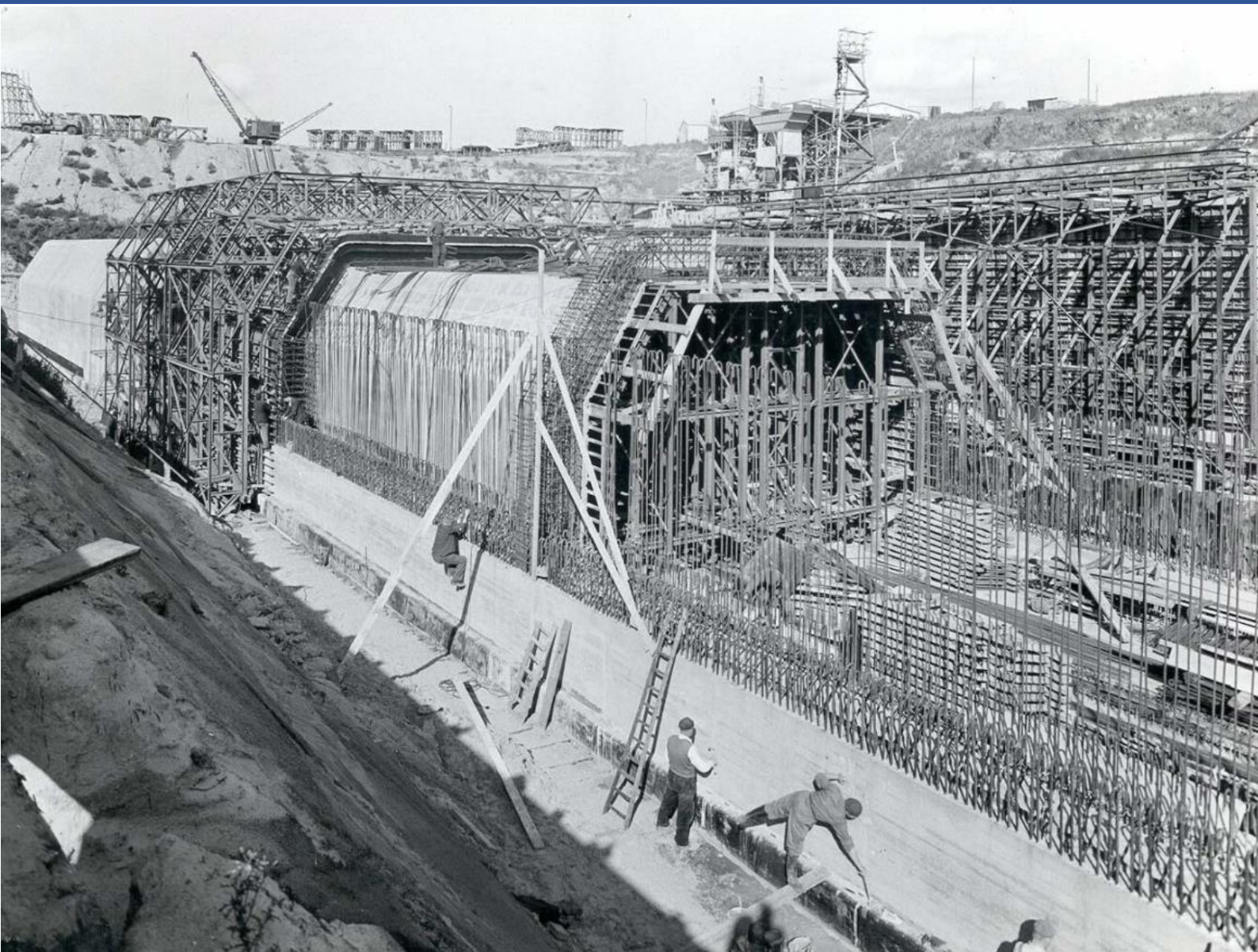


Bescherming van Noordzeekanaal tunnels tegen scheepvaart calamiteiten

Casus Velsertunnels



Mark van der Heijden

Maart 2021

Bescherming van Noordzeekanaal tunnels tegen scheepvaart calamiteiten

Casus Velsertunnels

door

Mark van der Heijden

bij gedeeltelijke vervulling aan de vereisten voor de graad van

Master of Science
in Civiele Techniek

aan de Technische Universiteit Delft,
om te worden verdedigd op dinsdag 30 maart 2021.

