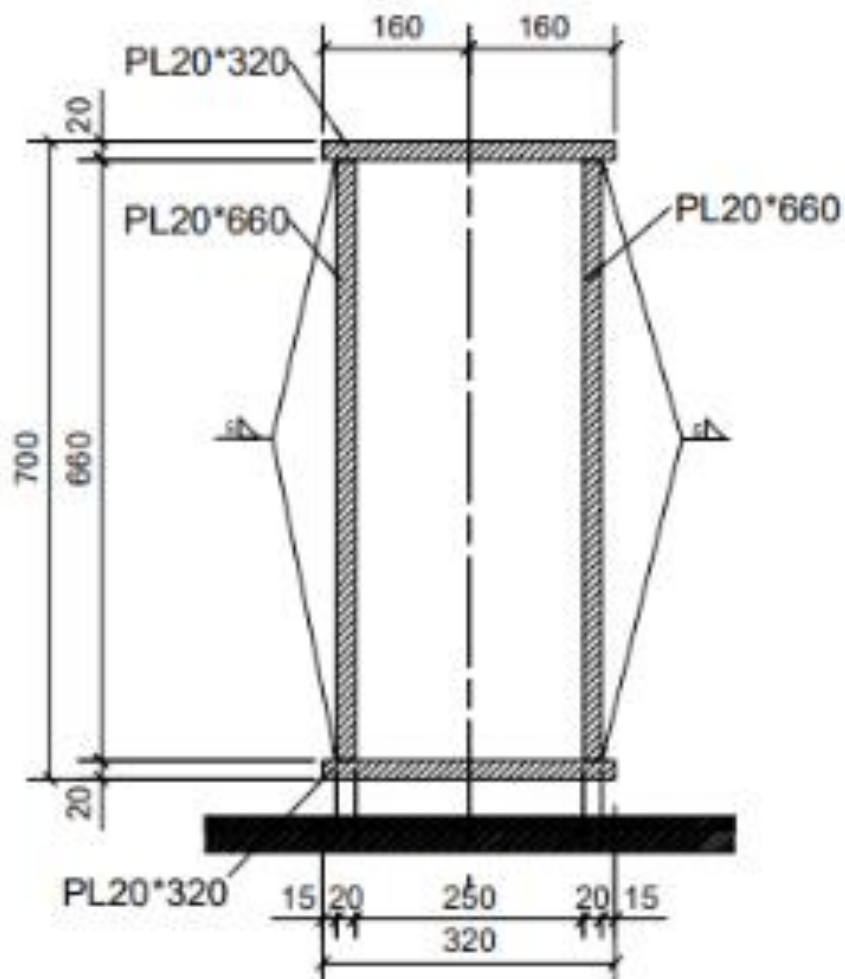


Figuur 21: Vereenvoudigde gemodelleerde doorsnede dwarsliggers

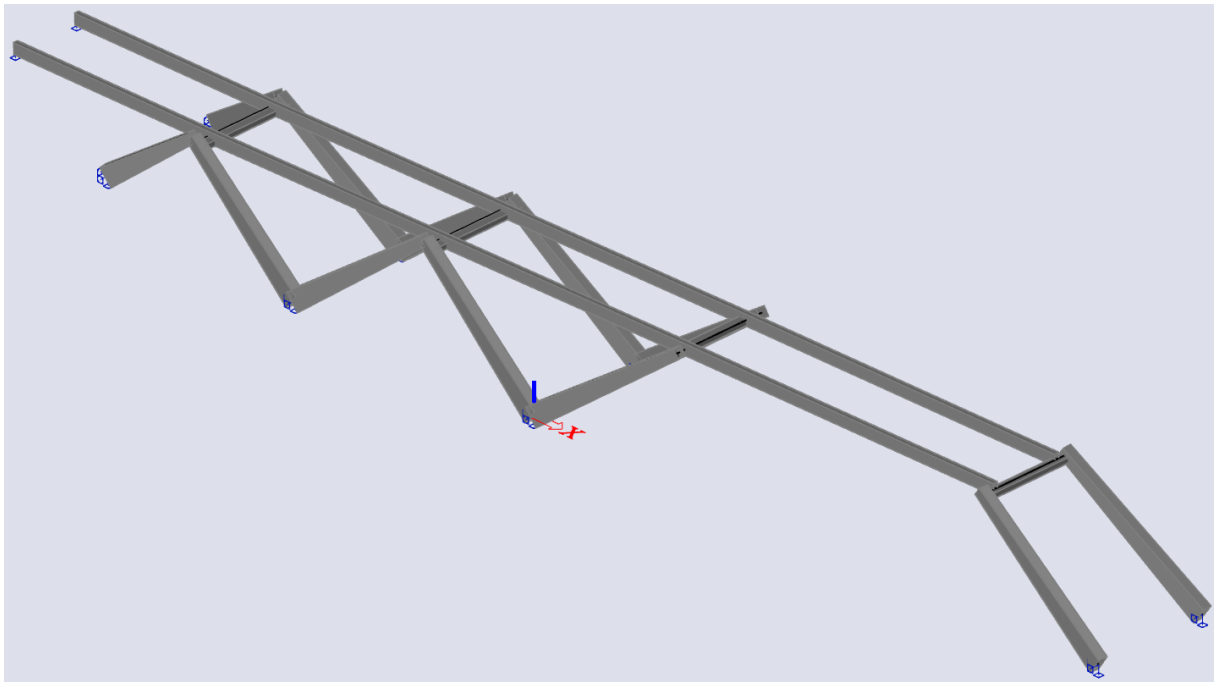


Figuur 22: Modelling diagonale pijlers en dwarsliggers - SCIA Engineer

De langsliggers zijn de minst complexe lineaire elementen binnen dit ontwerp (zie Figuur 23). Deze variëren namelijk niet in sectie, en werden in de praktijk doorlopend uitgevoerd, door middel van lasverbindingen, zoals reeds getoond in Figuur 12. In het model werden de langsliggers in hun geheel gemodelleerd, aangezien de lasverbindingen als volledig stijf worden beschouwd. De volledige structuur samengesteld uit 1D-elementen is geïllustreerd in Figuur 24.



Figuur 23: Geometrische samenstelling langsligger



Figuur 24: Modelling samengestelde 1D-structuur – SCIA Engineer

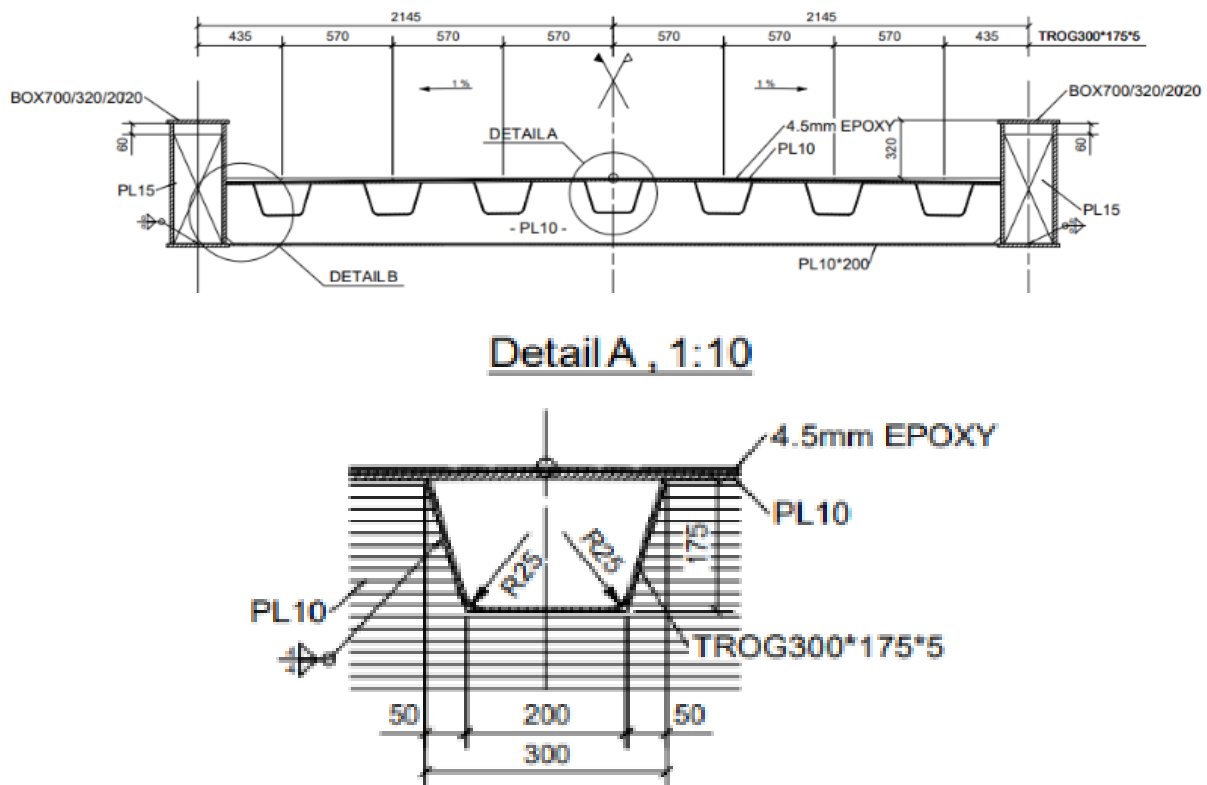
Tot slot zijn de in het eindige-elementenmodel toegepaste materiaaleigenschappen van het gebruikte staal terug te vinden in Tabel 13.

Tabel 13: Materiaaleigenschappen constructiestaal S355J2

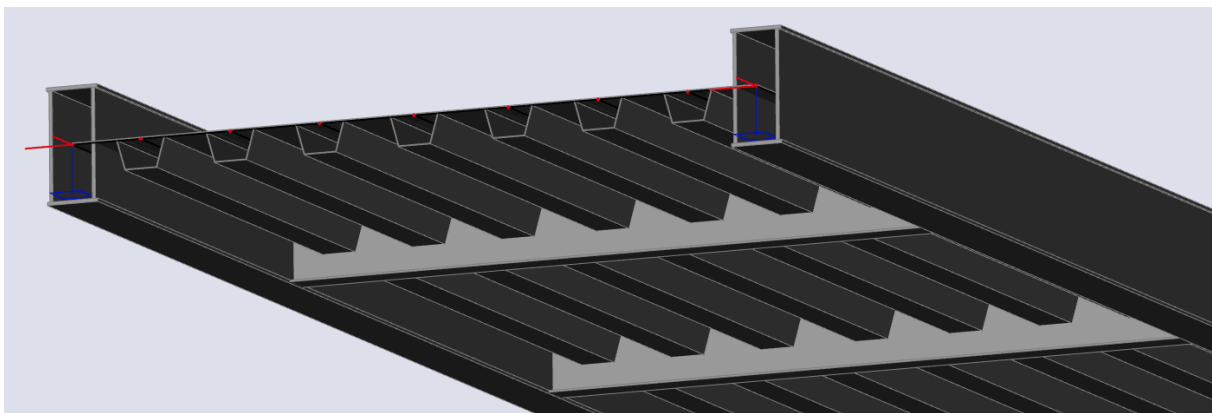
Elasticiteitsmodulus (E) [N/mm ²]	210.000
Glijmodulus (G) [N/mm ²]	81.000
Poisson ratio (ν) [-]	0,30
Lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt (α) [m/°C]	$12 \cdot 10^{-6}$

4.1.2 Plaat-elementen (2D-elementen)

Binnen het ontwerp wordt het wegdek samengesteld uit een stalen plaat van 10 mm dikte, voorzien van een slijtlaag bestaande uit een 4,5 mm dikke epoxycoating met instrooisels. Deze slijtlaag biedt een gewichtsbesparende oplossing en fungeert als een alternatief voor traditionele afdichtings- en afwerkingslagen. Het wegdek wordt in beide richtingen voorzien van geprofileerde verstijfingsribben. De geometrische samenstelling van het wegdek, met trogribben in de langsrichting en omgekeerde T-profielen als verstijvers in de dwarsrichting, is geïllustreerd in Figuur 25. Figuur 26 toont een doorsnede van het wegdek zoals gemodelleerd in SCIA Engineer.



Figuur 25: Geometrische samenstelling wegdek

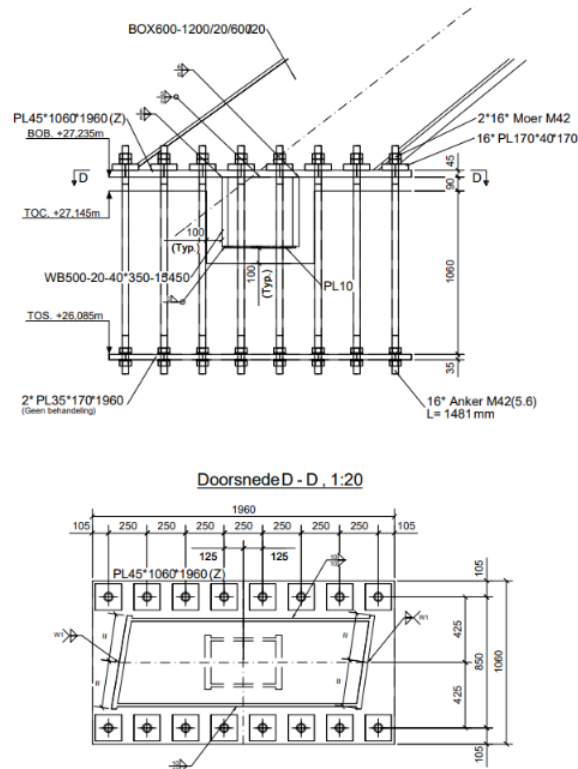


Figuur 26: Doorsnede opbouw wegdek - SCIA Engineer

4.1.3 Randvoorwaarden

Naast het correct modelleren van de structuur is het van belang de correcte randvoorwaarden mee te geven aan het model. Binnen dit model zijn er een aantal belangrijke randvoorwaarden te onderscheiden.

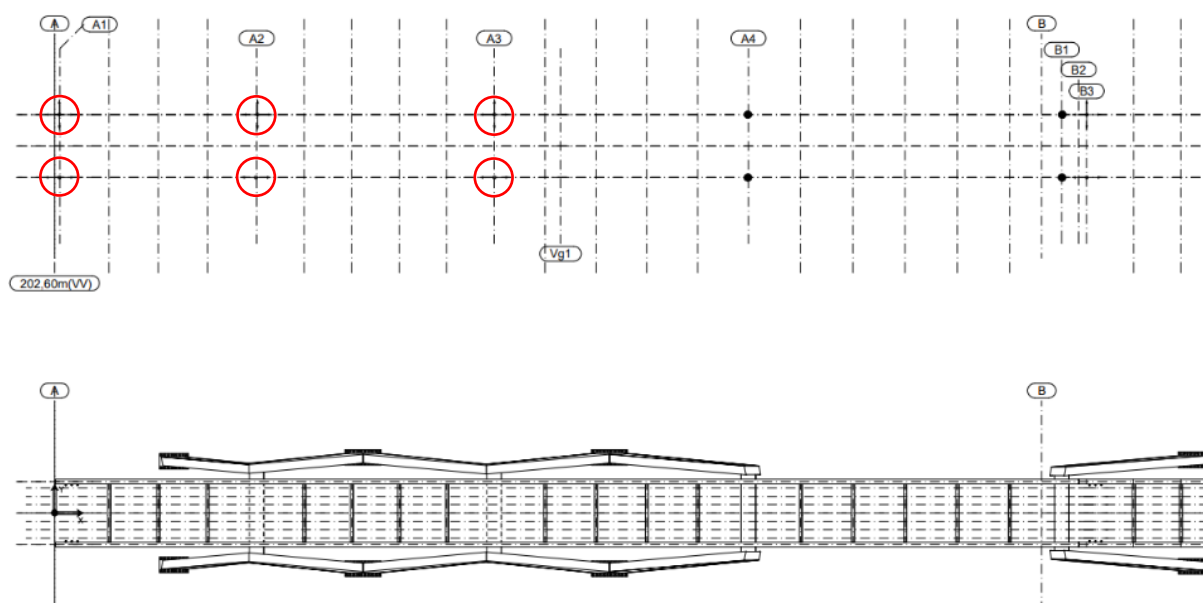
Allereerst worden de verbindingen tussen de pijlers en de ondergrond als stijve verbindingen in alle richtingen beschouwd. De pijlers zijn namelijk verbonden met een betonnen bodemplaat door middel van een voetplaat die aanzienlijk groter is dan de dwarsdoorsnede van de pijlers zelf. De voetplaat wordt met de betonnen bodemplaat verbonden met een 16-tal boutverbindingen. Figuur 27 illustreert de verbinding tussen de pijlers en de gebetonneerde bodemplaat.



Figuur 27: Ankerdetail verbinding bodemplaat en pijlers

Daarnaast worden lasverbindingen tussen de elementen als stijve verbindingen beschouwd. Echter vereist dit in de eindige-elementensoftware geen specifieke aandacht aangezien elementen die samenkomen in hetzelfde knooppunt standaard als onderling stijf verbonden worden aanzien.

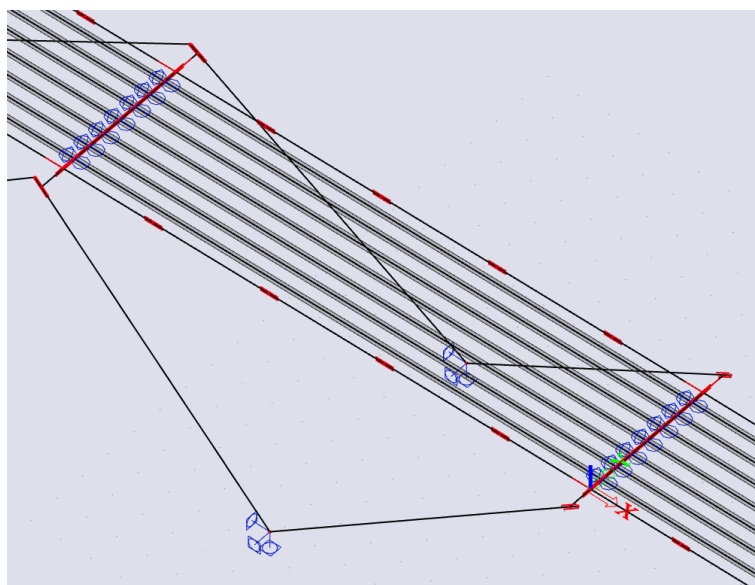
Bijkomend zijn er de neopreenopleggingen, die zich bevinden aan het begin van de brug en op specifieke tussenliggende steunpunten. Neopreenopleggingen, zonder bijkomende restricties, zijn ontworpen om enkel verplaatsingen in de verticale richting te ondersteunen en rotaties rond de verticale richting te beperken. Dit betekent concreet dat dergelijke opleggingen verplaatsingen en rotaties toelaten in zowel de langs- als de dwarsrichting van de brug. Deze eigenschappen dragen bij aan het beperken van interne spanningen ten gevolge van thermische uitzetting en uitwendige krachten die op de structuur inwerken. Figuur 28 toont een bovenaanzicht van de brug met bijhorende aanduidingen van de steunpunten.



Figuur 28: Bovenaanzicht aanduiding type opleggingen

Figuur 28 toont de ligging van de neopreenopleggingen aan de hand van de rode markeringen, die een aanvullende verduidelijking bieden bij de aanduidingen van de toegestane verplaatsingen in dwars- en/of langrichting. De gevulde markeringen op de figuur geven uitsluitend aan dat de langsliggers afsteunen op de dwarsligger, waarbij geen gebruik wordt gemaakt van oplegtoestellen.

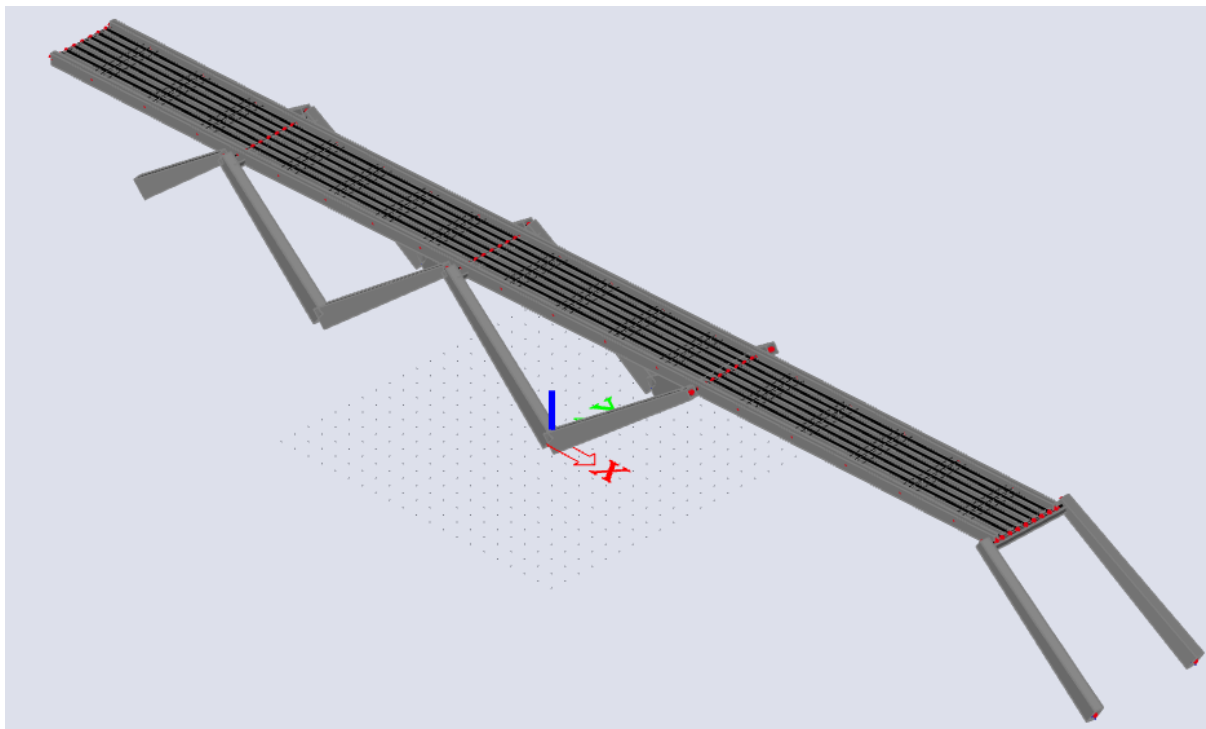
Tot slot is het van belang om de juiste randvoorwaarden, in de vorm van inwendige scharnieren, toe te kennen aan de plaat-ribstructuur. Aan beide uiteindes van de trogribben, de ribben in de langsrichting, worden er inwendige scharnieren toegekend, zoals geïllustreerd in Figuur 29. Deze inwendige koppelingen zijn zo gedefinieerd dat ze verplaatsingen in de horizontale lengterichting mogelijk te maken. Het doel hiervan is te voorkomen dat deze ribben normaalkrachten moeten opnemen, aangezien hun functie erin bestaat momenten als gevolg van de belastingen tussen twee dwarsliggers op te vangen.



Figuur 29: Restricties trogribben

4.1.4 Presentatie en kritische analyse van het model

Tot slot wordt in Figuur 30 het volledige model geïllustreerd. Aangezien enkel het bruggedeelte dat de liggerbrug omvat gemodelleerd werd voor de ontwikkeling van de gezondheidsscore, wordt de doorbuiging overschat die zich zal voordoen in de overspanning die in de praktijk aansluit op de boogbrug. Dit omwille van het feit dat het doorlopende brugdek, een positief en verstijvend effect zou hebben op dit deel van de overspanning. Voor toekomstig onderzoek is het aangeraden hiermee rekening te houden. Echter, deze vereenvoudiging vormt geen belemmering in het ontwikkelen van de methodiek voor het bepalen van de gezondheidsscore.



Figuur 30: Globale model - SCIA Engineer

4.2 Belastingsgevallen en lastgroepen

De in rekening te brengen belastingsgevallen voor bruggen verschillen grotendeels van deze voor gebouwen. Daarnaast maakt men onderscheid in de in rekening te brengen belastingsgevallen afhankelijk van het specifieke type brug. Zo wordt er een onderscheid gemaakt tussen wegverkeersbruggen, spoorwegbruggen en voetgangersbruggen.

Zoals reeds vermeld in de literatuurstudie zijn binnen dit onderzoek de ontwerpregels en controles voor voetgangersbruggen relevant omwille van het feit dat er in de Eurocodes geen expliciet onderscheid gemaakt wordt tussen fiets- en voetgangersbruggen.

In wat hierop volgt worden de, voor een fiets- en voetgangersbrug, relevante belastingsgevallen besproken. Globaal wordt er onderscheid gemaakt tussen permanente en variabele belastingen. Accidentele belastingen worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten, aangezien deze doorgaans een significante impact hebben op de structurele integriteit van de constructie. In dergelijke gevallen is doorgaans een herstelinterventie of gedeeltelijke vervanging van de beschadigde en omliggende bouwdelen noodzakelijk.

4.2.1 Permanente belastingen

4.2.1.1 Eigengewicht

Het eigengewicht wordt in SCIA Engineer automatisch gegenereerd. Het is dus van belang de correcte materiaaleigenschappen mee te geven aan de structuur, alsook de doorsnedes van de elementen, in de mate van het mogelijke, correct te modelleren.

4.2.1.2 Vaste belastingen

Naast het eigengewicht zijn er enkele niet-structurele onderdelen die een permanente belasting uitoefenen op de structuur. We onderscheiden volgende vaste belastingen:

- slijtlaag,
- leuning.

De afwerkingslaag bovenop het stalen brugdek, ook wel slijtlaag genoemd, is zoals te zien in Figuur 25, een epoxylaag. Het eigengewicht van dergelijke epoxylaag met instrooisels wordt geschat op 1400 kg/m^3 . Dit resulteert voor de 4,5 mm dikke slijtlaag in een oppervlaktebelasting van $0,06 \text{ kN/m}^2$.

De leuning worden, vanwege de vele openingen en de beperkte hoogte, vereenvoudigd tot een lijnlast van slechts $0,1 \text{ kN/m}$.

4.2.2 Variabele belastingen

4.2.2.1 Verkeersbelastingen

Voor fiets- en voetgangersbruggen onderscheidt EN 1991-2 de volgende drie, elkaar onderling uitsluitende, belastingsgevallen [10]:

- een gelijkmatig verdeelde belasting, q_{fk} ,
- een geconcentreerde belasting, Q_{fvd} ,
- belastingen die dienstvoertuigen representeren, Q_{serv} .

Daarnaast dient er een bijkomende horizontale belasting, Q_{flk} , in rekening gebracht te worden. Deze horizontale belasting brengt rem- en acceleratiekrachten aangrijpend op de slijtlaag in rekening.

Concreet resulteert de combinatie van voorgaande belastingsgevallen in de belastingsgroepen geïllustreerd in Tabel 14. Hieruit blijkt dat de geconcentreerde belasting ontbreekt in de van toepassing zijnde belastingsgroepen. Aangezien er reeds een dienstvoertuig in rekening gebracht wordt, stelt EN 1991-2 dat de geconcentreerde belasting, Q_{fvd} , niet beschouwd dient te worden.

Tabel 14: Karakteristieke waarden voor de van toepassing zijnde belastingsgroepen [10]

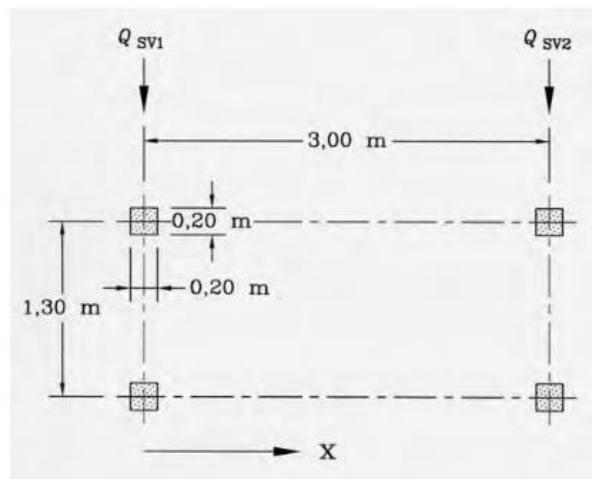
Belastingtype		Verticale krachten		Horizontale krachten
Belastingssysteem		Gelijkmatig verdeelde belasting	Dienstvoertuig	
Groepen van belastingen	gr1	q_{fk}	0	Q_{flk}
	gr2	0	Q_{serv}	Q_{flk}

Volgens EN 1991-2 wordt de gelijkmatig verdeelde belasting, q_{fk} , als volgt bepaald indien het risico op een continue mensenmenigte over de volledige bruglengte niet reëel is [10]:

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L + 30} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (1)$$

$$\text{met } 2,5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} \leq 5,0 \text{ kN/m}^2 \text{ en } 20\text{m} \leq L \leq 210\text{m}$$

Aangezien de brug toegankelijk is voor dienstvoertuigen, moet rekening worden gehouden met de belasting van het voertuig zoals geïllustreerd in Figuur 31, tenzij de opdrachtgever expliciet aangeeft dat een ander dienstvoertuig wordt gebruikt.



Verklaring

X : brugas richting

$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$

$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$

Figuur 31: Buitengewone belasting - dienstvoertuig [10]

Tot slot stelt EN 1991-2 dat er een horizontale belasting in rekening dient te worden gebracht ter hoogte van de slijtlaag. Deze horizontale belasting, Q_{flk} , dient volgende waarde aan te nemen [10]:

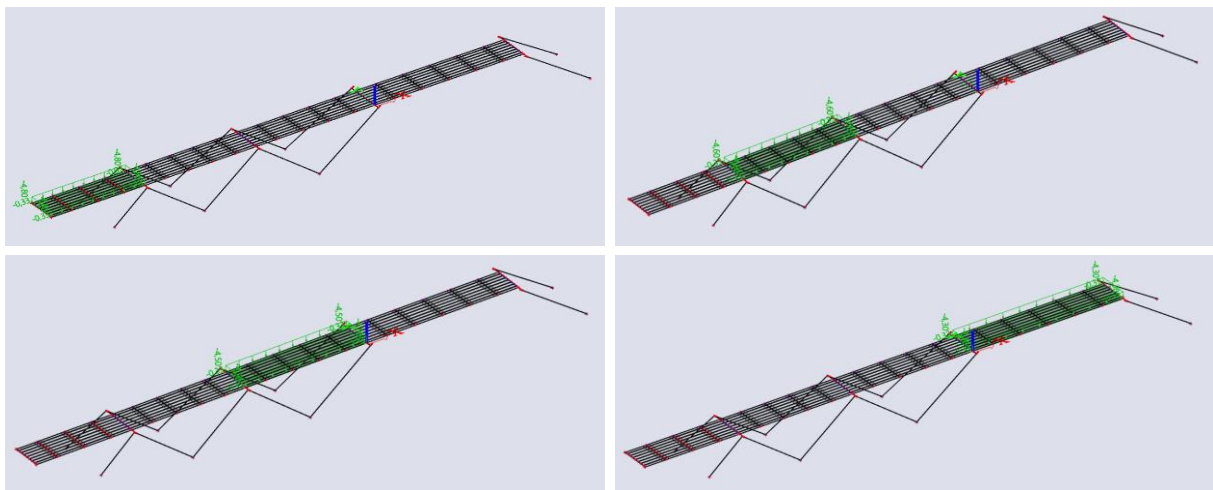
$$Q_{flk} = \max(0,10 \cdot q_{fk} \cdot A; 0,60 \cdot Q_{dienstvoertuig}) \quad (2)$$

Binnen deze casus bestaat de fiets- en voetgangersbrug uit vier opeenvolgende brugdelen, die door uitzettingsvoegen van elkaar zijn gescheiden. Elk afzonderlijk brugdeel wordt belast met zowel een verticale voetgangersbelasting, berekend aan de hand van formule (1), als met een horizontale belasting ten gevolge van de remkracht, bepaald aan de hand van formule (2). Tabel 15 presenteert de belastingslengtes, evenals de bijbehorende grootte van de aangrijpende belastingen.

