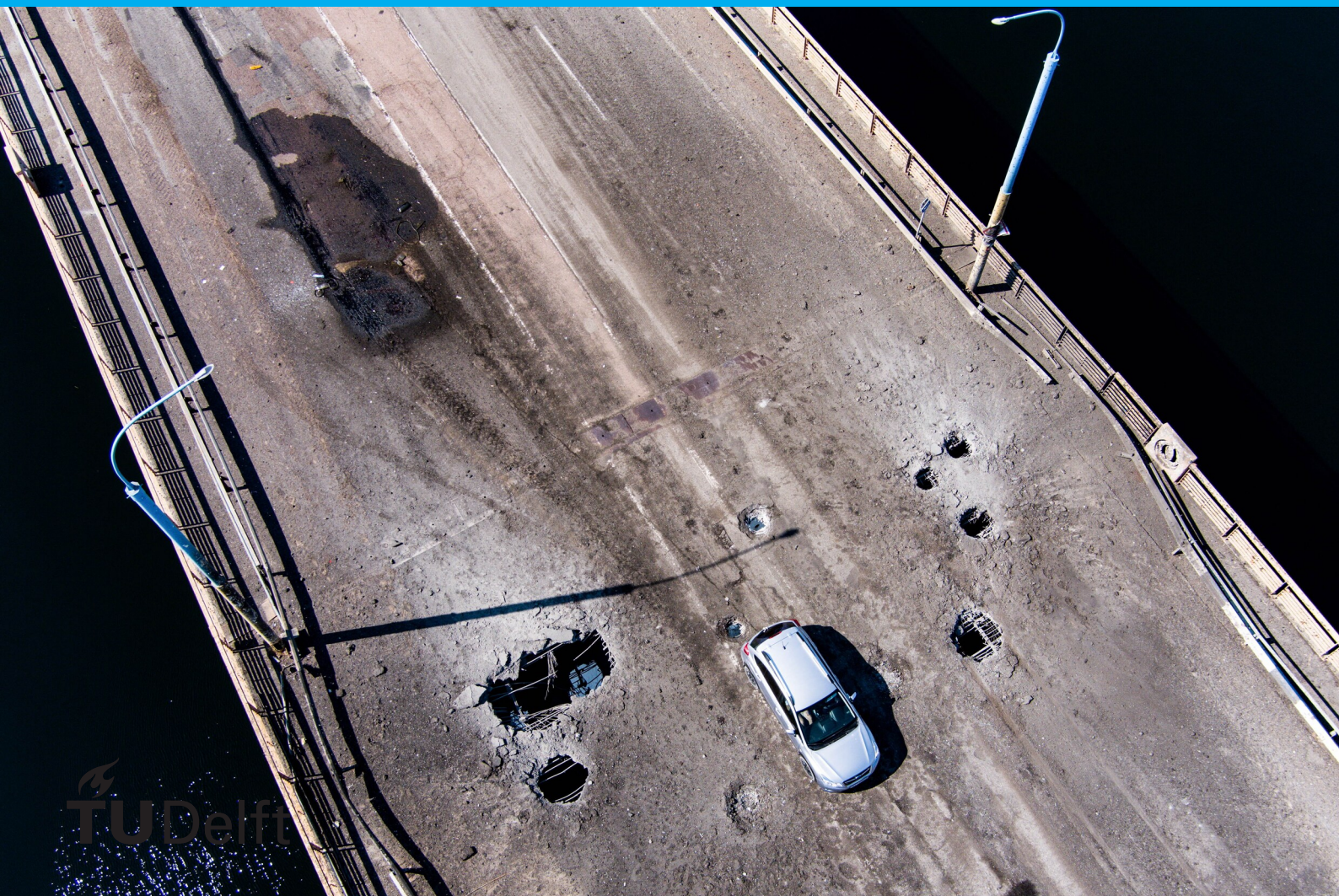


Gaten in betonnen bruggen

Hoe repareren we in tijden van oorlog zo snel mogelijk een betonnen brug?

S. Herweijer

31 Maart 2025



Gaten in betonnen bruggen

Hoe repareren we in tijden van oorlog zo snel
mogelijk een betonnen brug?

door

S. Herweijer

ter verkrijging van de graad van Bachelor of Science
aan de Technische Universiteit Delft

Studentennummer:	5390443	
Project duur:	Februari 10, 2025 – Maart 31, 2025	
BEP Begeleiders:	Dr. ir. P. C. J. Hoogenboom, Ir. S. Pasterkamp,	TU Delft, supervisor TU Delft, supervisor
Afbeelding titelpagina:	[13]	

Voorwoord

Voor u ligt het bacheloreindproject (BEP) 'Gaten in betonnen bruggen: Hoe repareren we in tijden van oorlog zo snel mogelijk een betonnen brug?' Deze BEP is geschreven ter afronding van de bachelor Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Van februari tot april 2025 ben ik bezig geweest met het onderzoeken en schrijven van mijn BEP.

Het onderwerp was niet alleen uitdagend, maar vooral erg interessant, wat een grote rol speelde in het soepele verloop van mijn onderzoek. In het begin was LaTeX even wennen, aangezien dit de eerste keer was dat ik met de software aan de slag ging. Door veel trial en error ben ik hier, naarmate het project vorderde, steeds handiger in geworden. Daarnaast heb ik veel gebruikgemaakt van Python voor het maken van de berekeningen en figuren. Vanwege mijn dyslexie had ik af en toe moeite met het formuleren van goedlopende zinnen. Daarom heb ik AI-tools zoals ChatGPT en Perplexity gebruikt om zinnen te verbeteren en vloeiender te laten lopen. De inhoud van de tekst is echter volledig door mij bedacht en gebaseerd op informatie uit bronnen, de expertise van mijn begeleiders en mijn eigen kennis.

Ik wil mijn begeleider, dr.ir. P.C.J. Hoogenboom, bedanken voor de waardevolle begeleiding tijdens dit proces. Ik vond het fijn dat u meteen aangaf dat de deur altijd openstond en dat ik altijd met vragen langs kon komen. Zonder uw expertise had ik dit project niet zo goed kunnen uitvoeren. Ook wil ik Ir. S. Pasterkamp bedanken voor uw expertise en feedback in de eindfase van het project.

Tot slot wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor de steun die zij mij hebben geboden tijdens het schrijven van mijn BEP.

Ik wens u veel leesplezier toe.

S. Herweijer
Delft, Maart 2025

Samenvatting

In moderne conflicten, zoals de oorlog tussen Rusland en Oekraïne, worden betonnen bruggen vaak doelwit van kruisraketten. Deze bruggen zijn meestal essentieel voor de toevoer van goederen naar het front, wat een snelle en effectieve reparatie essentieel maakt. Dit bacheloreindproject richt zich op het ontwikkelen van een methode om deze bruggen zo snel mogelijk te herstellen. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: Hoe repareren we in tijden van oorlog zo snel mogelijk een betonnen brug?

Om antwoord te geven op de onderzoeksvraag is er een literatuurstudie uitgevoerd om te kijken naar de effecten van kruisraketinslagen op betonnen bruggen en naar de meest voorkomende liggers in Nederlandse bruggen. Vervolgens zijn verschillende reparatiemethodes uitgewerkt en vergeleken op snelheid en effectiviteit. Om de beste methode te valideren zijn draagkrachtberekeningen uitgevoerd. Op basis van deze berekeningen is een grafiek opgesteld waarmee bepaald kan worden of de brug gerepareerd moet worden met de geselecteerde methode of dat een stalen rijplaat voldoet.

Uit het onderzoek blijkt, indien een reparatie nodig is, dat de snelste en meest effectieve methode om een brug te repareren, het gebruik van spanbanden met een houten bekisting is. Door deze methode toe te passen, kan de brug binnen 30 uur na ontdekking van het gat weer veilig worden gebruikt door pantservoertuigen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	ii
1 Inleiding	1
2 Literatuuronderzoek	3
2.1 Wat is de conditie van een betonnen brug na een kruisraket inslag?	3
2.2 Welke liggers worden er in Nederlandse bruggen gebruikt?	4
2.2.1 Omgekeerde T-liggers met een in-situ druklaag	4
2.2.2 Kokerliggers met dwarsvoorspanning zonder druklaag	5
2.2.3 Omgekeerde T-ligger met een volstortdek	5
2.2.4 De ligger voor deze studie	6
3 Welke methodes zijn er om gaten in een betonnen brug te dichten?	7
3.1 Concept 1: Vakwerkconstructie met stalen plaat	7
3.2 Concept 2: Bekisting van hout met bouten	8
3.3 Concept 3: Bekisting van hout met spanbanden	9
3.4 Welk concept wordt gebruikt?	11
4 Ontwikkeling van de gemiddelde betondruksterkte	13
5 Draagkracht onbeschadigd, beschadigd en gerepareerd	15
5.1 Formules die nodig zijn voor het berekenen van de draagkracht	15
5.2 Draagkracht van een onbeschadigde ligger	16
5.3 Draagkracht van een beschadigde ligger	19
5.4 Wanneer moet de brug gerepareerd worden	20
5.4.1 De brug moet niet gerepareerd worden	20
5.4.2 De brug moet wel gerepareerd worden	21
6 Verankeringslengte tussen de beschadigde- en nieuwe wapeningsstaaf	23
7 Discussie	26
8 Conclusie	27
9 Bijlage A - Ontwerpgrafiek HRP-700 ligger	29
10 Bijlage B - Python code grafiek betondruksterkte	31
11 Bijlage C - Python code draagkrachtberekeningen	32

1

Inleiding

Oorlogen worden al zo lang als de mensheid bestaat gevoerd. Gedurende deze conflicten worden vaak strategische acties uitgevoerd om de uitkomst in eigen voordeel te beïnvloeden. Dit gebeurt nu ook in de oorlog tussen Rusland en Oekraïne, waarbij veel bruggen in Oekraïne een target zijn geworden voor Russische kruisraketten. Als deze bruggen niet stabiel genoeg meer zijn, kan dit grote gevolgen hebben voor de toestroom van goederen naar het front. Het is van uiterst belang voor de NAVO en Oekraïne om manieren te vinden om zo snel mogelijk de draagkracht van de brug te herstellen.

Het onderzoek beperkt zich tot een theoretische casus waarbij een kruisraket van 100 kg TNT een gat veroorzaakt van ongeveer 1 m in een gewapend betonnen brug of viaduct. Hierbij is de doelstelling om een effectieve manier te vinden om de beschadigde brug weer begaanbaar te maken voor pantservoertuigen.

De literatuur biedt uitgebreide inzichten in het repareren van bruggen en viaducten onder normale omstandigheden. Echter, in oorlogssituaties spelen andere factoren een cruciale rol, waarbij tijd vaak de kritische factor is. Hierdoor ontstaat er een kloof tussen de conventionele reparatiemethoden en de noodbehoeften tijdens oorlogssituaties. De onderzoeksvraag van deze studie luidt dan ook als volgt:

Hoe repareren we in tijden van oorlog zo snel mogelijk een betonnen brug?

Om de onderzoeksvraag zo goed mogelijk te kunnen beantwoorden, worden de volgende onderwerpen onderzocht:

1. Wat is de conditie van een betonnen brug na een kruisraket inslag?
2. Welke methodes zijn er om gaten in een betonnen brug te dichten?
3. Hoe berekenen je de draagkracht van een gewapend betonnen brug?
4. Hoe lang duurt het voordat pantservoertuigen weer over de brug kunnen rijden?
5. Waar kunnen deze methodes worden toegepast?

In de eerste weken van het onderzoek zijn verschillende literatuurstudies uitgevoerd. Hierbij was het van belang dat verschillende eigenschappen van beton werden onderzocht en welke methode het meest geschikt was om de reparatie mee uit te voeren. Het literatuuronderzoek bestond uit krantenartikelen, sociale media, wetenschappelijke artikelen en de Eurocode. Na de literatuurstudie is de draagkracht van een onbeschadigde, beschadigde en gerepareerde ligger berekend en werd de verankeringslengte bepaald. Voor de kennis van de krachtberekeningen werden verschillende dictaten uit de bachelor Civiele Techniek en de Eurocode geraadpleegd.

Dit bacheloreindproject opent met een literatuurstudie in hoofdstuk 2, waarin een overzicht wordt geboden van kruisraketinslagen op bruggen, waarbij specifiek aandacht wordt besteed aan de diameters van de inslagen. Tevens worden in dit hoofdstuk ook de meest gebruikte liggerconstructies in de Nederlandse bruggenbouw in kaart gebracht. Hoofdstuk 3 behandelt verschillende methodes die gebruikt kunnen worden om gaten in betonnen bruggen te dichten.