Afstudeercommissie:	dr. ir. M.A.N. Hendriks,	TU Delft
	dr. ir. C.B.M. Blom,	TU Delft
	ir. W.F. Molenaar,	TU Delft / Rijkswaterstaat
	ir. H.R.E. Dekker,	Rijkswaterstaat
	ir. C.E.J. Jacobs,	Rijkswaterstaat



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Afbeelding voorblad: *Bouw Velsertunnels tussen 1952 en 1957 door de Amsterdamsche Ballast Maatschappij*
<https://www.ballast-nedam.nl/projecten/velsertunnel/>

Voorwoord

Met de voltooiing van dit afstudeeronderzoek is er een eind gekomen aan mijn studie Civiele Techniek aan de TU Delft. Ik kan terugkijken op een fantastische studieperiode waarin ik veel heb mogen leren. Het afstuderen tijdens het coronavirus vanaf de thuiswerkplek gaf een extra uitdaging maar zal in de toekomst voordelen met zich meebrengen.

Ik ben Rijkswaterstaat zeer dankbaar om onderzoek te kunnen doen op een relevant en uitdagend vraagstuk. De afstudeercommissie ben ik veel dank verschuldigd voor hun uitstekende begeleiding tijdens het traject. De inzichten en kritische feedback van de commissie zijn altijd erg waardevol geweest. Verder wil ik Gerrit Wolsink en Derk Nellestein bedanken voor hun hulp tijdens het onderzoek. Daarnaast wil ik iedereen bedanken die verder heeft bijgedragen aan het onderzoek. Tot slot wil ik familie en vrienden bedanken voor hun steun tijdens het afstudeertraject.

*Mark van der Heijden
Pijnacker, maart 2021*

Samenvatting

Het Noordzeekanaal verbindt de Haven van Amsterdam met de Noordzee via het sluiscomplex van IJmuiden. In de huidige situatie is de Noordersluis maatgevend voor de maximale diepgang van de scheepvaart op het Noordzeekanaal. Met de geplande realisatie van Zeesluis IJmuiden begin 2022, zal de Noordersluis niet langer maatgevend zijn voor de maximale diepgang. In de nieuwe situatie zal de bodemligging van het Noordzeekanaal maatgevend zijn voor de maximale diepgang van de scheepvaart. Het Centraal Nautisch Beheer en Rijkswaterstaat wensen de scheepvaart capaciteit van het Noordzeekanaal te bepalen afhankelijk van de beschikbare waterdiepte en de daarbij passende diepgang van schepen.

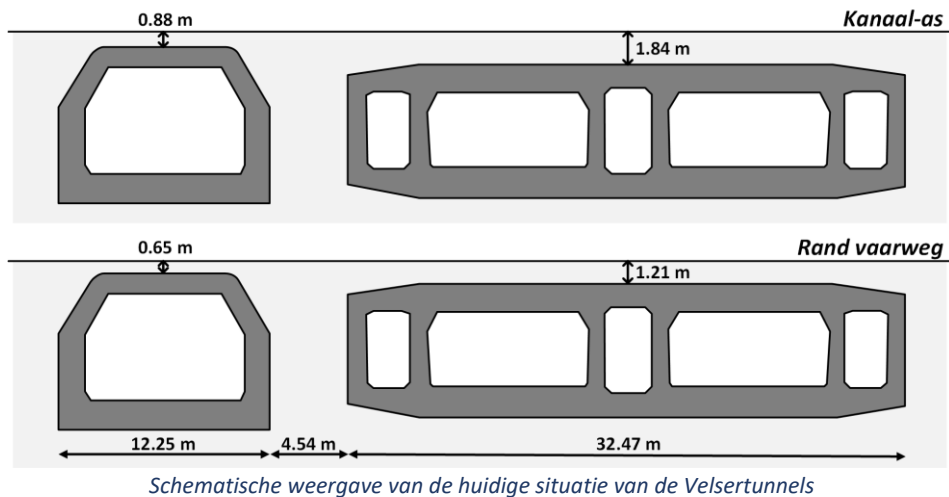
Uit onderzoek van Horvat & Partners (2017) bleek dat de Velserspoortunnel maatgevend is bij eventuele verdieping van het Noordzeekanaal. Daarnaast werd geconcludeerd dat de spoortunnel in de huidige situatie niet voldoet aan de eisen omtrent de minimale tunneldekking en de kielspeling. Onderzoek van Marin (2019) toonde vervolgens aan dat de dynamische kielspeling boven meerdere Noordzeekanaal tunnels te klein is. Tevens werd duidelijk dat door de optredende bodemsnelheden, veroorzaakt door schroefwerking en retourstroom, de kritische snelheid van de tunneldekking overschreden wordt.