Tabel 15: Aangrijpende belastingen ten gevolge van voetgangersbelasting per brugdeel

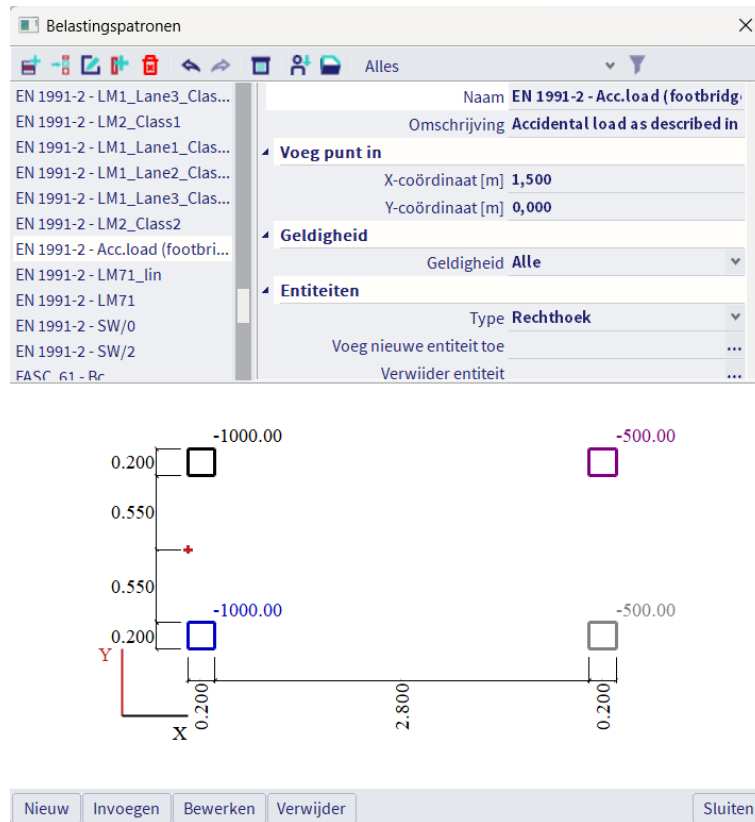
Belastingslengtes	Belastingen	Karakteristieke waarde
$L_1 = 13,3 \text{ m}$	$q_{fk,1}$	$4,8 \text{ kN/m}^2$
$L_2 = 16,2 \text{ m}$	$q_{fk,2}$	$4,6 \text{ kN/m}^2$
$L_3 = 17,2 \text{ m}$	$q_{fk,3}$	$4,5 \text{ kN/m}^2$
$L_4 = 21,4 \text{ m}$	$q_{fk,4}$	$4,3 \text{ kN/m}^2$
Corresponderend met de respectievelijke belastingslengte	Q_{fIk}	$0,33 \text{ kN/m}^2$

Figuur 32 illustreert de wijze waarop de belastingen uit Tabel 15 worden aangebracht. Het is daarbij van belang te verduidelijken dat de belastingen die op elk afzonderlijk brugdeel aangrijpen, als afzonderlijke belastingsgevallen werden gedefinieerd. Deze belastingsgevallen worden vervolgens automatisch gecombineerd volgens verschillende belastingspatronen, zoals dambordconfiguraties (bijvoorbeeld alternerend brugdek 1 en 3; brugdek 2 en 4) en oplopende patronen (beginnend met enkel brugdek 1, daarna brugdek 1 en 2, vervolgens 1, 2 en 3, en uiteindelijk het volledige brugdek). Op deze manier kan de meest kritische belastingstoestand worden geïdentificeerd, waaruit de overeenkomstige maximale doorbuiging wordt afgeleid.

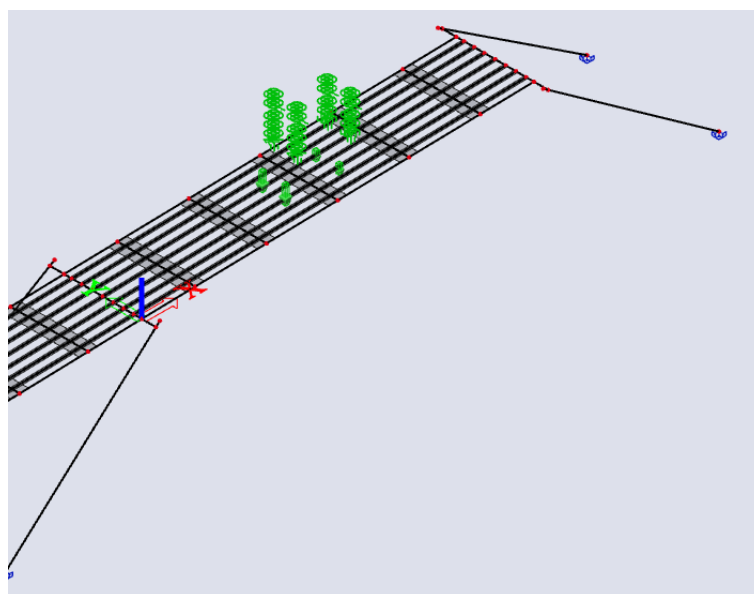


Figuur 32: Aanbrengen van voetgangersbelastingen in aparte belastingsgevallen

De belasting ten gevolge van het dienstvoertuig wordt in het eindige-elementenmodel gemodelleerd als een verkeerslast (zie Figuur 33). Deze verkeerslast wordt aangebracht met behulp van een verkeerslastengenerator, die op basis van een vooraf gedefinieerde rijstrook periodieke belastingsgevallen genereert. Op die manier kan de meest kritische positionering van het dienstvoertuig worden bepaald. Tot slot toont Figuur 34 de resulterende voertuigbelasting voor één willekeurig geselecteerd belastingsgeval, afkomstig uit de automatisch gegenereerde belastingsgevallen met behulp van de verkeerslastengenerator.



Figuur 33: Genereren verkeerslast op basis van belastingpatroon voor dienstvoertuigen



Figuur 34: Visuele weergave van de resulterende verkeerslast

4.2.2.2 Sneeuwbelastingen

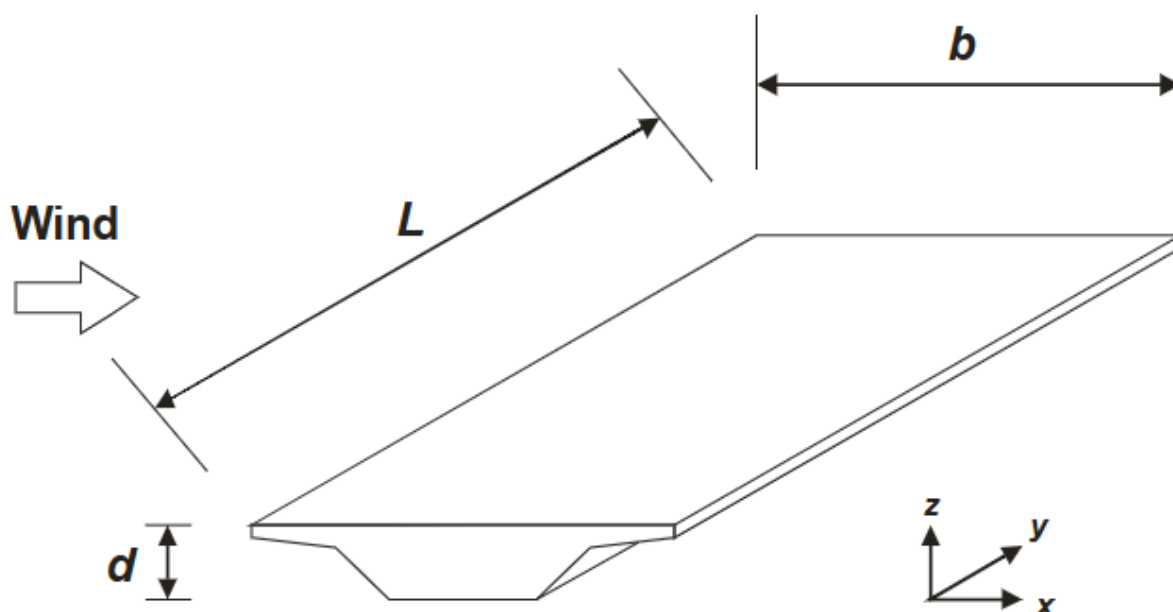
Sneeuwbelastingen vormen een uitzondering op de in rekening te brengen belastingen. Zo stelt NBN EN 1990 ANB [9] dat sneeuwbelastingen niet worden gecombineerd met de belastingsgroepen voor verkeersbelastingen. Omdat deze belastingsgroepen een aanzienlijk verschil in grootteorde hebben, worden sneeuwbelastingen niet meegenomen in de controle en het ontwerp van fiets- en voetgangersbruggen.

4.2.2.3 Windbelastingen

De inwerkende windbelastingen worden berekend op basis van NBN EN 1991-1-4 + ANB [22], [23]. In eerste instantie wordt de algemene stuwdruk berekend, waarmee vervolgens de inwerkende windkrachten worden bepaald. Een uitgewerkte berekening is terug te vinden als Bijlage A. Tabel 16 biedt een overzicht van de bepaling van de extreme stuwdruk. Vervolgens wordt in Tabel 17 en Tabel 18 het onderscheid toegelicht aan de hand van Figuur 35 en Figuur 36 met betrekking tot de gebruikte conventies voor de inwerkende windbelastingen op de brug.

Tabel 16: Overzicht parameters ter bepaling extreme stuwdruk

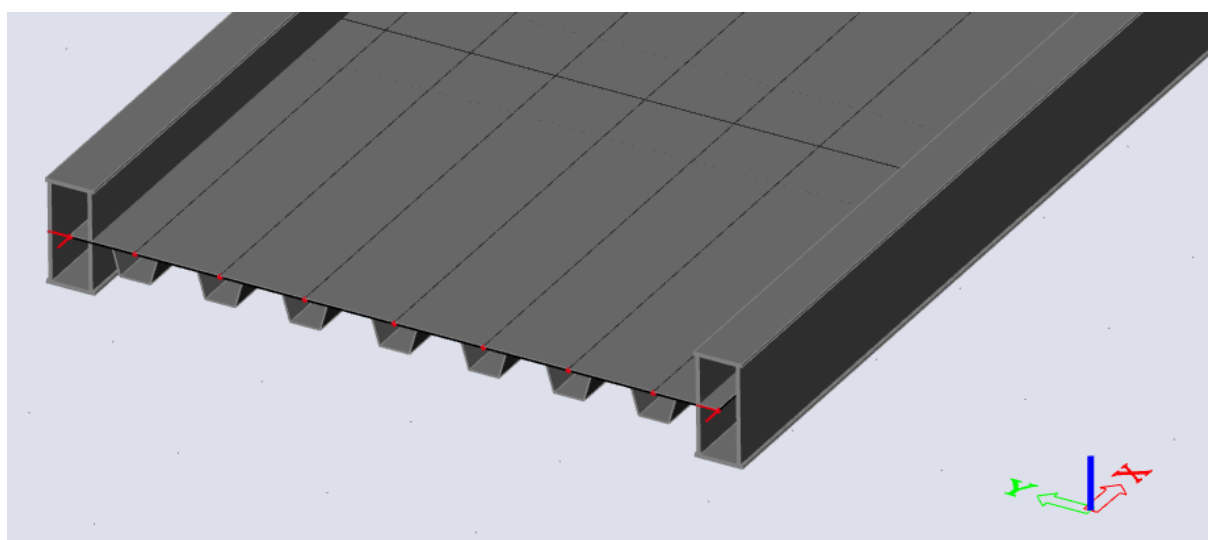
Grootheid	Symbool	Waarde
Referentiehoogte voor uitwendige windbelasting	z_e	7,55 m
Ruwheidfactor	$c_r(z_e)$	0,95
Orografiefactor	$c_o(z_e)$	1
Gemiddelde windsnelheid	$v_m(z_e)$	24,74 m/s
Turbulentie-intensiteit	$I_v(z_e)$	0,20 m/s
Extreme stuwdruk	$q_p(z_e)$	916,1 N/m ²



Figuur 35: Conventie windbelastingen volgens oriëntatie NBN EN 1991-1-4 [22]

Tabel 17: Overzicht windkrachten op brugdek volgens oriëntatie NBN EN 1991-1-4

Grootheid	Symbool	Waarde
Windkracht aangrijpend op de langsligger - lijnlast	$f_{w,x,lijn}$	1,55 kN/m
Windkracht aangrijpend op het brugdek - oppervlaktelast	$f_{w,y,opp.}$	0,09 kN/m ²
Windkracht aangrijpend op de onderzijde van het brugdek - oppervlaktelast	$f_{w,z,opp.}$	0,82 kN/m ²



Figuur 36: Conventie windbelastingen volgens oriëntatie eindige-elementenmodel

Tabel 18: Overzicht windkrachten op brugdek volgens oriëntatie eindige-elementenmodel

Grootheid	Symbool	Waarde
Windkracht aangrijpend op het brugdek - oppervlaktelast	$f_{w,x,opp.}$	0,09 kN/m ²
Windkracht aangrijpend op de langsligger - lijnlast	$f_{w,y,lijn}$	1,55 kN/m
Windkracht aangrijpend op de onderzijde van het brugdek - oppervlaktelast	$f_{w,z,opp.}$	0,82 kN/m ²

4.2.2.4 Thermische belastingen

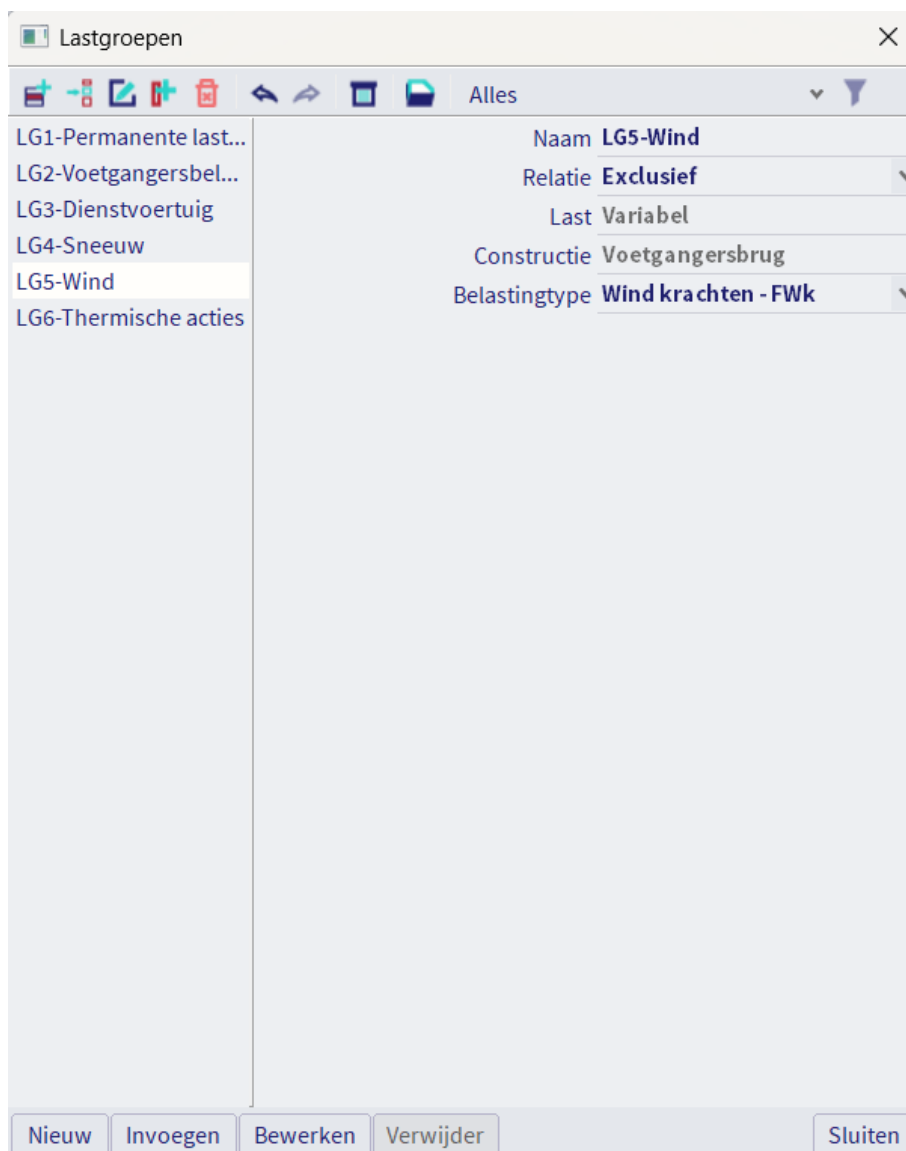
Gelijkaardig aan de bepaling van de windbelastingen wordt er voor de bepaling van de thermische belastingen gebruik gemaakt van NBN EN 1991-1-5 + ANB [24], [25]. Voor de bepaling van de thermische belastingen wordt er een onderscheid gemaakt tussen gelijkmatige temperatuurcomponenten en de temperatuurverschilcomponenten. De gelijkmatige temperatuurcomponenten kan men opsplitsen in deze voor verkorting van het brugdek, $\Delta T_{N,con}$, en deze voor expansie van het brugdek, $\Delta T_{N,exp}$. Ook voor de temperatuurverschilcomponenten wordt er dergelijk onderscheid gemaakt. Enerzijds voor een temperatuursverandering waarbij het wegdek bovenaan warmer is dan onderaan, $\Delta T_{M,heat}$ en anderzijds waarbij het wegdek onderaan warmer is dan bovenaan, $\Delta T_{M,cool}$. Een uitgewerkte berekening is terug te vinden in Bijlage B. Tabel 19 biedt een overzicht van deze thermische belastingen.

Tabel 19: Overzicht thermische belastingen op brugdek

Gelijkmatige temperatuurcomponent ΔT_N		
Maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent voor uitzetting van de brug	$\Delta T_{N,exp}$	33,5 °C
Maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent voor verkorting van de brug	$\Delta T_{N,con}$	20,5 °C
Temperatuurverschilcomponenten ΔT_M		
Maximumtemperatuursverandering bij opwarming van het brugdek (bovenzijde warmer)	$\Delta T_{M,heat}$	18 °C
Maximumtemperatuursverandering bij afkoeling van het brugdek (onderzijde warmer)	$\Delta T_{M,cool}$	13 °C

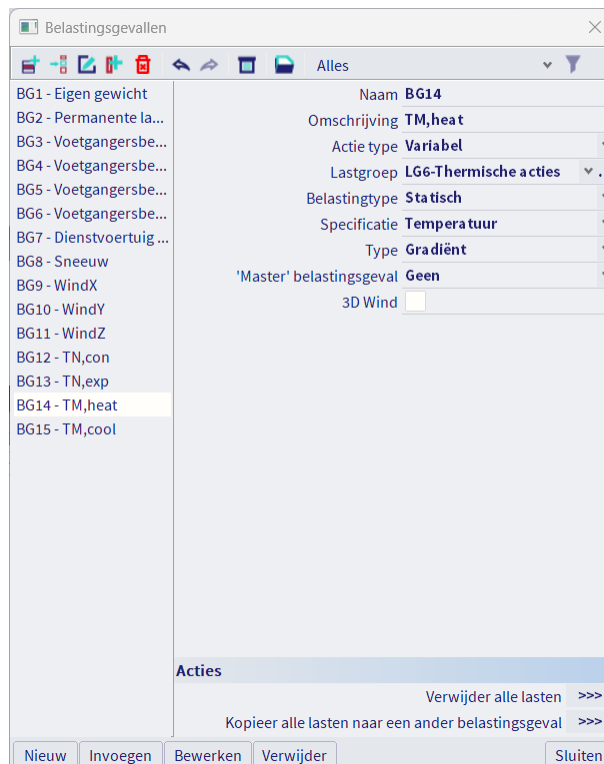
4.2.3 Belastingsgevallen en lastgroepen in SCIA Engineer

Het toekennen van de belastingen in SCIA Engineer verloopt in twee stappen. In eerste instantie worden de lastgroepen gedefinieerd. Hierbij is het van belang de juiste relatie mee te geven aan iedere lastgroep. Ter illustratie wordt in Figuur 37 het voorbeeld getoond voor de lastgroep met betrekking tot de windbelasting. Deze belastingcategorie kent een exclusieve relatie, wat impliceert dat wanneer de wind vanuit een bepaalde richting op de structuur inwerkt, gelijktijdige belasting door wind uit een andere richting uitgesloten is. Deze relatie zorgt ervoor dat hiermee automatisch rekening gehouden wordt tijdens het genereren van de belastingscombinaties in de volgende fase.



Figuur 37: Definiëren lastgroepen in SCIA Engineer - lastgroep wind

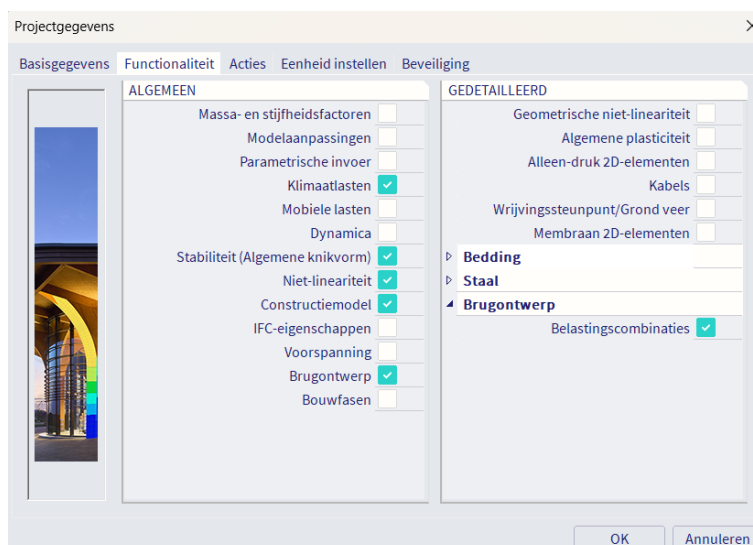
Een volgende stap in het toekennen van de belastingen aan het model is het definiëren van de belastingsgevallen. Hierbij worden alle belastingsgevallen, zoals vermeld in voorgaande alinea's, aangemaakt waarbij de eerder gedefinieerde lastgroepen moeten worden geselecteerd. Vervolgens kunnen de overige parameters, zoals de aard en de duur van de belasting, meegegeven worden. Ter illustratie wordt het belastingsgeval voor een thermische belasting waarbij het wegdek bovenaan warmer is dan onderaan, $\Delta T_{M,heat}$, in Figuur 38 getoond. Hierbij kan worden opgemerkt dat het mogelijk is om te kiezen voor een temperatuursgradiënt wanneer de belasting als 'temperatuur' wordt gespecificeerd.



Figuur 38: Definiëren belastingsgevallen in SCIA Engineer - temperatuurverschilcomponent op het brugdek

4.3 Belastingscombinaties

Bij het opstellen van belastingscombinaties voor bruggen wordt er, net zoals bij de belastingsgevallen, een onderscheid gemaakt tussen de drie eerder besproken brugtypologieën, waarbij bovendien opgemerkt moet worden dat de toegepaste combinatie- en veiligheidsfactoren verschillen van deze geldig voor gebouwen. Echter is het niet nodig om deze in de eindige-elementensoftware zelf in rekening te brengen. SCIA Engineer heeft namelijk de functie om belastingcombinaties te genereren, specifiek volgens de geldende Eurocode-richtlijnen voor (voetgangers)bruggen (zie Figuur 39).



Figuur 39: Functionaliteit belastingscombinaties voor brugontwerp in SCIA Engineer

Vervolgens kunnen de vereiste belastingscombinaties automatisch gegenereerd worden. Ter illustratie wordt dit weergegeven in Figuur 40 voor de quasi-permanente gebruiksgrenstoestand.

Figuur 40: Belastingscombinatie quasi – permanente gebruiksgrenstoestand voor voetgangersbruggen

Uit Figuur 41 blijkt dat de functionaliteit 'Brugontwerp' automatisch de correcte combinatie- en partiële veiligheidsfactoren toepast bij het genereren van belastingscombinaties. Dit blijkt uit het feit dat de coëfficiënten in het grijs worden weergegeven, hetgeen aangeeft dat deze automatisch zijn toegewezen en niet handmatig aangepast kunnen worden. De correctheid hiervan is geverifieerd door de gegenereerde belastingscombinaties te ontleden in lineaire componenten, waarbij de toegepaste combinatiefactoren expliciet zichtbaar worden. Figuur 42 toont ter illustratie één van deze lineaire combinaties. Hierbij moet worden opgemerkt dat de weergegeven coëfficiënten reeds de combinatiefactoren (ψ -factoren) en de partiële veiligheidsfactoren (γ -factoren) combineren.

Figuur 41: Gegenereerde belastingscombinaties – UGT-B & GGT-Q

Figuur 42: Ontlede lineaire combinatie - UGT-B

4.4 Simulatie van schade

Het simuleren van schade biedt een eerste indicatie van hoe de structuur op bepaalde schade fenomenen zal reageren. Omwille van de beperkte tijd, vormt het monitoren van deze schade over een langere periode een uitdaging binnen deze onderzoekscontext. Schadesimulatie maakt het daarom mogelijk om voldoende fictieve meetdata te verzamelen om vervolgens een relevante scoringsmethodiek voor de structurele gezondheid te ontwikkelen.

Binnen dit onderzoek wordt de schade gesimuleerd door een systematische verzwakking van de secties van de structurele brugdelen. Dit proces begint met een aanpassing van de materiaaldoorsneden, waarbij rekening wordt gehouden met de verwachte corrosie-evolutie doorheen de tijd, zoals gedefinieerd in NBN EN ISO 9224. Hoe dit precies bewerkstelligd wordt, zal duidelijk worden in het volgende hoofdstuk. Op deze manier wordt het aspect schade door corrosie gesimuleerd.

Een tweede manier waarop schade wordt nagebootst binnen dit onderzoek is het wijzigen van de mechanische eigenschappen van bepaalde brugdelen. Hierbij wordt getracht de buigstijfheid van de structuur globaal te doen afnemen om schade ten gevolge van vermoeiing in rekening te brengen. Dit wordt gerealiseerd door een geleidelijke verlaging van de elasticiteitsmodulus (E-modulus) van het staal. Een verminderde E-modulus resulteert in een lagere globale buigstijfheid, waardoor de structuur minder stijf reageert onder belasting. Dit leidt tot grotere doorbuigingen bij gelijke belastingen, wat op zijn beurt kan resulteren in verhoogde spanningsconcentraties en een versnelde ontwikkeling van vermoeiingsschade.

Op deze manier kan worden nagegaan vanaf welke kritieke waarden voor verzwakking er grenswaarden voor doorbuiging en/ of trillingen worden bereikt. Vervolgens kan een eerste inschatting worden gemaakt van de brugdelen die de grootste invloed hebben op de structurele integriteit van de brug. Op basis hiervan kan tenslotte worden vastgesteld welke onderdelen voornamelijk gemonitord dienen te worden en aldus in de toekomst van de benodigde sensoren moeten worden voorzien.

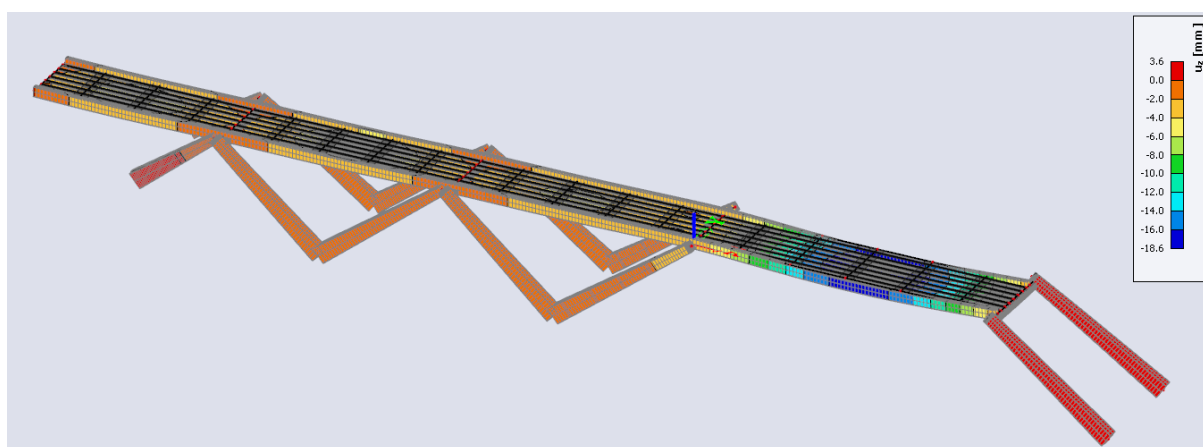
4.5 Uitgevoerde analyses

In dit hoofdstuk worden de analyses besproken die zijn uitgevoerd om de scoringsmethodiek voor de gezondheidsscore te ontwikkelen. In essentie kunnen deze analyses opgedeeld worden in twee delen, namelijk de doorbuigingsanalyse en de trillingsanalyse. Enerzijds zijn deze twee analyses relevant voor de bepaling van de structurele kwaliteit van een stalen brug. Anderzijds zijn deze analyses op relatief eenvoudige wijze uit te voeren in SCIA Engineer. Verder werd er voor het bepalen van het belang van ieder constructiedeel een spanningsanalyse uitgevoerd. In het volgende hoofdstuk worden deze analyses toegepast voor verschillende situaties om de gezondheidsscore uit te werken.

4.5.1 Doorbuigingsanalyse

De eerste analyse die wordt uitgevoerd, namelijk de doorbuigingsanalyse, onderzoekt de impact van het reduceren van de doorsnede van verschillende constructiedelen en de effecten hiervan op de doorbuiging. Binnen dit onderzoek wordt de brug opgedeeld in de langsliggers, dwarsliggers en pijlers, aangezien deze de belangrijkste structurele onderdelen vormen van de constructie. In een latere fase worden deze elementen constructiedelen genoemd bij het bepalen van de gezondheidsscore.