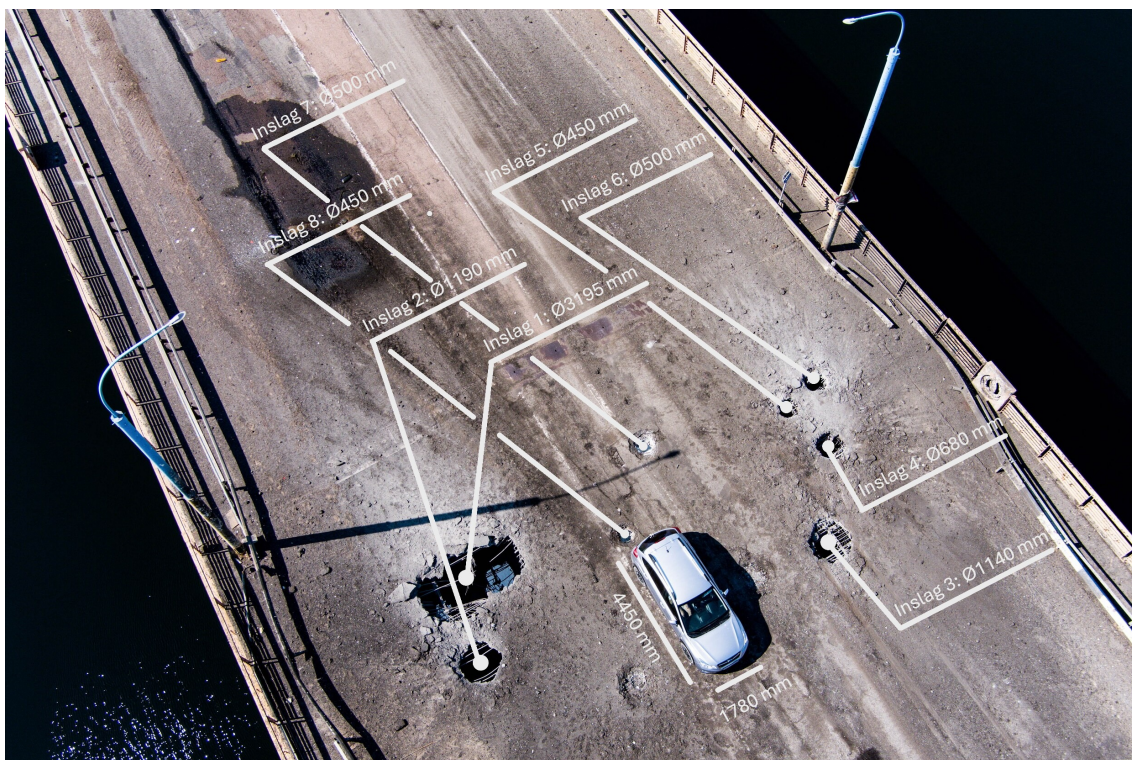
Vervolgens beschrijft hoofdstuk 4 de ontwikkeling van de gemiddelde betondruksterkte. In hoofdstuk 5 wordt de draagkracht berekend van de onbeschadigde, beschadigde en gerepareerde ligger. Tot slot wordt de verankeringslengte tussen de wapeningsstaven in hoofdstuk 6 bepaald. Alle bevindingen worden in hoofdstuk 7 en 8, de discussie en conclusie, gepresenteerd.

2

Literatuuronderzoek

2.1. Wat is de conditie van een betonnen brug na een kruisraket inslag?

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden, wordt eerst de toestand van de brug na de inslagen van de kruisraketten geanalyseerd. Met behulp van berichten op sociale media worden meerdere raketinslagen in kaart gebracht. De brug in figuur: 2.1 is een goed voorbeeld van de conditie van de brug na een raketaanval. De auto in de afbeelding wordt als referentiepunt gebruikt bij het vaststellen van de dimensies van de raketinslagen. Dit voertuig, een Subaru XV, heeft een totale lengte van 4450 mm en een breedte van 1780 mm [2].



Figuur 2.1: Kruisraket inslagen op Antonovsky brug [13]

Een overzicht van alle raketinslagen is te vinden in tabel 2.1. In deze tabel is te zien dat de diameter van de inslaggaten varieert tussen 450 mm en 1600 mm. Het eerste gat, met een diameter van 3195 mm, is namelijk duidelijk het gevolg van twee overlappende inslagen. De gemiddelde diameter van de inslagen bedraagt Ø1020 mm, wat de voornaamste reden is om in deze studie uit te gaan van een gat met een diameter van 1 meter.

	Diameter (mm)	brug volledig gepenetreerd
Inslag 1	Ø3195	Ja
Inslag 2	Ø1190	Ja
Inslag 3	Ø1140	Ja
Inslag 4	Ø680	Ja
Inslag 5	Ø450	Ja
Inslag 6	Ø500	Ja
Inslag 7	Ø500	Nee
Inslag 8	Ø450	Nee
Gemiddeld	Ø1020	-

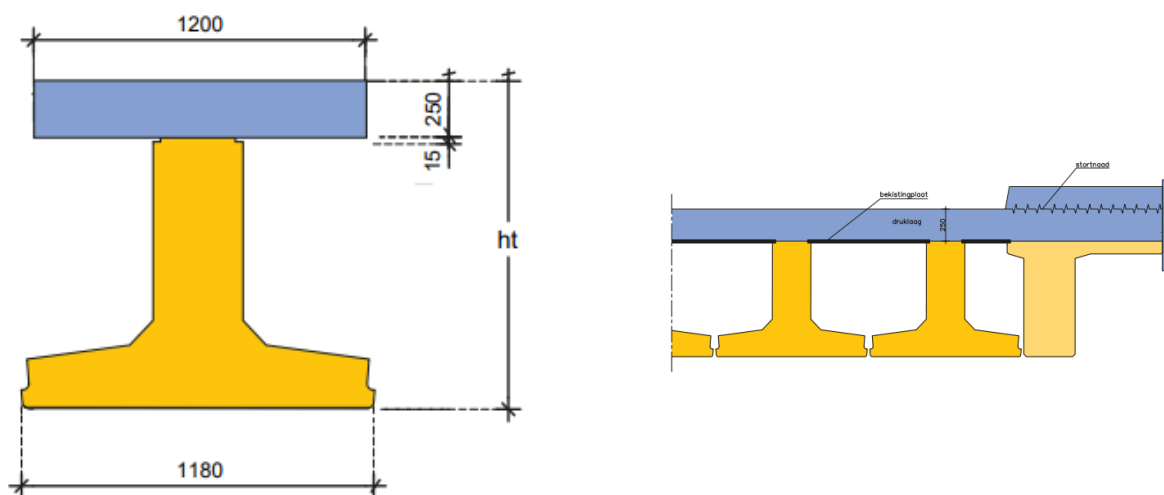
Tabel 2.1: Afmetingen van raketinslagen op Antonovsky brug

2.2. Welke liggers worden er in Nederlandse bruggen gebruikt?

Bij het bouwen van bruggen of viaducten kan voor verschillende constructiematerialen gekozen worden: prefab-liggers, in situ-beton, staal-beton, staal of kunststof. De keuze van het type brug is afhankelijk van het soort verkeer dat over de brug rijdt. In Nederland worden viaducten tot 65 m vooral gebouwd met prefab-liggersystemen [3]. In dit hoofdstuk worden de drie meest gebruikte liggersystemen behandeld.

2.2.1. Omgekeerde T-liggers met een in-situ druklaag

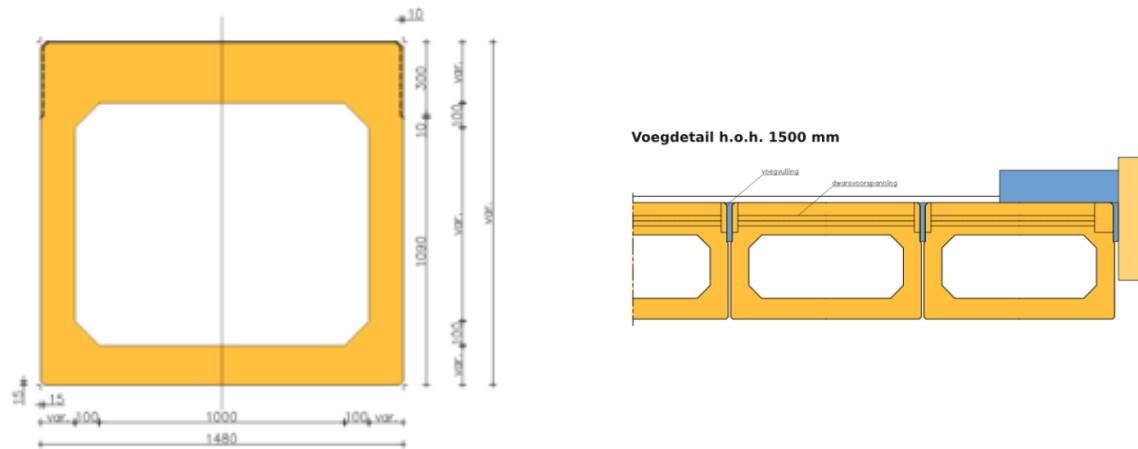
De Haitsma Railligger Profiel (HRP) is een ligger die prefab en in-situ elementen combineert. Deze combinatie van bouwstijlen maakt de HRP-ligger kosteneffectief en snel te installeren, terwijl maatwerk mogelijk blijft. Een belangrijk kenmerk van de HRP-ligger is het gebruik van het 'verloren bekisting' concept, waarbij de bekisting geïntegreerd wordt in het uiteindelijke ontwerp [6].



Figuur 2.2: Omgekeerde T-liggers met een in-situ druklaag [6]

2.2.2. Kokerliggers met dwarsvoorspanning zonder druklaag

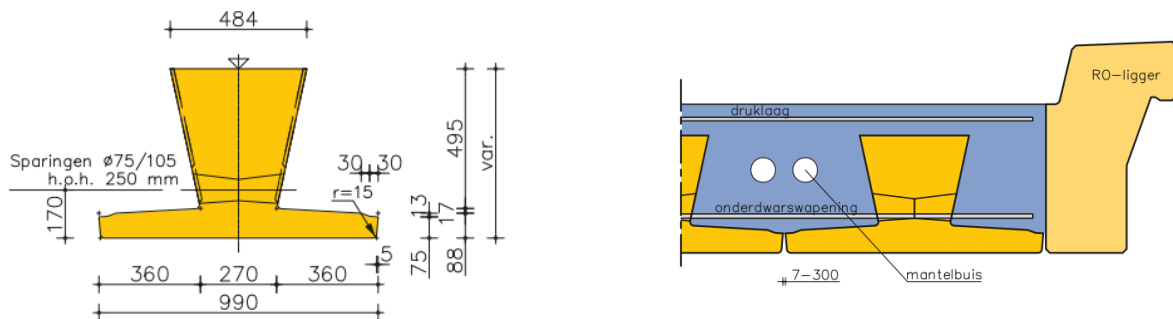
De Haitsma koker profiel (HMP) is een vierkante ligger met een 'holle' ruimte waar gerecyclede polystyreen-blokken zijn ingestort om het eigen gewicht van de ligger flink te reduceren. Met deze methode hoeft er geen stortnaad aangelegd te worden en heeft de ligger geen druklaag nodig omdat de kokerligger in dwarsrichting nagespannen wordt [5].



Figuur 2.3: Kokerligger met dwarsvoorspanning zonder druklaag [5]

2.2.3. Omgekeerde T-ligger met een volstortdek

De HKO-Volstortligger combineert prefab beton met in-situ werk om de meest economische oplossing te vinden. De kosten worden laag gehouden omdat er zo veel mogelijk in situ wordt gestort. De HKO-Volstortligger wordt vooral toegepast op verkeersbruggen en ondergrondse parkeergarages [4].



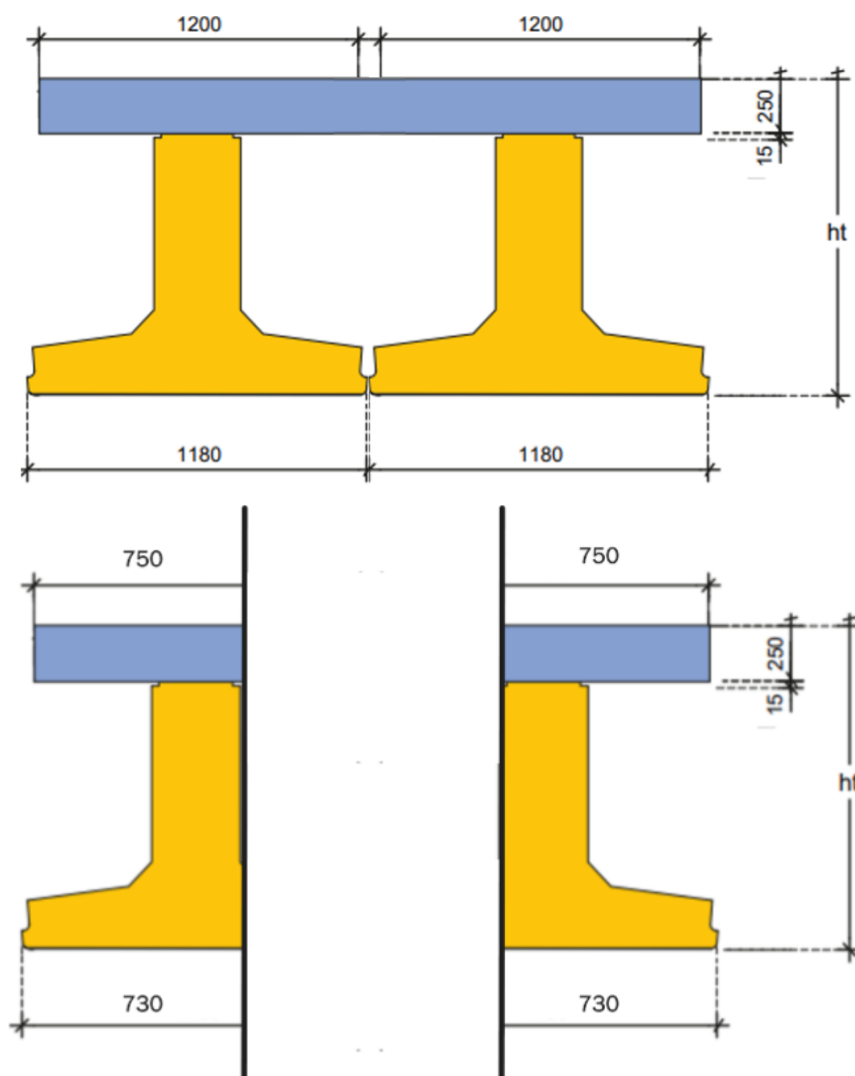
Figuur 2.4: Omgekeerde T-ligger met een volstortdek [4]

2.2.4. De ligger voor deze studie

In deze studie wordt een omgekeerde T-ligger met een in-situ druklaag als basis gebruikt voor de berekeningen aan de brug. Om de berekeningen inzichtelijker te maken, is een specifiek scenario gekozen, zoals geïllustreerd in figuur 2.5. Het bovenste plaatje toont de situatie vóór de inslag van de kruisraket en het onderste plaatje de situatie na de inslag.

Na de inslag is de doorsnede van de druklaag gereduceerd naar 750 mm en de doorsnede van de onderflens naar 730 mm. Daarnaast zijn 12 voorspanstrengen verloren gegaan. Voor de berekeningen wordt een HRP-700 ligger met een overspanning van 20 meter gebruikt, waarbij het inslagpunt van de kruisraket zich in het midden van de ligger bevindt. Dit is gekozen omdat het optredende moment in het midden het grootst is. Als de draagkracht daar groot genoeg is, geldt dat ook voor de rest van de ligger.