Aangezien de constructieve veiligheid van de tunnels gelegen onder het Noordzeekanaal niet in het geding mag komen dient meer inzicht te worden verkregen in de veiligheid van de tunnels bij scheepvaart calamiteiten. De rol van de dekking op de tunnels is hierbij cruciaal. In dit rapport is daarom onderzocht hoe de tunneldekking van de Noordzeekanaal tunnels geoptimaliseerd kan worden ter voorkoming van scheepvaart calamiteiten. Aan de hand van literatuuronderzoek is inzicht verkregen in de scheepvaart calamiteiten. Vervolgens is de verkregen kennis toegepast op de casus van de Velsertunnels, door de tunnels te toetsen aan de vereiste veiligheid bij calamiteitsbelastingen. Tot slot zijn alternatieve vormen van tunnelbescherming onderzocht voor de Velsertunnels.

Rijkswaterstaat hanteert op basis van onderzoek en ervaring als uitgangspunt een gronddekking van minimaal 1 m voor de Noordzeekanaal tunnels als bescherming tegen calamiteitsbelastingen van scheepvaart. De Velserspoortunnel voldoet echter niet aan deze minimale dekking zoals getoond in onderstaande figuur. De huidige dekking op de Velsertunnels bestaat uit grof materiaal waaronder puin en grind. Verder zijn nog restanten uit de bouwphase aanwezig, waaronder een gekromde betonplaat en afgebrande damwanden.

De constructieve veiligheidseisen zijn maatgevend voor de veiligheid van de Velsertunnels in het geval van scheepvaart calamiteiten. Uit de *Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken* volgt de vereiste betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.3$ voor de gebruiksfase van de tunnel. Voor een restlevensduur van 30 jaar is de toegestane faalkans voor de Velsertunnels hierdoor gelijk aan $1.61 \cdot 10^{-5}$ per jaar.

Uit de risicoanalyse kwam naar voren dat de calamiteiten van een vallend scheepsanker, slepend scheepsanker, zinkend schip en aanvarend schip een risico zouden kunnen vormen voor de constructieve veiligheid van de Velsertunnels. Door een vallend scheepsanker boven de tunnel kan het tunneldak bezwijken op pons en vindt mogelijk afschuren van de beton aan de binnenzijde van de tunnel plaats. Een slepend scheepsanker kan de tunnel lokaal beschadigen doordat het scheepsanker achter de tunnel blijft haken of over het tunneldak schraapt. Bij de calamiteit van een zinkend schip kan de tunnel bezwijken op dwarskracht of buigende momenten. Een aanvarend schip zou bij een frontale botsing met de bovenhoek van de tunnel het bezwijken van de tunnelwand kunnen veroorzaken op dwarskracht.



De Velsertunnels zijn in het onderzoek op de scheepvaart calamiteiten getoetst door middel van een deterministische berekening waarbij de maatgevende ankermassa's en schepen afgeleid zijn uit de toegestane faalkans van $1.61 \cdot 10^{-5}$ per jaar. De kans op het gelijktijdig optreden van de calamiteiten is verwaarloosbaar geacht waardoor de tunnels afzonderlijk op de calamiteiten getoetst zijn aan de vereiste veiligheid. Uit de berekening kwam naar voren dat de spoortunnel niet voldeed op de calamiteit van het vallende scheepsanker en de autotunnel niet voldeed op het zinkende schip.

