



Brug Kop van Kessel-Lo, bron: NEY+Partners

HOOFDRAPPORT

EFFICIËNTER BEPALEN KRACHTSWERKING INTEGRAALBRUGGEN
De relatie(-problemen) tussen constructie en grond

Mark Aarsen & Rik Hendriks
mei '18

Hogeschool Arnhem en Nijmegen (HAN)

BE	Built Environment
Adres	Ruitenberglaan 26
Postcode	6826 CC Arnhem
Telefoon	(026) 369 19 11
Website	www.han.nl

Studenten

Naam 1^e	Mark Aarsen - 549210
Naam 2^e	Rik Hendriks - 547565
Mail HAN 1^e	M.Aarsen@student.han.nl
Mail Pers. 1^e	markaarsen@gmail.com
Mail HAN 2^e	H.Hendriks@studenten.han.nl
Mail Pers. 2^e	rikhendriks@rocketmail.com

Opdrachtverlenende organisatie

Naam	Witteveen+Bos
Adres	Hoogoorddreef 15
Postcode	1101 BA Amsterdam
Telefoon	(020) 312 55 55
Website	www.witteveenbos.nl

Begeleiders

W+B	Keimpe Bloemhof
SCHOOL 1^e	Kees van der Zijden
SCHOOL 2^e	Ernst Rob

Document gegevens

Versie	1.2
Publicatiedatum	28-05-2018
Aantal pagina's	58
Aantal woorden	14558

VOORWOORD

Voor u ligt de scriptie 'Efficiënter bepalen krachtswerking integraalbruggen - De relatie(-problemen) tussen constructie en grond'. Deze scriptie is geschreven voor het afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Arnhem en Nijmegen in opdracht van Witteveen+Bos. De scriptie is geschreven in de periode van februari 2018 tot en met mei 2018.

Op basis van een positief verlopen stage bij Witteveen+Bos van Mark in zijn tweede jaar en van Rik in zijn derde jaar hebben wij besloten om ook bij Witteveen+Bos af te studeren. Hiervoor hebben wij de stagebegeleider van Mark benaderd, Keimpe Bloemhof (constructeur), om een gesprek aan te gaan over de eventuele mogelijkheden. Uit dit gesprek zijn een viertal afstudeeronderwerpen gekomen waaronder het efficiënter bepalen van de krachtswerking van een integraalbrug. Daar is onze keuze op gevallen omdat dat onderwerp complex, onderzoekend, theoretisch maar ook praktisch toepasbaar is.

Wij willen graag in het bijzonder onze afstudeerbegeleider, Keimpe Bloemhof, bedanken voor het aanbieden van dit boeiende afstudeeronderwerp, zijn adviezen die ons de goede richting hebben opgestuurd en voor de begeleiding van het proces. We willen Jan Ruigrok (geotechnicus; PLAXIS expert) bedanken voor het beantwoorden van vragen over PLAXIS en voor de hulp met geotechnische vraagstukken en Richard Roggeveld (constructeur; DIANA expert) voor het helpen en geven van advies over de vele uitdagingen die we zijn tegengekomen bij het toepassen van DIANA. Hiernaast willen wij ook verschillende experts bedanken voor hun inbreng: John Snijders en Arjan ten Voorde (constructeurs). Daarnaast willen wij onze begeleidende docenten vanuit de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, Kees van der Zijden en Ernst Rob, bedanken voor hun adviezen en nuttige tips om dit onderzoek naar een hoger niveau te tillen.

Wij vonden het leuk om ons te verdiepen in de krachtswerking van integraalbruggen en we hebben dit rapport met plezier geschreven.

Wij wensen u veel leesplezier.

Mark Aarsen en Rik Hendriks

Amsterdam,

29 Mei 2018

SAMENVATTING

Een integraalbrug wordt gedefinieerd als een brug waarvan de brugeinden constructief (vast) verbonden zijn met de fundering en die een voegloos dek heeft waar tussensteunpunten ook constructief (vast) verbonden zijn met het dek. Door dit andere constructieprincipe in vergelijking met een conventionele Nederlandse brug werkt de krachtswerking van de constructie geheel anders.

De huidige rekenmethodieken voor integraalbruggen die toegepast worden door Witteveen+Bos zijn niet geoptimaliseerd en niet eenduidig. Het valt op dat elke constructeur een andere aanpak heeft, er is geen standaard rekenmethodiek beschikbaar (binnen Witteveen+Bos). Er zijn dus veel kansen om de berekeningsprocessen efficiënter en dus winstgevender te kunnen uitvoeren.

Door middel van het beschouwen van binnenlandse en buitenlandse literatuur alswel het houden van gesprekken met experts binnen Witteveen+Bos zijn er verschillende methodieken gevonden om de krachtswerking van integraalbruggen te bepalen. De onderstaande methodieken zijn gevonden:

- ❖ **Methodiek Rotterdamsebrug:** Iteratieve methode waarbij D-sheet (geotechnisch programma) ondersteunend is voor SCIA (constructief programma).
- ❖ **Methodiek IJzerlaan (KW09):** Iteratieve methode waarbij een duidelijke splitsing zit tussen D-sheet en SCIA.
- ❖ **Methodiek Valkbrug:** Lineaire methode waarbij maar één programma gebruikt wordt.
- ❖ **Methodiek MEMO (KW11):** Lineaire methode waarbij drie modellen en twee programma's gebruikt worden.
- ❖ **Methodiek Groote Wielen:** Lineaire methode welke met de hand uitgewerkt wordt

Het doel van het dit onderzoek is om de meest efficiënte rekenmethodiek te bepalen voor het construeren van integraalbruggen. Dit wordt gedaan door de nauwkeurigheid en toepasbaarheid te bepalen van methodieken Rotterdamsebrug, MEMO en Groote Wielen. Binnen het hoofdonderzoek wordt in verband met de tijd enkel met deze drie methodieken verder gegaan.

Hieronder worden de delen “nauwkeurigheid” en “toepasbaarheid” verder toegelicht.

De “nauwkeurigheid” van een rekenmethodiek is een percentage dat aangeeft hoe ver de waarden van de theoretische krachtswerking en vervormingen van de daadwerkelijk optredende situatie afliggen. De nauwkeurigheid van de rekenmethodieken wordt bepaald aan de hand van een representatieve rekenmethodiek die de “waarheid” representeert. De representatieve rekenmethodiek bestaat uit een zo geavanceerd en volledig mogelijk model waarbij gebruik wordt gemaakt van twee uitgebreide rekenprogramma's, namelijk DIANA en PLAXIS. Hierbij wordt aan de hand van een fictieve casus de

krachtswerking per rekenmethodiek vergeleken met de krachtswerking van de representatieve rekenmethodiek. Dit wordt ook gedaan voor verschillende variaties van deze fictieve casus om tot zo goed mogelijke resultaten te komen.

Gevonden is dat de methodieken Rotterdamsebrug en Groote Wielen het meest in de buurt komen van de daadwerkelijk optredende situatie, deze zijn het meest nauwkeurig.

De “toepasbaarheid” van een rekenmethodiek is een score op een schaal van één tot tien die aangeeft hoe goed een methodiek toe te passen is. Als deze score hoog is, is de methodiek goed toe te passen. De score van een rekenmethodiek wordt bepaald aan de hand van de criteria: snelheid, relevantie (project technisch), draagvlak binnen W+B en automatiseringsmogelijkheden.

De scores hiervan zijn als volgt:

- ❖ Representatieve rekenmethodiek: 5,7
- ❖ Methodiek Rotterdamsebrug: 6,2
- ❖ Methodiek MEMO: 7,0
- ❖ Methodiek Groote Wielen: 8,1

Aan de hand van de resultaten van de toetsingen op “nauwkeurigheid” en “toepasbaarheid” wordt het verband tussen deze twee onderdelen van efficiëntie bepaald. Er wordt gekeken naar welke nauwkeurigheid in te leveren is voor een betere toepasbaarheid.

De conclusie is dat wordt geadviseerd om standaard de rekenmethodiek Groote Wielen te kiezen voor het berekenen van een integraalbrug. Een uitzondering is wanneer zeer complexe berekeningen moeten worden verricht en een hoge nauwkeurigheid benodigd is, dan wordt geadviseerd om voor een combinatie van DIANA en PLAXIS te kiezen.

SUMMARY

An integral abutment bridge is defined as a bridge with a monolithic deck and at both ends an integral connection with the foundation. The internal forces that act on the construction work entirely different compared to conventional Dutch bridges because they use a different construction principle.

The current calculation methods that are used by Witteveen+Bos are not optimized nor unambiguous. It turns out that each structural engineer uses a different method of calculation, thus it can be concluded that there is no standard calculation method available (within Witteveen+Bos). Therefore there are a lot of opportunities for the calculation methods to be more efficient and thus more profitable.

By reviewing literature, as well as having conversations with experts, multiple calculation methods have been found to determine the internal forces of integral abutment bridges. The following methods have been found:

- ❖ **Method Rotterdamsebrug:** Iterative method where D-sheet (geotechnical program) works supportive to SCIA (structural program).
- ❖ **Method IJzerlaan (KW09):** Iterative method with a clear separation between D-Sheet and SCIA.
- ❖ **Method Valkbrug:** Linear method where only one program is used.
- ❖ **Method MEMO (KW11):** Linear method where three models and two programs are used.
- ❖ **Method Groote Wielen:** Linear method that is done by hand.

The objective of this research paper is to determine the most efficient calculation method for integral abutment bridges. This is done by determining the accuracy and applicability of the three most different calculation methods. These methods are method Rotterdamsebrug, MEMO and Groote Wielen. The parts “accuracy” and “applicability” are further explained below this paragraph.

The “accuracy” of a calculation method is a percentage that indicates how good the calculated values represent the actual situation. The accuracy of the calculation methods is determined with a representative calculation method that represents the “truth” (the real occurring situation). The representative calculation method is a model that is as advanced and complete as possible. This model uses two extensive programs, these are: DIANA and PLAXIS. According to a fictional case, the internal forces calculated by the aforementioned calculation methods are compared to the forces calculated by the representative calculation method. This is also done for multiple variations of the fictional case to get better conclusions.

The result of the research is that the results of methods Rotterdamsebrug and Groote Wielen give the best approximation of the real occurring situation.

The “applicability” of a calculation method is a score on a scale of one to ten that indicates how well you can apply a calculation method. If this score is high, then the calculation method is easily applicable. The score of a calculation method is determined by the next four requirements: speed, relevance, support within W+B and automation options.

The scores are as follows:

- ❖ representative calculation method: 5,7
- ❖ Method Rotterdamsebrug: 6,2
- ❖ Method MEMO: 7,0
- ❖ Method Groote Wielen: 8,1

With the results of the tests on “accuracy” and “applicability” there is a relation determined between these two parts. There is determined how much accuracy can be lost for a better applicability.

The conclusion is an advice to always choose the calculation method Groote Wielen to calculate integral abutment bridges. An exception is to choose a combination of DIANA and PLAXIS to calculate complex integral abutment bridges where a high accuracy is needed.

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING EN LEESWIJZER	1
2. PROBLEEM-, DOELSTELLING EN VRAGEN	4
2.1 Probleemstelling	4
2.2 Doelstelling	5
2.3 Hoofd- en deelvragen	6
2.4 Afbakening	7
3. BRONNENONDERZOEK	9
3.1 De integraalconstructie	9
3.2 Secundaire effecten	11
3.3 Rekenmethodieken	12
3.4 Beantwoorden deelvraag 1	14
4. HOOFDONDERZOEK	15
4.1 Onderzoeksaanpak	16
4.2 Nauwkeurigheid	19
4.2.1 Startgegevens	19
4.2.2 Representatieve rekenmethodiek	23
4.2.3 Uitwerking rekenmethodieken	29
4.2.4 Resultaten	29
4.2.5 Beantwoorden deelvraag 2	33
4.3 Toepasbaarheid	35
4.3.1 Multicriteria-analyse	35
4.3.2 Beantwoorden deelvraag 3	36
4.4 Combinatie deelonderzoeken	37
5. CONCLUSIES, DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	39
5.1 Conclusie	40
5.2 Bevindingen	41
5.3 Discussie	43
5.4 Aanbevelingen	45

DEELRAPPORTEN EN BIJLAGEN

Deelrapport 1.0	Literatuurstudie
Bijlagen 1.1-1.14	Onderliggende bijlagen behorende bij '1.0 Literatuurstudie'
Deelrapport 2.0	Nauwkeurigheid
Bijlagen 2.1-2.72	Onderliggende bijlagen behorende bij '2.0 Nauwkeurigheid'
Deelrapport 3.0	Toepasbaarheid
Deelrapport 4.0	Plan van Aanpak (PvA)
Bijlagen 4.1-4.11	Onderliggende bijlagen behorende bij '4.0 PvA'
Deelrapport 5.0	Procesbijlage
Bijlagen 5.1-5.19	Onderliggende bijlagen behorende bij '5.0 Procesbijlage'

1.

INLEIDING EN LEESWIJZER

Dit afstudeeronderzoek gaat over de meest efficiënte rekenmethodiek voor integraalbruggen. Een integraalbrug wordt gedefinieerd als een brug waarvan de brugenden constructief (vast) verbonden zijn met de fundering en die een voegloos dek heeft waar tussensteunpunten ook constructief (vast) verbonden zijn met het dek. De krachtswerking van een integraalbrug werkt geheel anders dan een Nederlandse conventionele brug, doordat een integraalbrug een ander constructieprincipe toepast.

De huidige rekenmethodieken die toegepast worden door Witteveen+Bos om de samenwerking van de constructie en de grond bij integraalbruggen te berekenen is niet geoptimaliseerd en niet eenduidig. Het doel van dit afstudeerproject is om een advies uit te brengen welke methodiek(en) het beste is/zijn om te gebruiken om bepaalde integraalbruggen uit te rekenen en hoe deze methodiek(en) te doorlopen is/zijn. De hieruit leidende hoofdvraag wordt alvast genoemd om een beter beeld te krijgen van het doel en de opzet van het onderzoek, de hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

*Hoe kan de **krachtswerking** van **integraalbruggen**, gefocust op de landhoofdconstructies, ten opzichte van de huidige methodieken **efficiënter** door Witteveen+Bos bepaald worden?*

*Waar met de term “**efficiënter**” bedoeld wordt: een zo hoog mogelijke **nauwkeurigheid** met een zo goed mogelijke **toepasbaarheid**, welke acceptabel is voor Witteveen+Bos.*

Met de volgende drie onderliggende deelvragen:

Deelvraag 1: *Wat is er bekend in verschillende bronnen om de werking en berekening van integraalbruggen te beschouwen?*

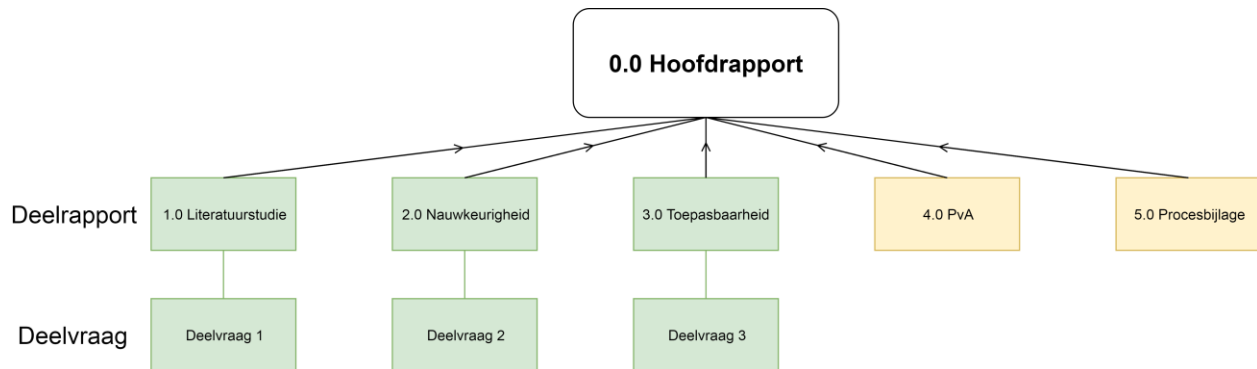
Deelvraag 2: *Hoe nauwkeurig zijn de verschillende rekenmethodieken?*

Deelvraag 3: *Hoe toepasbaar zijn de verschillende rekenmethodieken voor Witteveen+Bos?*

LEESWIJZER

In deze paragraaf staat de leeswijzer voor dit verslag. Hier staat eerst de algemene opzet van de verslagen en daarna een korte toelichting van elk hoofdstuk.

De in de inleiding gespecificeerde deelvragen zijn de leidraad voor de opzet van de rapportage. De rapportage bestaat uit een hoofdrapport met onderliggende deelrapporten zoals te zien is in Afbeelding 1.



Afbeelding 1 Opzet rapportage (eigen afbeelding)

De deelrapporten die in Afbeelding 1 groen gekleurd zijn behandelen elk een andere deelvraag en zijn ook te zien als deelonderzoeken. De deelrapporten die in Afbeelding 1 geel gekleurd zijn lichten de aanpak en het proces van het onderzoek toe. De deelrapporten zijn zo opgesteld dat deze geheel onafhankelijk te lezen en te begrijpen zijn. Procesmatig zijn deze deelrapporten als eerste opgesteld en zijn de belangrijkste zaken (onderzoeksaanpak, resultaten en conclusies) gebundeld in dit hoofdrapport. Zodoende worden de conclusies van de verschillende deelrapporten in dit hoofdrapport met elkaar verbonden.

Vermeld moet worden, dat in dit hoofdrapport alleen de belangrijkste zaken voor het onderzoek uit de deelrapporten getoond worden, voor de verdieping moeten de deelrapporten geopend worden. Het hoofdrapport is opgedeeld in de volgende hoofdstukken:

In hoofdstuk '2. Probleem-, doelstelling en vragen' wordt aan de hand van het deelrapport '4.0 PvA' toegelicht wat het probleem is, waardoor er een onderzoek gedaan wordt naar rekenmethodieken voor integraalbruggen. Dit leidt tot de hoofdvraag, afgeleide deelvragen en sub-deelvragen. Hiernaast wordt in dit hoofdstuk ook de afbakening van dit onderzoek benoemd.

