

JESPER AALBERS
JOOST HAEFKENS
CAN YILDIZ

START
BRUG
CALCULATIE

100%

TERUG NAAR DE BASIS MET KLASSIEKE MECHANICA

Met eenvoudige berekeningen de krachtswerking inzichtelijk maken

Terug naar de basis met Klassieke Mechanica

Met eenvoudige berekeningen de krachtswerking inzichtelijk maken

Afstudeeronderzoek

Opleiding:

Civiele Techniek

Faculteit Techniek, Instituut Built Environment

Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Afstudeerrichting Constructie

Datum:

	Jesper Aalbers	Joost Haefkens	Can Yildiz	
Studentnummer	525519	525857	526699	29 mei 2018

Auteurs:

Paraaf



Begeleiders:

Afstudeerbedrijf
Adres

Royal Haskoning DHV

Bedrijfsbegeleiders

ing. A. Driesse

ing. E. de Winter

Paraaf

Afstudeerbegeleiders
Paraaf

ir. T. Beuker

ing. J. Rikken

Voorwoord

Voor u ligt ons afstudeeronderzoek waarin wij de klassieke mechanica hebben toegepast om inzicht te verkrijgen in de krachtswerking van verkeersviaducten. Dit afstudeeronderzoek hebben wij uitgevoerd ter afronding van de voltijd opleiding Civiele Techniek, met de specialisatierichting “Constructie”, aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen. Dit rapport is gericht op mensen met een (civiel)technische achtergrond.

In het derde jaar zijn wij een zoektocht gestart naar een interessant onderwerp voor ons afstuderen in het vierde jaar, dit heeft geleid tot het contact met Royal HaskoningDHV. Vanuit een breed scala aan vraagstukken die liggen binnen het bedrijf, is het voorstel gedaan het onderzoek te richten op de klassieke mechanica. Dit voorstel klonk ons als muziek in de oren, omdat de mechanica veel mogelijkheid tot verdieping biedt.

Een samenwerking die bestaat uit drie afstudeerders is niet gebruikelijk. Binnen dit onderzoek is ons groepsverband juist een kracht gebleken. Het waren vier leerzame maanden waarin niet alleen veelvuldig gediscussieerd is over de verschillende theorieën, maar ook communicatie een essentiële rol speelde binnen het team. Om de samenhang binnen het onderzoek en dit rapport te kunnen waarborgen, is een hecht samenwerkingsverband cruciaal gebleken. We hebben elkaar constant gemotiveerd en gestimuleerd gedurende het onderzoek. Met een kritische blik van drie personen naar elkaar toe, is getracht een kwalitatief zo goed mogelijk onderzoek op te zetten. Inhoudelijk is het onderzoek opgedeeld in drie mechanicamethoden die uiteindelijk gezamenlijk worden toegepast op één casus. Elk persoon heeft binnen het onderzoek een methode uitgewerkt. Een wijze les die wij hier uit getrokken hebben, is de kracht van eenvoud. Houd het simpel, dan snap je het zelf ook nog.

Graag willen wij enkele personen bedanken voor hun adviezen en steun tijdens het schrijven van dit rapport. Allereerst de heer A. Driesse en de heer E. de Winter vanuit Royal HaskoningDHV voor hun inbreng en sturing die zij gedurende het afstudeertraject hebben geboden. Daarnaast onze begeleiders vanuit de HAN, de heer T. Beuker en de heer J. Rikken, voor hun enthousiasme en raad tijdens de 3-wekelijkse gesprekken die wij met hen hadden op de locatie in Arnhem. Wij danken jullie allen voor deze leerzame periode.

Veel leesplezier gewenst,

Jesper Aalbers, Joost Haefkens en Can Yildiz

Nijmegen, mei 2018

Samenvatting

Elke jonge afgestudeerde constructeur, die net van de hogeschool of universiteit afkomt, staat aan het begin van het leertraject dat hij gedurende zijn carrière zal afleggen. Door de automatisering van berekeningen in allerlei complexe programma's, is de noodzaak van het inzicht in de krachtswerking op de achtergrond geraakt. De automatisering brengt vele voordelen met zich mee, maar kent ook valkuilen en dat moet niet ten koste gaan van het inzicht. Het inzicht kan alsnog verkregen worden door uitgebreide berekeningen te versimpelen aan de hand van klassieke mechanica. De constructeur moet namelijk aan de hand van zijn kennis en inzicht snel kunnen beredeneren of de resultaten van complexe softwareprogramma's kloppen. Dit probleem doet zich voor in het ontwerp van alle soorten constructies, maar dit onderzoek is gericht op dekconstructies van verkeersviaducten. Om te onderzoeken of dit mogelijk is, is de volgende vraag tot stand gekomen: "Hoe kunnen klassieke mechanica-methoden worden toegepast op de berekening van een betonnen statisch-onbepaalde dek-constructie van een verkeersviaduct, om inzicht te verkrijgen in de krachtswerking en benodigde dimensies?"

Er is een grote hoeveelheid aan theorie beschikbaar over krachtswerking, daarom is onderzocht welke methoden de krachtswerking zo eenvoudig mogelijk inzichtelijk maken. Op basis van het type belasting en constructie zijn drie verschillende methoden onderzocht: de methode invloedslijnen, de methode Clapeyron en de methode Guyon-Massonnet. Elke methode achterhaalt een deel van het inzicht dat nodig is om de maatgevende krachten voor het dekontwerp te bepalen. Naderhand zijn met deze drie methoden verschillende vraagstukken behandeld. Denk hierbij aan het definiëren van vuistregels voor het bepalen van de constructiehoogte, invloed van de verschillende overspanningsverhoudingen en het bepalen van de meest ongunstige belastingposities van mobiele verkeersbelasting. De berekeningen van de drie verschillende methoden zijn uiteindelijk gezamenlijk toegepast op een casus.

Alle drie de methoden zijn onderzocht met gebruik van Mathcad en Excel. De rekensheets zijn dusdanig opgesteld, dat na het wijzigen van de parameters, direct de uitwerking kan worden gezien in de rekenstappen en resultaten. In de rekensheets zijn met verschillende belangrijke factoren rekening gehouden. Als eerste zijn de belangrijkste toetsingen voor het bepalen van constructiehoogtes meegenomen, zoals scheurwijdte, stijfheid en maximale wapeningspercentage. Ten tweede is rekening gehouden met bijzondere situaties zoals een afwijkende overspanningshoek of een in breedte verlopende constructiehoogte. Als laatste zijn controles in de berekeningen verwerkt om veelgemaakte fouten te voorkomen. Denk hierbij aan controle van verticaal-, horizontaal- en momentevenwicht.

Uit de resultaten van de casus is gebleken, dat voor een afwijkende situatie het resultaat voor een groot gedeelte klopt. Dit geldt niet voor constructies met voorspanning, dit dient nog verder uitgezocht te worden. Met dit onderzoek is hiermee aangetoond dat elke constructeur, door versimpelde berekeningen uit de klassieke mechanica toe te passen, op een eenvoudige wijze de resultaten kan beoordelen. Een belangrijke aanbeveling op basis van dit onderzoek is het uitbreiden van het aantal methoden, zodat verschillende type constructies berekend kunnen worden zoals de onderbouw van viaducten, tunnels en liggers met voorspanning.

Summary

Every young structural engineer, who just graduated from the University of Applied Sciences or university, is starting his learning curve. Because of automatization of calculations in various complex programs, the necessity of insight in forces has been neglected. Automatization has lots of benefits, but the detriment of insight is something undesirable. That is why it is relevant to look if the comprehensive calculations can be simplified by using classical applied mechanics. The structural engineer has to be able to reason with his knowledge and insight, if the results of complex software programs are correct or not. This kind of problem can occur in calculations of any type of constructions, but this thesis is focused on the deck construction of a traffic viaduct. To investigate the possibility of this, the following main question has been formulated: "How can classical applied mechanics methods be used on the calculations of a statically indeterminate concrete traffic viaduct, to get insight in the forces and the required dimensions?"

There is a huge amount of information available about forces, so there has been investigated which methods can be applied as simple as possible to get insight in this. Based on the type of loads and the construction, there are three different methods investigated to answer the main question: influence lines, the method Clapeyron and Guyon Massonnet. Every method captures a part of insight that is necessary to determine the forces in order to establish the dimensions of the deck. Afterwards, the three methods have been used to examine different issues. E.g. determining rules of thumb in order to get the construction heights, the influence of various spans and determining the most unfavorable positions of mobile loads. Calculations of the three methods combined are used in a case study.

All the methods are investigated by using Mathcad or Excel. The calculation sheets are made in a such way, that after changing the parameters, the effects on the results and calculation steps can be assessed. In the calculation sheets, different types of factors have been considered. First, there are the most important tests to determine the construction heights involved. Examples for this are crack width, deflection and the maximum percentage of reinforcement. Second, there has been considered that exceptional situations like divergent span angles and (in width) changing construction heights can be calculated. Finally, there are multiple checks in the calculations in order to prevent the most common mistakes engineers make in their calculations, like vertical, horizontal and bending moment balance of forces.

Due to the results of the case it has been demonstrated that an aberrant situation is correct in for high. The same does not apply for prestressed concrete structures, this need to be investigated further. With this thesis, it has been demonstrated that every structural engineer, by using simplified calculations of classical applied mechanics, is able to review the results easily. It is recommended we want to expand this thesis by investigating more methods, in order to calculate different type of constructions like the substructure of a viaduct, tunnels and prestressed girders.

Zusammenfassung

Jeder junge Diplom-Konstrukteur, der gerade Hochschule oder Universität abgeschlossen hat, steht am Anfang des Lernprozesses, den er während seiner Karriere durchgehen wird. Durch die Automatisierung von Berechnungen in allen Arten von komplexen Programmen, ist die Notwendigkeit von Einblick in die Wirkung von mechanische Kräfte im Hintergrund geraten.

Die Automatisierung bringt viele Vorteile, aber hat auch Fallstricke, und das sollte nicht auf Kosten der Einsicht gehen. Einblick kann erhalten werden durch umfangreichen Berechnungen zu vereinfachen mit Hilfe von klassische Mechanik. Der Konstrukteur muss nämlich sein Wissen anwenden um schnell zu verstehen ob die Ergebnisse komplexer Softwareprogramme stimmen. Dieses Problem tritt beim Entwerfen aller Arten von Konstruktionen auf, aber diese Forschung konzentriert sich auf Deckenkonstruktionen von Verkehrsviadukten. Um zu untersuchen, wie weit dies möglich ist, ist die folgende Frage entstanden: "Wie können klassische Mechanik Methoden auf die Berechnung einer statisch-unbestimmte Beton-Deckenkonstruktion von eines Viadukts angewendet werden, um Einblick in die Wirkung der Kräfte und die Dimensionen zu bekommen?"

Es gibt eine große Menge an Theorien über die Wirkung von Kräften. Deshalb ist untersucht worden welche Methoden die einfachste Einsicht in die Kraftwirkung möglich machen. Basierend auf der Art der Belastung und Konstruktionen, wurden drei verschiedene Methoden untersucht: die Methode 'Einflusslinien', die Methode Clapeyron und die Methode GuyonMassonnet. Jede Methode zeigt einen Teil der Einsicht, die benötigt wird, um die normativen Kräfte für das Deckdesign zu bestimmen. Nachher sind mit diese Methoden verschiedene Fragen behandelt. Denke zum Beispiel an das Bestimmen der Faustregeln um Konstruktionshöhen, das Bestimmen der Einfluss der verschiedenen Span-Verhältnisse und das Bestimmen von die meist ungünstigste Lastpositionen von mobile Verkehrsbelastungen. Die Berechnungen der drei verschiedenen Methoden wurden letztlich gemeinsam auf einen Fall angewandt.

Alle drei Methoden wurden mit der Hilfe von Mathcad und Excel untersucht. Die Berechnungsbögen sind so eingerichtet, dass nach Änderung der Parameters, gleich die Wirkung eingesehen werden kann in den Berechnungsschritten und in die Ergebnissen. In die Kalkulationstabellen sind verschiedene wichtige Variationen berücksichtigt worden. Als erste sind die wichtigste Tests zur Bestimmung Konstruktionshöhen in Betracht gezogen wie Rissbreite, Durchbiegung und Maximal Prozentsatz der Verstärkung. Zweitens sind besondere Situationen berücksichtigt wie die Abweichung der Winkel der Überspannung oder eine Konstruktion Höhe Änderung über die Breite. Zuletzt wurden die Überprüfungen in den Berechnungen verarbeitet um häufig gemachte Fehler zu vermeiden. Denken Sie zum Beispiel an die Kontrolle von Vertikal-, Horizontal- und Momentbilanz.

Die Ergebnisse der studierte Fall zeigen das auch für anormale Situationen die Ergebnissen Großteils korrekt sind. Mit dieser Forschung hat sich gezeigt, dass jeder Konstrukteur, durch vereinfachte Berechnungen aus der klassischen Mechanik anzuwenden, auf eine einfache Art und Weise Ergebnisse beurteilen kann. Eine wichtige Empfehlung auf Basis dieser Forschung ist die Erhöhung der Anzahl der angewendeter Methoden, so dass verschiedene Konstruktionstypen berechnet werden können wie die Unterkonstruktion von Viadukten, Tunnel und Konstruktionen mit Balken mit Vorspannung.

Symbolenlijst

Invloedslijnen

α Correctiefactor voor de belastingen

Methode Clapeyron

In onderstaande lijst zijn in een aantal symbolen ook een x verwerkt, welke aangeeft om welke overspanning het van de ligger betreft. ($x = 1, 2, 3, 4$ etc.)

a_x	Afstand van puntlast tot een bepaald steunpunt
a	Factor voor lengteverhouding van zijveld ten opzichte van de totale lengte ligger
q_x	Lijnlast
L_x	Lengte van overspanning
A_x	Oppervlakte van momentenlijn
E_x	Elasticiteitsmodulus
I_x	Traagheidsmoment
M_x	Moment
F_1	Puntlast
X_x	Afstand van steunpunt tot zwaartepunt momentenlijn
θ_{sx}	Hoekverdraaiing, s = steunpunt ($s = A, B, C, D$ etc.)

Methode Guyon Massonnet

a	Excentriciteit van deeloppervlak t.o.v. totale oppervlakte
b	Breedte (algemeen)
b	Halve dek-breedte (Guyon-Massonnet)
e	Excentriciteit van last t.o.v. dekmidden over de y -as (Guyon-Massonnet)
h	Hoogte
i	Buigstijfheid per lengte eenheid y -as (moerbalk)
i_0	Torsiestijfheid per lengte eenheid x -as (moerbalk)
j	Buigstijfheid per lengte eenheid x -as (kinderbint)
j_0	Torsiestijfheid per lengte eenheid y -as (kinderbint)
q	Lijnlast
y	Excentriciteit beschouwde ligger t.o.v. dekmidden (Guyon-Massonnet)
A	Oppervlakte van doorsnede
A_v	Verticale reactiekracht uit steunpunt A
C	Veerconstante
C	Correctiefactor doorgaande ligger (Guyon Massonnet)
E	Elasticiteitsmodulus
F	Puntlast
G	Glijdingsmodulus
I	Traagheidsmoment

K	Invloedsfactor (Guyon-Massonnet)
K_0	Invloedsfactor zonder torsieweerstand
K_1	Invloedsfactor met maximale torsieweerstand
K_a	Geïnterpoleerde invloedsfactor
L	Overspanning
M	Moment
α	Torsieparameter (Guyon-Massonnet)
δ_z	Verticale doorbuiging
θ	Stijfheidsparameter (Guyon-Massonnet)
ν	Dwarscontractie coëfficiënt (Poisson-factor)

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

Summary

Zusammenfassung

Symbolenlijst

Inleiding	1
Hoofdstuk 1: Afbakening afstudeeronderzoek	4
1.1 Algemeen	4
1.2 Afbakening – Methode Invloedslijnen	4
1.3 Afbakening – Methode Clapeyron	5
1.4 Afbakening – Methode Guyon Massonnet	5
Hoofdstuk 2: Belastingen	6
2.1 Wegverkeer	6
2.2 Spoorwegverkeer	7
Hoofdstuk 3: Invloedslijnen	9
3.1 Belang van invloedslijn	9
3.2 Invloedslijnen voor vier steunpunten	11
3.2.1 Belastingen	12
3.3 Analyse	13
3.3.1 Werkwijze	13
3.3.2 Spoorwegverkeer	16
3.4 Conclusie	18
Hoofdstuk 4: Methode Clapeyron	19
4.1 Het principe van methode Clapeyron	19
4.2 Rekenblad	24
4.3 Analyse	26
4.4 Conclusie	28
Hoofdstuk 5: Methode Guyon Massonnet	29
5.1 Probleemstelling – het plaat- & balkroosterprobleem	29
5.2 Methode Guyon Massonnet	32
5.2.1 Invoer: de factor θ	33
5.2.2 Uitvoer: de factor K	33
5.2.3 Validatie methode Guyon Massonnet	35
5.2.4 Validatie 1 - Vergelijking met balkrooster	36
5.2.5 Validatie 2 – vergelijking met orthotrope plaat	37
5.3 Conclusie Guyon-Massonnet	39
Hoofdstuk 6: Vuistregels en kosten	41
6.1 Vuistregels	41
6.1.1 Uitgangspunten	42
6.1.2 Werkwijze	42
6.1.3 Resultaten Vuistregels	44
6.1.4 Resultaten Vuistregels – Wegverkeersviaducten	44

6.1.5	Resultaten Vuistregels – Spoorwegverkeersviaducten	46
6.2	Kosten	47
Hoofdstuk 7: Casus: verkeersviaduct - Waterkruising De Swette		50
7.1	Uitgangspunten	50
7.2	Belastingen	51
7.2.1	Permanente belasting	51
7.2.2	Mobiele belasting	52
7.3	Werkwijze	52
7.4	Resultaten	53
7.5	Discussie resultaten	54
Hoofdstuk 8: Conclusie		57
Nawoord		58
Bibliografie		59
Bijlagen		61
	Bijlage I –Invloedslijnen	61
	Bijlage II – De methode Clapeyron	61
	Bijlage III – Guyon Massonnet	61
	Bijlage IV - Vuistregels & Kosten	61
	Bijlage V – Casus: De Swette	61
	Bijlage VI – Rekenblad	61
	Bijlage VII - Overige	61

Inleiding

Meer dan 30 jaar geleden was in ieder geval één persoon in Nederland zich bewust van de ontwikkeling die plaatsvond binnen de bouw- en civieltechnische sector, zijn naam is ir.

W.A. Eisma. Ingenieur Eisma schreef in de jaren 80 een boek genaamd “Spelen met momenten” waarin hij betoogt dat door de automatisering die toen al aan de gang was, de nieuwe generatie ingenieurs aan inzicht tekort zou komen. Ook in het boek betreft zijn afscheidscollege genaamd “Zo kan het ook... en moet het”, stelt hij: “De consequenties zijn duidelijk, automatisering mag en kan nooit een legitimatie zijn voor onvoldoende kennis en inzicht in de krachtswerking in draagconstructies.”

Toen wij in juli 2017 voor het eerst in gesprek gingen met de heren A. Driesse en E. de Winter, werden meerdere voorbeelden genoemd waarbij problemen zijn ontstaan in het ontwerp dan wel in de uitvoering van projecten. Dit vond plaats doordat er in de gebruikte software afwijkende aannames zijn gedaan ten opzichte van wat de constructeur had verwacht. De software is zo complex dat gerichte controle van de uitkomsten moeilijk, zo niet onmogelijk, is te controleren. Hierdoor konden fouten niet voldoende worden herkend. Dergelijke misstappen zouden tijdens de diverse controlerondes in het ontwerpproces naar boven moeten komen. Om dit te bewerkstelligen zouden de constructies herberekend kunnen worden met behulp van klassieke toegepaste mechanica. Dit stelt de constructeur in staat de berekeningsmethode goed te volgen en te doorgronden met als resultaat een goed inzicht in het gedrag van de constructie.

Het is belangrijk dat iedere constructeur op basis van eigen inzichten een indicatie kan geven van de krachtswerking en dimensies, maar ook de kosten die hieraan verbonden zijn. Daarom is dit onderzoek gericht op diverse mechanica-methoden, om deze vervolgens toe te passen op een statisch onbepaalde verkeersviaduct, zodat snel een schatting kan worden gemaakt van de krachtswerking. Dit onderzoek wil het inzicht van constructeurs vergroten, zodat ingewikkelde rekenmodellen geïnterpreteerd kunnen worden. Daarmee is dit onderzoek praktisch relevant.

Door het toenemende aantal normen, toenemende verwijzingen tussen de normen en extra normen en voorschriften van de opdrachtgever, heeft de constructeur steeds meer verschillende eisen die aangetoond moeten worden. Hierin biedt de automatisering een goede oplossing, mede doordat een grote hoeveelheid aan informatie verwerkt kan worden binnen een softwarepakket of rekenblad. Echter, heeft dit tevens een keerzijde. Door de toenemende complexiteit achter de schermen van deze programma's, raakt de constructeur het overzicht kwijt. Om dit probleem aan te kunnen pakken, dient terug gegaan te worden naar de basis. De alomvattende hoofdvraag voor deze kwestie is daarom:

“Hoe kunnen klassieke mechanica-methoden worden toegepast op het ontwerpproces van een statisch-onbepaalde betonnen dek-constructie van een verkeersviaduct, om inzicht te verkrijgen in de krachtswerking en benodigde dimensies?”

Om tot een antwoord op de hoofdvraag te kunnen komen, zijn deelvragen opgesteld die gezamenlijk moeten leiden tot het beantwoorden van de hoofdvraag:

1. Wat zijn de maatgevende belastingen en belastingcombinaties op een verkeersviaduct en wat is hun invloed op krachtswerking in de constructie?

Om klassieke mechanica-methoden te kunnen beoordelen op hun nut en toepassing moet bekend zijn met welke belastingen de brug belast wordt en waar (en wanneer/hoe vaak) deze op de constructie kunnen plaatsvinden.

2. Welke klassieke mechanica-methoden leiden tot de beste benadering van een ontwerpberekening van een statisch onbepaalde constructie?

Om te beginnen is informatie verzameld over de diverse klassieke mechanica-methoden die zijn ontwikkeld in de periode voordat de trend van automatisering met computermodellen werd ingezet. Per methode moet beoordeeld worden of:

- deze methode toepasbaar is voor een mechanicaschema van een brugdek;
- deze methode benodigd is bij het type belasting volgens de eurocode op een brugdek;
- indien de methode van toepassing is: zijn er betere alternatieven zonder significante afwijkingen?

3. Hoe is door middel van klassieke mechanica-methoden de krachtswerking in een statisch onbepaald verkeersviaduct te bepalen?

In deze deelopdracht zijn de methoden meer in detail bestudeerd vanuit de literatuur en zijn deze uitgewerkt in rekenbladen om voor diverse formaten en typen bruggen de krachtswerking te achterhalen. Hier zal per gekozen methode meer duidelijkheid ontstaan over hun werking en beperkingen.