In de eigenlijke analyse wordt de doorsnede per constructiedeel stapsgewijs verlaagd om een bepaalde doorbuiging te verkrijgen. In eerste instantie wordt het model van de brug in oorspronkelijke staat gesimuleerd. Figuur 43 toont een overzicht van de doorbuigingsresultaten van de constructie in onaangetaste toestand onder de quasi-permanente gebruiksgrenstoestand (GGT-Q).



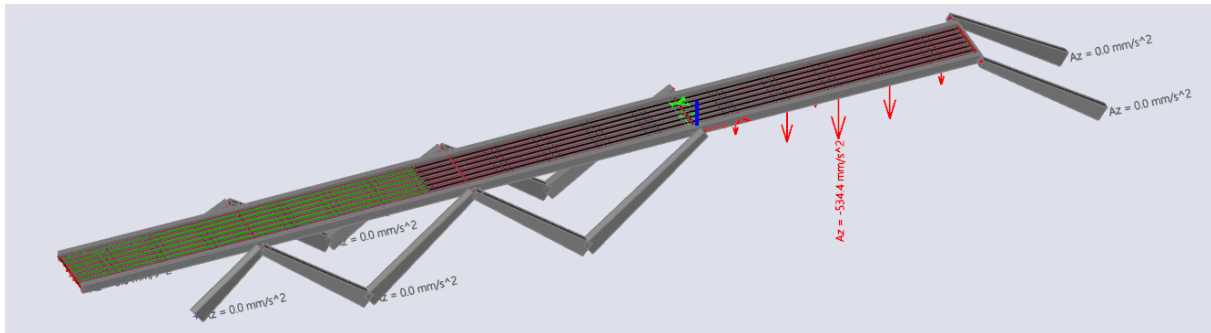
Figuur 43: Doorbuiging in GGT-Q – onaangetaste toestand

De resultaten van de stapsgewijze reductie van de doorsneden per constructiedeel worden opgenomen in de ontwikkeling van de gezondheidsscore.

4.5.2 Trillingsanalyse

De laatste jaren stelt men een verschuiving naar grotere overspanningen en een toegenomen flexibiliteit in het brugontwerp vast, voornamelijk om esthetische redenen, maar ook met het oog op het beperken van het materiaalgebruik. Dit heeft geleid tot een afname in stijfheid en massa, wat resulteert in lagere natuurlijke frequenties en een grotere gevoeligheid voor het ontwikkelen van ontoelaatbare trillingen [26]. Daarbij kan in beperkte mate een gevoel van onveiligheid ontstaan bij gebruikers, waarbij aanzienlijke trillingen zelfs kunnen leiden tot ernstige schade of het falen van de structuur.

Om de impact te begroten en om het gebruikscomfort van de gebruikers van de brug te verzekeren, wordt er een trillingsanalyse uitgevoerd in SCIA Engineer, door middel van de 'Dynamics – detailed'-functie. In de analyse worden de maximale versnellingen bepaald, om deze vervolgens te vergelijken met de comforteisen uit de literatuurstudie (zie sectie 2.4.2). Deze analyse wordt uitgevoerd voor een voetgangersbelasting met een frequentie van 2 Hz, dewelke verwacht wordt bij voetgangers met een normale stapfrequentie [26]. Figuur 44 toont een overzicht van de versnellingen in de oorspronkelijke toestand.

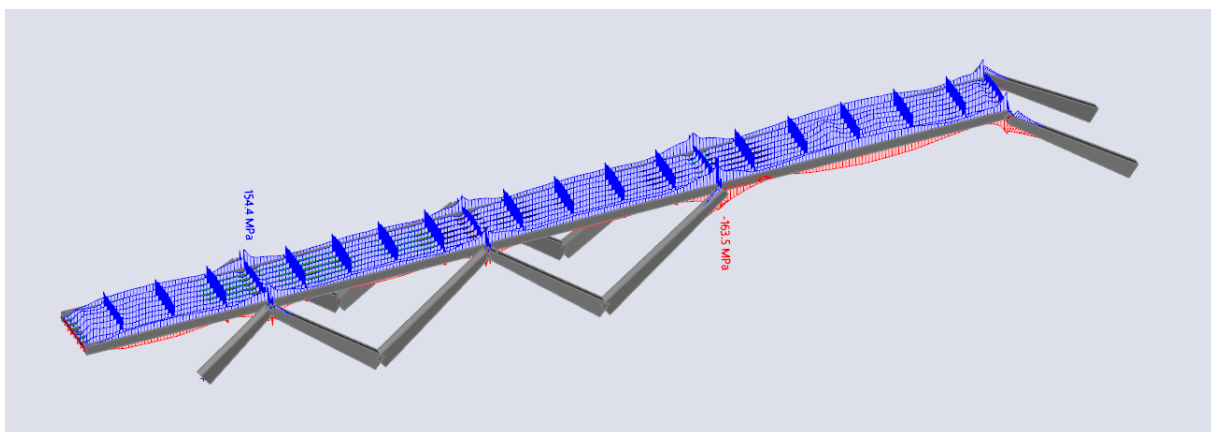


Figuur 44: Trillingen - onaangetaste toestand

Deze trillingsanalyse wordt vervolgens gebruikt bij het definiëren van de beoordelingsschaal voor trillingen. Dit wordt toegelicht in Hoofdstuk 5.

4.5.3 Spanningsanalyse

Om de impact van de doorbuigingen te vergelijken met de trillingen, wordt er beroep gedaan op een derde parameter. Deze derde parameter omvat de spanningen die optreden in de verschillende delen van de constructie. Door stapsgewijs de doorsnede te verlagen om een bepaalde doorbuiging of trilling te bereiken, kan men de invloed van deze reductie van de doorsnede op de spanningen onderzoeken en het belang van elke parameter inschatten. Figuur 45 toont een overzicht van de spanningen in de quasi-permanente gebruiksgrenstoestand (GGT-Q) van de structuur in onaangetaste toestand.



Figuur 45: Spanningen in GGT-Q - onaangetaste toestand

De volledige afname van deze spanningen en de impact op respectievelijk de doorbuiging en trillingen, wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 5.

5 GEZONDHEIDSSCORE

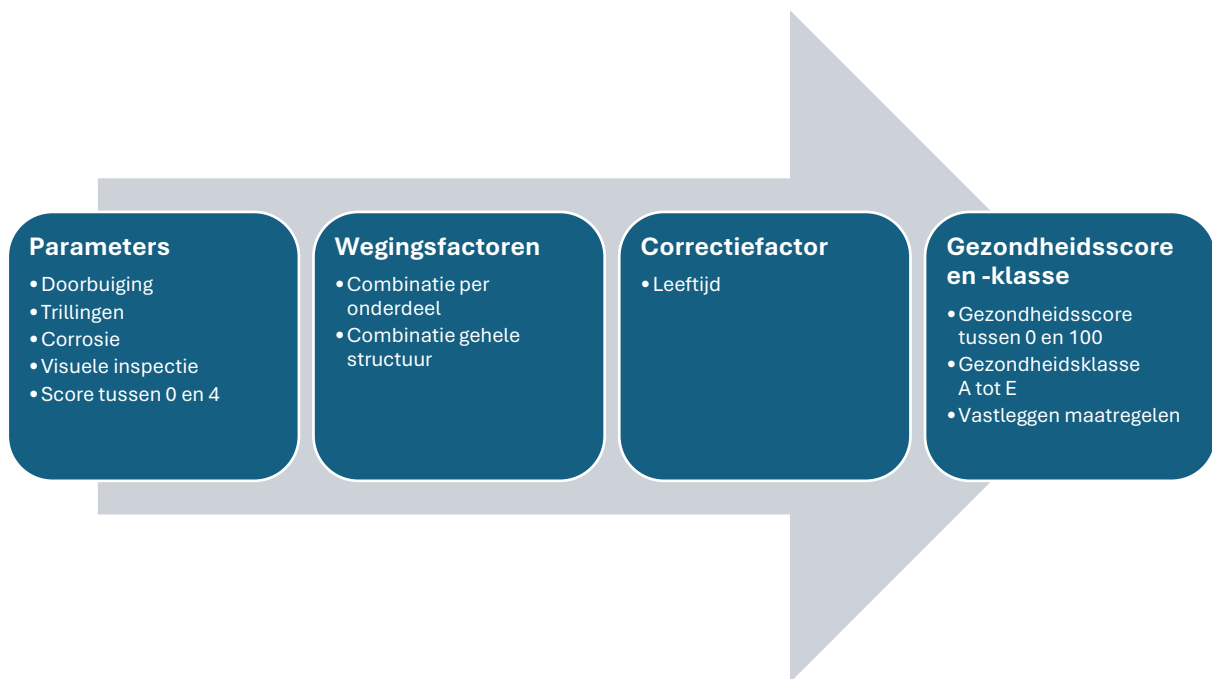
5.1 Uitgangspunten

Dit hoofdstuk bespreekt de uitgangspunten die de basis vormen voor de ontwikkeling van een scoringsmethodiek waarmee de gezondheidstoestand van stalen bruggen op objectieve en eenduidige wijze kan worden vastgesteld. Deze methodiek heeft als doel om gericht en preventief onderhoud mogelijk te maken, met als bijkomend voordeel het verlagen van de totale onderhoudskosten over de levensduur van de brug.

De voorgestelde methode richt zich specifiek op stalen bruggen die onder beheer staan van infrastructuurbeheerders. Dergelijke partijen worden steeds vaker ingeschakeld binnen het kader van DBFM-contracten waarbij zij gedurende een vaste periode (meestal 30 jaar) verantwoordelijk zijn voor het volledige onderhoud van de constructie.

Binnen deze context biedt de methode een alternatief voor bestaande manuele inspectiemethoden, zoals de A-inspecties, door (gedeeltelijk) over te stappen op sensorgebaseerde metingen. Hierdoor wordt de afhankelijkheid van subjectieve beoordelingsmethoden verminderd, terwijl ook de financiële lasten op termijn dalen dankzij geautomatiseerde dataverzameling en -analyse. Bovendien draagt deze aanpak bij aan een verbetering van de veiligheidscondities, aangezien inspecties kunnen worden uitgevoerd zonder directe fysieke aanwezigheid op onveilige, moeilijk bereikbare onderdelen. Hierdoor wordt het risico aan blootstelling van potentieel gevaarlijke werkomstandigheden aanzienlijk beperkt. Bij opstart gaat deze aanpak daarentegen gepaard met hogere kosten voor de aankoop van sensoren en inzet van personeel.

De gezondheidsscore steunt op een methode waarbij de te onderzoeken constructie wordt opgedeeld in een aantal constructiedelen, die vervolgens worden beoordeeld door middel van de beoordelingsparameters doorbuiging en trillingen. Voor elk van deze parameters wordt er vervolgens een score toegekend, variërend tussen 0 en 4. In een volgende fase worden deze gewogen deelscores van iedere beoordelingsparameter gecombineerd tot een deelscore per constructiedeel, met een maximumscore van 100. De maximumscore van 100 komt overeen met een brug in perfecte staat. In de laatste stap worden deze deelscores, van ieder constructiedeel, gecombineerd tot een algemene eindscore en gecorrigeerd met een factor die de leeftijd van de brug in rekening brengt. Deze correctiefactor zorgt er voor dat oudere bruggen eerder in aanmerking komen voor onderhoud. Het finale resultaat voor de gezondheidsscore en -klasse wordt tenslotte gelinkt aan de maatregelen die getroffen dienen te worden. De *flowchart* in Figuur 46 geeft een overzicht van het proces.



Figuur 46: Flowchart ontwikkeling gezondheidsscore

Bij dit scoringsmodel krijgt elke parameter een kwantitatieve score tussen 0 en 4, gebaseerd op de mate van afwijking ten opzichte van de vooropgestelde ontwerpwaarde. Hierbij vormen de richtlijnen uit de Eurocodes een goede basis. De exacte grenzen van de verschillende scores worden iteratief bepaald op basis van het eindige-elementenmodel, zoals later in dit hoofdstuk zal worden toegelicht.

Als laatste dient te worden opgemerkt dat bovenstaande methode een score toekent op basis van de metingen van één sensor per beoordelingsparameter. Ingeval er meerdere sensoren worden toegepast, dient de meest kritische waarde gebruikt te worden voor de bepaling van de gezondheidsscore en -klasse. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer er meerdere elementen van éénzelfde constructiedeel worden gemonitord. Om een completer gezondheidsbeeld van de brug te vormen, is het gewenst om een gezondheidsscore op te stellen per constructiedeel. Vervolgens kunnen deze deelscores gecombineerd worden, door het belang van elk constructiedeel in rekening te brengen. Aangezien dit onderzoek zicht richt op één specifieke onderzoekslocatie, is het noodzakelijk om in de toekomst meerdere casussen te beschouwen om een algemene methode te kunnen opstellen.

5.2 Parameters

Door de doorbuiging van een constructie te monitoren, kunnen schadepatronen zoals vermoeiing en overmatige belasting worden opgespoord. Een toenemende of onverwacht grote doorbuiging kan wijzen op structurele degradatie, zoals materiaalvermoeiing na herhaaldelijke belastingscycli, of op belastingen groter dan deze waarvoor de structuur oorspronkelijk ontworpen is.

Doorbuigingen kunnen worden gemeten door middel van lineair variabele differentiaaltransformatoren (LVDT's). Deze worden strategisch geplaatst op de locaties waar de grootste doorbuiging te verwachten is, i.e. het midden van de langs- en dwarsliggers, evenals de uiteinden van de pijlers waaraan de dwarsliggers bevestigd zijn. Een alternatieve methode om de doorbuiging te monitoren, bestaat uit het toepassen van inclinometers. Uit de hoekverdraaiing van het te monitoren onderdeel, kan vervolgens relatief eenvoudig de

doorbuiging bepaald worden. In het volgende hoofdstuk worden er richtlijnen gegeven in verband met het gebruik van deze sensoren.

Naast het opvolgen van doorbuigingen speelt ook de analyse van trillingen een cruciale rol bij het bepalen van de structurele gezondheid. Veranderingen in het trillingsgedrag, zoals frequentieverschuivingen als gevolg van een afname van de massa van de structuur of een wijziging in de demping ervan, kunnen wijzen op een afname van de structurele integriteit [27], [28].

Trillingen kunnen worden gemonitord door middel van *accelerometers*, ook wel versnellingsmeters genoemd. Deze sensoren worden idealiter geplaatst in het midden van de grootste overspanningen, waar de grootste trillingen worden verwacht. Ook de richting van de waargenomen trillingen speelt een rol. Hoofdstuk 6 zal handelen over het gebruik van deze sensoren en zal daarnaast een geschikte sensor toelichten voor de toepassing binnen SHM.

De laatste parameter die deel uitmaakt van de gezondheidsscore, is de mate van corrosie. Deze parameter heeft een belangrijke invloed op de structurele kwaliteit van een constructie, aangezien corrosie op termijn voor een reductie in doorsnede van structurele elementen zorgt. Indien corrosie niet behandeld wordt, kan deze reductie dermate groot worden waardoor bepaalde elementen hun functie niet meer kunnen vervullen. Door deze corrosie in een vroeg stadium op te sporen, is men in staat om met beperkte inspanningen en kosten de nodige maatregelen te treffen en ernstige schade te vermijden.

Corrosie wordt gemonitord door middel van sensoren die de dikte van een bepaald element opmeten. Meestal gaat het hierbij om een profiel dat in contact staat met de buitenlucht en regenwater, aangezien deze omstandigheden corrosie bevorderen. Door de afname in dikte te monitoren en deze te vergelijken met de verwachte waarde, kan men vaststellen of er al dan niet bijkomende maatregelen getroffen dienen te worden. In Hoofdstuk 6 wordt de werking van dit type sensoren uitgebreid besproken en wordt er een voorstel gedaan voor een geschikte sensor om corrosie te monitoren.

Zoals reeds aangegeven in de literatuurstudie is het gewenst om, naast het sensorgestuurde onderhoud, ook periodieke visuele inspecties in te plannen. Op deze manier kunnen ook losse of ontbrekende verbindingen en verbindingsmiddelen, onregelmatigheden in de beschermingslaag of schade door vandalisme etc., worden geregistreerd. Sensoren kunnen efficiënt de gevolgen van structurele veranderingen beoordelen, zoals overmatige doorbuiging en trillingen. Echter, de identificatie van de oorzaken van deze veranderingen vereist de expertise van ervaringsdeskundigen en zou idealiter reeds plaatsvinden alvorens er grote structurele schade optreedt. Daarom worden de resultaten van de visuele inspecties ook meegenomen in de bepaling van de gezondheidsscore.

5.3 Opdeling constructiedelen

Zoals reeds vermeld, wordt de uiteindelijke gezondheidsscore van de constructie bepaald door de gezondheidsscore van de meest kritieke onderdelen (constructiedelen) te combineren. Hiervoor dient er een opdeling van de constructie in constructiedelen gemaakt te worden. Binnen dit onderzoek wordt er, specifiek voor de beschouwde brug, een opdeling gemaakt in langsliggers, dwarsliggers en pijlers. Deze onderdelen werden namelijk beschouwd als de meest cruciale in de structurele opbouw van de brug.

Door de opdeling in constructiedelen ontstaat er een compleet beeld over de structurele gezondheid van de brug. Daarnaast stelt deze opdeling het onderhoudspersoneel in staat om gericht onderhoud uit te voeren, aangezien men informatie verkrijgt over welke constructiedelen ondermaats scoren.

5.4 Scoringssysteem en weging

5.4.1 Doorbuiging

Doorbuiging wordt gedefinieerd als de maximale verticale vervorming van een brug onder belasting. Een toegenomen doorbuiging ten opzichte van een eerdere meting of ontwerpwaarde wijst op een mogelijke afname van de stijfheid of op structurele schade.

In eerste instantie is het van belang om een referentiewaarde te definiëren, waarmee de resultaten kunnen worden vergeleken. Idealiter komt deze referentiewaarde uit metingen die, vlak na de bouw, uitgevoerd werden op de onbeschadigde constructie. Een andere mogelijkheid bestaat uit het opleggen van een limietwaarde door de opdrachtgever. In het kader van dit onderzoek zijn deze gegevens niet voorhanden en wordt er beroep gedaan op referentiewaarden uit verschillende normen, zoals samengevat werd in de literatuurstudie (zie sectie 2.4).

De doorbuiging wordt beoordeeld door middel van een vijfdelige schaal, waarbij een waarde groter dan $L/1000$, zoals vastgesteld in de literatuurstudie (zie sectie 2.4.1), overeenstemt met een ontoelaatbare doorbuiging. Deze doorbuiging dient gecontroleerd te worden voor elke overspanning, waarbij de meest negatieve waarde doorslaggevend is. Tabel 20 geeft een overzicht van de verschillende situaties.

Tabel 20: Beoordelingsschaal doorbuiging

Doorbuiging (verticaal)	Score	Beschrijving
$\geq L/900$	0	Zeer slecht: ontoelaatbare doorbuiging, gevoelsmatig onveilige situatie
$L/1000 \leq x < L/900$	1	Slecht: ontoelaatbare doorbuiging, onderhoud nodig
$L/1100 \leq x < L/1000$	2	Matig: toelaatbare doorbuiging, brug voldoet
$L/1200 \leq x < L/1100$	3	Goed: toelaatbare doorbuiging, brug voldoet ruimschoots
$< L/1200$	4	Zeer goed: toelaatbare doorbuiging, brug in nieuwstaat

De eerste stap bij het opstellen van bovenstaande beoordelingsschaal omvat het vastleggen van de verschillende grenswaarden per score, alsook de intervalgrootte van elke score. Hiervoor wordt score 2, de middelste score, gedefinieerd als een interval met als ondergrens $L/1000$, zoals bepaald in het vooronderzoek. Deze grens is zo gekozen dat de huidige brug in nieuwstaat de hoogste score van 4 behaalt, hetgeen hierna verduidelijkt zal worden, terwijl een score van 2 nog steeds voldoet aan de minimumeisen vastgesteld in het vooronderzoek. Op deze manier is het mogelijk om de situatie van de brug, zowel positief als negatief, in te schatten. In de volgende stap wordt het eindige-elementenmodel gebruikt om de andere grenzen vast te leggen. Zo wordt de brug in eerste instantie gesimuleerd in onaangetaste toestand. Zoals te zien in Figuur 43, bedraagt de maximale doorbuiging van de onderzochte brug 18,6 mm ter hoogte van de grootste overspanning van 21,4 m. Dit komt overeen met een doorbuiging van ongeveer $L/1200$, met L de lengte van de overspanning. Dit is meteen ook de meest kritische verhouding van alle langsliggers die optreedt bij deze brug, en wordt bijgevolg gedefinieerd als de bovengrens voor de maximale score. Zolang de effectieve doorbuiging lager ligt dan deze grens, wordt er een score 4 toegekend. Op basis van deze twee grenzen wordt de rest van de intervallen bepaald, met als doel om gelijke intervalgroottes te bekomen.

Op basis van bovenstaande tabel is het mogelijk om een doorbuigingsscore tussen 0 en 4 toe te kennen aan de constructiedelen, waarbij een hogere score overeenkomt met een betere prestatie.

5.4.2 Trillingen

Zoals reeds eerder vermeld, vormt de analyse van trillingen een belangrijke beoordelingsparameter. De trillingen zijn immers sterk afhankelijk van de globale stijfheid van een constructie. Een variatie in trillingen kan een indicatie zijn voor een afname van de massa, de stijfheid of de demping van de te beschouwen constructie.

Ook hier bestaat de eerste stap uit het vastleggen van een referentiewaarde voor de verticale trillingen, die het mogelijk maakt om de verkregen resultaten te vergelijken. In de nationale bijlage van NBN EN 1990 wordt deze grenswaarde vastgelegd op $0,7 \text{ m/s}^2$, zoals eerder besproken in de literatuurstudie (zie sectie 2.4.2) [9].

Gelijkaardig aan de doorbuiging, worden de trillingen in verticale richting beoordeeld op basis van een vijfdelige schaal, waarbij een lage score overeenkomt met ontoelaatbare trillingen. Tabel 21 geeft een overzicht van de beoordelingsschaal van deze trillingen. De grenzen worden vastgelegd door de combinatie te maken tussen de opgelegde grenswaarden uit de Eurocode en de waarden afkomstig uit het eindige-elementenmodel.

Tabel 21: Beoordelingsschaal verticale trillingen

Trilling (verticaal)	Score	Beschrijving
$\geq 1,00 \text{ m/s}^2$	0	Zeer slecht: onveilige situatie door grote trillingen
$0,85 \text{ m/s}^2 \leq x < 1,00 \text{ m/s}^2$	1	Slecht: grote trillingen die comfort beïnvloeden
$0,70 \text{ m/s}^2 \leq x < 0,85 \text{ m/s}^2$	2	Matig: merkbare trillingen
$0,55 \text{ m/s}^2 \leq x < 0,70 \text{ m/s}^2$	3	Goed: lichte trillingen
$< 0,55 \text{ m/s}^2$	4	Zeer goed: brug in perfecte staat

Net zoals bij de doorbuiging, wordt de grenswaarde afkomstig uit de Eurocode genomen als ondergrens voor de middelste score (score 2). Vervolgens wordt het eindige-elementenmodel ingezet om de effectieve trillingen van de brug in nieuwstaat te bepalen. Figuur 44 geeft een maximale versnelling in het midden van de grootste overspanning weer van $0,534 \text{ m/s}^2$. Op basis van deze waarde wordt de grens voor de maximumscore bepaald als $0,55 \text{ m/s}^2$. De overige grenzen worden bepaald door constante intervalgroottes aan te nemen.

Op basis van bovenstaande tabel is het mogelijk om een trillingsscore tussen 0 en 4 toe te kennen aan de constructiedelen, waarbij een hoge score opnieuw overeenkomt met een goede prestatie wat de trillingen in verticale richting betreft.

5.4.3 Corrosie

Een andere relevante parameter die de structurele kwaliteit van een stalen constructie beïnvloedt is de mate van corrosie. Dit schadefenomeen heeft na verloop van tijd uiteraard ook een effect op de doorbuigingen en trillingen van de constructie, daar deze de buigstijfheid op termijn zal doen afnemen. In NBN EN ISO 12944-2 [29] wordt er een richtlijn gegeven voor het dikteverlies dat verwacht wordt in het eerste jaar na plaatsing van een stalen structuur. Hierbij dient de corrosiecategorie bepaald te worden. In het geval van deze casus gaat het om een binnenlandse brug in de nabijheid van een vervuilende autosnelweg en spoorweg, wat resulteert in een corrosieklasse C3. Dit gaat gepaard met een omgeving waarbij een gemiddelde hoeveelheid corrosie verwacht wordt. Voor een corrosieklasse C3 wordt er, volgens Tabel 22, in staal een dikteverlies van tussen de 25 en 50 μm verwacht na een blootstellingsduur van één jaar.

Tabel 22: Classificatie corrosiecategorieën en verwacht dikteverlies na één jaar [29]

Corrosivity category	Mass loss per unit surface/thickness loss (after first year of exposure)				Examples of typical environments (informative only)	
	Low-carbon steel		Zinc		Exterior	Interior
	Mass loss g/m ²	Thickness loss µm	Mass loss g/m ²	Thickness loss µm		
C1 very low	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	—	Heated buildings with clean atmospheres, e.g. offices, shops, schools, hotels
C2 low	> 10 to 200	> 1,3 to 25	> 0,7 to 5	> 0,1 to 0,7	Atmospheres with low level of pollution: mostly rural areas	Unheated buildings where condensation can occur, e.g. depots, sports halls
C3 medium	> 200 to 400	> 25 to 50	> 5 to 15	> 0,7 to 2,1	Urban and industrial atmospheres, moderate sulfur dioxide pollution; coastal areas with low salinity	Production rooms with high humidity and some air pollution, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies
C4 high	> 400 to 650	> 50 to 80	> 15 to 30	> 2,1 to 4,2	Industrial areas and coastal areas with moderate salinity	Chemical plants, swimming pools, coastal ship and boatyards
C5 very high	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4,2 to 8,4	Industrial areas with high humidity and aggressive atmosphere and coastal areas with high salinity	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution
CX extreme	> 1 500 to 5 500	> 200 to 700	> 60 to 180	> 8,4 to 25	Offshore areas with high salinity and industrial areas with extreme humidity and aggressive atmosphere and sub-tropical and tropical atmospheres	Industrial areas with extreme humidity and aggressive atmosphere
NOTE The loss values used for the corrosivity categories are identical to those given in ISO 9223.						

Verder wordt er in NBN EN ISO 9224 opgemerkt dat deze dikteverliezen niet elk jaar hetzelfde zijn, maar gegeven worden door onderstaande formule [30]:

$$D = r_{corr} \cdot t^b \quad (3)$$

Met

r_{corr} : de vastgestelde corrosieafname na één jaar, uitgedrukt in µm,

t : de blootstellingsduur, uitgedrukt in jaren,

b : de tijdsexponent, specifiek voor de metaalomgeving.

Volgens Tabel 23 geldt er een waarde van 0,575 voor de tijdsexponent, waarmee de bovengrens van het dikteverlies bepaalt dient te worden. De waarden voor de tijdsexponent terug te vinden in kolom B1 zijn afkomstig uit voorgaand onderzoek, namelijk het ISO CORRAG onderzoek [31]. De waarden voor de tijdsexponent in kolom B2 brengen de standaarddeviaties van deze resultaten in rekening en worden gebruikt om de bovengrens van

het dikteverlies te bepalen. Hierdoor wordt de meest kritische situatie waarbij de standaarddeviaties in rekening worden gebracht (B2) gebruikt.

Tabel 23: Tijdsexponent ter voorspelling en inschatting van de aantasting door corrosie [29]

Metal	B1	B2
Carbon steel	0,523	0,575
Zinc	0,813	0,873
Copper	0,667	0,726
Aluminium	0,728	0,807

Op basis van deze bepalingen kan er een schaal worden opgesteld om een score toe te kennen op basis van corrosiemetingen. Deze schaal wordt opgebouwd op basis van de ontwerplevensduur van de constructie. In dit geval gaat het om een fietsbrug met een ontwerplevensduur van 100 jaar, maar deze ontwerplevensduur dient per project beschouwd te worden.

De bovengrens voor de afname die de constructie gedurende zijn levensduur mag ervaren, wordt bepaald door de maximaal toelaatbare afname na 100 jaar van 50 μm en bedraagt bijgevolg:

$$D = r_{\text{corr}} \cdot t^b = 50 \mu\text{m} \cdot 100^{0,575} = 706 \mu\text{m}$$

Indien deze waarde wordt overschreden, bevindt de constructie zich in de meest negatieve toestand. Dit gaat gepaard met een deelscore voor corrosie van 0. De meest positieve waarde voor de corrosie komt overeen met een corrosie die kleiner is dan de verwachte waarde na één jaar, namelijk 25 μm :

$$D = r_{\text{corr}} \cdot t^b = 25 \mu\text{m} \cdot 1^{0,575} = 25 \mu\text{m}$$

De tussenliggende intervallen worden bekomen door gelijke intervalgrootten te gebruiken en door de effectieve leeftijd van de brug in rekening te brengen. Tabel 24 geeft een overzicht van de beoordelingsschaal van de corrosie, geldig voor constructies tot 100 jaar. Bij een constructieleeftijd van 100 jaar vallen de grenzen voor score 0 en 1 samen, waardoor de meest negatieve en conservatieve score, namelijk 0, dient te worden toegekend. Hetzelfde is geldig voor een constructie van één jaar oud, waarbij de grenzen voor score 3 en 4 samenvallen.

Tabel 24: Beoordelingsschaal corrosie na t jaar – geldig voor een constructieleeftijd van 1 – 100 jaar

Dikteverlies	Score	Beschrijving
$\geq 706 \mu\text{m}$	0	Zeer slecht: onveilige situatie door dikteverlies
$50 \cdot t^{0,575} \mu\text{m} \leq x < 706 \mu\text{m}$	1	Slecht: ontoelaatbaar dikteverlies
$25 \cdot t^{0,575} \mu\text{m} \leq x < 50 \cdot t^{0,575} \mu\text{m}$	2	Matig: net toelaatbaar dikteverlies
$25 \mu\text{m} \leq x < 25 \cdot t^{0,575} \mu\text{m}$	3	Goed: toelaatbaar dikteverlies
$< 25 \mu\text{m}$	4	Zeer goed: ruim toelaatbaar dikteverlies

5.4.4 Visuele inspectie

Voor de beoordeling op basis van visuele inspecties wordt eveneens beroep gedaan op een vijfdelige schaal. Deze beoordeling is subjectiever dan de voorgaande, omwille van de subjectiviteit van de inspecteur. Vandaar dat het gewicht van de parameter beperkt blijft, zoals later zal blijken. Bij de ingebruikname van de constructie krijgt deze de hoogste score toegewezen. Bij toekomstige inspecties wordt er een nieuwe controle uitgevoerd met als referentie de allereerste inspectie. Tabel 25 geeft een overzicht van de verschillende mogelijkheden.