In hoofdstuk '3. Bronnenonderzoek' wordt de eerste deelvraag beantwoord aan de hand van de informatie in het deelrapport '1.0 Literatuurstudie'. Het eerste deel van dit onderzoek is gericht op het verzamelen van informatie. Hier wordt ingegaan op de integraalconstructie, de verschillende effecten waar deze constructie mee te maken krijgt en er wordt een inventarisatie gedaan naar rekenmethodieken voor integraalbruggen.

In hoofdstuk '4. Hoofdonderzoek' worden de tweede en derde deelvraag beantwoord. Dit tweede deel is het hoofdonderzoek waar vooral eigen werk wordt getoond.

In paragraaf '4.1 Onderzoeksaanpak' wordt beschreven hoe het hoofdonderzoek uitgevoerd wordt.

In paragraaf '4.2 Nauwkeurigheid' wordt de tweede deelvraag beantwoord aan de hand van de informatie in het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'. Alle relevante informatie in dit deelrapport wordt ook in dit hoofdverslag getoond.

In paragraaf '4.3 Toepasbaarheid' wordt de derde deelvraag beantwoord aan de hand van de informatie in het deelrapport '3.0 Toepasbaarheid'. Alle relevante informatie in dit deelrapport wordt ook in dit hoofdverslag getoond.

In paragraaf '4.4 Combinatie deelonderzoeken' wordt gekeken naar het verband tussen de nauwkeurigheid en de toepasbaarheid. Er wordt gebruik gemaakt van de informatie uit paragraaf 4.1 en 4.2.

In hoofdstuk '5. Conclusie en discussie' wordt met alle verzamelde informatie binnen het onderzoek de hoofdvraag beantwoord. Er worden conclusies getrokken, een discussie gehouden en aanbevelingen gedaan.

VERDELING VAN HET WERK; PROCES

Dit Rapport is opgesteld door Mark Aarsen en Rik Hendriks. Het werk is evenredig verdeeld tussen deze twee studenten. Hierbij is de verdeling van het werk te zien in Tabel 1.

Volledige uitwerking hiervan in:

Deelrapport 5.0

Rapporten	Mark Aarsen	Rik Hendriks
Literatuurstudie	H3, H5, H6.2, 6.3, 6.4, 6.7 en H7	H4, H6.1, 6.5, 6.6
Nauwkeurigheid	H3, H4.1, H5.1, 5.3, H6, H7.1, 7.2, 7.3, H8 PLAXIS	H2, H4.2, H5.2, H6, H7.4, H8 DIANA
Toepasbaarheid	Alles	-
Hoofdverslag	50%	50%

Tabel 1 Geschreven stukken per afstudeerstudent

2.

PROBLEEM-, DOELSTELLING EN VRAGEN

In dit hoofdstuk worden de probleemstelling, doelstelling, hoofdvraag, deelvragen en afbakening toegelicht. De vragen en afbakening zullen beknopt toegelicht worden, de volledige toelichting hiervan staat beschreven in het rapport '4.0 PvA'.

Volledige uitwerking van dit hoofdstuk:

Deelrapport 4.0

2.1 PROBLEEMSTELLING

De huidige rekenmethodieken die toegepast worden door Witteveen+Bos om de samenwerking van de constructie en de grond bij integraalbruggen te berekenen is niet geoptimaliseerd en niet eenduidig. Een van de methodieken is als volgt: een constructeur berekent de constructie in SCIA en de geotechnicus in D-Sheet, dan passen ze beiden hun parameters aan die voortkomen uit het pakket van de ander totdat de vervormingslijn bij beide rekenpakketten overeenkomt. In essentie betekent dit dat er een niet-lineaire berekening handmatig wordt uitgevoerd door middel van beide pakketten. Deze huidige aanpak is zeer tijdrovend. Het valt op dat elke constructeur een andere aanpak heeft, er is geen standaard rekenmethodiek beschikbaar (binnen Witteveen+Bos).

De toetsingen die afhankelijk zijn van de samenwerking tussen de constructie en de grond zijn in tegenstelling tot een conventionele brug uitermate belangrijk voor integraalbruggen. De reden hiervoor is dat de brug vaste voeg- en oplegverbindingen heeft. Het gevolg hiervan is dat uitzettingen door temperatuur, krimp en kruip leiden tot grote vervormingen. Deze vervormingen leiden tot heel andere spanningen in de constructie dan bij conventionele bruggen. De vervormingen moeten worden opgenomen door onder andere de grond die tegen de constructie aanligt. Het nadeel van grond is dat de spanningen in de grond, en de daaruit komende vervormingen, een niet lineaire relatie hebben. Hierdoor zijn complexe niet-lineaire of iteratief lineaire berekeningen nodig, dit leidt in de praktijk tot niet geoptimaliseerde processen. Er zijn veel kansen om de berekeningsprocessen efficiënter en dus winstgevender te kunnen uitvoeren.

In Nederland worden relatief weinig integraalbruggen gebouwd ten opzichte van de rest van Europa en de Verenigde Staten (zie hoofdstuk 3.5 in de literatuurstudie voor nadere toelichting). Dit heeft tot gevolg dat Nederlandse ingenieurbureaus, maar ook opdrachtgevers en aannemers, minder bekend zijn met het ontwerpen en toetsen van dit type constructie. Ook zijn integraalbruggen nu, gekeken naar ontwerpaspecten, lastig te vergelijken met conventionele bruggen. Over het algemeen is er minder

kennis beschikbaar over het berekenen en ook zijn de voorbeelden van rekenmethodieken schaars. De rekenmethodieken die wel aanwezig zijn, zijn niet eenduidig. Er zijn allerlei verschillende methodieken beschikbaar, zo worden intern de integraalbruggen in de ring Groningen anders berekend dan de Rotterdamsebrug te Gouda. Bij Witteveen+Bos is te zien dat er kennis en eenduidigheid mist aan het feit dat de samenwerking van beton en grond weinig wordt toegepast. Er mist dus momenteel kennis om dit pijnpunt goed aan te pakken.

Nu is er bekend binnen het bedrijf dat er veel verschillende aanpakken en schematisatiemogelijkheden zijn, maar niet precies welke methodieken dit zijn, waarvan ze uitgaan en welke versimpelingen doorgevoerd zijn in tegenstelling tot andere methodieken. Van al deze verschillende methodieken is ook niet bekend welke het meest efficiënt is (onder efficiënt wordt hoge nauwkeurigheid en goede toepasbaarheid verstaan).

De nu toegepaste methodieken bij Witteveen+Bos zijn versimpelingen van de meest geavanceerde en volledige rekenmethodiek. Zo is het niet duidelijk hoe nauwkeurig de toegepaste modellen zijn en of een ander model nauwkeuriger is met behoud van toepasbaarheid. Een vraag is hoeveel nauwkeurigheid men bereid is in te leveren voor het behalen van een bepaalde toepasbaarheid.

Samengevat is het probleem dat het momenteel niet bekend is welke methodiek het meest efficiënt voor Witteveen+Bos is om integraalbruggen nauwkeurig uit te rekenen met behoud van de toepasbaarheid.

2.2 DOELSTELLING

Het doel van dit afstudeerproject is: om een advies uit te brengen welke methodiek het beste is om te gebruiken om bepaalde integraalbruggen uit te rekenen, en hoe deze methodiek te doorlopen is. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen verschillende geïnventariseerde methodieken. Deze worden bekeken op nauwkeurigheid en toepasbaarheid, waarbij de nadruk ligt op nauwkeurigheid.

Onderliggende doelen zijn het inbrengen van eenduidigheid in het berekenen van integraalbruggen, het inzicht vergroten in de samenwerking tussen constructie en geotechniek en een draagvlak creëren voor onze definitie van een efficiëntere rekenmethodiek binnen Witteveen+Bos. Door dit te doen heeft dit onderzoek een goede impact binnen het werkveld.

2.3 HOOFD- EN DEELVRAGEN

De probleemstelling en doelstelling leiden tot de hoofdvraag en hiervan afgeleide deelvragen. Voor extra duidelijkheid zijn de deelvragen opgedeeld in sub-deelvragen, deze staan enkel beschreven in het rapport '4.0 PvA'. Deze sub-deelvragen worden namelijk alleen gebruikt binnen de deelrapporten.

Hoofdvraag

De volgende hoofdvraag is opgesteld:

*Hoe kan de **krachtswerking** van **integraalbruggen**, gefocust op de landhoofdconstructies, ten opzichte van de huidige methodieken **efficiënter** door Witteveen+Bos bepaald worden?*

*Waar met de term “**efficiënter**” bedoeld wordt: een zo hoog mogelijke **nauwkeurigheid** met een zo goed mogelijke **toepasbaarheid**, welke acceptabel is voor Witteveen+Bos.*

Toelichting: Er wordt gekeken naar de verschillende soorten rekenmethodieken die gebruikt kunnen worden voor integraalbruggen, waar gefocust wordt op de landhoofdconstructies. Hier wordt voor “integraalbruggen” de volgende definitie gebruikt: “integrale brugeinden met een voegloos dek dat voegloos verbonden is met de fundering”. Er wordt van de methodieken een toepasbaarheid en nauwkeurigheid bepaald, waar in eerste instantie de nadruk gelegd zal worden op de nauwkeurigheid. Waarna de relatie tussen nauwkeurigheid en toepasbaarheid nader onderzocht wordt, dit zorgt ervoor dat een uitspraak gedaan kan worden over de efficiëntie van de verschillende soorten rekenmethodieken.

Hieronder staan de drie deelvragen gespecificeerd.

Deelvraag 1; Literatuuronderzoek

Deelvraag 1: Wat is er bekend in verschillende bronnen om de werking en berekening van integraalbruggen te beschouwen?

Toelichting: Een inventarisatie maken naar integraalbruggen in het algemeen, de effecten die hierop van toepassing zijn en rekenmethodieken die integraalbruggen kunnen beschouwen. Hier worden interne documenten, documenten uit databases en experts voor geraadpleegd.

Deelvraag 2; Nauwkeurigheid

Deelvraag 2: Hoe nauwkeurig zijn de verschillende rekenmethodieken?

Toelichting: Een inventarisatie maken van de nauwkeurigheid van verschillende rekenmethodieken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gevoeligheidsanalyses tussen de rekenmethodieken.

Deelvraag 3; Toepasbaarheid

Deelvraag 3: Hoe toepasbaar zijn de verschillende rekenmethodieken voor Witteveen+Bos?

Toelichting: Een inventarisatie maken van de “toepasbaarheid” van verschillende rekenmethodieken. Hierbij wordt met “toepasbaarheid” bedoeld: een verzameling onderliggende criteria welke van toepassing zijn voor Witteveen+Bos.

2.4 AFBAKENING

In deze paragraaf wordt het afstudeeronderzoek afgebakend, zowel voor de onderdelen waar integraalbruggen uit bestaan als voor het onderzoek in zijn geheel. De toelichtingen en afwegingen die gemaakt zijn om tot deze afbakening te komen staan beschreven in het rapport '4.0 PvA'. In dit hoofdrapport staan enkel de hoofdpunten zonder toelichting aangegeven.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:

Deelrapport '4.0 Plan van Aanpak'

Hoofdstuk 2.4

2.4.1 Afbakening onderdelen integraalbrug

Algemeen: Integraalbruggen met scheve kruisingen of een horizontale boogstraal worden niet beschouwd. Van de integraalbruggen wordt alleen de hoofdconstructie beschouwd en worden hierdoor stootplaten en vleugelwanden niet meegenomen in het onderzoek. Hiernaast worden alleen autoverkeersviaducten beschouwd, viaducten voor voetgangers en treinverkeer worden niet meegenomen.

Type integraalbrug: Van de verschillende typen integraalbruggen wordt in dit onderzoek alleen het type 'integraalbrug' beschouwd en geen 'semi-integraalbruggen' en 'conventionele bruggen' (deze typen worden toegelicht in paragraaf '3.2 De integraalconstructie').

Dek: Van de verschillende typen dek wordt in dit onderzoek alleen het type "voorgespannen liggers met een later aangebrachte druklaag" beschouwd. De andere typen worden niet meegenomen in het onderzoek (deze typen worden toegelicht in paragraaf '3.2 De integraalconstructie').

Tussensteunpunten: Er wordt een integraalbrug beschouwd met één tussensteunpunt (dus een brug met twee overspanningen). Dit tussensteunpunt is ook voegloos uitgevoerd.

Fundering: Van de verschillende typen fundering worden in dit onderzoek alleen de volgende typen fundering beschouwd: buispalen, damwand, stalen H-profielen en voorgespannen betonpalen. Hiernaast worden alleen funderingen zonder schoorstand meegenomen.

2.4.2 Algemene afbakening

Hierboven zijn verschillende afbakeningen beschreven, gefocust op integraalbruggen. Hieronder worden nog een aantal algemene afbakeningen voor het gehele onderzoek benoemd.

Binnen het onderzoek zal uitgegaan worden van de BGT situatie en zal de UGT situatie buiten beschouwing gelaten worden.

Het onderzoek gaat over de krachtswerking van integraalbruggen, zo zal er globaal ingegaan worden op het ontwerpen en toetsen van dergelijke constructies. Het uitwerken tot wapeningsniveau zal buiten beschouwing gelaten worden. Er zal gefocust worden tot het niveau waar momenten, spanningen en vervormingen bepaald zijn. Wanneer er wel een ontwerp of wapening bepaald moet worden, zal deze gebaseerd worden op al reeds uitgewerkte projecten. De reden tot deze keuze is de tijdsoverschrijding die dat anders zou veroorzaken en de focus van de hoofdvraag op de krachtswerking van integraalbruggen.

Binnen het onderzoek zullen geen rekenmethodieken met elkaar gemixt worden, er worden enkel rekenmethodieken in hun geheel (zoals geïnventariseerd binnen het literatuuronderzoek) toegepast.

Het onderzoek richt zich op de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van de rekenmethodieken. De focus wordt in het onderzoek gelegd bij de nauwkeurigheid van de rekenmethodieken.

In het afstudeerproject zal er niet ingegaan worden op de vergelijking van verschillende normen. Dit betekent dat voor bijvoorbeeld kruip van beton er een bepaalde norm wordt gekozen en dat dit aangehouden wordt om kruip te bepalen voor iedere rekenmethodiek. De algemene norm die aangehouden wordt is de Eurocode, dit is omdat deze maatgevend is binnen Europa (en zo ook voor Witteveen+Bos).

Het statisch systeem van de integraalbrug wordt enkel in langsrichting beschouwd. Dit betekent dat alle effecten die optreden (kruip/krimp) in dwarsrichting niet meegenomen worden. Uit de literatuurstudie blijkt dat deze krachten nooit maatgevend zijn.

Als laatste zal er naast de gegeven onderdelen op niets anders ingegaan worden, de gegeven onderdelen zijn bepaald aan de hand van een uitgebreide literatuurstudie. De belangrijkste aspecten worden uitgewerkt en meegenomen binnen het onderzoek. Er wordt uitgegaan van het principe “Interessant, maar niet relevant”.

3.

BRONNENONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt het eerste deelonderzoek toegelicht. Het hoofddoel van dit deelonderzoek is om informatie te verzamelen uit interne bronnen, externe bronnen en gesprekken met experts. Onder interne en externe bronnen vallen ontwerprapporten, rekenrapporten en onderzoeken. Het volledige onderzoek is te lezen in het deelrapport '1.0 Literatuuronderzoek', in dit hoofdverslag zullen enkel de belangrijkste punten uit dit deelrapport getoond worden. Met behulp van dit deelonderzoek wordt de eerste deelvraag beantwoord, deze luidt:

Volledige uitwerking van dit hoofdstuk:
Deelrapport 1.0

Deelvraag 1: *Wat is er bekend in verschillende bronnen om de werking en berekening van integraalbruggen te beschouwen?*

Toelichting: *Een inventarisatie maken naar integraalbruggen in het algemeen, de effecten die hierop van toepassing zijn en rekenmethodieken die integraalbruggen kunnen beschouwen. Hier worden interne documenten, documenten uit databases en experts voor geraadpleegd.*

In het deelrapport '1.0 Literatuurstudie' in hoofdstuk '2. Geïnterviewde bronnen' worden alle beschouwde bronnen toegelicht. Hier wordt ook toegelicht of ze nuttig waren, en zo nee, waarom niet.