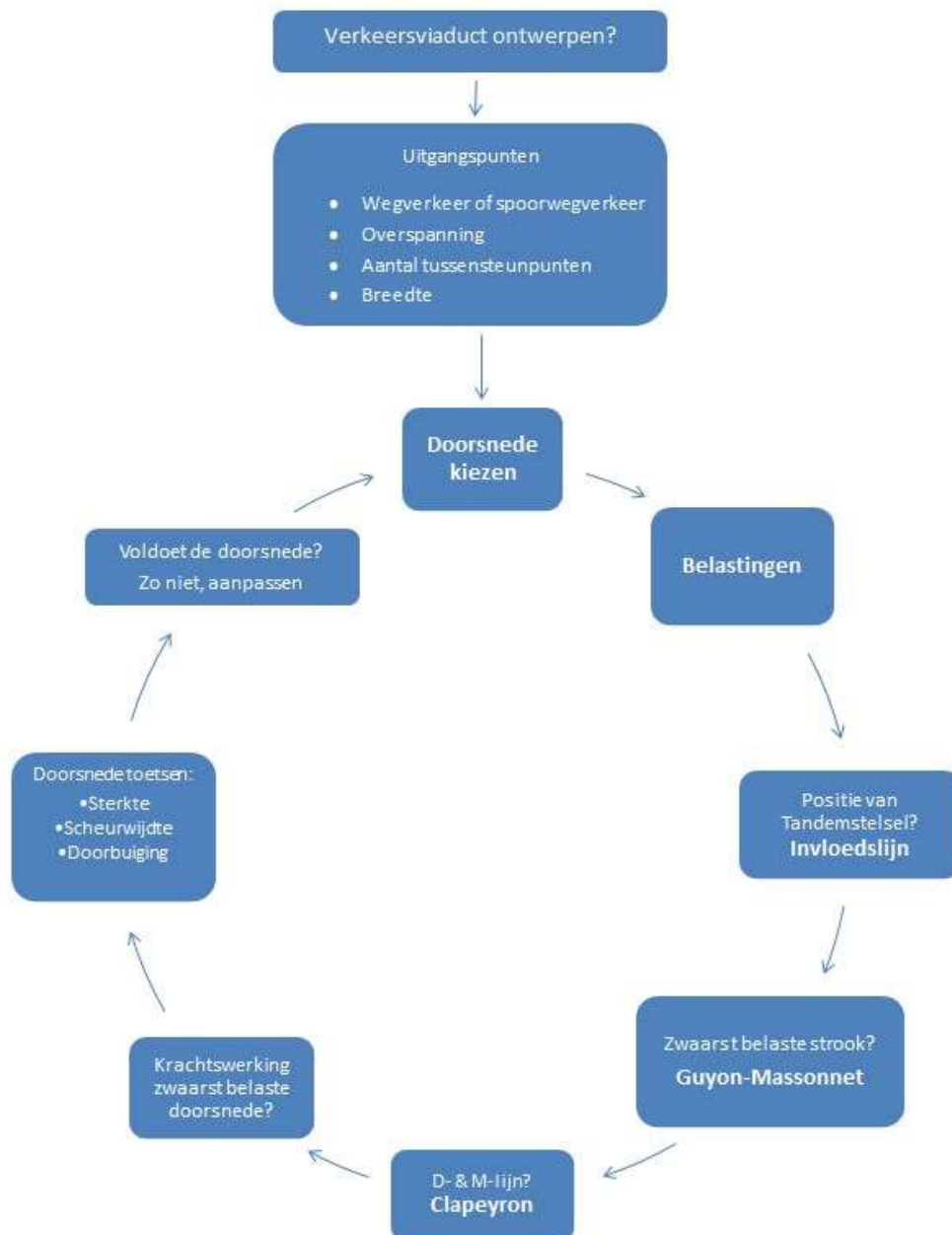
4. Wat is de spreidingsbreedte waarin momenten, dwarskracht en normaalkrachten volgens het referentieontwerp / bij diverse overspanningen in een betonnen plaat kunnen voorkomen, en met welke aanpassingen van het ontwerp zijn deze optimaal te beïnvloeden?

In deze deelopdracht zullen de verschillende klassieke mechanica-methoden samen worden toegepast in het berekenen van een casus. Vervolgens wordt gekeken hoe de krachtswerking kan worden geoptimaliseerd, rekening houdend met de benodigde dimensionering en de keuze van overspanning van eind –en middenveld.

5. Wat zijn de verschillen tussen de resultaten uit de benadering met een klassieke mechanica-methodes en een eindig-elementenmodel van dezelfde situatie, en hoe zijn deze te minimaliseren of te verklaren?

Het onderzoek is in meerdere delen opgedeeld. Zo zullen eerst de belastingmodellen behandeld worden. Hierna wordt elke methode afzonderlijk behandeld waarin de basis, de rekenbladen en de validatie naar voren komen. Dit rapport eindigt met de meest belangrijke toets: Is het mogelijk om bij een al uitgevoerde en doorgerekende constructie, van een statisch-onbepaald verkeersviaduct, de krachtswerking en benodigde constructiehoogte te bepalen?

Om deze vragen te kunnen beantwoorden, wordt in dit rapport opbouwend ingegaan op de benoemde methoden. Hierin worden de grondslagen belicht, de berekeningen uitgelegd en gevalideerd. Vervolgens worden de methoden samengevoegd toegepast op een casus, een al gerealiseerde viaduct genaamd "De Swette" in Leeuwarden. Ten slotte zullen conclusies getrokken worden uit alle bevindingen die gedaan zijn tijdens het onderzoek.



Figuur 1: stroomschema werkmethode

Hoofdstuk 1: Afbakening afstudeeronderzoek

1.1 Algemeen

Op basis van de hoofdvraag en de gekozen methoden is een afbakening vastgesteld, om zo meer diepgang in de materie en de essentie van het onderzoek te kunnen waarborgen. Daarom is een algemene afbakening vastgesteld, maar ook een afbakening per methode.

1. Uitsluitend eenvoudige methoden

Dit onderzoek is er uitsluitend op gericht om de krachtswerking te bepalen met methoden waarvan de berekening goed navolgbaar is, goed bekend is waarop de methode gebaseerd is, en bij voorkeur goed met de hand na te rekenen. Gebruik van de computer is alleen toegepast voor het opzetten van rekenbladen met Excel of MathCAD om snel verschillende situaties door te rekenen. Tussenkost van eindigelementen software of andere constructieve software is niet toegepast. De resultaten van de methode moeten gevalideerd worden met een simpel ligger- of plaatmodel waarmee de toepasbaarheid met minimale afwijkingen kan worden aangetoond.

2. Dek-constructie verkeersviaduct

Er wordt uitsluitend ingegaan op de dek-constructie van een verkeersviaduct. Er wordt niet ingegaan op de onderbouw en fundering van verkeersviaducten. Situaties waarbij onderbouw en dekconstructie in elkaar zijn ingeklemd worden niet beschouwd.

3. Overspanningshoek & alignement

De verkeersviaducten waarvan de krachtswerking en dimensies worden bepaald zijn een rechtstand (geen boogstraal) en hebben een overspanningshoek tussen de 70° en 110°.

4. Max. aantal overspanningen

Het maximaal aantal overspanningen van de verkeersviaducten in dit onderzoek is 3 stuks.

5. Nadruk op mechanica

De nadruk van het onderzoek ligt op het bepalen van de krachtswerking en anderzijds op het snel kunnen bepalen van benodigde constructie hoogte zonder diepgaande berekeningen te hoeven doen. Tijdens dit onderzoek zal dus in minimale mate aandacht worden besteed aan constructieve berekeningen, alleen indien dit nodig wordt geacht voor de toetsing van vuistregels of de krachtswerking.

6. Belastingen

Bij het toetsen van vuistregels zullen de belastingen, belastingmodellen en belastingfactoren uit NEN-EN 1991-2 2003 NB 2011 in acht worden genomen voor belasting door wegverkeer en spoorwegverkeer. Voor wegverkeer wordt uitgegaan van belastingmodel 1. Voor spoorwegverkeer wordt uitgegaan van belastingmodellen SW/0.

7. Constructieve berekeningen

Bij het toetsen van vuistregels voor betonnen viaducten zullen de regels uit "EN 19922: Bruggen - Regels voor ontwerp en berekening en voor detaillering" in acht worden genomen.

1.2 Afbakening – Methode Invloedslijnen

Omdat het onderzoek betrekking heeft op de krachtswerking op een verkeersviaduct zullen er invloedslijnen worden toegepast om het maximale effect van een beweegbare belasting in kaart te brengen, evenals de positie waarbij het maximale effect optreedt. Omdat het moment

Afbakening afstudeeronderzoek

de maatgevende factor is voor de sterkte berekening, is dit onderzoek gericht op het bepalen van de invloedslijn van het moment.

- De liggers zullen dezelfde stijfheid hebben (EI-waarde);
- De maximale lengte van de ligger staat vast op 130 meter;
- De belastingsmodellen dienen te worden omgeschreven naar een combinatie van puntlasten;
- Voor het berekenen van de invloedslijn wordt uitgegaan van liggers op twee, drie en vier steunpunten beschouwd.

1.3 Afbakening – Methode Clapeyron

Uiteraard dienen ook de momenten, dwarskrachten en bijbehorende reactiekrachten inzichtelijk gemaakt te worden. Hiervoor is gekeken naar met welke methode een overzichtelijk en simpel model opgesteld kan worden. De hoekverdraaiingsvergelijkingen (Gaapmethode) leek in eerste instantie een logische keuze te zijn, maar hierin zijn wij tot de conclusie gekomen dat het teveel tijd vergt om voor elke verschillende belasting een bepaalde formule te kiezen. Uiteindelijk is gekozen voor de methode Clapeyron, omdat deze methode veel variabelen kan bevatten en simpel opgelost kan worden met Mathcad. Er hoeven enkel parameters ingevoerd te worden om tot een oplossing te komen. De afbakening van deze methode is vastgesteld met de volgende voorwaarden:

- Er zullen enkel gelijk verdeelde q-lasten (geheel op overspanning of gedeeltelijk) en puntlasten toegepast worden;
- Voor het berekenen van de momenten en dwarskrachten zal een ligger op drie, vier en vijf steunpunten gedimensioneerd worden;
- Er dient per overspanning een onafhankelijke waarde ingevoerd te kunnen worden voor de stijfheid (EI-waarde);
- Per situatie dienen alle reactiekrachten, dwarskrachten en momenten inzichtelijk gemaakt te worden. Vervormingen, hoekverdraaiingen en steunpuntszakkingen worden niet meegenomen in de berekening met deze methode;

1.4 Afbakening – Methode Guyon Massonnet

Om grenzen te stellen aan het deelonderzoek over de methode Guyon-Massonnet is de onderstaande afbakening opgesteld. Deze houdt rekening met de beperkingen aan de methode welke zijn gebleken uit de literatuurstudie en de algemene afbakening voor dit onderzoek.

- Guyon Massonnet wordt enkel gebruikt voor herverdeling van de mobiele belasting in dwarsrichting. Het eigen gewicht en rustende belasting zijn gelijk gespreid over de breedte.
- De plaat heeft in de overspanningsrichting over de gehele dwarsdoorsnede één constante buigstijfheid. Ditzelfde geldt voor de buigstijfheid in de dwarsrichting over de gehele langsdoorsnede. Verstijfde randliggers vormen geen onderdeel van dit onderzoek. De stijfheidsmatrix wordt opgesteld conform Richtlijn Beoordeling Kunstwerken, versie 1.1, Rijkswaterstaat, 2013.
- Er wordt enkel gekeken naar invloedsfactor K voor de momenten in de lengterichting (x-as). Momenten in de breedterichting (y-as) worden niet beschouwd.

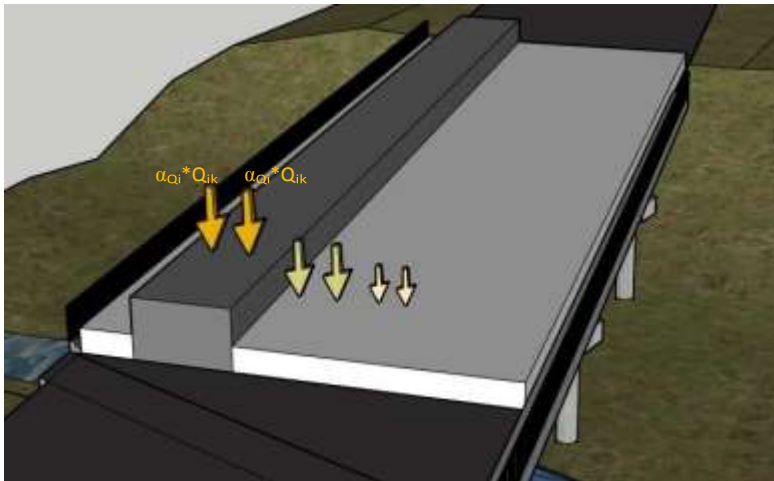
Hoofdstuk 2: Belastingen

Voor het onderzoek zullen er twee belastinggevallen worden gebruikt. Dit is Belastinggeval LM1 voor wegverkeer en belastinggeval SW/0 voor spoorwegverkeer. Deze belastinggevallen zijn conform NEN-EN 1991-2.

2.1 Wegverkeer

Belastinggeval LM1

Dit model representeert de maximale belasting (het merendeel van de effecten van vracht- en personenautoverkeer) die is toegelaten op de Nederlandse wegen. In dit model wordt de brug opgedeeld in theoretische rijstroken van drie meter breed. Per rijstrook wordt één tandemstelstel van twee as-lasten toegepast. Naast de tandemstelsels dient er een verdeelde q-last te zijn toegepast over het wegdek. In Figuur 2 is de verdeling van de belastingen te zien op het wegdek en in Figuur 3 de bij behorende kracht. Zoals is te zien, wordt er een rijstrook beschouwd voor zwaar verkeer.



Figuur 2: Belastingsmodel 1, wegverkeer

Beschrijving	Afstand (m)	Puntlast ten gevolge van tandemstelstel	Q_{vk} karakteristiek (kN/m ²)	Correctiefactor	Q_{vk} toegepast (kN/m ²)
overig	1,4	0	2,5	1,4	3,5
Rijstrook 1	3,25	2 x 300	9	1,15	10,35
Rijstrook 2	3,25	2 x 200	2,5	1,4	3,5
Rijstrook 3	3,25	2 x 100	2,5	1,4	3,5
overig	3,85	0	2,5	1,4	3,5

Figuur 3: Toepassing van karakteristieke waarde

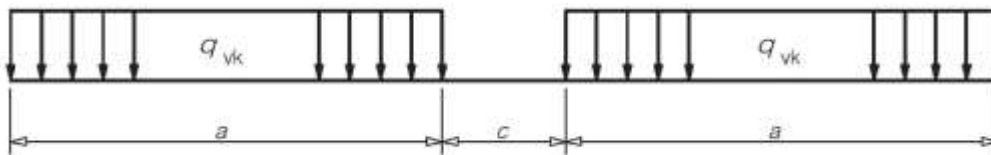
Naast deze belastingen worden er nog correctiefactoren toegepast voor wegverkeer. Dit is een factor die van toepassing is indien er meer dan 2.000.000 vrachtwagens per jaar het viaduct passeren. Deze factor verschilt, te weten:

- Correctiefactor verdeelde belasting rijstrook 1: 1,15
- Correctiefactor verdeelde belasting overig: 1,40

2.2 Spoorwegverkeer

Naast wegverkeer, worden er in de Eurocode ook belastingcombinaties voorgeschreven voor spoorwegverkeer. Net zoals bij wegverkeer beschrijven deze belastingen geen werkelijke belastingen maar representeert het een vervangend model waar in alle effecten zijn meegenomen die een spoorwegbelasting met zich mee brengt. Alleen belastingsmodel SW/0 zal worden gebruikt.

Belastingsmodel SW/0

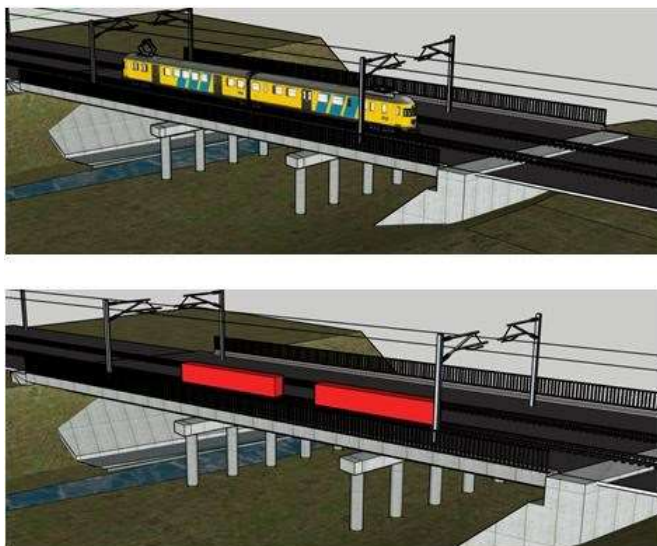


Figuur 4: Belastingenschema voor belastingsmodel SW/0, spoorwegverkeer

Figuur 4 is representatief voor het model volgens de Eurocode. Deze belasting komt voort door normaal spoorwegverkeer (SW/0). In Figuur 5 is een overzicht te zien, waarbij per belasting geval de karakteristieke waarde staat die wordt toegepast voor de q_{vk} .

Belastingsmodel	q_{vk} [kN/m]	a [m]	c [m]
SW/0	133	15,0	5,3

Figuur 5: Toe te passen belastingen voor spoorwegverkeer



Figuur 6: Belastingsmodel SW/0 volgens Eurocode, spoorwegverkeer

De karakteristieke waarden (q_{vk}) gegeven in Figuur 5 moeten worden vermenigvuldigd met een factor α op spoorlijnen waarop spoorwegverkeer rijdt dat zwaarder of lichter is dan normaal spoorwegverkeer. Belastingen vermenigvuldigd met de factor α worden geclassificeerde verticale belastingen'. De factor die toegepast dient te worden is $\alpha = 1,21$.

0,75 - 0,83 - 0,91 - 1,00 - 1,10 - 1,21 - 1,33 - 1,46

Figuur 7: alfa factor voor spoorwegverkeer

Belastingen

Hoofdstuk 3: Invloedslijnen

In het ontwerpproces van verkeersviaducten wordt volgens de Eurocode, de Europese norm voor bouwconstructies, voorgeschreven dat mobiele belastingen moeten worden toegepast voor het toetsen van een verkeersviaduct. Een mobiele belasting houdt in dat een bepaald type punt- of lijnlast op alle posities binnen een bepaald gebied op het brugdek kan staan. Dit geldt voor zowel wegverkeer als spoorverkeer. Door deze mobiele belasting op een bepaalde positie op de constructie te zetten, ontstaat er een maatgevende situatie van deze belasting in een vast punt. Een methode om het meest kritische punt te bepalen is de invloedslijn.

De invloedslijn representeert het effect dat de verplaatsing van een mobiele belasting kan hebben op de inwendige kracht of het koppel zoals deze plaats vindt in één specifieke positie op je staafmodel. Dit effect wordt uitgezet over de lengte.

Op een constructie kunnen verschillende invloedslijnen worden opgesteld, te weten: Krachtswerking:

- Dwarskracht
- Momenten

Vervormingen:

- Hoekverdraaiing
- Verplaatsingen

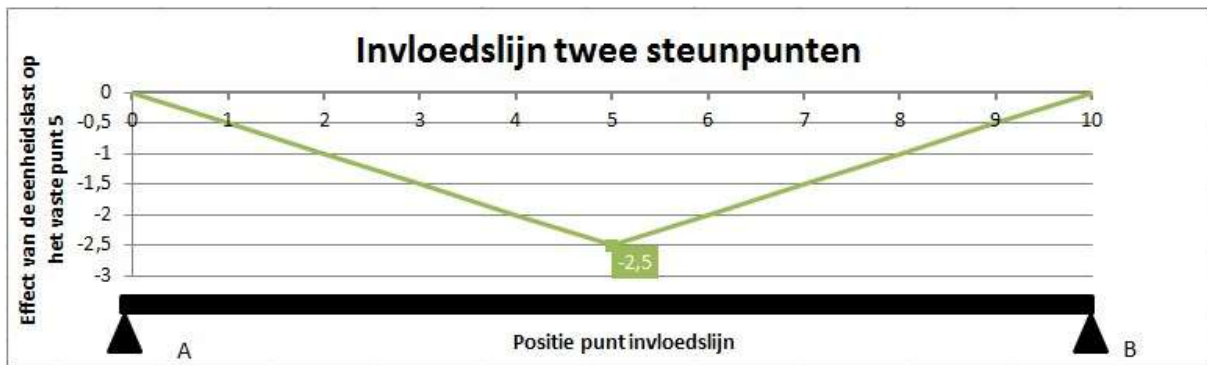
Omdat het onderzoek betrekking heeft op de krachtwerking op een verkeersviaduct zullen er invloedslijnen worden toegepast om het maximale effect van een mobiele belasting in kaart te brengen, evenals het vaststellen van de lastpositie die het maximale effect veroorzaakt. Omdat het moment de maatgevende factor is voor de sterkteberekening, is dit onderzoek gericht op het bepalen van de invloedslijn van het moment voor een ligger op vier steunpunten.

Voordat de invloedslijn voor een ligger op vier steunpunten is bepaald, is er begonnen met een ligger op zowel twee als drie steunpunten. Deze twee invloedslijnen zullen niet aanbod komen in de hoofdrapportage. In hoofdstuk 2 van de literatuurstudie, is te zien hoe de invloedslijn is bepaald. In Bijlage I-a en Bijlage I-b is de sheet bijgevoegd met een handberekening.

3.1 Belang van invloedslijn

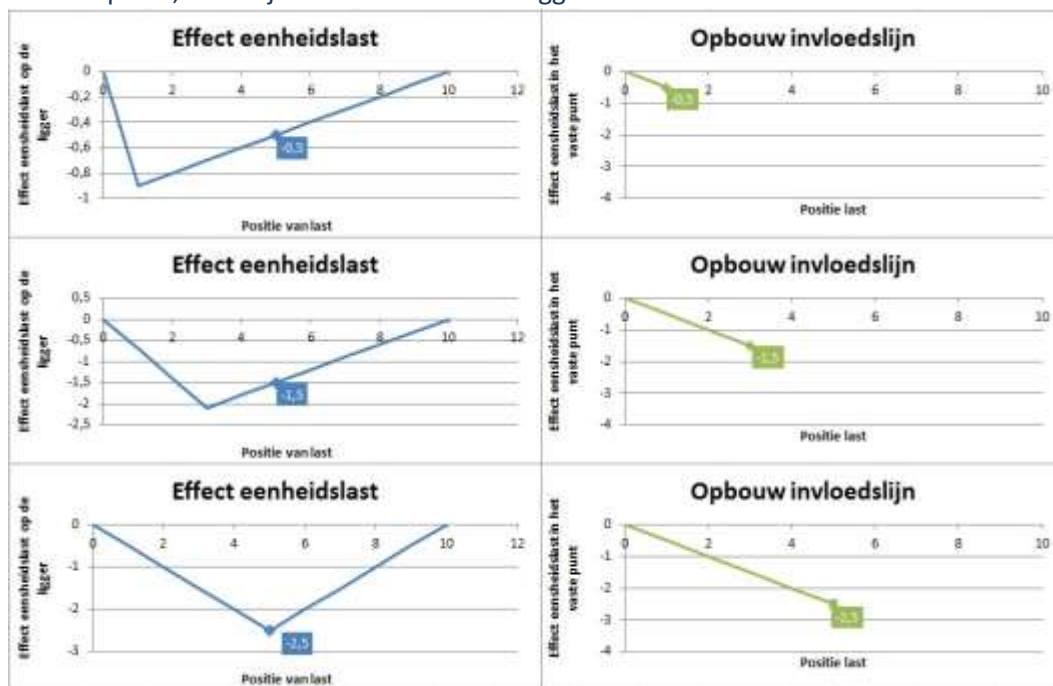
Zoals in de inleiding al is beschreven, is de invloedslijn van essentieel belang om de positie van de belasting te bepalen die voor het grootste effect op het moment zorgt in een bepaald punt. Hierbij definieert de X-as de positie van de eenheidslast en de Y-as het effect van deze eenheidslast. Doordat de last op meerdere positie op de ligger wordt neergezet ontstaat de invloedslijn.

Als voorbeeld is in Figuur 8 de invloedslijn van punt 5 te zien. Het voorbeeld is een enkelvelds overspanning, daarnaast is voor de kracht 1 kN aangenomen. Dit is niet volgens een belastingsmodel uit de NEN-EN 1991-2.



Figuur 8: Invloedslijn twee steunpunten

Bovenstaande invloedslijn is benaderd volgens onderstaande Figuur 9, de liggerlengte is tien meter. Om de uitleg van het principe overzichtelijk te houden wordt de last op drie posities gezet. Het effect dat optreedt ter plaatse van het vaste punt wordt over de Y-as uitgezet, zie de groene lijn. De positie van de last die voor de grootte van het effect zorgt, wordt uitgezet over de X-as. In dit geval komt de positie van de last die zorgt voor het grootste effect overeen met het punt waarvoor de invloedslijn wordt bepaald, namelijk het midden van de ligger.



Figuur 9: Uitleg invloedslijn

Dat in bovenstaand voorbeeld het grootste effect optreedt wanneer de belasting in het middenveld staat, is te verklaren door het principe kracht maal arm. Ter plaatse van de steunpunten treden er geen moment op, er zullen enkel verticale krachten zijn die evenwicht maken met de last. Het grootste moment zal dus optreden wanneer er een puntlast op het midden van de ligger staat omdat, de afstand tot aan het steunpunt hier het grootst is. Deze beredenering is voor een enkel veld met één last logischerwijs te verklaren. Maar wanneer er naar doorgaande liggers wordt gekeken, wordt dit complexer.

Het voorbeeld met een last is al aan bod gekomen. Echter dienen ervoor belastingsmodel LM1 twee puntlasten van twee maal 600 kN te worden neergezet met een afstand van 1,2 meter tussen de assen. Door deze as-afstand is niet met zekerheid te zeggen dat wanneer er bijvoorbeeld naar een

invloedslijn van een steunpunt wordt gekeken, het grootste effect optreedt indien de belasting op het midden van het veld staat. Dit maakt het interessant om gebruik te maken van een invloedslijn.

Bij een invloedslijn voor doorgaande liggers is er sprake van meer dan twee steunpunten. Dit zal geen effect hebben op de grondslag van de invloedslijn. Door het opbuigend effect van de naastgelegen velden zal er sprake zijn van positieve en negatieve waarde.