De HRP-700 ligger is voorzien van voorgespannen staal. Bij voorgespannen staal is de wapening van de ligger onder spanning gebracht, waarna het beton in de bekisting wordt gestort. Als het beton verhard is, bevat de ligger voorspanwapening. De wapening is voorgespannen met aanhechting en dit is de voornaamste reden dat de wapening op zijn plek blijft liggen als het door een kruisraket wordt beschadigd [8]. De wapening die in de HRP-700 ligger wordt gebruikt is FeP1670.



Figuur 2.5: Situatie voor en na inslag van de kruisraket [6]

3

Welke methodes zijn er om gaten in een betonnen brug te dichten?

In dit hoofdstuk worden drie concepten behandeld voor het dichten van een gat in een betonnen brug. Na de voor- en nadelen van elk concept met elkaar vergeleken te hebben, zal één concept volledig worden uitgewerkt.

3.1. Concept 1: Vakwerkconstructie met stalen plaat

In het eerste concept wordt gebruikgemaakt van een vakwerkconstructie die boven het gat wordt geplaatst. De methode bestaat uit twee fasen: het monteren van de stalen plaat aan de onderflens en het bevestigen van houten bekisting aan de bovenflens.

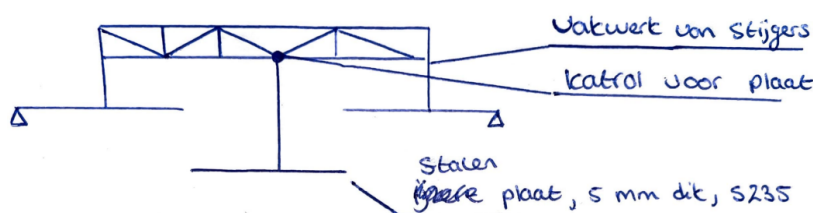
Bekisting van de onderflens

Een vakwerkconstructie boven het gat functioneert als draagstructuur, waarbij een katrolsysteem de stalen plaat omhoog takelt. Aan de plaat is een laslus bevestigd voor de verbinding met het katrol. Na het hijsen worden twee steun elementen aan de stalen plaat gelast om de plaat op zijn plek te houden. Zodra de plaat is gemonteerd, kan de bestaande wapening worden hersteld en nieuwe wapening worden aangebracht. Om de stalen plaat aan de onderkant ook als wapening te laten functioneren, worden aan beide zijden stiftdeuvels gelast. Deze verbinden de plaat met de nieuwe betonconstructie. Zonder de stiftdeuvels zou de plaat slechts als bekisting dienen. Vervolgens wordt het beton gestort en kan fase 2 van start.

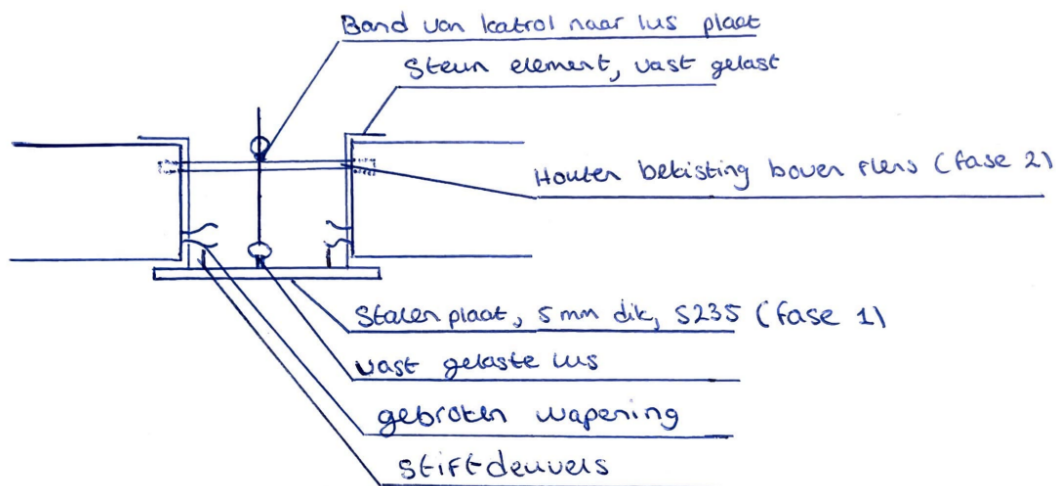
Bekisting van de bovenflens

Voor de bovenflens wordt dezelfde vakwerkconstructie gebruikt, maar worden stalen platen vervangen door houten bekistingsplanken. Twee planken worden door het gat geschoven en met het katrolsysteem tegen de bovenflens getrokken. Hout is gekozen omdat de bekisting in de bovenflens geen extra rol in de wapening speelt. Na positionering van de bekisting wordt de betonlaag gestort.

Concept 1 is een combinatie van stalen bekisting in de onderflens en houten bekisting in de bovenflens die door middel van een vakwerk met katrol worden bevestigd. Concept 1 is geïllustreerd in figuur 3.1 en 3.2 en de voor- en nadelen van het concept zijn in tabel 3.1 weergegeven.



Figuur 3.1: Voorbeeld van constructie concept 1: Vakwerkconstructie met stalen plaat



Figuur 3.2: Zij-aanzicht concept 1: Vakwerkconstructie met stalen plaat

Voordelen	Nadelen
- Geen belemmering door de hoogte of ligging van de brug - De stalen plaat werkt naast bekisting, ook als extra wapening	- De stalen plaat is aanzienlijk zwaar, wat de montage kan belemmeren - Steun elementen moeten worden toegevoegd om de bekisting op zijn plek te houden - De steun elementen zitten in de weg van de bekisting van de bovenflens - De bestaande wapening kan een obstakel vormen, tijdens het hijsen van de stalen plaat

Tabel 3.1: Voor- en nadelen concept 1: Vakwerkconstructie met stalen plaat

3.2. Concept 2: Bekisting van hout met bouten

In het tweede concept wordt er in plaats van een stalen plaat, gebruikgemaakt van houten bekisting, die aan omliggende liggers wordt bevestigd met bouten. Dit concept bestaat ook uit twee fasen: de bekisting van de onderflens en van de bovenflens.

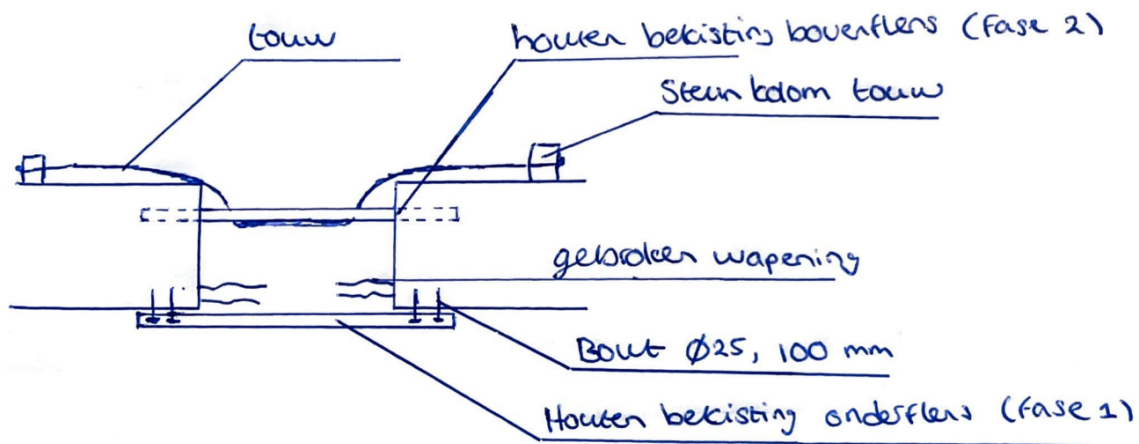
Bekisting van de onderflens

De bekisting van de onderflens wordt met een hoogwerker gemonteerd aan onbeschadigde liggers. Hierbij worden eerst gaten in de liggers geboord met een betonboor. Vervolgens worden de houten planken over het gat geplaatst en via stalen bouten aan de liggers verankerd. Na montage kan de bestaande wapening worden rechtgetrokken en nieuwe wapening worden aangebracht, waarna het beton gestort wordt.

Bekisting van de bovenflens

Voor de bekisting van de bovenflens worden eveneens houten planken gebruikt. Deze planken krijgen voor-geboorde gaten waar touwen doorheen worden geleid. De planken worden door het gat geschoven en met de touwen strak tegen de onderkant van de druklaag getrokken. De touwen worden vervolgens aan een steun kolom bevestigd. Zodra de planken op positie liggen, kan het storten van het beton beginnen.

Concept 2 is een combinatie van bouten en touwen om de houten bekisting aan de onder- en bovenflens te monteren en is geïllustreerd in figuur: 3.3. In tabel 3.2 zijn de voor- en nadelen van concept 2 weergegeven.



Figuur 3.3: Zij-aanzicht concept 2: Bekisting van hout met moeren

Voordelen	Nadelen
- Bekisting is licht en eenvoudig aan te passen aan specifieke situaties - Geen constructie nodig om de bekisting te plaatsen	- De houten bekisting biedt geen extra wapening in de trekzone - Concept 2 maakt gebruik van hoogwerkers, maar in veel gevallen (bergachtig, water) is dat niet mogelijk - Boren in omliggende liggers is niet wenselijk, kans dat de huidige wapening wordt geraakt

Tabel 3.2: Voor- en nadelen concept 2: Bekisting van hout met moeren

3.3. Concept 3: Bekisting van hout met spanbanden

In het derde concept wordt er in plaats van een stalen plaat, ook gebruikgemaakt van houten bekisting. De houten bekisting wordt nu vastgemaakt met spanbanden en bestaat uit twee fasen: de bekisting van de onderflens en van de bovenflens.

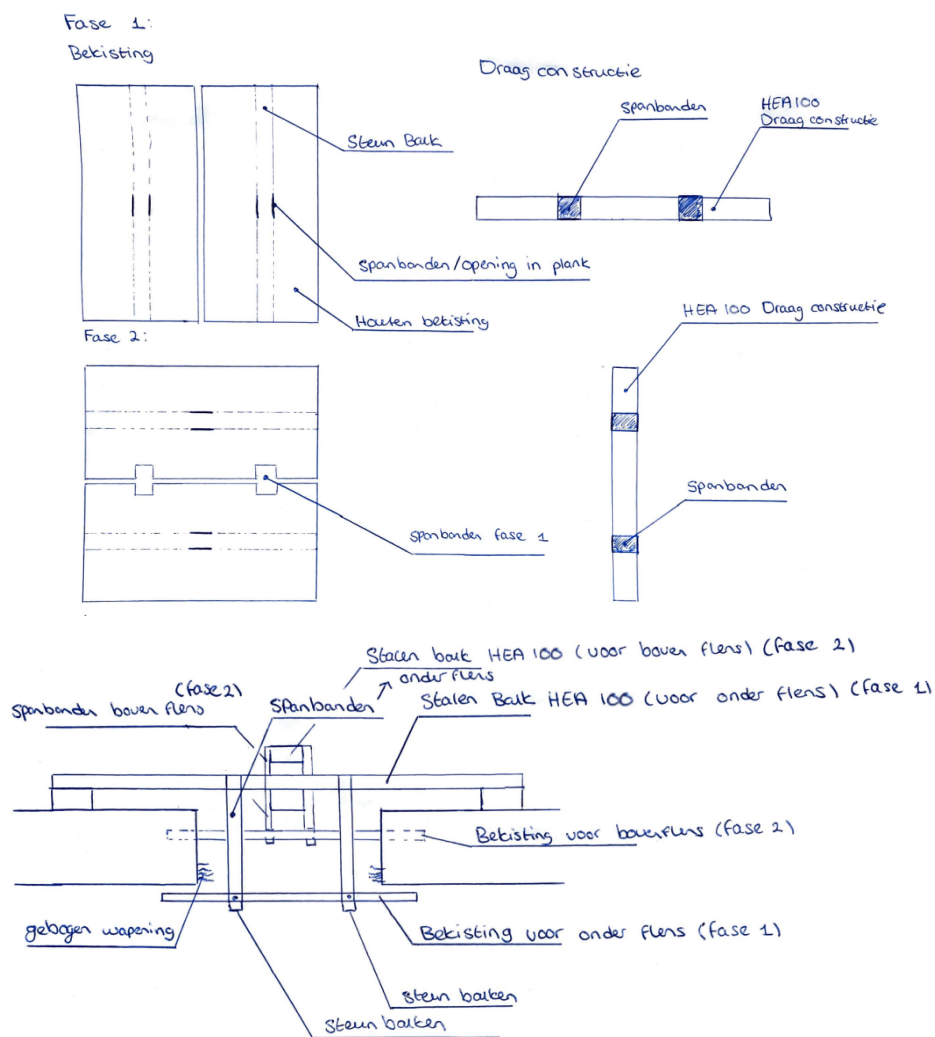
Bekisting van de onderflens

Voor de onderflens worden twee houten planken gebruikt, die op maat gemaakt worden voor de situatie. In beide planken worden met een cirkelzaag twee openingen gemaakt om spanbanden doorheen te laten gaan. De planken worden vervolgens boven het brugdek vastgezet met behulp van een stalen draagconstructie. Om te voorkomen dat het hout tussen de spanbanden bezwijkt, worden onder de houten planken twee steunbalken geplaatst.

Na het aanbrengen van deze constructie wordt de oude wapening rechtgetrokken, waarna de nieuwe wapening eraan kan worden bevestigd. Zodra de nieuwe wapening is gemonteerd, wordt de onderflens gestort met beton. Fase 1 van figuur 3.4 toont de situatie van de onderflens.