3.1 DE INTEGRAALCONSTRUCTIE

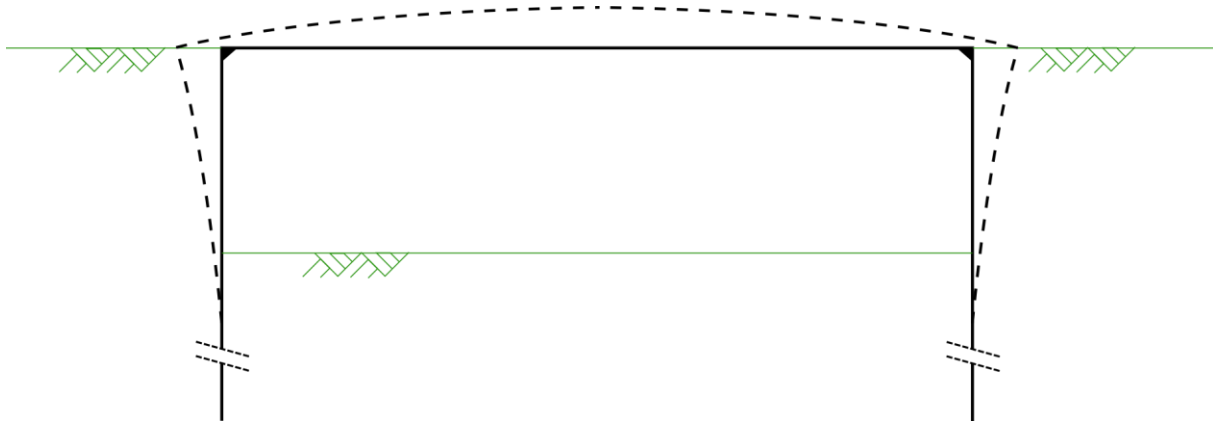
Een integraalbrug wordt gedefinieerd als een brug waarvan de brugeinden constructief (vast) verbonden zijn met de fundering en die een voegloos dek heeft waar tussensteunpunten ook constructief (vast) verbonden zijn met het dek. Door dit andere constructieprincipe in vergelijking met een conventionele brug werkt de krachtswerking van de constructie geheel anders. De mechanismen kruip, krimp en temperatuuruitzettingen zijn bij conventionele bruggen amper van toepassing, dit wordt opgelost door het toepassen van voegen in de constructie

Volledige uitwerking van deze paragraaf:
Deelrapport '1.0 Literatuurstudie'
Hoofdstuk 3

Detailtering dek en tussensteunpunten	Voegloos dek (zonder scharnieren)		Dek met scharnier(en)
	Tussensteunpunten voegloos verbonden met het dek of geen tussensteunpunten	Tussensteunpunten met scharnieren of roloplegging	Conventionele Nederlandse methode
Detailtering brugeinden (Zie afbeelding 2)			
Beide brugeinden integraal	Integraalbrug		
Een brugeinde semi-integraal, ander brugeinde semi-integraal of integraal		Semi-integraalbrug	
Ten minste één brugeinde scharnierend			Scharnierende (conventionele) brug

Tabel 2 Definitie integraalbrug

waardoor het dek vrij kan vervormen. Bij integraalbruggen zijn geen voegen aanwezig om deze vervorming op te vangen, hierdoor bewegen de landhoofdconstructies en fundering mee met de vervorming van het dek (zie Afbeelding 2). Deze verplaatsing wordt echter opgevangen door de grond achter de constructie, dit leidt tot spanningen in de constructie omdat de beweging beperkt wordt. De samenwerking tussen grond en constructie is daarom van groot belang voor het gedrag van de constructie.



Afbeelding 2 vervormingen door thermische uitzetting (eigen afbeelding)

Voor- en nadelen

Zoals hierboven genoemd wordt, zijn de vervormingen die van toepassing zijn op deze constructie een groot knelpunt. Andere knelpunten zijn mogelijke asfaltschade door het vervormen, een andere werking van kruip en het gebrek aan ervaring met integraalbruggen in Nederland.

Voordelen ten opzichte van een conventionele brug zijn het ontbreken van voegen en opleggingen, een verkleining van het veldmoment van de liggers in de gebruikssituatie, betonbesparing in de landhoofden door de stempelwerking van het dek en bovendien een grotere architectonische vrijheid.

Constructieonderdelen

De volgende dekconstructies worden toegepast bij integraalbruggen: voorgespannen liggers met een later aangebrachte druklaag, stalen liggers met een betonnen dek en een in-situ dek. Bij het dek moet goed rekening worden gehouden met de uitvoering, aangezien dit een grote invloed heeft op de berekening.

Verschillende stalen en betonnen funderingen worden toegepast bij integraalbruggen, hiernaast is een fundering op staal ook mogelijk. Voor de fundering van integraalbruggen gelden twee belangrijke aandachtspunten, namelijk draagvermogen en stijfheid. Deze twee punten werken elkaar echter tegen; voor een grotere draagkracht is een stijvere fundering nodig wat leidt tot meer momenten in de aansluiting dek-landhoofd. Het doel is juist zo weinig mogelijk buigstijfheid in de langsrichting van de brug, omdat hierdoor het moment in de aansluiting dek-landhoofd verminderd wordt. Juist deze aansluiting dek-landhoofd is een groot aandachtspunt in integraalconstructies.

3.2 SECUNDAIRE EFFECTEN

Op integraalconstructies werken net als op elke constructie primaire en secundaire effecten. In het voorgaande hoofdstuk is beschreven hoe door het principe van een integraalbrug deze effecten een andere invloed hebben dan bij een conventionele brug. Primaire effecten zijn effecten die gelijk aangrijpen op de constructie, terwijl secundaire effecten een verandering ondergaan door de tijd heen. Onder primaire effecten vallen de volgende zaken:

Volledige uitwerking van deze paragraaf:
Deelrapport '1.0 Literatuurstudie'

Hoofdstuk 4

- ❖ Eigen gewicht en rustende belasting
- ❖ Verkeersbelasting

Deze primaire effecten worden hetzelfde meegenomen bij een integraalbrug als bij een conventionele brug. In dit onderzoek worden de volgende zeven secundaire effecten beschouwd:

- ❖ **Stijfheidsverdeling:** Een constructie kan zowel ongescheurd als gescheurd doorgerekend worden. Het ongescheurd doorrekenen van een betonconstructie leidt tot grotere momenten en die leiden tot scheurvorming. Scheurvorming leidt echter tot gescheurd rekenen, wat lagere momenten geeft. Het is mogelijk om in bepaalde gebieden gescheurd (met een lagere E-modulus) te rekenen.
- ❖ **Thermische effecten:** Door temperatuurverandering zetten materialen uit of krimpen ze in. Hier kan een onderscheid gemaakt worden in dagelijkse en jaarlijkse temperatuurswisselingen. De verplaatsingen van het dek door dit effect hebben een grote invloed op de momenten in het landhoofd omdat de fundering vast verbonden is met het dek.
- ❖ **Krimp:** De verkorting van beton die niet afkomstig is van een belasting.
- ❖ **Kruip:** De met de tijd toenemende en blijvende vervorming van beton bij gelijkblijvende belasting.
- ❖ **Kist-effect:** Het Kist-effect is het effect dat optreedt wanneer het statisch systeem van een betonconstructie verandert. Een voorbeeld hiervan is dat het statisch systeem verandert door twee liggers te koppelen op een steunpunt, het negatieve moment ter plekke van dit tussensteunpunt ontstaat niet direct. Dit moment ontstaat pas na verloop van tijd door het kruipen van de constructie. Het opmerkelijke van het Kist-effect is dat nooit het maximale steunpuntmoment zal ontstaan, het Kist-effect leidt tot een verlaging in het maximale moment.
- ❖ **Grond en beddingen:** De horizontale effectieve grondspanning in de actieve en passieve situatie is afhankelijk van de mate van vervorming en verplaatsing ten opzichte van de grond. Een belangrijk gerelateerd effect is het **opspaneffect** wat zich voordoet bij cyclische vervormingen van grond. Dit effect houdt dus een sterk verband met alle aan vervorming gerelateerde effecten.

Grote gevolgen van deze effecten zijn bijvoorbeeld de temperatuurveranderingen die een grote invloed hebben op de normaalkrachten in de liggers en fundering van de gehele constructie. Door dit effect wordt de maximale lengte van integraalbruggen in de literatuur 450 meter geacht. In Amerikaanse staten wordt echter de limitatie van maximaal 100 en 200 meter gegeven. De grondgesteldheid direct achter het landhoofd wordt ook gezien als cruciaal voor de werking van de constructie. Hierdoor kan er gevarieerd worden met de grondparameters.

3.3 REKENMETHODIEKEN

Er zijn vijf verschillende methodieken gevonden, hieronder staat puntsgewijs welke dit zijn en in één zin wat ze inhouden (zie bijlagen 1.8 t/m 1.13 voor verschillende stroomschema's van deze rekenmethodieken):

- ❖ **Methodiek Rotterdamsebrug:** Iteratieve methode waarbij D-sheet ondersteunend is voor SCIA.
- ❖ **Methodiek IJzerlaan (KW09):** Iteratieve methode waarbij een duidelijke splitsing zit tussen D-sheet en SCIA.
- ❖ **Methodiek Valkbrug:** Lineaire methode waarbij maar één programma gebruikt wordt.
- ❖ **Methodiek MEMO (KW11):** Lineaire methode waarbij drie modellen en twee programma's gebruikt worden.
- ❖ **Methodiek Groote Wielen:** Lineaire methode die met de hand uitgevoerd wordt.

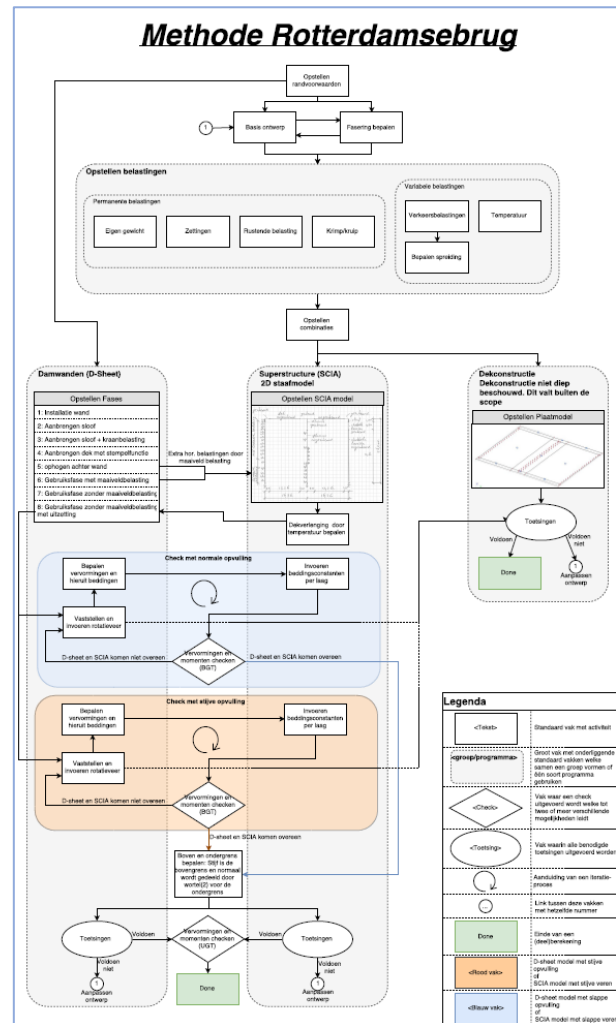
Onderling bestaan tussen de rekenmethodieken meerdere grote verschillen. Deze zijn te categoriseren als verschillen in de aanpak en verschillen in het meenemen van de verschillende secundaire effecten.

Aanpak binnen rekenmethodieken

In de aanpak is het grootste verschil welke programma's gebruikt zijn en tot welke splitsingen en iteraties dit leidt:

- ❖ **Methodieken Rotterdamsebrug en IJzerlaan** gebruiken beide een combinatie van SCIA en D-Sheet, wat leidt tot splitsingen en iteraties in de berekening. Deze iteraties komen van het feit dat de modellen in de verschillende programma's, ondanks de splitsing, op elkaar aan moeten sluiten. Rotterdamsebrug gebruikt D-Sheet ondersteunend aan SCIA om de veren van het raamwerkmodel in SCIA vast te stellen, waar er bij IJzerlaan een splitsing wordt gemaakt in de aansluiting dek-landhoofd en de modellen op elkaar afgesteld worden met behulp van veren.
- ❖ **Methodiek MEMO** maakt gebruik van SCIA en D-sheet, maar gebruikt geen iteraties om de modellen op elkaar af te stellen.
- ❖ **Methodiek Groote Wielen** splitst de constructie op in meerdere "simpele" mechanica modellen die met de hand uitgewerkt kunnen worden. Voor een aantal modellen wordt gebruik gemaakt van een simpel ligger programma in Excel.
- ❖ **Methodiek Valkbrug** gebruikt één groot RFEM model waarin alles berekend wordt.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:
Deelrapport '1.0 Literatuurstudie'
Hoofdstuk 6



Afbeelding 3 Voorbeeld stroomschema (bijlage 1.8)
(Eigen afbeelding)

Verschillen tussen de modellen zijn ook terug te vinden in de toepassing van 2D of 3D modellen. De twee rekenmethodieken die geheel in 2D uitgewerkt zijn, zijn Groote Wielen en Rotterdamsebrug. Rekenmethodieken IJzerlaan en MEMO gebruiken een combinatie van 2D en 3D, hier zijn de D-Sheet modellen in 2D en de SCIA modellen in 3D. Tot slot is rekenmethodiek Valkbrug geheel in 3D uitgewerkt.

Om onzekerheden binnen het ontwerp en de berekening mee te nemen, worden door de rekenmethodieken verschillende variaties van parameters genomen waardoor er een boven- en ondergrens als resultaat uitkomt. Rekenmethodiek Rotterdamsebrug neemt binnen D-Sheet zowel een stijve als slappe achteropvulling mee. Rekenmethodieken Valkbrug en MEMO variëren ook met de grond, zij variëren met een factor $\sqrt{2}$ over de grondveren. Rekenmethodiek IJzerlaan varieert met een stijve en slappe fundering en rekenmethodiek Groote Wielen varieert geheel niet.

Secundaire effecten binnen rekenmethodieken

De secundaire effecten worden verschillend meegenomen in de rekenmethodieken. De volgende verschillen zijn er per effect:

- ❖ **De thermische effecten** worden in elke methodiek meegenomen als opgelegde vervorming gerelateerd aan het materiaal.
- ❖ **Krimp en kruip** worden als opgelegde vervorming of als constant temperatuurverschil in gevoerd. De enige afwijking zit in methodiek Groote Wielen, deze neemt krimp en kruip beide niet mee.
- ❖ **Het Kist-effect** wordt enkel binnen methodieken Valkbrug en MEMO meegenomen, dit gebeurt op de volgende manieren:
 - Bij methodiek Valkbrug wordt het Kist-effect pas aan het einde meegenomen als factor over de resultaten waar voorafgaand in een apart RFEM-model (met alleen het eigen gewicht en rustende belasting) de factor met behulp van de invloed van kruip bepaald wordt.
 - Bij methodiek MEMO wordt het effect meegenomen als factor over de permanente belastingen.
- ❖ **Het effect van de grond** is op verschillende manieren beschouwd:
 - Methodiek Valkbrug past niet-lineaire veren toe die vooraf door de grondparameters vastgesteld worden.
 - Methodieken MEMO en Groote Wielen passen enkel lineaire veren toe die bepaald worden uit de grondeigenschappen. Deze lineaire veren worden niet over het grondkerende deel van de fundering toegepast, hier wordt een horizontale belasting geplaatst.
 - Methode Rotterdamsebrug past een combinatie van niet-lineaire veren (het bovenste deel van de fundering) en lineaire veren toe (het onderste deel van de fundering), waar de veerwaarden uit D-Sheet komen.
 - Methodiek IJzerlaan neemt grond enkel mee binnen D-Sheet.
- ❖ **Het opspaneffect** wordt op verschillende manieren meegenomen:
 - In de methodieken Rotterdamsebrug en IJzerlaan wordt dit effect meegenomen door een stijvere achtervulling mee te nemen.
 - In de methodieken Valkbrug en MEMO wordt het opspaneffect meegenomen door een verhoogde belasting op het landhoofd te plaatsen.
 - Het opspaneffect wordt niet beschouwd bij methodiek Groote Wielen.

3.4 BEANTWOORDEN DEELVRAAG 1

Deelvraag 1 luidt: *“Wat is er bekend in verschillende bronnen om de werking en berekening van integraalbruggen te beschouwen?”*. Door het beschouwen van de hierboven gespecificeerde paragrafen is deze deelvraag beantwoord. Er is nu bekend wat een integraalbrug inhoudt en hoe deze werkt. Ook is bekend hoe deze berekend worden, welke effecten meegenomen worden, welke versimpelingen gedaan worden en welke aannames gemaakt worden.

4.

HOOFDONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt het hoofdonderzoek toegelicht. Het hoofddoel is om de efficiëntie van de rekenmethodieken die worden beschreven in de literatuurstudie te vinden, Waarbij efficiëntie volgens de hoofdvraag bestaat uit een combinatie van nauwkeurigheid en toepasbaarheid. Dit tweede deel is het hoofdonderzoek waar vooral eigen werk wordt getoond. In paragraaf 4.1 wordt allereerst de onderzoeksaanpak uitgelegd. In paragraaf 4.2 wordt dan de nauwkeurigheid beschouwd, hierna wordt in paragraaf 4.3 de toepasbaarheid beschouwd en als laatste wordt in paragraaf 4.4 het verband tussen deze twee onderzocht. Hiermee wordt in paragraaf 4.1 de tweede deelvraag beantwoord en in paragraaf 4.2 wordt de derde deelvraag beantwoord. De resultaten van de nauwkeurigheid en de toepasbaarheid worden met elkaar gecombineerd tot de efficiëntie van de rekenmethodieken, waarmee uiteindelijk de hoofdvraag beantwoord kan worden.

4.1 ONDERZOEKSAANPAK

Het doel van het hoofdonderzoek is om de efficiëntie van verschillende rekenmethodieken te bepalen, wat de hoofdvraag beantwoordt. In deze paragraaf wordt toegelicht hoe dit doel behaald wordt. Allereerst worden de benodigde definities (efficiëntie, nauwkeurigheid en toepasbaarheid) uitgelegd. Hierna wordt beschouwd met welke geïnventariseerde rekenmethodieken verder gewerkt wordt binnen het hoofdonderzoek. Waarna wordt beschreven hoe tot de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van de gekozen rekenmethodieken gekomen wordt. Als laatste wordt benoemd hoe de resultaten tot de conclusie van het onderzoek leiden.

Definities

Zoals eerder gespecificeerd in de hoofdvraag, is efficiëntie gedefinieerd als een combinatie tussen nauwkeurigheid en toepasbaarheid. Om de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van rekenmethodieken te bepalen moet eerst inzichtelijk worden gemaakt wat hiervan de definities zijn.

De nauwkeurigheid van een rekenmethodiek is een percentage dat aangeeft hoe ver de waarden van de krachtswerking en vervormingen van de daadwerkelijk optredende situatie afliggen.