Wanneer er wordt gekeken naar een invloedslijn van een constructie met drie of meer steunpunten zijn de reactiekrachten benodigd. Een methode die hiervoor gebruikt kan worden voor het verkrijgen van steunpuntsmomenten, is de methode “Clapeyron”. Deze methode wordt behandeld in Hoofdstuk 4. Met behulp van deze methode kan een invloedslijn worden bepaald voor een willekeurig aantal steunpunten.

Voor het afstudeeronderzoek wordt er een invloedslijn gebruikt voor twee typen verkeer, te weten:

- Wegverkeer;
- Spoorwegverkeer.

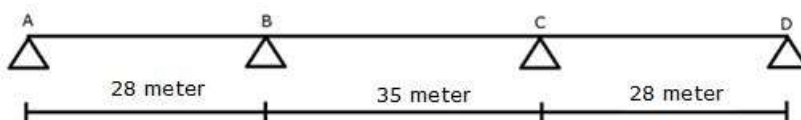
Bij spoorwegverkeer dienen er volgens de Eurocode q-lasten te worden toegepast. Echter zal dit model worden omgeschreven naar puntlasten. Er wordt voor puntlasten gekozen omdat dit representatief kan zijn van een fictieve q-last en omdat dit goed past binnen het kader van de afbakening van het onderzoek; het zo simpel mogelijk houden van de berekeningen. In vergelijking met wegverkeer, is het belastingschema voor spoorwegverkeer complexer. Dit komt doordat er bij het belastingschema voor spoorwegen sprake is van een combinatie van puntlasten. Deze combinatie maakt de positie die zorgt voor het maatgevende effect op het moment lastig te bepalen.

Hierom wordt er gebruik gemaakt van een “omliggende invloedslijn”. Deze lijn representeert de uiterste waarden van alle invloedslijnen die van toepassing zijn op de constructie. Uit deze grafiek kan vervolgens de maximale waarden worden gehaald en de bijbehorende positie van het laststelsel

3.2 Invloedslijnen voor vier steunpunten

Het uiteindelijke model, waar de invloedslijn voor bepaald zal worden, is een ligger op vier steunpunten. Daarbij wordt er een lengteverhouding aangehouden van 0,8:1,0:0,8, zie hiervoor Figuur 10 waarin een schema is te zien volgens deze verhouding. Voor de liggers wordt een zelfde stijfheid aangehouden.

De verhouding is gebaseerd op de meest ideale momentverdeling, voor gelijke veld- en steunpuntsmomenten. In paragraaf 4.3 wordt deze verhouding nader worden toegelicht.



Figuur 10: Uiterste ligger lengte volgens ideale verhouding

Voor het genereren van de invloedslijn zijn er functies opgesteld. Dit is gedaan voor drie situaties:

- Mobiele belasting op veld 1;

- Mobiele belasting op veld 2; -
Mobiele belasting op
veld 3.

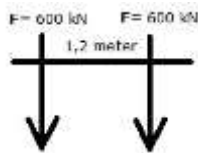
In de Bijlage I-c zijn de functies nader toegelicht. Omdat het belastingsmodel voor spoorwegverkeer is omschreven naar puntlasten, kunnen dezelfde functies worden gebruikt.

3.2.1 Belastingen

Voor de berekening van de belastinggevallen wordt er gerekend met een kracht van 1 kN . Om de werkelijke belasting te krijgen zal de uitkomst dus moeten worden vermenigvuldigd met de kracht volgens de NEN-EN 1991-2. Hieronder worden de modellen nader toegelicht.

3.2.1.a Wegverkeer, belastingmodel LM1

Voor belastingmodel LM1, zal de kracht moeten worden vermenigvuldigd met twee keer 600 kN dit komt neer op een totale belasting van 1200 kN totaal.



Figuur 11: Toe te passen kracht volgens belastingsmodel LM1, wegverkeer

3.2.1.b Spoorwegverkeer, belastingmodel SW/0

Naast wegverkeer, wordt er ook een invloedslijn voor spoorwegverkeer gebruikt. Het belastingsmodel dat toegepast wordt, is belastingsmodel SW/0. Dit model is representatief voor normaal spoorwegverkeer en dus goed inpasbaar op “de Swette”.

Door gebruik te maken van een invloedslijn voor spoorwegverkeer, wordt er meer duidelijkheid verschaft over de positie van de belasting die zorgt voor het maatgevend effect op het moment. De andere twee belastingmodellen, belastingmodel SW/2 en Belastingmodel 71, zijn niet nader onderzocht in dit afstudeerrapport. Deze modellen passen niet binnen onderzoek, omdat de berekeningen zo eenvoudig mogelijk gehouden dienen te worden.

In Figuur 12 is het belastingsmodel te zien volgens Eurocode met daaronder de fictieve qlast. De q-lasten worden omschreven naar een model die bestaat uit een combinatie van puntlasten. Een q-last wordt vervangen door vijftien puntlasten. Voor het hele model worden er dus dertig puntlasten toegepast.

De kracht van de belasting volgens de Eurocode is 133 kN/m voor de q-lasten. Deze lasten moet nog gedeeld worden door de breedte van het viaduct. De uitkomst wordt vervolgens verdeeld over twee maal vijftien punt lasten.

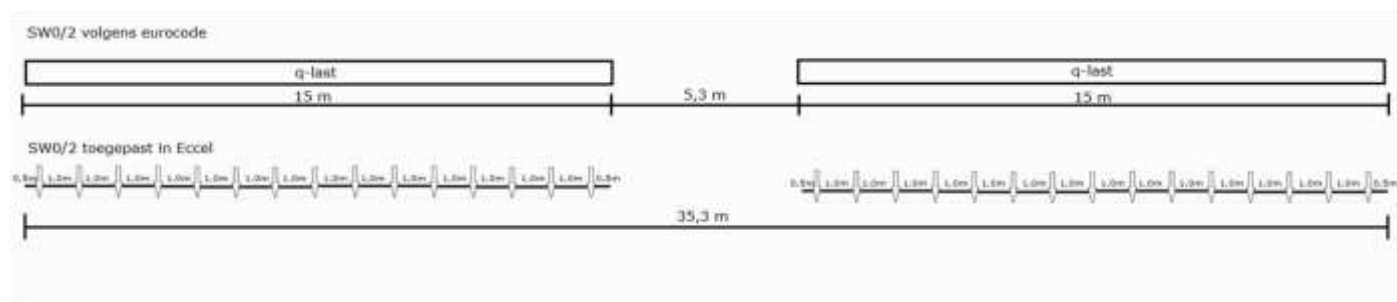
Figuur 12: Belastingsmodel SW/0, spoorwegverkeer

3.3 Analyse

3.3.1 Werkwijze

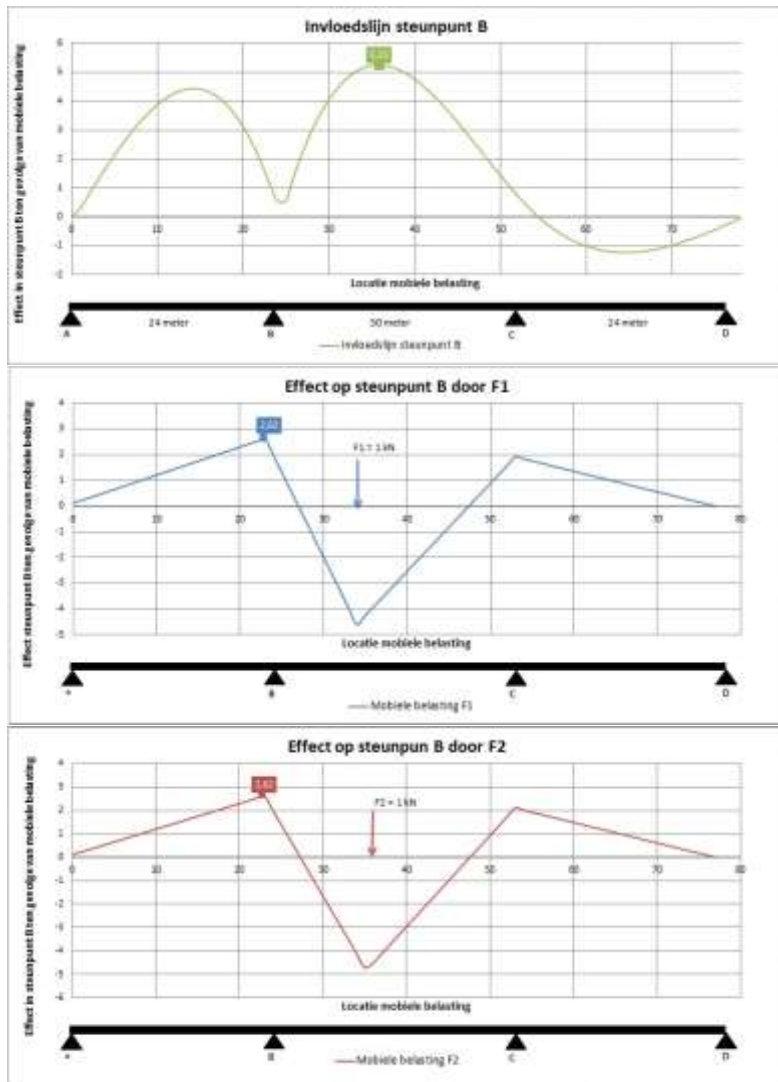
Het uiteindelijke model dat gebruikt gaat worden voor de casus zal, worden belast volgens belastingsmodel LM1. In onderstaand voorbeeld is te zien hoe de invloedslijn voor dit model is opgebouwd. Zoals is te zien zorgen beide puntenlasten (F1 en F2) voor een eigen effect op steunpunt B, doordat F2 1,2 meter verder staat dan F1.

Vervolgens worden de waarden van F1 en F2 in steunpunt B bij elkaar opgeteld en wordt de gecombineerde waarde op de beginposititie van F1 neergezet, zie onderstaand Figuur 13. Door het verplaatsen van de mobiele belasting over de constructie ontstaat de invloedslijn voor punt steunpunt



B. Onderstaand stappenplan is ter verduidelijking voor het bepalen van de invloedslijn van steunpunt B:

1. De puntlasten F1 en F2 worden beide één meter verschoven;
2. De waarde in punt steunpunt B wordt opnieuw bij elkaar opgeteld en neergezet op de beginposititie van F1;
3. Dit principe wordt herhaald, tot de puntlasten het eind van de constructie hebben gepasseerd.

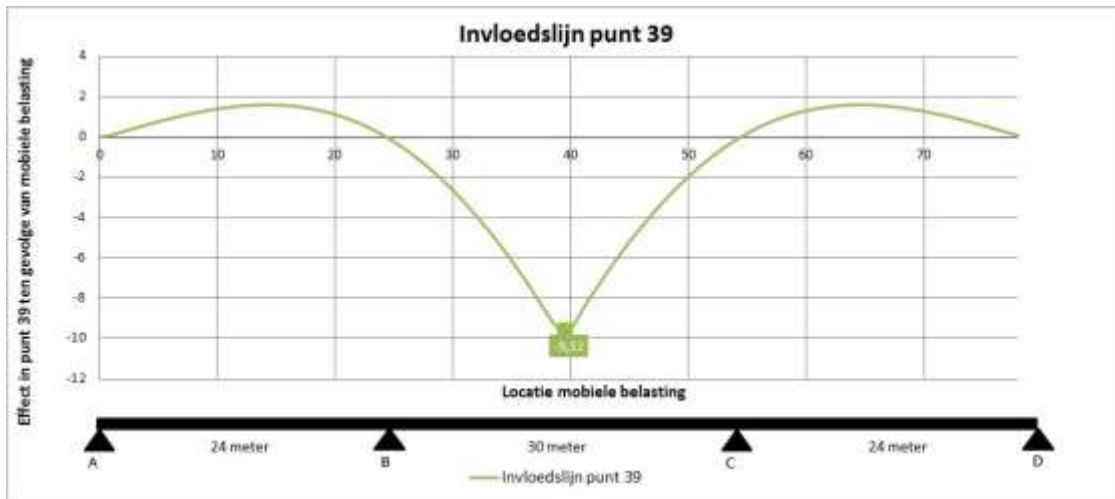


Figuur 13: Uitleg invloedslijn, steunpunt B

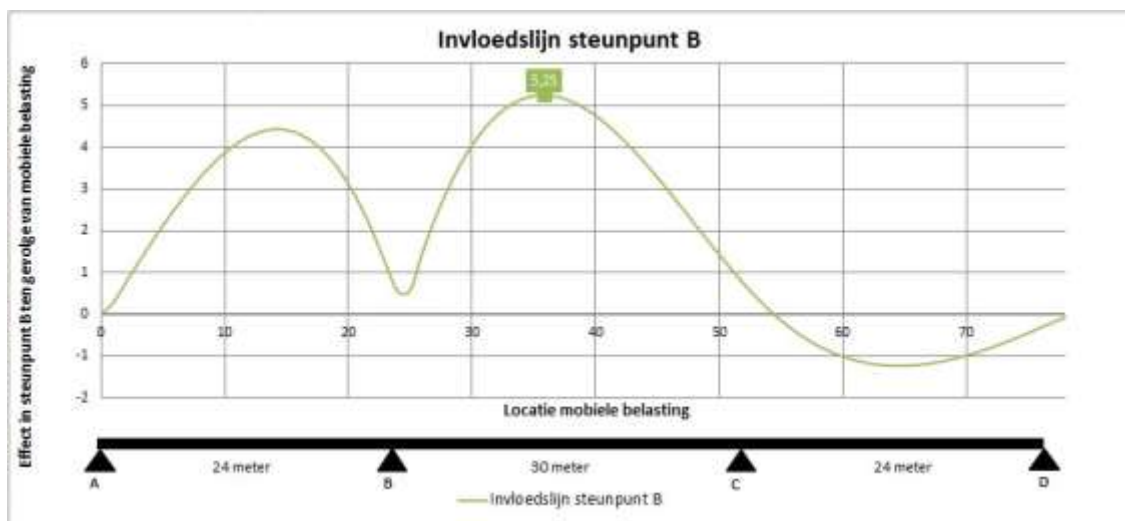
Voor de invloedslijn voor wegverkeer zijn er twee posities interessant waarvoor een invloedslijn gebruikt kan worden, te weten de steunpunten B (en C) en een invloedslijn voor een punt op het midden- of eindveld. De invloedslijn voor B=C in verband door symmetrie.

Met de redenering die in paragraaf 3.1 aanbod is gekomen, kan er worden aangenomen dat het grootste effect optreedt indien de belasting in het midden van het middenveld staat. Om dit te controleren zal er een invloedslijn voor punt 39 worden bekeken, dit punt bevindt zich in het midden van de constructie en een invloedslijn voor steunpunt B.

In Figuur 14 en Figuur 15 zijn beide invloedslijnen te zien. Uit deze twee invloedslijnen is in ieder geval op te maken dat er bij de invloedslijn voor punt 39, het grootste effect optreedt.



Figuur 14: Invloedslijn punt 39



Figuur 15: Invloedslijn steunpunt B

Naast de invloedslijn voor een punt op het middenveld, kan er ook naar een invloedslijn voor steunpunt B of C worden gekeken. Van de twee steunpunten hoeft maar één steunpunt te worden beschouwd omdat er sprake is van symmetrie.

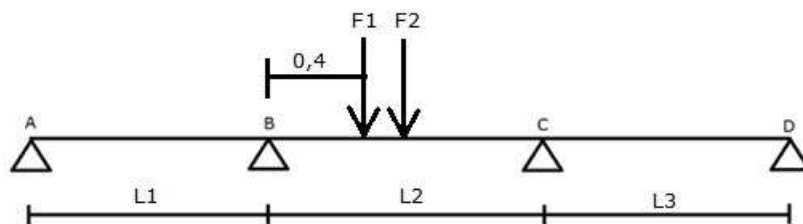
Bij het beschouwen van een invloedslijn van steunpunt B, is over de positie van de belasting die zorgt voor het maatgevende effect niet veel te zeggen. Uit Figuur 15 blijkt dat de maatgevende positie van de belasting niet het midden van de ligger is maar op punt 36 staat ten opzichte van punt A. Bij het veranderen van de veldlengte met tussenstappen van vijf meter voor L , valt op dat de maatgevende lastpositie op $0,4L_2$ vanaf steunpunt B staat. In Figuur 16 is een overzicht te zien met de maatgevende lastposities.

Verhouding	Positie die zorgt voor het grootste effect in steunpunt B tov A(m)	Lastpositie op het middenveld
$0,8L_1 - L_2 - 0,8L_3$		
12 - 15 - 12	18	0,40

16 - 20 - 16	24	0,40
20 - 25 - 20	30	0,40
24 - 30 - 24	36	0,40
28 - 35 - 28	42	0,40
32 - 40 - 32	48	0,40

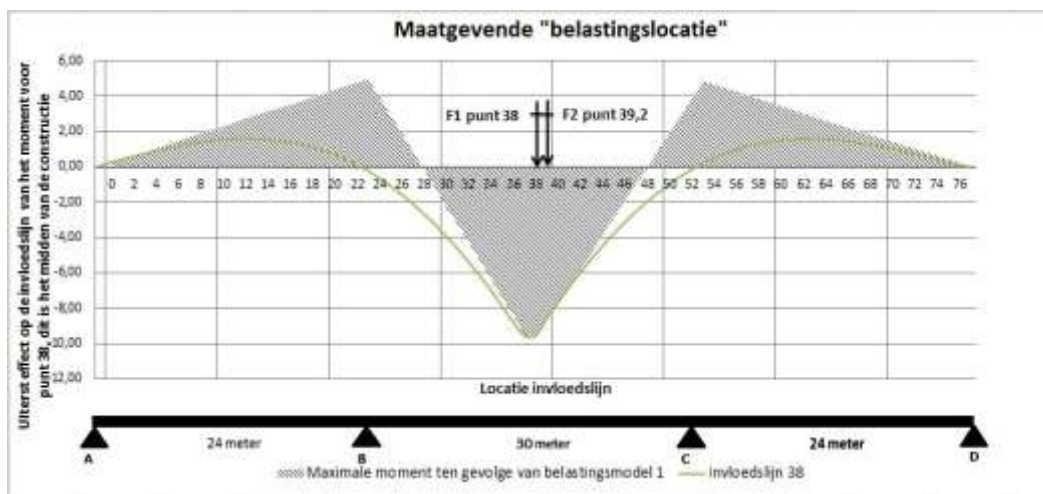
Figuur 16: positie belasting die zorgt voor maatgevend effect

Dit principe is gevisualiseerd in Figuur 17 wat als ondersteuning dient voor Figuur 15.



Figuur 17: Lastpositie op het middenveld

Ter validatie is in Figuur 18 de invloedslijn van punt 38 te zien met de maatgevende momentenlijn. Hiermee is de berekening van de invloedslijn gevalideerd.



Figuur 18: validatie invloedslijn voor punt 38 met momentenlijn ten gevolgen van de mobiele belasting

3.3.2 Spoorwegverkeer

Door de combinatie van puntlasten is er over de maatgevende positie bij spoorwegverkeer weinig te zeggen. Daarom is er voor het bepalen van de beginpositie van de belasting gebruik gemaakt van een omliggende invloedslijn.

Door het neerzetten van de spoorwegbelasting om de meter en vervolgens van elk punt de uiterste waarde te pakken, ontstaat de omliggende invloedslijn. Uit deze lijn kan vervolgens de positie worden gehaald waar de belasting neergezet dient te worden om zo het grootste effect te krijgen in een bepaald punt.

Voor het controleren van de positie die zorgt voor het maatgevende effect wordt er voor verschillende lengteverhoudingen gekeken. In Figuur 19 is een overzicht te zien waarbij per lengteverhouding, de positie staat die zorgt voor het maatgevende effect in een vast punt. De maximale effecten treden op ter plaatse van een steunpunt of middenveld.

Lengteverhouding	Positie spoorweglast waarbij grootste effect optreedt afstand t.o.v. A(m)
12 - 15 - 12	10
16 - 20 - 16	18
20 - 25 - 20	3 en 27
24 - 30 - 24	7 en 36
28 - 35 - 28	11 en 45
32 - 40 - 32	30

Figuur 19: Maatgevende positie belasting

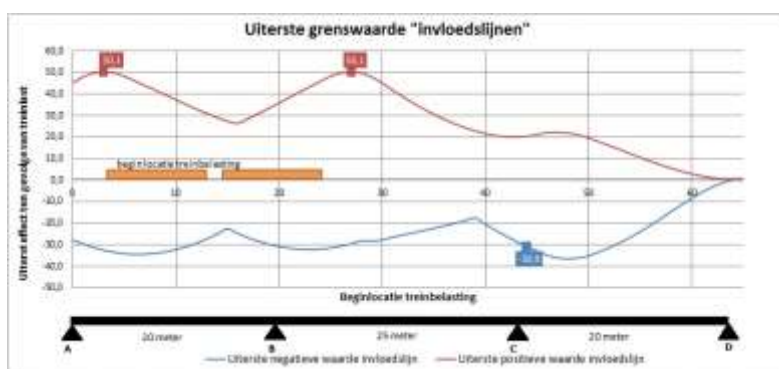
In Bijlage I-d zijn figuren bijgevoegd die de beginlocatie laten zien waarbij het maximale effect optreedt bij het steunpunt of middenveld.

Op het middenveld zal alleen het grootste effect optreden indien de belasting volledig op het middenveld kan staan. Dit is alleen bij de lengteverhouding van 32 - 40 - 32.

Bij de lengteverhoudingen 12 - 15 - 12 en 16 - 20 - 16 is er maar één maatgevende positie van de spoorweglast die zorgt voor het grootste effect. Het maximale effect treedt op bij steunpunt C. Dit is te verklaren aan de hand van de lengte van het eerste zijveld. Doordat het zijveld, kleiner is dan de helft van de belasting, $\frac{35,3}{2} = 17,65 \text{ meter}$, past de q-last niet volledig op het eerste veld. Omdat het middenveld groter is en hier dus meer belasting op staat, is het effect op steunpunt C groter dan steunpunt B.

Bij een zijveldlengte van minimaal twintig meter, is er symmetrie mogelijk van de belasting. Hierbij is ook te zien dat er twee maatgevende posities zijn die zowel in steunpunt B en C voor het zelfde effect zorgen. Één maatgevende positie van de belasting die zorgt voor het maximale effect in steunpunt B en één positie van de belasting die zorgt voor het grootste effect in C.'

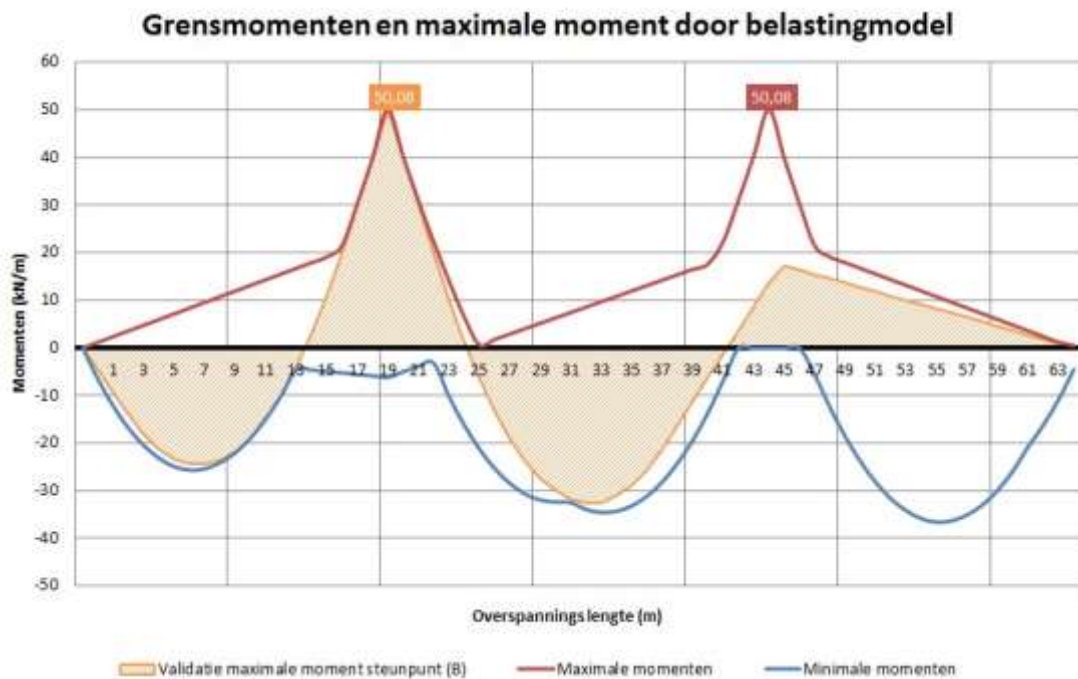
In Figuur 20 is het principe van de beginpositie van de spoorwegbelasting te zien. Met de beginlocatie wordt de achterkant van de trein bedoeld.