Bekisting van de bovenflens

De bekisting voor de bovenflens volgt een vergelijkbare aanpak, maar het proces wordt 90 graden gedraaid. Een extra stalen draagconstructie wordt haaks op de eerste stalen draagconstructie aan het brugdek toegevoegd. De houten planken worden parallel aan de ligger voorgespannen. In de houten planken worden twee openingen gezaagd, zoals te zien is in figuur 3.4, omdat de spanbanden van fase 1 nog aangespannen staan. Als de bekisting in fase 2 zijn plek staat, en ook hier de wapening is hersteld, kan de nieuwe druklaag worden gestort. figuur 3.4 (boven) laat de twee fasen zien waarin de bekisting wordt geplaatst, en figuur 3.4 (onder) geeft een zijaanzicht nadat de bekisting van fase 2 op zijn plek staat. De spanbanden maken tussen de bekisting en de draagconstructie een halve draai om uiteindelijk parallel aan de lengtezijde van de planken te lopen. In tabel 3.3 zijn de voor- en nadelen van dit concept weergegeven.



Figuur 3.4: Boven-aanzicht (boven) en zij-aanzicht (onder) van concept 3: Bekisting van hout met spanbanden

Voordelen	Nadelen
- De constructie is eenvoudig en kan in korte tijd worden geplaatst - Geen belemmering door de hoogte of ligging van de brug - Bekisting is licht en eenvoudig aan te passen aan specifieke situaties - Geen steun elementen nodig, spanbanden worden als verloren bekisting gezien	- Geen extra wapening door houten bekisting

Tabel 3.3: Voor- en nadelen concept 3: Bekisting van hout met spanbanden

3.4. Welk concept wordt gebruikt?

Na vergelijking van alle methoden blijkt concept 3 in de meeste gevallen de beste keuze te zijn. Dit hoofdstuk zal een stappenplan volgen van impact kruisraket tot veilige overgang van het pantservoertuig en nodige toelichting bieden van verschillende ontwerpkeuzes.

In concept 3 is gekozen voor twee draagconstructies van het formaat HEA100 met een overspanning van 1400 mm. In de Quick Reference is te vinden dat $W_{z,el} = 25.3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ is en dat staalsoort S235 een maximale spanning van 235 N/mm^2 heeft [15]. De steunbalken hebben de volgende momentcapaciteit:

$$M_{max} = W_{z,el} \cdot \sigma_{rekgrens} = 26.8 \cdot 10^3 \cdot 235 = 6.23 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 6.23 \text{ kNm} \quad (3.1)$$

De twee spanbanden kunnen vereenvoudigd worden tot 1 puntlast in het midden vanwege symmetrie (Zie figuur: 3.4 boven). Er wordt aangenomen dat het gewicht van het gestorte beton 500 kg (4.905 kN) bedraagt.

$$M_{spanbanden} = \frac{1}{4} \cdot F \cdot L = \frac{1}{4} \cdot 4.905 \cdot 1.4 = 1.72 \text{ kNm} \quad (3.2)$$

De draagconstructies kunnen het gewicht van het in-situ beton makkelijk aan. Aan de onderkant van de bekisting zijn steunbalken toegevoegd om te voorkomen dat het hout bij de spanbanden bezwijkt. Om te garanderen dat de bekisting niet bezwijkt, is hier ook een berekening voor gemaakt. De houten steunbalken hebben een hoogte van 100 mm en een breedte van 50 mm. Het gewicht van het gestorte beton wordt verdeeld over de twee bekistingsplaten, wat betekent dat elke bekistingsplaat een gewicht van 250 kg draagt. Met een overspanning van 1 meter geeft dit een $q = 2.45 \text{ kNm}$. Het moment dat de steunbalk moet dragen is dan:

$$M_{steunbalken} = \frac{1}{8} \cdot q \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 2.45 \cdot 1^2 = 0.31 \text{ kNm} \quad (3.3)$$

$$W_{steunbalk} = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 50 \cdot 100^2 = 83.3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad (3.4)$$

$$\sigma = \frac{M_{steunbalk}}{W_{steunbalk}} = \frac{0.31 \cdot 10^6}{83.3 \cdot 10^3} = 3.72 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5)$$

Aangezien de maximale spanning van hout 16 N/mm^2 is, kunnen de steunbalken het gewicht makkelijk dragen [14]. De nieuwe wapening wordt met binddraad aan de gebroken wapening vastgemaakt. De verankering lengte tussen de nieuwe- en de gebroken wapeningsstaaf wordt berekend in hoofdstuk 6.

Op basis van methode 3 en de toelichting die eerder in deze paragraaf is gegeven, kan de brugreparatie gestructureerd worden uitgevoerd volgens het volgende stappenplan:

- **0 uur na inslag:** De raket is in de brug geslagen en wordt door het Ministerie van Defensie ontdekt.
- **1 uur na inslag:** De brug wordt geïnspecteerd door een ingenieur. Deze ingenieur zal bepalen hoe breed de doorsnede van de drukzone is en hoeveel wapeningsstaven nog intact zijn. Aan de hand van figuur: 5.6 wordt bepaald of de brug gemaakt moet worden of niet.
 - Is het niet nodig dat de brug wordt gemaakt, dan wordt een stalen rijplaat over het gat geplaatst. Voor meer toelichting, zie paragraaf 7.4.1
- **2 uur na inslag:** Eerst wordt de draagconstructie van de onderflens (fase 1) op het brugdek gemonteerd. Vervolgens worden de vier openingen voor de spanbanden in het hout gezaagd. Nadat de draagconstructie gereed is, kunnen de twee houten bekistingsplaten door de opening op de juiste plek worden geplaatst. Zodra deze correct gepositioneerd zijn, worden de spanbanden aangetrokken om de bekisting stevig tegen de onderkant van de flens te bevestigen. Vervolgens worden de openingen van de spanbanden met purschuim gevuld zodat het beton niet door de openingen vloeit.
- **3 uur na inslag:** De gebogen wapeningsstaven worden door het aannemersbedrijf rechtgebogen. Dit is van belang omdat de nieuwe wapeningsstaven aan de beschadigde wapeningsstaven moeten worden bevestigd.
- **3.5 uur na inslag:** De nieuwe wapeningsstaven worden bevestigd aan de oude, rechtgetrokken wapeningsstaven.

- **4.5 uur na inslag:** De bekisting is gemonteerd en de nieuwe wapening zit op zijn plaats. Het beton kan nu in de opening worden gestort door de eerste betonlevering. Hiermee is fase 1 afgerond. Vervolgens wordt de draagconstructie van de bovenflens (fase 2) aan het brugdek gemonteerd.
- **5 uur na inslag:** De bekisting voor de bovenflens volgt een vergelijkbare aanpak als in fase 1, maar het proces wordt 90 graden gedraaid. De extra stalen draagconstructie wordt haaks op de eerste aangebracht om de bekisting correct te positioneren. In de bekisting van de bovenflens worden, naast de vier openingen voor de nieuwe spanbanden, ook twee extra openingen gezaagd voor de spanbanden van fase 1. Deze extra openingen zijn zichtbaar in figuur 3.4 (boven) bij fase 2. Nadat de bekisting op de juiste plek is geïnstalleerd, de wapening hersteld is en de gaten zijn afgedicht met purschuim, kan de tweede betonlevering direct worden gestort. De duur van fase 2 kan aanzienlijk worden verkort, omdat al het voorbereidende werk tijdens fase 1 kan worden gedaan.
- **6 uur na inslag:** Het beton is in situ gestort op de beschadigde plek.
- **29 uur na inslag:** De twee draagconstructies mogen worden verwijderd. De spanbanden en houten bekisting blijven in de constructie en worden gezien als verloren bekisting.
- **30 uur na inslag:** Het beton bereikt dezelfde betonsterkte als de onbeschadigde delen van de ligger. De brug biedt weer een veilige overgang voor de pantservoertuigen.

4

Ontwikkeling van de gemiddelde betondruksterkte

De druksterkte van beton op een ouderdom t hangt af van het type cement, de temperatuur en de nabehandlingsomstandigheden. Voor een gemiddelde temperatuur van 20 °C en nabehandeling in overeenstemming met EN 12390 mag de druksterkte van beton bij verschillende ouderdommen $f_{cm}(t)$ zijn [11]:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (4.1)$$

met

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (4.2)$$

waarin:

- $f_{cm}(t)$ is de gemiddelde druksterkte van beton op een ouderdom van t dagen;
- f_{cm} is de gemiddelde druksterkte na 28 dagen;
- $\beta_{cc}(t)$ is een coëfficiënt die afhangt van de ouderdom t van het beton;
- t is de ouderdom van het beton in dagen;
- s is een coëfficiënt die afhangt van de soort cement:
 - = 0,20 voor cement van de sterkteklassen CEM 42,5 R, CEM 52,5 N en CEM 52,5 R (klasse R);
 - = 0,25 voor cement van de sterkteklassen CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (klasse N);
 - = 0,38 voor cement van de sterkteklassen CEM 32,5 N (klasse S) [11].

In dit onderzoek willen we gebruikmaken van de rekenwaarde van de druksterkte van beton f_{cd} , daarom moet de waarde $f_{cm}(t)$ als volgt worden omgeschreven:

$$f_{cm}(t) = f_{ck} + 8 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4.3)$$

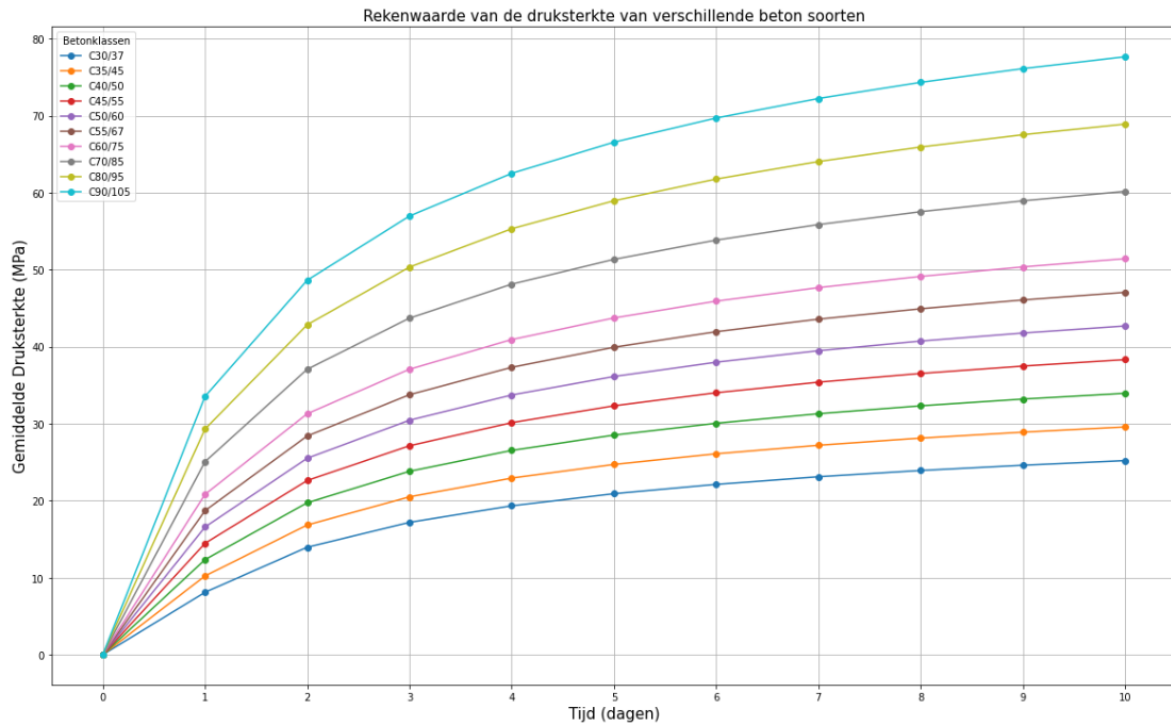
$$f_{cd} = a_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 \cdot \frac{f_{ck}}{1.5} \quad (4.4)$$

waarin:

- a_{cc} is de reductiefactor voor langetermijneffecten;
- f_{ck} is karakteristieke cilinderdruksterkte;

- γ_c is de partiële veiligheidsfactor voor beton [11].

In dit onderzoek is het van belang om in zo kort mogelijke tijd, zo hoog mogelijke betondruksterkte te behalen. Daarom is er gekozen voor cement uit klasse R, hierbij verkrijgen we de hoogste $\beta_{cc}(t)$. figuur: 4.1 is aan de hand van Formules 4.1-4.4 opgesteld waarbij de rekenwaarde van de druksterkte van beton is uitgezet tegen de tijd.



Figuur 4.1: Verschillende sterkte beton uitgezet tegen de tijd

De grafiek toont aan dat betonsoort C60/75 na 24 uur een druksterkte bereikt van 21 MPa, wat overeenkomt met de rekenwaarde van volhard C30/37 beton. Deze snelle sterkteontwikkeling is de voornaamste reden voor de keuze voor C60/75. Daarnaast moet er rekening gehouden worden met de grotere diameter van de nieuwe wapening. Hierdoor is er minder ruimte tussen de wapeningsstaven. Om deze reden is het van belang dat fijn grind bij de betonproductie wordt gebruikt, zodat het beton goed om de wapening kan zitten. Hoewel dit economisch minder voordelig is, zijn dergelijke kostenafwegingen minder relevant in oorlogstijd.

5

Draagkracht onbeschadigd, beschadigd en gerepareerd

In dit hoofdstuk worden de berekeningen weergegeven van de HRP-700 ligger in onbeschadigde staat, beschadigde staat en gerepareerde staat. Daarnaast wordt ook een grafiek opgesteld om te kunnen bepalen of de brug gerepareerd moet worden.

5.1. Formules die nodig zijn voor het berekenen van de draagkracht

Voordat de draagkracht berekend kan worden, moet eerst de momentcapaciteit van de ligger vastgesteld worden. De momentcapaciteit wordt met de volgende formules berekend:

$$Totale\ trekkracht = N_s = n \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \varnothing_{wapening}^2 \cdot f_{yd} \quad (5.1)$$

waarin:

- n het aantal wapening staven is;
- $\varnothing_{wapening}^2$ de diameter van de wapening staven is;
- f_{yd} de vloeigrens van de wapening staven is [7].