Toepasbaarheid is gedefinieerd als het gewogen gemiddelde van een verzameling van criteria die samen de toepasbaarheid van een rekenmethodiek beschrijven. Toepasbaarheid wordt gemeten op een schaal van tien punten, waar een tien perfect toepasbaar is en een één absoluut niet toepasbaar.

Rekenmethodieken

In de literatuurstudie zijn vijf rekenmethodieken geïnventariseerd (zie paragraaf '3.3 Rekenmethodieken') om integraalbruggen te berekenen. Vanwege de beperkte tijd voor dit onderzoek worden in dit hoofdonderzoek enkel drie rekenmethodieken meegenomen. Deze worden voor het onderzoek worden het meest kansrijk geacht, er worden rekenmethodieken meegenomen die veel van elkaar verschillen. Van de vijf rekenmethodieken wordt hieronder toegelicht waarom ze wel of niet meegenomen worden:

Rotterdamsebrug (zie paragraaf 6.2 in het rapport '1.0 Literatuurstudie'): Wordt wel meegenomen;

De methode van de Rotterdamsebrug wordt gekozen omdat het project gekozen is voor de fictieve casus, waardoor de antwoorden uit de rekenmodellen van ons onderzoek gemakkelijk gecontroleerd kunnen worden met de waarden uit de rekennota van dat project. Verder bevat deze methode ook een iteratieve stap om de veerwaarden van de verbinding dek-landhoofd te bepalen.

MEMO (KW11) (zie paragraaf 6.5 in het rapport '1.0 Literatuurstudie'): Wordt wel meegenomen;

Rekenrekenmethodiek MEMO wordt wel meegenomen omdat dit een methode is die gebruikt maakt van constructieve en geotechnische programmatuur en geen iteratieprocessen bevat. Ook wordt binnen deze rekenmethodiek het kist-effect meegenomen. In tegenstelling tot de andere gekozen rekenmethodieken wordt hier de constructie in 3D beschouwd.

Groote Wielen (zie paragraaf 6.6 in het rapport '1.0 Literatuurstudie'): Wordt wel meegenomen;

Rekenmethode Groote Wielen wordt gekozen omdat deze bijna geheel met de hand wordt uitgewerkt. Hierdoor worden er veel versimpelingen gedaan en is het nuttig om te weten wat deze versimpelingen doen met de nauwkeurigheid van de rekenmethodiek.

IJzerlaan (KW09) (zie paragraaf 6.3 in het rapport ‘1.0 Literatuurstudie’): Wordt niet meegenomen;
Rekenmethodiek IJzerlaan (KW09) wordt niet meegenomen in verband met de grote overeenkomsten met rekenmethodiek Rotterdamsebrug. De grote verschillen ten opzichte van rekenmethodiek Rotterdamsebrug zijn een 3D SCIA model en de duidelijke splitsing tussen SCIA en D-Sheet. Een 3D SCIA model wordt alsnog meegenomen in het onderzoek door rekenmethodiek MEMO mee te nemen. De duidelijke splitsing tussen SCIA en D-Sheet wordt nergens verder meegenomen.

Valkbrug (zie paragraaf 6.4 in het rapport ‘1.0 Literatuurstudie’): Wordt niet meegenomen;
Rekenmethodiek Valkbrug wordt niet meegenomen in verband met de grote overeenkomsten met rekenmethodiek MEMO. Zowel MEMO als rekenmethodiek Valkbrug zijn een methode zonder iteraties, waarbij de keuze is gevallen op rekenmethodiek MEMO. De keuze hiervoor is omdat rekenmethodiek Valkbrug geen gebruik maakt van geotechnische software, waardoor deze als minder betrouwbaar wordt gezien. De constructie waarvoor deze rekenmethodiek is toegepast wijkt ook sterk af van de te toetsen casus in het nauwkeurigheidsonderzoek, wat veel wijzigingen zou geven.

Bepaling nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de rekenmethodieken moet vastgesteld worden, dit gebeurt op de volgende manier:

De nauwkeurigheid van de rekenmethodieken wordt bepaald aan de hand van een representatieve rekenmethodiek die de “waarheid” representeert. Dit model is opgebouwd aan de hand van validaties om te garanderen dat het de “waarheid” representeert. Hierbij wordt aan de hand van een fictieve casus de krachtswerking en de vervormingen per rekenmethodiek vergeleken met de krachtswerking en de vervormingen van de representatieve rekenmethodiek.

Ook wordt er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van de nauwkeurigheid tussen de rekenmethodieken. Dit houdt in dat de nauwkeurigheid per rekenmethodiek wordt bepaald van verschillende parametersets¹ en dat er dus conclusies getrokken kunnen worden hoe nauwkeurig een rekenmethodiek is voor een gegeven situatie.

Hiernaast worden bepaalde versimpelingen en aannames nader bekeken om te bepalen welke invloed ze hebben binnen de verschillende rekenmethodieken, hiervoor worden verschillende belastingcombinaties opgesteld. Met deze resultaten kunnen extra conclusies getrokken worden over de nauwkeurigheid.

Bepaling toepasbaarheid

De toepasbaarheid van de rekenmethodieken moet vastgesteld worden, dit gebeurt op de volgende manier:

Allereerst worden de criteria die onder toepasbaarheid vallen opgesteld. Er wordt specifiek gekeken naar de toepasbaarheid binnen Witteveen+Bos. Sommige criteria zijn belangrijker dan andere, hierdoor is besloten om wegingsfactoren toe te kennen aan de verschillende criteria. De wegingsfactoren zijn gebaseerd op basis van systematische onderlinge afweging van de criteria. Elk criterium wordt tegen elk ander criterium afgewogen, wat leidt tot een wegingsfactor (percentage van het totaal aantal toegekende punten).

¹ Een parameterset is een verzameling van de parameters van een gegeven casus, in dit geval de opgestelde fictieve casus.

De rekenmethodieken worden beoordeeld aan de hand van de eigen ervaringen bij het uitwerken van de rekenmethodieken tijdens het nauwkeurigheidsonderzoek. Hier wordt een multicriteria-analyse voor gebruikt waar met een 5-punts schaal wordt gewerkt.

Aan de hand van de resultaten van de multicriteria-analyse en de weging wordt de toepasbaarheid (op een schaal van één tot tien punten) vastgesteld.

Resultaten

Nadat de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van alle rekenmethodieken vastgesteld is, wordt hiermee de efficiëntie van de rekenmethodieken bepaald. Dit wordt gedaan door voor elke rekenmethodiek de nauwkeurigheid en toepasbaarheid tegen elkaar uit te zetten. Hierna wordt gekeken welke rekenmethodieken afvallen, waarbij een rekenmethodiek afvalt wanneer een andere rekenmethodiek beter scoort op nauwkeurigheid en toepasbaarheid. Met behulp van deze resultaten wordt de hoofdvraag beantwoord.

4.2 NAUWKEURIGHEID

In deze paragraaf wordt het tweede deelonderzoek toegelicht, dit deelonderzoek is het grootst van allemaal en leidt tot de meeste inhoudelijke conclusies van de rekenmethodieken. Het hoofddoel van dit deelonderzoek is om de nauwkeurigheid van de rekenmethodieken te bepalen. Het volledige onderzoek is te lezen in het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'. In dit hoofdverslag zullen enkel de belangrijkste punten uit dit deelrapport getoond worden. Met behulp van dit deelonderzoek wordt de tweede deelvraag beantwoord, deze luidt:

Volledige uitwerking van dit hoofdstuk:

Deelrapport 2.0

Deelvraag 2: *Hoe nauwkeurig zijn de verschillende rekenmethodieken?*

Toelichting: *Een inventarisatie maken van de nauwkeurigheid van verschillende rekenmethodieken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gevoeligheidsanalyses tussen de rekenmethodieken.*

De nauwkeurigheid van een rekenmethodiek is gedefinieerd als een percentage dat aangeeft hoe ver de waarden van de krachtswerking en vervormingen van de daadwerkelijk optredende situatie af liggen. Hiervoor wordt voor de daadwerkelijk optredende situatie een representatieve rekenmethodiek toegepast. Hierna wordt een fictieve casus doorgerekend om resultaten te verkrijgen. Met deze casus wordt gevarieerd om een gevoeligheidsanalyse uit te kunnen voeren. Als laatste wordt de nauwkeurigheid van de rekenmethodieken bepaald op basis van alle verkregen resultaten.

4.2.1 Startgegevens

Zoals beschreven in paragraaf '4.1 Onderzoeksaanpak hoofdonderzoek' worden om de nauwkeurigheid te bepalen gebruikt:

- ❖ Fictieve casus
- ❖ Representatieve rekenmethodiek
- ❖ Gevoeligheidsanalyse
- ❖ Resultaten

Waar hieronder dieper op ingegaan wordt.

Fictieve casus

De fictieve casus is gekozen aan de hand van een project waarin een integraalbrug is uitgewerkt. Het project dat is gekozen, is de Rotterdamsebrug (zie paragraaf '6.2 Methodiek Rotterdamsebrug' van het rapport '1.0 literatuurstudie'). Dit project is gekozen omdat het voldoet aan de gestelde afbakening in het PvA van dit onderzoek, zie het rapport '4.0 PvA'. Waarin de afbakening van de tussensteunpunten doorslaggevend is geweest. Er is afgebakend dat er een integraalbrug met één tussensteunpunt wordt beschouwd en de Rotterdamsebrug is de enige integraalbrug die een tussensteunpunt heeft van de integraalbruggen die zijn beschouwd in de literatuurstudie.

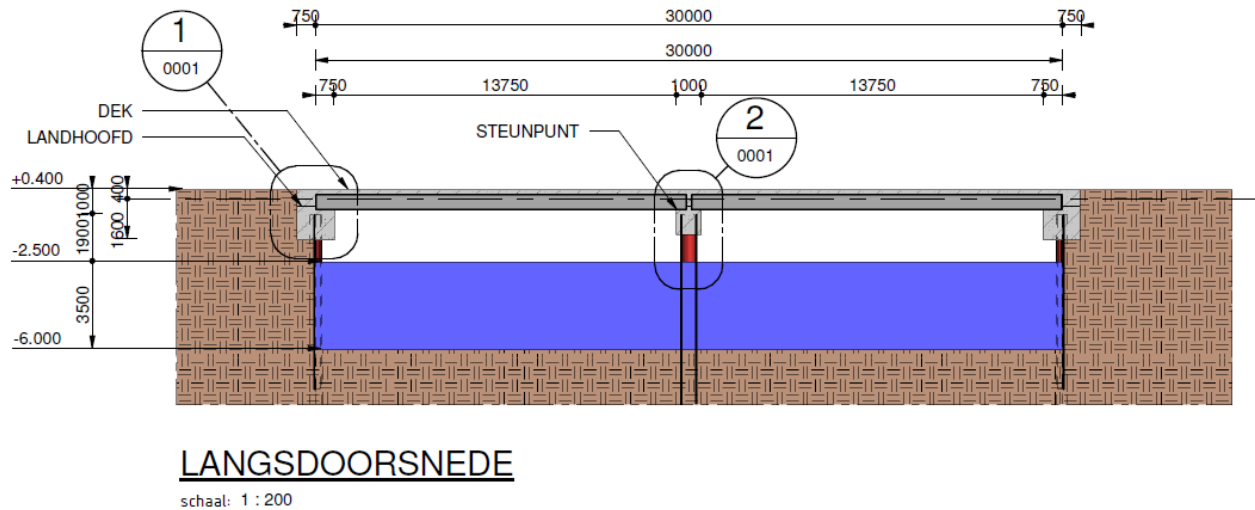
Volledige uitwerking van deze paragraaf:

Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'

Hoofdstuk 3.2

De startgegevens en de randvoorwaarden van de fictieve casus zijn hetzelfde als die van de Rotterdamsebrug behalve dat de geometrie en belasting versimpeld is. Zo staat het brugdek in het project onder een hoek in langsrichting, waarbij dit in de fictieve casus niet het geval is. Een andere grote versimpeling is de grondgesteldheid, deze is versimpeld tot een enkele zandlaag. Hierdoor kunnen de effecten van de grond beter beschouwd worden. Hiervoor is gekozen om zo de rekenmethodieken

sneller te kunnen doorlopen zonder dat het negatieve gevolgen heeft op de resultaten van het onderzoek.



Afbeelding 4 Langsdoorsnede fictieve casus (eigen afbeelding)

Er is ook een fasering vastgesteld, deze bestaat uit de volgende fases:

- ❖ Fase 1: Installatie Larssen (damwandplanken)
- ❖ Fase 2: Aanbrengen sloof
- ❖ Fase 3: Afgraven watergang
- ❖ Fase 4: Aanbrengen liggers (de leeftijd van de liggers wordt hier vastgesteld op 60 dagen)
- ❖ Fase 5: Ophogen grond achter de wand
- ❖ Fase 6: Eindsituatie met maaiveldbelasting (storten druklaag)

Alle exacte constructie-eigenschappen, de grondgesteldheid en fasering staan beschreven in paragraaf '3.2 Casus' van het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'. Verder is er een tekening van de fictieve casus te zien in bijlage 2.1

Representatieve rekenmethodiek

De representatieve rekenmethodiek bestaat uit een zo geavanceerd en volledig mogelijk model waarbij gebruik wordt gemaakt van twee programma's, namelijk DIANA en PLAXIS. Het volledige model wordt opgebouwd in DIANA, waarbij PLAXIS ondersteunend werkt voor het DIANA model. In het PLAXIS model wordt het grondgedrag gevalideerd, bepaald en het opspaneffect beschouwd. Dit wordt gesteld omdat beide programma's gevalideerd zijn binnen hun eigen vakgebied: constructie voor DIANA en geotechniek voor PLAXIS. Om de modellen juist op te stellen worden verschillende validaties gedaan.

Beide modellen worden in de programma's in 2D uitgewerkt. Deze keuze is gemaakt omdat de afstudeerders weinig ervaring hebben met beide programma's en omdat er een beperkte tijd is om de rekenmethodieken door te werken.

Zie hoofdstuk '4. Representatieve rekenmethodiek' uit het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid' voor nadere informatie over de representatieve rekenmethodiek, dit wordt ook nog verder toegelicht in paragraaf '4.2.2 Representatieve rekenmethodiek' binnen dit hoofdrapport

Gevoeligheidsanalyse

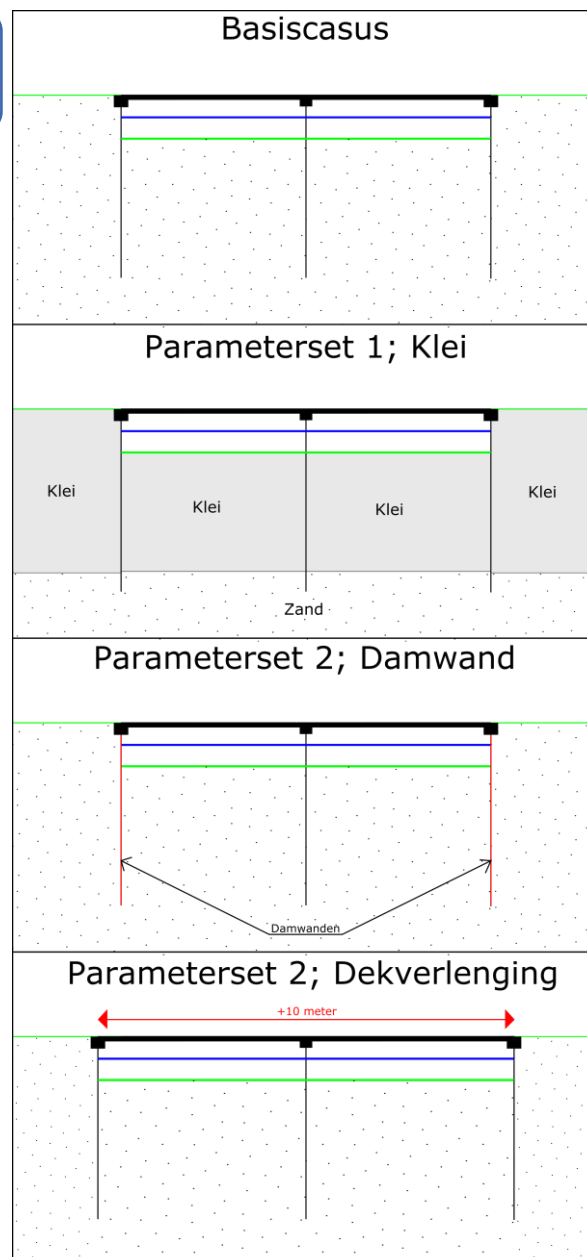
Als enkel de fictieve casus beschouwd wordt, kan er alleen iets gezegd worden over de nauwkeurigheid binnen die specifieke situatie. Door een enkele parameter aan te passen van deze fictieve casus kan er meer gezegd worden over een rekenmethodiek binnen verschillende situaties. Dit wordt een gevoeligheidsanalyse over de rekenmethodieken genoemd, hierdoor kan er gekeken worden of er eenzelfde afwijking van nauwkeurigheid is in een andere situatie.

Er worden drie parametersets naast de fictieve casus (basiscasus) beschouwd. De volgende parametersets worden doorgerekend (zie ook Afbeelding 5):

- ❖ Parameterset 1; Klei
In deze parameterset is een hoge laag klei en een diepe zandlaag aanwezig.
- ❖ Parameterset 2; Damwand
In deze parameterset is de combiwand vervangen door een damwand.
- ❖ Parameterset 3; Dekverlenging
In deze parameterset is de lengte van de overspanningen vergroot.