Figuur 20: Beginpositie spoorwegbelasting

Op basis van de invloedslijnen is bepaald dat de spoorwegbelasting op twee posities kan staan om hieruit het hoogst mogelijk effect te verkrijgen. Hier vindt de samenwerking tussen methode Clapeyron en de methode invloedslijnen plaats. Door de uiterste grenswaarden van de momenten te berekenen,

kan nagegaan worden of de uitkomsten van de invloedslijnen kloppen. In Figuur 21 is te zien dat ten gevolge van één van de maatgevende posities het maximale steunpuntmoment verkregen kan worden. Hiermee is de berekening van de invloedslijnen gevalideerd.



Figuur 21: grensmomenten treinbelasting

3.4 Conclusie

Door gebruik te maken van invloedslijnen is aangetoond dat er op eenvoudige wijze inzicht kan worden verkregen en wat de maatgevende positie van de belasting is die zorgt voor het grootste effect. Daarnaast kan de methode invloedslijn op eenvoudige wijze worden toegepast in Excel. Dit kan voor eenvoudige belastingen zoals wegverkeer, maar ook complexere belasting als spoorwegverkeer.

Hiermee past de methode van de invloedslijn binnen het kader van het onderzoek, namelijk het zo eenvoudig mogelijk houden van de berekening.

Hoofdstuk 4: Methode Clapeyron

Liggers op meerdere steunpunten worden ook wel doorgaande liggers genoemd. Deze doorgaande, statisch onbepaalde liggers kunnen per overspanning (van steunpunt tot steunpunt) verschillen op vele vlakken. Zo kunnen de liggers onderling van stijfheid verschillen, maar ook qua lengte en de belasting die erop geplaatst kan worden. Doordat deze statisch onbepaalde liggers (hierna: SOB), vele onbekende reactiekrachten bevat, is deze lastiger te berekenen dan een statisch bepaalde ligger (hierna: SB). We kennen vanuit de mechanica diverse methoden om SOB-liggers te berekenen, vaak gaat dit gepaard met vele stappen die genomen dienen te worden doormiddel van een handberekening. Er is in ieder geval één methode die uitzondering vormt op die regel, en dat is de methode Clapeyron.

De Methode Clapeyron, ook wel de driemomentenstelling genoemd, is voor het eerst voorgesteld in 1857 door Benoît Paul Émile Clapeyron. Het doel van Clapeyron is om de onbekende reactiekrachten, steunpuntmomenten en veldmomenten te berekenen. De formules van Clapeyron zijn onder andere gebaseerd op de hoekverdraaiingsvergelijkingen en de momentenvlakmethode, en zijn zo opgesteld dat de onbekende factoren goed te berekenen zijn met behulp van een geautomatiseerd rekenblad. De exacte toepassing van de Methode Clapeyron wordt uitgelegd in dit gedeelte van het onderzoek.

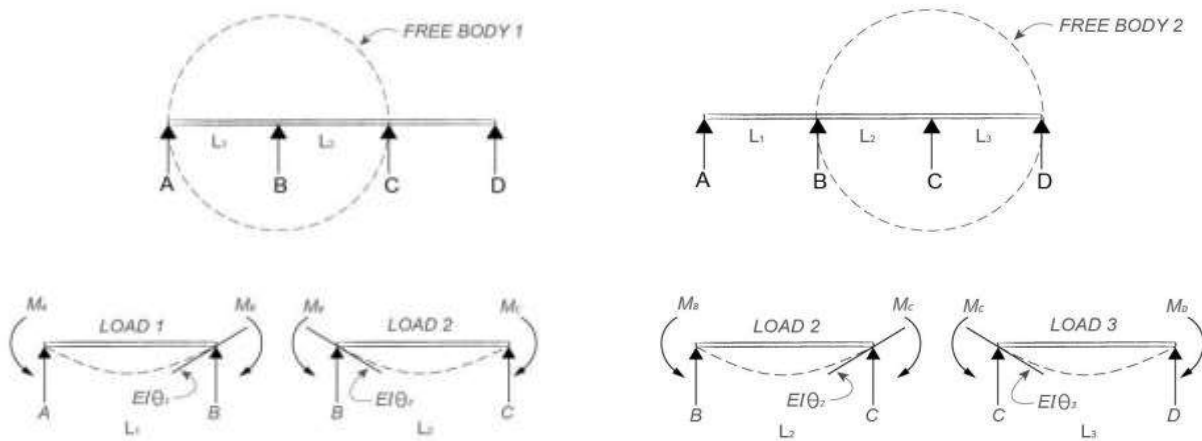
De Methode Clapeyron is toegepast in een Mathcad sheet, waarbij onderscheid gemaakt is in een ligger op drie, vier en vijf steunpunten. Per berekening dienen de parameters ingevoerd te worden, waarna de berekening automatisch uitgevoerd wordt en hieruit de dwarskrachten, de steunpuntmomenten en maximale veldmomenten inzichtelijk gemaakt zijn. Dit is gevisualiseerd door dwarskrachten –en momentenlijnen per situatie.

De analyse is gebaseerd op verschillende deelvragen die betrekking hebben op deze methode. Zo zijn de vergelijkingen met Technosoft gemaakt, maar is ook gekeken naar de invloed van bepaalde belastingen en de posities van deze belastingen op het verloop van de dwarskrachten –en momentenlijn. Deze methode wordt gebruikt bij verschillende berekeningen en vraagstukken binnen dit onderzoek om de gevraagde onbekenden te kunnen berekenen.

4.1 Het principe van methode Clapeyron

De methode wordt ook wel, zoals eerder vermeld is, de driemomentenstelling genoemd. Deze benaming verklaart ook meteen het principe, namelijk het beschouwen van drie steunpunten (en de bijbehorende momenten) in één vergelijking. Simpel gezegd wordt telkens een steunpunt genomen waaruit gekeken wordt naar de aansluitende liggers, dichtstbijzijnde steunpunten en eventuele belastingen. Dit principe kan net zo vaak herhaald worden als benodigd is voor een ligger op aantal steunpunten.

In Figuur 22 is weergegeven hoe een ligger op vier steunpunten uitgewerkt dient te worden. Zoals te zien is in het linker plaatje van dit figuur wordt eerst punt B beschouwd, waarin de liggers 1 en 2, en de steunpunten A en C meedoen. De bijbehorende belastingen en steunpuntmomenten dienen allemaal meegenomen te worden. In het rechter plaatje is exact hetzelfde principe toegepast, maar dan vanuit punt C beschouwd. Deze beschouwingen leiden uiteindelijk tot meerdere vergelijkingen. Deze vergelijkingen dienen opgelost te worden, waarna ze in een matrix ingevoerd worden en uiteindelijk resulteren in steunpuntmomenten.



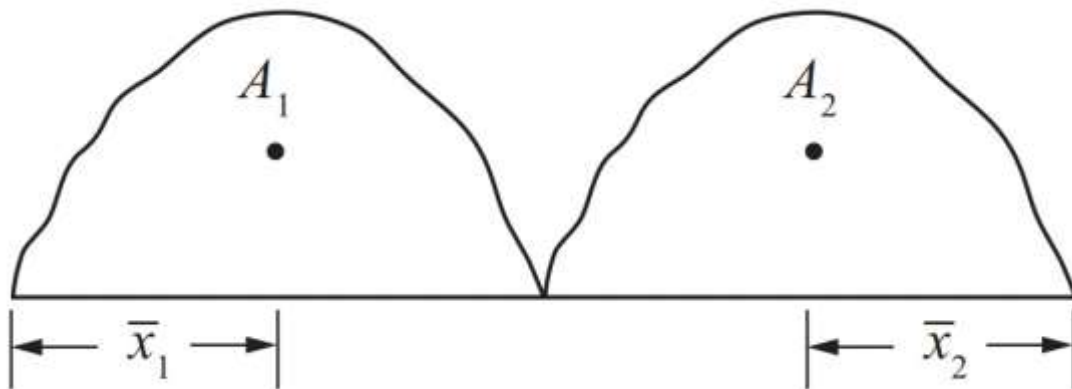
Figuur 22: Driemomentenstelling situatie 1 en 2 van een ligger met drie overspanningen op vier steunpunten

Belangrijke uitgangspunten van deze methode zijn onder andere dat het verschil in stijfheid meegenomen kan worden in de berekening indien dit van toepassing is. Ook is aangenomen dat de steunpunten niet-verend zijn, er vindt dus louter hoekverdraaiingen plaats ten gevolge van de gegeven belastingen. De verdere uitwerking van deze methode in formulevorm wordt hieronder toegelicht.

De toepassing van de theorie kan worden uitgedrukt in een rotatie om een steunpunt. In het volgende voorbeeld nemen we steunpunt B als referentie:

$$\theta_{BL} + \theta_{BR} = 0$$

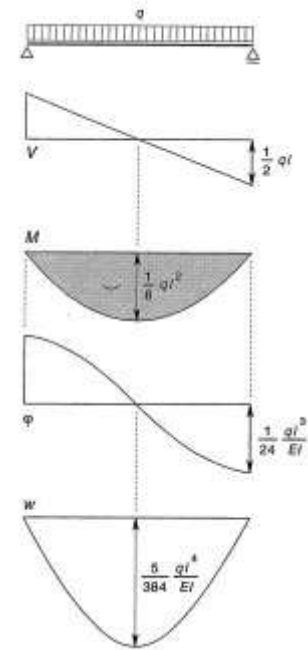
De rotatie (afbuiging) links van het steunpunt (θ_{BL}) en rechts van het steunpunt (θ_{BR}) worden berekend op basis van de momentenvlakmethode.



Figuur 23: bepalen van moment d.m.v. momentenvlakmethode

Rechts van het =-teken zien we de benadering van de belastingen doormiddel van de momentenvlakmethode. Deze methode wordt ook wel een semi-grafische techniek genoemd, omdat met behulp van de momentenlijn (het grafische gedeelte) de vervormingen berekend kunnen worden. De vervormingslijn wordt als belastinglijn gedefinieerd om het vervolgens door te rekenen naar een "nieuwe" momentenlijn. Deze momentenlijn van de momentenlijn is een representatie van de vervormingen. De methode rekent als het ware de oppervlakte (A_x) tussen de 0-lijn en de momentenlijn, waarna deze vermenigvuldigd wordt met de afstand tussen een steunpunt en het zwaartepunt van de oppervlakte ($\bar{x}_x$).

In Figuur 24 is te zien dat ten gevolge van een q-last de mechanicaschema's zijn opgesteld. Met de momentenvlakmethode wordt de vervormingslijn opgesteld, dit de is onderste lijn in de figuur. De lijnen kunnen worden verkregen door van boven naar beneden per stap in volgorde te integreren. Dit zou betekenen dat in omgekeerde richting gedifferentieerd zou moeten worden. Om uit de vervormingslijn de momentenlijn te verkrijgen zullen de functies dus tweemaal gedifferentieerd moeten worden. Onderstaand is weergegeven hoe de formules voor de methode Clapeyron versimpeld worden aan de hand van de formules die de momentenvlakmethode kent. Door m.b.v. de momentenvlakmethode de "dwarskrachtenlijn" van de momentenlijn als belastinglijn te nemen, wordt de hoekverdraaiingslijn gevonden waarmee de hoekverdraaiingen B_L en B_R kunnen worden gevonden.



de

Figuur 24: dwarskracht-, moment- en vervormingslijn t.g.v. gelijk verdeelde q-last

$$\theta_{BL} = \frac{\text{Buiging van L1 beschouwd vanuit steunpunt B}}{\text{Stijfheid van ligger L1}}$$

$$= \frac{1}{L_1} \left\{ \left(\frac{A_1 X_1}{EI_1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{M_A}{EI_1} \right) L_1 \frac{1}{3} L_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{M_B}{EI_1} \right) L_1 \frac{2}{3} L_1 \right\}$$

$$\theta_{BL} = \frac{A_1 \bar{x}_1}{EI_1 L_1} + \frac{M_A L_1}{6EI_1} + \frac{M_B L_1}{3EI_1}$$

Hetzelfde principe wordt toegepast op de rechterzijde, wederom vanuit steunpunt B beschouwd.

$$\theta_{BR} = \frac{\text{Buiging van L2 beschouwd vanuit steunpunt B}}{\text{Stijfheid van ligger L2}}$$

$$\theta_{BR} = \frac{A_2 \bar{x}_2}{EI_2 L_2} + \frac{M_C L_2}{6EI_2} + \frac{M_B L_2}{3EI_2}$$

Dit levert op:

$$\frac{A_1 \bar{x}_1}{EI_1 L_1} + \frac{M_A L_1}{6EI_1} + \frac{M_B L_1}{3EI_1} + \frac{A_2 \bar{x}_2}{EI_2 L_2} + \frac{M_C L_2}{6EI_2} + \frac{M_B L_2}{3EI_2} = 0$$

De bovenstaande vergelijking kan worden gesimplificeerd tot de volgende vergelijking:

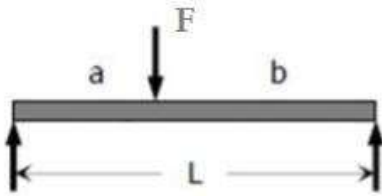
$$M_A \left(\frac{l_1}{I_1} \right) + 2M_B \left\{ \frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right\} + M_C \left(\frac{L_2}{I_2} \right) = -\frac{6A_2 \bar{x}_2}{I_2 L_2} - \frac{6A_1 \bar{x}_1}{I_1 L_1}$$

Echter is dit niet praktisch toepasbaar in een sheet die wij uiteindelijk willen opzetten. Daarom worden de formules van de momentenvlakmethode vervangen door de daadwerkelijke belastingen.

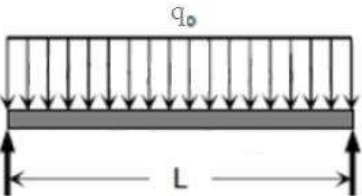
Formule methode Clapeyron

De formule die weergegeven is in de vorige paragraaf waarbij de momentenvlakmethode wordt gebruikt, kan omschreven worden tot een formule waarbij de daadwerkelijke belastingen ingevoerd kunnen worden. Deze versie is praktisch gezien vele malen handiger, omdat nu de belastingen als parameter ingevoerd kunnen worden. Voor het bepalen van momenten en dwarskrachten wordt uitgegaan van gelijk verdeelde q-lasten en puntlasten. Voor elk type belasting wordt een formule toegepast dat bij het beschouwde steunpunt hoort.

In Figuur 25 is een puntlast weergegeven waarvan de positie willekeurig op de overspanning geplaatst kan worden. Wanneer vanuit het linkersteunpunt beschouwd wordt, dient de formule onder $\frac{6A\bar{a}}{L}$ toegepast te worden en vice versa. Dit geldt voor ieder type belasting. Hiervoor gebruiken we de volgende formules:

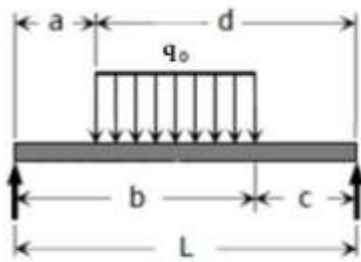
Type of Loading	$\frac{6A\bar{a}}{L}$	$\frac{6A\bar{b}}{L}$
Concentrated load anywhere on the span. 	$\frac{Fa}{L}(L^2 - a^2)$	$\frac{Fb}{L}(L^2 - b^2)$

Figuur 25: Clapeyronformule voor puntlast

Type of Loading	$\frac{6A\bar{a}}{L}$	$\frac{6A\bar{b}}{L}$
Uniform load over the entire span. 	$\frac{q_0 L^3}{4}$	$\frac{q_0 L^3}{4}$

Figuur 26: Clapeyronformule voor gelijk verdeelde q-last over gehele overspanning

Type of Loading	$\frac{6A\bar{a}}{L}$	$\frac{6A\bar{b}}{L}$
General uniform loading.	$\frac{6A\bar{a}}{L} = \frac{q_o}{4L} [b^2(2L^2 - b^2) - a^2(2L^2 - a^2)]$	$\frac{6A\bar{b}}{L} = \frac{q_o}{4L} [d^2(2L^2 - d^2) - c^2(2L^2 - c^2)]$



Figuur 27: Clapeyronformule voor gelijk verdeelde q-last over een beperkt gedeelte van de overspanning

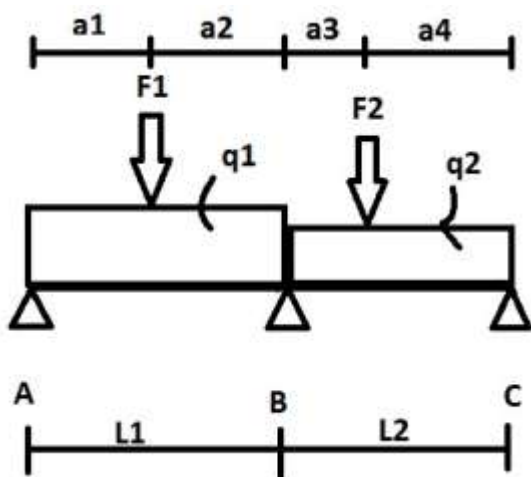
De formules voor het berekenen van de spoorwegbelastingen zijn weergegeven in Figuur 27. Hierin is te zien dat de q-lasten over een deel van de overspanning geplaatst kunnen worden. Dit is representatief voor de spoorwegbelasting, welke bestaat uit meerdere q-lasten. In het vervolg van deze paragraaf worden de formules ten behoeve van de spoorwegbelastingen niet verder behandeld. Er is gerekend met belastingmodel SW/0, welke uitgerekend is in een Mathcad sheet. De exacte bepaling van de meest ongunstige positie op een ligger is berekend met behulp van de invloedslijnen, welke terug te vinden is in paragraaf 0.

Deze formules worden gebruikt in de vergelijking voor het bepalen van de onbekenden, de uiteindelijke (definitieve) formule hiervoor kan geschreven worden als:

$$M_A(L_1) + 2M_B\{L_1 + L_2\} + M_C(L_2) = -\frac{q_1 L_1^3}{4} - \frac{q_2 L_2^3}{4} - \frac{F_1(L_1^2 - a_1^2)}{L_1} - \frac{F_2(L_2^2 - a_4^2)}{L_2}$$

We zien dus dat rechts van het =-teken zoveel belastingen toegevoegd kunnen worden als benodigd is. Bij het toepassen van de momentenvlakmethode is het berekenen van meerdere (verschillende soorten) belastingen op beide liggers omslachtiger, omdat geadviseerd wordt de belastingen afzonderlijk van elkaar te beschouwen bij het berekenen van de oppervlaktes. Ten slotte dient vermeld te worden dat in de bovenstaande vergelijking, ter versimpeling, de stijfheden niet worden meegenomen. De aanname is dus dat de liggers beschikken over een gelijke stijfheid, hierdoor kunnen deze onthouden worden van deze vergelijking.

De bovenstaande vergelijking is schematisch weergegeven in Figuur 28:



Figuur 28: standaardsituatie voor invoer parameters

De bovenstaande uitleg van de berekening is verwerkt het rekenmodel van de methode Clapeyron, dat eigenhandig opgesteld is. In de sheet is de berekening uitgevoerd voor een ligger op drie, vier en vijf steunpunten. Hiermee kan voor verschillende situaties de mechanische waarden berekend worden die benodigd zijn voor het ontwerp. De sheet is overzichtelijk en stapsgewijs opgesteld, waarbij er bovenaan parameters zijn die ingevuld dienen te worden. Naast de parameters is een schematisering opgesteld van de waarden die ingevuld kunnen worden, zodat duidelijk is waar elk parameter voor staat. Verder berekent de sheet alles stap voor stap automatisch uit, wat resulteert in de dwarskrachten en momenten met bijbehorende grafieken. De stapsgewijze toelichting hierop is te vinden in Bijlage II-a.

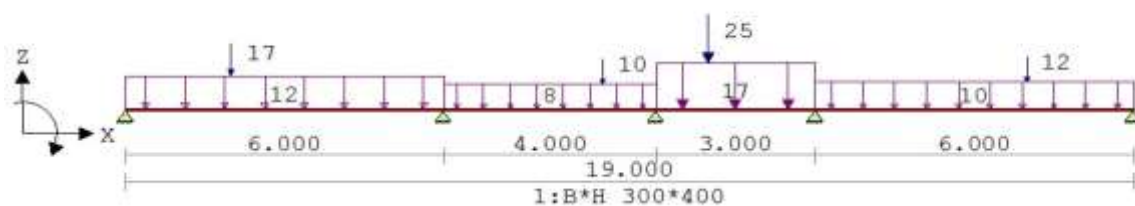
4.2 Rekenblad

Om de sheet te kunnen valideren, nemen we een voorbeeldsituatie aan die in een liggerprogramma en in het rekenmodel wordt ingevoerd. Hier zal een vergelijking van gemaakt worden, om te kunnen bevestigen dat het rekenmodel correct is. Voor de dwarskrachtenlijn is in het rekenmodel een gespiegelde versie weergegeven, omdat voor dit onderzoek de dwarskrachtenlijn altijd vanaf links opgesteld wordt. Technosoft beschouwt dit anders, maar technisch gezien komen beide modellen exact overeen.

Liggerlengten (m)	Traagheidsmoment (mm ⁴)			
<u>L1</u> := 6	<u>I1</u> := 1	<u>I2</u> := 1	<u>I3</u> := 1	<u>I4</u> := 1
<u>L2</u> := 4	Elasticiteitsmodulus (N/mm ²)			
<u>L3</u> := 3	<u>E1</u> := 1	<u>E2</u> := 1	<u>E3</u> := 1	<u>E4</u> := 1
<u>L4</u> := 6				
Lijnlasten (kN/m1)	Puntlasten (kN)	Lastpositie (m)		
<u>q1</u> := 12	<u>F1</u> := 17	<u>a1</u> := 2		
<u>q2</u> := 8	<u>F2</u> := 10	<u>a3</u> := 3		
<u>q3</u> := 17	<u>F3</u> := 25	<u>a5</u> := 1		
<u>q4</u> := 10	<u>F4</u> := 12	<u>a7</u> := 4		

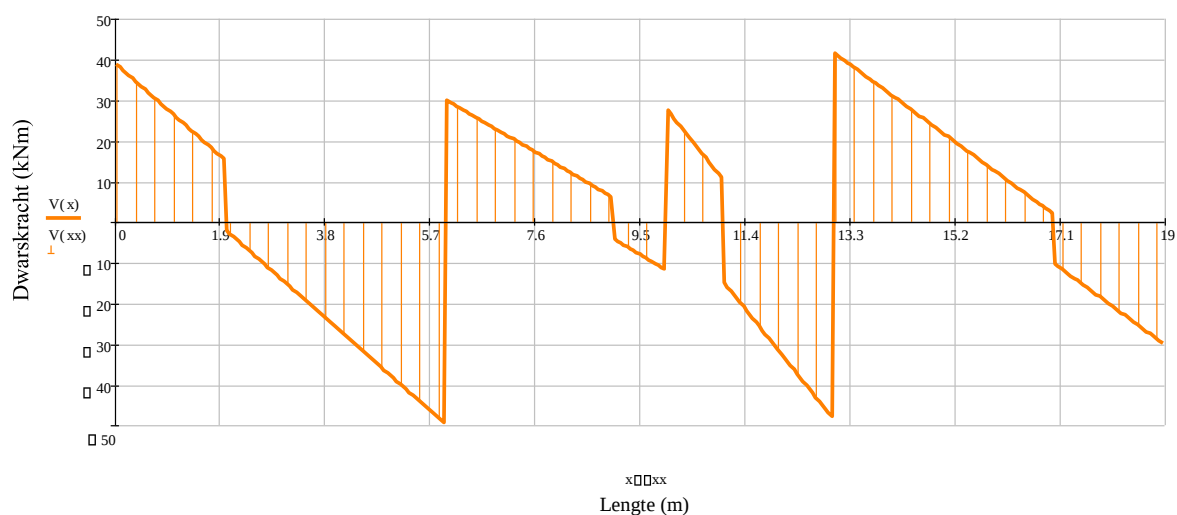
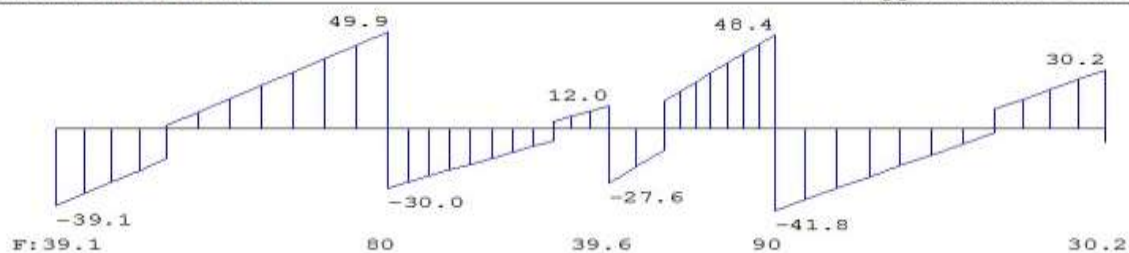
VELDBELASTINGEN