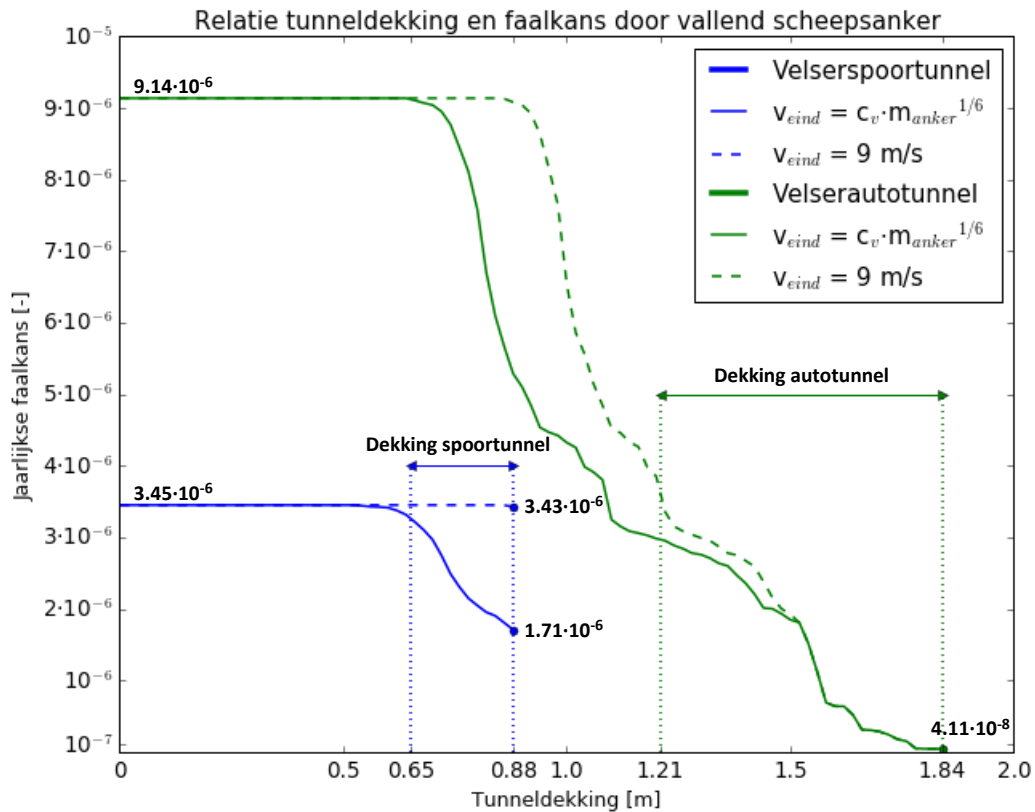
Vervolgens zijn daarom de faalkansen van de Velsertunnels bepaald bij de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip. Voor beide calamiteiten is de voorwaardelijke faalkans bepaald aan de hand van simulaties met behulp van de scheepsdata van het loodswezen. De totale jaarlijkse faalkansen volgden uit het product van de kans van optreden met de voorwaardelijke faalkans. Onderstaande tabel geeft de resultaten van de faalkansbepaling weer. Beide Velsertunnels voldoen aan de vereiste veiligheid bij de calamiteit van het vallende scheepsanker. Daarnaast voldoet de spoortunnel bovendien op de calamiteit van het zinkende schip. Echter voldoet de autotunnel niet aan de vereiste veiligheid bij de calamiteit van het zinkende schip. De faalkansen zijn voor groot deel afhankelijk van de kans van optreden en dienen wegens diverse onderliggende aannames als orde-grootte te worden beschouwd.

Tunnel	Jaarlijkse faalkans	
	Vallend scheepsanker	Zinkend schip
Velserspoortunnel	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$2.31 \cdot 10^{-6}$
Velserautotunnel	$7.32 \cdot 10^{-7}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$

Faalkansen Velsertunnels voor de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip

Voor de Velsertunnels is tevens een relatie afgeleid tussen de dikte van de tunneldekking en de faalkans door calamiteit van een vallend scheepsanker. In onderstaande figuur is deze relatie weergegeven waarbij tevens de huidige dekking op de Velsertunnels is aangegeven. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat bij een geringe tunneldekking de faalkans gelijk is aan de kans van optreden. Daarnaast lijkt de faalkans bij een bepaalde dikte van de tunneldekking gestaag af te nemen.

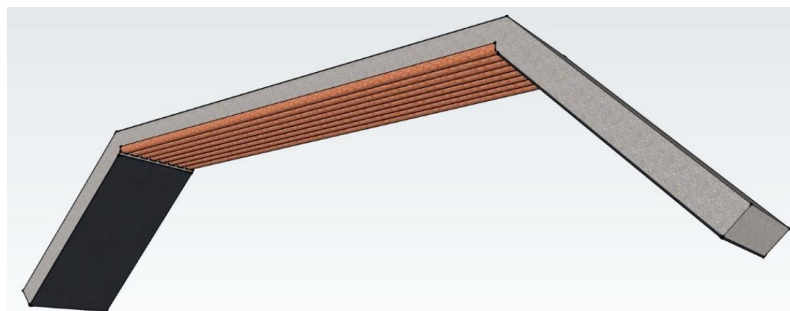
Er dient te worden opgemerkt dat de calamiteitsbelastingen in het onderzoek met methoden zijn gekwantificeerd waaronder verschillende aannames ten grondslag liggen. Bij de weerstand van de tunnel zijn verder vereenvoudigde bezwijkmechanismen aangenomen. Daarnaast zullen afwijkingen aanwezig zijn tussen de geschematiseerde situatie van de Velsertunnels met de gehanteerde gegevens van de scheepvaart en de werkelijke situatie. Bij de interpretatie van de resultaten dient daarom te worden opgemerkt dat er onzekerheden aanwezig zijn omtrent het werkelijke gedrag van tunnels tijdens de calamiteiten.