Deze parametersets zijn opgesteld aan de hand van de verkregen informatie uit het deelrapport '1.0 Literatuurstudie'. Deze parameters hebben de grootste invloed op de krachtswerking van integraalbruggen en zijn het meest nuttig om de rekenmethodieken mee te analyseren.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:
Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'
Hoofdstuk 3.3



Afbeelding 5 De verschillende parametersets (eigen afbeelding)

Resultaten

Aan het einde van het onderzoek zijn er resultaten per rekenmethodiek en per parameterset verkregen. Om hier goede conclusies uit te kunnen halen worden er combinaties (zie Tabel 3) opgesteld om duidelijk te zien welke belastingen een bepaalde afwijking geven. Combinaties één tot en met vijf worden vergeleken met de representatieve rekenmethodiek. De laatste vier combinaties worden niet met de representatieve rekenmethodiek vergeleken omdat het eigen gewicht te belangrijk is om uit te zetten. Deze laatste vier combinaties zijn opgesteld om extra conclusies te kunnen trekken over de rekenmethodieken onderling.

combi #	Grond	eigen gewicht	rustende belasting	verkeerslast	Krimp	Temperatuur uitzetting	Opspaneffect
combi 1	x	x	x	x	x	x	x
combi 2	x	x	x	x			
combi 3	x	x	x		x		
combi 4	x	x	x			x	x
combi 5	x	x	x				
combi 6	x			x			
combi 7	x				x		
combi 8	x					x	
combi 9	x						x

Tabel 3 Combinaties

Van al deze combinaties, parametersets en rekenmethodieken worden op de volgende 7 meetpunten gegevens afgelezen:

- ❖ Moment aansluiting dek-landhoofd
- ❖ Maximale veldmoment
- ❖ Moment tussensteunpunt
- ❖ Maximaal moment fundering (buik)
- ❖ Locatie maximaal moment fundering buik
- ❖ Maximale normaalkracht dek
- ❖ Normaalkracht fundering, net onder het landhoofd
- ❖ Normaalkracht buispalen onder het tussensteunpunt

Met behulp van al deze gegevens worden vergelijkingen gemaakt en conclusies getrokken waarom bepaalde afwijkingen in nauwkeurigheid aanwezig zijn.

4.2.2 Representatieve rekenmethodiek

De representatieve rekenmethodiek bestaat uit een zo geavanceerd en volledig mogelijk model waarbij gebruik wordt gemaakt van twee programma's, namelijk DIANA en PLAXIS. Het volledige model wordt opgebouwd in DIANA, waarbij PLAXIS ondersteunend werkt voor het DIANA model. Dit wordt gesteld omdat beide programma's gevalideerd zijn binnen hun eigen vakgebied: constructie voor DIANA en geotechniek voor PLAXIS. In PLAXIS wordt aan de hand van een geavanceerd grondmodel een "simpeler" Mohr-coulomb grondmodel voor DIANA bepaald, want het toepassen van een Mohr-Coulomb grondmodel is binnen DIANA veel praktischer. Hiernaast wordt het opspaneffect ook binnen PLAXIS beschouwd en versimpeld tot een q-last die in DIANA ingevoerd kan worden. Om de modellen juist op te stellen worden verschillende validaties uitgevoerd.

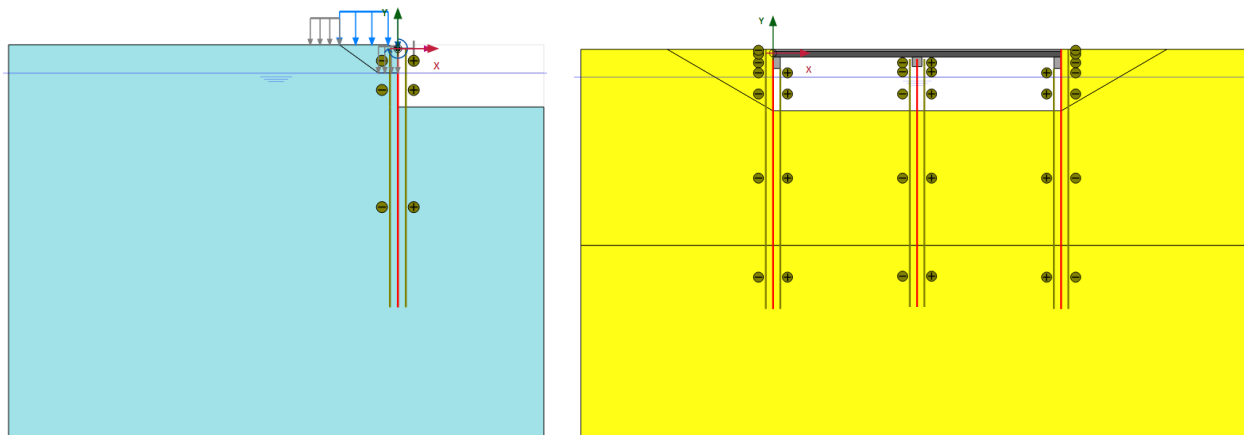
Volledige uitwerking van deze paragraaf:

Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'

Hoofdstuk 4

PLAXIS modellen

In PLAXIS zijn twee modellen opgesteld, één model om het opspaneffect² te beschouwen en één model met fases om het gedrag van de combiwand te beschouwen en de Mohr-Coulomb parameters voor het DIANA model vast te stellen. In Afbeelding 6 zijn deze twee modellen te zien.



Afbeelding 6 Model gedrag combiwand (links) en model opspaneffect (rechts) uit PLAXIS (eigen afbeelding)

Model opspaneffect

Het model om het opspaneffect te beschouwen is een model waar de gehele constructie in gemodelleerd is (zie Afbeelding 6). Samengevat wordt de constructie doorgerekend voor 80 jaar vanaf een fase waar geen verplaatsingen of spanningen in de constructie zitten ter gevolge van de fasering. Dit rekenen vanaf een "maagdelijke situatie" is gedaan om enkel het opspaneffect te beschouwen en geen andere invloeden te hebben.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:

Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'

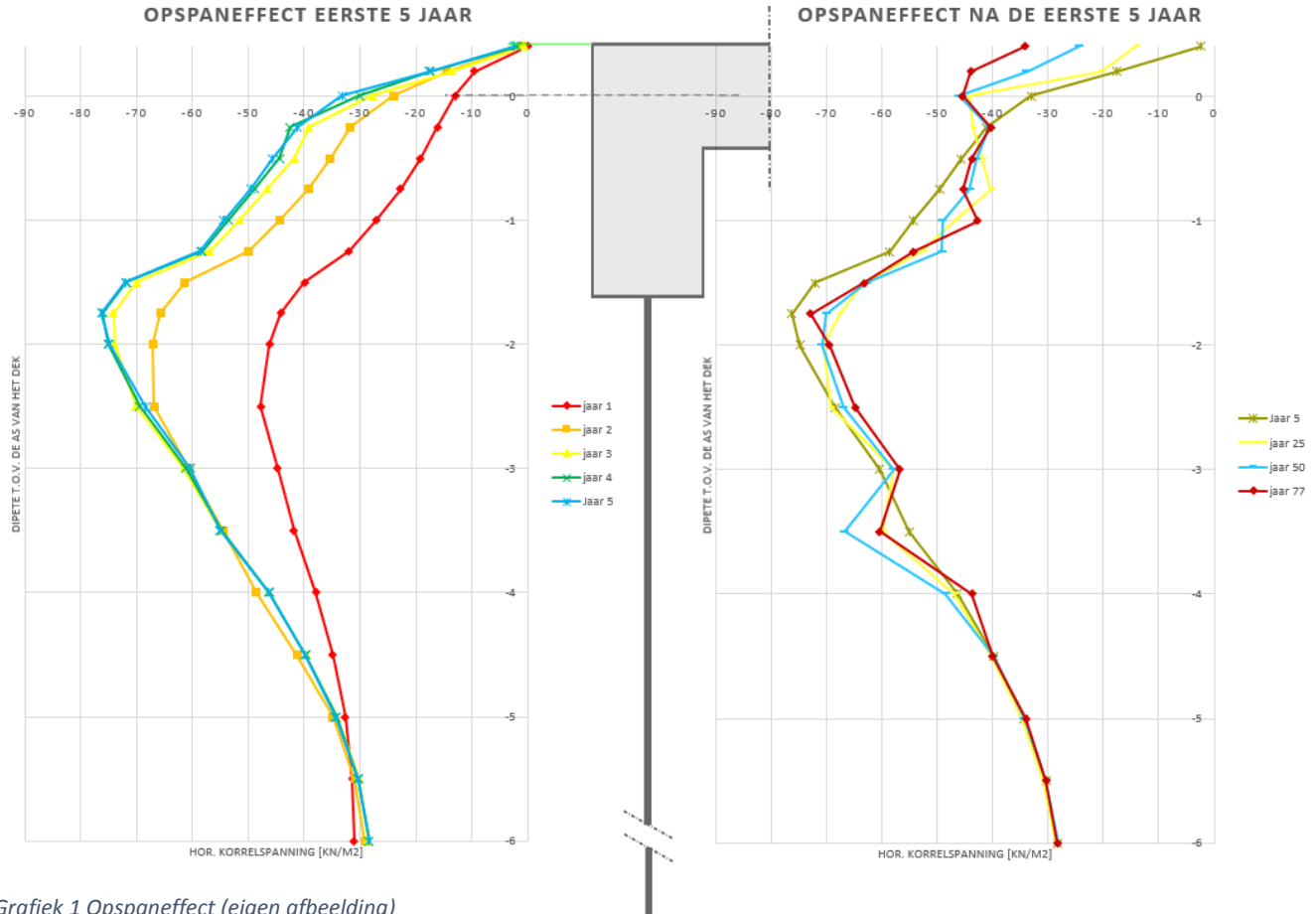
Hoofdstuk 4.1.1

In Grafiek 1 is de invloed van het opspaneffect op de grond te zien door de jaren heen, dit is opgesplitst in het effect de eerste 5 jaar, en het effect vanaf 5 jaar. Dit is gedaan omdat het effect vooral in het begin een grote invloed heeft. Er valt op dat na drie jaar het opspaneffect zijn maximum heeft bereikt bij de

² toelichting van dit effect staat in het rapport '1.0 Literatuurstudie' in de paragraaf '4.7 Grond en beddingen' en wordt in dit rapport niet opnieuw toegelicht

top. In de jaren hierna wordt de grond direct onder het maaiveld steeds stijver en over de rest van de wand iets slapper.

Om het opspaneffect juist in DIANA mee te nemen wordt de invloed hiervan versimpeld tot een q-last die aangebracht wordt op de combiwand.



Grafiek 1 Opspaneffect (eigen afbeelding)

De resultaten zijn gevalideerd aan de literatuur. Hieruit blijkt het gedrag van het opspaneffect overeen te komen met de literatuur (zie Grafiek 1), alleen zijn de uiterste waarden 30% groter dan de formules. Er blijkt dat de formules in oorsprong een ander toepassingsgebied (Zie Afbeelding 7) hebben waardoor de uitkomsten uit PLAXIS als waarheid beschouwd kunnen worden.

Note: Recommendations provided in this section are based on limited experimental data obtained from model tests on a retaining wall hinged at its base. Therefore, they should not be extracted into practical design without due care.

Afbeelding 7 Ander toepassingsgebied

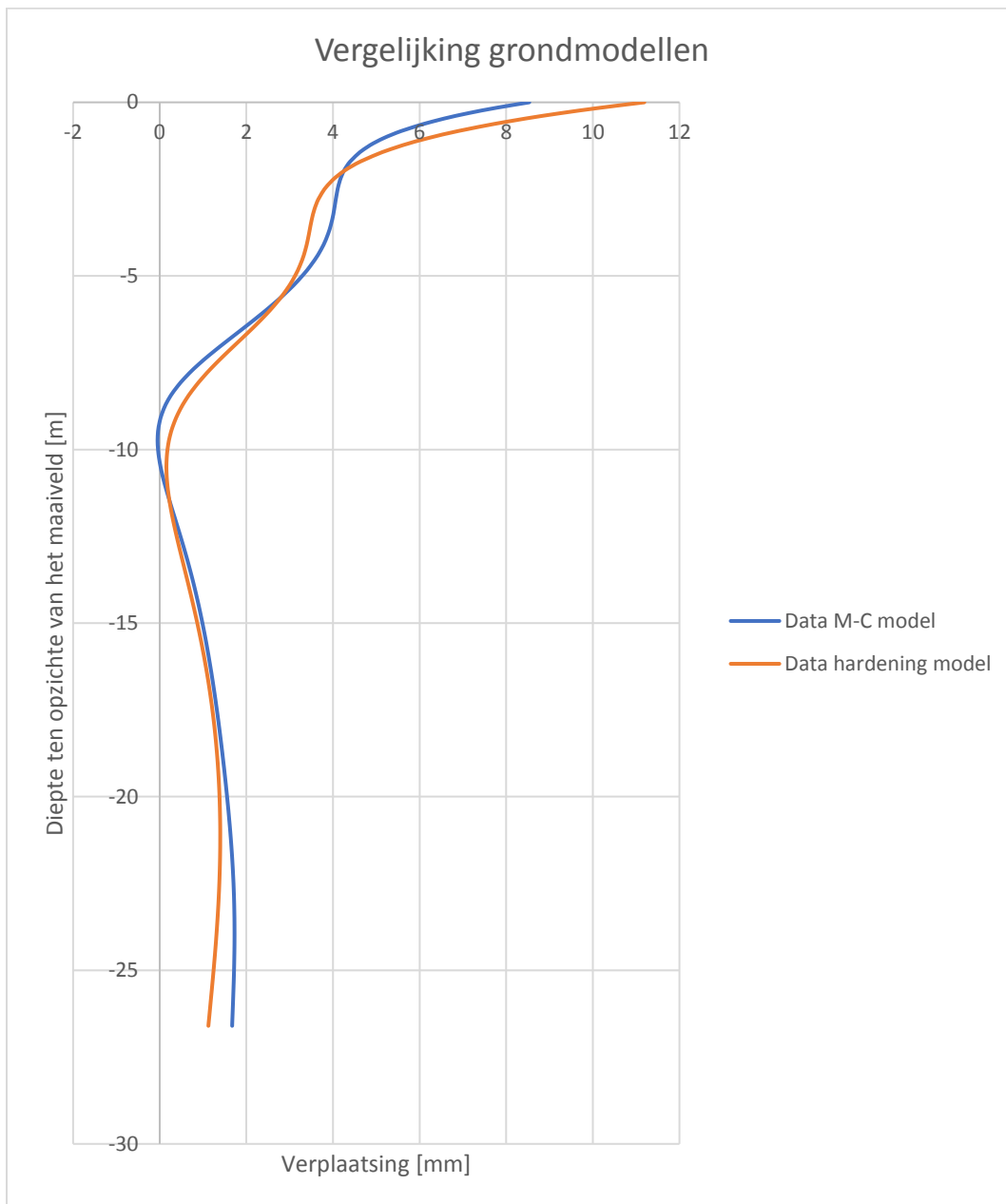
Model gedrag combiwand

Door middel van het model om het gedrag van de combiwand te beschouwen is het geavanceerde 'Hardening soil' model omgezet naar een 'Mohr-Coulomb' model, welke gebruikt is voor het volledige DIANA model. In dit model is enkel de combiwand en de grond gemodelleerd (zie Afbeelding 6) en zijn zes fases verwerkt om het gedrag van de combiwand juist te bepalen. In de omzetting van het 'Hardening soil' model naar het 'Mohr-Coulomb' model zijn de juiste grondparameters bepaald met behulp van de vervorming van de wand. In Grafiek 2 is te zien hoe de vervorming van de combiwand bij het Mohr-Coulomb model afgestemd is op de vervorming van de combiwand bij het Hardening soil model.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:

Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'

Hoofdstuk 4.1.3



Grafiek 2 Vergelijking Hardening soil en M-C grondmodel (eigen afbeelding)

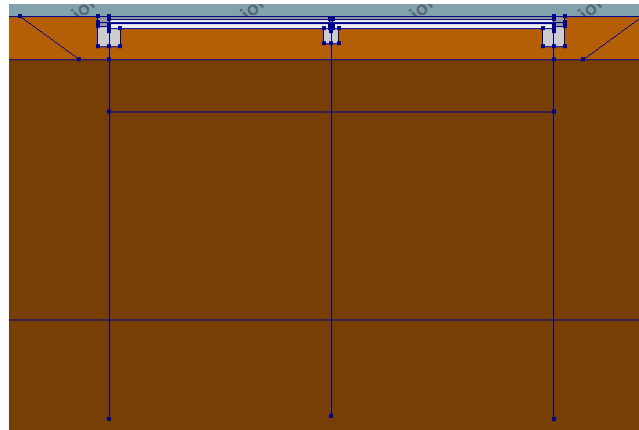
Diana model

In DIANA wordt één model opgebouwd. In dit model wordt de volledige integraalbrug beschouwd, waarbij de brug gefaseerd wordt berekend en de parameters van de modellering van de grond afkomstig zijn uit de modellen uit PLAXIS zoals beschreven in paragraaf '4.1 PLAXIS-modellen'. In Afbeelding 8 is het DIANA model te zien.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:

Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'

Hoofdstuk 4.2



Afbeelding 8 DIANA model (eigen afbeelding)

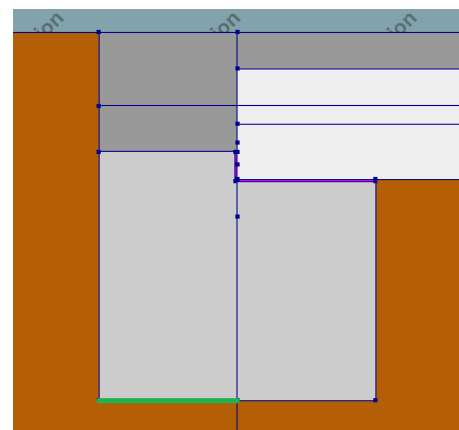
Modellering

Het DIANA model modelleert en simuleert de volledige constructie in een plain-strain model. Binnen de simulatie van de volledige integraalbrug worden ook de prefab liggers over de volledige levensduur gesimuleerd. De reden hiervoor is om zo het Kist-effect correct mee te nemen, deze modellering is gevalideerd door metingen uit de literatuur. De modellering van het Kist-effect in Diana wordt gevalideerd met behulp van het onderzoek (Kist, Allaart, & Verlaan, 1962).