Ligger:1 B.G:1 Normaal



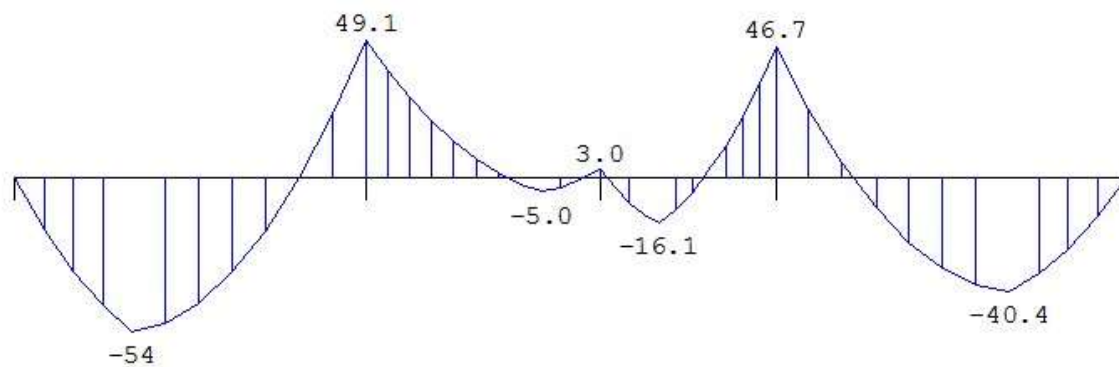
DWARSKRACHTEN

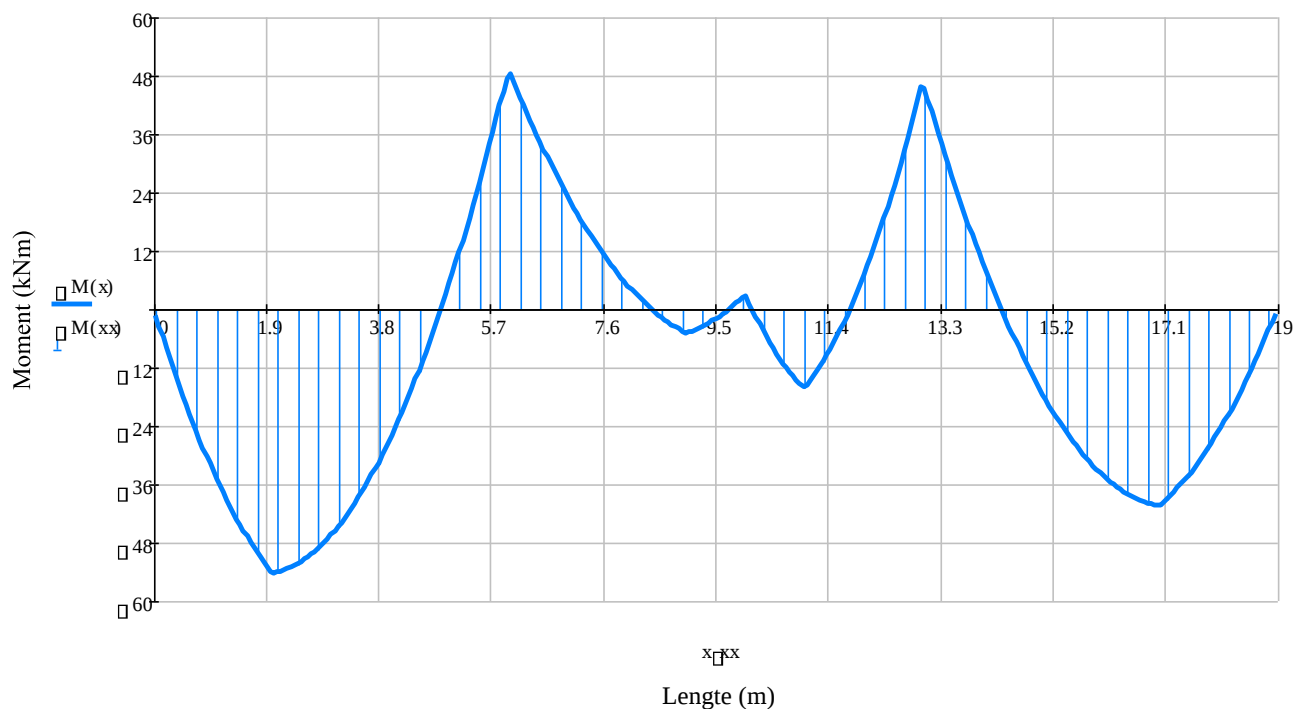
Ligger:1 B.C:1 Sterkte



MOMENTEN

Ligger:1 B.C:1 Sterkte





Geconstateerd wordt dat de reactiekrachten, met de gegeven verschillende decimalen, exact overeenkomen met de gegevens van Technosoft. Ook de dwarskrachtenlijnen hebben hierdoor een overeenkomstige lijn, waarmee aangetoond is dat het rekenmodel in Mathcad correct is. Door deze validatie is de methode goedgekeurd en zal het dus toegepast worden in de casus, maar ook in combinatie met andere berekeningen.

Dezelfde soort berekening is ook in Mathcad uitgevoerd om de momenten en dwarskrachten ten gevolge van spoorwegbelasting te berekenen. Deze is te vinden in bijlage II-a.

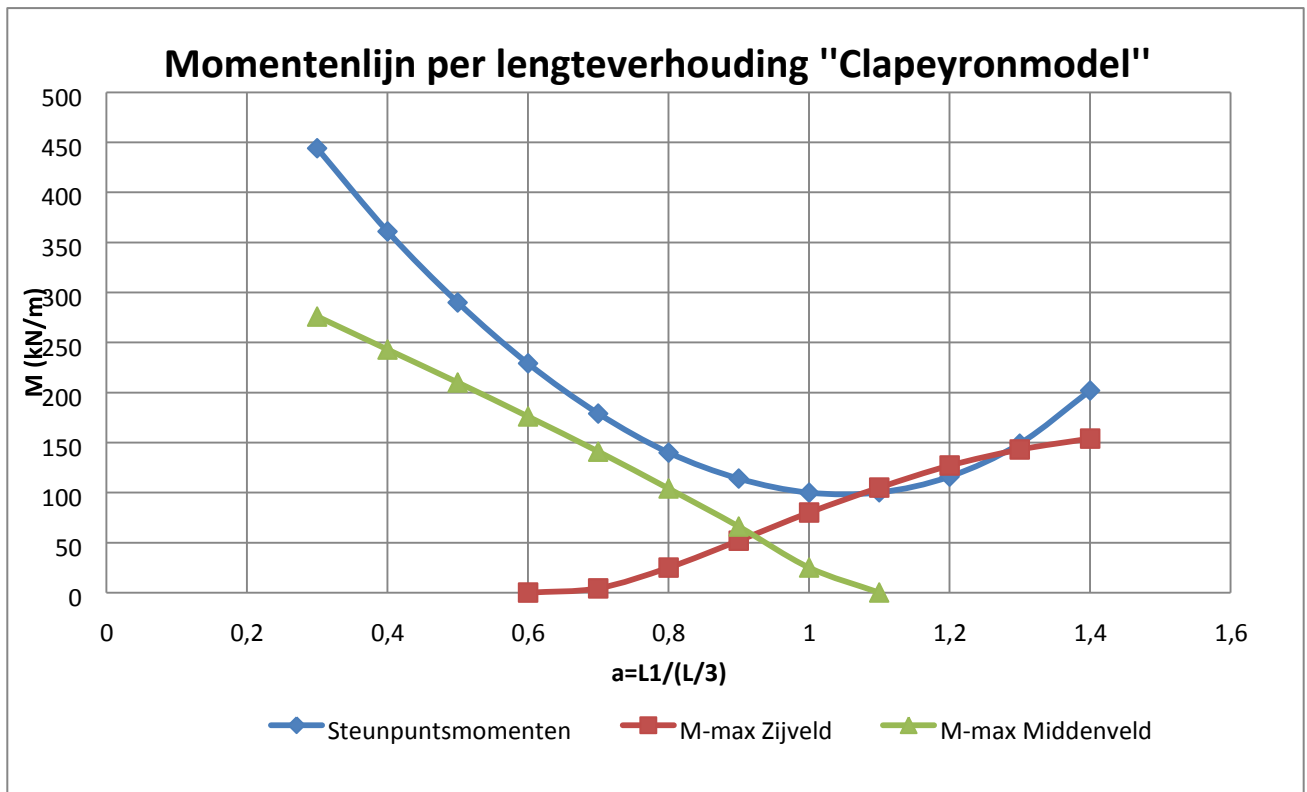
4.3 Analyse

Het model dient ook een technisch doel ten behoeve van ons onderzoek. Om te achterhalen welke lengtes van de overspanningen van een ligger op vier steunpunten de meest ideale zijn, zullen we deze toetsen aan één belastingmodel (gelijk verdeelde q-last over hele ligger). Er zal gekeken worden naar alle steunpunt –en veldmomenten bij de gegeven lengtes. Op basis hiervan zullen de gegevens geanalyseerd worden waarna een conclusie zal worden geformuleerd op basis van deze analyse. Er wordt telkens uitgegaan van één totale lengte van de ligger, waarbinnen de overspanningen van de liggers variabel zijn.

Bij de variant van het “Clapeyronmodel” wordt voor elke situatie de lengteverhoudingen ingevoerd. Dit model rekent automatisch alle onbekende waarden (momenten en reactiekrachten) uit, waarna op basis hiervan een grafiek uitgezet kan worden. De variant waarbij de momentenontwikkeling op basis van de theorie uit het boek “Spelen met momenten” uitgezet is, verloopt dit iets anders. Dit komt doordat de berekening hiervan opgesteld is op basis van vuistregels. De grafiek, bijbehorende waarden en toelichting op de toegepaste methode van dat variant is te vinden in bijlage III-c.

De lengteverhouding a waarmee gerekend wordt:

$$a = \frac{l_1}{l} \text{ met } l = \frac{l}{3}$$



Figuur 2: momentenlijn

De grafieken en waarden per lengteverhouding komen ruimschoots overeen met de theorie uit het boek, wat wederom aantoont dat het Mathcadmodel klopt. Een belangrijke les uit de theorie leert ons dat bepaalde waarden voor a ($a < 0,3$ en $a > 1,3$) als niet realistisch beschouwd mogen worden, waarmee deze genegeerd worden. Hiermee hoeven alleen de eerder genoemde domeinen voor a berekend te worden, dit scheelt veel werk en tijd voor de berekening.

Deze grafiek is opgesteld om de meest gunstige lengteverhoudingen tussen de velden te kunnen verklaren. Uit het document "Vuistregels voor het ontwerpen van betonnen bruggen en viaducten" van Rijkswaterstaat, worden verhoudingen van overspanningen genoemd voor een ligger op vier steunpunten. Een citaat uit het document noemt de volgende

vuistregel voor de verhoudingen: "Bij drie-velders is de verhouding eindoverspanning / hoofdoverspanning = 0,8". Wanneer we deze verhouding vertalen naar een lengte verhouding van 24-30-24, krijgen we hier een a uit van 0,92. De ideale verhouding zal hiermee dus liggen bij $0,90 < a < 1,0$.

Nu kan er verwarring ontstaan bij constructeurs over de definitie van L . Normaliter wordt het middenveld als L gekenmerkt, waarmee de zijvelden worden uitgedrukt in L . Dit zou betekenen dat, wanneer de verhouding wordt aangepast, de totale lengte van de gehele overspanning hiermee varieert. In de weergegeven grafieken wordt louter uitgegaan van een vaste totale lengte waarbinnen de tussenoverspanningen in een symmetrische vorm variëren. De lengteverhouding van 0,8 die genoemd wordt is dus niet te verwarren met de lengteverhouding a die gebruikt is voor de grafieken. Er is voor deze methode gekozen, omdat het doel ligt bij het bepalen van de ideale lengteverhouding tussen de zij- en middenoverspanningen van een ligger die een vooraf vastgestelde lengte dient te overbruggen.

Ook is het mogelijk dat de eindsteunpunten van de ligger kunnen opwippen. Dit fenomeen wordt veroorzaakt wanneer de zijoverspanningen in verhouding vele malen kleiner zijn dan de middenoverspanning. In de bovenstaande grafieken en tabellen is gevarieerd met de lengtes, hierin is te zien dat bij de overgang van $a = 0,6$ naar $a = 0,7$ een omslagpunt plaatsvindt. Bij $a = 0,7$ is er namelijk voor het eerst een maximaal veldmoment terug te zien, wat inhoudt dat bij de zijoverspanningen de momentenlijn onder de 0-lijn komt. Tevens is dit het omslagpunt waarbij de reactiekrachten van de eindsteunpunten naar boven gericht zijn in plaats van naar beneden. In het geval er sprake is van “opwipping” van de eindsteunpunten, kunnen drie maatregelen getroffen worden om dit te voorkomen. Allereerst kunnen de dimensies van de ligger worden aangepast in het midden, dit is een onaangename maatregel. Ook het toevoegen van eigen gewicht op de constructie is financieel gezien niet voordelig. De laatste maatregel is de meest praktische en ook financieel meest gunstige maatregel. Deze houdt namelijk in dat de ligger wordt opgeknipt in liggers op twee steunpunten waarbij de middensteunpunten als scharnier beschouwd worden. Dit principe wordt meestal toegepast bij spoorwegconstructies, omdat de rails van de spoorweg zijn gelimiteerd voor verplaatsingen en hoekverdraaiingen.

4.4 Conclusie

Er kan gesteld worden dat de methode Clapeyron een uiterst effectief en “simpele” methode is om snel inzicht te verkrijgen in de momenten en reactiekrachten van een constructie met de gegeven belastingen. Hiermee voldoet de methode ruimschoots aan de eisen die vooraf gesteld zijn. Zo dient de methode uitsluitend eenvoudig te zijn, kunnen worden toegepast op een dek-constructie (liggerberekening), is het in staat om meerdere overspanning uit te rekenen, kunnen verschillende type belastingen gebruikt worden en ligt binnen deze methode de nadruk enkel op de mechanica.

Persoonlijk heeft het uitzetten van grafieken meer tijd gekost dan verwacht. Dit komt doordat voor elke waarde van x rekening gehouden moet worden met verschillende soorten belastingen en steunpunten die meespelen in het bepalen van een moment of dwarskracht op een specifiek punt. Uiteindelijk heeft het opstellen van deze grafieken en vergelijkingen wiskundig gezien inzicht verschaft.

Hoofdstuk 5: Methode Guyon Massonnet

5.1 Probleemstelling – het plaat- & balkroosterprobleem

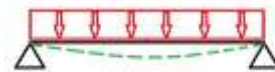
De doorbuiging van een balk is afhankelijk van de positie en grootte van de last op de balk. Wanneer de positie van de last in dwarsrichting wordt beschouwd heeft dit echter geen grote invloed op de doorbuiging van de balk. Wanneer ditzelfde probleem wordt bekeken voor een plaat gaat de positie van de last in dwarsrichting wel een rol spelen: bij excentrisch belasten van een plaat zal deze over zijn dwarsdoorsnede onevenredig doorbuigen.



Figuur 30: doorbuiging in dwarsdoorsnede voor balken (links) en platen (rechts)

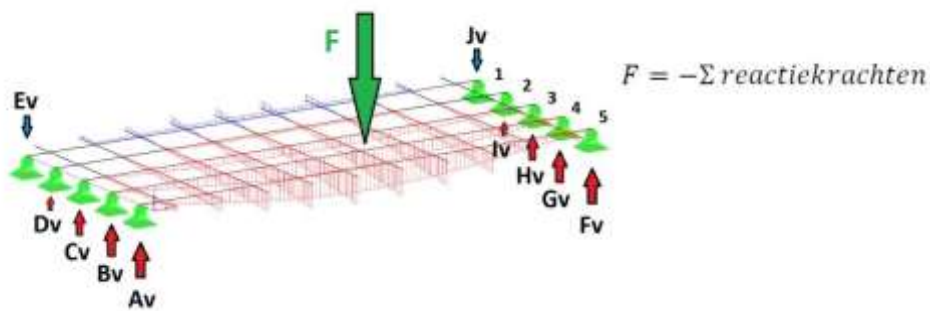
De mate waarin doorbuiging in constructies plaatsvindt, heeft volgens de mechanica een lineair verband met de belasting die op de constructie rust. De grootte van de doorbuiging is daarentegen afhankelijk van het traagheidsmoment (geometrie van de doorsnede) en de elasticiteitsmodulus (materiaal-afhankelijk). Dit is terug te zien in de onderstaande formule voor doorbuiging van een ligger op twee steunpunten onder invloed van een lijnlast.

$$\delta z = \frac{5 * q * L^4}{384 * EI}$$



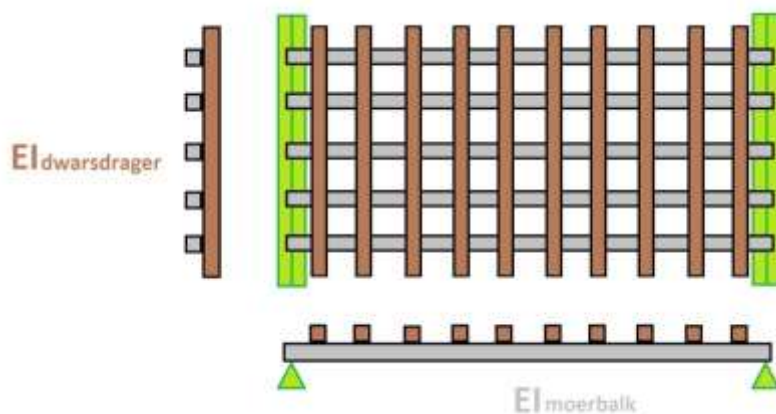
Vergelijking 1: doorbuiging door een q-last

De grote van de doorbuiging δz heeft een lineair verband met de grootte van de q-last. Wanneer de doorbuiging rechts op een plaat groter is, zal de belasting in deze strook dus ook groter zijn. Een grotere belasting in een strook zorgt volgens de mechanica tevens voor evenredig hogere momenten. De strook met de hoogste doorbuiging zal dus maatgevend zijn voor de toetsing van de dek-constructie van een viaduct op sterkte.



Figuur 31: vervorming dek door excentrische last F

Nu duidelijk is dat de belasting, het moment en doorbuiging in een strook van een plaat evenredig zijn met elkaar zal achterhaald moeten worden hoe de effectieve belasting in een strook bepaald kan worden. Om de richting van de oplossing te achterhalen kan een plaat vertaald worden naar een balkrooster (Figuur 32), een gebruikelijke constructievariant voor stalen en houten bruggen. De werking van dit type constructie is voor buigstijfheid gelijk aan die van een plaat. Balkroosterbruggen zijn echter niet in staat om een weerstand te bieden tegen torsie zoals een betonnen dek dit doet.

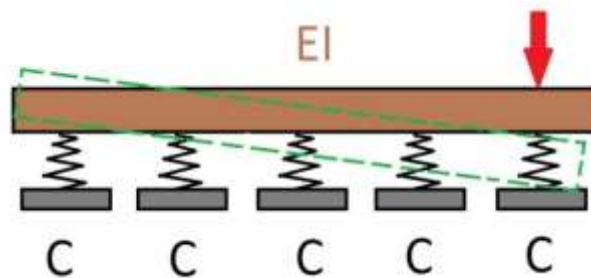


Figuur 32: Balkrooster constructie

Een balkrooster is te modelleren als een 2-dimensionaal staafmodel, hierboven in Figuur 32 weergegeven als balkrooster op twee tegenover elkaar gelegen randen. De doorbuiging van de moerbalk is evenredig met de belasting op de moerbalk uit een dwarsdrager. Dit 2dimensionale model is daarom ook te verwerken tot een eenvoudiger 1-dimensionaal model waarin de moerbalk is gemodelleerd als veer (Figuur 33). De formule voor δz kan worden omgeschreven tot een formule voor veerconstante C .

$$\delta z = \frac{1}{48} * \frac{F * L^3}{EI} \rightarrow C = \frac{48 * EI}{L^3} = \frac{F}{\delta z}$$

Vergelijking 2: bepaling veerconstante C



Figuur 33: balkrooster als 1-dimensionaal model

Uit de veerconstante kan de doorbuiging en reactiekracht van de moerbalk worden berekend door de zakkingsvergelijkingen rondom de steunpunten (de veren) op te lossen. De reactiekracht in het steunpunt met de grootste doorbuiging is hierin de maatgevende belasting. Met deze belasting q kan vervolgens in een staafmodel de momenten en dwarskrachten in de ligger (of strook) worden vastgesteld. Als een effectieve lijnlast of puntlast kan worden bepaald, zou de overige krachtswerking in de maatgevende strook dus met Clapeyron kunnen worden vastgesteld.

De schematisering van het plaat/balkroosterprobleem is nu duidelijk. Om de zwaarst belaste strook in een betonnen verkeersviaduct te kunnen bepalen is dus een vergelijking nodig voor de reactiekrachten van de moerbalken die rekening houdt met de C , EI , het aantal stroken of liggers en de dekbreedte.

Het doel van dit onderzoek is om ingewikkelde vraagstukken versimpeld en handmatig op te lossen. Omdat het balkrooster probleem meer variabelen heeft dan op te lossen is met evenwichtsvergelijkingen (hbo-lesmateriaal), methode Gaap of methode Clapeyron, zal hierbij het probleem op een andere manier moeten worden aangepakt: methode Guyon Massonnet.

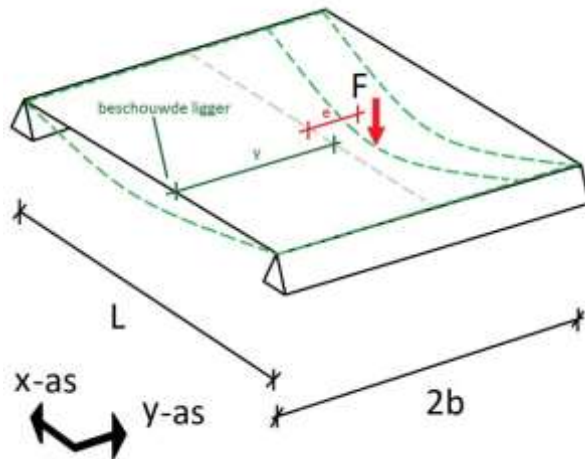
Guyon-Massonnet betreft een methode waarbij de stijfheidsmatrix en dekgeometrie worden verwerkt in één parameter. Daarnaast moeten twee parameters worden gedefinieerd voor de beschouwde positie en de lastpositie. De oplossingen van de differentiaalvergelijking voor verschillende waarden van de 3 parameters is verwerkt in één goniometrische functie voor de invloedsfactor. Deze functie op basis van Fourierreeksen komt overeen met de waarden voor belastingafdracht op basis van de ingevoerde parameters, echter zijn differentiaal vergelijking hierin niet meer terug te vinden. Voor verdere toelichting over de basis van deze formules en Fourierreeksen zie Bijlage III-b.

5.2 Methode Guyon Massonnet

Met de methode Guyon Massonnet is een verhoudingsgetal voor de zakking in een willekeurig punt over de breedte van een brugdek te bepalen. De methode kan worden toegepast om het gedrag van platen en balkroosters te bestuderen of bijvoorbeeld de zwaarst belaste ligger in een brugdek te vinden en hierop te dimensioneren.

De invoer van de methode is de factor θ (theta, voor formule zie §0). De factor combineert de twee eerder genoemde parameters voor stijfheid en lengtebreedteverhouding tot een enkele waarde. θ is constant voor een bepaald brugontwerp waardoor men aan de hand van één parameter alle zakkingen kan berekenen.

Naast parameter θ dient de excentriciteit van de last “e” en de positie van de beschouwde strook of ligger “y” gedefinieerd te worden in meters t.o.v. het



plaat-midden.

Figuur 34: Schematisering parameters Guyon-Massonnet

Vroeger was het voordeel van de enkele constante parameter θ , dat slechts één tabel benodigd was per dek. Hierin werden e en y ten elkaar uitgezet en kan voor 9 verschillende posities de juiste invloedfactor K opgezocht worden. Voor afwijkende posities kan tussen de verschillende posities worden geïnterpoleerd om de juiste K factor te verkrijgen.

De factor K is de afwijking van de gemiddelde zakking. Door de gemiddelde zakking voor het dek te bepalen en deze vergroten met de gemiddelde factor K kan de werkelijke zakking worden gevonden. Om het werkelijke moment in een strook te vinden kan de gemiddelde belasting worden vergroot met K.