Om de drukzone te bepalen, wordt de volgende formule gebruikt:

$$Drukzone = x_u = \frac{N_s}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}} \quad (5.2)$$

waarin:

- α de effectiviteitsfactor van de drukzone is;
- b de breedte van de doorsnede is;
- f_{cd} de betondruksterkte is [7].

Om de effectieve hoogte te bepalen, wordt de volgende formule gebruikt:

$$Effectieve\ hoogte = z = h - a - \beta \cdot x_u \quad (5.3)$$

waarin:

- h de hoogte van de doorsnede is;
- a de afstand tussen hart van de wapening en onderkant doorsnede;

- β de coëfficiënt die de effectieve hoogte van de drukzone om de betondoorsnede bepaald [7].

Uiteindelijk kan door middel van de totale trekkracht, de drukzone en de effectieve hoogte de momentcapaciteit van de ligger berekend worden [7]:

$$M_{rd} = N_s \cdot z \quad (5.4)$$

De draagkracht van de ligger kan bepaald worden door het moment als gevolg van het eigen gewicht van de momentcapaciteit af te trekken:

$$Draagkracht = M_{max} = M_{rd} - M_{ed} \quad (5.5)$$

5.2. Draagkracht van een onbeschadigde ligger

In dit gedeelte worden de draagkrachtberekeningen uitgevoerd voor de onbeschadigde ligger. Daarnaast wordt ook het moment bepaald dat wordt veroorzaakt door het gewicht van tank + trailer. Voor de berekeningen worden 30 wapeningsstaven van het type FeP1670 met een diameter van 9.3 mm in beschouwing genomen.

$$N_s = n \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \varnothing_{wapening}^2 \cdot f_{yd} = 30 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot 9.3^2 \cdot \frac{1670}{1.15} = 2959.3 \text{ kN} \quad (5.6)$$

$$x_u = \frac{N_s}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2959.3 \cdot 10^3}{0.75 \cdot 1200 \cdot \frac{30}{1.5}} = 164.4 \text{ mm} \quad (5.7)$$

$$z = h - a - \beta \cdot x_u = 950 - 80 - \frac{7}{18} \cdot 164.4 = 806.1 \text{ mm} \quad (5.8)$$

$$M_{rd} = N_s \cdot z = 2959.3 \cdot 806.1 = 2385.4 \text{ kNm} \quad (5.9)$$

$$M_{ed} = \frac{1}{8} \cdot \gamma_g \cdot q_{ed} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 1.1 \cdot 16.88 \cdot 20^2 = 928.4 \text{ kNm} \quad (5.10)$$

$$M_{max} = M_{rd} - M_{ed} = 2385.4 - 928.4 = 1457.0 \text{ kNm} \quad (5.11)$$

Om te kijken of de draagkracht van de ligger groot genoeg is, moet het maximale moment dat wordt veroorzaakt door de tank + trailer worden bepaald. Het gewicht van de trailer wordt als volgt berekend: het gewicht van de trailer = het toegestane totaalgewicht van de (trekker + trailer) - het gewicht van de trekker - de maximale nuttige lading van de trailer = 130 - 26.10 - 70 = 33.9 ton [1]. In Nederland wordt vooral gebruikgemaakt van de Leopard 2 A6-gevechtstank met een gewicht van 60 ton [10]. Samen komt dit op het volgende gewicht:

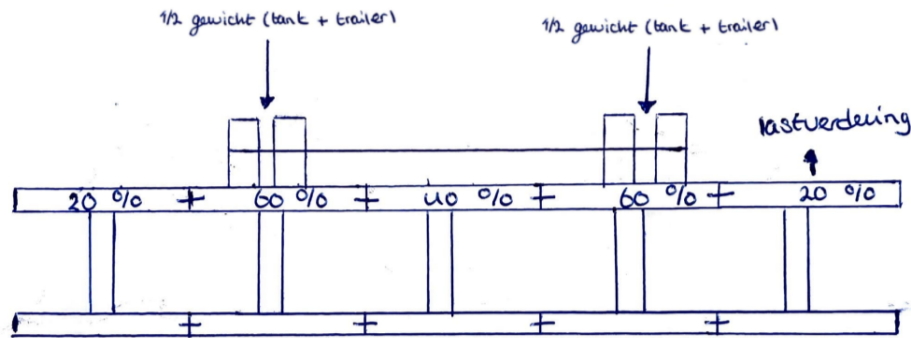
$$Gewicht (tank + trailer) = 60000 \text{ kg} + 33900 \text{ kg} = 93.9 \text{ ton} = 921.2 \text{ kN} \quad (5.12)$$



Figuur 5.1: Leopard 2 A6-gevechtstank + trailer [16]

In figuur: 5.1 is te zien dat de belasting bij benadering gelijkmatig verdeeld is. In dit onderzoek wordt gesteld dat het volledige gewicht van de tank + trailer wordt verdeeld over de lengte van de trailer (14 meter) [16]. Daarnaast wordt er een lastverdeling van 60% aangehouden voor de belaste ligger en 20% voor de omliggende liggers. Figuur: 5.2 schetst de uitgelegde situatie.

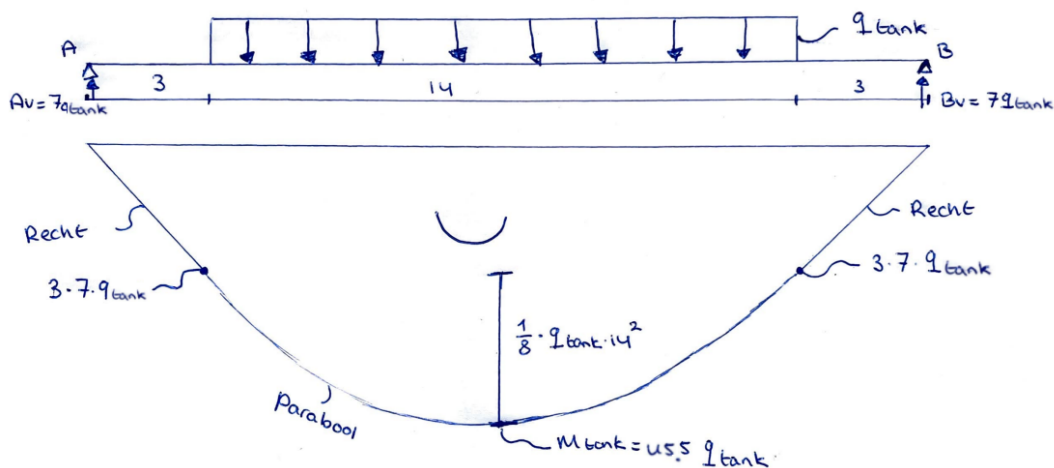
$$q_{\text{tank}} = \frac{\text{gewicht per last}}{\text{lengte trailer}} \cdot \text{lastverdelingsfactor} = \frac{\frac{921.2}{2}}{14} \cdot 0.6 = 19.74 \text{ kN/m} \quad (5.13)$$



Figuur 5.2: Lastverdeling gewicht van tank + trailer en overzicht van de momentenlijn

De veiligheidsfactor γ_q van 1.1 wijkt af van de voorschriften van de Eurocode. De voornaamste reden is dat in tijden van oorlog risico's verhoogd moeten worden. Door de veiligheidsfactor te verlagen, komt het beton eerder op een gewenste draagkracht, wat kostbare tijd scheelt. Met een veiligheidsfactor van 1.1 wordt het volgende moment berekend:

$$M_{\text{tank}} = \gamma_q \cdot (3 \cdot 7 \cdot q_{\text{tank}} + \frac{1}{8} \cdot q_{\text{tank}} \cdot L^2) = 1.1 \cdot (21 \cdot 19.74 + \frac{1}{8} \cdot 19.74 \cdot 14^2) = 987.9 \text{ kNm} \quad (5.14)$$



Figuur 5.3: Momentenlijn veroorzaakt door tank + trailer

Het maximale moment dat de brug kan dragen is $M_{\text{max}} = 1457.0 \text{ kNm}$ en het moment dat de tank + trailer belast is $M_{\text{tank}} = 987.9 \text{ kNm}$. De brug heeft voldoende draagkracht om het werkende moment van de tank + trailer op te vangen. De krijgsmacht kan hun weg veilig vervolgen.

Naast berekeningen in de langsdoorsnede, is het ook interessant om te kijken of de brug sterk genoeg is in de dwarsdoorsnede. In de dwarsdoorsnede kan de constructie beschouwd worden als een ligger die aan beide kanten is ingeklemd. Daarnaast wordt de belasting nu beschouwd als een puntlast in het midden van de overspanning. De puntlast heeft een grootte van $\frac{\text{Totaal gewicht}}{\text{Aantal banden}} = \frac{921,2 \text{ kN}}{28} = 32,9 \text{ kN}$ en daar volgt het volgende moment uit:

$$M_{band} = \frac{1}{8} \cdot \gamma_q \cdot F_{band} \cdot L = \frac{1}{8} \cdot 1,1 \cdot 32,9 \cdot 1,2 = 5,43 \text{ kN} \quad (5.15)$$

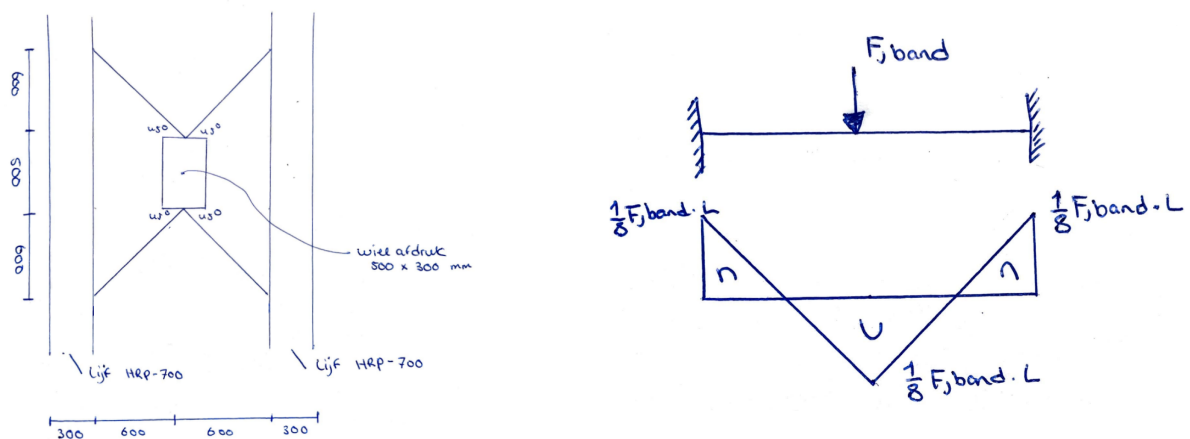
In dit geval wordt berekend hoeveel wapeningsstaven er nodig zijn om 1 band van de trailer te kunnen dragen. De kracht die de band op de liggers uitoefent wordt onder een hoek van 45° naar de lijfen ontbonden. In figuur 1: 5.4 (links) is de ontbinding van krachten weergegeven.

$$N_s = n \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \phi_{wapening}^2 \cdot f_{yd} = 1 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot 10^2 \cdot \frac{500}{1,15} = 34,15 \text{ kN} \quad (5.16)$$

$$x_u = \frac{N_s}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{34,15 \cdot 10^3}{0,75 \cdot 500 \cdot \frac{30}{1,5}} = 4,55 \text{ mm} \quad (5.17)$$

$$z = h - 2 \cdot a - 2 \cdot \frac{1}{2} \phi_{wapening} - \beta \cdot x_u = 250 - 2 \cdot 30 - 10 - \frac{7}{18} \cdot 4,55 = 178,23 \text{ mm} \quad (5.18)$$

$$M_{rd} = N_s \cdot z = 34,15 \cdot 178,23 = 6,09 \text{ kNm} \quad (5.19)$$

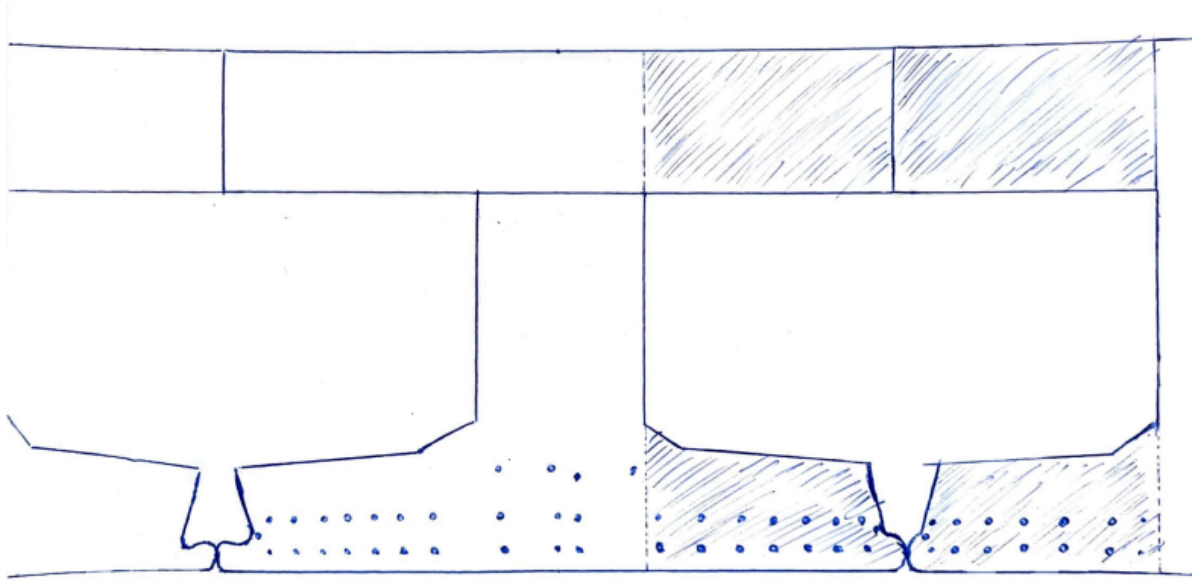


Figuur 5.4: (links) bovenaanzicht van de dwarsdoorsnede en (rechts) wordt de momentenlijn illustreert

Uit de berekeningen blijkt dat één wapeningsstaaf van type B500B voldoende draagkracht heeft om één band van de trailer te ondersteunen. Theoretisch betekent dit dat per 500 mm één wapeningsstaaf volstaat. In de praktijk wordt de wapening echter veel dicht bij elkaar geplaatst om de structurele sterkte en stabiliteit te verhogen.