Tabel 25: Beoordelingsschaal visuele inspectie

Geval	Score	Beschrijving
v	0	Zeer slecht: onveilige situatie en risico op bezwijken
iv	1	Slecht: dreigend functieverlies
iii	2	Matig: net toelaatbaar met lange termijn risico
ii	3	Goed: ruim toelaatbaar, lokaal probleem
i	4	Zeer goed: constructie in nieuwstaat, geen invloed

De classificering gebeurt op basis van de eerder vermelde inspecties, die beschreven worden door het Departement Leefmilieu en Infrastructuur in [15]. In Bijlage 7 van dit document wordt er een lijst gegeven met de belangrijkste gebreken waar rekening mee gehouden wordt bij de beoordeling van een constructie. Door deze gebreken te classificeren op basis van de ernst van de schade, kunnen er richtlijnen worden opgesteld om de score voor de visuele inspectie vast te leggen. Tabel 26 geeft een overzicht van de gebreken die aanleiding geven tot een bepaalde score.

Tabel 26: Gebreken vastgesteld tijdens visuele inspecties en bijhorende score

Geval	Score	Mogelijke gebreken
v	0	Gebreken aan klink-, bout-, of lasverbindingen van vitale onderdelen Verzakking van de grond onder of naast funderingen
iv	1	Corrosie bij dragende elementen Differentiële zettingen Ontoelaatbare beweging van het kunstwerk in horizontale zin
iii	2	Beschadigingen door lekkage- of draineerwater (vochtige omgeving) Onvoldoende contact van de opleggingen
ii	3	Jonge scheuren die mogelijks toenemen in de tijd of bij belasting Beschadigingen ter hoogte van de afdichtingslaag/lasnaden
i	4	Belemmering van de vrije beweging van de elementen van het kunstwerk Geen significante schade

5.4.5 Wegingsfactoren

Na de bepaling van de verschillende deelscores van voorgaande schadebeoordelingsparameters, bestaat de volgende stap uit het combineren van deze deelscores tot een algemene gezondheidsscore voor één constructiedeel. Dit gebeurt door het toepassen van wegingsfactoren op elke deelscore. De wegingsfactoren geven het aandeel van iedere schadebeoordelingsparameter weer bij de bepaling van de algemene gezondheid van het gehele constructiedeel. In dit onderzoek worden de wegingsfactoren, en later ook de combinatiefactoren, bepaald op basis van het eindige-elementenmodel. In een latere fase is het de bedoeling om deze te verifiëren door meerdere gelijkaardige bruggen te bestuderen en te beoordelen. Dit zowel op basis van het opstellen van een model alsook door middel van het opzetten van een sensorsysteem. Op deze manier kan een meer algemene scoringsmethodiek worden verkregen.

Zoals reeds besproken, zal de brug uit dit onderzoek opgedeeld worden in langsliggers, dwarsliggers en pijlers. De wegingsfactoren worden bepaald door de beoordelingsparameters één voor één te simuleren, met als doel aan elke parameter een specifieke weging toe te kennen. Om de invloeden van deze wijzigingen vast te leggen, is het noodzakelijk om een referentiewaarde te definiëren. Binnen dit onderzoek worden de interne spanningen van de beschouwde elementen gebruikt als referentiewaarde. De spanningstoename wordt beoordeeld aan de hand van simulaties op de langsliggers aangezien, zoals tijdens het opstellen van de combinatiefactoren (zie sectie 5.4.6), zal blijken, deze het grootste aandeel hebben in het beïnvloeden van de doorbuigingen en trillingen van de globale structuur.

In eerste instantie wordt de doorbuiging gesimuleerd. Hierbij wordt er gestart van het oorspronkelijke model van de brug (in onaangestaste toestand). Hierbij wordt de maximale spanning genoteerd die optreedt ter hoogte van de langsliggers. Vervolgens worden er stapsgewijs doorbuigingen gesimuleerd door de doorsnede van de langsliggers te verlagen, zodat de doorbuigingen overeenkomen met de eerder opgestelde grenzen van de beoordelingsschaal. Dit gaat gepaard met een toename van de maximale spanning.

Tabel 27: Bepaling gemiddelde toename van de doorbuiging op basis van simulatie afname doorsnedes

Doorbuiging (richtlijn)	Max. Spanning [MPa]	Procentuele toename van de spanning t.o.v. de voorgaande situatie	Procentuele afname van de doorsnede t.o.v. de onaangestaste situatie
Oorspronkelijk	163,5	-	-
L/1200	181,4	10,95%	5%
L/1100	201,4	11,03%	10%
L/1000	224,4	11,42%	15%
L/900	248,9	10,92%	20%
Gemiddelde toename doorbuiging ($t_{\text{doorbuiging}}$)		11,08%	

De volgende parameter die bepaald wordt zijn de trillingen. Gelijkaardig aan de doorbuigingssimulatie, wordt er gestart vanuit het oorspronkelijke model in nieuwstaat. Hierbij wordt er gekeken naar de trillingsresultaten in verticale richting. In de volgende stap wordt de doorsnede stapsgewijs verkleind, waardoor de trillingen toenemen totdat deze in een lagere score belanden. Deze wijziging brengt een toenemende spanning teweeg. De gemiddelde toename over de verschillende scores zal hierna gebruikt worden om de wegingsfactoren voor de trillingen te bepalen.

Tabel 28: Bepaling gemiddelde toename van de trillingen op basis van simulatie afname doorsnedes

Verticale trillingen (richtlijn)	Score	Max. Spanning [MPa]	Procentuele toename van de spanning t.o.v. de voorgaande situatie	Procentuele afname van de doorsnede t.o.v. de onaangetaste situatie
Oorspronkelijk	4	163,5	-	-
0,55 m/s ²	3	172,2	5,32%	2,5%
0,70 m/s ²	2	185,5	7,72%	6%
0,85 m/s ²	1	196,9	6,15%	9%
1,00 m/s ²	0	206,9	5,08%	11,5%
Gemiddelde toename trillingen (t_{trilling})			6,07%	

Als laatste parameter wordt de corrosie beschouwd. Net zoals bij de twee voorgaande parameters wordt er hierbij gestart vanuit het oorspronkelijke model in nieuwstaat, zonder eerdere simulatie van degradatieverschijnselen. Gelijkaardig aan de eerder uitgevoerde simulaties, gebeurt dit door middel van een verkleining van de doorsnede gebaseerd op de richtlijnen vanuit NBN EN ISO 9224. Deze richtlijnen worden vervolgens gelinkt aan de scores. De afnames van de doorsnedes worden bepaald door middel van Formule 3 en dit voor veelvoorkomende mijlpalen binnen de bruggenbouw, zoals 30 jaar (duur DBFM-contract), 50 jaar (helft van de beoogde levensduur) en 100 jaar (beoogde levensduur).

Tabel 29: Bepaling gemiddelde toename van de invloed van corrosie op de toename van de spanning

Afname van de doorsnede door corrosie, bepaald op basis van NBN EN ISO 9224	Score	Max. Spanning [MPa]	Procentuele toename van de spanning t.o.v. de voorgaande situatie	Beschouwde periodes voor afname door corrosie
Geen afname	4	163,5	-	na oplevering
Afname van 0,7 mm	3	167,9	2,69%	na 30 jaar
Afname van 1 mm	2	169,8	1,13%	na 50 jaar
Afname van 1,2 mm	1	171,2	0,82%	na 75 jaar
Afname van 1,4 mm	0	172,5	0,76%	na 100 jaar
Gemiddelde toename corrosie (t_{corrosie})			1,35%	

In de laatste stap worden de eigenlijke wegingsfactoren bepaald. Dit gebeurt op basis van de gemiddelde spanningstoename die de verandering van de respectievelijke beoordelingsparameter teweegbrengt. Zoals eerder besproken, blijft de visuele inspectie een essentieel onderdeel uitmaken bij de bepaling van de structurele gezondheid van stalen bruggen. Om deze reden wordt er aan de resultaten van de visuele inspectie initieel een weging van 10% toegekend, hoe groot het aandeel uiteindelijk blijkt in de beoordeling zal verder onderzoek moeten uitmaken. Deze waarde dient immers door middel van praktijkervaring bijgesteld te worden. Hieronder wordt de berekening van de wegingsfactoren van elke beoordelingsparameter (w_i) bepaald, door de impact van de parameter (t_i) te correleren aan de wegingsfactor.

$$\frac{w_{doorbuiging}}{w_{trilling}} = \frac{t_{doorbuiging}}{t_{trilling}} \quad (4)$$

$$\frac{w_{trilling}}{w_{corrosie}} = \frac{t_{trilling}}{t_{corrosie}} \quad (5)$$

$$w_{doorbuiging} + w_{trilling} + w_{corrosie} + w_{inspectie} = 100\% \quad (6)$$

$$\text{met } w_{inspectie} = 10\%$$

Indien men Formules 4, 5 en 6 uitwerkt verkrijgt men volgende resultaten voor de wegingsfactoren van iedere parameter:

$$w_{doorbuiging} = 54\%$$

$$w_{trillingen} = 30\%$$

$$w_{corrosie} = 6\%$$

$$w_{inspectie} = 10\%$$

Men stelt vast dat de corrosie de laagste weging krijgt volgens deze methode. Dit is een logische vaststelling, die kan worden verklaard doordat corrosie een impact heeft op de doorbuigingen en trillingen. Om te vermijden dat deze invloeden dubbel in rekening zouden worden gebracht, is een lage wegingsfactor passend.

5.4.6 Combinatiefactoren

De volgende stap bestaat uit het combineren van de bepaalde deelscores van de structurele constructiedelen. Zoals eerder besproken wordt de brug in dit onderzoek opgedeeld in langsliggers, dwarsliggers en pijlers. In deze stap worden de combinatiefactoren voor elk constructiedeel bepaald, die de mate van belang van ieder onderdeel in de structurele integriteit aangeven. De bepaling van deze combinatiefactoren gebeurt op basis van het simuleren van schade door een afname van de doorsnede van iedere afzonderlijke categorie constructiedelen. In dit geval wordt de doorsnede telkens met 10% vermindert. Na het verminderen van de doorsnede worden de veranderingen in de maximale doorbuiging van de globale constructie beschouwd. Dit gebeurt afzonderlijk voor elk constructieonderdeel, zodat de impact op de globale doorbuiging van iedere categorie op onderling onafhankelijke wijze bepaald wordt. Tabel 30 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 30: Invloed constructiedeel op doorbuiging

Constructiedeel	Maximale doorbuiging voor afname doorsnede [mm]	Maximale doorbuiging na afname doorsnede met 10% [mm]	Toename doorbuiging na afname doorsnede (t_i)
Langsliggers	18,6	21,6	16,13% ($t_{\text{langsliggers}}$)
Dwarsliggers	18,6	19,9	6,99% ($t_{\text{dwarsliggers}}$)
Pijlers	18,6	19,3	3,76% (t_{pijlers})

In de volgende fase worden de combinatiefactoren vastgelegd. Dit gebeurt door na te gaan hoe groot de impact ten gevolge van de procentuele afname van de doorsnede van een constructiedeel is op de toename in de beoordelingsparameter (t_i).

Hieronder wordt de berekening getoond van de combinatiefactoren voor elke categorie constructiedelen (c_i), waarbij de impact van de parameter (t_i) wordt gecorreleerd aan de combinatiefactor. In dit geval wordt de parameter met de grootste weging gebruikt, namelijk de doorbuigingen.

$$\frac{c_{\text{langsliggers}}}{c_{\text{dwarsliggers}}} = \frac{t_{\text{langsliggers}}}{t_{\text{dwarsliggers}}} \quad (7)$$

$$\frac{c_{\text{dwarsliggers}}}{c_{\text{pijlers}}} = \frac{t_{\text{dwarsliggers}}}{t_{\text{pijlers}}} \quad (8)$$

$$c_{\text{langsliggers}} + c_{\text{dwarsliggers}} + c_{\text{pijlers}} = 100\% \quad (9)$$

Indien men bovenstaande formules uitwerkt verkrijgt men volgende resultaten voor de combinatiefactoren voor ieder constructiedeel:

$$c_{\text{langsliggers}} = 60\%$$

$$c_{\text{dwarsliggers}} = 26\%$$

$$c_{\text{pijlers}} = 14\%$$

5.4.7 Correctiefactor

Nadat de deelscores met behulp van de combinatiefactoren zijn samengesteld tot een gezondheidsscore voor de gehele constructie, wordt er nog een correctiefactor toegepast die rekening houdt met de leeftijd van de constructie. Deze correctiefactor wordt gebruikt om ervoor te zorgen dat sterk verouderde constructies eerder in aanmerking komen voor een grondige inspectie, onderhoud of vervanging. Constructies met een zekere ouderdom zijn immers vatbaarder voor schade, aangezien deze al voor een langere periode in dienst zijn en reeds verder staan in het degradatieproces. Deze degradatie wordt niet altijd waargenomen door de sensoren, aangezien slechts een gedeelte van de brug gemonitord wordt door sensoren. Door het invoeren van deze correctiefactor, worden deze degradatiefenomenen indirect in rekening gebracht. De verschillende grenzen worden wederom bepaald op basis van de reeds eerder vermelde mijlpalen in de levensduur van bruggen. In de latere fasen van de levensduur van de brug wordt er een extra opdeling voorzien. De exacte waarde voor de correctiefactor dient in een later fase verfijnd te worden door middel van praktijkervaring. Tabel 31 geeft een overzicht van de correctiefactoren per leeftijd en de bijhorende beschrijving

Tabel 31: Correctiefactor – leeftijd van de constructie

Leeftijd	Correctiefactor	Beschrijving
< 30 jaar	1,00	Gemiddelde periode van een DBFM-contract
30 jaar $\leq$ x < 50 jaar	0,95	Periode tussen afloop DBFM-contract en helft verwachte levensduur
50 jaar $\leq$ x < 75 jaar	0,90	Periode tussen helft verwachte levensduur en verwachte levensduur (1)
75 jaar $\leq$ x < 100 jaar	0,85	Periode tussen helft verwachte levensduur en verwachte levensduur (2)
$\geq$ 100 jaar	0,80	Periode na overschrijden verwachte levensduur

Opnieuw dient er vermeld te worden dat de grootte van de correctiefactor afhankelijk is van de ernst van de toestand in de praktijk. Verder onderzoek is nodig, inclusief het beoordelen van vele praktijkgevallen, om definitieve conclusies te kunnen trekken. Om deze redenen wordt ervoor gekozen om deze correctiefactor initieel gering te houden.

5.4.8 Formulering gezondheidsscore

Na de toevoeging van deze correctiefactor kan de uiteindelijke gezondheidsscore worden berekend. De eerste stap is het bepalen van de deelscore per constructiedeel. De deelscore wordt vermenigvuldigd met 25 om een score op 100 te bekomen. Hierdoor worden kommagetallen vermeden, wat de eenvoud van de methode en deelscore ten goede komt.

$$S_{deel} = 25 \cdot \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i \quad (10)$$

Met:

S_{deel} : de gezondheidsscore van een constructiedeel, op 100,

w_i : de wegingsfactor, van toepassing op de beschouwde beoordelingsparameter,

S_i : de score per beoordelingsparameter, gebaseerd op een vijfdelige schaal.

Vervolgens wordt de correctiefactor voor de leeftijd in rekening gebracht, om de algemene gezondheidsscore van de totale constructie te bepalen.

$$S_{tot} = C_{leeftijd} \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot S_{deel,i} \quad (11)$$

Met:

S_{tot} : de gezondheidsscore van de totale constructie, op 100,

f_i : de combinatiefactor, van toepassing op het beschouwde constructiedeel,

$S_{deel,i}$: de deelscore per constructiedeel, op 100,

$C_{leeftijd}$: correctiefactor voor de leeftijd van de constructie.

5.5 Interpretatie

Na het bepalen van een gezondheidsscore, is het van belang om hier de juiste interpretatie aan te geven zodat de nodige maatregelen getroffen kunnen worden. Ook hier wordt er gebruikgemaakt van een vijfdelige schaal. Ditmaal bestaat de beoordelingsschaal uit vijf intervallen van de gezondheidsscore, waaraan vervolgens een gezondheidsklasse en de nodige vervolgmaatregelen worden gekoppeld. Op deze manier ontstaat er een universeel begrip over de gezondheid van een bepaalde brug wat eenvoudiger te interpreteren is dan de eigenlijke gezondheidsscore, die meer gericht is op het bepalen van de onderhoudsurgentie. Tabel 32 biedt een overzicht van deze intervallen en maatregelen.

Tabel 32: Beoordelingsschaal gezondheidsscore en maatregelen

Gezondheidsscore	Klasse	Maatregel
≥ 80	A	Constructie in (quasi) nieuwstaat, geen actie vereist
$60 \leq x < 80$	B	Constructie voldoet ruimschoots, normale monitoring
$40 \leq x < 60$	C	Constructie voldoet, preventief onderhoud gewenst
$20 \leq x < 40$	D	Constructie voldoet niet, urgente onderhoudsnood
< 20	E	Constructie wordt als onveilig ervaren, uit dienst halen

Op basis van Tabel 32 kan aan de hand van de gezondheidsscore de klasse van een bepaalde constructie bepaald worden. Deze klasse varieert tussen A en E, waarbij A overeenkomt met een constructie die zich in een uitstekende staat bevindt. Hieronder volgt een uitgebreid overzicht van de verschillende klassen en de bijhorende maatregelen.

Een constructie met klasse A stemt overeen met een bouwwerk dat in uitstekende toestand verkeert. Deze klasse is van toepassing op constructies met een jonge leeftijd. Voor constructies in deze klasse is geen onmiddellijke actie vereist.

Wanneer een constructie klasse B krijgt toegewezen, is er sprake van een constructie die ruimschoots voldoet aan de eisen en zijn functie naar behoren kan uitvoeren. Deze klasse is voornamelijk van toepassing bij constructies die al enige jaren in dienst zijn of waarbij recent ingrijpend onderhoud werd uitgevoerd. De constructie wordt onderworpen aan normale monitoring.

Bij een klasse C is er sprake van een constructie die voldoet aan de eisen, zonder hierbij een grote reserve te hebben. Dit is voornamelijk van toepassing op constructies die al enige tijd gebruikt worden en waarbij geen ingrijpend onderhoud werd uitgevoerd in het recent verleden. Bij deze klasse is het van belang om in de nabije toekomst preventief onderhoud uit te voeren, om te vermijden dat de constructie in een lagere klasse terechtkomt.

Een constructie met klasse D stemt overeen met een constructie die zijn functie nog kan uitoefenen, maar waarbij de oorspronkelijke ontwerpeisen (gedeeltelijk) niet meer gehaald worden. Deze klasse is van toepassing bij constructies die geen onderhoud hebben ondergaan in de afgelopen jaren of waarbij er een significante afname werd vastgesteld. Dit type constructie heeft een urgente nood aan ingrijpend onderhoud.

In het meest extreme geval heeft een bouwwerk klasse E. Dit betekent dat de constructie zijn functie niet meer kan uitoefenen en een gevoelsmatig onveilige situatie teweegbrengt voor de gebruikers. Bij dit type constructies is het noodzakelijk om deze af te sluiten en zo snel mogelijk ingrijpend onderhoud of mogelijks een (gedeeltelijke) vervanging uit te voeren.

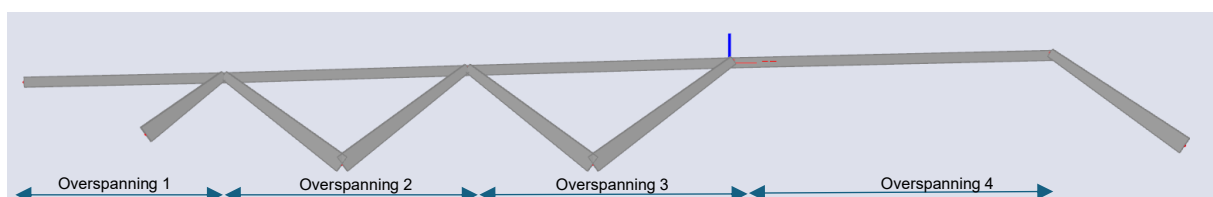
Vervolgens dient er opgemerkt te worden dat ook de onderliggende beoordelingsparameters op regelmatige basis gecontroleerd dienen te worden. Hierdoor kan er vroegtijdig worden vastgesteld welke factor een oorzaak is voor de (toekomstige) lage gezondheidsscore. Dit is een aanvullend hulpmiddel om de onderhoudsnood en onderhoudsvolgorde te bepalen. Concreet wil dit zeggen dat het relevant is om de gezondheidsscore in bepaalde gevallen (deels) te ontleden en niet louter voort te gaan op het eindcijfer van de gezondheidsscore.

5.6 Toepassing

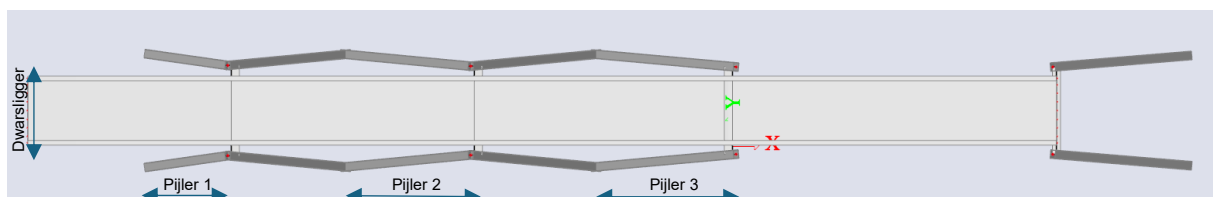
Dit hoofdstuk werkt een aantal toepassingen uit van de methode voor het bepalen van de gezondheidsscore. Allereerst wordt de methode toegepast op het eindige-elementenmodel voor verschillende fasen gedurende de levensduur van de brug, waarbij er stapsgewijze degradatie wordt aangebracht volgens het corrosiemodel. Ten tweede wordt de huidige situatie van de brug geanalyseerd. Dit gebeurt op basis van de bevindingen vastgesteld tijdens het eerste plaatsbezoek. De doorbuigings- en trillingsresultaten zijn hierbij afkomstig uit het eindige-elementenmodel met een gesimuleerde degradatie volgens de huidige leeftijd van de brug (13 jaar).

5.6.1 Mijlpalen levensduur brug

In eerste instantie wordt de methode voor de bepaling van de gezondheidsscore van een stalen brug, die besproken werd in de voorgaande paragrafen, geïllustreerd aan de hand van de onderzoekslocatie die besproken werd in Hoofdstuk 3 (enkel het rechterdeel). Samengevat is deze onderzoekslocatie een stalen brug, bestaande uit vier brugdelen. In dit voorbeeld wordt de brug opgedeeld in drie typen constructiedelen, namelijk de langsliggers, dwarsliggers en pijlers. De analyse gebeurt voor de verschillende mijlpalen in het leven van de brug (0, 30, 50 en 100 jaar). Figuur 47 en Figuur 48 geven een overzicht van de beschouwde brug via respectievelijk een zij- en bovenaanzicht.



Figuur 47: Zijaanzicht beschouwde brug



Figuur 48: Bovenaanzicht beschouwde brug

De benodigde gegevens worden samengevat in Tabel 33. In dit voorbeeld wordt de brug in nieuwstaat verondersteld. De doorsneden van het model zijn bijgevolg niet verminderd, aangezien er geen corrosie verondersteld wordt vlak na de bouw van de brug. Indien een brug met een oudere leeftijd wordt beschouwd, dienen de doorsneden van de elementen te worden verminderd met de verwachte corrosie, om degradatie te simuleren. Verder zijn de wegings- en combinatiefactoren bepaald door middel van het eindige-elementenmodel, zoals aangetoond in secties 5.4.5 en 5.4.6. De pijlers werden opgedeeld in groepen met een vergelijkbare lengte.

Tabel 33: Gegevens beschouwde brug

G E G E V E N S	Leeftijd	0 jaar
	Wegingsfactor doorbuiging	54 %
	Wegingsfactor trillingen	30 %
	Wegingsfactor corrosie	6 %
	Wegingsfactor inspectie	10 %
	Combinatiefactor langsliggers	60 %
	Combinatiefactor dwarsliggers	26 %
	Combinatiefactor pijlers	14 %
	Overspanning 1	13.8 m
	Overspanning 2	16.5 m
	Overspanning 3	17.5 m
	Overspanning 4	22 m
	Dwarsliggers	4.4 m
	Lengte pijler 1	6.7 m
	Lengte pijler 2	10 m
	Lengte pijler 3	11.8 m

In eerste instantie worden de doorbuigingen geëvalueerd. Dit gebeurt per constructiedeel, waarbij de minimale score doorslaggevend is. Op deze manier verkrijgt men een score tussen 0 en 4 voor de drie categorieën constructiedelen. De waarden voor de doorbuigingen zijn afkomstig uit het eindige-elementenmodel. In dit geval zijn alle constructiedelen nog in perfecte staat, waardoor ze allemaal een score van 4 behalen. Tabel 34 geeft een overzicht van de meetwaarde en score per constructiedeel.

Tabel 34: Doorbuiging beschouwde brug

D O O R B U I G I N G	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	8.2 mm (L/1683)	4
	Overspanning 2	Langsligger	8.6 mm (L/1919)	4
	Overspanning 3	Langsligger	8.8 mm (L/1989)	4
	Overspanning 4	Langsligger	18 mm (L/1222)	4
	Finale score doorbuiging	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	2.8 mm (L/1571)	4
	Finale score doorbuiging	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0.8 mm (L/8375)	4
	Pijler 2	Pijler	3 mm (L/3333)	4
	Pijler 3	Pijler	2.6 mm (L/4538)	4
	Finale score doorbuiging	Pijler	Minimale waarde:	4

In de volgende stap worden de trillingen van de structuur beoordeeld via de 'Dynamics – detailed'-functie in SCIA Engineer. De beoordeling gebeurt op gelijkaardige wijze zoals bij de doorbuiging, waarbij voor elk constructiedeel de trillingen worden nagegaan en worden getoetst door middel van de eerder opgestelde beoordelingsschaal. Tabel 35 toont de resultaten voor de trillingen per constructiedeel, alsook de overeenkomstige scores.

Tabel 35: Trillingen beschouwde brug

T R I L L I N G E N	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde		Score
	Overspanning 1	Langsligger	0.07	m/s ²	4
	Overspanning 2	Langsligger	0.073	m/s ²	4
	Overspanning 3	Langsligger	0.033	m/s ²	4
	Overspanning 4	Langsligger	0.534	m/s ²	4
	Finale score trillingen	Langsligger	Minimale waarde:		4
	Dwarssliggers	Dwarsligger	0.489	m/s ²	4
	Finale score trillingen	Dwarsligger	Minimale waarde:		4
	Pijler 1	Pijler	0.003	m/s ²	4
	Pijler 2	Pijler	0.026	m/s ²	4
	Pijler 3	Pijler	0.015	m/s ²	4
	Finale score trillingen	Pijler	Minimale waarde:		4

De volgende controle bestaat uit het toetsen van de effectieve corrosie met de verwachte corrosie, bepaald door middel van Formule 3. In dit voorbeeld wordt er geen corrosie verondersteld omwille van de leeftijd van 0 jaar, waardoor overal de maximale score behaald wordt. Tabel 36 geeft een overzicht van de bepaling van de corrosie.

Tabel 36: Corrosie beschouwde brug

C O R R O S I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde		Score
	Overspanning 1	Langsligger	0	µm	4
	Overspanning 2	Langsligger	0	µm	4
	Overspanning 3	Langsligger	0	µm	4
	Overspanning 4	Langsligger	0	µm	4
	Finale score corrosie	Langsligger	Minimale waarde:		4
	Dwarssliggers	Dwarsligger	0	µm	4
	Finale score corrosie	Dwarsligger	Minimale waarde:		4
	Pijler 1	Pijler	0	µm	4
	Pijler 2	Pijler	0	µm	4
	Pijler 3	Pijler	0	µm	4
	Finale score corrosie	Pijler	Minimale waarde:		4

In de laatste fase worden de bevindingen van de visuele inspectie in rekening gebracht. Deze bevindingen kunnen niet bekomen worden uit het eindige-elementenmodel. Vandaar wordt er, ter illustratie, een aanname gedaan om de volledige werking van de scoringsmethodiek aan te tonen. In nieuwstaat wordt er verondersteld dat er zich geen problemen voordoen bij de visuele inspectie en dat bijgevolg overal de maximale score wordt behaald. Tabel 37 toont de resultaten van de visuele inspectie.

Tabel 37: Inspectie beschouwde brug

I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	i	4
	Overspanning 2	Langsligger	i	4
	Overspanning 3	Langsligger	i	4
	Overspanning 4	Langsligger	i	4
	Finale score inspectie	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarssliggers	Dwarsligger	i	4
	Finale score inspectie	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	i	4
	Pijler 2	Pijler	i	4
	Pijler 3	Pijler	i	4
	Finale score inspecties	Pijler	Minimale waarde:	4

Na de bepaling van de scores voor afzonderlijke parameters per constructiedeel, wordt de combinatie gemaakt om tot een deelscore op 100 per constructiedeel te komen. Dit gebeurt op basis van de wegingsfactoren die het belang van elke parameter in rekening brengen. Deze deelscores worden vervolgens gecombineerd door middel van de combinatiefactoren. Dit tussenresultaat wordt tenslotte gecorrigeerd met een correctiefactor die de leeftijd van de brug in rekening brengt. In dit geval is deze correctiefactor gelijk aan 1, gezien de leeftijd van 0 jaar. Uiteindelijk bekomt men in dit geval een finale gezondheidsscore van 100, wat overeenkomt met een gezondheidsklasse A. Er is bijgevolg geen verdere actie vereist en de brug mag als een brug in nieuwstaat verondersteld worden. Tabel 38 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 38: Resultaten beschouwde brug

R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	100
	Deelscore dwarssliggers	100
	Deelscore pijlers	100
	Gezondheidsscore (voor correctie)	100
	Correctiefactor leeftijd	1
	Gezondheidsscore (na correctie)	100
	Gezondheidsklasse	A
	Beschrijving + Maatregel	
	Constructie in nieuwstaat, geen verdere actie vereist	

Naast een voorbeeldberekening voor een brug na 0 jaar, werden er gelijkaardige voorbeeldberekeningen uitgevoerd voor een brug na 30, 50 en 100 jaar. De volledige berekeningen voor al deze gevallen zijn terug te vinden in Bijlage C. Voor de volledigheid wordt er een samenvatting van de resultaten gegeven in Tabel 39.