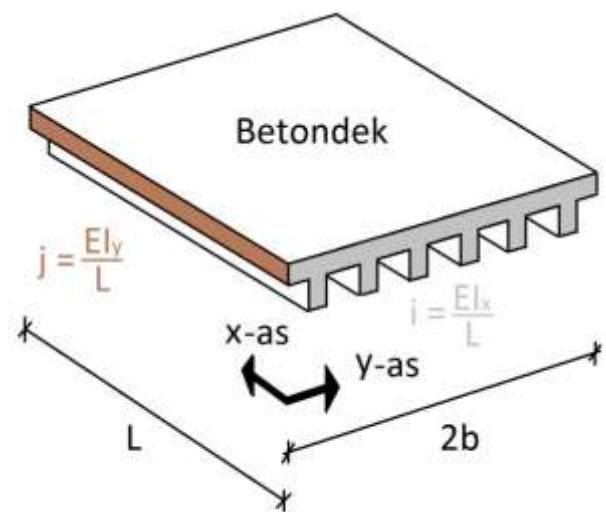
Voor de positie van de last in de lengterichting, de x-as, wordt geen onderscheid gemaakt. De zakkingsfactor is voor alle punten op een lijn van de x-as gelijk. Uitgangspunt van de methode is enkel dat zwaardere belastingen in het midden van het dek worden geplaatst en de lichtere typen belastingen dicht bij de steunpunten. Alle posities worden ingevoerd t.o.v. het dek-midden.

De algemene aanpak voor het ontwerpen van de maatgevende strook:

- Opdelen van lijnlasten en puntlasten per strook van 1000 mm in dwarsrichting;
- Factor K bepalen per strook bij gewenste positie “y”;
- Belasting op strook spreiden over plaatbreedte en vermenigvuldigen met K;
- Totale effectieve belasting op strook bepalen met $\Sigma[K \cdot \text{belasting}]$;
- Effectieve belasting invoeren in Clapeyron voor het bepalen van de D- en M-lijn.

5.2.1 Invoer: de factor θ

Om K te bepalen zal eerst θ voor het gewenste brugdek vastgesteld moeten worden. Veelal zal een brugdek geen constante stijfheid over zijn dwars- en/of langsdoorsnede hebben, net zoals het geval is in het dek hiernaast in Figuur 35. Om het dek in te kunnen voeren in de formule voor θ zal dit dek eerst vertaald moeten worden naar een orthotroop dek: een dek met een constante buigstijfheid voor de x-as en de y-as. Namelijk: i , een constante buigstijfheid over de dwarsdoorsnede en j , een constante buigstijfheid over de langsdoorsnede. De buigstijfheden in de twee assen kunnen dus wel van elkaar afwijken.



De formule voor θ is als volgt:

$$\theta = \frac{b}{L} * 4 \sqrt{\frac{i}{j}}$$

F

Massonnet

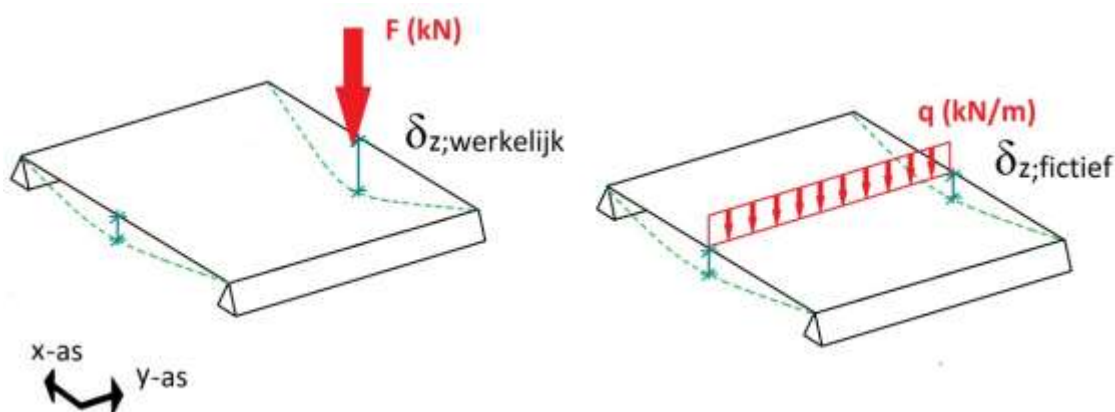
Vergelijking 3: formule voor hoofdparameter theta

5.2.2 Uitvoer: de factor K

Het resultaat van de methode is de eerder beschreven factor K . Deze vertegenwoordigt het verschil tussen de zakking door de werkelijke excentrische plaatselijke last en een fictieve gespreide last.

$$K = \frac{\text{werkelijke zakking (plaatselijke last)}}{\text{fictieve zakking (gespreide last)}}$$

Vergelijking 4: Formule voor invloedfactor K



Figuur 36: werkelijke zakking bij puntlast (links) & fictieve zakking bij gespreide last (rechts)

De toe te passen waarde van K wordt berekend uit de waarden van K_0 (geen torsiestijfheid) en K_1 (torsiestijfheid is gelijk aan buigstijfheid). Wat de waarden van K_0 en K_1 kan kan bij de methode Guyon-

Massonnet worden gevonden in tabellen zoals hieronder in Figuur 37 uit Analysis of Beam Grids and Orthotropic Plates by the Guyon-Massonnet-Bares method door Bares en Massonnet. Hierbij wordt de lastpositie (y) uitgezet op de y-as en de beschouwde positie (e) uitgezet op de x-as. De corresponderende waarde voor K_0 en K_1 kan worden gevonden door verticaal de lijn van e en horizontaal de lijn van y te volgen. Als horizontaal de gemiddelde waarde voor K wordt bepaald is te zien dat de gemiddelde invloed 1,000 is maar dat de belating afhankelijk van θ anders wordt verdeeld over de breedte.

θ	$-\frac{3b}{4}$	$-\frac{b}{2}$	$-\frac{b}{4}$	0	$\frac{b}{4}$	$\frac{b}{2}$	$\frac{3b}{4}$	b
$\theta = 4,20$	Table 1/41							
0	-0,0033	+0,0123	-0,0920	+0,0303	-9,3322	+0,0303	-0,0920	+0,0123
$b/4$	+0,0002	-0,0008	+0,0120	-0,0920	+0,0303	-9,3322	+0,0303	-0,0920
$b/2$	0	0	-0,0007	+0,0120	-0,0920	+0,0303	-9,3322	+0,0123
$3b/4$	0	0	0	-0,0038	+0,0123	-0,0920	+0,0194	-9,5918
b	0	0	0	+0,0002	-0,0033	+0,0258	-0,0166	-2,5004
	Table 1/42							
0	+0,0002	+0,0036	+0,0684	+1,0474	-6,5973	+1,0474	+0,0684	+0,0036
$b/4$	0	+0,0002	+0,0036	-0,0684	+1,0474	-6,5973	+1,0474	+0,0687
$b/2$	0	0	-0,0002	+0,0036	-0,0684	+1,0474	-6,5973	+1,0539
$3b/4$	0	0	0	+0,0002	+0,0036	+0,0687	+1,0539	-6,8974
b	0	0	0	0	+0,0002	+0,0033	+0,1031	+1,7214
$\theta = 4,40$	Table 1/43							
0	-0,0021	+0,0080	-0,0598	-0,1048	-9,7774	-0,1048	-0,0598	+0,0089
$b/4$	+0,0002	-0,0007	+0,0087	-0,0598	-0,1048	-9,7774	-0,1048	-0,0599
$b/2$	0	0	-0,0007	+0,0087	-0,0598	-0,1048	-9,7782	-0,1170
$3b/4$	0	0	0	-0,0007	+0,0089	-0,0599	-0,1170	-10,0108
b	0	0	0	+0,0002	-0,0021	+0,0128	+0,0513	+2,6024
	Table 1/44							
0	+0,0001	+0,0025	+0,0545	+0,9720	-6,9115	+0,9720	+0,0545	+0,0025
$b/4$	0	+0,0001	+0,0025	-0,0545	+0,9720	-6,9115	+0,9720	+0,0547
$b/2$	0	0	-0,0001	+0,0025	+0,0545	+0,9720	-6,9118	+0,9766
$3b/4$	0	0	0	+0,0001	-0,0025	+0,0547	+0,9766	-6,9837
b	0	0	0	0	+0,0001	+0,0036	+0,0818	+1,5869

Figuur 37: tabel voor K_0 en K_1 uit Analysis of Beam Grids and Orthotropic Plates by the Guyon-Massonnet-Bares method

Daarnaast zijn exacte formules opgesteld in de vorm van Fourierreeksen om de waardes van K exact te bepalen. Deze methode voor het bepalen van K_1 en K_0 is terug te vinden in bijlage III-b. Voor het rekenblad van Guyon-Massonnet is gebruik gemaakt van deze formules zodat niet geïnterpoleerd hoeft te worden tussen de 9 waarden voor K uit de tabellen.

Een goede controle voor de juistheid van de resultaten is de controle op verticaal evenwicht. Hiermee wordt gekeken of de ingevoerde verticale belastingen na vermenigvuldiging met K een gelijk resultaat geven.

De toe te passen waarde voor K is $K\alpha$. De factor α is een verhouding tussen de torsiestijfheid van het dek en de buigstijfheid. De methode voor het bepalen van torsiestijfheid kan worden teruggevonden in bijlage III-a. De waarde van α dient eerst te worden bepaald, alvorens de waarde van $K\alpha$ kan worden vastgesteld.

$$\alpha = \frac{i0+j0}{2\sqrt{i+j}} \leq 1,0 \quad K\alpha = K_1 + (K_0 = K_1) * \sqrt{\alpha}$$

5.2.2.a Correctie op Factor-K bij doorgaande ligger

De methode Guyon Massonnet is oorspronkelijk bedoeld voor een plaat of balkrooster op twee steunranden. Het uitgangspunt van dit afstudeerproject is een viaduct met 3 velden dus de methode zal gecorrigeerd moeten worden met een factor voor een doorgaande ligger. Hierbij gedraagt de plaat zich stijver in langsrichting doordat er ter plaatse van de tussensteunpunten een moment heerst dat de velden omhoog drukt. De zakking wordt hierdoor beperkt. De factor θ zal moeten worden gecorrigeerd voor de langs-buigstijfheid i door de factor C .

Voor het vaststellen van C moet de werkelijke optredende veldzakking bepaald worden met invloed van de aangrenzende velden: $\Sigma\delta_{\text{werkelijk}}$. Vervolgens moet ook de zakking beschouwd worden zoals deze zou optreden zonder aangrenzende velden: $\Sigma\delta_{\text{enkel veld}}$. De zakkingen kunnen worden bepaald door de steunpuntmomenten bij de doorgaande ligger te berekenen. De steunpuntmomenten zullen de veldzakking beperken. Deze veldzakking is te bepalen met de volgende twee vergeet-mij-nietjes:

$$\delta z = \frac{F * L^3}{48 * EI}$$

Vergelijking 5: doorbuiging door puntlast

$$\delta z = \frac{5 * q * L^4}{384 * EI}$$

Vergelijking 6: doorbuiging door q-last

Als de werkelijke zakking en de zakking zoals deze optreedt bij een enkel veld zijn bepaald, kunnen C en θ worden vastgesteld met de volgende formules:

$$C = \frac{\Sigma\delta_{\text{enkel veld}}}{\Sigma\delta_{\text{werkelijk}}}$$

Vergelijking 7: formule voor correctiefactor C

$$\theta = \frac{b}{2a} * \sqrt[4]{\frac{C * i}{j}}$$

Vergelijking 8: formule voor theta (inclusief correctiefactor)

5.2.3 Validatie methode Guyon Massonnet

Om de correctheid van de methode Guyon Massonnet voor het bepalen van de herverdeling van belastingen in platen en balkrooster te controleren is een 6 tal verschillende dekken gecontroleerd. Dekken 1 tot 3 hebben geen torsiestijfheid en dekken 4 tot 6 hebben een torsiestijfheid i_0 die gelijk is aan hun buigstijfheid i . De beide dek-typen zijn daarnaast onderverdeeld in een dek met $\theta = 0.3$, $\theta = 1.0$ en $\theta = 3.0$. Vervolgens is een lange lijst met mogelijk dek-configuraties opgesteld waarvoor de waarden voor θ zijn bepaald.

De onderstaande dekken komen overeen met de gewenste waarden voor θ en α zodat ze kunnen worden ingevoerd in een eindig-elementen programma als orthotrope plaat of balkrooster. Op het

middelpunt van de buitenste randligger van het balkrooster en de corresponderende positie op de orthotrope plaat is een puntlast van 100 kN geplaatst. Vervolgens wordt de zakking volgens het Guyon Massonnet rekenblad vergeleken met de zakking volgens het eindig-elementen-softwarepakket "RFEM" van Dlubal. Alle dekken worden ingevoerd als orthotrope plaat en balkrooster om de overeenkomsten met beide modeleringen te beschouwen.

		dekken zonder torsie stijfheid ($\alpha=0$)			Dekken met torsiestijfheid ($\alpha=1$)		
afk.	eenh.	Dek 1	Dek 2	Dek 3	Dek 4	Dek 5	Dek 6
θ	-	0,3	1	3	0,3	1	3
b	mm	10	40	60	10	40	60
l	mm	20	20	20	20	20	20
E	N/mm ²	30000	30000	30000	30000	30000	30000
G	N/mm ²	13043	13043	13043	13043	13043	13043
v	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
i	kNm	8,63E+06	8,63E+06	8,63E+06	8,63E+06	8,63E+06	8,63E+06
j	kNm	4,42E+06	8,63E+06	5,39E+05	4,42E+06	8,63E+06	5,39E+05
D12	kNm	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,29E+06
i0	kNm	0	0	0	8,63E+06	8,63E+06	8,63E+06
D44	kNm	1,96E+07	1,96E+07	1,96E+07	1,96E+07	1,96E+07	1,96E+07
D45	kNm	0	0	0	0	0	0
D55	kNm	1,57E+07	1,96E+07	7,76E+06	1,57E+07	1,96E+07	7,76E+06

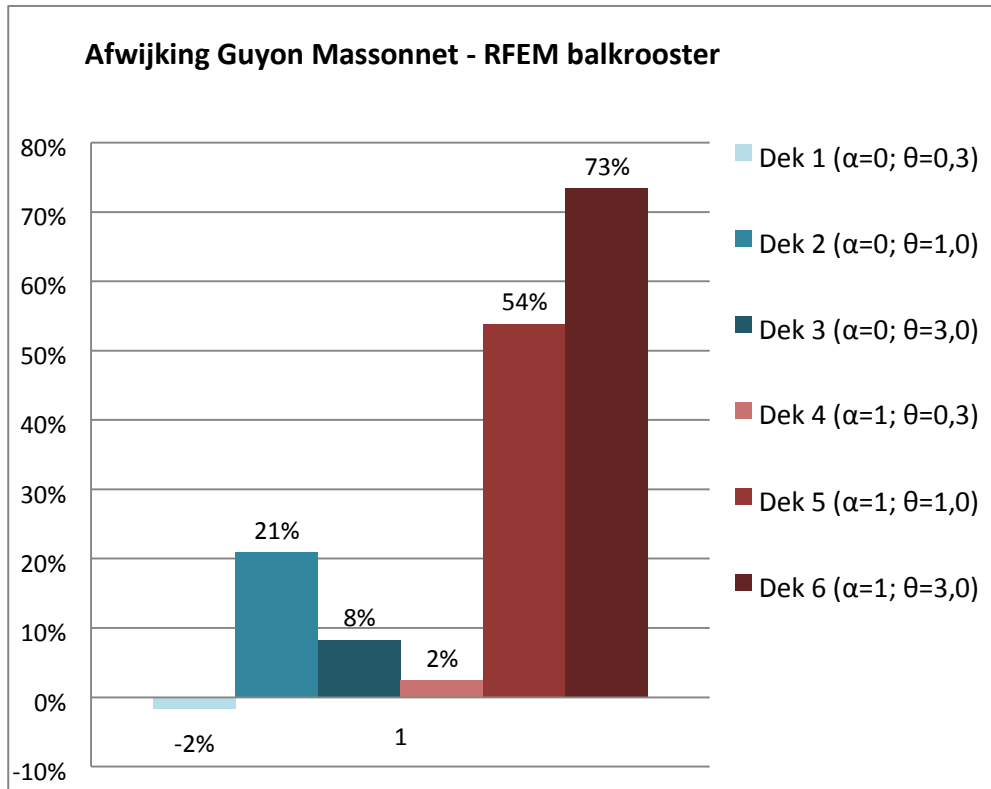
5.2.4 Validatie 1 - Vergelijking met balkrooster

Uit de vergelijking met het balkrooster model blijkt dat Guyon Massonnet voor bruggen met $\alpha = 0$ een redelijk kloppend resultaat geeft voor dwarsverdeling van belasting en zakking. De zakking en belasting is op de zwaarst belaste ligger is volgens Guyon-Massonnet maximaal 20% hoger dan volgens het RFEM balkrooster model. Guyon-Massonnet rekent dus ongunstiger voor hoeveelheid benodigd materiaal van de doorsnede. Er zal meer materiaal gebruikt worden dan nodig om weerstand te bieden volgens de voorgeschreven belastingen. Na het invoeren van de diverse dek-geometrieën die voor wegverkeersviaducten gebruikelijk zijn, blijkt voor de stijfheidsparameter die meestal geldt: $\theta \approx 0.3$. Bij dit type viaduct zijn de afwijkingen dan ook maar heel beperkt: slechts 2%.

De conclusie hieruit is dat de balkrooster modelering in RFEM bij $\alpha = 0$ goed overeenkomt met Guyon-Massonnet. De methode is voor stalen en houten dekken (zonder plaatselijke verstijvingen) een goede methode. Ook bij betonnen dekken blijkt de α -waarde niet werkelijk 1,0 te zijn maar beter benaderbaar met $\alpha \approx 0,15$

Wanneer de torsiestijfheid gelijk is aan de buigstijfheid ($\alpha = 1$) zoals in dekken 4, 5 en 6 moet in RFEM de modelering waarschijnlijk gezocht worden in die van een orthotrope plaat. De resultaten als balkrooster zijn namelijk zeer ongunstig. De modelering als orthotrope plaat zal verder worden beschouwd in §5.2.5.

De invoer en uitvoer van RFEM en Guyon-Massonnet voor de validatie van het balkroostermodel zijn te vinden in Bijlage III-e t/m III-i.



Figuur 38: afwijkingen Guyon-Massonnet als balkrooster

5.2.5 Validatie 2 – vergelijking met orthotrope plaat

Uit de voorgaande paragraaf blijken de dekken met $\alpha = 0$ goed te modelleren als balkrooster. Echter wanneer torsiestijfheid ($\alpha = 1$) een zeer grote rol speelt moet dit vermoedelijk anders worden gemodelleerd. Bijvoorbeeld als een orthotrope plaat waar de torsiestijfheid kan worden ingevoerd.

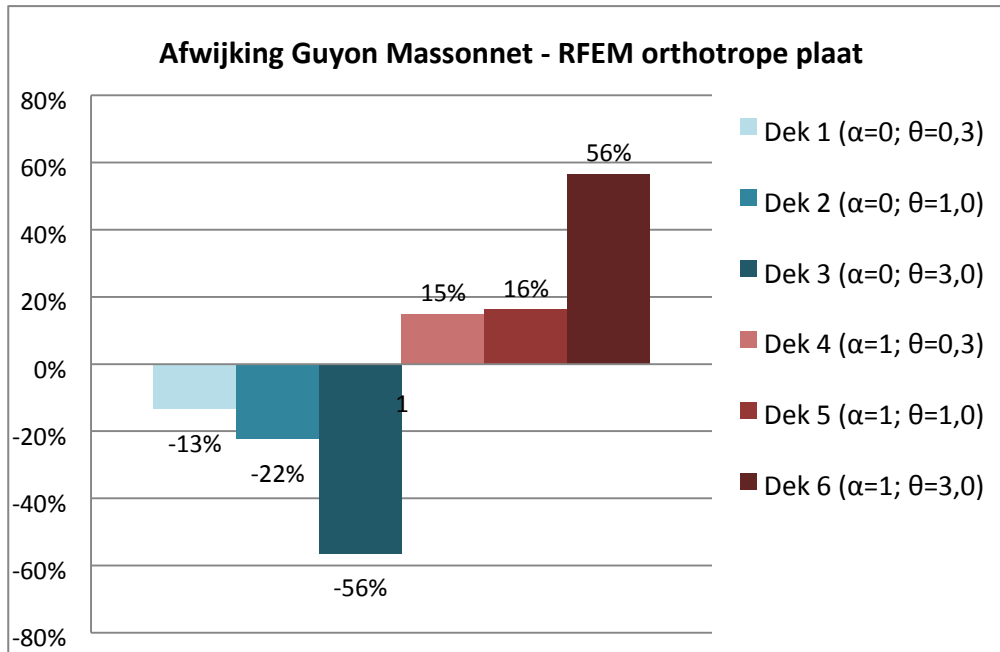
Na het invoeren van de dekken als orthotrope plaat blijkt dat de zakking volgens Guyon Massonnet bij $\alpha = 0$ lager uit valt dan in het RFEM model. Dit betekent dat een stalen of houten balkrooster brug niet geschikt is om als orthotrope plaat in te voeren, maar beter als balkrooster.

De resultaten voor de dekken met $\alpha = 1$ zijn voor waarden van θ tot 1,0 goed bruikbaar. De afwijking van 15% is te accepteren als beschouwd wordt dat enkel de excentrische lasten met een afwijking worden herverdeeld. Het overgrote deel van de belasting is namelijk centrisk (permanente lasten en deel van de variabele belasting). De afwijking van de berekende effectieve last op de werkelijke effectieve belasting zal dus kleiner zijn naarmate een groter deel centrisk is. De variabele belasting is bij betonnen dekken circa 25% van de totale belasting. Aangezien de centrisk belasting geen afwijking hebben, omdat deze direct berekend kunnen worden zal de totale afwijking ongeveer 4% zijn.

Bij waarden van θ hoger dan 1 wordt de afwijking op de zakking groter. De waarde van θ wordt hoger naarmate de dwarsverbinding een lagere buigstijfheid heeft dan de

hoofdoverspanningsrichting. Alle beschouwde plaatviaducten hebben echter een θ kleiner dan één dus deze afwijking is voor de berekeningen in dit onderzoek niet van toepassing.

De invoer en uitvoer van RFEM en Guyon-Massonnet voor de validatie van het balkroostermodel zijn te vinden in Bijlage III-j t/m III-o.



Figuur 39: afwijkingen Guyon-Massonnet als orthotrope plaat

5.3 Conclusie Guyon-Massonnet

Guyon Massonnet blijkt na het opzetten van een rekenblad en de validatie een goede methode voor het doen van een simpele toetsing op krachtswerking in dwarsrichting. Met het Excel rekenblad dat is opgezet rondom de methode kan snel inzicht worden gegeven in de belastingen en momenten in een viaduct dat bestaat uit 1, 2 of 3 velden. De samengevoegde sheet is te vinden in Bijlage VI. Daarnaast is ook een analyse uitgevoerd met invloedslijnen (Bijlage III-c) waarmee is bewezen dat de randstrook de maatgevende positie is voor het beschouwen van de hoogste momenten in een plaat. Ten slotte is de methode gevalideerd aan de hand van het plaatsen van een proefbelasting op de rand van de plaat om de zakking in de plaat te vergelijken met de zakkingen volgens RFEM. Hieruit bleek dat het type viaduct dat in dit onderzoek veelvuldig wordt gebruikt ($\theta \approx 0,3$ en $\alpha \approx 0,15$) dat de afwijking op de zakkingen 2% betreft vergeleken met het eindig-elementen balkrooster model. De geconstateerde afwijkingen zijn aanvaardbaar voor een grove toetsing.

Persoonlijk was het opstellen van het rekenblad een ingewikkelde opgave omdat de formules voor K_0 en K_1 bestaan uit ingewikkelde goniometrische functies (sinus en sinushyperbolicus-functies) waar een verkeerd geplaatst haakje direct zorgt voor foutieve antwoorden. Ook het opstellen van de juiste stijfheidsmatrix bij de 6 dek-constructies bood veel uitdaging. Gelukkig waren daar verschillende constructeurs van Royal HaskoningDHV die bereid waren om hun vakkundig oog over het vraagstuk te laten gaan. Zo kon vaak snel een passende oplossing op het probleem gevonden worden.

Hoofdstuk 6: Vuistregels en kosten

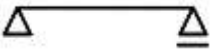
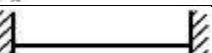
Met behulp van de methoden en de samenvoeging hiervan kunnen ook optimalisatieberekeningen gemaakt worden. Om op een eenvoudige manier inzicht te verkrijgen in de dimensionering, worden met behulp van de methoden vuistregels opgesteld waarmee gewerkt kan worden. Door hierbij een kostenraming op te stellen is bepaald welke posten een belangrijke factor hierin spelen.

6.1 Vuistregels

In de hoofdvraag van dit onderzoek wordt gesteld dat het van belang is om snel inzicht te kunnen hebben in de benodigde dimensies van verkeersviaducten. Met deze ervaring kan op kritieke momenten snel beoordeeld worden of de keuze van een constructeur aannemelijk is of niet. Ook kan hiermee in het vervolg tijd bespaard worden in een vroeg stadium van het ontwerpproces door snel een doorsnede te kunnen kiezen die voldoet aan alle ontwerpcriteria.