5.3. Draagkracht van een beschadigde ligger

Na de raketinslag is de brug een deel van zijn draagkracht kwijt. In dit hoofdstuk wordt het scenario dat in hoofdstuk 2.2.4 is geïllustreerd uitgewerkt. In dit scenario zijn er in totaal 12 van de 30 wapeningsstaven beschadigd geraakt en is de breedte van de drukzone niet 1200 mm meer, maar 750 mm. Een voorbeeld van het scenario is te zien in figuur 5.5.



Figuur 5.5: Scenario waarbij 12 wapeningsstaven vervangen moeten worden

$$N_s = n \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \phi_{wapening}^2 \cdot f_{yd} = 18 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot 9.3^2 \cdot \frac{1670}{1.15} = 1775.6 \text{ kN} \quad (5.20)$$

$$x_u = \frac{N_s}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{1775.6 \cdot 10^3}{0.75 \cdot 750 \cdot \frac{30}{1.5}} = 157.8 \text{ mm} \quad (5.21)$$

$$z = h - a - \beta \cdot x_u = 950 - 80 - \frac{7}{18} \cdot 157.8 = 808.6 \text{ mm} \quad (5.22)$$

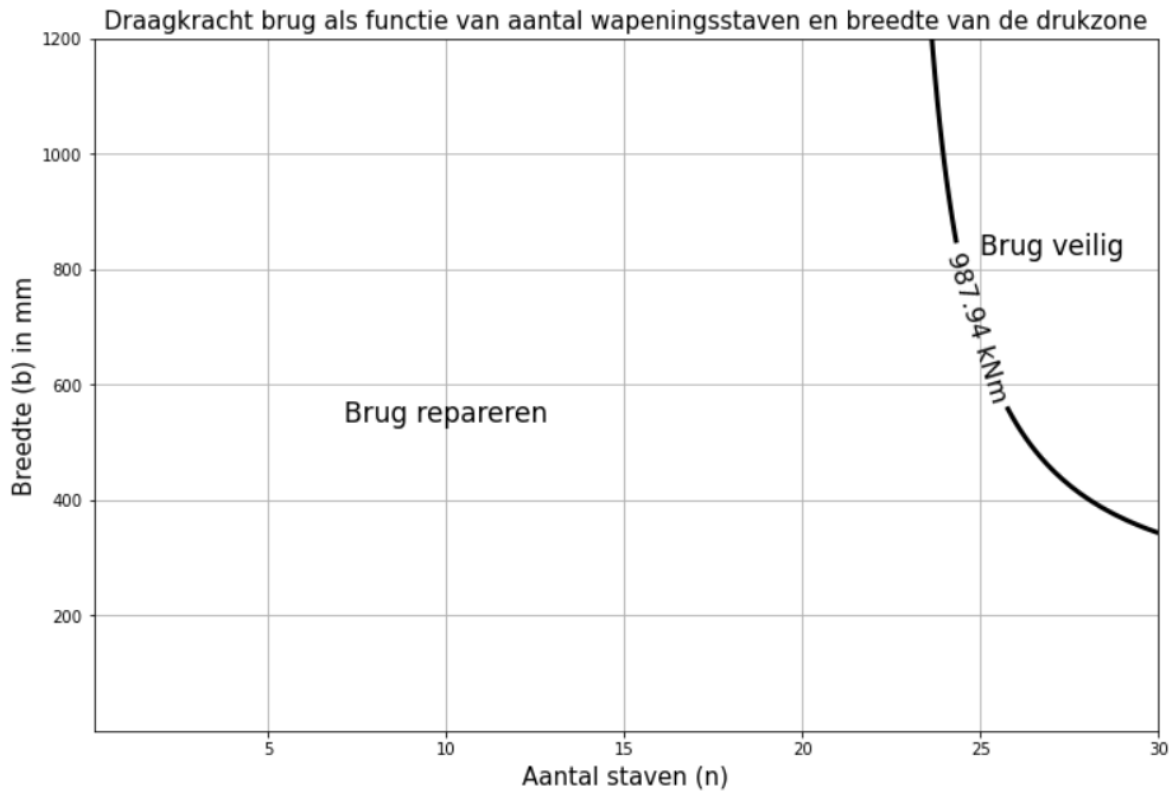
$$M_{rd} = N_s \cdot z = 1775.6 \cdot 808.6 = 1435.8 \text{ kNm} \quad (5.23)$$

$$M_{max} = M_{rd} - M_{ed} = 1435.8 - 928.4 = 507.4 \text{ kNm} \quad (5.24)$$

Het maximale moment dat de brug kan dragen is nu $M_{max} = 507.4 \text{ kNm}$ en het moment dat de tank + trailer belast is $M_{tank} = 987.9 \text{ kNm}$. De brug heeft niet voldoende draagkracht om het werkende moment van de tank + trailer op te vangen. De krijgsmacht moet acties ondernemen voordat zij hun weg veilig kunnen vervolgen.

5.4. Wanneer moet de brug gerepareerd worden

De onderstaande grafiek geeft weer of de brug gerepareerd moet worden of veilig genoeg is voor het pantser-voertuig om over te steken. De grafiek berekent de draagkracht van de brug voor alle verschillende combinaties van onbeschadigde wapeningsstaven en de overgebleven breedtes van de drukzone. De zwarte lijn in de grafiek geeft weer wanneer M_{max} gelijk is aan M_{tank} . Alles rechts van de lijn betekent een veilige overgang (draagkracht is groter dan M_{tank}) en alles links van de zwarte lijn geeft geen veilige overgang (draagkracht is lager dan M_{tank}).



Figuur 5.6: Draagkracht als functie van wapeningsstaven en breedte van de drukzone

Voorbeeld: In het scenario beschreven in hoofdstuk 2.2.4 betekent dit dat er nog 18 wapeningsstaven over zijn (12 van de 30 zijn beschadigd) en een resterende breedte van 750 mm. Het snijpunt van deze variabelen valt in de categorie 'Brug repareren', wat overeenkomt met de berekeningen uit hoofdstuk 5.3.

5.4.1. De brug moet niet gerepareerd worden

Wanneer de brug niet gerepareerd hoeft te worden, zal een eenvoudige rijplaat over het gat worden geplaatst. Wel is een berekening nodig om te kijken of de rijplaat niet permanent vervormt wanneer de trailer + tank over de rijplaat heenrijden. De rijplaat is van staal en heeft een dikte van 15 mm. Voor de breedte wordt een wielafdruk van 500 mm bij 300 mm in beschouwing genomen. Hieruit volgen de volgende berekeningen:

$$W_{el,x} = \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^2 = \frac{1}{6} \cdot 500 \cdot 15^2 = 18750 \text{ mm}^3 \quad (5.25)$$

$$W_{el,y} = \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^2 = \frac{1}{6} \cdot 300 \cdot 15^2 = 11250 \text{ mm}^3 \quad (5.26)$$

$$M_{el,x} = W_{el,x} \cdot f_y = 18750 \cdot 235 = 4.41 \text{ kNm} \quad (5.27)$$

$$M_{el,y} = W_{el,y} \cdot f_y = 11250 \cdot 235 = 2.64 \text{ kNm} \quad (5.28)$$

Met $M_{el,x}$ en $M_{el,y}$ kan de maximale puntlast in het midden van de rijplaat worden berekend:

$$F_{max} = \frac{4 \cdot M_{el,x}}{l_x} + \frac{4 \cdot M_{el,y}}{l_y} = \frac{4 \cdot 4.41}{1 - 0.3} + \frac{4 \cdot 2.64}{1 - 0.5} = 46.3 \text{ kNm} \quad (5.29)$$

De trailer + tank hebben samen een gewicht van 921.2 kN verdeeld over 28 banden. Dit betekent dat elke band zorgt voor een puntlast van 32.9 kN (hoofdstuk 5.2.). De puntlast van de band is lager dan F_{max} . De stalen rijplaat kan zonder risico over het gat worden geplaatst zonder dat het permanente vervorming oplevert.

5.4.2. De brug moet wel gerepareerd worden

Wanneer de brug wel moet worden geprepareerd, zal de gekozen methode uit hoofdstuk 3 gebruikt worden. Voor het opvullen van het gat is er gekozen voor betonsoort C60/75, want C60/75 heeft na 24 uur, ongeveer een even grote rekenwaarde voor de betonsterkte, f_{cd} , als C30/37. Voor de nieuwe wapening gebruiken we staalsoort B500B met een diameter van 16 mm. Na de reparatie heeft de drukzone weer een breedte van 1200 mm.

$$\begin{aligned} N_s &= n_1 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \varnothing_{wapening,1}^2 \cdot f_{yd,1} + n_2 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \varnothing_{wapening,2}^2 \cdot f_{yd,2} \\ &= 18 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot 9.3^2 \cdot \frac{1670}{1.15} + 12 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot 16^2 \cdot \frac{500}{1.15} = 2824.6 \text{ kN} \end{aligned} \quad (5.30)$$

Waarin:

- n_1 het aantal niet beschadigde wapeningsstaven is;
- n_2 het aantal nieuw aangelegde wapeningsstaven is;
- $\varnothing_{wapening,1}^2$ de diameter van de niet beschadigde wapeningsstaven is;
- $\varnothing_{wapening,2}^2$ de diameter van de nieuw aangelegde wapeningsstaven is;
- $f_{yd,1}$ de vloeigrens van de niet beschadigde wapeningsstaven is;
- $f_{yd,2}$ de vloeigrens van de nieuwe wapeningsstaven is [7].

$$x_u = \frac{N_s}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2824.6 \cdot 10^3}{0.75 \cdot 1200 \cdot \frac{30}{1.5}} = 156.9 \text{ mm} \quad (5.31)$$

$$z = h - a - \beta \cdot x_u = 950 - 80 - \frac{7}{18} \cdot 156.9 = 809.0 \text{ mm} \quad (5.32)$$

$$M_{rd} = N_s \cdot z = 2824.6 \cdot 809.0 = 2285.0 \text{ kNm} \quad (5.33)$$

$$M_{max} = M_{rd} - M_{ed} = 2285 - 928.4 = 1356.6 \text{ kNm} \quad (5.34)$$

Het maximale moment dat de brug kan dragen is $M_{max} = 1356.6 \text{ kNm}$ en het moment dat de tank + trailer belast is $M_{tank} = 987.9 \text{ kNm}$. De brug heeft 24 uur na het storten van het beton, voldoende draagkracht om het werkende moment van de tank + trailer op te vangen. De krijgsmacht kan hun weg veilig vervolgen.

Het scenario in hoofdstuk 2.2.4 is een specifiek geval. Om te testen of de methode in alle situaties toepasbaar is, worden in de onderstaande berekeningen de volledige ligger vervangen. Hierbij zijn alle 30 wapeningsstaven beschadigd en ontbreekt de volledige drukzone. Figuur: 5.7 is de situatie geschetst.

$$\begin{aligned} N_s &= n_1 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \varnothing_{wapening,1}^2 \cdot F_{yd,1} + n_2 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot \varnothing_{wapening,2}^2 \cdot F_{yd,2} \\ &= 0 + 30 \cdot 1/4 \cdot \pi \cdot 16^2 \cdot \frac{500}{1.15} = 2622.5 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (5.35)$$

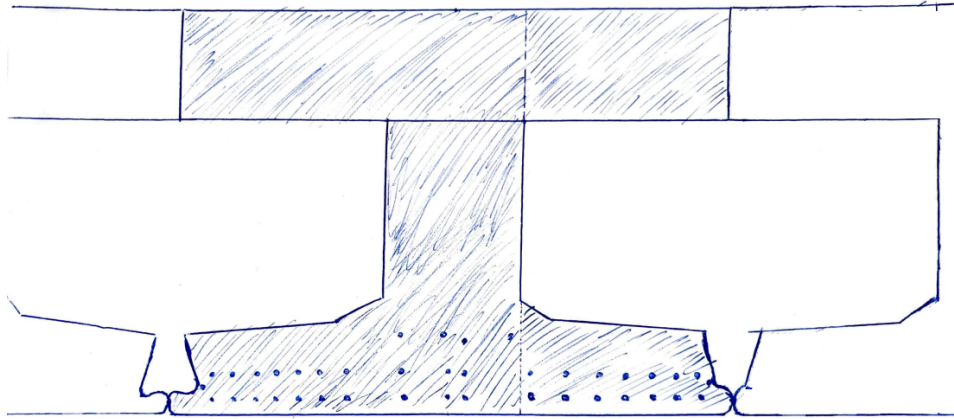
$$x_u = \frac{N_s}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{2622.5 \cdot 10^3}{0.75 \cdot 1200 \cdot \frac{30}{1.5}} = 145.7 \text{ mm} \quad (5.36)$$

$$z = h - a - \beta \cdot x_u = 950 - 80 - \frac{7}{18} \cdot 145.7 = 813.34 \text{ mm} \quad (5.37)$$

$$M_{rd} = N_s \cdot z = 2622.5 \cdot 8813.34 = 2133.0 \text{ kNm} \quad (5.38)$$

$$M_{max} = M_{rd} - M_{ed} = 2133.0 - 928.4 = 1204.6 \text{ kNm} \quad (5.39)$$

Dit scenario geeft aan dat het niet uit maakt waar de brug geraakt wordt. Met de uitgewerkte methode kan de krijgsmacht 24 uur na het storten van het beton, hun weg veilig over de brug vervolgen.