Tabel 39: Samenvatting resultaten

Leeftijd [jaar]	Gezondheidsscore	Gezondheidsklasse
0	100	A
30	84	A
50	72	B
100	39	D

5.6.2 Analyse huidige situatie

In tweede instantie wordt deze analyse uitgevoerd voor de onderzoekslocatie in de huidige situatie, met een leeftijd van 13 jaar. Hierbij gebeuren de analyses voor doorbuigingen, trillingen en corrosie op dezelfde manier als bij de voorgaande situaties in sectie 5.6.1. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in Bijlage D. De resultaten uit de visuele inspectie worden in detail geïllustreerd in Tabel 40. Ditmaal komen de resultaten voort uit de eerder uitgevoerde visuele inspectie uit sectie 3.4.

Tabel 40: Resultaten inspectie huidige situatie

I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	i	4
	Overspanning 2	Langsligger	i	4
	Overspanning 3	Langsligger	ii	3
	Overspanning 4	Langsligger	ii	3
	Finale score inspectie	Langsligger	Minimale waarde:	3
	Dwarssliggers	Dwarsligger	iii	2
	Finale score inspectie	Dwarsligger	Minimale waarde:	2
	Pijler 1	Pijler	i	4
	Pijler 2	Pijler	i	4
	Pijler 3	Pijler	i	4
	Finale score inspecties	Pijler	Minimale waarde:	4

Uit deze resultaten concludeert men dat de langsliggers van twee van de vier overspanningen niet de maximumscore van 4 behalen. Dit resultaat is te verklaren door middel van de waargenomen corrosie ter hoogte van de lasnaden van deze langsliggers. Deze corrosie is echter in beperkte mate aanwezig, waardoor er een score van 3 wordt toegekend. Verder is er ook op de dwarsliggers corrosie vast te stellen. Ditmaal is deze corrosie over een grotere oppervlakte aanwezig en komt deze voort uit vochtrophoping. Om deze redenen behalen de dwarsliggers een lagere score van 2. Tenslotte wordt er op de pijlers geen significante schade vastgesteld, waardoor deze de maximale score van 4 behalen. Tabel 41 geeft een overzicht van de resultaten voor de huidige situatie van de brug, waarbij er een gezondheidsscore van 91 wordt bepaald. Dit komt overeen met een gezondheidsklasse A, waardoor er geen verdere actie vereist is en de brug als nieuw beschouwd kan worden.

Tabel 41: Resultaten huidige situatie

R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	89
	Deelscore dwarsliggers	94
	Deelscore pijlers	99
	Gezondheidsscore (voor correctie)	91
	Correctiefactor leeftijd	1
	Gezondheidsscore (na correctie)	91
	Gezondheidsklasse	A
	Beschrijving + Maatregel	
	Constructie in nieuwstaat, geen verdere actie vereist	

6 IN DE PRAKTIJK

6.1 Uitgangspunten

Dit hoofdstuk heeft als doel de belangrijkste bevindingen met betrekking tot het vooronderzoek naar eventuele on-site experimenten toe te lichten. Dit hoofdstuk vormt daarom een richtlijn voor toekomstig onderzoek, waarbij de methodiek van de gezondheidsscore wordt toegepast op werkelijke meetdata. Hieruit zal kunnen worden geconcludeerd of de resultaten uit het eindige-elementenmodel een al dan niet realistische weergave zijn van de realiteit. Daarnaast kunnen mogelijke aanvullingen op of beperkingen van de scoringsmethodiek worden geïdentificeerd.

Concreet worden in dit hoofdstuk geschikte sensoren besproken om de meest voorkomende schade fenomenen te detecteren. Vervolgens wordt een eerste voorstel van een sensorsysteem gedaan, waarbij voorafgaand onderzocht wordt hoe de verzamelde data kan worden opgeslagen en verstuurd. Tot slot biedt dit hoofdstuk een overzicht van enkele praktische bevindingen die tijdens vervolgonderzoek in overweging genomen moeten worden, aangevuld met een voorbeeld voor de ontwikkeling van een real-time visualisatieplatform voor de gezondheidsscore.

6.2 Sensorconfiguratie

6.2.1 Introductie tot relevante sensoren voor SHM van stalen bruggen

De verschillende schade fenomenen die zich in stalen constructies kunnen voordoen, vereisen het gebruik van verschillende sensortypes om alle verschijnselen te kunnen monitoren. Dit hoofdstuk biedt een overzicht van de verschillende sensoren die kunnen worden ingezet om schade fenomenen bij stalen constructies te kunnen detecteren. Voor elk type sensor wordt een beschrijving gegeven van de werking en de specifieke schade fenomenen die ermee kunnen worden waargenomen. Daarnaast worden de sensorlocaties bepaald die op basis van een eerste inzicht als meest efficiënt worden beschouwd, zodat de constructie optimaal kan worden gemonitord. Echter kunnen mogelijks meerdere sensoren geschikt zijn om éénzelfde schade fenomeen te monitoren. De uiteindelijke keuze wordt bepaald door het gebruiksgemak, compatibiliteit met beschikbare data-acquisitiesoftware en kostprijs. Bij de keuze van het type sensoren wordt gestreefd naar een configuratie waarin de constructie haar normale functie kan blijven uitoefenen en het comfort van de gebruikers niet in het gedrang komt. Daarnaast is het, afhankelijk van de opdrachtgever, vaak van belang dat de sensoren op een niet-destructieve wijze worden aangebracht. Dit betekent dat de sensoren niet mogen worden bevestigd met behulp van indringende machines of schurende handelingen die de beschermende coatings zouden aantasten.

Dit overzicht vormt de basis voor de selectie van een finale sensorconfiguratie die bijdraagt aan het tijdig signaleren van risico's en het bevorderen van de structurele integriteit van de te monitoren stalen brug.

6.2.1.1 Accelerometers

Accelerometers, ook wel versnellingsmeters genoemd, zijn sensoren die fundamenteel zijn voor het meten van trillingen en versnellingen, in één of meerdere richtingen. Op deze manier kunnen wijzigingen in versnellingen van bepaalde structurele onderdelen of verschuivingen van (eigen)frequenties van de constructie worden waargenomen. Het doel is om veranderingen in de dynamische respons van de brug te monitoren. Dit type sensoren wordt meestal geplaatst op langs- en dwarsliggers, in het midden van hun overspanning, of op locaties waar belastingen direct worden overgedragen. Naast het monitoren van de structurele kwaliteit, zijn trillingen belangrijk voor het comfort van de gebruikers. Aangezien dit project een fiets- en voetgangersbrug omvat, dient er extra aandacht te worden besteed aan het comfort van de gebruiker. Een sensor die binnen dit onderzoek als mogelijke oplossing naar voren kwam, en geschikt lijkt voor deze toepassing is de ROCK Acceleration van Syscom Instruments (zie Figuur 49) [32]. Deze draadloze versnellingsmeter is uitgerust met een interne SIM-kaart, waardoor het gebruik van een gateway, die fungeert als tussenstation tussen het sensornetwerk en een centrale digitale opslag (cloud), overbodig is. Daarnaast maakt deze sensor gebruik van een inwendige batterij, eventueel aangevuld met een externe energiebron in de vorm van een zonnepaneel. Bijgevolg is er geen externe voeding of netstroom vereist. De batterijduur varieert tussen 14 dagen en meer dan een jaar, afhankelijk van de gekozen meetintervallen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een continue meetfrequentie en een periodieke meetfrequentie. Verder is dit een triaxiale sensor, waardoor de trillingen zowel in de verticale als beide horizontale richtingen kunnen worden gemeten. Door het grote temperatuurbereik waarin deze sensor kan functioneren, is deze uiterst geschikt voor toepassingen die zich in de buitenomgeving situeren.



Figuur 49: ROCK Acceleration - accelerometer [32]

6.2.1.2 Rekstrookjes

Rekstrookjes zijn sensoren die op een eenvoudige manier (lineaire) vervormingen van constructiedelen monitoren. Het is cruciaal om deze sensoren te plaatsen op locaties waar onvoorziene vervormingen en spanningen kunnen leiden tot ongewenste situaties. Belangrijke te monitoren locaties binnen deze casus zijn:

- lasnaden,
- de trekkabels in de boogbrug met trekband,
- boven- en onderflenzen van de liggers.

Voor deze toepassing is dit type sensor minder geschikt, gezien de kwetsbaarheid en de nood om de reksensoren te voorzien van externe voeding. Hiervoor dient er een complex netwerk van bedradingen en voedingen opgezet te worden, waardoor het comfort en het

veiligheidsgevoel van gebruikers in gedrang komt. Een ander nadeel is het fragiele karakter van deze sensoren, waardoor ze niet geschikt zijn voor permanente toepassing in een buitenomgeving.

6.2.1.3 Corrosiesensoren

Corrosiesensoren monitoren de evolutie van corrosie doorheen de tijd. Deze sensoren zijn doorgaans gebaseerd op het meten van de aanwezigheid van vocht, chloride-ionen of veranderingen in elektrische weerstand. Deze fenomenen duiden namelijk op roestvorming. Volgens [33] en [34] bestaan hiervoor volgende technieken:

- elektrische weerstandssondes,
- elektrochemische monitoring,
- corrosiepotentiaalmetingen,
- lineaire polarisati weerstand,
- elektrochemische ruis,
- waterstofsondes,
- ultrasone metingen.

De ultrasone meettechniek wordt gezien als één van de meest gebruikte, alsook meest betrouwbare, niet-destructieve technieken. Deze techniek is namelijk gebaseerd op het sturen van hoogfrequente geluidsgolven die zich vervolgens verplaatsen doorheen het materiaal. De snelheid waarmee deze geluidsgolven zich vervolgens door het materiaal voortplanten is een functie van de elasticiteitsmodulus en de dichtheid van het materiaal. Op basis daarvan wordt het dikteverlies door corrosie gegeven als functie van de voortplantingssnelheid en de frequentie. De wanddikte wordt vervolgens afgeleid uit het tijdsverschil tussen verschillende golfpulsen [34].

Figuur 50 toont een dergelijke corrosiesensor, gebaseerd op deze ultrasone meettechniek. De *Rosemount™ Wireless Permasense ET410* zendt standaard elke 12 uur een impuls uit, waarmee de wanddikte wordt bepaald. Dit is ruim voldoende aangezien corrosie zich traag ontwikkelt doorheen de tijd. Daarnaast is deze sensor geschikt om wanddiktes van 4-50 mm te monitoren, wat specifiek voor deze casus, waarbij de brug samengesteld is uit 20-30 mm dikke staalplaten, voldoende is. De batterijduur van 9 jaar, het brede temperatuursbereik en de IP67-waterdichtheid lijken van de ET410 een geschikte corrosiesensor te maken voor deze casus.



Figuur 50: Rosemount™ Wireless Permasense ET410 - Corrosion and Erosion Monitoring System [35]

Dit type sensoren wordt voornamelijk geplaatst op plekken die gevoelig zijn voor vochtophoping of waar corrosie verwacht wordt als eerst op te treden, zoals bij verbindingen of in holtes van de structuur. Corrosie dient hoofdzakelijk opgespoord te worden door middel van visuele inspecties, aangezien het niet realistisch is om alle mogelijke corrosiegevoelige plekken te voorzien van een sensor. Dit zou leiden tot een situatie die financieel en praktisch gezien niet realiseerbaar is. Indien er bij een specifiek project in het verleden, op basis van visuele inspecties, werd vastgesteld dat corrosie zich op een vaste plaats situeert, is het aangewezen om deze corrosie eerst te behandelen. Daarnaast dient een eventuele oorzaak te worden opgespoord en verholpen, waarna de locatie permanent van een sensor kan worden voorzien. Op die manier kan de waargenomen corrosie vanop afstand gemonitord worden, waardoor visuele inspecties minder frequent nodig zijn.

6.2.1.4 Temperatuursensoren

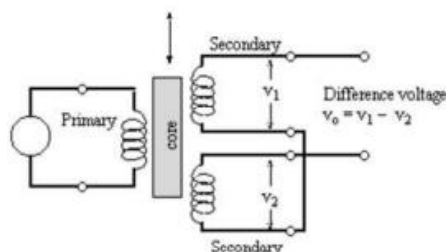
Voor stalen constructies in een buitenomgeving wordt aanbevolen om temperatuurschommelingen nauwkeurig te monitoren, aangezien deze de staalspanning kunnen verhogen en de materiaalvermoeïng kunnen beïnvloeden, met name bij thermische uitzettingen en krimp.

Echter, volgens [35] is het aanbevolen om primair de contacttemperatuur van het materiaal continu te monitoren in plaats van de omgevingstemperatuur. Op deze manier kan de data uit andere sensormetingen rechtstreeks worden geïnterpreteerd, waardoor onderscheid kan worden gemaakt tussen variaties als gevolg van temperatuursveranderingen en structurele wijzigingen. Contacttemperatuursensoren worden geplaatst op blootgestelde delen van de brug die worden beïnvloed door zowel zonlicht als schaduw, daar waar de meest significante temperatuurschommelingen worden verwacht.

Vele sensoren zijn tegenwoordig uitgerust met een interne contacttemperatuursensor, waardoor aanvullende dataverwerking niet vereist is voor de interpretatie van de sensormetingen. Dit principe wordt bijvoorbeeld toegepast bij de eerdergenoemde accelerometer [36]. Het is daarom wenselijk om sensoren te selecteren die over deze ingebouwde functionaliteit beschikken.

6.2.1.5 Lineaire Variabele Differentiaal Transformatoren (LVDT's)

Verder toont [37] aan dat voor het meten van doorbuigingen, Lineaire Variabele Differentiaal Transformatoren, beter bekend als LVDT's, één van de meest preferabele meettechnieken zijn. Een LVDT werkt volgens het principe van wederzijdse inductie, waarbij een verandering in de uitgangsspanning wordt veroorzaakt door variaties in de wederzijdse inductie tussen de primaire wikkeling en de twee secundaire wikkelingen, die optreden wanneer de kern zich verplaatst als gevolg van een externe verplaatsing. Dit principe wordt geïllustreerd in Figuur 51.



Figuur 51: Werkingsprincipe LVDT [37]

Deze sensoren worden geplaatst op delen van de brug waar de verwachte doorbuigingen het grootst zijn, zoals op het midden van grote overspanningen waar doorbuiging door (eigen) gewicht, verkeersbelasting of weersinvloeden het grootst is.

6.2.2 Sensorselectie

Op basis van de hierboven geïdentificeerde relevante sensoren en de reeds beschikbare gesimuleerde data uit het eindige-elementenmodel wordt een eerste selectie van sensoren samengesteld. Aangezien uitsluitend gegevens over versnellingen en doorbuiging beschikbaar zijn, wordt bij de samenstelling van het initiële sensorsysteem de nadruk hierop gelegd.

Volgende sensoroplossingen zijn het meest aangewezen binnen deze casus:

- accelerometers,
- LVDT's,
- corrosiesensoren,
- (contact)temperatuursensoren.

Zoals te zien, wordt het sensorsysteem aanvankelijk bewust beperkt gehouden in omvang. Dit om zowel de complexiteit van de dataverwerking als de kosten van de implementatie te beperken. Op termijn kan het sensorsysteem uiteraard uitgebreid worden, afhankelijk van het budget en verder onderzoek naar relevante sensoren. Anderzijds is deze initiële selectie uitgebreid genoeg om voldoende invalshoeken te bieden voor het beoordelen van de structurele kwaliteit van de brug. Bovendien werd deze keuze beïnvloed door de noodzaak sensoren te vermijden die gevoelig zijn voor schade ten gevolge van manipulatie door omstaanders en weersomstandigheden.

Een voorstel betreffende de locaties en methoden voor de bevestiging van deze sensoren in vervolgonderzoek wordt besproken in de volgende alinea's.

6.2.3 Keuze data-acquisitie en -transmissie

Het samenstellen van een sensorsysteem omvat niet alleen de selectie van geschikte sensoren voor het monitoren van specifieke schadefenomenen. Om de gegevens die door deze sensoren worden gegenereerd om te zetten in digitale, verwerkbare data en deze op afstand te kunnen analyseren, is een doeltreffend systeem voor data-acquisitie en -transmissie vereist.

In dit hoofdstuk wordt de keuze van het type data-acquisitie en -transmissie binnen dit onderzoek besproken. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen twee opties. De eerste optie is het gebruik van een *Internet of Things* (IoT)-gebaseerde data-acquisitie en -transmissie. Concreet bestaat dergelijk systeem uit volgende componenten:

- sensoren,
- datalogger,
- gateway,
- cloudopslag,
- laptop + software.

De sensoren meten de fysieke parameters (versnellingen, doorbuiging, etc.). Deze parameters worden vervolgens omgezet in analoge of digitale gegevens, die worden doorgegeven aan de datalogger. De datalogger verzamelt aldus de ruwe data van de sensoren, slaat deze tijdelijk op en kan de data indien nodig voorbewerken. De datalogger verstuurt vervolgens de data via een bekabelde of draadloze verbinding naar de gateway, waarop deze vervolgens de ontvangen data via mobiele netwerken (4G/5G) naar de cloud verstuurt. Tot slot kan de data via de daarvoor voorziene software geraadpleegd worden.

Dergelijke methode van data-acquisitie en -transmissie heeft als voornaamste voordeel dat de data ten alle tijde op afstand raadpleegbaar is. Zo is het omwille van de automatische en draadloze dataoverdracht mogelijk om de structuur continu en in real-time te monitoren, zonder dat hiervoor manuele plaatsbezoeken of inspecties nodig zijn.

Deze oplossing heeft echter ook zijn nadelen. Zo is het opzetten van dergelijk systeem kostelijk omwille van de bijkomende componenten, de gateway en cloud, die bij een oplossing van dataverzameling on-site niet nodig zijn. Ook zal het gebruik van mobiele netwerken om de data te versturen leiden tot terugkerende abonnementskosten. Daarnaast kunnen connectiviteitsproblemen optreden doordat het merendeel van het sensorsysteem onder de brug zal worden bevestigd, met als doel het vermijden van een gevoel van onveiligheid bij gebruikers. Dit vormt een potentieel kritisch aandachtspunt, aangezien dergelijke connectiviteitsproblemen kunnen resulteren in dataverlies en de beperking om gegevens in real-time te raadplegen. Tot slot is er de complexiteit van de implementatie van deze oplossing. Een correcte werking van dit systeem vereist, zeker bij opzet, de hulp van een ervaringsdeskundige.

Een alternatieve oplossing bestaat uit het verzamelen en opslagen van de data on-site. Dergelijk systeem bestaat uit een beperkt aantal componenten, namelijk:

- sensoren,
- datalogger (incl. interne opslag),
- laptop + software,
- al dan niet met externe opslag.

De initiële fase van deze oplossing vertoont overeenkomsten met die van de IoT-gebaseerde methode. Echter, in plaats van de verzamelde data naar een gateway te verzenden, slaat de datalogger deze intern op. De data wordt vervolgens on-site opgehaald door de datalogger rechtstreeks te koppelen aan een laptop. Indien gewenst kan de verkregen data nadien worden overgezet naar een externe opslag.

Hoewel deze oplossing op het eerste zicht niet de meest innovatieve keuze lijkt, biedt zij toch enkele voordelen ten opzichte van voorgaande oplossing. Zo zijn de lagere aanschaffkosten en het vermijden van de terugkerende abonnementskosten een aanzienlijk voordeel op de lange termijn. Ook is het opzetten van het systeem in zijn totaliteit eenvoudiger. Daarnaast stelt [38] dat draadloze netwerken minder energie verbruiken wanneer ze de data lokaal opslaan in plaats van de gegevens te verzenden. Tot slot is er geen risico op connectiviteitsproblemen, waardoor dataverlies wordt voorkomen.

Toch brengt deze oplossing ook enkele uitdagingen met zich mee. Zo is het voordeel van continue en real-time monitoring niet meer van toepassing, waardoor er de tijdsintensieve noodzaak is om op periodieke wijze aan on-site data-ophaling te doen. Daarnaast is het ogenblikkelijk waarnemen van plotse afnames in de structurele respons niet meer mogelijk. Een bijkomend nadeel is dat bij eventueel vandalisme niet alleen het sensorsysteem zijn functionaliteit verliest, maar hoogstwaarschijnlijk ook de reeds verzamelde data verloren gaat.

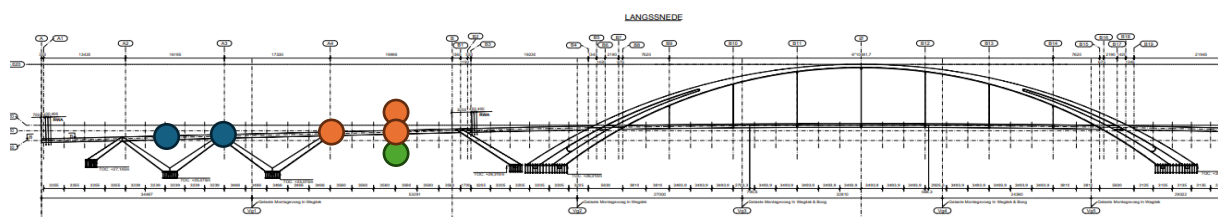
De keuze voor de meest geschikte data-acquisitie en -transmissieoplossing is projectafhankelijk. Zo is een real-time, IoT-gebaseerde, monitoring geschikter voor grootschalige monitoringsprojecten waarin het budget een minder relevante rol speelt. Voor de kleinere, afgelegen projecten, waar de toegankelijkheid tot mobiele netwerken niet ten alle tijden verzekerd is en budgetten doorgaans een bepalende rol spelen, lijkt het opslagen van de data on-site een efficiëntere oplossing.

6.2.4 Meetopstelling

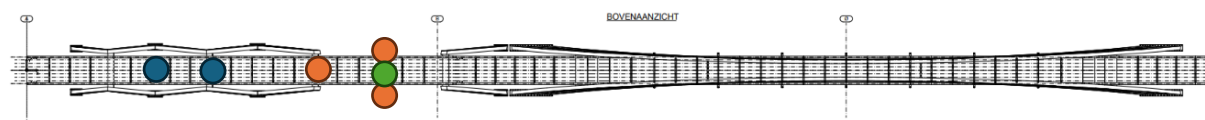
Deze paragraaf geeft een richtlijn, naar eerste inschatting, voor een geschikte meetopstelling die toegepast kan worden in verder onderzoek. Het is hierbij belangrijk te vermelden dat in dit voorstel zowel rekening gehouden is met budgettaire als praktische beperkingen.

Na het eerste plaatsbezoek kon worden vastgesteld welke locaties op een veilige en relatief eenvoudige manier toegankelijk waren. Bijkomend konden (beginnende) schadefenomenen vastgesteld worden waardoor een eerste idee werd verkregen van de aan te brengen sensoren. Vervolgens werd er aan de hand van de ter beschikking gestelde as-built-plannen gekeken naar mogelijke (bijkomende) kritieke locaties van de constructie. Tot slot werd er aan de hand van de opgedane kennis een eerste selectie sensoren gemaakt, zoals eerder vermeld in sectie 6.2.2.

Op basis van het reeds in de literatuurstudie vastgestelde stappenplan voor het samenstellen van een sensorsysteem is getracht een eerste meetopstelling voor te stellen, zoals geïllustreerd in Figuur 52 en Figuur 53.



Figuur 52: Voorstel meetopstelling vervolgonderzoek (zijaanzicht)



● LVDT ● Corrosiesensor ● Accelerometer

Figuur 53: Voorstel meetopstelling vervolgonderzoek (bovenaanzicht)

De voorgestelde meetopstelling uit Figuur 52 en Figuur 53 heeft als doel gebruikt te worden als basis voor eventueel vervolgonderzoek. Een uitgebreide toelichting van hoe deze meetopstelling tot stand is gekomen, gebaseerd op het in de literatuurstudie vastgestelde stappenplan, wordt hieronder uiteengezet.

De eerste stap in het proces is het definiëren van de algemene sensorconfiguratie, waarbij wordt vastgesteld welke sensortypes worden gebruikt, het benodigde aantal sensoren per type en hun locaties. De bepaling van de sensorlocaties is gebaseerd op de gebieden waar het model de meest kritische waarden vertoonde.

Voor doorbuigingsmetingen blijken de langsliggers over de overspanning boven de afrit van de autosnelweg de zwaarst belaste zones te zijn. Dit valt vast te stellen uit de eerder bepaalde combinatiefactoren; zie sectie 5.4.6. Daarnaast is het interessant om ook de zwaarst belaste dwarsligger, in het midden van zijn overspanning, te voorzien van een nauwkeurige doorbuigingsmeting.

Wat betreft de trillingsmetingen zijn de maximale, gesimuleerde waarden eveneens waargenomen in het midden van de overspanning, maar ditmaal op het wegdek zelf. Daarom lijkt het meest geschikte meetpunt zich te bevinden aan de onderzijde van het brugdek, waar een accelerometer kan worden geplaatst.

Op basis van het plaatsbezoek werd, zoals vermeld in sectie 3.4, reeds enige vorm van corrosie vastgesteld aan de onderflenzen van de dwars- en langsliggers, specifiek ter hoogte van de lasverbindingen. De onderzijde van de eerder aangetaste liggers lijkt na behandeling bij voorkeur te worden voorzien van een corrosiesensor, om verdere degradatie tijdig te detecteren.

Op basis van bovenstaande analyse werd de aanbevolen sensorconfiguratie uit Figuur 52 samengesteld:

- accelerometer(s),
 - 1 sensor geplaatst aan de onderzijde van het brugdek;
- LVDT(s),
 - 2 sensoren gepositioneerd aan weerszijden van de grootste overspanning, op de langsliggers;
 - 1 sensor geïnstalleerd op de zwaarst belaste dwarsligger;
- corrosiesensor(en),
 - Minimaal 2 sensoren, geplaatst aan de onderzijde van eerder aangetaste zones.

Vervolgens kan er op basis van de reeds eerder besproken gegevensacquisitie- en transmissiesystemen een keuze gemaakt worden voor de meest wenselijke optie in dit scenario.

Gezien de budgettaire beperkingen en de ietwat afgelegen ligging van de brug, waardoor aansluiting op het elektriciteitsnet niet mogelijk is, lijkt de meest geschikte keuze een on-site gegevensacquisitie- en opslagsysteem.

Daarnaast spelen energievereisten ook een cruciale rol in de keuze van voorgaande sensoren, alsook het gegevensacquisitie- en opslagsysteem. Ook hier speelt de locatie een rol, en is de meest gebruikelijke keuze in deze situatie gebruik te maken van een sensorsysteem dat volledig gebaseerd is op componenten voorzien van interne voedingen. Wanneer de data vervolgens on-site wordt opgehaald, kan, indien wordt vastgesteld dat bepaalde sensoren zijn uitgevallen, de interne voeding worden vervangen.

Het correct kiezen van de gewenste meetintervallen speelt een cruciale rol in het beperken en opschonen van de data die voortkomt uit de metingen. Daarnaast is ook het beperken van de energieconsumptie van de interne batterijen een bepalende factor in deze keuze. De keuze voor een continue of periodieke meting is afhankelijk van het sensortype, en welke schadefenomenen men hiermee wil monitoren. Voor accelerometers is het doorgaans relevant om continue metingen uit te voeren, of met zeer korte intervallen als enige energiebesparing gewenst is. Dit komt doordat trillingen en schokken zeer abrupt kunnen optreden, bijvoorbeeld door windstoten tijdens extreme weersomstandigheden of grote groepen snel passerende voetgangers. Ook voor het meten van doorbuigingen is het wenselijk om een gelijkaardige methodiek te hanteren. Structurele vervormingen evolueren doorgaans traag, maar kunnen bij

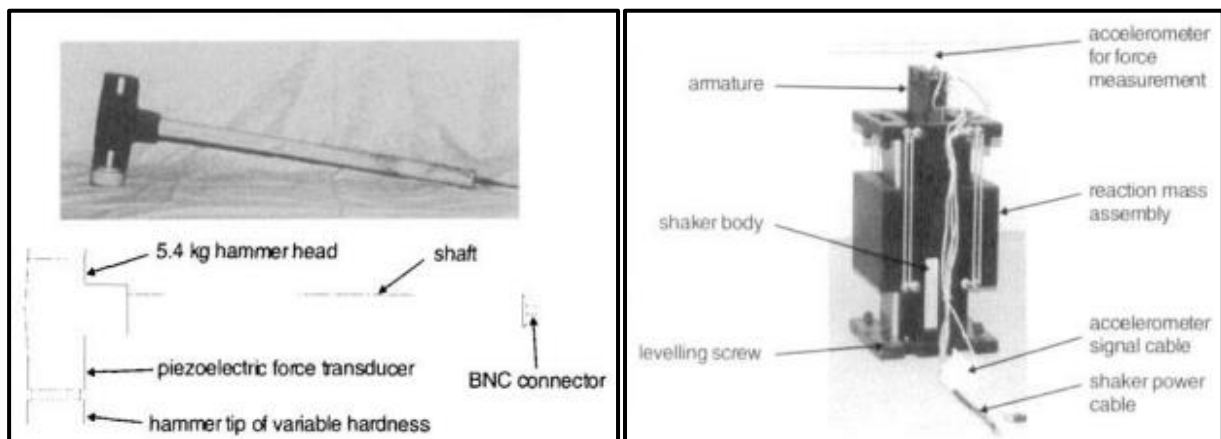
zware (over)belasting plots toenemen. Dit maakt het risico reëel dat kortstondige overschrijdingen van de toegelaten doorbuiging onopgemerkt blijven wanneer enkel periodiek wordt gemeten. Indien men echter vooral geïnteresseerd is in de uiteindelijke doorbuigingswaarde onder (quasi) statische omstandigheden, dus wanneer de brug nauwelijks of niet in beweging is, kunnen periodieke metingen wel volstaan. Zulke (quasi) statische toestanden kunnen worden afgeleid uit het ontbreken van versnellingen in de data van de accelerometers.

De benodigde geheugencapaciteit is afhankelijk van de hoeveelheid data die verzameld wordt gedurende een periode en hoelang het duurt vooraleer de opgeslagen data opgehaald en verwerkt wordt.

Tot slot is het wenselijk om, in situaties waarin omgevingsfactoren onvoldoende natuurlijke excitatie genereren, één of meerdere excitatiebronnen op de structuur toe te passen. Dit is in deze context relevant, aangezien het passerende verkeer in normale gebruikstoestand enkel uit voetgangers en fietsers bestaat. Daarnaast kan een opgelegde excitatie helpen om zowel een inschatting te maken van de te verwachten grootteorde van de meetresultaten als om de gevoeligheid van de sensoren te bepalen en ze te kalibreren.

Deze externe krachten of trillingen die bewust op een constructie worden toegepast om een meetbare respons op te wekken, worden in de praktijk toegepast als zijnde gecontroleerde belastingen. Voorbeelden hiervan zijn het laten passeren van een voertuig met bekende massa, het gebruik van een trilhamer of shaker, en het aanbrengen van een tijdelijke massa, zoals een proeflast met gewichten.