De eigenschappen van de combiwanden en de buispalen worden bepaald door een equivalente dikte en stijfheid te bepalen op basis van de EA en EI van beide funderingen, dit is omdat er geen traagheidsmoment meegegeven kan worden aan deze elementen binnen DIANA. Van de prefab ligger wordt een equivalente E-modulus bepaald om zo de doorsnede correct mee te kunnen meenemen in het plain-strain model, verder wordt de voorspanning van de prefab ligger gemodelleerd als een puntlast. Deze modellering is gevalideerd binnen de validatie van het Kist-effect.

Voor meer informatie over het DIANA model wordt doorverwezen naar paragraaf '4.2 DIANA-modellen' in het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'. Daar wordt dieper ingegaan op de volgende aspecten:

- ❖ Prefab liggers en druklaag
- ❖ Landhoofd en tussensteunpunt
- ❖ Beton materiaal
- ❖ Grond
- ❖ Voorspanwapening
- ❖ Combiwanden en buispalen
- ❖ Verende ondersteuning en interface elementen
- ❖ Fasering



Afbeelding 9 Horizontale interface elementen (eigen afbeelding)

Uitvoeringsfasen

De uitvoeringsfasen worden vertaald naar fasen in DIANA. Sommige uitvoeringsfasen kunnen niet gerepresenteerd worden in een enkele fase binnen DIANA, daarom zijn er meer fasen in DIANA dan uitvoeringsfasen. Dit zijn de volgende fasen:

- ❖ Fase 1.1: installatie Larssen – initialisatie
- ❖ Fase 1.2: installatie Larssen - ontgraven grond
- ❖ Fase 1.3: installatie Larssen - plaatsen combiwanden en buispalen
- ❖ Fase 2: afgraven watergang - ontgraven watergang
- ❖ Fase 3: aanbrengen sloof - aanbrengen slofen
- ❖ Fase 5: ophogen grond achter de wand - aanvullen grond
- ❖ Fase 4.1: aanbrengen liggers
- ❖ Fase 4.2: aanbrengen liggers - prefab ligger kruip zonder verplaatsing in Y:
- ❖ Fase 4.3: aanbrengen liggers - prefab ligger kruip met verplaatsing in Y en voorspanning
- ❖ Fase 4.4: aanbrengen liggers - prefab ligger met voorspanning en belasting van druklaag
- ❖ Fase 6: eindsituatie met maaiveldbelasting - prefab ligger met voorspanning en Kist-effect

Wat opvalt is dat fase vier en vijf zijn omgedraaid. De reden hiervoor is dat het niet mogelijk is om ervoor te zorgen dat tijdens het ophogen achter de wand enkel een normaalkracht in het dek komt en geen moment in de aansluiting dek-landhoofd. Het is mogelijk om een normaalkracht te introduceren waarbij er ook een moment ontstaat (omdat de ligger en het landhoofd gekoppeld zijn) of beide niet te introduceren (de ligger en het landhoofd nog niet gekoppeld). De spanningen van het geïntroduceerde moment zijn groter dan de spanningen die afkomstig zijn van de normaalkracht, waardoor ervoor is gekozen om beide niet te introduceren om de minste afwijking van de werkelijkheid te krijgen.

Validaties

Het volledige model in DIANA wordt gevalideerd door middel van de volgende validaties:

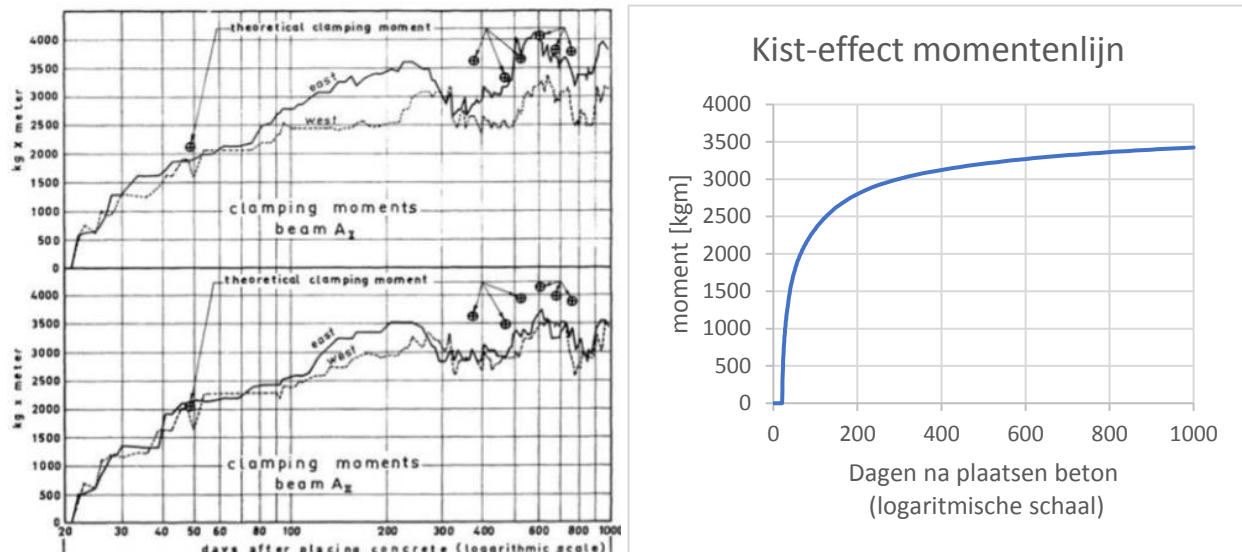
- Kist-effect ligger met voorspanning
- Krimp verschil van twee liggers
- Vergelijking grond ophogen achter landhoofd

Hieronder wordt de validatie van het kist-effect nader toegelicht vanwege de impact voor het model. In paragraaf '4.1.3 Validatie model volledig' in het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid' staat meer informatie over de validatie van het Kist-effect en de overige twee validaties.

In dit onderzoek wordt het Kist-effect analytisch bepaald waarna dit bewezen wordt door middel van een proef. Deze proef bestaat uit een voorgespannen ligger van 10 meter, waarbij de hoekverdraaiing zonder het Kist-effect en de momenten boven de steunpunten met Kist-effect gemeten worden. Met deze meetresultaten kan de modellering van een ligger met voorspanning en een ligger met voorspanning en het Kist-effect gevalideerd worden.

De resultaten van de proef en van het DIANA model zijn te zien in Afbeelding 10, waarbij de linker grafiek de meting van de proef is en de rechter grafiek de waarden die uit DIANA komen. De vorm van beide grafieken is hetzelfde en ze hebben beide dezelfde waarden. Na 30 dagen, nadat het Kist-effect is

opgetreden, is het moment in de meting 1250 *kgm* en in het DIANA model 1130 *kgm* en na 1000 dagen is het moment in de meting 3400 *kgm* en in het DIANA model 3424 *kgm*.³



Afbeelding 10 Moment ligger met Kist-effect (eigen afbeelding)

Eindbewerking resultaten DIANA

De resultaten van het DIANA model zijn niet direct het eindresultaat, want voor de normaalkracht en de momenten in het dek geldt dat eerst de spanningen ten gevolge van de voorspanning afgetrokken moeten worden. Dit komt doordat de andere rekenmethodieken van het principe uitgaan dat er in de uiteindelijke krachswerking geen krachten en momenten aanwezig zijn afkomstig uit de voorspanning.

³ De waarden van de meting is de gemiddelde waarden van beide grafieken en is afgelezen.

4.2.3 Uitwerking rekenmethodieken

Van de al eerder beschouwde rekenmethodieken (in het rapport '1.0 Literatuurstudie') is beschreven hoe de rekenmethodieken en modellen veranderd zijn om ze toepasbaar te maken op de fictieve casus. Bovendien zijn de wijzigingen voor elke beschouwde parameterset ten opzichte van de basiscasus beschreven. Bij het maken van de verschillende aannames (om wijzigingen ten opzichte van de originele toepassing te verwerken) zijn deze aan de hand van validaties gecontroleerd. De uitwerking van deze rekenmethodieken voor de verschillende parametersets staat beschreven in hoofdstuk '5. Uitwerking rekenmethodieken' in het deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'.

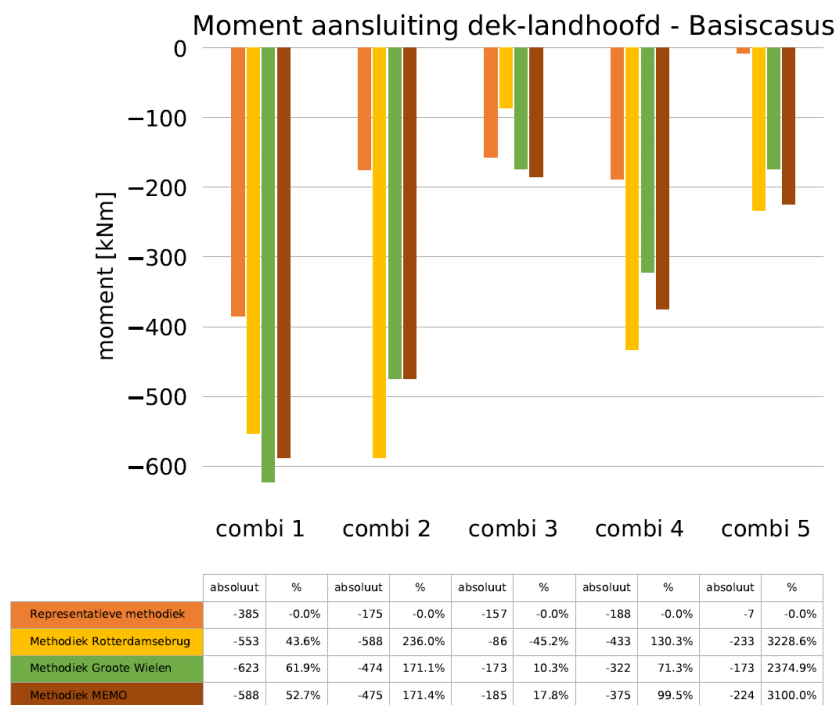
Volledige uitwerking van deze paragraaf:
Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'
Hoofdstuk 5

4.2.4 Resultaten

Van de verschillende meetpunten en combinaties (zie 'Resultaten' in paragraaf '4.1 Onderzoeksaanpak')) zijn per rekenmethodiek en per parameterset de resultaten verzameld. Binnen dit hoofdverslag zal enkel ingegaan worden op de analyse van deze gegevens.

Volledige uitwerking van deze paragraaf:
Deelrapport '2.0 Nauwkeurigheid'
Hoofdstuk 6,7 en 8

In Grafiek 3 zijn de momenten in het dek te zien voor combinatie 1 t/m 5 van de basiscasus. Hier zijn de absolute waarden en procentuele afwijkingen ten opzichte van de representatieve rekenmethodiek te zien.



Grafiek 3 Vergelijking en afwijkingen momenten knoop dek-landhoofd (eigen afbeelding)

Voor elk meetpunt is er per parameterset een grafiek zoals Grafiek 3 opgesteld om de invloed van verschillende effecten te analyseren. Hieruit zijn per meetpunt afwijkingen met bepaalde oorzaken geconstateerd die in de volgende paragrafen genoemd worden. Hierna wordt ook ingegaan op afwijkingen die voor een bepaalde parameterset of rekenmethodiek gelden.

Momenten dek

Voor de momenten in de aansluiting dek-landhoofd komen rekenmethodiek Rotterdamsebrug en Groote Wielen het meest in de buurt van de representatieve rekenmethodiek. Rekenmethodiek Memo heeft een grotere afwijking. De afwijking is in alle gevallen aan de veilige kant. De volgende redenatie is gevonden voor de afwijkingen:

- ❖ Het kist-effect heeft een grote invloed en geeft een afwijking van rond de 200 kNm voor elke rekenmethodiek. Opvallend is dat rekenmethodiek MEMO het kist-effect wel meeneemt. De reden dat rekenmethodiek MEMO alsnog deze afwijking heeft is omdat er meer effecten zoals ook het opspaneffect (extra q -last) meegenomen worden waardoor het totale moment groter wordt. Hierdoor wordt rekenmethodiek MEMO juist onnauwkeuriger.

Voor het maximale veldmoment komen rekenmethodieken MEMO en Groote Wielen het meest in de buurt van de representatieve rekenmethodiek. Rekenmethodiek Rotterdamsebrug heeft een grotere afwijking. De afwijking is in alle gevallen aan de veilige kant. De volgende redenaties zijn gevonden voor de afwijkingen:

- ❖ De rekenmethodieken komen nog redelijk dicht in de buurt van het veldmoment, maar zijn niet bedoeld om deze te bepalen.
- ❖ Zoals beschreven in de vorige alinea, is het Kist-effect van groot belang, hierdoor ontstaat er een algemene afwijking. Binnen rekenmethodiek MEMO is een Kist-factor over het moment gegaan, ditmaal echter foutief. Het kist-effect zou het moment moeten vergroten terwijl dezelfde reductiefactor als over het moment in de aansluiting dek-landhoofd toegepast wordt bij rekenmethodiek MEMO. In werkelijkheid zou rekenmethodiek MEMO een net zo grote afwijking hebben als rekenmethodiek Rotterdamsebrug en komt alleen rekenmethodiek Groote Wielen het meest in de buurt van de representatieve rekenmethodiek.

Voor het maximaal steunpuntmoment komt rekenmethodiek Rotterdamsebrug het meest in de buurt van de representatieve rekenmethodiek, hierna rekenmethodiek MEMO en als laatste rekenmethodiek Groote Wielen. Belangrijk om te vermelden is dat de rekenmethodieken Rotterdamsebrug en MEMO aan de onveilige kant uitkomen en rekenmethodiek Groote Wielen aan de veilige kant. De volgende redenaties zijn gevonden voor de afwijkingen:

- ❖ Het Kist-effect is zoals eerder beschreven van toepassing met ongeveer dezelfde absolute afwijkingen van het moment in de aansluiting dek-landhoofd.
- ❖ Het valt op dat Groote Wielen een zeer grote afwijking heeft. Deze grote afwijking is te verklaren door het toepassen van vaste steunpunten waardoor een veel groter moment ontstaat. Er zouden veren als ondersteuning toegepast moeten worden in rekenmethodiek Groote Wielen om een beter gedrag te verkrijgen.

Momenten fundering

Het gedrag van de fundering in de representatieve rekenmethodiek wijkt af van de resultaten van de rekenmethodieken. In de representatieve rekenmethodiek is de inkrimping groter dan de uitzetting wat leidt tot een naar binnen buigende damwand, waarbij de andere rekenmethodieken uitgaan van een vast punt of een verplaatsing door temperatuur. Dit uitgangspunt is foutief, omdat er werkelijk wel grote momenten in de fundering komen door de verplaatsingen. Het meest maatgevend lijkt de fase waar er inkrimping door zowel temperatuur en krimp meegenomen wordt in bijvoorbeeld D-Sheet. Een ander

belangrijk aspect is de fasering die nu binnen rekenmethodiek Groote Wielen geheel niet meegenomen wordt.

Normaalkrachten

Voor de totale normaalkrachten onder de landhoofden en de sloof van het middensteunpunt komen alle drie de rekenmethodieken goed in de buurt (ook wel de draagkracht), echter zijn de afwijkingen wel aan de onveilige kant, er is meer draagkracht benodigd in werkelijkheid. Er zijn twee redeneringen gevonden voor afwijkingen die elkaar (toevallig) opheffen:

- ❖ De kracht uit het eigen gewicht is groter in de representatieve rekenmethodiek. In de rekenmethodieken worden bijvoorbeeld de sloof in het midden en het volume van de landhoofden niet even goed meegenomen. Deze afwijking is onveilig, de rekenmethodieken komen lichter uit dan de representatieve rekenmethodiek. De afwijking hieruit volgend is een afwijking van -18% bij rekenmethodiek MEMO, een afwijking van -22% bij rekenmethodiek Rotterdamsebrug en een afwijking van -27% bij rekenmethodiek Groote Wielen.
- ❖ De grond onder het landhoofd neemt ook een deel van de kracht op wanneer er een grotere last op de constructie staat. Wanneer dit gebeurt wil de constructie meer zakken en gaat de grond onder het landhoofd meer kracht opnemen. Dit is niet meegenomen binnen de rekenmethodieken.

Voor de normaalkracht in het dek komt rekenmethodiek Rotterdamsebrug het meest in de buurt van de representatieve rekenmethodiek, maar er moet opgemerkt worden dat deze afwijking al zeer fors is. De afwijking van rekenmethodiek MEMO is tweemaal zo groot en van rekenmethodiek Groote Wielen zijn geen gegevens beschikbaar omdat deze niet uitgaat van horizontale krachten in het model van het dek. De volgende redeneringen zijn gevonden voor de afwijkingen:

- ❖ De grote afwijkingen van rekenmethodiek MEMO zijn te verklaren door het “3D-effect” bij opgelegde vervormingen (krimp en temperatuurbelasting). Door het modelleren in 3D ontstaan heel andere normaalkrachten, de vervorming van het dek wordt in de breedte (door de modellering van de belastingen) tegengehouden door de landhoofden en het tussensteunpunt. De normaalkrachten verlopen over de breedte van het dek.
- ❖ De afwijking van methodiek Rotterdamsebrug wordt verklaard door het niet meenemen van het opspaneffect.

Resultaten over de parametersets

Bij het doorrekenen van de verschillende parametersets zijn resultaten gevonden die bij elke rekenmethodiek van toepassing zijn. Deze worden hieronder genoemd:

- ❖ Wanneer het dek langer wordt, worden de afwijkingen van de momenten in het dek kleiner omdat het Kist-effect (over de permanente belastingen) in relatie tot de overige belastingen een kleinere invloed heeft.
- ❖ De invloed van het slapper maken van de grond op de normaalkrachten en momenten is in de representatieve rekenmethodiek altijd groter dan in de rekenmethodieken terugkomt. De verwachting is dat dit effect komt doordat de fasering meegenomen wordt binnen de representatieve rekenmethodiek en dit niet gebeurt binnen de andere rekenmethodieken.