In dit hoofdstuk zal getracht worden dit inzicht te verkrijgen door onderzoek te doen naar een verband tussen overspanningen en de benodigde constructiehoogte voor een veelvoorkomend type viaduct: een massieve gewapende plaat. De constructiehoogte zal worden bepaald bij wegverkeersbelastingen en spoorwegverkeersbelastingen zoals beschreven in Hoofdstuk 2: . Voorheen waren hier vuistregels voor bekend, maar door aangescherpte eisen voor scheurwijdte in de Eurocode, zijn de oude vuistregels niet langer betrouwbaar. Ook zijn de belastingen waarmee deze vuistregels zijn bepaald vermoedelijk afkomstig uit de woningbouwsector waar wordt gerekend met lichtere variabele belastingen.

De middelen om de krachtswerking in dek-constructies te bepalen zijn nu beschikbaar, dus de volgende uitdaging betreft het ontwikkelen van een efficiënte samenvoeging van de methoden om een vergelijking te kunnen maken tussen de resultaten aan de hand van de huidige normen (Eurocode) en de bestaande vuistregels.

	Schema	$\frac{l}{d} \ (l \leq 7,0m)$	$\frac{l}{d} \ (l > 7,0m)$
1.		25	$\frac{175}{l}$
2.		32	$\frac{225}{l}$
3.		35	$\frac{245}{l}$

Tabel 1: Vuistregels plaathoogte voor beton uit VBC

De verwachting voor dit onderzoek is dat voor doorgaande liggers zal gelden dat meer tussensteunpunten een winst zal opleveren betreft een lagere constructiehoogte. Dit effect is beschreven in de bovenstaande vuistregels die in de huidige GTB tabellen van de Betonvereniging staan en afkomstig zijn uit de oude VBC norm. Dit is de voorganger van de huidige Eurocode norm. Te zien is dat bij overspanningen van meer dan 7,0 meter de benodigde constructiehoogte excentrisch stijgt.

Voor dit onderzoek zullen deze drie situaties worden nagerekend in de vorm van: 1. enkelveld-viaducten, 2. twee-velds-viaducten en 3. drie-velds-viaducten. Alle wegverkeersviaducten zijn in dit onderzoek ontworpen met een vaste breedte van 15 meter en twee rijstroken (1x2). Alle spoorwegviaducten hebben een breedte van 6 meter met een enkel spoor.

De overspanningen zijn zo gekozen dat de veld- en steunpuntmomenten elkaar zullen benaderen. De lengten die zal worden uitgezet tegen benodigde constructiehoogte is L in meters. De verhoudingen van overspanningen zijn als volgt:

		Lengte 1 ^e veld	Lengte 2 ^e veld	Lengte 3 ^e veld
1.	Enkel-veld-viaducten	L		
2.	2-velds-viaducten	L	L	
3.	3-veldsviaducten	$0,8 * L$	L	$0,8 * L$

6.1.1 Uitgangspunten

Veiligheidsklasse	CC3
Betonsterkte klasse	C30/37
Betonstaal	B500
Dekking $C_{toegepast}$	60 mm
Milieuklasse	XC4, XD3, XS3, XF4
Ontwerplevensduur	100 jaar
Spannings-rekdiagram	Bi-lineair

De doorbuiging uit eigen gewicht en rustende belasting wordt aangebracht als toog.

6.1.2 Werkwijze

Voor het bepalen van een minimaal benodigde constructiehoogte is een vaste werkwijze gehanteerd die hieronder zal worden toegelicht.

6.1.2.a Schatten van de benodigde constructiehoogte

Ten behoeve van de belasting uit het eigen gewicht wordt direct een inschatting gemaakt voor de benodigde dek-constructie. Deze dient later in het ontwerpproces voldoende weerstand te kunnen bieden tegen de belastingen.

6.1.2.b Effectieve belasting op maatgevende strook

De doorsnede wordt getoetst op de krachtswerking in een strook van 1000 mm breed. Hiervoor moet de belastingverdeling over de breedte worden beschouwd. Na herverdeling van de krachten wordt bepaald welke strook de grootste belasting zal dragen. Deze strook zal hiermee maatgevend zijn voor de berekening.

Bij spoorwegverkeersviaducten is elke strook gelijk belast door een smalle constructie waarin de effectieve breedte gelijk is aan de constructiebreedte. Aan het dragen van de mobiele last wordt daarom vanuit elke strook een gelijke bijdrage geleverd.

Bij wegverkeersviaducten is dit niet het geval. De randstrook wordt zwaarder belast dan de overige rijstroken ten gevolge van een excentrische mobiele belasting (zie hoofdstuk 2:

Belastingen). Hierom wordt het belastingstelsel in Guyon Massonnet ingevoerd en volgen hieruit de effectieve lijnlasten en puntlasten na herverdeling in de randstrook.

Het eigen gewicht wordt voor spoor- en wegverkeersviaducten gelijk verdeeld over de breedte omdat deze belasting geen excentriciteit heeft ten opzichte van het zwaartepunt.

6.1.2.c Bepalen D- & M-lijn

De effectieve belastingen worden in BGT en UGT ingevoerd in een rekenblad met de methode Clapeyron voor het betreffende mechanicaschema. De maximale momenten- en dwarskracht-combinatie wordt hiermee uit de D- & M-lijn afgelezen.

6.1.2.d M- κ diagram opstellen: buigstijfheid

De geschatte doorsnede wordt ingevoerd in Technosoft M-N-kappa om het traagheidsmoment en elasticiteitsmodulus te bepalen. Het maatgevende moment en dwarskracht uit stap 6.1.2.c dienen hier als invoer. Na 20 verschillende doorsneden te hebben ingevoerd bleek de elasticiteitsmodulus E voor de betondoorsnede altijd een waarde tussen

10.000 en 13.000 N/mm² te hebben. Het traagheidsmoment I bleek goed benaderbaar met $\frac{1}{12}bh^3$ door de wapening te verwaarlozen voor de berekende platen.

Met deze kennis is besloten om in het vervolg voor het bepalen van de constructiehoogte uit te gaan van E=10.000 N/mm² en $I=\frac{1}{12}bh^3$ voor gewapend beton.

6.1.2.e Controle op doorbuiging

Aan de hand van de bekende buigstijfheden, belastingen en de steunpuntsmomenten uit het rekenblad met de methode Clapeyron konden aan de hand van vergeet-me-nietjes de doorbuigingen van de verschillende velden worden gecontroleerd.

Toetsing doorbuiging wegverkeersviaducten: $\delta z \leq \frac{L}{250}$

Toetsing doorbuiging spoorwegverkeersviaducten: $\delta z \leq \frac{L}{700}$

De toetsing op door buiging van spoorwegverkeersviaducten is gebaseerd op passagierscomfort. Om het comfort voor reizigers te kunnen waarborgen en er niet teveel doorbuiging mag optreden voor het spoor, is een hoger criterium gesteld voor doorbuiging bij spoorwegverkeersviaducten. Het criterium per maximum snelheid en type verkeer is opgenomen in figuur A2.3 van de NEN-EN 1990 uit 2011.

Er is besloten de doorbuiging uit eigen gewicht aan te brengen als toeg, zodat deze geen rol speelt in de toetsing op doorbuiging.

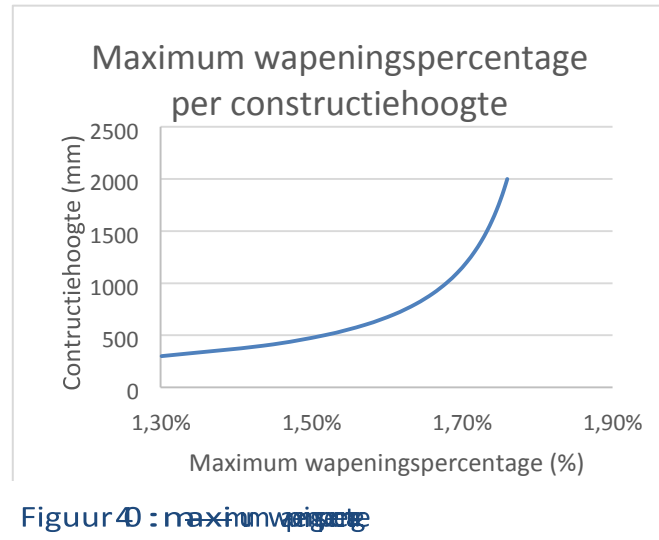
6.1.2.f Controle op sterkte en scheurwijdte

Vervolgens is de gekozen doorsnede gecontroleerd of deze zou voldoen op sterkte en scheurwijdte. Scheurwijdte was zoals verwacht maatgevende factor, waarbij de unitycheck voor sterkte altijd uitkomt op 0,5 à 0,6.

Een belangrijke punt tijdens het bepalen van de benodigde effectieve hoogte d op sterkte en scheurwijdte was het maximum wapeningspercentage. Deze beperking is afkomstig van het horizontale krachterevenwicht en de maximale hoogte van de betondrukzone $X_{u,max}$ waarvoor de regel geldt:

$$\frac{x_u}{d} = \frac{500}{500 + f_{yd}} = \frac{500}{935}$$

Door de dekking van 60 mm aan te houden en te voldoen aan het maximum wapeningspercentage kon in alle gevallen met een unity-check voor sterkte op 0,5 worden voldaan aan de scheurwijdte eis. Na dit te hebben geconstateerd en beproefd is ervoor gekozen om de sterkte berekening op te nemen in het rekenblad en de unitycheck voor sterkte op 0,5 aan te houden als richtlijn voor de benodigde constructiehoogte.



Figuur 40 : maximum wapeningspercentage

6.1.3 Resultaten Vuistregels

Het bovenstaande stappenplan is doorlopen voor viaducten met één, twee en drie velden met veldlengtes van 10 tot 35 meter. Bij grotere overspanningen L zijn de benodigde hoogten en benodigde hoeveelheden betonstaal buitenproportioneel groot, waardoor het niet realistisch is deze mee te nemen in dit onderzoek. Tevens zijn bij de berekende viaducten de benodigde d 's zo hoog dat het toepassen van voorspanstrengen kan zorgen voor lagere kosten en hoogten. Deze vergelijking valt echter buiten de scope van dit onderzoek.

6.1.4 Resultaten Vuistregels – Wegverkeersviaducten

Voor wegverkeersviaducten met 1 veld is de curve “liggerhoogte Eurocode” opgesteld in Figuur 41 die voldoet aan de drie eerder genoemde toetsingen. De berekeningen kunnen worden gevonden in Bijlagen IV-a tot IV-f. Als de berekende curve wordt vergeleken met de curve volgens de oude vuistregels uit de VBC wordt gezien dat deze voor een ligger van 10 meter nog overeenkomen, maar dat het verschil daarna steeds groter wordt. Voor wegverkeersviaducten de vuistregel 1 uit Tabel 1 dus niet geschikt. Een betere vuistregel zou zijn:

$$\text{vuistregel 1 veld – betonnen plaat (wegverkeer): } d = 311 * e^{0,0598 * L}$$

* d in mm; L in m

Voor wegverkeersviaducten met 2 velden is de curve “liggerhoogte Eurocode” opgesteld in Figuur 42, waarin te zien is dat de benodigde hoogte d lager uitvalt dan bij een enkel veld. De berekeningen kunnen worden gevonden in Bijlagen IV-g tot IV-l. Het veldmoment wordt namelijk beperkt door het moment ter plaatse van het middelste steunpunt. Dit is een belangrijke factor voor het bepalen van

de constructiehoogte. De vergelijking met de oude vuistregel is wederom te zien dat deze niet representatief is voor de belastingen bij wegverkeer en de nieuwe scheurwijdte eisen.

Een betere vuistregel zou zijn:

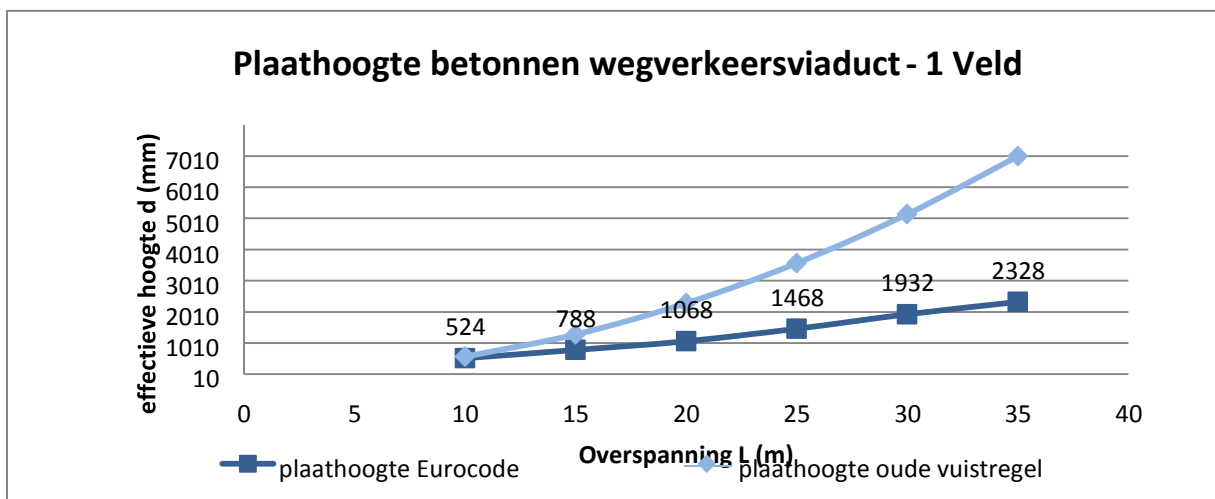
$$\text{vuistregel 2 velden – betonnen plaat (wegverkeer): } d = 226 * e^{0,065 * L}$$

*d in mm; L in m

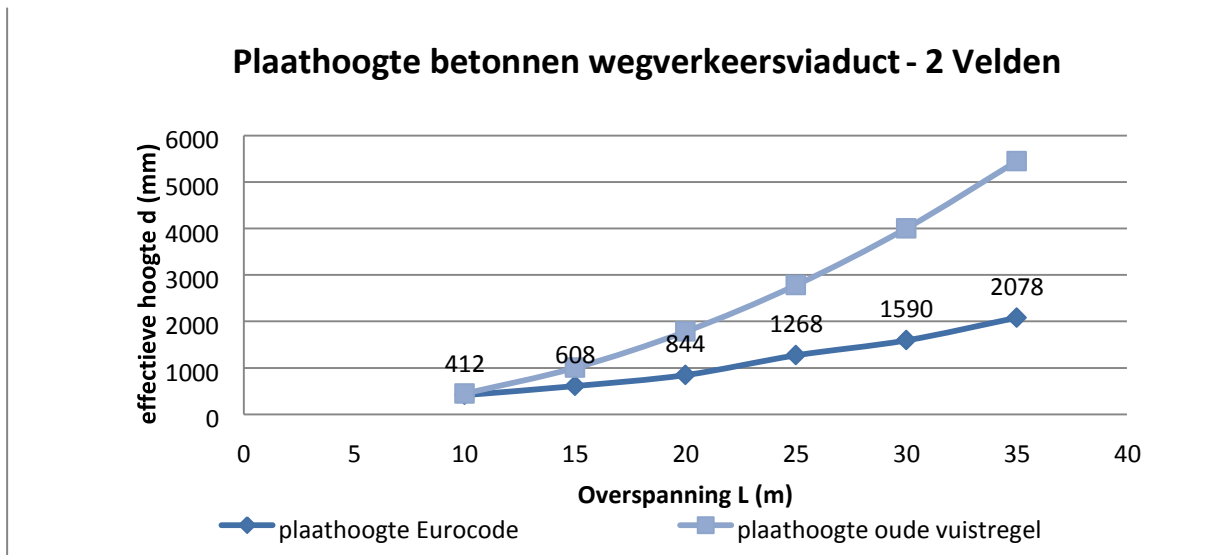
Voor wegverkeersviaducten met 3 velden is de curve “hoogte Eurocode” opgesteld in Figuur 43, waarin wederom te zien is dat de benodigde hoogte d lager is dan bij 2 velden. Dit is te verklaren doordat de momenten ter plaatse van beide steunpunten tegengesteld gericht zijn aan het veldmoment. Hierdoor valt het veld moment aanzienlijk lager uit en is de benodigde plaat hoogte hierbij lager. De berekeningen zijn terug te vinden in Bijlagen IV-m tot IV-r. Bij de vergelijking met de oude vuistregel is weer een grote afwijking te zien. Een betere vuistregel zou zijn:

$$\text{vuistregel 3 velden – betonnen plaat (wegverkeer): } d = 273 * e^{0,054 * L}$$

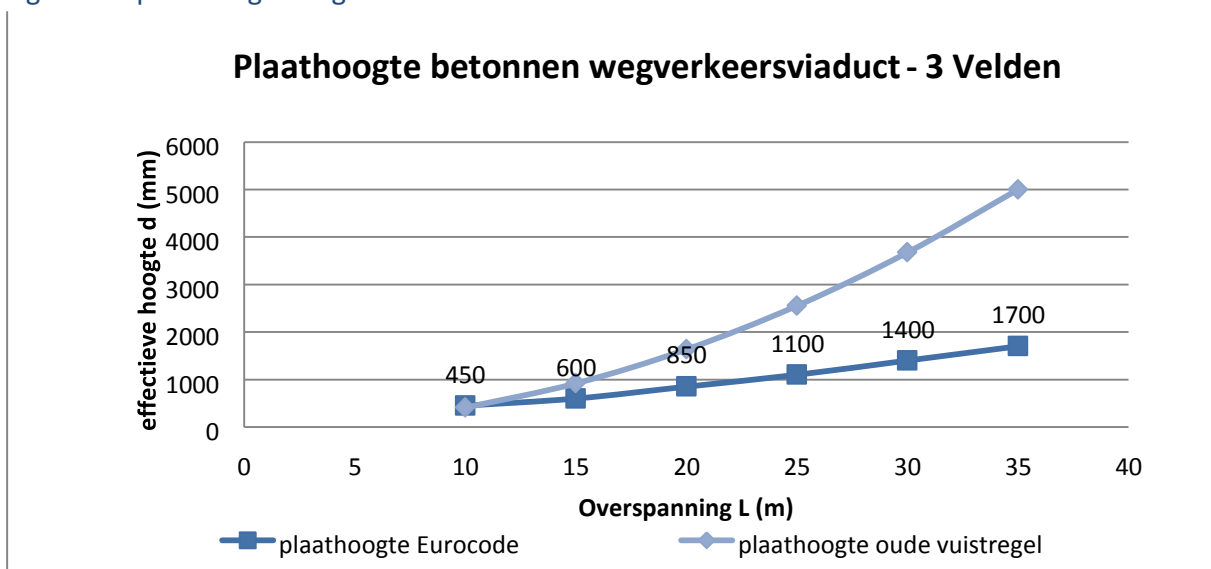
*d in mm; L in m



Figuur 41: plaathoogte wegverkeersviaduct - 1 veld



Figuur 42: plaathoogte wegverkeersviaduct - 2 velden



Figuur 43: plaathoogte wegverkeersviaduct - 3 velden

6.1.5 Resultaten Vuistregels – Spoorwegverkeersviaducten

De benodigde plaathoogte is ook bepaald voor spoorwegviaducten met 3 velden en twee tussensteunpunten. De spoorwegverkeersbelasting (belastingmodel SW/0) is betrekkelijk hoger dan de wegverkeersbelasting (belastingmodel 1) waardoor de benodigde constructiehoogte hoger zal zijn. Volgens de resultaten die zijn verkregen aan de hand van het stappenplan zou een betere vuistregel voor een 3 velds-spoorwegviaduct zijn:

$$\text{vuistregel 3 velden – betonnen plaat (spoorwegverkeer): } d = 40 * L + 300$$

*d in mm; L in m



Figuur 44: plaathoogte spoorwegverkeersviaduct - 3 velden

6.2 Kosten

In 6.1 is met het bepalen van de vuistregels al gekeken naar liggerhoogtes, als verdieping slag kan er worden gekeken naar de kosten van het dek. Door een globale kosten raming te maken wordt er getracht inzicht te krijgen in hoeveelheden van een constructie en de bijbehorende kosten.

Voor de kostenraming is de overspanning van 24 – 30 – 24 meter gebruikt, dit model komt voor een groot gedeelte overeen met de veldlengtes van de “de Swette”. Omdat bij het bepalen van de liggerhoogte, alleen het dek is beschouwd, wordt voor de onderconstructie de onderbouw van “de Swette” als uitgangspunt gebruikt. Daarnaast wordt voor de kosten raming alleen uitgegaan van materiaalkosten en worden de arbeidskosten buiten beschouwing gelaten.

Bij de overspanning van 24 – 30 – 24, totaal 78 meter, is van een massief dek uitgegaan met een liggerhoogte van 1100mm met een breedte van vijftien meter. Een massief dek brengt ook nadelen met zich mee. Omdat bij een massief dek het beton niet altijd effectief gebruikt wordt, zal dit alleen maar extra belasting leveren op de constructie.

Een mogelijke oplossing voor gewichtsbeparing zijn sparings, dit zijn vaak ronde buizen van plaatstaal of karton die in het brugdek worden aangebracht. Prijstechnisch is het toepassen van een sparringbuis niet altijd goedkoper. Dit komt door de extra arbeidskosten die benodigd zijn.

Voor het toepassen van een sparring, dient er te worden voldaan aan de eisen volgens Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken. De eisen zijn vooral gericht op de dekking rondom de buis, te weten:

- Minimale dekking onder sparring 150 mm;
- Maximale dekking boven sparring 200 mm of 1/5 buisdiameter; - Minimale ruimte tussen de sparings 200 mm.

Aan de hand van bovengenoemde eisen is een buisdiameter bepaald, uitgangspunten:

- Liggerhoogte 1100 mm;

- Dekking boven en onder sparring 200 mm; -
- Dekking wapening onder 162 mm; -
- Dekking wapening boven 82 mm.

Bepaalde sparringdiameter: $1100 - 200 - 200 - 162 - 82 = 458 \text{ mm}$

Over de breedte kunnen er 22 sparringbuizen worden toegepast. De gewichtsbesparing is als volgt berekent:

$$\begin{aligned} &= 1100 * 15000 = 16.500.000 \text{ mm}^2 \\ \text{Oppervlak}_{\text{beton}} &= 225 * 225 * \pi * 22 \approx 3.500.000 \text{ mm}^2 \\ \text{Oppervlak}_{\text{sparing}} &= \frac{100}{16500000} * 3500000 = 21,21 \% \\ \text{Gewichtsbesparing:} & \end{aligned}$$

Met dit percentage is er gekeken naar de kostenraming, van het massieve dek en het dek waarin sparringen zijn toegepast. De grondslag van de kostenberekening, is de constructieve berekeningen die is gebruikt voor het bepalen van de vuistregels. Zie Bijlage IV-q en Bijlage IV-z

Omdat er voor sparringen geen prijsindicatie is verkregen, zal de inhoud die bespaard wordt met sparringen, opgevuld worden met EPS. Dit wordt veel in de bouw gebruikt en is een goed alternatief voor een sparring.

In Tabel 2 zijn de kosten te zien zowel voor het massieve dek als het dek met sparringen. Indien er alleen wordt gekeken naar materiaalkosten, is te zien dat er doormiddel van sparringen wel degelijk bespaard kan worden. Echter, zijn in deze berekening geen arbeidskosten meegenomen.

Naast de kosten voor het dek, is er ook gekeken naar kosten voor de onderconstructie, zie Tabel 3. De landhoofden en steunpunten zullen qua inhoud gelijk zijn, hierdoor zijn de kosten nagenoeg gelijk.

In de berekening zijn naast de algemene kosten ook extra kosten in rekening gebracht. Onder de extra kosten worden beugels die benodigd zijn door het toepassen van de sparringen.

Kostenraming dek	Eenheid	Prijs	massief dek(€)	dek met sparring(€)
Dekwandbekisting	€/m ²	80	16386	16386
Dekvloerbekisting	€/m ²	130	50700	76050
Inhouddek _{beton}	€/m ³	110	141570	111543
Dekwapening	€/Kg	1,25	485617	333516
Wap _{extra}	€/Kg	1,25	0	33516
EPS	€/m ³	65	0	17743
extra kosten	€		0	10000
totaal			694273	598754

Tabel 2: Kosten raming dek

Kostenraming onderconstructie	Eenheid	Prijs	massief dek(€)	dek met sparring(€)
Landhoofd _{beton}	€/m ³	125	17513	17513
Landhoofd _{bekisting}	€/m ²	90	3410	3410

Landhoofd _{wapening}	€/Kg	1,25	52863	46307
tussensteunpunt _{beton}	€/m ³	110	22412	22412
tussensteunpunt _{bekisting}	€/m ²	80	5368	5368
Tussensteunpunt _{wapening}	€/Kg	1,25	65051	56983
extra kosten	€		0	10000
totaal			166617	161993

Tabel 3: Kosten raming onderconstructie

Een kostenpost die niet mee is genomen zijn de palen. Omdat het gewicht van het dek afneemt zullen er theoretisch minder palen nodig zijn. De totale kosten voor het in het werk gestort dek zijn

$\frac{694273}{15} = € 593 \text{ per } m^2 \text{ (exclusief arbeidskosten)}$. Een prefab dek komt uit op ongeveer 600 € per m² (inclusief arbeidskosten).