De keuze van de excitatiebron hangt sterk af van het type meting. Voor trillingsmetingen wordt vaak gebruikgemaakt van een elektrodynamische shaker of een impacthamer, waarmee gecontroleerde frequenties kunnen worden opgelegd aan de constructie [39]. Dit laat toe om de natuurlijke frequenties, damping en modi van het systeem te identificeren. Figuur 54 illustreert beide excitatiebronnen.



Figuur 54: Excitatiebronnen voor trillingsmetingen; links impacthamer, rechts: elektrodynamische shaker [39]

Daarnaast illustreert het onderzoek uitgevoerd in [40] hoe gecontroleerde proefbelastingen, zoals het aanbrengen van zandzakken en het parkeren van een testvoertuig met een bekende massa, effectief kunnen worden ingezet om de statische doorbuiging van een brug te monitoren.

Het is dus belangrijk om de excitatiebron af te stemmen op het doel van de meting en het type sensor.

6.3 Praktische overwegingen

6.3.1 Impact bevestigingsmiddelen op frequentierespons

Daar opdrachtgevers vaak aangeven dat erop toegezien dient te worden dat er louter gebruik gemaakt wordt van niet-destructieve bevestigingsmiddelen om de sensoren te bevestigen, is het relevant na te gaan wat de impact van bepaalde bevestigingsmiddelen is op de nauwkeurigheid van de meetresultaten. Hierover bestaan reeds richtlijnen beschreven in NBN ISO 5348 [41]. Deze ISO-norm spitst zich specifiek toe op de mechanische bevestiging van accelerometers.

Algemeen, voor ieder type bevestigingsmiddel, vereist de bevestiging specifiek aandacht voor volgende criteria:

- voorbereiding van het oppervlak,
- aard van het oppervlak,
- stijve verbinding tussen accelerometer en de te monitoren structuur,
- massa van de accelerometer is klein in vergelijking met de massa van de te monitoren structuur,
- correcte bevestiging van bekabeling (indien bekabeld).

Tabel 42 vat de criteria voor de selectie van het bevestigingsmiddel samen. Hieruit blijkt dat de impact van de nauwkeurigheid van de meetresultaten en betrouwbaarheid van bevestiging voornamelijk afhankelijk is van de keuze van het bevestigingsmiddel.

Tabel 42: Criteria voor de selectie van bevestigingsmiddel [41]

Attachment fidelity	Resonance frequency	Static strength	Temperature resistance	Importance of surface preparation
High ↑ Low	Stud or screw	Stud or screw	Stud or screw	Stud or screw
	Cyanoacrylate or epoxy resin adhesive	Cyanoacrylate or epoxy resin adhesive	Magnet	Cyanoacrylate
	Sticky wax	Thin double-sided tape	Cyanoacrylate or epoxy resin adhesive	Magnet
	Thin double-sided tape	Magnet	Hand-held probe tip	Sticky wax
	Cyanoacrylate or epoxy resin adhesive with adhesive mounting pad	Sticky wax	Thin double-sided tape	Thin double-sided tape
	Thin double-sided tape with adhesive mounting pad	Hand-held probe tip	Sticky wax	Epoxy resin adhesive
	Magnet			Hand-held probe tip
	Hand-held probe tip			

Uit Tabel 42 blijkt dat vooral verlijmen en het mechanische bevestigen goed presteren op zowel het correct monitoren van de resonantiefrequentie als het waarborgen van een betrouwbare verbinding.

Daar voor deze casus enkel de niet-destructieve opties relevant zijn, zullen deze onderling vergeleken worden, om zo tot de meest efficiënte keuze voor het bevestigingsmiddel te komen.

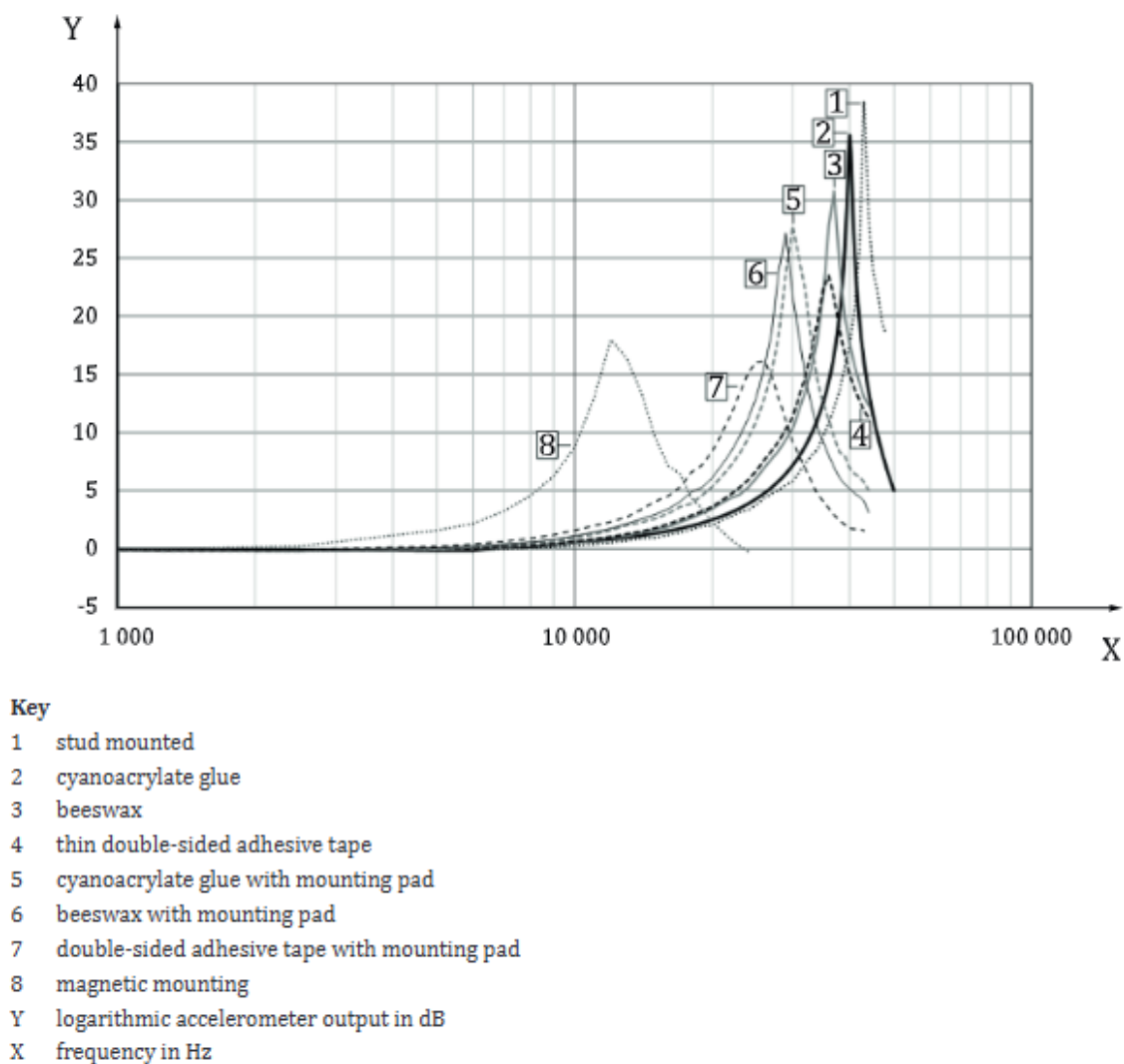
De in acht te nemen, niet-destructieve, verbindingsmiddelen zijn de volgende:

- magneet,
- verlijming (al dan niet met montageplaat),
 - cyanoacrylatlijm,
 - epoxyharslijm,
- dubbelzijdige plakband (al dan niet met montageplaat).

Uit een analyse van Tabel 42 van deze niet-destructieve bevestigingsmiddelen blijkt dat:

- een magnetische verbinding niet naar behoren presteert wat betreft het monitoren van de resonantiefrequentie;
- beide verlijmingstechnieken gelijkaardig presteren op alle vlakken, echter is een epoxyharslijm minder gevoelig aan slecht voorbereide, ongelijke oppervlakken;
- het gebruik van dubbelzijdige plakband gemiddeld presteert op alle vlakken, en een waardig alternatief lijkt te zijn indien de accelerometer snel en eenvoudig geplaatst en verwijderd moet kunnen worden.

Bijkomend toont Figuur 55 de invloed van de verschillende bevestigingsmethoden op de frequentierespons.



Figuur 55: Frequentierespons van accelerometers afhankelijk van de verschillende bevestigingsmiddelen [41]

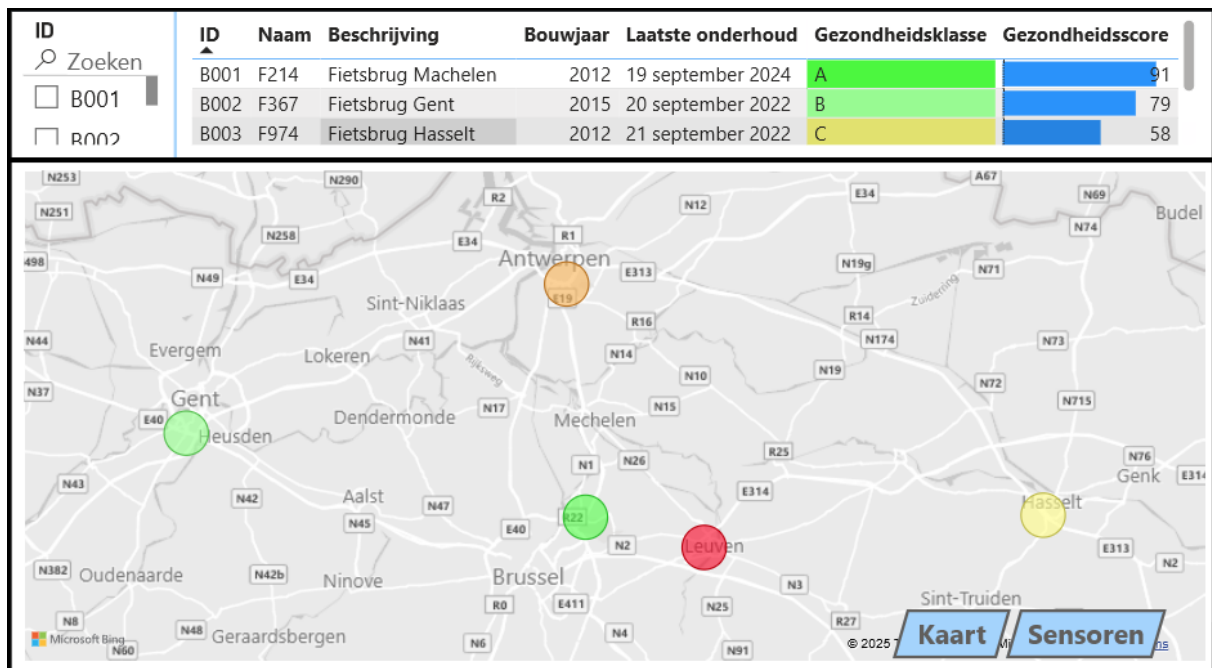
Uit Figuur 55 blijkt dat, zoals reeds bleek uit Tabel 42, een rechtstreekse verlijming van de accelerometer op de structuur, als niet-destructief verbindingsmiddel, de hoogste gemonteerde fundamentele resonantiefrequentie behaalt. Bijkomend toont deze figuur aan dat het gebruik van een tussenliggende montageplaat een aanzienlijke negatieve invloed heeft.

Concreet voor de niet-destructieve verbindingsmiddelen is een rechtstreekse verlijming de meest aangewezen oplossing, waarna een dubbelzijdige plakband een waardige alternatieve oplossing biedt. Het gebruik van een dubbelzijdige plakband is voornamelijk relevant wanneer de accelerometer snel geplaatst en verwijderd dient te worden. Een magnetische verbinding lijkt de minst aangewezen oplossing.

6.3.2 Visualisatie gezondheidsscore met Power BI-dashboard

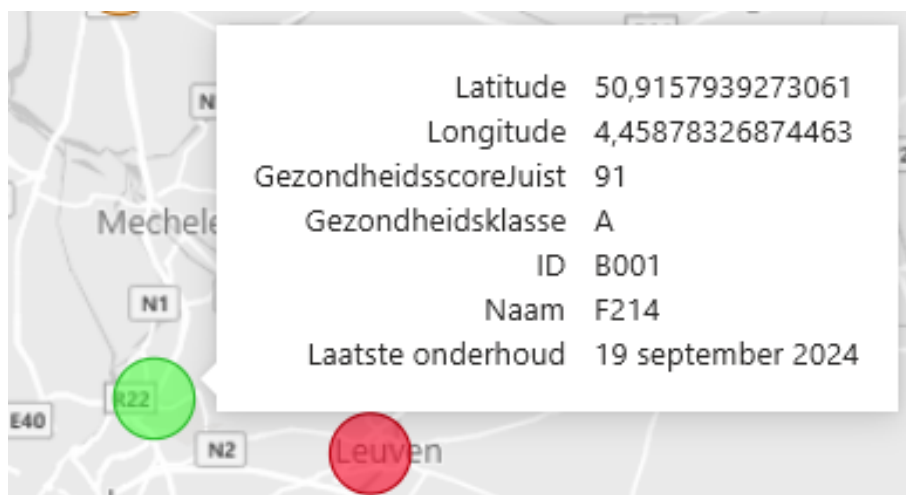
Deze paragraaf bespreekt de mogelijkheden om de resultaten van toekomstige sensormetingen op visuele wijze beschikbaar te stellen voor brugbeheerders, die verantwoordelijk zijn voor het onderhoud. Hierdoor is iedere gebruiker in staat om zonder diepgaande technische kennis een idee te krijgen van de gezondheid van de beheerde bruggen. Deze inzichten kunnen vanop afstand gevolgd worden, waardoor er snel ingespeeld kan worden op eventuele problemen. Deze inzichten worden geleverd door middel van de data van de geplaatste sensoren. Deze data wordt automatisch omgevormd naar de finale deelscores en gezondheidsscore, op basis van de vooraf gedefinieerde grenzen per parameters (zie sectie 5.4). Deze transformatie kan gebeuren in een Excel-bestand of op grote schaal via dataverwerkingssoftware (*querytaal*) zoals *Structured Query Language* (SQL) [42]. In hetgeen hierna volgt wordt een voorbeeld gepresenteerd van het binnen dit onderzoek ontwikkelde *dashboard*, waarbij de afzonderlijke visualisaties en hun functionaliteiten stap voor stap worden toegelicht. Dit dashboard werd opgesteld in Power BI [43], waarbij het in zijn geheel terug te vinden is in Bijlage E.

Het dashboard binnen dit onderzoek omvat een reeks fictieve projecten waarbij fictieve sensordata werd gebruikt om een helder beeld te bieden in de opzet en functionaliteit van het systeem. Naar de toekomst toe, dient deze data voort te komen uit sensormetingen uitgevoerd op locatie, waarna de gegevens worden verwerkt en via de bijhorende gateway en 4G-netwerk naar een *database* worden gestuurd. Voor dit dashboard werd de fictieve data opgeslagen in een Excel-bestand, waarna het geïmporteerd werd in het dashboard. In de praktijk is het echter gewenst om een database zoals *SQL Server* of cloudgebaseerde oplossingen zoals *Azure SQL* of *Amazon Web Services* (AWS) te gebruiken [44]-[46]. Dit om een soepele integratie bij grotere hoeveelheden data te verzekeren en de flexibiliteit naar automatisering en schaalbaarheid toe te waarborgen. Daarnaast zijn de integratiemogelijkheden met visualisatiesoftware zoals Power BI veel uitgebreider, waarbij er een automatische verbinding tussen de data en het visualisatieprogramma mogelijk is. Hiermee worden real-time updates mogelijk. Figuur 56 geeft een overzicht van de eerste visualisatie binnen dit dashboard.



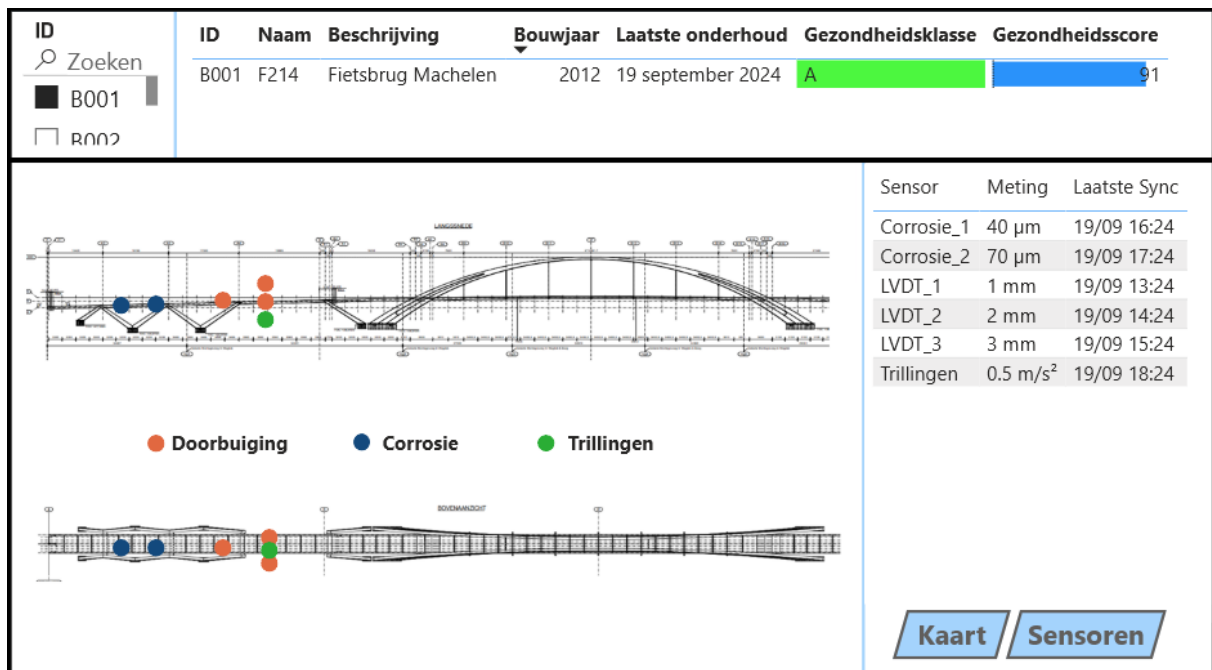
Figuur 56: Dashboard - detail 1 (kaart)

In de visualisatie in Figuur 56 heeft de gebruiker linksboven de keuze om een beheerd project te selecteren. Elk project krijgt een uniek identificatienummer toegekend, waardoor er eenvoudig onderscheid gemaakt kan worden tussen de projecten. Rechts van deze selectie, wordt er een uitgebreid overzicht gegeven van alle projecten die gemonitord worden. In dit venster heeft de gebruiker de mogelijkheid om de projecten te sorteren op basis van verschillende parameters zoals het bouwjaar, het laatste onderhoud en de gezondheidsscore of -klasse. Via deze functie kan de rangorde voor de urgentie van onderhoud op snelle wijze worden bepaald. Onderaan wordt er een kaart weergegeven waarop de projecten worden voorgesteld. De kleur van de projecten is gecorreleerd aan de gezondheidsscore. Verder verschijnt er gedetailleerde informatie over het project zodra de gebruiker met de cursor over het betreffende project beweegt, zoals te zien in Figuur 57.



Figuur 57: Gedetailleerde informatie

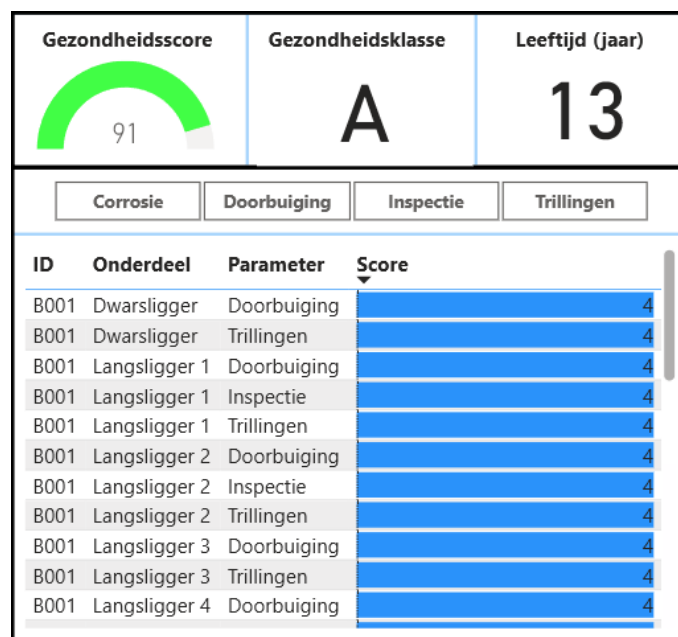
Met behulp van de twee schakelaars rechts onderaan kan de gebruiker wisselen tussen de kaartweergave en sensorweergave. Deze sensorweergave wordt zichtbaar wanneer er een keuze wordt gemaakt voor een bepaald project via de ID-zoekfunctie of door het aanklikken van een bepaald project op de kaart. Figuur 58 illustreert dergelijke sensorweergave.



Figuur 58: Dashboard - detail 1 (sensoren)

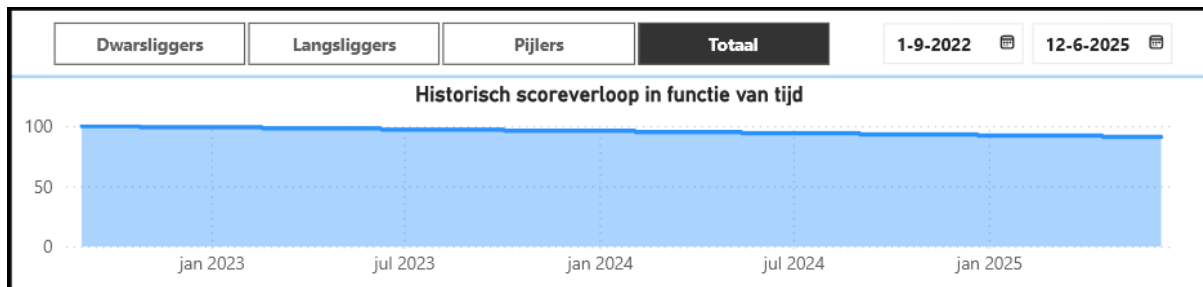
Na het kiezen voor de sensorweergave wordt er een overzicht geïllustreerd van de geplaatste sensoren binnen het geselecteerde project. Aan de rechterzijde verschijnt een tabel waarin de verschillende sensoren, de meest recente meetwaarde en de laatste synchronisatie terug te vinden zijn. Op deze manier kan er nagegaan worden welke sensor aanleiding geeft tot een bepaalde score.

In Figuur 59 wordt er algemene informatie gegeven over het project zoals de gezondheidsscore en -klasse en de leeftijd van het project. Daaronder verkrijgt de gebruiker een overzicht van de score per parameter en per constructiedeel. Daarbij is het mogelijk te filteren op basis van de gewenste parameter. Op deze wijze verkrijgt men detailinformatie per constructiedeel.



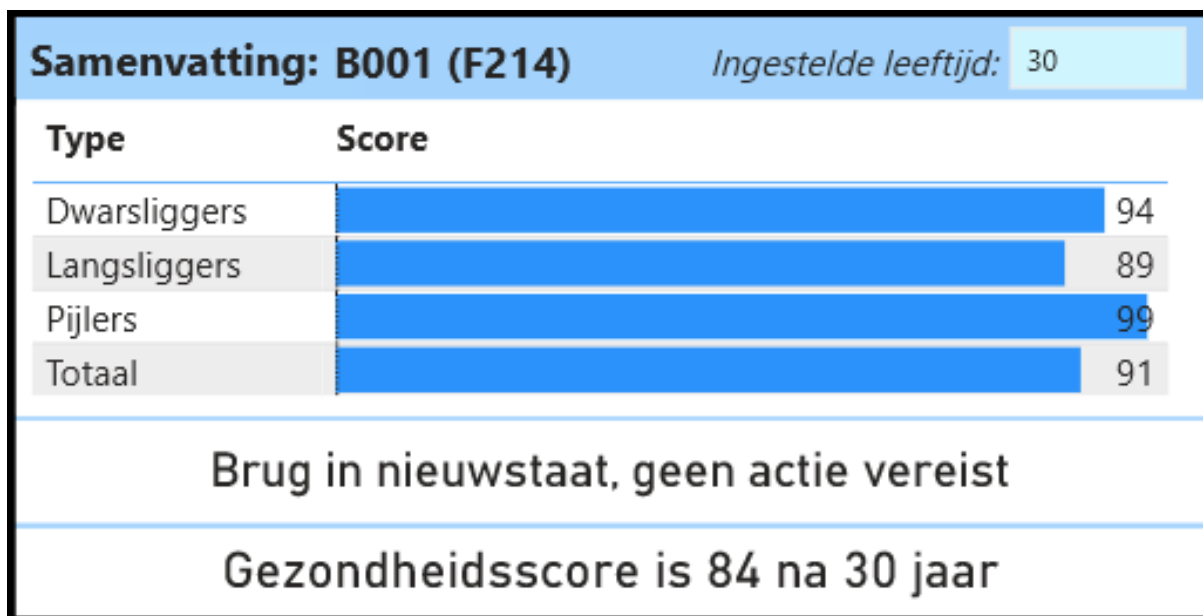
Figuur 59: Dashboard - detail 2

Figuur 60 geeft het scoreverloop van het gekozen project in de tijd weer. De gebruiker heeft hierbij de keuze om het scoreverloop van de volledige constructie (de gezondheidsscore) weer te geven, of om het historisch scoreverloop van enkel de dwarsliggers, langsliggers of pijlers te visualiseren. Daarnaast is er de mogelijkheid om de resultaten gedurende een bepaalde tijdsperiode weer te geven. Door middel van deze functionaliteit kan de gebruiker onverwachte of snelle afnames opsporen, zodat de nodige maatregelen getroffen kunnen worden.



Figuur 60: Dashboard - detail 3

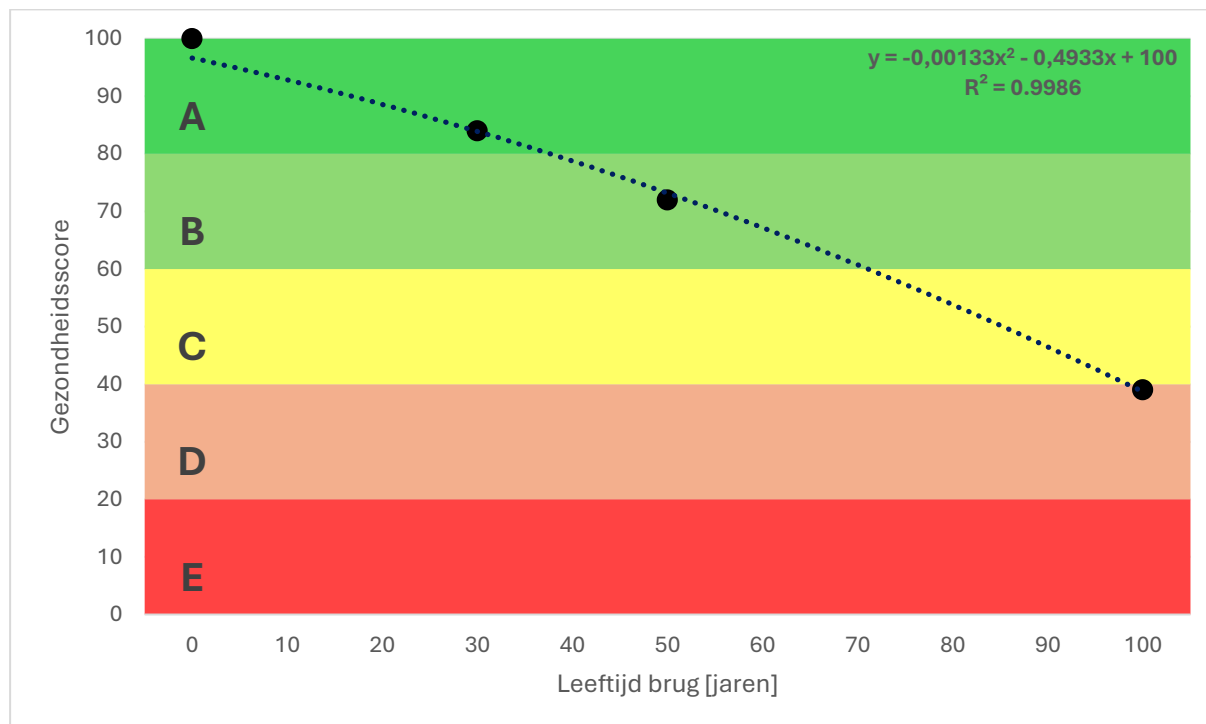
In de laatste visualisatie, geïllustreerd in Figuur 61, wordt er een samenvatting gegeven van de belangrijkste resultaten. Deze resultaten omvatten de meest recente, totale deelscores per constructiedeel, evenals de globale gezondheidsscore. Verder wordt er een beschrijving gegeven van de gezondheid van de brug, aangevuld met voorgestelde maatregelen. Tenslotte biedt deze visualisatie de mogelijkheid om een gezondheidsscore van de brug te voorspellen op basis van een door de gebruiker ingevoerde leeftijd. Deze inschatting wordt gemaakt op basis van het degradatieprofiel van dit project. De gebruiker stelt rechtsboven een waarde in voor de gewenste leeftijd (na constructie), waarna de verwachte gezondheidsscore onderaan wordt weergegeven.



Figuur 61: Dashboard - detail 4

7 DISCUSSIE

Dit hoofdstuk licht de belangrijkste bevindingen van het onderzoek toe en zoekt naar mogelijke verklaringen voor de waargenomen trends. Het merendeel van de resultaten is afkomstig van de simulaties met betrekking tot het eindige-elementenmodel en van voorbeeldberekeningen voor de specifieke onderzoekslocatie. Hierbij werd de ontwikkelde gezondheidsscore gevalideerd op basis van verschillende scenario's, gebaseerd op mijlpalen binnen de levensduur van een brug. In Hoofdstuk 5 werden deze berekeningen uitgebreid beschreven en werden de resultaten voor de verschillende scenario's kort aangehaald. De interpretatie van deze resultaten gebeurt aan de hand van een visuele representatie, geïllustreerd in Figuur 62. Op deze grafiek zijn de vijf gezondheidsklassen aangeduid.



Figuur 62: Samenvatting resultaten in grafiekvorm met aanduiding gezondheidsklassen

Bovenstaande grafiek toont het resultaat van de gezondheidsscore in functie van de leeftijd van de brug. In het kader van dit onderzoek werd de gezondheidsscore berekend voor een brug met een leeftijd van 0 jaar, 30 jaar, 50 jaar en 100 jaar. Uit deze resultaten concludeert men dat de gezondheidsscore, over een tijdsspanne van 100 jaar, op significante wijze afneemt. Concreet spreekt men over een afname van 61 eenheden, wat gepaard gaat met een afname van 61%.