Resultaten over de rekenmethodieken

Als laatste zijn nog een aantal algemene resultaten gevonden wat betreft de rekenmethodieken zelf. Deze worden hieronder genoemd:

- ❖ De representatieve rekenmethodiek maakt gebruik van een vlakkenmodel in plaats van een lijnmodel zoals de andere rekenmethodieken. Bij een vlakkenmodel ligt het moment iets voor het einde (wat een iets kortere overspanning geeft), en bij een lijnmodel ligt het moment aan het einde van de staaf wat een maximale overspanning geeft.
- ❖ Bij het uitwerken van de rekenmethodieken blijkt dat het lineair bepalen van de veren ongeveer dezelfde veren oplevert als het iteratief bepalen van de veren met behulp van D-Sheet, dus dat de snelste optie zonder iteraties voldoet.
- ❖ Er zijn verschillende manieren om de grond te representeren in een constructief model. Er zijn verschillende resultaten gevonden over het toepassen van een q-last (rekenmethodiek MEMO) of niet-lineaire veren (rekenmethodiek Rotterdamsebrug) over het grondkerende deel van de fundering:
 - Wanneer gekeken wordt naar de momenten in het dek, dan lijkt het toepassen van een q-last een beter gedrag te geven in plaats van niet-lineaire veren omdat de veren geactiveerd moeten worden bij een vervorming. De grond geeft namelijk altijd een druk, ook zonder vervormingen (en daar gaan de veren wel vanuit).
Echter zou een slappere grondlaag kunnen leiden tot een groter moment in de knoop omdat er een grotere q-last toegepast wordt (andere grondsoort/ k_0 factor). Dit effect is onrealistisch waardoor de niet-lineaire veren in dit geval een beter gedrag lijken te geven.
Er kan niet geconcludeerd worden welke modellering meer in de buurt van de representatieve rekenmethodiek komt, dit vereist meer onderzoek.
 - Voor de normaalkracht in het dek maakt het niet uit of er niet-lineaire veren of een q-last toegepast is.

4.2.5 Beantwoorden deelvraag 2

Deelvraag 2 luidt: “Hoe nauwkeurig zijn de verschillende rekenmethodieken?”. Door het beschouwen van de hierboven gespecificeerde paragrafen kan ook deze deelvraag beantwoord worden. Er is met behulp van een fictieve casus en de representatieve rekenmethodieken een bepaalde nauwkeurigheid bepaald. Waar nauwkeurigheid gedefinieerd is als een bepaalde procentuele afwijking van de werkelijk optredende situatie, waar deze werkelijk optredende situatie wordt benaderd met de representatieve rekenmethodiek. Er is gekeken naar verschillende meetpunten (verschillende normaalkrachten en momenten) en variaties van de fictieve casus (parametersets) om tot de nauwkeurigheid te komen.

Absolute procentuele afwijkingen

De volgende drie tabellen laten de verschillende nauwkeurigheden zien van de rekenmethodieken per kracht of moment, per parameterset en per rekenmethodiek. Bij de drie tabellen moet erop gelet worden dat de fundering buiten beschouwing gelaten is. De reden hiervoor is dat er in het algemeen grote afwijkingen bij de fundering aanwezig, deze zijn afkomstig door foutieve waarden in de resultaten.

In Tabel 4 is de absolute procentuele afwijking per rekenmethode per kracht of moment te zien. Hierbij valt op dat over het algemeen de rekenmethodiek Rotterdamsebrug het dichtst in de buurt komt van de representatieve rekenmethodiek. De tabel laat tevens zien dat het moment in de knoop sterk van de representatieve waarde afligt en dit geldt tevens voor de maximale normaalkracht in het dek. Het eerste komt door het niet correct meenemen van het Kist-effect in de rekenmethodieken, het tweede doordat bij rekenmethodiek Rotterdamsebrug geen neutrale gronddruk plaatsvindt en dat bij MEMO het effect van modelleren in 3D meespeelt.

Rekenmethodiek	Moment aansluiting dek-landhoofd	Maximaal veldmoment	Maximaal moment tussensteunpunt	Maximale normaalkracht dek	Normaalkracht fundering net onder het landhoofd	Normaalkracht buispalen net onder het tussensteunpunt
Representatieve methodiek	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Methodiek Rotterdamsebrug	62.1%	23.5%	6.2%	53.0%	5.1%	4.8%
Methodiek Groote Wielen	61.4%	2.8%	39.2%	-	12.5%	4.4%
Methodiek MEMO	81.1%	5.9%	23.2%	91.1%	8.6%	14.0%

Tabel 4 Absolute procentuele afwijking per rekenmethodiek per kracht of moment (gekeken naar combinatie 1)

In Tabel 5 zijn de absolute procentuele afwijkingen te zien van de rekenmethodieken per parameterset. Hierbij valt op dat de basis casus en parameterset 2 relatief overeen komen, dat parameterset 1 over het algemeen onnauwkeuriger is en dan parameterset 3 nauwkeuriger is dan de basis casus.

In paragraaf '3.3 Rekenmethodieken' wordt toegelicht dat er bij verschillende rekenmethodieken met hoge en lage stijfheden gerekend wordt. Voor rekenmethodiek IJzerlaan wordt gevarieerd met een stijve en slappe combiwand en bij rekenmethodieken Rotterdamsebrug, MEMO en Valkbrug wordt gevarieerd met een stijve en slappe grondlaag. Op basis van Tabel 5 kan geconcludeerd worden dat variëren met een stijve en slappe combiwand niet veel nut heeft, aangezien de resultaten dicht bij elkaar liggen. Echter heeft het variëren van de grondlaag wel nut want dit zorgt voor een verdubbeling van de procentuele afwijking.

Rekenmethodiek	Basis casus	Parameterset 1; Klei	Parameterset 2; Damwand	Parameterset 3; Dekverlenging
Representatieve methodiek	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Methodiek Rotterdamsebrug	21.0%	48.2%	20.4%	13.5%
Methodiek Groote Wielen	24.3%	33.4%	23.1%	19.2%
Methodiek MEMO	18.2%	94.8%	26.8%	11.5%

Tabel 5 Absolute procentuele afwijking per rekenmethodiek per parameterset (gekeken naar combinatie 1)

In Tabel 6 zijn de procentuele afwijkingen van de rekenmethodieken te zien. Hierbij is te zien dat over het algemeen de rekenmethodiek Rotterdamsebrug het meest in de buurt komt van de representatieve rekenmethodiek. Echter moet wel vermeld worden dat de standaard deviatie erg groot is. Dit geldt vooral voor rekenmethodiek MEMO (de hoge standaard deviatie voor memo is voornamelijk afkomstig van grote afwijkingen in het moment aansluiting dek-landhoofd en de normaalkracht in het dek en de grote afwijkingen bij parameterset 1; Klei (zie ook Tabel 5)). Dit betekent dat er binnen de parameterset, waaruit de procentuele afwijking bestaat, grote afwijkingen zijn, waardoor de procenten niet als harde feiten beschouwd kunnen worden. De waarden zijn dus enkel indicatief voor de algemene nauwkeurigheid van de betreffende rekenmethodiek.

Methodiek	Absoluut procentuele afwijking	Standaard deviatie
Methodiek Rotterdamsebrug	25,8%	32,7%
Methodiek Groote Wielen	25,0%	27,1%
Methodiek MEMO	37,8%	69,3%

Tabel 6 Absolute procentuele afwijking per rekenmethodiek (gekeken naar combinatie 1)

4.3 TOEPASBAARHEID

In deze paragraaf wordt het derde deelonderzoek toegelicht. Het hoofddoel van dit deelonderzoek is om de toepasbaarheid van de rekenmethodieken te bepalen. Het volledige onderzoek is te lezen in het deelrapport '3.0 Toepasbaarheid', in dit hoofdverslag zullen enkel de belangrijkste punten uit dit deelrapport getoond worden. Met behulp van dit deelonderzoek wordt de derde deelvraag beantwoord, deze luidt:

Volledige uitwerking van dit hoofdstuk:

Deelrapport 3.0

Deelvraag 3: *Hoe toepasbaar zijn de verschillende rekenmethodieken voor Witteveen+Bos?*

Toelichting: *Een inventarisatie maken van de "toepasbaarheid" van verschillende rekenmethodieken. Hierbij wordt met "toepasbaarheid" bedoeld: een verzameling onderliggende criteria welke van toepassing zijn voor Witteveen+Bos*

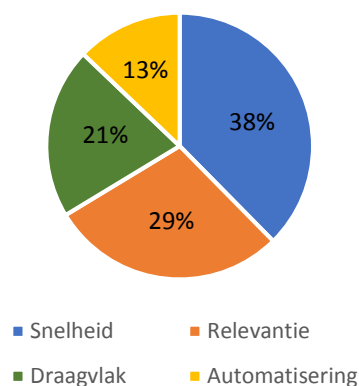
De toepasbaarheid is gedefinieerd als het gewogen gemiddelde van een verzameling van criteria die samen de toepasbaarheid van een rekenmethode beschrijven. Toepasbaarheid wordt gemeten op een schaal van 10 punten, waar een 10 perfect toepasbaar is en een 1 absoluut niet toepasbaar. Hiervoor worden eerst criteria opgesteld samen met wegingsfactoren. Hierna wordt om de toepasbaarheid van de rekenmethodieken te bepalen een multicriteria-analyse uitgevoerd.

4.3.1 Multicriteria-analyse

Met behulp van een multicriteria-analyse wordt de toepasbaarheid van de rekenmethodieken bepaald. Hiervoor worden vier criteria opgesteld die van toepassing zijn op de toepasbaarheid voor Witteveen+Bos, dit zijn:

- ❖ Snelheid;
Hoe snel en gemakkelijk een project uit te werken is.
- ❖ Relevantie (project technisch);
Op hoeveel verschillende projecten een methode van toepassing is.
- ❖ Draagvlak binnen Witteveen+Bos;
Hoeveel ervaring en kennis er al is binnen W+B van de benodigde ervaring en kennis om een rekenmethode uit te kunnen werken.
- ❖ Automatiseringsmogelijkheden;
De mogelijkheden tot het automatiseren van een rekenmethode.

Invloed criteria



In het deelrapport '3.0 Toepasbaarheid' in paragraaf '3.1 Vier criteria' staat een verdere toelichting van deze criteria. In het deelrapport '3.0 Toepasbaarheid' in paragraaf '3.2 Wegingsfactoren' staat een beargumentering van de waarden.

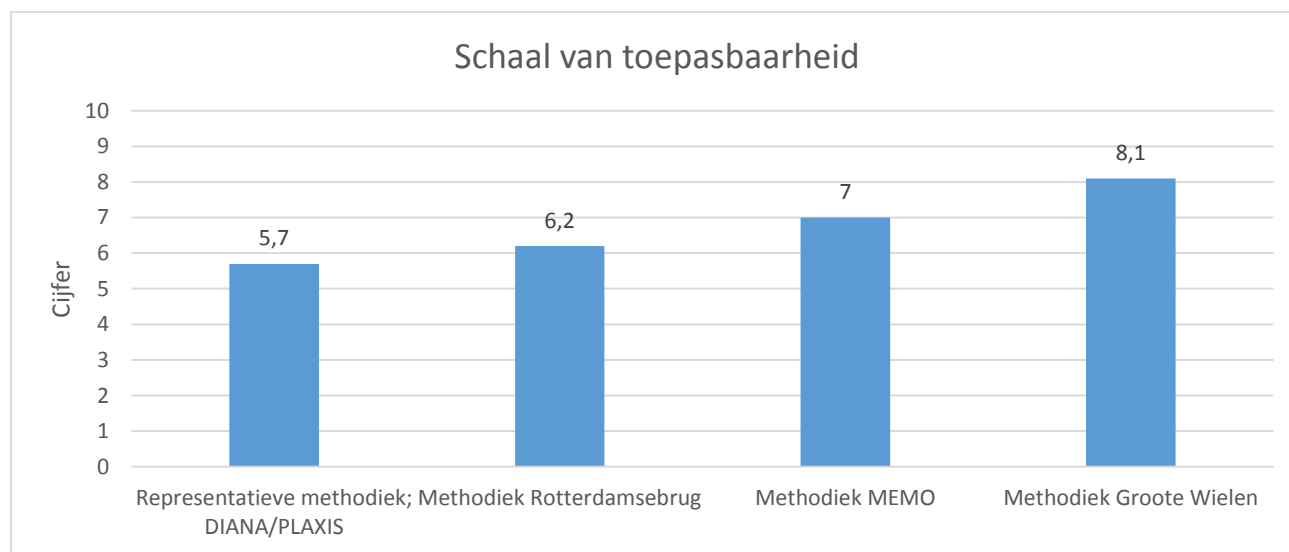
Met de vier criteria en wegingsfactoren is een multicriteria-analyse uitgevoerd, deze is te zien in Tabel 7. In het deelrapport '3.0 Toepasbaarheid' in hoofdstuk '4. Multicriteria-analyse' staat een toelichting van elke waarde en een beargumentering van de toegekende waarden.

Criteria	Wegingsfactor	Waarde				Score			
		Representatieve methodiek; DIANA/PLAXIS	Methodiek Rotterdamsebrug	Methodiek Groote Wielen	Methodiek MEMO	Representatieve methodiek; DIANA/PLAXIS	Methodiek Rotterdamsebrug	Methodiek Groote Wielen	Methodiek MEMO
Snelheid	38	1	3	5	4	38	114	190	152
Relevantie (project technisch)	29	5	3	2	3	145	87	58	87
Draagvlak binnen W+B	21	3	4	5	4	63	84	105	84
Automatiseringsmogelijkheden	13	3	2	4	2	39	26	52	26
Totaalscore						285	311	405	349
Totaalscore op een tienpuntschaal						5,7	6,2	8,1	7,0

Tabel 7 Multicriteria-analyse

4.3.2 Beantwoorden deelvraag 3

Deelvraag 3 luidt: “Hoe toepasbaar zijn de verschillende rekenmethodieken voor Witteveen+Bos?”. Door het beschouwen van de hierboven gespecificeerde paragrafen is deze deelvraag beantwoord. Er is nu bekend (zie de multicriteria-analyse in Tabel 7) hoe toepasbaar de verschillende rekenmethodieken zijn op een tienpuntschaal, zie ook Afbeelding 11.



Afbeelding 11 Schaal van toepasbaarheid (eigen afbeelding)

4.4 COMBINATIE DEELONDERZOEKEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van paragraaf '4.2 Nauwkeurigheid' en '4.3 Toepasbaarheid' met elkaar gecombineerd en vergeleken. Uit het beantwoorden van deelvraag 2 komen drie tabellen die de verschillende absolute afwijkingen aangeven. Hierbij is in dit hoofdstuk gekozen om alleen naar de tabel te kijken waarin de absolute afwijkingen per rekenmethodiek per parameterset wordt gegeven. De reden hiertoe is dat de andere twee tabellen niet toepasbaar zijn om de hoofdvraag van het onderzoek te kunnen beantwoorden. Want in de tabel met alleen de nauwkeurigheden per rekenmethodiek is de standaarddeviatie te groot om er iets universeels over te kunnen zeggen en de resultaten per kracht of moment zijn niet praktisch, aangezien het een lage toepasbaarheid oplevert om verschillende rekenmethodieken toe te passen om verschillende krachten of momenten te berekenen.

4.3.1 Vergelijking

De resultaten van Tabel 5 van nauwkeurigheid en Afbeelding 11 van toepasbaarheid zijn samengevoegd in Tabel 8. Met de tabel kan worden gezien welke rekenmethodieken direct afvallen. Dit is namelijk het geval wanneer een rekenmethodiek een lagere nauwkeurigheid heeft en minder toepasbaar is dan een andere rekenmethodiek, want dat betekent dat die andere rekenmethodiek in ieder opzicht beter is. Per parameterset vallen de volgende rekenmethodieken af:

- **Basiscasus:** rekenmethodiek Rotterdamsebrug valt af.
- **Parameterset 1; Klei:** rekenmethodieken Rotterdamse brug en MEMO vallen af.
- **Parameterset 2; Damwand:** rekenmethodiek MEMO valt af.
- **Parameterset 3; Dekverlenging:** rekenmethodiek Rotterdamsebrug valt af.

Rekenmethodiek	Basis casus	Parameterset 1; Klei	Parameterset 2; Damwand	Parameterset 3; Dekverlenging	Toepasbaarheid
Representatieve methodiek: DIANA/PLAXIS	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5,2
Methodiek Rotterdamsebrug	21.0%	48.2%	20.4%	13.5%	6,2
Methodiek Groote Wielen	24.3%	33.4%	23.1%	19.2%	8,1
Methodiek MEMO	18.2%	94.8%	26.8%	11.5%	7,0

Tabel 8 Resultaten nauwkeurigheid en toepasbaarheid per rekenmethodiek

Tevens valt rekenmethodiek Rotterdamsebrug af voor parameterset 2. Dit komt omdat voor een klein beetje meer onnauwkeurigheid een veel grotere toepasbaarheid verkregen wordt door het toepassen van rekenmethodiek Groote Wielen.

Door uit Tabel 8 de rekenmethodieken te verwijderen die afvallen en de rekenmethodieken te ordenen van meest nauwkeurig naar meest toepasbaar wordt Tabel 9 verkregen.

Basis casus	Parameterset 1; Klei	Parameterset 2; Damwand	Parameterset 3; Dekverlenging
Meest nauwkeurig			
Representatieve methodiek: DIANA/PLAXIS	Representatieve methodiek: DIANA/PLAXIS	Representatieve methodiek: DIANA/PLAXIS	Representatieve methodiek: DIANA/PLAXIS
Methodiek MEMO			Methodiek MEMO
Methodiek Groote Wielen	Methodiek Groote Wielen	Methodiek Groote Wielen	Methodiek Groote Wielen
Meest toepasbaar			

Tabel 9 Volgorde rekenmethodieken op nauwkeurigheid-toepasbaarheid

5.