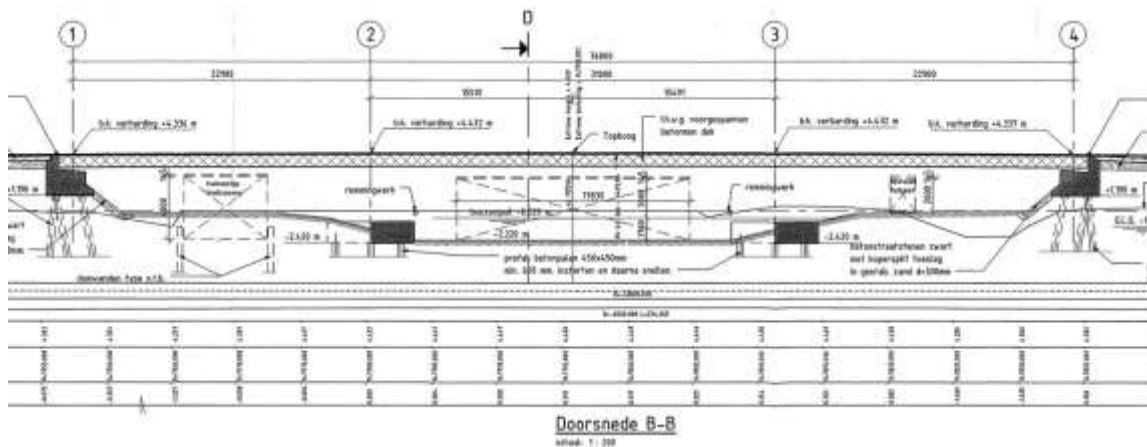
Er kan dus worden gesteld dat de kosten van een het werk gestort dek duurder zijn dan een prefab dek.

Hoofdstuk 7: Casus: verkeersviaduct - Waterkruising De Swette

Waterkruising De Swette is een verkeersviaduct voor project “De Haak om Leeuwarden – Zuid” dat ontworpen is in 2013 door Royal Haskoning in opdracht van Rijkswaterstaat en aannemer Volker Wessels Infra. Het vormt de overgang voor de rijksweg A31 over het kanaal tussen Sneek en Leeuwarden, de Zwette (in het Fries: “Swette”). Het is een combinatie van twee viaducten die beiden plaats hebben voor een rijksweg met 1x2 rijbanen. In deze casus zal één van deze twee identieke viaducten worden beschouwd.

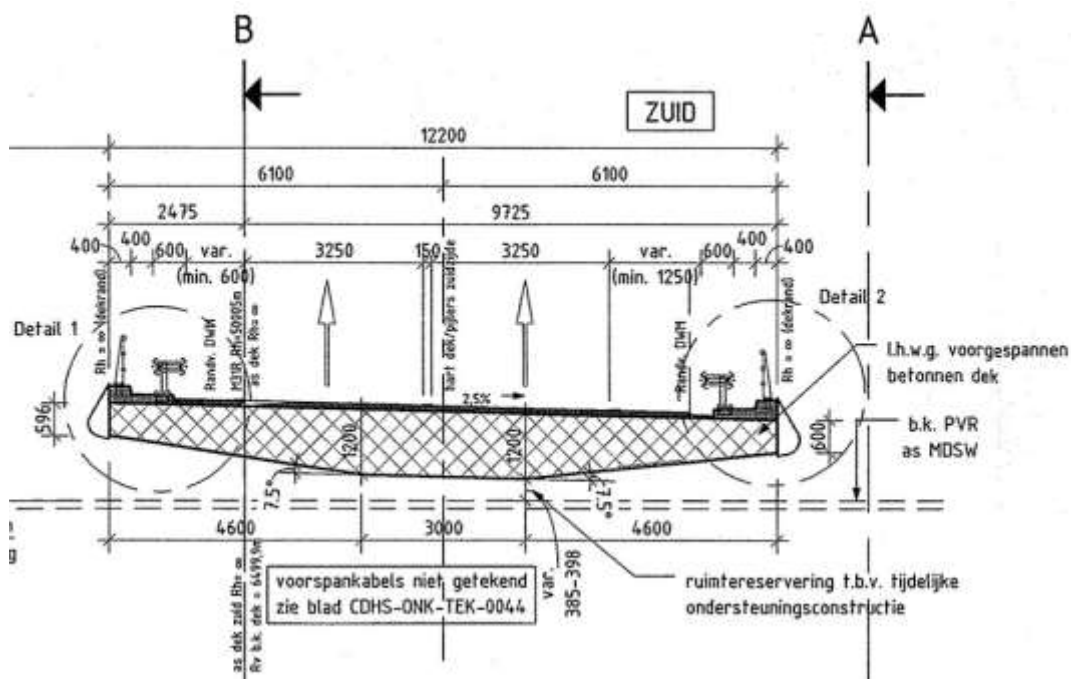
7.1 Uitgangspunten

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| □ 3 overspanningen: | 22,9 – 31,0 – 22,9 m |
| □ Breedte: | 12,2 m |
| □ Verlopende hoogte: | 600 – 1200 mm |
| □ Zeeg | ca. 50 mm |
| □ Overspanningshoek: | 38,8° |
| □ Twee tussensteunpunten | kolommen Ø2000 mm |
-
- | | |
|-----------------------------|--------|
| □ Veiligheidsklasse | CC3 |
| • In-situ voorgespannen dek | |
| • Betonsterkteklasse: | C35-45 |
| • Wapening: | B500B |



Figuur 45: langsdoorsnede "De Swette"

In tegenstelling tot eerdere berekende dek-constructies heeft dit dek enkele afwijkingen ten opzichte van de afbakening van dit onderzoek. Hiermee zal onderzocht worden of een eenvoudige globale toetsing kan volstaan voor een afwijkende situatie. De overspanningshoek van 38,8 graden is groter dan de bruikbaarheidsgrens van Guyon Massonnet van 20° en de doorsnede van het dek heeft een variërende constructiehoogte. De schuine overspanning zal worden verwaarloosd in de berekening en voor de constructiehoogte zal een correctie voor de toegepaste breedte worden gedaan. In §7.5 Discussie resultaten zal worden beschouwd in welke mate de vereenvoudigde modelering bruikbaar is.



Figuur 46: dwarsdoorsnede “De Swette”

7.2 Belastingen

De toegepaste belastingmodellen uit het berekeningsrapport zijn nagerekend met de belastingen uit NEN-EN 1991-2+C1:2011 (NL). Deze zijn terug te vinden in hoofdstuk 2, Belastingen.

7.2.1 Permanente belasting

De permanente belastingen zijn nagerekend op basis van tekening CDHS-ONK-TEK-0042 KW100 DO - v1.0 (Bijlage V-a). Voor controle van verticale belastingen zie bijlage V-c. Hieruit zijn de totale verticale belastingen uit eigengewicht en rustende belasting voortgekomen:

Belastinggeval	q _{eigen} (kN/m ²)	V _{origineel} (kN)	Afwijking
BG1: eigen gewicht	24,2	24,9	+2,9%
BG2: schampkant	1,3	1,8	+35,3%
BG3: asfalt	3,2	3,3	+0,5%
BG4: leuning & geleiderail	0,3	0,34	+2,9%
Totalen	29,1	30,2	+4,0%

Tabel 4: controle permanente belasting

De afwijking van +35,3% op BG2 is vreemd aangezien de hoeveelheid beton in de schampkant volgens tekening niet overeenkomt met de aangenomen belasting. Echter is de afwijking op de totale belasting beperkt, dus zal in het vervolg verder gerekend worden met de originele belastingen om onderscheid te kunnen maken in afwijkingen in belastingbepaling en rekenmodel. De q-last voor permanente belasting wordt vastgesteld op 30,2 kN/m².

7.2.2 Mobiele belasting

De mobiele belasting is conform hoofdstuk 2 Belastingen. Er is uitgegaan van 1x2 rijstroken zoals in tekening CDHS-ONK-TEK-0042 KW100 DO - v1.0 te zien is. Vervolgens is de methode Guyon Massonnet toegepast om een K-factor te bepalen om de gemiddelde belastingen om te rekenen tot effectieve belastingen op de randstrook.

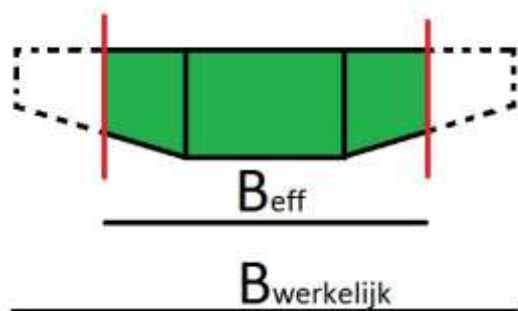
De gemiddelde gespreide belasting is $q_{i;k;gem} = 8,1 \text{ kN/m}^2$ met een K-waarde voor de zwaarst belaste strook van 1,31. Hiermee is effectieve gespreide belasting op de maatgevende strook $q_{i;k;eff} = 7,0 \text{ kN/m}^2$. De gemiddelde belasting voor de aslast is $Q_{i;k;gespreid} = 125 \text{ kN}$ met een Kwaarde voor de zwaarst belaste strook van 1,55. De effectieve as-last op de maatgevende strook betreft dus $Q_{i;k;eff} = 193,8 \text{ kN}$. Voor de mobiele belastingen zie Bijlagen V-f tot V-h.

*Opmerking: volgens de voorschriften passen er theoretisch 3 rijstroken op het dek. Volgens de tekening wordt een 1x2-baansweg toegepast op het viaduct, waardoor er is gerekend met de belasting van 2 tandemstelsels in plaats van 3.

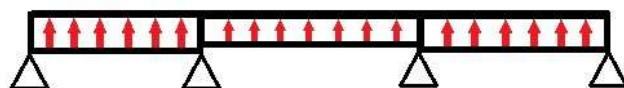
7.3 Werkwijze

Bij de toetsing van de Swette zijn de momenten van de 3 maatgevende sneden (zijveld, middenveld en steunpunt B) gecontroleerd in de BGT omdat dit de belangrijkste toets is voor de voorspanberekening. De momenten $M_{xD;bgt}$ uit de originele berekening kwamen relatief hoog uit dus als eerst is gekeken naar de oorzaak van deze hoge waarden. De eerste verklaring hiervoor was dat de puntvormige opleggingen ter plaatse van de tussensteunpunten zouden zorgen voor geconcentreerde momenten in de middelste strook van de plaat. Echter zou de belasting ter plaatse van het veldmidden dan weer moeten spreiden, en dit was niet terug te zien in de resultaten van de originele berekening.

De oorzaak bleek te liggen bij de variërende constructiehoogte over de breedte. Over een strook van 3,0 m is de hoogte 1200 mm, waarna de hoogte terugloopt naar 600 mm over een lengte van 4,6 m aan beide zijden. Een goede benadering bleek om de halve breedte te nemen voor de sneden met verlopende breedte. $B_{effectief} = 3,0 + 2 * 4,6 / 2 = 7,6 \text{ m}$. Dit effect is gecontroleerd en bevestigd met doorsnede programma ALP. In de globale toetsing is gerekend met een effectieve breedte van 8,0 m.



Figuur 47: aanpak effectieve breedte



Figuur 48: schematisering voorspanbelasting

In verband met tijd is voor de berekening van momenten uit voorspanning gekozen voor een Clapeyronmodel met een eenvoudig eenvoudige schematisering de voorspanning. De neerwaartse belastingen ter plaatse van de steunpuntmomenten kan hierin niet worden ingevoerd.

7.4 Resultaten

Hieronder worden de resultaten in de berekening van de momenten uit de 3 beschouwde belastingtypen weergegeven, namelijk permanent, voorspanning en variabele verkeersbelasting. In de linker tabel zijn de resultaten van de controles weergegeven. De berekeningen zijn te vinden in Bijlagen V-f tot V-g. In de middelste tabel worden de resultaten uit de Scia berekening gepresenteerd, welke te vinden zijn in Bijlage V-e. In de rechter tabel wordt steeds de vergelijking gemaakt tussen de resultaten uit de originele Sciaberekening en resultaten uit het eigen rekenblad.

Snede 1 - veld 1

Beschrijving belasting: Tandemstelsel verkeersbelasting op veld 1. Alle velden belast.

Snede krachten uit Scia

BGT		
	M _{xD} (kNm/m)	N _x (kN/m)
PERM	1432	
VSP	-743	-5166
VB	1126	

Snede krachten uit rekenblad

BGT		
	M _{xD} (kNm/m)	N _x (kN/m)
PERM	1529	
VSP	-428	-5166
VB	1118	

afwijking (%)
6,8
-42,4
-0,7

Snede 2 - middenveld

Beschrijving belasting: Tandemstelsel verkeersbelasting op veld 2. Alle velden belast.

Snede krachten uit Scia

BGT		
	M _{xD} (kNm/m)	N _x (kN/m)
PERM	2159	
VSP	-1576	-5250
VB	1263	

Snede krachten uit rekenblad

BGT		
	M _{xD} (kNm/m)	N _x (kN/m)
PERM	2058	
VSP	-1678	5250
VB	1307	

afwijking (%)
-4,7
6,5
3,5

Snede 3 - steunpunt 2

Beschrijving belasting: Tandemstelsel verkeersbelasting op veld 2. Veld 3 is onbelast (t.b.v. maximaal steunpuntsmoment).

Snede krachten uit Scia

BGT		
	M _{xD} (kNm/m)	N _x (kN/m)
PERM	3769	
VSP	-2322	-3148
VB	1119	

Snede krachten uit rekenblad

BGT		
	M _{xD} (kNm/m)	N _x (kN/m)
PERM	3467	
VSP	-1006	3148
VB	1085	

afwijking (%)
-8,0
-56,7
-3,0

In de volgende paragraaf wordt de analyse van de bevindingen gepresenteerd.

7.5 Discussie resultaten

Na analyse van de resultaten geven de momenten uit eigen gewicht, permanente belasting en de verkeersbelasting een kleine afwijking van gemiddeld 4% en hiermee bevestigen zij een correcte aanpak bij de originele berekening. Voor ons was dit een zeer leerzaam zoekproces in het opsporen van de oorzaak van de eerdere afwijkingen. Het bepalen van effectieve breedten is dus essentieel voor reële resultaten in relatie tot platen en puntvormige ondersteuning.

Voor de momenten uit voorspanbelasting is het niet gelukt om op goede realistische resultaten te komen in de beschikbare tijd van het afstuderen. De eerste methode voor het berekenen van de momenten was met de formule:

$$M_{vsp} = P * p$$

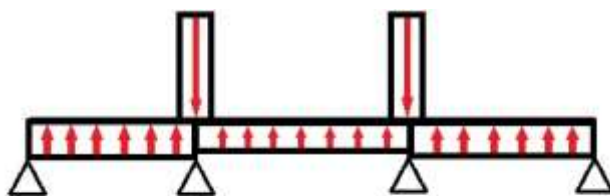
Met P als de voorspankracht (kN) en p als de pijl t.o.v. het zwaartepunt (m)

De eerste methode bleek echter niet correct voor het bepalen van de voorspanbelasting op een statisch onbepaald liggermodel. Na overleg is besloten om de opwaartse q-last uit de voorspankabel te bepalen met de formule:

$$q_{vsp} = \frac{P}{R}$$

Met P als de voorspankracht (kN) en R als de straal van de kabel ter plaatse van het betreffende veld.

Bij het toepassen van het Clapeyron model was het in verband met tijd niet mogelijk om een model met 3 q-lasten per veld op te zetten waarmee de voorspanbelasting geheel correct te modeleren is zoals in Figuur 49. Daarom is ervoor gekozen alleen de gemiddelde q-last in het veld uit voorspanning te verwerken, zoals in Figuur 48. De neerwaartse krommingsdruk ter plaatse van de steunpunten is verwaarloosd. De afwijking in dit model is dat de momenten in de eindvelden en steunpunten hoger uitvallen dan in werkelijkheid het geval zal zijn.



Figuur 49: correcte modelering voorspanning (niet toegepast)

Echter bleek ook de voorspankracht in het berekeningsrapport niet representatief voor de voorspankracht op andere posities in de plaat. De voorspankracht varieert sterk door verliezen uit kabelwrijving en wigzetting. Met afwijkende voorspankracht kan volgens de eenvoudige modellering van dit afstudeerproject niet goed verwerkt worden.

Omdat de nadruk in dit project ligt bij de mechanica, en constructieve berekeningen zoals voorspanning hier slechts een bijrol spelen, is uiteindelijk in verband met tijd ervoor gekozen het volgende te concluderen:

Het simplificeren van complexe modellen met de in dit rapport toegepaste klassieke mechanica methoden kan toegepast worden op dek-constructies met afwijkende overspanningshoeken en constructiehoogten. Echter is voor de toepassing op voorgespannen constructies meer kennis van het voorspanstelsel en interne krachtwerving door voorspanning benodigd.

Casus: verkeersviaduct

Hoofdstuk 8: Conclusie

Bij aanvang van dit onderzoek is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

“Hoe kunnen klassieke mechanica-methoden worden toegepast op de berekening van een statisch-onbepaalde betonnen dek-constructie van een verkeersviaduct, om inzicht te verkrijgen in de krachtswerking en benodigde dimensies?”

De uitvoerige bestuderingen van de methoden en toepassing hiervan heeft veel opgeleverd. Het resultaat is een tool dat is opgebouwd uit meerdere methoden, welke de krachtswerking snel en eenvoudig inzichtelijk maakt. Het product, maar ook het proces dat er tot geleid heeft, geeft een positief antwoord op de hoofdvraag. We kijken daarom tevreden terug op het resultaat.

Er is rekening gehouden met de belangrijkste factoren die meespelen bij het onderzoek. Zo is er bij de belastinggevallen uitgegaan van de essentiële belastingmodellen die representatief zijn voor 90% van de constructieve berekeningen die gemaakt worden in de praktijk. Dit zijn eigen gewicht, permanent rustende belasting en verschillende variabele verkeersbelasting. Andere meespelende factoren als temperatuur en zetting zijn verwaarloosd.

Voor het benaderen van deze vraag hebben wij drie methoden toegepast. De positie van de mobiele lasten is bepaald met behulp van de methode van invloedslijnen. Aan de hand van deze positie zijn de belastingen ingevoerd in de methode van Guyon Massonnet. Hiermee is de herverdeling van belastingen in dwarsrichting bepaald om de maatgevende strook vast te stellen. De belastingen op de maatgevende strook zijn gebruikt voor het berekenen van de momenten en dwarskrachten uit diverse belastingen met de methode van Clapeyron. Uiteindelijk zijn deze waarden gebruikt voor verdere dimensioneringsberekeningen en het definiëren van vuistregels.

Met een aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid kan gesteld worden dat de opgestelde rekenbladen voldoende kwaliteit bevatten om een realistische, globale toetsing uit te voeren. Wordt er met een situatie gerekend die buiten de randvoorwaarden van de methoden ligt, dan kan er niet meer worden gegarandeerd dat de resultaten geschikt zijn om op te dimensioneren. Er is namelijk in de casus een situatie beschouwd die afwijkt van de randvoorwaarden. Hierin is gebleken dat een versimpelde berekening met voorspanning grote afwijkingen veroorzaakt ten opzichte van de traditionele berekeningen.

Persoonlijk hebben wij met dit onderzoek veel kennis op kunnen doen met betrekking tot de mechanica. Door ons te verdiepen in de materie, maar deze ook toe te passen in rekenbladen, hebben wij een groter inzicht verkregen in de krachtswerking. Door onder andere te spelen met steunpuntsposities, stijfheidsverhoudingen, belastingposities en diverse toetsingen, hebben wij meer gevoel gekregen voor het dimensioneren.

Nawoord

Doordat in het begin van de afstudeerperiode wij meermaals het plan van aanpak herschreven hebben, is onduidelijkheid ontstaan over de richting van het onderzoek. Na gesprekken met onze begeleiders de heer A. Driesse en E. de Winter, zijn we op het juiste spoor terecht gekomen en is de richting van het onderzoek definitief vastgesteld. Het doel vanaf dat moment was: "het vergaren van inzicht in de klassieke mechanica".

Door het onderzoek met zijn drieën te doen, heeft ieder persoon niet alleen inzicht verkregen in de methode die hij zelf onderzocht heeft, maar ook in de andere twee methoden. Dit kwam mede door de intensieve samenwerking en de vergaderingen waarbij de drie methoden vaak zijn behandeld.

Waar het altijd verleidelijk is om gebruik te maken van een computerprogramma, hebben wij dankzij dit onderzoek juist geleerd om constructies met handberekeningen te controleren. Door een handberekening toe te passen blijft het werk controleerbaar. De basis die wij hebben gelegd deze periode zal in de toekomst goed van pas komen in het werkveld of gedurende een vervolgstudie aan de universiteit.

Wij hebben met veel plezier aan dit interessant onderzoek gewerkt en kijken met een tevreden blik terug op het resultaat.

Bibliografie

Continuous Beam [Presentatie]. (z.d.). Geraadpleegd op 15 februari 2018, van http://fast10.vsb.cz/koubova/SoBSI_theme4_three_mom_eq.pdf

Bares, R., & Massonet, C. (1968). Analysis of Beam Grids and Orthotropic Plates by the Guyon-Massonnet-Bares method. London: Crosby Lockwood & Son LTD.

Betonvereniging. (2013). GTB 2013: Grafieken en Tabellen voor Beton. Gouda, Nederland: Visual Art en Design.

Blok, R. (2014). Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen (10e ed.). Amersfoort, Nederland: ThiemeMeulenhoff.

Braam, C. R. (2012). CB3 - Constructieleer Voorgespannen Beton (5e ed.). 's-Hertogenbosch, Nederland: Aeneas.

De Smit, B., & Top, J. (2003). Het Idee van Fourier. In ORG. Veen Magazines (Red.), Speeltuin van de Wiskunde (pp. 71-91). Diemen, Nederland: Veen Magazines.

Demenko, V. (2015). MECHANICS OF MATERIALS (Lecture 24 Continuous (Multispan) Beams and the Method of Three Moments). Geraadpleegd van https://k102.khai.edu/uploads/editor/17/4274/sitepage_47/files/LEC_24%20Continuous%20_Multispan_%20Beams%20and%20the%20Method%20of%20Three%20Moments.pdf

Gavin, H. P. (2009). The Three-Moment Equation for Continuous-Beam Analysis. Geraadpleegd van <http://people.duke.edu/~hpgavin/cee201/three-moment.pdf>

Hofman, J. W., & Van der Vlugt, B. W. (1954). Berekening van balkrooster- en plaatbruggen. 's-Hertogenbosch, Nederland: Cement.

Hoogenboom, P. C. J. (2012). Aantekeningen over wringing (4e ed.). Delft, Nederland: TU Delft.

Indian Institute of Technology Kharagpur. (z.d.). Analysis of Statically Indeterminate Structures by the Matrix Force Method (Lesson 12). Geraadpleegd van <http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Structural%20Analysis/pdf/m2l12.pdf>

Indian Institute of Technology Kharagpur. (z.d.). Analysis of Statically Indeterminate Structures by the Matrix Force Method (Lesson 13). Geraadpleegd van <http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Structural%20Analysis/pdf/m2l13.pdf>

Laursen, H. I. (1988). Structural Analysis (3e ed.). NYC, NY: McGraw-Hill Book Company.

Nederlands Normalisatie-instituut. (2015). NEN-EN 1991-2+C1 (nl). Geraadpleegd van <https://connect.nen.nl/>

Bibliografie

Nederlands Normalisatie-instituut. (2011). NEN-EN 1990+A1+A1/C2 (nl). Geraadpleegd van <https://connect.nen.nl/>

The Three-Moment Equation. (z.d.). Geraadpleegd op 16 februari 2018, van <https://www.mathalino.com/reviewer/strength-materials/three-moment-equation>

Welleman, H. (Ed.). (2004). Invloedslijnen. -, Netherlands: Hans Welleman.

Welleman, J. W., Dolfing, A., & Hartman, J. W. (2011). Basisboek Toegepaste Mechanica (2e ed.). Amersfoort, Nederland: ThiemeMeulenhoff.

Bijlagen

Bijlage I – Invloedslijnen

Bijlage II – De methode Clapeyron

Bijlage III – Guyon Massonnet

Bijlage IV - Vuistregels & Kosten

Bijlage V – Casus: De Swette

Bijlage VI – Rekenblad

Bijlage VII - Overige

Bijlagen