Figuur 5.7: Scenario waarbij alle 30 wapeningsstaven vervangen moeten worden

6

Verankeringslengte tussen de beschadigde- en nieuwe wapeningsstaaf

Als laatst moet de verankeringslengte tussen de beschadigde wapening en de nieuwe wapening worden berekend. De beschadigde wapening (FeP1670) wordt vervangen door nieuwe B500B wapening met een diameter van 16 mm. De formule van de basisverankeringslengte gaat als volgt:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset \cdot \sigma_{sd}}{4 \cdot f_{bd}} \quad (6.1)$$

met

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (6.2)$$

waarin:

- $\emptyset$ is de diameter van wapening;
- σ_{sd} is de rekenwaarde van de spanning in de staaf;
- f_{bd} is de uiterst opneembare aanhechtspanning;
- η_1 is een coëfficiënt betrokken op de kwaliteit van de aanhechtomstandigheden en de positie van de staaf tijdens het storten:
 - $\eta_1 = 1,0$ als 'goede' omstandigheden zijn verkregen;
 - $\eta_1 = 0,7$ voor alle andere gevallen en voor staven in met glijbekisting gefabriceerde constructieve elementen, tenzij kan zijn aangetoond dat de aanhechtomstandigheden 'goed' zijn;
- η_2 is betrokken op de staaf diameter:
 - $\eta_2 = 1.0$ voor $\emptyset \leq 32$ mm;
 - $\eta_2 = (132 - \emptyset) / 100$ voor $\emptyset > 32$ mm;
- f_{ctd} is de rekenwaarde van de treksterkte van het beton. Ten gevolge van toenemende brosheid van beton met hogere sterkte behoort $f_{ctk,0,05}$ hierbij te zijn beperkt tot de waarde voor C60/75, tenzij kan zijn getoetst dat de gemiddelde aanhechtsterkte toeneemt boven die grens [12].

Invullen van de twee vergelijkingen geeft de volgende basisverankeringslengte voor wapeningsstaaf B500B en FeP1670:

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2.25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{2.0}{1.5} = 3.0 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset \cdot \sigma_{sd}}{4 \cdot f_{bd}} = \frac{16 \cdot \frac{500}{1.15}}{4 \cdot 3.0} = 579.7 \text{ mm} \quad (6.4)$$

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset \cdot \sigma_{sd}}{4 \cdot f_{bd}} = \frac{9.3 \cdot \frac{1670}{1.15}}{4 \cdot 3.0} = 1125.4 \text{ mm} \quad (6.5)$$

Met de basisverankeringslengte kan de rekenwaarde van de overlappingslengte berekend worden. In dit geval wordt de overlappingslengte gebruikt in plaats van de rekenwaarde van de verankeringslengte omdat de beschadigde- en nieuwe wapeningsstaven over elkaar worden geplaatst. De overlappingslengte wordt als volgt berekend:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{0,min} \quad (6.6)$$

waarin:

- α_1 is de vorm van de staaf;
- α_2 is de betondekking: $\alpha_2 = 1 - 0.15 \cdot (c_d - \emptyset) / \emptyset$ met $0.7 \geq \alpha_2 \leq 1.0$;
- α_3 is de opsluiting door dwarswapening: $\alpha_3 = 1 - K \cdot \lambda$ met $0.7 \geq \alpha_3 \leq 1.0$;
- α_5 is opsluiting door dwarsdruk: $\alpha_5 = 1 - 0.04 \cdot p$ met $0.7 \geq \alpha_5 \leq 1.0$;
- α_6 is het percentage overlappende staven in verhouding tot de totale oppervlakte van de dwarsdoorsnede [12].

De waarden van de coëfficiënten kunnen geraadpleegd worden in tabel 8.2 van NEN-EN 1992-1-1 [12]. In dit specifieke geval worden de volgende waarden verkregen:

- $\alpha_1 = 1.0$
- $\alpha_2 = 1 - 0.15 \cdot (47 - 16) / 16 = 0.71$ (B500B) en $\alpha_2 = 1 - 0.15 \cdot (47 - 9.3) / 9.3 = 0.39$ (FeP1670)
- $\alpha_5 = 1 - 0.04 \cdot 0 = 1.0$ met $p = \frac{\text{Maximale draagkracht (kN/m)}}{\text{Doorsnede ligger}} = \frac{24.01 \text{ kN/m}}{1.2} = 20.08 \text{ kN/m}^2 = 0.02 \text{ MPa} \approx 0$
- $\alpha_6 = 1.0$ - tabel 8.3 van NEN-EN 1992-1-1 geraadpleegd [12]

Voor de HRP-700 ligger is geen specifieke informatie beschikbaar over de configuratie van de transversale wapening. Om conservatief te blijven, nemen we daarom $K = 0$ aan (geen transversale wapening), wat resulteert in $\alpha_3 = 1.0$. Met deze waarde en de overige coëfficiënten berekenen we de volgende overlappingslengte:

$$l_{0,B500B} = 1.0 \cdot 0.71 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 579.7 = 411.6 \text{ mm} \quad (6.7)$$

$$l_{0,FeP1670} = 1.0 \cdot 0.70 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1125.4 = 787.8 \text{ mm} \quad (6.8)$$

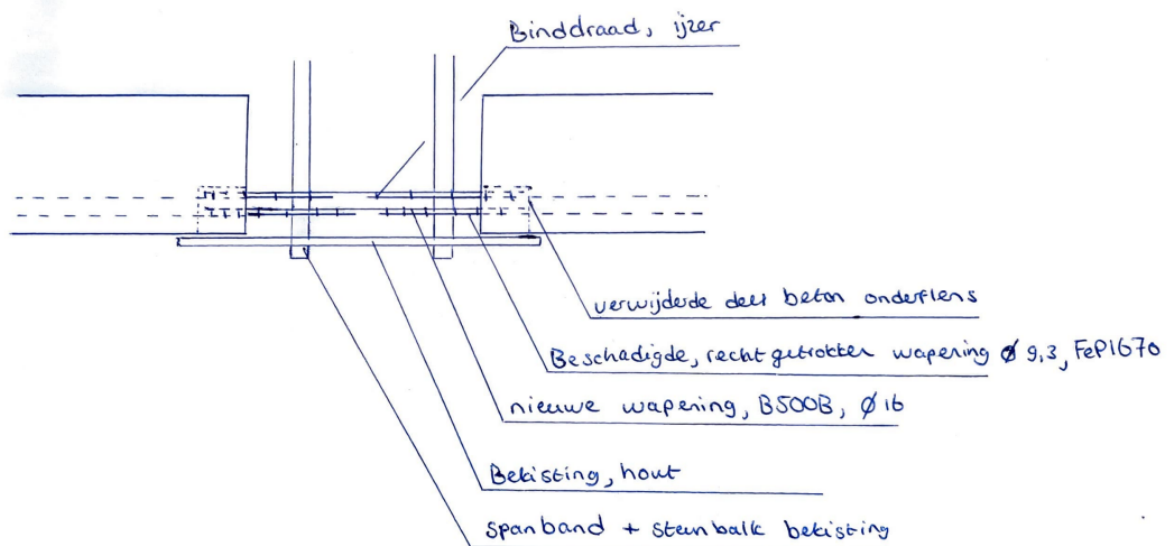
De berekeningen tonen aan dat een minimale overlappingslengte van 787.8 mm vereist is om de kracht effectief over te dragen op de nieuwe wapeningsstaven. Aangezien de wapening aan beide zijden van de ligger moet worden bevestigd, resulteert dit in een totale overlappingslengte van 1575.6 mm. Dit is echter niet ideaal, omdat de raketinslag een gat van 'maar' 1000 mm veroorzaakt. Om de wapeningsstaven correct te verankeren, zou dat in dit geval betekenen dat er extra beton rondom de wapening verwijderd moet worden, om aan de eisen te voldoen. Dit resultaat roept vragen op over de gekozen methode en efficiëntie van het stappenplan, wat in de discussie verder wordt besproken.

Uit afbeeldingen van beschadigde bruggen blijkt dat de wapening door tweeën breekt, maar geen grote delen verliest nadat de kruisraket is ingeslagen. Een voorbeeld van de gebroken wapening is te zien in figuur 6.1. Dit is gunstig omdat de rechtgetrokken wapening gebruikt kan worden als overlappingslengte.



Figuur 6.1: Beschadigde brug in de Krim, de Chongar brug [9].

figuur 6.2 toont hoe de gebroken wapening van de onderflens is rechtgetrokken en met binddraad is bevestigd aan de nieuwe wapening. Hoeveel beton rondom de wapening verwijderd moet worden, verschilt per situatie.



Figuur 6.2: Verankering van nieuwe wapeningsstaven aan beschadigde staven

7

Discussie

De berekeningen voor de draagkracht van de betonnen liggers in dit onderzoek zijn uitgevoerd volgens de richtlijnen en principes van het vak CTB2220-14: Concrete and Steel Structures, aangeboden door de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen aan de TU Delft. De formules voor het berekenen van de gemiddelde betondruksterkte en verankeringslengte zijn rechtstreeks ontleend aan de Europese norm NEN-EN 1992-1-1. Gezien de toepassing van deze gestandaardiseerde methoden en formules kan worden geconcludeerd dat, bij afwezigheid van menselijke fouten, een herhaling van dit onderzoek tot dezelfde resultaten zou leiden.

De resultaten van de berekeningen bevestigen de projectverwachtingen: in veel gevallen is de draagkracht van de brug dusdanig aangetast dat de pantservoertuigen zonder reparatie de brug niet meer kunnen passeren. Het pantservoertuig heeft samen met de trailer een aanzienlijk gewicht, wat zorgt voor veel spanning op de individuele liggers. Daarom is het in de meeste gevallen logisch dat reparatie nodig is.

Het onderzoek kan gebruikt worden wanneer Nederland zich in een oorlogssituatie verkeert en een dergelijke HRP-700 ligger met een overspanning van 20 meter is beschadigd. Hierbij wordt ook meteen duidelijk wat de beperkingen van het onderzoek zijn. Het huidige onderzoek beperkt zich tot een specifieke situatie waarbij een HRP-700 ligger met een overspanning van 20 meter moet worden gerepareerd. In de werkelijkheid verschillen overspanningen en ligger types enorm. Het onderzoek kan wel als leidraad gebruikt worden in andere situaties.

De lange verankeringslengtes brengen ook beperkingen met zich mee voor de uitgewerkte methode. Aanvankelijk werd niet verwacht dat deze lengtes groter zouden zijn dan de diameter van de inslag. Dit betekent dat in veel gevallen beton rondom de wapening moet worden verwijderd om aan de verankeringslengte te voldoen. Het verwijderen van het beton in de onderflens is niet meegenomen in het denkproces van de uitgewerkte methode en als direct gevolg niet in het stappenplan. Dit wil niet zeggen dat het stappenplan niet klopt, alleen dat er een extra stap aan moet worden toegevoegd. Daarnaast moet de methode verfijnd worden om manieren te vinden om het beton rondom de wapening te verwijderen. Deze beperkingen bieden daarentegen wel mooie vraagstukken voor toekomstige onderzoeken.

8

Conclusie

Dit bacheloronderzoek richtte zich op het ontwikkelen van een snelle en efficiënte methode voor het repareren van betonnen bruggen die beschadigd zijn door inslagen van kruisraketten. De belangrijkste bevindingen kunnen als volgt worden samengevat:

1. De diameter van het gat dat wordt veroorzaakt door een kruisraket ligt tussen 450 mm en 1600 mm, met een gemiddelde diameter van 1020 mm.
2. Een grafiek is ontwikkeld om te bepalen of de reparatie van de brug noodzakelijk is. De grafiek kan ook worden afgelezen zonder technische achtergrond.
3. Van de drie onderzochte reparatiemethodes bleek de combinatie van houten bekisting met spanbanden het meest effectief. De methode kan flexibel worden ingezet en snel worden toegepast.
4. Het gebruik van hoogsterktebeton (C60/75) zorgt ervoor dat de gerepareerde ligger binnen 24 uur na storten een vergelijkbare sterkte bereikt als het originele C30/37 beton.
5. De ontwikkelde reparatiemethode stelt de brug in staat om binnen 30 uur na de inslag weer veilig pantservoertuigen te dragen, zelfs in een scenario waarbij de gebroken wapening gerepareerd moet worden.

Hoewel de resultaten veelbelovend zijn, moet worden opgemerkt dat de efficiëntie van de methode in sommige gevallen lager kan uitvallen dan aanvankelijk verwacht. Met name de onverwachte lange verankeringslengtes vereisen extra handelingen, wat de totale reparatietijd kan beïnvloeden. Desalniettemin biedt de ontwikkelde methode een veelbelovende basis voor verdere optimalisatie, waardoor eventuele crisisreparaties in de toekomst snel en efficiënt kunnen worden uitgevoerd.