CONCLUSIES, DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden de conclusies van het onderzoek gegeven en wordt de hoofdvraag beantwoord. Dit gebeurt met de combinatie van de conclusies van de deelvragen, deze staat beschreven in paragraaf '4.4 Combinatie deelonderzoeken'. Naast de conclusie die volgt uit de hoofdvraag zijn er bevindingen gedaan die niet gelijk betrekking hebben op de hoofdvraag, deze worden ook beschreven. Met de conclusies wordt een discussie gehouden die ingaat op de interpretaties van de resultaten en de beperkingen van het onderzoek. Als laatste worden aanbevelingen gegeven voor eventuele vervolgonderzoeken die meer inzicht geven in open vragen die tijdens dit onderzoek naar voren zijn gekomen.

5.1 CONCLUSIE

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksvraag beantwoord. De onderzoeksvraag is:

*Hoe kan de **krachtswerking** van **integraalbruggen**, gefocust op de landhoofdconstructies, ten opzichte van de huidige methodieken **efficiënter** door Witteveen+Bos bepaald worden?*

*Waar met de term “**efficiënter**” bedoeld wordt: Een zo hoog mogelijke **nauwkeurigheid** met een zo goed mogelijke **toepasbaarheid**, welke acceptabel is voor Witteveen+Bos.*

Het antwoord van de hoofdvraag is als volgt:

Door te kijken naar de resultaten van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat de krachtswerking van integraalbruggen ten opzichte van de huidige rekenmethodieken efficiënter bepaald kan worden door het volgende advies te volgen, waarop één uitzondering (die nagenoeg niet voorkomt) gegeven wordt:

Basis: Er wordt geadviseerd om standaard rekenmethodiek Groote Wielen te kiezen voor het berekenen van een integraalbrug.

Uitzondering: Wanneer zeer complexe constructies (hieronder worden lastige geometrieën, lange bruglengtes en kleine kruisingshoeken bedoeld) moeten worden berekend en een hoge nauwkeurigheid benodigd is dan wordt geadviseerd om voor een combinatie van DIANA en PLAXIS te kiezen.

Toelichting

Er wordt, om het draagvlak binnen Witteveen+Bos te vergroten, één rekenmethodiek geadviseerd voor het doorrekenen van integraalbruggen. Uit het onderzoek komt dat rekenmethodiek Groote Wielen voor iedere parameterset geschikt is; de verschillen in nauwkeurigheid ten opzichte van de andere rekenmethodieken zijn klein. Hiernaast heeft rekenmethodiek Groote Wielen een hoge toepasbaarheid; hij is gemakkelijk toe te passen door Witteveen+Bos. Een Aanbeveling uit dit onderzoek is dat rekenmethodiek Groote Wielen verbeterd kan worden, wat hem nog nauwkeuriger en zo nog efficiënter maakt. Dit is niet het geval voor rekenmethodieken MEMO en Rotterdamsebrug. Rekenmethodiek MEMO is minder efficiënt (een combinatie van lagere nauwkeurigheid en lagere toepasbaarheid) dan rekenmethodiek Groote Wielen voor integraalbruggen met slappe grondlagen of een fundering met een lage buigstijfheid. Rekenmethodiek Rotterdamsebrug valt binnen de onderzochte parametersets af vanwege de slechte efficiëntie van deze rekenmethodiek.

In uitzonderlijke gevallen kan van het basisadvies afgeweken worden, dit is het geval wanneer buitengewoon complexe constructies zoals lastige geometrieën, lange bruglengtes en kleine kruisingshoeken gebruikt worden. Omdat in deze gevallen een zeer hoge nauwkeurigheid vereist wordt, heeft een combinatie van DIANA en PLAXIS de voorkeur. De toepasbaarheid van deze combinatie is lager dan rekenmethodiek Groote Wielen door het langdurige uitwerken vanwege de complexiteit van de programma's en de modellen, echter is elke mogelijke integraalbrug wel te modelleren in DIANA en PLAXIS. In de praktijk zal deze situatie zich zelden voordoen, het basisadvies blijft het belangrijkste uitgangspunt.

Door het geven van dit advies is de doelstelling van het afstudeeronderzoek behaald.

5.2 BEVINDINGEN

Uit de drie deelrapporten en het hoofdverslag zijn ook een aantal bevindingen naar voren gekomen die niet direct relevant zijn voor het beantwoorden van de hoofdvraag. Toch zijn dit interessante bevindingen en doen ze er echt toe, daarom worden deze bevindingen vermeld in deze paragraaf.

Integraalbrug algemeen

- ❖ De grondgesteldheid achter het landhoofd is volgens de literatuurstudie zeer van belang voor de krachtswerking van integraalbruggen. Dit wordt bevestigd door de resultaten van het nauwkeurigheidsonderzoek. Het moment in de aansluiting dek-landhoofd neemt bij het slapper maken van de grond gemiddeld met 55% af.
- ❖ Een stijve grondlaag draagt bij aan de draagkracht van de landhoofden, een deel van de belasting wordt gelijk door de grond opgenomen omdat het landhoofd zich gaat gedragen als een fundering op staal. Dit geeft afwijkingen in de draagkracht van gemiddeld 22%.
- ❖ In het onderzoek is gebleken dat de formules die gebruikt worden voor het bepalen van het opspaneffect een ander toepassingsgebied hebben. De binnen dit onderzoek bepaalde waarden voor het opspaneffect zijn 30% groter dan de waarden bepaald met de formules en de invloed is tot een grotere diepte te merken.
- ❖ In de literatuurstudie komt naar voren dat het verlagen van de buigstijfheid van de fundering onder het landhoofd zeer van belang is voor de krachtswerking. Dit verkleint het moment in de aansluiting dek-landhoofd wat als positief gezien wordt. Echter komt dit niet naar voren in het nauwkeurigheidsonderzoek. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat binnen het nauwkeurigheidsonderzoek gekeken is naar combiwanden en damwanden terwijl er binnen het literatuuronderzoek gekeken is naar een vergelijking met zeer slappe H-profielen.
- ❖ Er blijkt binnen het nauwkeurigheidsonderzoek dat het Kist-effect een zeer grote invloed heeft op de krachtswerking en nu geheel niet of te weinig meegenomen wordt binnen de rekenmethodieken. Door het Kist-effect ontstaat een vermindering van gemiddeld 200 kNm (een afname van gemiddeld 34%) in de aansluitingen van het dek op de landhoofden en het tussensteunpunt ten opzichte van de geïnventariseerde rekenmethodieken. In de literatuur wordt de invloed van het Kist-effect ook erkend en het lijkt zeer voordelig en realistisch om dit mee te nemen binnen de rekenmethodieken.

Rekenmethodieken

- ❖ Het blijkt niet nodig te zijn om grondveren te bepalen met een iteratief proces zoals gedaan wordt bij methodiek Rotterdamsebrug; het direct bepalen van de veerstijfheid is voldoende gezien hier dezelfde resultaten uitkomen.
- ❖ De momenten in de fundering worden niet correct beschouwd binnen de rekenmethodieken, er is veelal geen rekening gehouden met de fasering en vervormingen zoals krimp en kruip.
- ❖ Binnen de geïnventariseerde rekenmethodieken worden verschillende variaties met de factor $\sqrt{2}$ (zowel delen als vermenigvuldigen) toegepast. Uit het nauwkeurigheidsonderzoek is gebleken dat variëren met een stijve en slappe grondlaag zeer nuttig is en het variëren met een fundering met een hoge en lage buigstijfheid niet nuttig is.

Nauwkeurigheid

- ❖ Er blijkt dat een andere grondgesteldheid in werkelijkheid een grotere invloed heeft dan naar voren komt in de rekenmethodieken. De afwijkingen van de momenten zijn gemiddeld tweemaal

zo groot wanneer er een slappe grondlaag (gemiddelde klei) toegepast wordt in vergelijking tot een zeer stijve grondlaag (stijf zand). Het moment in de aansluiting dek-landhoofd neemt (bij het slapper maken van de grond) bij de representatieve rekenmethodiek gemiddeld met 55% af en neemt bij de overige rekenmethodieken gemiddeld met 13% af; deze grote verschillen zijn ook zichtbaar bij de andere meetpunten.

- ❖ De nauwkeurigheid van de beschouwde rekenmethodieken wordt groter (een verbetering van 6%) wanneer gekeken wordt naar een langer dek.

5.3 DISCUSSIE

In de discussie wordt ingegaan op de beantwoording van de hoofdvraag en de extra conclusies. Er worden interpretaties en beperkingen van de conclusies gegeven.

BGT en UGT

De lezer moet er rekening mee houden dat deze studie gebaseerd is op de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT), dit houdt in dat er enkel naar de daadwerkelijke optredende situatie gekeken is. Er is niet gekeken naar de uiterste grens toestand (UGT), waarmee de integraalbruggen voornamelijk getoetst worden. Dit heeft als gevolg dat de krachten en momenten die bepaald zijn in paragraaf '4.1 Nauwkeurigheid' niet per se de maximale krachten en momenten zijn die optreden in de toetsing van een integraalbrug. Ook moet worden opgemerkt dat de vervormingen door krimp en kruip standaard niet worden meegenomen in de UGT, omdat ervanuit gegaan wordt dat dit opgenomen wordt door het scheuren van het beton.

Voor de UGT situatie betekent het onderzoek dat net als in de BGT situatie de maximale krachten en momenten nauwkeuriger bepaald kunnen worden. Dit leidt uiteindelijk tot een slanker en duurzamer ontwerp van de integraalbrug omdat de momenten met minder afwijkingen bepaald kunnen worden.

Ontwerptechnisch

De grond achter het landhoofd is van zeer groot belang voor de krachtswerking van de integraalbrug. Het is goed om hier rekening mee te houden tijdens het ontwerp en vervang eventueel de grond die zich achter het landhoofd bevindt voor een slappere grondsoort om tot kleinere momenten in de aansluiting dek-landhoofd te komen.

Uit het onderzoek blijkt dat de grond onder het landhoofd ook wordt gebruikt om de verticale kracht van de brug af te dragen. Echter moet dit niet worden gebruikt voor de toetsing van de draagkracht, aangezien er altijd een situatie⁴ optreedt waarbij de volledige verticale kracht wordt afgedragen door de fundering.

Uit de resultaten van het nauwkeurighedsverslag blijkt dat de waarden van het opspaneffect uit het PLAXIS model 30% groter zijn dan de waarden die bepaald worden met de standaardformules binnen Witteveen+Bos. Dit zou betekenen dat de standaardformules onveilig rekenen. De verwachting is dat dit inderdaad zo is, aangezien de formules voor een ander toepassingsgebied zijn bepaald.

Uit de literatuurstudie blijkt dat een fundering met een lagere buigstijfheid tot minder grote momenten in de aansluiting dek-landhoofd leidt, echter blijkt uit het nauwkeurigheid verslag dat dit niet terugkomt in de resultaten. Het vermoeden is dat dit wel het geval is wanneer er voor een nog lagere buigstijfheid wordt gekozen, bijvoorbeeld een H-paal in de slappe richting. Want in de literatuurstudie wordt er gesproken over H-palen bij een fundering met een lage buigstijfheid, terwijl in het nauwkeurigheid verslag de fundering met de laagste buigstijfheid een damwand is.

⁴ De situatie waarin dit optreedt is de situatie waarbij de grond nog niet is opgehoogd achter het landhoofd en er dus geen grond aanwezig is net onder het landhoofd of vanwege uitvoeringsonzekerheden.

Kist-effect

Uit de verschillende resultaten van het onderzoek blijkt dat het Kist-effect een grote invloed heeft op de uiteindelijke momenten in dek. Hierbij valt ook op dat de drie beschouwde rekenmethodieken sterk afwijken (veilig) van de momenten van de representatieve rekenmethodiek. Er kan geconcludeerd worden dat het belangrijk is om de kruip factoren van het Kist-effect mee te nemen en deze factoren zorgvuldig te bepalen. Ook moet er rekening mee worden gehouden dat een grote voorspanning in de prefab liggers ervoor kan zorgen dat het samengestelde dek omhoog kan gaan kruipen. Dit effect wordt niet meegenomen door de drie rekenmethodieken.

Het "3D-effect"

Wanneer gekeken wordt naar de normaalkrachten bij opgelegde vervormingen dan zijn er grote verschillen te zien in de resultaten van rekenmethodiek MEMO ten opzichte van de andere rekenmethodieken. De reden hiervoor is dat bij MEMO de constructie met platen in een 3D model wordt gemodelleerd. Dit is zichtbaar wanneer gekeken wordt naar de normaalkrachten in het dek tijdens het krimpen ten gevolge van het beton. Het gevolg hiervan is dat de normaalkracht in de langsrichting over de dwarsdoorsnede van het dek en de fundering varieert. Waarbij dit voor de andere rekenmethodieken niet opgaat.

5.4 AANBEVELINGEN

Naar aanleiding van dit onderzoek worden er enkele aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoeken.

Optimalisatie rekenmethodiek Groote Wielen

In dit onderzoek is bepaald dat rekenmethodiek Groote Wielen het meest efficiënt is om toe te passen voor het berekenen van een integraalbrug. Er zijn alsnog verschillende (kleine) afwijkingen gevonden tussen deze rekenmethodiek en de representatieve rekenmethodiek. Een goed voorbeeld hiervan is de afwijking van de momenten bij de huidige beschouwing van de fundering. Er kan verdiepend onderzoek gedaan worden hoe de rekenmethodiek verder geoptimaliseerd kan worden om dichterbij de werkelijke situatie te komen zonder toepasbaarheid te verliezen.

Grotere dataverzameling

Door het verzamelen van meer gegevens, kijkend naar meer parametersets en meetpunten, kunnen nog betere conclusies getrokken worden over de rekenmethodieken en kan gewerkt worden richting standaard ontwerpregels. Hiernaast is het ook goed om meetgegevens van een bestaande integraalbrug te hebben om nog betere beschouwingen te kunnen maken.

3D beschouwing

Binnen dit onderzoek is de nauwkeurigheid bepaald aan de hand van een representatief model dat in 2D uitgewerkt is in verband met de tijd. Er is gebleken bij een van de simpele rekenmethodieken dat het uitwerken in 3D bepaalde afwijkingen geeft, al zal dit waarschijnlijk niet voor andere resultaten leiden voor dit onderzoek. Om nog beter de nauwkeurigheid te bepalen en het effect van het in 2D of 3D uitwerken van rekenmodellen bij integraalbruggen te beschouwen moet het representatieve model ook beschouwd worden in 3D.

Het opspaneffect

In het onderzoek is gebleken dat de formules die gebruikt worden voor het bepalen van het opspaneffect een ander toepassingsgebied hebben. De binnen dit onderzoek bepaalde waarden voor het opspaneffect zijn groter dan degene bepaald met de formules. Het is aan te raden om aanvullend onderzoek te doen naar het opspaneffect bij “flexibele” stalen (dam/combi)wanden om het opspaneffect in de toekomst juist mee te nemen in de berekeningen.

Modellering grond binnen rekenprogrammatuur

In het onderzoek is gebleken dat grond binnen simpele rekenprogramma's beschouwd wordt als een q-last of als (niet-lineaire) veren. Uit dit onderzoek zijn voor beide enige opties voor- en nadelen te noemen, maar er kan niet gezegd worden welke beter de waarheid representeren. Nader onderzoek is nodig om te bepalen welke modellering van grond bij het beschouwen van integraalbruggen het best is.

Fundering

In de literatuurstudie is gevonden dat een fundering met een lage of hoge buigstijfheid veel uitmaakt voor de krachtwerking. Dit blijkt echter niet uit het nauwkeurigheidsonderzoek. Er kan nog aanvullend onderzoek gedaan worden naar funderingen met een nog lagere buigstijfheid dan beschouwd in het nauwkeurigheidsonderzoek, zoals bijvoorbeeld H-profielen die in Amerika toegepast worden.

Vergelijking met conventionele bruggen

In dit onderzoek wordt niet gekeken hoe efficiënt integraalbruggen zijn ten opzichte van conventionele bruggen, om de bekendheid integraalbruggen groter te maken is dit een goed vervolgonderzoek.

NAWOORD

Wij hebben door het uitwerken van dit afstudeeronderzoek veel geleerd. We zijn zeer trots op het eindresultaat, en ook vooral op de uitwerking van DIANA en PLAXIS waar we op onze opleiding nog niet mee in contact waren gekomen. Het gehele afstudeerproces hebben we met veel plezier en gebundelde krachten zeer efficiënt doorlopen.

Integraalbruggen spreken tot onze verbeelding, ze bieden mogelijkheden die nog ontdekt moeten worden. Conventionele bruggen komen we in de gebouwde omgeving regelmatig tegen, maar integraalbruggen niet. Hier kan verandering in komen. Wellicht is ons afstudeeronderzoek al een eerste stap naar een grotere naamsbekendheid van dit brugtype. Misschien raken integraalbruggen ook hier in de toekomst meer ingeburgerd.

Ons advies om rekenmethodiek Groote Wielen als basis rekenmethodiek te gebruiken voor toekomstige integraalbruggen zal bij Witteveen+Bos in goede aarde vallen. Deze methodiek kenmerkt zich door een grote gebruiksvriendelijkheid, waardoor het voor huidige en toekomstige constructeurs niet veel inspanning zal kosten om het onder de knie te krijgen. We zijn ervan overtuigd dat onze literatuurstudie een belangrijke bouwsteen kan zijn voor toekomstige onthullingen op dit gebied. Ons rapport heeft een meerwaarde voor Witteveen+Bos, maar ook voor het gehele vakgebied van civiele techniek in het algemeen. We hebben ons verdiept in de rekentechnische kant van integraalbruggen. Een verdere verkenning van het brugtype in vergelijking tot Nederlandse conventionele bruggen, met hun voor- en nadelen zou een interessant onderwerp kunnen zijn van toekomstige studies.

Mark Aarsen en Rik Hendriks

Amsterdam,

29 Mei 2018