Daarnaast werd er door middel van een lineaire regressie een verband gezocht tussen de verschillende meetpunten van de gezondheidsscore in functie van de leeftijd van de brug. Concreet werd er voor de lineaire regressie een tweede-orde polynoom toegepast, waarbij er een R^2 -waarde van 0,9986 werd vastgesteld. Dit wijst op een sterke correlatie tussen de gezondheidsscore en de leeftijd van de brug. Op basis van deze vaststelling is men in staat om, naast het beschrijven van de huidige toestand, ook een inschatting te maken van de resterende tijd voordat de brug een kritieke gezondheidsscore bereikt.

De formule vanuit de lineaire regressie kan op twee manieren toegepast worden. In eerste instantie kan men deze gebruiken om de gezondheidsscore voor willekeurige momenten in de levensduur van de brug te bepalen. De maximumleeftijd die hierbij gebruikt kan worden is

echter gelimiteerd tot 100, aangezien dit de maximale leeftijd is waarvoor de simulaties werden uitgevoerd. Er dient opgemerkt te worden dat dit verband is vastgesteld op basis van de aanname van het corrosiemodel en bijhorende modelanalyses, specifiek voor deze brug, waardoor de geldigheid ervan via toekomstige praktijkmetingen moet worden bevestigd. Hieronder wordt deze toepassing getoond indien men de gezondheidsscore van een brug wil berekenen na 40 jaar.

$$\text{gezondheidsscore} = -0,00133 \cdot \text{leeftijd}^2 - 0,4933 \cdot \text{leeftijd} + 100 \quad (12)$$

$$\text{gezondheidsscore} = -0,00133 \cdot 40^2 - 0,4933 \cdot 40 + 100 = 78$$

Deze berekening resulteert in een gezondheidsscore van 78 (klasse B) na een periode van 40 jaar.

De tweede toepassing, die in de praktijk wenselijker is, bestaat uit het inschatten van de resterende tijd totdat de gezondheidsscore een bepaalde grens overschrijdt. Indien men de grens voor het uitvoeren van onderhoud legt op 60 (tussen klasse B en C) en de brug bestaat reeds 40 jaar, wordt de resterende tijd op volgende wijze berekend:

$$60 = -0,00133 \cdot \text{leeftijd}^2 - 0,4933 \cdot \text{leeftijd} + 100$$

$$\text{leeftijd} = 68 \text{ jaar}$$

De brug zal bijgevolg nog 28 jaar (68 jaar – 40 jaar) voldoen aan de huidige eisen om boven een gezondheidsscore van 60 te presteren.

Gebaseerd op het corrosiemodel uit sectie 5.4.3, wordt verder geconcludeerd dat de jaarlijkse afname van de gezondheidsscore in de beginfase van de levensduur van de brug trager verloopt dan bij een gevorderde mate van veroudering. Dit is visueel waar te nemen door middel van de convexe kromme die de trendlijn vormt. Deze vaststelling is ook terug te zien wanneer men de afname berekent voor de drie beschouwde intervallen, zoals weergegeven in Tabel 43.

Tabel 43: Jaarlijkse afname gezondheidsscore

Periode	Afname
0 jaar - 30 jaar	0,53 eenheden/jaar
30 jaar - 50 jaar	0,60 eenheden/jaar
50 jaar – 100 jaar	0,66 eenheden/jaar

Door toepassing van Formule 12 wordt dit principe verder verduidelijkt. In dit voorbeeld worden twee verschillende bruggen verondersteld. De eerste brug is pas opgeleverd en heeft bijgevolg een leeftijd van 0 jaar, en volgens de benaderende formule, een gezondheidsscore van 100. De tweede brug heeft een leeftijd van 50 jaar en een gezondheidsscore van 72. Indien men nu de tijd wil berekenen waarin de gezondheidsscore van elke brug met 10 eenheden verlaagt, stelt men vast dat dit bij de oudste brug minder tijd in beslag neemt. Hieronder volgen de berekeningen voor respectievelijk de nieuwe en oude brug.

$$100 - 10 = 90 = -0,00133 \cdot \text{leeftijd}^2 - 0,4933 \cdot \text{leeftijd} + 100$$

$$\text{leeftijd} = 19 \text{ jaar}$$

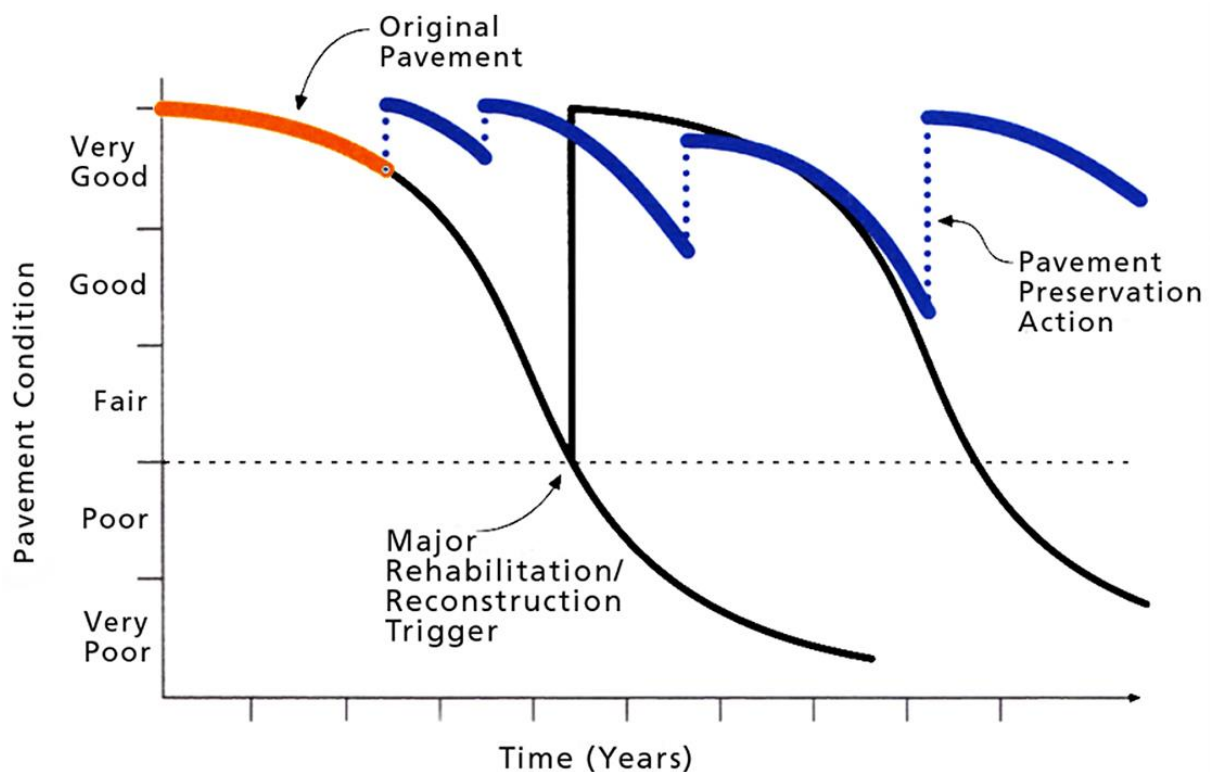
Voor de nieuwste brug is er 19 jaar (19 jaar – 0 jaar) nodig om de gezondheidsscore met 10 eenheden te doen verlagen.

$$72 - 10 = 62 = -0.00133 \cdot \text{leeftijd}^2 - 0.4933 \cdot \text{leeftijd} + 100$$

$$\text{leeftijd} = 65 \text{ jaar}$$

Voor de oudste brug daarentegen is er 15 jaar (65 jaar – 50 jaar) nodig om de gezondheidsscore met 10 eenheden te doen verlagen.

Gebaseerd op de aanname van het corrosiemodel uit sectie 5.4.3, volgt dat de brug sneller degradeert naarmate de leeftijd toeneemt. Voor een brug van 50 jaar is er 21,05% minder tijd nodig om de gezondheidsscore met 10 eenheden te doen verlagen ten opzichte van een brug met een leeftijd van 0 jaar. Hiermee wordt het belang van preventief onderhoud benadrukt. Door periodiek kleinschalig onderhoud uit te voeren, wordt de levensduur van een constructie significant verlengd. Meerdere kleinere onderhoudswerken zorgen daarnaast voor minder gebruikshinder en resulteren op lange termijn in lagere onderhoudskosten. Het grootste voordeel blijft de verlengde levensduur van de constructie. Dit fenomeen is reeds gekend binnen de asfaltindustrie, waar preventief onderhoud wordt ingezet om de asfaltlaag in goede conditie te houden. Diezelfde principes zijn echter ook van toepassing binnen de burgerlijke bouwkunde. Figuur 63 geeft een visuele weergave van deze principes weer.



Figuur 63: Impact preventief onderhoud [47]

Door deze principes toe te passen binnen de onderhoudsplanning, zijn er minder inspanningen nodig om de brug terug tot op een bepaald gezondheidsniveau te brengen wanneer het onderhoud in een vroeg stadium uitgevoerd wordt. Met behulp van het scoringssysteem voor de gezondheidsscore en -klasse, kan men grenzen opleggen die definiëren wanneer er onderhoud dient uitgevoerd te worden. In een ideaal geval ligt dit punt op de grens van gezondheidsklasse A en B, wat gepaard gaat met een gezondheidsscore van 80. Dit om ervoor te zorgen dat alle constructies steeds ruimschoots voldoen aan de noden van de gebruikers. Deze grens ligt niet exact vast en kan door de beheerder of opdrachtgever gespecificeerd

worden. Op termijn kan deze grens worden bijgesteld op basis van de ervaring die is opgedaan bij het beheer van meerdere bruggen. Indien dit niet mogelijk is kan men de urgentie van onderhoud bepalen door de gemiddelde gezondheidsscore van alle constructies te vergelijken met de beschouwde constructie.

Daarnaast kan men een aantal vaststellingen doen wanneer de gedetailleerde resultaten van de brug in oorspronkelijke toestand worden vergeleken met de resultaten van de brug na 100 jaar. Zo stelt men vast dat de deelscore van de langs- en dwarsliggers het hardst afnemen, namelijk met 56 (56%) eenheden. De impact op de pijlers is daarentegen veel beperkter, namelijk een afname van 12 (12%) eenheden over een periode van 100 jaar. Tabel 44 en Tabel 45 geven een overzicht van de resultaten voor respectievelijk de oorspronkelijke toestand en de toestand na 100 jaar.

Tabel 44: Detail resultaten oorspronkelijke toestand

R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	100
	Deelscore dwarsliggers	100
	Deelscore pijlers	100
	Gezondheidsscore (voor correctie)	100
	Correctiefactor leeftijd	1
	Gezondheidsscore (na correctie)	100
	Gezondheidsklasse	A
	Beschrijving + Maatregel	
	Constructie in nieuwstaat, geen verdere actie vereist	

Tabel 45: Detail resultaten na 100 jaar

R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	44
	Deelscore dwarsliggers	44
	Deelscore pijlers	88
	Gezondheidsscore (voor correctie)	50
	Correctiefactor leeftijd	0.8
	Gezondheidsscore (na correctie)	39
	Gezondheidsklasse	D
	Beschrijving + Maatregel	
	Constructie voldoet niet, urgente onderhoudsnoed	

Op basis van deze resultaten van de eindige-elementenanalyse kan men concluderen dat er sneller onderhoud nodig is bij de langs- en dwarsliggers dan bij de pijlers. De impact van schade aan de langs- en dwarsliggers is bijgevolg groter dan wanneer er schade optreedt ter hoogte van de pijlers. Dit wordt weerspiegeld in de lagere combinatiefactor die gebruikt werd bij de pijlers.

Als laatste conclusie stelt men vast dat de gezondheidsscore van de huidige constructie (op basis van de uitgevoerde visuele inspectie) 91 bedraagt. Wanneer men de gezondheidsscore simuleert op basis van de lineaire regressie van de modelgedreven data (Formule 12), resulteert dit in een score van 93.

$$\text{gezondheidsscore} = -0,00133 \cdot 13^2 - 0,4933 \cdot 13 + 100 = 93$$

Er wordt bijgevolg een verschil van 2 eenheden vastgesteld tussen het effectieve resultaat op basis van de visuele inspecties en de verwachte waarde vanuit de lineaire regressie. Dit komt overeen met een verschil van 2,20%. Hieruit concludeert men dat het effectieve resultaat een minimaal verschil vertoont met de verwachte resultaten, waardoor beide situaties als gezondheidsklasse A geclassificeerd worden.

8 BESLUIT

Het hoofddoel van deze thesis bestaat uit het ontwikkelen van een objectieve en gestructureerde methode om de gezondheid van stalen bruggen in Vlaanderen te beoordelen, zodat aannemers zoals Stadsbader Contractors NV gericht onderhoud kunnen uitvoeren en hun projecten op een duurzame manier kunnen beheren. In dit onderzoek wordt de gezondheidsscore ontwikkeld op basis van een eindige-elementenmodel in SCIA Engineer. Dit voor een praktijkvoorbeeld, namelijk de F214 fietsbrug, die onderdeel uitmaakt van het Diabolo-project. Door verschillende parameters, zoals doorbuiging, trillingen, corrosie en visuele inspecties, op een reproduceerbare manier samen te brengen, werd er een gezondheidsscore verkregen die de structurele toestand van de volledige brug in kaart brengt.

In de literatuurstudie komen de meest voorkomende schadefenomenen bij stalen bruggen aan bod, waaronder vermoeiingsscheuren, corrosie en het loskomen van verbindingen. Vervolgens verdiept de studie zich in het concept van SHM, waarbij begrippen zoals schade, falen en het opzetten van een gestructureerd SHM-proces worden behandeld. Daarnaast wordt relevante informatie verzameld over bruikbaarheidscriteria voor fiets- en voetgangersbruggen, zoals de maximaal toelaatbare doorbuiging en grenswaarden voor versnellingen als gevolg van trillingen. Tot slot werden reeds bestaande scoringsmethoden en eerder uitgevoerd onderzoek bestudeerd, waarbij opvalt dat deze methoden voornamelijk steunen op visuele waarnemingen. Deze inzichten vormen de basis voor de ontwikkeling van de geïntegreerde en modelgebaseerde beoordelingsmethode die in deze thesis wordt voorgesteld.

Op basis van de ter beschikking gestelde as-builtplannen en de visueel verzamelde informatie gedurende de plaatsbezoeken, wordt het eindige-elementenmodel van deze casus opgesteld. Het doel van dit model is het nabootsen van de praktijk, om zodoende de invloed van gesimuleerde schade op de structuur na te gaan. Op basis van deze simulaties wordt in een volgende stap de scoringsmethodiek ontwikkeld.

De eigenlijke methode vertrekt vanuit een opdeling van de brug in de belangrijkste constructiedelen, namelijk de langsliggers, dwarsliggers en pijlers. Hierdoor ontstaat er een beeld van de toestand van elk van deze constructiedelen, waardoor het uitvoeren van gericht onderhoud eenvoudiger wordt. Deze constructiedelen krijgen op basis van de beoordelingsparameters een score tussen 0 en 4 toegewezen. De beoordelingsschaal voor iedere parameter wordt bepaald door de opgelegde grenzen vanuit de Eurocodes te combineren met de impact die wordt waargenomen bij het verlagen van de doorsneden in het model. Door de introductie van wegingsfactoren, bepaald op basis van de eindige-elementenanalyses, worden deze scores samengevoegd om een deelscore per constructiedeel te vormen. In de volgende stap wordt het belang van elk constructiedeel in rekening gebracht met behulp van combinatiefactoren. In de laatste stap wordt er een correctiefactor toegepast die de leeftijd van de constructie in rekening gebracht. Deze factor moet ervoor zorgen dat verouderde bruggen eerder in aanmerking komen voor onderhoud, aangezien deze reeds verder staan in hun degradatieproces en dus vatbaarder zijn voor schade die niet altijd waar te nemen is met sensoren. Uitwerking van deze methode levert een algemene beoordelingsschaal voor de gezondheidsscore, die gelinkt wordt aan de gezondheidsklasse. Deze gezondheidsklasse wordt op zijn beurt gelinkt aan de onderhoudsmaatregelen die getroffen dienen te worden. Hiermee wordt het onderhoudspersoneel in staat gesteld om de urgentie van onderhoud te bepalen.

Door toepassing van deze methode op het eindige-elementenmodel zijn de belangrijkste bevindingen van dit onderzoek duidelijk geworden. De gezondheidsscore van de brug neemt significant af naarmate de leeftijd toeneemt, met een versnelde afname in de latere levensfasen. De lineaire regressie toont een sterke correlatie tussen de gezondheidsscore en de ouderdom van de brug, wat helpt bij het inschatten van de resterende tijd tot kritieke schade. Het onderzoek benadrukt het belang van preventief onderhoud, vooral voor langs- en dwarsliggers, die sneller degraderen dan de pijlers. Hiermee wordt het belang van periodiek onderhoud benadrukt, waarmee de levensduur van bruggen verlengd wordt en de kosten op lange termijn afnemen.

Daarnaast worden er mogelijke oplossingen uitgewerkt voor een meetopstelling om proeven uit te voeren met behulp van sensoren, bestaande uit accelerometers, LVDT's en corrosiesensoren. De opstelling omvat deze sensoren, een datalogger, een gateway, cloudopslag (database) en een laptop met de nodige software om de data uit de cloud te raadplegen. Wanneer ervoor gekozen wordt om de data lokaal op te slaan, zijn de gateway en cloudopslag overbodig. In de voorgestelde meetopstelling wordt één accelerometer geplaatst in het midden van de grootste overspanning, twee LVDT's op de langsliggers van deze overspanning, één LVDT op de zwaarst belaste dwarsligger en twee corrosiesensoren aan de onderzijde van de aangetaste zones. Om de verkregen data eenvoudig te interpreteren, worden de resultaten gevisualiseerd door middel van een dashboard ontwikkeld in Power BI.

Samenvattend kunnen de belangrijkste resultaten van dit onderzoek als volgt worden omschreven:

- De ontwikkeling van een eindige-elementenmodel is een cruciale eerste stap in het ontwikkelen van een gestructureerde, gestaafde scoringsmethodiek voor het beoordelen van de structurele gezondheid van bruggen;
- De methode verdeelt de brug in constructiedelen, kent scores toe op basis van beoordelingsparameters en leeftijd, en koppelt de gezondheidsscore aan onderhoudsmaatregelen;
- Door toepassing van deze methode op het eindige-elementenmodel blijkt dat de gezondheidsscore van de brug afneemt met de leeftijd, waarbij preventief onderhoud, vooral aan langs- en dwarsliggers, essentieel is voor het verlengen van de levensduur en het verlagen van lange-termijncosten;
- Er wordt een meetopstelling uitgewerkt met accelerometers, LVDT's en corrosiesensoren, inclusief datalogger en dataverwerking, waarbij een voorstel wordt gedaan voor de positionering van de verschillende sensoren. De data wordt gevisualiseerd door middel van een dashboard in Power BI.

Tot slot volgt een kritische reflectie op het uitgevoerde onderzoek en worden mogelijke opportuniteiten voor vervolgonderzoek toegelicht. De voorgestelde methode voor het bepalen van de gezondheidsscore is momenteel gebaseerd op één eindige-elementenmodel, wat de representativiteit van de resultaten beperkt. Om de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de methode te verbeteren, is bijkomend onderzoek noodzakelijk. Een eerste stap daarin kan bestaan uit het toepassen van de methode op meerdere onderzoekslocaties, waarbij éénzelfde modelgedreven aanpak wordt gehanteerd. Op deze manier kan nagegaan worden in welke mate de opgestelde beoordelingsschalen te veralgemenen zijn voor stalen bruggen. Verder kunnen de wegingsfactoren op deze manier worden bijgesteld of uitgebreid, bijvoorbeeld door het afzonderlijk wegen van de constructiedelen alvorens men overgaat naar een deelscore. Daarnaast is het aanbevolen om experimentele proeven uit te voeren op de huidige onderzoekslocatie, voornamelijk om de correctheid van de aanname van het degradatieverloop volgens het corrosiemodel te toetsen. Verder zijn deze metingen cruciaal

om de nauwkeurigheid van het gebruikte model te verifiëren en zo de methode verder te onderbouwen en optimaliseren.

De gezondheidsscore blijft bovendien vatbaar voor uitbreiding. Er bestaat de mogelijkheid om bijkomende beoordelingsparameters in rekening te brengen, zoals spanningen, scheurwijdtes, knik- en kipinstabiliteit, etc. Het integreren van dergelijke parameters vereist echter experimentele data om betrouwbare grenswaarden te kunnen definiëren. Bovendien kunnen experimentele proeven ook meer inzicht bieden in de wederzijdse invloed van de verschillende parameters op elkaar, wat essentieel is voor een correcte weging en interpretatie binnen de gezondheidsscore.

Uit dit onderzoek blijkt dat de ontwikkelde gezondheidsscore potentieel heeft om bij te dragen aan duurzaam en gericht onderhoud van bruggen. Voor aannemers zoals Stadsbader Contractors NV kan deze methode een waardevol middel vormen om het verouderende bruggenpatrimonium in Vlaanderen op een veilige, efficiënte en onderhoudsvriendelijke manier te beheren.

REFERENTIELIJST

- [1] Stadsbader Contractors NV, "Historiek - Stadsbader Contractors," [Online]. Beschikbaar: <https://www.stadsbader-contractors.be/nl/over-ons/historiek>. [Geraadpleegd op 5 februari 2025].
- [2] R. Cockx, T. Roelens and V. Thomas, "Vlaamse overheid zoekt miljarden voor ongeziene renovatiegolf van bruggen," *De Tijd*, 20 Juli 2024.
- [3] L. Taerwe e.a., "Duurzaam Beheer van Infrastructuur, Niet alleen een kwestie van budgetten," *KVAB Standpunt* 79, 2022.
- [4] C. Chuang, Z. Qinghua, Z. Dengke, L. Wulve, W. Lemou and J. Zhenxiong, "Monitoring and detection of steel bridge diseases: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, pp. 188-208, 2024.
- [5] T. Tamakoshi, Y. Yoshida, Y. Sakai and S. Fukunaga, "Analysis of damage occurring in steel plate girder bridges on national roads in Japan".
- [6] C. R. Farrar, G. Park, D. W. Allen and M. D. Todd, "Structural Control and Health Monitoring," *Sensor network paradigms for structural health monitoring*, no. 13, pp. 210-225, 2006.
- [7] C. R. Farrar and K. Worden, "An Introduction to Structural Health Monitoring - CISM, Volume 520," in *New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring*, Wenen, Oostenrijk, SpringerWienNewYork, 2010, pp. 1-17.
- [8] M. I. Friswell, "Damage Identification using Inverse Methods," *Dynamic Methods for Damage Detection in Structures - CISM, Volume 499*, 2008.
- [9] NBN, "NBN EN 1990 ANB:2021 – Eurocode – Grondslagen van het constructief ontwerp – Nationale Bijlage," Brussel, 2021.
- [10] NBN, "NBN EN 1991-2 – Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelastingen op bruggen," Brussel, 2013.
- [11] NBN, "NBN EN 1991-2 ANB:2011 – Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelastingen op bruggen – Nationale Bijlage," Brussel, 2011.
- [12] NBN, "NBN EN 1993-2 – Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 2: Bruggen," Brussel, 2011.
- [13] NBN, "NBN EN 1993-2 ANB:2011 – Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 2: Bruggen – Nationale Bijlage," Brussel, 2011.
- [14] AASHTO, "AASHTO LRFD bridge design specifications, 4th edition," AASHTO, Washington D.C., 2007.
- [15] Departement Leefmilieu en Infrastructuur , "Richtlijnen voor het beheer van kunstwerken," Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 1993.

- [16] NEN, "Conditiemeting - Beheer en onderhoud in de bouw," NEN, [Online]. Beschikbaar: <https://www.nen.nl/bouw/beheer-en-onderhoud/conditiemeting>. [Geraadpleegd op 4 februari 2025].
- [17] X. Yang, "Bridge health monitoring and evaluation system," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021.
- [18] Allplan, "Scia Engineer," [Online]. Beschikbaar: <https://www.scia.net/nl/scia-engineer>. [Geraadpleegd op 11 maart 2025].
- [19] Departement Financiën en Begroting, "Noordelijke wegomsluiting van de luchthaven van Zaventem," *Grote projecten en programma's van de Vlaamse overheid - Editie 2023*, pp. 36-38, 2023.
- [20] NMBS-Groep, *Activiteitenverslag 2007 - NMBS-Groep*, p. 10, 2008.
- [21] G. Maps, "E19, Machelen, België," [Online]. Beschikbaar: <https://www.google.com/maps/@50.9154126,4.4595179,17z?entry>. [Geraadpleegd op 4 februari 2025].
- [22] NBN, "NBN EN 1991-1-4:2005 - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting (+ AC:2010)," Brussel, 2005.
- [23] NBN, "NBN EN 1991-1-4 ANB:2010 - Eurocode 1 : Belastingen op constructies - Deel 1-4 : Algemene belastingen - Windbelasting - Nationale bijlage," Brussel, 2010.
- [24] NBN, "NBN EN 1991-1-5:2004 - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-5: Algemene belastingen - Thermische belasting (+ AC:2009)," Brussel, 2004.
- [25] NBN, "NBN EN 1991-1-5 ANB:2009 - Eurocode 1 : Belastingen op constructies - Deel 1-5 : Algemene belastingen - Thermische belasting - Nationale bijlage," Brussel, 2009.
- [26] F. Hauksson, "Dynamic behaviour of footbridges subjected to pedestrian-induced vibrations," Lund University, Lund, 2005.
- [27] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation - Research Fund for Coal and Steel Unit, Human induced Vibrations of Steel Structures - Design of Footbridges: Guideline, Brussel: RFCS publications, 2008.
- [28] P. Van den Broeck, G. De Roeck, P. Verbeke and C. Schauvliege, "Trillingsreducerende maatregelen voor voetgangersbruggen & vloeren onder mens-geïnduceerde belasting," KU Leuven - KAHO Sint-Lieven, 2014.
- [29] NBN, "NBN EN ISO 12944-2 – Corrosion protection of steel structures – Part 2: Classification of environments," Brussel, 2018.
- [30] NBN, "NBN EN ISO 9224 – Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheric environments – Classification," Brussel, 2012.

- [31] S. W. Dean and D. B. Reiser, " Analysis of long term atmospheric results from ISO CORRAG program," in *Outdoor Atmospheric Corrosion*, West Conshohocken, PA, ASTM International, 2002, p. 3–18.
- [32] S. I. SA, "ROCK – Acceleration Recorder," [Online]. Beschikbaar: https://www.syscom.ch/wp-content/uploads/Syscom-ROCK-Acceleration-datasheet_A4_EN_DIGITAL.pdf. [Geraadpleegd op 22 april 2025].
- [33] F. Ropital, "15 - Environmental degradation in hydrocarbon fuel processing plant: issues and mitigation," in *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing: Science and Technology*, Elsevier, 2011, pp. 437-462.
- [34] F. Salgueiro, M. Ribeiro, A. Carvalho, G. Covas, Ø. Baltzersen and C. Proença, "Monitoring of Wall Thickness to Predict Corrosion in Marine Environments Using Ultrasonic Transducers," in *NDT*, 2 ed., 2024, pp. 255-269.
- [35] D. Yang, L. Aiqun, L. Yang and C. Suren, "Investigation of temperature actions on flat steel box girders of long-span bridges with temperature monitoring data," *Advances in Structural Engineering*, vol. 21, pp. 2099-2113, Oktober 2018.
- [36] Emerson Electric Co., "Emerson," 2025. [Online]. Beschikbaar: <https://www.emerson.com/nl-nl>. [Geraadpleegd op 3 mei 2025].
- [37] S. Joshi and S. M. Harle, "Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering," *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, pp. 62-66, 2017.
- [38] C. A. Peckens, M. B. Kane, Y. Zhang and J. P. Lynch, "17 - Long-term wireless structural monitoring of operational bridges," *ensor Technologies for Civil Infrastructures (Second Edition) - Volume 2 : Applications in Structural Health Monitoring*, pp. 555-586, 2022.
- [39] P. Reynolds and A. Pavic, "Impulse hammer versus shaker excitation for the modal testing of building floors," *Structural testing series: Part 7*, januari 2000.
- [40] M. Köhncke, Y. Jaelani, A. Mendler, N. Lizzie, P. Wittenberg, A. Rode-Klemm and K. Sylvia, "Static and Dynamic Load Tests on the Bridge Vahrendorfer Stadtweg," arXiv preprint arXiv:2412.15713, 2024.
- [41] NBN, "NBN ISO 5348 – Mechanical vibration and shock - Mechanical mounting of accelerometers," Brussel, 2021.
- [42] Amazon, "What is SQL (Structured Query Language)?," [Online]. Beschikbaar: <https://aws.amazon.com/what-is/sql/>. [Geraadpleegd op 1 juni 2025].
- [43] Microsoft Corporation, "Microsoft Power BI," 2025.
- [44] Microsoft Corporation, "SQL Server," 2025.
- [45] Microsoft Corporation, "Azure SQL Database," 2025.
- [46] Amazon, "AWS," 2025.

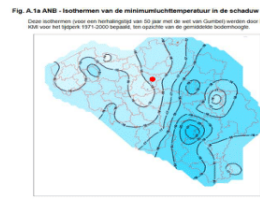
[47] FP², "Why Pavement Preservation and Recycling?," [Online]. Beschikbaar: <https://fp2.org/why-pavement-preservation/>. [Geraadpleegd op 3 mei 2025].

BIJLAGEN

Bijlage A: Rekenblad windbelastingen	121
Bijlage B: Rekenblad temperatuurbelastingen.....	122
Bijlage C: Voorbeeldberekeningen 0, 30, 50 en 100 jaar	123
Bijlage D: Voorbeeldberekening huidige situatie F214.....	127
Bijlage E: Dashboard gezondheidsscore in Power BI	128

BIJLAGE B: REKENBLAD TEMPERATUURBELASTINGEN

Bron: NBN EN 1991-1-4 + ANB	
Temperatuurbelastingen	
Minimumluchttemperatuur in de schaduw	
T _{min}	-16 °C
T _{max}	37 °C
Verhogingsfactor o.w.v. levensduur 100)	
Factor Max.	1,0386984
Factor Min.	1,1196233
k1	0,781
k2	0,056
k3	0,380
k4	-0,156
T _{max,p}	38,43 °C
T _{min,p}	-17,77 °C
Gelijkmatige temperatuurcomponent ΔT _{ti}	
Dektype	Type 1 Stalen dek
T _{a,max}	53,5 °C
T _{a,min}	-20,5 °C
T _{0,winter}	0 °C
T _{0,zomer}	20 °C
ΔT _{N,cool}	20,5 °C
ΔT _{N,heat}	33,5 °C
Temperatuurverschilcomponenten ΔT _{ti}	
ΔT _{N,heat}	18 °C
ΔT _{N,cool}	13 °C



A.2 Maximum- en minimumluchttemperatuur in de schaduw met een jaarlijkse overschrijdingskans van p anders dan 0,02

(1) Indien de maximum- (of minimum)luchttemperatuur in de schaduw, T_{max,p} (T_{min,p}), is gebaseerd op een jaarlijkse overschrijdingskans anders dan 0,02 mag de verhouding T_{max,p}/T_{max} (T_{min,p}/T_{min}) zijn bepaald uit figuur A.1.