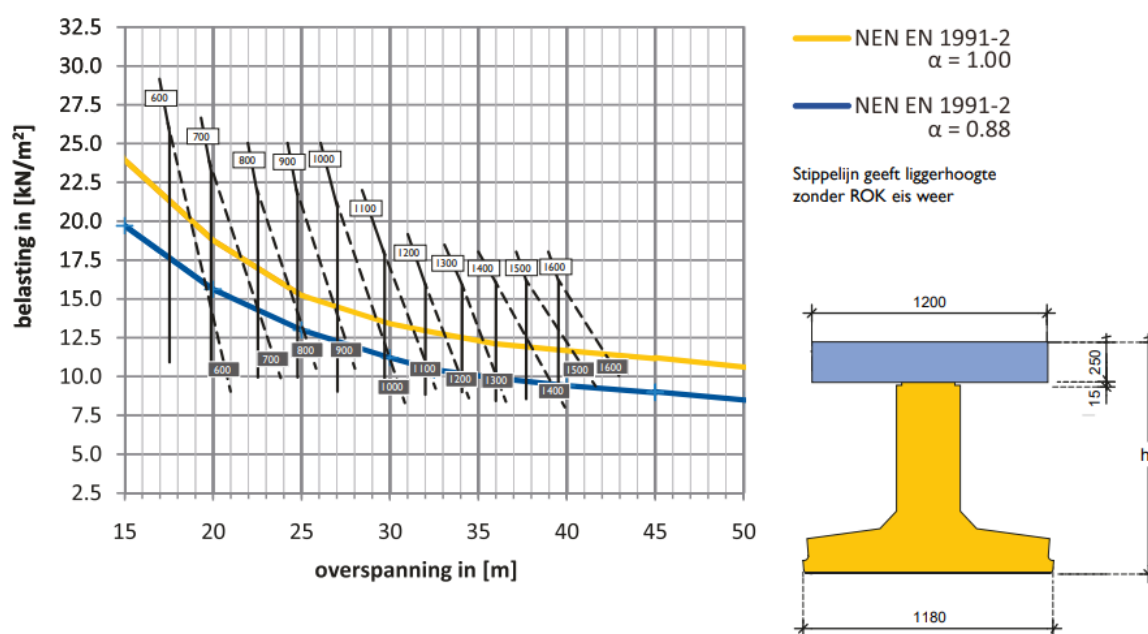
Bibliografie

- [1] Bundeswehr. Schwerlasttransporter SLT Mammut. 2025. URL: <https://www.bundeswehr.de/de/ausruestung-technik-bundeswehr/landsysteme-bundeswehr/schwerlasttransporter-slt-mammut>.
- [2] Carsguide.com. Subaru XV Dimensions 2020. URL: <https://www.carsguide.com.au/subaru/xv/car-dimensions/2023>.
- [3] Hans Galjaard e.a. Materiaalkeuze van bruggen en viaducten. nr 3. 2013. URL: <https://www.bruggenstichting.nl/images/bruggen2013/Materiaalkeuze.pdf>.
- [4] Haitsma Beton. HKO en HKO-XL Volstortliggers. URL: <https://www.haitsma.nl/bruggen-viaducten/hko-xl-volstortliggers-6-21m>.
- [5] Haitsma Beton. HKP - Haitsma Koker Profiel - kokerliggers. URL: <https://www.haitsma.nl/bruggen-viaducten/hkp-kokerliggers-16-70m>.
- [6] Haitsma Beton. HRP HRP-XL Haitsma Railligger Profiel. URL: <https://www.haitsma.nl/bruggen-viaducten/hrp-xl-railligger-15-45m>.
- [7] Max Hendriks en Technische Universiteit Delft - Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen. CTB2220 Beton Staalconstructies B2 Buiging. 21 nov 2023. URL: <https://brightspace.tudelft.nl/d21/le/content/595469/viewContent/3565715/View>.
- [8] Joostdevree.nl. voorgespannen beton, voorgerekt, nagerekt. URL: https://www.joostdevree.nl/shtmls/voorgespannen_beton.shtml.
- [9] KyivPost. Russian media reported that the Chongar bridge, which leads to occupied Crimea from Kher-son Region, was blown up at night. 22 jun 2023. URL: <https://x.com/KyivPost/status/1671763097281806336>.
- [10] Ministerie van Defensie. Leopard 2 A6-gevechtstank. 15 okt 2024. URL: <https://www.defensie.nl/onderwerpen/materieel/voertuigen/leopard-2a6-gevechtstank>.
- [11] Nederlands Normalisatie-instituut. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2015, p. 25–27. URL: <https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=3715982&RNR=3715982&token=89c95f29-523f-4a4c-9038-030da1e25032&type=pdf#pagemode=bookmarks>.
- [12] Nederlands Normalisatie-instituut. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2015, p. 142–149. URL: <https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=3715982&RNR=3715982&token=89c95f29-523f-4a4c-9038-030da1e25032&type=pdf#pagemode=bookmarks>.
- [13] Michael Persson, Erik Verwiel en Bobylev Sergei. ‘Dit is heel goed gedaan’: (satelliet)beelden van brug-gen van Cherson tonen de tactiek van de Oekraïners. 15 okt 2022. URL: <https://www.demorgen.be/nieuws/dit-is-heel-goed-gedaan-satelliet-beelden-van-bruggen-van-cherson-tonen-de-tactiek-van-de-oekraïners~bf7b0381/>.
- [14] Sleiderink.nl. De sterkteklasse van hout. Mrt 2025. URL: <https://www.sleiderink.nl/kennisbank/de-sterkteklasse-van-hout>.
- [15] Technische Universiteit Delft e.a. QUICK REFERENCE. Academic Year 2013-2014. 2014de ed. Section Structural en Building Engineering, 2014.
- [16] Ulrich's Referenzbilder. SLT-2 70t FSA "Mammut". URL: <https://www.ulrichwrede.de/rundgang-um-fahrzeuge/schwerlasttransporter/slt-2-70t-fsa-mammut/>.

9

Bijlage A - Ontwerpgrafiek HRP-700 ligger

HRP-ligger



Figuur 9.1: HRP-ligger ontwerpgrafiek

Profiel	Element h.o.h. 1200mm					Samengesteld profiel, druklaag 250mm				
	B	Ab	V	I	Q _{ref}	Ab _s	H _s	V _s	EI _s	Q _{sp}
HRP	mm ¹	mm ²	mm	mm ⁴ ×10 ⁹	kN/m	mm ²	mm ¹	mm ³	Nmm ² ×10 ¹⁵	kN/m
600	300	3,45E+05	204	9,30	8,63	3,00E+05	850	424	1,96	16,13
700	300	3,75E+05	240	14,7	9,38	3,00E+05	950	475	2,65	16,88
800	300	4,05E+05	277	21,9	10,13	3,00E+05	1050	525	3,46	17,63
900	300	4,35E+05	316	30,9	10,88	3,00E+05	1150	576	4,4	18,38
1000	300	4,65E+05	357	42,1	11,63	3,00E+05	1250	626	5,47	19,13
1100	300	4,95E+05	398	55,5	12,38	3,00E+05	1350	677	6,68	19,88
1200	300	5,25E+05	441	71,3	13,13	3,00E+05	1450	728	8,04	20,63
1300	300	5,55E+05	485	89,7	13,88	3,00E+05	1550	778	9,55	21,38
1400	300	5,85E+05	529	111,0	14,63	3,00E+05	1650	828	11,2	22,13
1500	300	6,15E+05	573	135,0	15,38	3,00E+05	1750	879	13,1	22,88
1600	300	6,45E+05	619	162,0	16,13	3,00E+05	1850	929	15,1	23,63

• Grafiekwaarden gebaseerd op betonkwaliteit elementen, betonkwaliteit druklaag C30/37
 • Profiel is tevens profielhoogte H.
 • v (vs) = zwaartepuntsafstand (samengesteld) profiel vanaf onderzijde.
 • Op aanvraag grotere overspanningen mogelijk.

Figuur 9.2: HRP-ligger grafiekwaarden

10

Bijlage B - Python code grafiek betondruksterkte

```
In [3]: def calculate_fcm_t(fcm, s, days):
    strengths = [0]
    for t in range(1, days + 1):
        beta_cc_t = math.exp(s * (1 - math.sqrt(28 / t)))
        fcm_t = beta_cc_t * fcm - 8
        strengths.append(max(0, fcm_t))
    return strengths

s = 0.2
days = list(range(0, 6))

fcm_values = [38, 43, 48, 53, 58, 63, 68, 78, 88, 98]

labels = ['C30/37', 'C35/45', 'C40/50', 'C45/55', 'C50/60', 'C55/67', 'C60/75', 'C70/85', 'C80/95', 'C90/105']

plt.figure(figsize=(20, 12))
for fcm, label in zip(fcm_values, labels):
    strengths = calculate_fcm_t(fcm, s, len(days) - 1)
    plt.plot(days, strengths, marker='o', label=label)

plt.title('Rekenwaarde van de druksterkte van verschillende beton soorten', fontsize=15)
plt.xlabel('Tijd (dagen)', fontsize=15)
plt.ylabel('Gemiddelde Druksterkte (MPa)', fontsize=15)
plt.grid(True)
plt.xticks(days)
plt.legend(title="Betonklassen")
plt.show()
plt.savefig('F_cd_diagram.pdf', bbox_inches='tight')
```

11

Bijlage C - Python code draagkrachtberekeningen

```
In [1]: %matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#data voor raketinslag
F_ck = 30
F_cd = F_ck / 1.5
n_voor = 30
wapening = 9.3
F_yd = 1670 / 1.15
alpha = 0.75
b_voor = 1200
h = 950
a = 80
beta = 7 / 18
L = 20
q_ed = 16.88
q_grafiek = 23 * 1.2
Y_g = 1.1
Y_Q = 1.35

#verdeelde belasting tank
Tank = (60000 * 9.81) / 10**3
trailer = 33.9 * 9.81
totaalgewicht = trailer + Tank
gewichtperlast = totaalgewicht / 2
verdeeldebelasting = (gewichtperlast / 14) * 0.6
```

```
In [66]: #berekeningen
N_s = n_voor * 0.25 * np.pi * (wapening ** 2) * F_yd
x_u = N_s / (alpha * b_voor * F_cd)

z = h - a - beta * x_u
M_rd = N_s * z
M_ed = (1/8) * Y_g * q_ed * L ** 2
M_Draag = (1/8) * q_grafiek * L ** 2

F_max = ((M_rd / 10**6) - M_ed) / (0.25 * Y_Q * 20)
M_tank = 45.5 * verdeelbelasting * Y_g
```

```
In [67]: #uitslagen voor raketinslag
print(f'N_s voor raket inslag = {(N_s / 10**3):.5} kN')
print()
print(f'x_u voor raket inslag = {(x_u):.5} mm')
print()
print(f'z voor inslag = {z:.5} mm')
print()
print(f'Momentcapaciteit (M_rd) = {(M_rd / 10**6):.5} kNm')
print()
print(f'Moment door eigen gewicht (M_ed) = {M_ed:.5} kNm')
print()
print(f'Moment uit ontwerpgrafiek = {M_Draag} kNm')
print()
print(f'Moment capaciteit - moment eigen gewicht = {((M_rd / 10**6) - M_ed):.5} kNm')
print()
print(f'Moment door gewicht tank in midden van overspanning is {M_tank:.5} kNm')
```

```

In [68]: #data na raket inslag
n_tijdens = 18
b_tijdens = 1200

In [69]: #berekeningen na raket inslag
N_s_tijdens = (n_tijdens * 0.25 * np.pi * (wapening ** 2) * F_yd)
x_u_tijdens = N_s_tijdens / (alpha * b_tijdens * F_cd)
z_tijdens = h - a - beta * x_u_tijdens
M_rd_tijdens = N_s_tijdens * z_tijdens

M_ed_tijdens = (1/8) * Y_g * q_ed * L ** 2
F_max_tijdens = ((M_rd_tijdens / 10**6) - M_ed_tijdens) / (0.25 * Y_Q * 20)

In [70]: print(f'N_s na raket inslag = {(N_s_tijdens / 10**3):.5} kN')
print()
print(f'x_u na raket inslag = {(x_u_tijdens):.5} mm')
print()
print(f'z na inslag = {z_tijdens:.5} mm')
print()
print(f'Momentcapaciteit na raket inslag = {(M_rd_tijdens / 10**6):.5} kNm')
print()
print(f'Moment door eigen gewicht (M_ed) na de raket inslag = {M_ed_tijdens:.5} kNm')
print()
print(f'Moment capaciteit - moment eigen gewicht na de raket inslag {(M_rd_tijdens / 10**6) - M_ed_tijdens:.5} kNm')
print()
print(f'Moment door gewicht tank in midden van overspanning is {M_tank:.5} kNm')

In [17]: veiligheidsgrens = M_tank

def calculate_extra_draagkracht(n, b):
    N_s = n * 0.25 * np.pi * (wapening ** 2) * F_yd
    denominator = alpha * b * F_cd
    if denominator != 0:
        x_u = N_s / denominator
    else:
        return -M_ed
    z = h - a - beta * x_u
    M_rd = N_s * z / 10**6
    return M_rd - M_ed

n_range = np.linspace(0.1, 30, 100)
b_range = np.linspace(0.1, 1200, 100)
N, B = np.meshgrid(n_range, b_range)

Extra_Draagkracht = np.vectorize(calculate_extra_draagkracht)(N, B)

plt.figure(figsize=(12, 8))

safety_contour = plt.contour(N, B, Extra_Draagkracht, levels=[veiligheidsgrens], colors='black', linewidths=3)
plt.clabel(safety_contour, inline=True, fmt='%1.2f kNm', fontsize=16)

plt.text(10, 550, 'Brug repareren', ha='center', va='center', rotation=0, fontsize=17, color='black')
plt.text(27, 840, 'Brug veilig', ha='center', va='center', rotation=0, fontsize=17, color='black')

plt.title('Draagkracht brug als functie van aantal wapeningsstaven en breedte van de drukzone', fontsize=15)
plt.xlabel('Aantal staven (n)', fontsize=15)
plt.ylabel('Breedte (b) in mm', fontsize=15)

plt.grid()
plt.show()

```

```

In [26]: #Data na reparatie
n_oudestaven = 0
n_nieuwestaven = 30 - n_oudestaven
diameter_oud = 9.3
diameter_nieuw = 16
F_yd_oud = 1670 / 1.15
F_yd_nieuw = 500 / 1.15
b_na = 1200

In [27]: #berekening na reparatie brug
N_s_na = (n_oudestaven * 0.25 * np.pi * (diameter_oud ** 2) * F_yd_oud) + (n_nieuwestaven * 0.25 * np.pi * (diameter_nieuw ** 2)
x_u_na = N_s_na / (alpha * b_na * F_cd)
z_na = h - a - beta * x_u_na
M_rd_na = N_s_na * z_na

M_ed = (1/8) * Y_g * q_ed * L ** 2
F_max_na = ((M_rd_na / 10**6) - M_ed) / (0.25 * Y_Q * 20)

In [75]: print(f'N_s na raket inslag = {(N_s_na / 10**3):.5} kN')
print()
print(f'x_u na raket inslag = {(x_u_na):.5} mm')
print()
print(f'z na inslag = {z_na:.5} mm')
print()
print(f'Momentcapaciteit na raket inslag = {(M_rd_na / 10**6):.5} kNm')
print()
print(f'Moment door eigen gewicht (M_ed) na de raket inslag = {M_ed:.5} kNm')
print()
print(f'Moment capaciteit - moment eigen gewicht na de raket inslag = {(M_rd_na / 10**6) - M_ed:.5} kNm')
print()
print(f'Moment door gewicht tank in midden van overspanning is {M_tank:.5} kNm')

```