(2) In het algemeen mag T_{max,p} (of T_{min,p}) zijn afgeleid van de volgende uitdrukkingen gebaseerd op een uiterste waardeverdeling type 1:

$$\text{— voor het maximum: } T_{max,p} = T_{max} (k_1 - k_2 \ln[-\ln(1-p)]) \quad (A.1)$$

$$\text{— voor het minimum: } T_{min,p} = T_{min} (k_3 + k_4 \ln[-\ln(1-p)]) \quad (A.2)$$

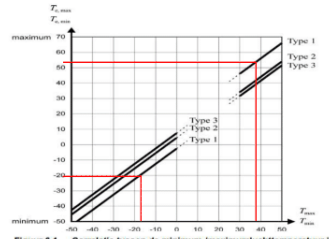
OPMERKING 1 De nationale bijlage kan de waarden voorschrijven voor de coëfficiënten k₁, k₂ en k₃ gebaseerd op de waarden van de parameters u en c. Indien geen andere informatie beschikbaar is zijn de volgende waarden aan te nemen:

$$k_1 = 0,781;$$

$$k_2 = 0,056;$$

$$k_3 = 0,380;$$

$$k_4 = -0,156.$$



Figuur 6.1 — Correlatie tussen de minimum-maximumluchttemperatuur in de schaduw (T_{min}/T_{max}) en de minimale/maximale gelijkmatige temperatuurcomponent van de brug (T_{min}/T_{max}), in °C (getekend voor de waarden T_{min} onder 0°C en getekend voor de waarden T_{max} boven 25°C)

(3) OPMERKING 3 De aanvangstemperatuur T₀ behoort gelijk te zijn genomen aan de temperatuur van een constructief element in de fase waarin de vervorming is belemmerd (eindmontage). Indien geen informatie hierover beschikbaar is, behoort de meest nadelige waarde beschouwd te zijn, bij voorbeeld 0°C in de winter en 20°C in de zomer.

(3) Aldus behoort de karakteristieke waarde van het maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent van de brug voor de verkorting ΔT_{N,cool} gelijk te zijn aan

$$\Delta T_{N,cool} = T_0 - T_{a,min} \quad (6.1)$$

en behoort de karakteristieke waarde van het maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent voor de uitzetting van de brug ΔT_{N,heat} gelijk te zijn aan

$$\Delta T_{N,heat} = T_{a,max} - T_0 \quad (6.2)$$

Tabel 6.1 ANB - Genormeerde waarden voor de lineaire temperatuurverschilcomponent voor verschillende dektypen voor weg-, voetgangers- en spoorwegbruggen

Dektype	Boven warmer dan onder		Onder warmer dan boven	
	ΔT _{N,heat} (°C)		ΔT _{N,cool} (°C)	
Type 1: Stalen dek	18		13	
Type 2: Staal-betondek	15		10	
Type 3: Betonnen dek, betonnen kokerligger	10		5	
betonnen ligger	15		8	
betonnen plaat	15		8	

OPMERKING 1 De waarden in de tabel zijn de bovengrenswaarden van de lineaire veranderlijke temperatuurverschilcomponent voor representatieve brugvormen.

OPMERKING 2 De waarden in de tabel zijn gebaseerd op een slijtlaag met een dikte van 50 mm voor weg- en spoorwegbruggen. Voor andere slijtlaagdiktes behoren deze waarden met een factor k_s te zijn vermenigvuldigd. De in de EN aanbevolen waarden voor de factor k_s zijn genormeerd (zie Tabel 6.2 ANB).

Tabel 6.2 ANB - Genormeerde waarden voor k_s om rekening te houden met de slijtlaagdikte

Dikte van de slijtlaag	Weg-, voetgangers- en spoorwegbruggen					
	Dektype 1		Dektype 2		Dektype 3	
	Boven warmer dan onder	Onder warmer dan boven	Boven warmer dan onder	Onder warmer dan boven	Boven warmer dan onder	Onder warmer dan boven
[mm]	k _s	k _s	k _s	k _s	k _s	k _s
Zonder slijtlaag	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1
Waterdicht ¹	1,6	0,6	1,1	0,9	1,5	1,0
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0
150	0,7	1,2	1,0	1,0	0,5	1,0
Ballast (750 mm)	0,6	1,4	0,8	1,2	0,6	1,0

¹ Deze waarden stellen de bovengrenswaarden voor een donkere kleur voor.

BIJLAGE C: VOORBEELDBEREKENINGEN 0, 30, 50 EN 100 JAAR

Projectlocatie: Diabolo-project F214				
G E G E V E N S	Leeftijd	0 jaar	STADSADER CONTRACTORS ►► UHASSELT	
	Wegingsfactor doorbuiging	54 %		
	Wegingsfactor trillingen	30 %		
	Wegingsfactor corrosie	6 %		
	Wegingsfactor inspectie	10 %		
	Combinatiefactor langsliggers	60 %		
	Combinatiefactor dwarsliggers	26 %		
	Combinatiefactor pijlers	14 %		
	Overspanning 1	13.8 m		
	Overspanning 2	16.5 m		
	Overspanning 3	17.5 m		
	Overspanning 4	22 m		
	Dwarsliggers	4.4 m		
	Lengte pijler 1	6.7 m		
Lengte pijler 2	10 m			
Lengte pijler 3	11.8 m			
D O O R B U I G I N G	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	8.2 mm (L/1683)	4
	Overspanning 2	Langsligger	8.6 mm (L/1919)	4
	Overspanning 3	Langsligger	8.8 mm (L/1989)	4
	Overspanning 4	Langsligger	18 mm (L/1222)	4
	Finale score doorbuiging	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	2.8 mm (U/1571)	4
	Finale score doorbuiging	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0.8 mm (U/8375)	4
	Pijler 2	Pijler	3 mm (L/3333)	4
	Pijler 3	Pijler	2.6 mm (L/4538)	4
	Finale score doorbuiging	Pijler	Minimale waarde:	4
T R I L L I N G E N	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	0.07 m/s ²	4
	Overspanning 2	Langsligger	0.073 m/s ²	4
	Overspanning 3	Langsligger	0.033 m/s ²	4
	Overspanning 4	Langsligger	0.534 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	0.489 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0.003 m/s ²	4
	Pijler 2	Pijler	0.026 m/s ²	4
	Pijler 3	Pijler	0.015 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Pijler	Minimale waarde:	4
C O R R O S I E *	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	0 µm	4
	Overspanning 2	Langsligger	0 µm	4
	Overspanning 3	Langsligger	0 µm	4
	Overspanning 4	Langsligger	0 µm	4
	Finale score corrosie	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	0 µm	4
	Finale score corrosie	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0 µm	4
	Pijler 2	Pijler	0 µm	4
	Pijler 3	Pijler	0 µm	4
	Finale score corrosie	Pijler	Minimale waarde:	4
I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	i	4
	Overspanning 2	Langsligger	i	4
	Overspanning 3	Langsligger	i	4
	Overspanning 4	Langsligger	i	4
	Finale score inspectie	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	i	4
	Finale score inspectie	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	i	4
	Pijler 2	Pijler	i	4
	Pijler 3	Pijler	i	4
	Finale score inspecties	Pijler	Minimale waarde:	4
R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	100		
	Deelscore dwarsliggers	100		
	Deelscore pijlers	100		
	Gezondheidsscore (voor correctie)	100		
	Correctiefactor leeftijd	1		
	Gezondheidsscore (na correctie)	100		
	Gezondheidsklasse	A		
	Beschrijving + Maatregel			
Constructie in nieuwstaat, geen verdere actie vereist				
Corrosie werd bepaald op basis van de formules uit NBN EN ISO 9224, door het gebrek aan sensordata				

Projectlocatie: Diabolo-project F214				
G E G E V E N S	Leeftijd	30 jaar	STADSBADER CONTRACTORS ►► UHASSELT	
	Wegingsfactor doorbuiging	54 %		
	Wegingsfactor trillingen	30 %		
	Wegingsfactor corrosie	6 %		
	Wegingsfactor inspectie	10 %		
	Combinatiefactor langsliggers	60 %		
	Combinatiefactor dwarsliggers	26 %		
	Combinatiefactor pijlers	14 %		
	Overspanning 1	13.8 m		
	Overspanning 2	16.5 m		
	Overspanning 3	17.5 m		
	Overspanning 4	22 m		
	Dwarsliggers	4.4 m		
	Lengte pijler 1	6.7 m		
Lengte pijler 2	10 m			
Lengte pijler 3	11.8 m			
D O O R B U I G I N G	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	8.7 mm (L/1586)	4
	Overspanning 2	Langsligger	9.2 mm (L/1793)	4
	Overspanning 3	Langsligger	8.8 mm (L/1989)	4
	Overspanning 4	Langsligger	18.3 mm (L/1202)	4
	Finale score doorbuiging	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	2.9 mm (L/1517)	4
	Finale score doorbuiging	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0.8 mm (L/8375)	4
	Pijler 2	Pijler	3.1 mm (L/3226)	4
	Pijler 3	Pijler	2.7 mm (L/4370)	4
Finale score doorbuiging	Pijler	Minimale waarde:	4	
T R I L L I N G E N	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	0.073 m/s ²	4
	Overspanning 2	Langsligger	0.081 m/s ²	4
	Overspanning 3	Langsligger	0.033 m/s ²	4
	Overspanning 4	Langsligger	0.569 m/s ²	3
	Finale score trillingen	Langsligger	Minimale waarde:	3
	Dwarsliggers	Dwarsligger	0.565 m/s ²	3
	Finale score trillingen	Dwarsligger	Minimale waarde:	3
	Pijler 1	Pijler	0.003 m/s ²	4
	Pijler 2	Pijler	0.027 m/s ²	4
	Pijler 3	Pijler	0.016 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Pijler	Minimale waarde:	4
	C O R R O S I E *	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde
Overspanning 1		Langsligger	177 µm	2
Overspanning 2		Langsligger	177 µm	2
Overspanning 3		Langsligger	177 µm	2
Overspanning 4		Langsligger	177 µm	2
Finale score corrosie		Langsligger	Minimale waarde:	2
Dwarsliggers		Dwarsligger	177 µm	2
Finale score corrosie		Dwarsligger	Minimale waarde:	2
Pijler 1		Pijler	177 µm	2
Pijler 2		Pijler	177 µm	2
Pijler 3		Pijler	177 µm	2
Finale score corrosie	Pijler	Minimale waarde:	2	
I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	i	4
	Overspanning 2	Langsligger	i	4
	Overspanning 3	Langsligger	ii	3
	Overspanning 4	Langsligger	ii	3
	Finale score inspectie	Langsligger	Minimale waarde:	3
	Dwarsliggers	Dwarsligger	ii	3
	Finale score inspectie	Dwarsligger	Minimale waarde:	3
	Pijler 1	Pijler	i	4
	Pijler 2	Pijler	i	4
	Pijler 3	Pijler	i	4
Finale score inspecties	Pijler	Minimale waarde:	4	
R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	87		
	Deelscore dwarsliggers	87		
	Deelscore pijlers	97		
	Gezondheidsscore (voor correctie)	88		
	Correctiefactor leeftijd	0.95		
	Gezondheidsscore (na correctie)	84		
	Gezondheidsklasse	A		
	Beschrijving + Maatregel			
	Constructie in nieuwstaat, geen actie vereist			
	Corrosie werd bepaald op basis van de formules uit NBN EN ISO 9224, door het gebrek aan sensordata			

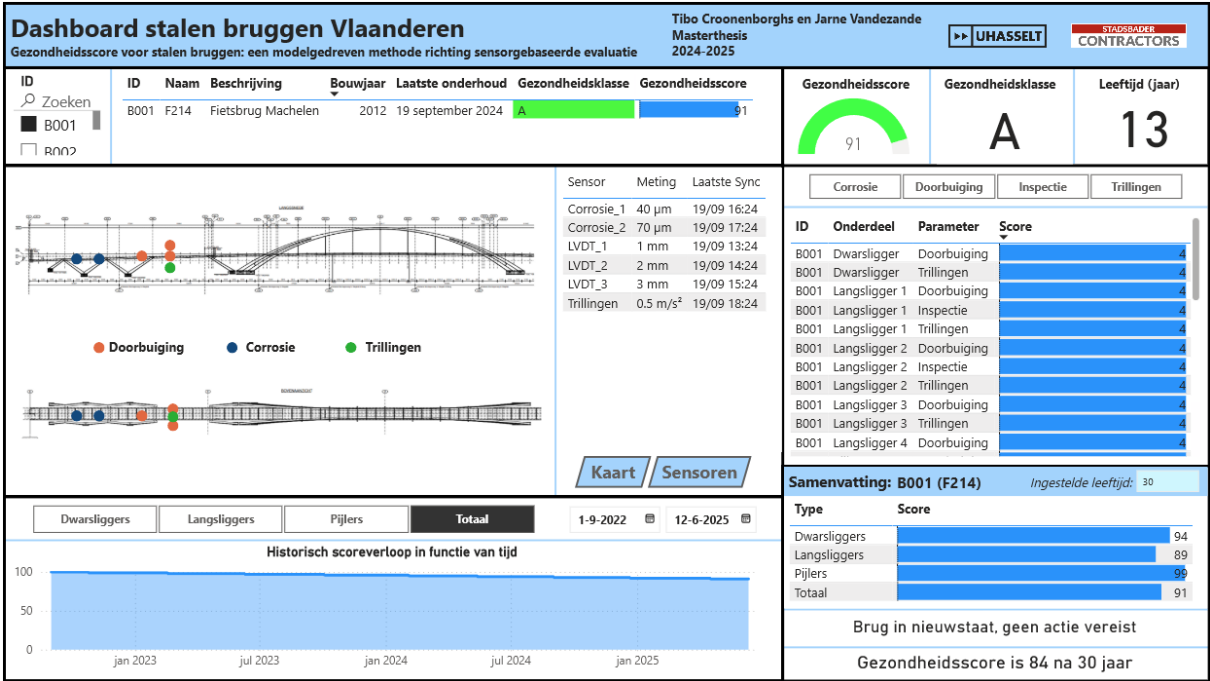
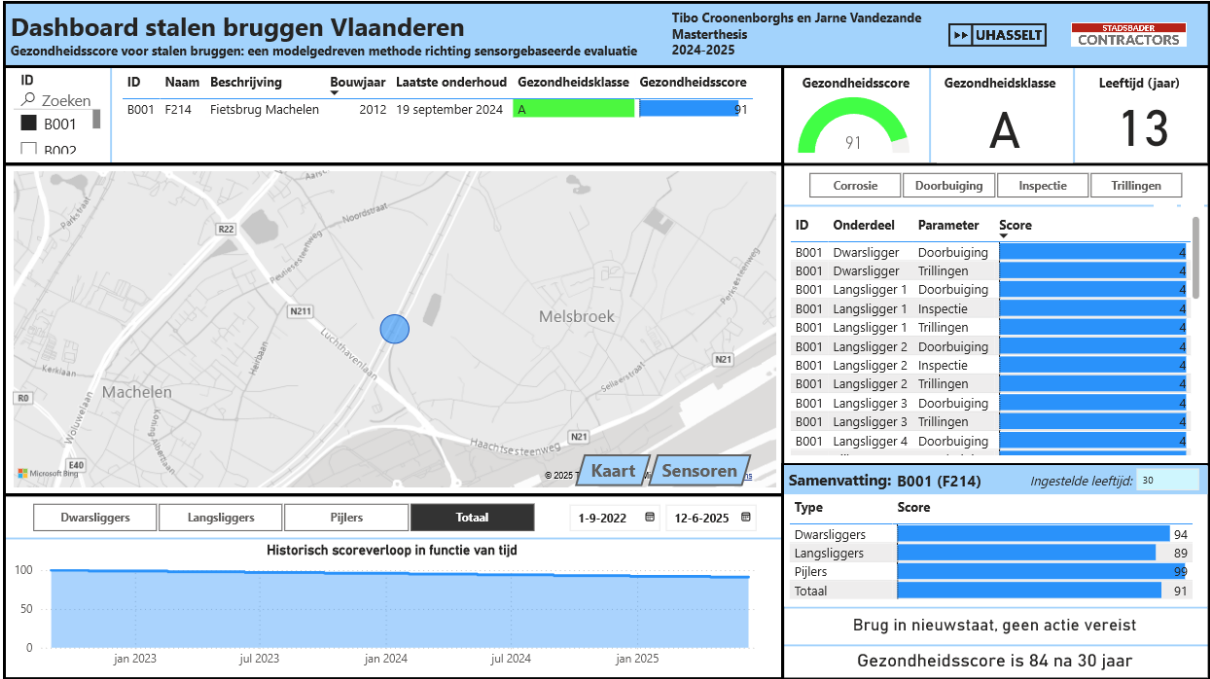
Projectlocatie: Diabolo-project F214					
G E G E V E N S	Leeftijd	50 jaar	STADSBADER CONTRACTORS ▶▶ UHASSELT		
	Wegingsfactor doorbuiging	54 %			
	Wegingsfactor trillingen	30 %			
	Wegingsfactor corrosie	6 %			
	Wegingsfactor inspectie	10 %			
	Combinatiefactor langsliggers	60 %			
	Combinatiefactor dwarsliggers	26 %			
	Combinatiefactor pijlers	14 %			
	Overspanning 1	13.8 m			
	Overspanning 2	16.5 m			
	Overspanning 3	17.5 m			
	Overspanning 4	22 m			
	Dwarsliggers	4.4 m			
	Lengte pijler 1	6.7 m			
Lengte pijler 2	10 m				
Lengte pijler 3	11.8 m				
D O O R B U I G I N G	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score	
	Overspanning 1	Langsligger	9.2 mm (L/1500)	4	
	Overspanning 2	Langsligger	9.6 mm (L/1719)	4	
	Overspanning 3	Langsligger	9.1 mm (L/1923)	4	
	Overspanning 4	Langsligger	18.9 mm (L/1164)	3	
	Finale score doorbuiging	Langsligger	Minimale waarde:	3	
	Dwarsliggers	Dwarsligger	3.6 mm (L/1222)	4	
	Finale score doorbuiging	Dwarsligger	Minimale waarde:	4	
	Pijler 1	Pijler	0.9 mm (L/7444)	4	
	Pijler 2	Pijler	3.2 mm (L/3125)	4	
	Pijler 3	Pijler	2.8 mm (L/4214)	4	
	Finale score doorbuiging	Pijler	Minimale waarde:	4	
	T R I L L I N G E N	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
		Overspanning 1	Langsligger	0.076 m/s²	4
Overspanning 2		Langsligger	0.088 m/s²	4	
Overspanning 3		Langsligger	0.037 m/s²	4	
Overspanning 4		Langsligger	0.583 m/s²	3	
Finale score trillingen		Langsligger	Minimale waarde:	3	
Dwarsliggers		Dwarsligger	0.595 m/s²	3	
Finale score trillingen		Dwarsligger	Minimale waarde:	3	
Pijler 1		Pijler	0.003 m/s²	4	
Pijler 2		Pijler	0.029 m/s²	4	
Pijler 3		Pijler	0.018 m/s²	4	
Finale score trillingen		Pijler	Minimale waarde:	4	
C O R R O S I E *		Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
		Overspanning 1	Langsligger	474 µm	2
	Overspanning 2	Langsligger	474 µm	2	
	Overspanning 3	Langsligger	474 µm	2	
	Overspanning 4	Langsligger	474 µm	2	
	Finale score corrosie	Langsligger	Minimale waarde:	2	
	Dwarsliggers	Dwarsligger	474 µm	2	
	Finale score corrosie	Dwarsligger	Minimale waarde:	2	
	Pijler 1	Pijler	474 µm	2	
	Pijler 2	Pijler	474 µm	2	
	Pijler 3	Pijler	474 µm	2	
	Finale score corrosie	Pijler	Minimale waarde:	2	
	I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
		Overspanning 1	Langsligger	ii	3
Overspanning 2		Langsligger	i	4	
Overspanning 3		Langsligger	ii	3	
Overspanning 4		Langsligger	ii	3	
Finale score inspectie		Langsligger	Minimale waarde:	3	
Dwarsliggers		Dwarsligger	ii	3	
Finale score inspectie		Dwarsligger	Minimale waarde:	3	
Pijler 1		Pijler	i	4	
Pijler 2		Pijler	i	4	
Pijler 3		Pijler	i	4	
Finale score inspecties		Pijler	Minimale waarde:	4	
R E S U L T A A T		Deelscore langsliggers	74		
		Deelscore dwarsliggers	87		
	Deelscore pijlers	97			
	Gezondheidsscore (voor correctie)	80			
	Correctiefactor leeftijd	0.90			
	Gezondheidsscore (na correctie)	72			
	Gezondheidsklasse	B			
	Beschrijving + Maatregel				
	Constructie voldoet ruimschoots, normale monitoring				
	Corrosie werd bepaald op basis van de formules uit NBN EN ISO 9224, door het gebrek aan sensordata				

Projectlocatie: Diabolo-project F214				
G E G E V E N S	Leeftijd	100 jaar	STADSBADER CONTRACTORS ►► UHASSELT	
	Wegingsfactor doorbuiging	54 %		
	Wegingsfactor trillingen	30 %		
	Wegingsfactor corrosie	6 %		
	Wegingsfactor inspectie	10 %		
	Combinatiefactor langsliggers	60 %		
	Combinatiefactor dwarsliggers	26 %		
	Combinatiefactor pijlers	14 %		
	Overspanning 1	13.8 m		
	Overspanning 2	16.5 m		
	Overspanning 3	17.5 m		
	Overspanning 4	22 m		
	Dwarsliggers	4.4 m		
	Lengte pijler 1	6.7 m		
	Lengte pijler 2	10 m		
Lengte pijler 3	11.8 m			
D O O R B U I G I N G	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	10.7 mm (L/1290)	4
	Overspanning 2	Langsligger	11.2 mm (L/1473)	4
	Overspanning 3	Langsligger	11.5 mm (L/1078)	4
	Overspanning 4	Langsligger	20.4 mm (U/1078)	2
	Finale score doorbuiging	Langsligger	Minimale waarde:	2
	Dwarsliggers	Dwarsligger	4 mm (U/1100)	2
	Finale score doorbuiging	Dwarsligger	Minimale waarde:	2
	Pijler 1	Pijler	1.4 mm (U/4786)	4
	Pijler 2	Pijler	4.1 mm (L/2439)	4
	Pijler 3	Pijler	3.6 mm (U/3278)	4
	Finale score doorbuiging	Pijler	Minimale waarde:	4
T R I L L I N G E N	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	0.091 m/s ²	4
	Overspanning 2	Langsligger	0.102 m/s ²	4
	Overspanning 3	Langsligger	0.042 m/s ²	4
	Overspanning 4	Langsligger	0.705 m/s ²	2
	Finale score trillingen	Langsligger	Minimale waarde:	2
	Dwarsliggers	Dwarsligger	0.712 m/s ²	2
	Finale score trillingen	Dwarsligger	Minimale waarde:	2
	Pijler 1	Pijler	0.004 m/s ²	4
	Pijler 2	Pijler	0.031 m/s ²	4
	Pijler 3	Pijler	0.021 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Pijler	Minimale waarde:	4
C O R R O S I E *	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	707 µm	1
	Overspanning 2	Langsligger	707 µm	1
	Overspanning 3	Langsligger	707 µm	1
	Overspanning 4	Langsligger	707 µm	1
	Finale score corrosie	Langsligger	Minimale waarde:	1
	Dwarsliggers	Dwarsligger	707 µm	1
	Finale score corrosie	Dwarsligger	Minimale waarde:	1
	Pijler 1	Pijler	707 µm	1
	Pijler 2	Pijler	707 µm	1
	Pijler 3	Pijler	707 µm	1
	Finale score corrosie	Pijler	Minimale waarde:	1
I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	i	4
	Overspanning 2	Langsligger	ii	3
	Overspanning 3	Langsligger	ii	3
	Overspanning 4	Langsligger	v	0
	Finale score inspectie	Langsligger	Minimale waarde:	0
	Dwarsliggers	Dwarsligger	v	0
	Finale score inspectie	Dwarsligger	Minimale waarde:	0
	Pijler 1	Pijler	i	4
	Pijler 2	Pijler	ii	3
	Pijler 3	Pijler	iv	1
	Finale score inspecties	Pijler	Minimale waarde:	1
R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	44		
	Deelscore dwarsliggers	44		
	Deelscore pijlers	88		
	Gezondheidsscore (voor correctie)	50		
	Correctiefactor leeftijd	0.8		
	Gezondheidsscore (na correctie)	39		
	Gezondheidsklasse	D		
	Beschrijving + Maatregel			
	Constructie voldoet niet, urgente onderhoudsnoed			
	Corrosie werd bepaald op basis van de formules uit NBN EN ISO 9224, door het gebrek aan sensordata			

BIJLAGE D: VOORBEELDBEREKENING HUIDIGE SITUATIE F214

Projectlocatie: Diabolo-project F214				
G E G E V E N S	Leeftijd	13 jaar	STADSADER CONTRACTORS ► UHASSELT	
	Wegingsfactor doorbuiging	54 %		
	Wegingsfactor trillingen	30 %		
	Wegingsfactor corrosie	6 %		
	Wegingsfactor inspectie	10 %		
	Combinatiefactor langsliggers	60 %		
	Combinatiefactor dwarsliggers	26 %		
	Combinatiefactor pijlers	14 %		
	Overspanning 1	13.8 m		
	Overspanning 2	16.5 m		
	Overspanning 3	17.5 m		
	Overspanning 4	22 m		
	Dwarsliggers	4.4 m		
	Lengte pijler 1	6.7 m		
Lengte pijler 2	10 m			
Lengte pijler 3	11.8 m			
D O O R B U I G I N G	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	8.4 mm (L/1643)	4
	Overspanning 2	Langsligger	8.9 mm (L/1854)	4
	Overspanning 3	Langsligger	8.8 mm (L/1989)	4
	Overspanning 4	Langsligger	18.1 mm (L/1215)	4
	Finale score doorbuiging	Langsligger	Minimale waarde:	4
	Dwarsliggers	Dwarsligger	2.8 mm (L/1571)	4
	Finale score doorbuiging	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0.8 mm (L/8375)	4
	Pijler 2	Pijler	3.1 mm (L/3226)	4
	Pijler 3	Pijler	2.6 mm (L/4538)	4
	Finale score doorbuiging	Pijler	Minimale waarde:	4
T R I L L I N G E N	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	0.071 m/s ²	4
	Overspanning 2	Langsligger	0.077 m/s ²	4
	Overspanning 3	Langsligger	0.033 m/s ²	4
	Overspanning 4	Langsligger	0.551 m/s ²	3
	Finale score trillingen	Langsligger	Minimale waarde:	3
	Dwarsliggers	Dwarsligger	0.524 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Dwarsligger	Minimale waarde:	4
	Pijler 1	Pijler	0.003 m/s ²	4
	Pijler 2	Pijler	0.026 m/s ²	4
	Pijler 3	Pijler	0.015 m/s ²	4
	Finale score trillingen	Pijler	Minimale waarde:	4
C O R R O S I E *	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	105 µm	3
	Overspanning 2	Langsligger	105 µm	3
	Overspanning 3	Langsligger	105 µm	3
	Overspanning 4	Langsligger	105 µm	3
	Finale score corrosie	Langsligger	Minimale waarde:	3
	Dwarsliggers	Dwarsligger	105 µm	3
	Finale score corrosie	Dwarsligger	Minimale waarde:	3
	Pijler 1	Pijler	105 µm	3
	Pijler 2	Pijler	105 µm	3
	Pijler 3	Pijler	105 µm	3
	Finale score corrosie	Pijler	Minimale waarde:	3
I N S P E C T I E	Beschrijving	Constructiedeel	Meetwaarde	Score
	Overspanning 1	Langsligger	i	4
	Overspanning 2	Langsligger	i	4
	Overspanning 3	Langsligger	ii	3
	Overspanning 4	Langsligger	ii	3
	Finale score inspectie	Langsligger	Minimale waarde:	3
	Dwarsliggers	Dwarsligger	iii	2
	Finale score inspectie	Dwarsligger	Minimale waarde:	2
	Pijler 1	Pijler	i	4
	Pijler 2	Pijler	i	4
	Pijler 3	Pijler	i	4
	Finale score inspecties	Pijler	Minimale waarde:	4
R E S U L T A A T	Deelscore langsliggers	89		
	Deelscore dwarsliggers	94		
	Deelscore pijlers	99		
	Gezondheidsscore (voor correctie)	91		
	Correctiefactor leeftijd	1		
	Gezondheidsscore (na correctie)	91		
	Gezondheidsklasse	A		
	Beschrijving + Maatregel			
Constructie in nieuwstaat, geen verdere actie vereist				
Corrosie werd bepaald op basis van de formules uit NBN EN ISO 9224, door het gebrek aan sensordata				

BIJLAGE E: DASHBOARD GEZONDHEIDSSCORE IN POWER BI



Gezondheidsscore

Gezondheidsklasse

Leeftijd (jaar)

91

A

13

Corrosie

Doorbuiging

Inspectie

Trillingen

ID

Onderdeel

Parameter

Score

B001

Dwarsligger

Doorbuiging

4

B001

Dwarsligger

Trillingen

4

B001

Langsligger 1

Doorbuiging

4

B001

Langsligger 1

Inspectie

4

B001

Langsligger 1

Trillingen

4

B001

Langsligger 2

Doorbuiging

4

B001

Langsligger 2

Inspectie

4

B001

Langsligger 2

Trillingen

4

B001

Langsligger 3

Doorbuiging

4

B001

Langsligger 3

Trillingen

4

B001

Langsligger 4

Doorbuiging

4

Samenvatting: B001 (F214)

Ingestelde leeftijd: 30

Type

Score

Dwarsliggers

94

Langsliggers

89

Pijlers

96

Totaal

91

Brug in nieuwstaat, geen actie vereist

Gezondheidsscore is 84 na 30 jaar

Dwarsliggers

Langsliggers

Pijlers

Totaal

1-9-2022

12-6-2025

Historisch scoreverloop in functie van tijd

jan 2023

jul 2023

jan 2024

jul 2024

jan 2025

Sensor

Meting

Laatste Sync

Corrosie_1

40 µm

19/09 16:24

Corrosie_2

70 µm

19/09 17:24

LVDT_1

1 mm

19/09 13:24

LVDT_2

2 mm

19/09 14:24

LVDT_3

3 mm

19/09 15:24

Trillingen

0.5 m/s²

19/09 18:24

Doorbuiging

Corrosie

Trillingen

Kaart

Sensoren