Verband tussen tunneldekking en de jaarlijkse faalkans van de Velsertunnels door een vallend scheepsanker

In het onderzoek zijn vervolgens alternatieve vormen van tunnelbescherming in kaart gebracht om de tunnelveiligheid tegen scheepvaart calamiteiten te verhogen of de dikte van de bescherming te minimaliseren. Er is hierbij onderscheid gemaakt tussen maatregelen en constructieve oplossingen. Maatregelen waardoor de kans dat scheepvaart calamiteiten optreden kunnen worden verlaagd betreffen handhaving op de vaarsnelheid of de diepgang en controle van scheepsankers en lieren. Daarnaast biedt het versmallen van het vaarwegprofiel mogelijkheden voor een kleinere tunneldekking.

Er zijn verschillende constructieve oplossingen in kaart gebracht die de tunnels kunnen beschermen tegen scheepvaart calamiteiten waaruit op basis van een multicriteria-analyse vier varianten zijn opgesteld. De variant met de vrijdragende beschermingsconstructie wordt het meest effectief geacht. De vrijdragende beschermingsconstructie is voor Velserspoortunnel verder globaal uitgewerkt waaruit blijkt dat de tunnelveiligheid bij scheepvaart calamiteiten door de constructie zou kunnen toenemen. In combinatie met het versmalde vaarwegprofiel kan de beschermingsconstructie een afname van ruim 30 cm in de tunneldekking worden gerealiseerd. Onderstaand wordt een prefab element van de vrijdragende beschermingsconstructie voor de spoortunnel getoond.



Ontwerp prefab element vrijdragende beschermingsconstructie Velserspoortunnel.

Voor de Noordzeekanaal tunnels geldt dat door toepassing van een beschermende constructie in plaats van de huidige tunneldekking, zowel de dikte van de bescherming kan afnemen als dat de veiligheid van de tunnels bij scheepvaart calamiteiten zou kunnen toenemen. Het principe van de vrijdragende beschermingsconstructie lijkt constructief gezien goed toepasbaar.

Aanbevolen wordt om vervolgonderzoek te doen naar de veiligheid van de Noordzeekanaal tunnels bij scheepvaart calamiteiten. Het gedrag van een tunnel bij de scheepvaart calamiteiten dient gedetailleerder onderzocht te worden, bijvoorbeeld aan de hand van FEM technieken. Verder dient de veiligheid van de andere Noordzeekanaal tunnels te worden bepaald bij scheepvaart calamiteiten. Daarnaast wordt aanbevolen om de vrijdragende beschermingsconstructie verder uit te werken en te optimaliseren. De beheerders van het Noordzeekanaal en de Noordzeekanaal tunnels wordt bovendien aanbevolen om toepasbaarheid van de genoemde maatregelen en de vrijdragende beschermingsconstructie te onderzoeken. Tot slot wordt aanbevolen om na te gaan of de *Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken* dient te worden aangescherpt.

Inhoud

1. Inleiding	10
2. Situatie en randvoorwaarden.....	12
2.1. Noordzeekanaal.....	12
2.2. Velsertunnels.....	13
2.3. Scheepvaart.....	15
2.4. Tunneldekking	16
2.5. Tunnelveiligheid	17
3. Calamiteitsbelastingen scheepvaart	19
3.1. Algemeen.....	19
3.2. Vallend scheepsanker.....	19
3.3. Slepnd scheepsanker	21
3.4. Zinkend schip.....	22
3.5. Aanvarend schip.....	23
4. Beoordeling Velsertunnels in de huidige situatie.....	25
4.1. Vallend scheepsanker.....	25
4.2. Slepnd scheepsanker	31
4.3. Zinkend schip.....	32
4.4. Aanvarend schip	34
4.5. Conclusie	36
5. Bepaling faalkansen Velsertunnels.....	37
5.1. Vallend scheepsanker.....	37
5.2. Zinkend schip.....	41
5.3. Conclusie	44
6. Alternatieve tunnelbeschermingen.....	45
6.1. Maatregelen	45
6.2. Constructieve oplossingen	47
6.3. Beoordeling alternatieve oplossingen.....	51
7. Varianten	53
7.1. Algemeen.....	53
7.2. Variant 1: Vrijdragende beschermingsconstructie.....	54
7.3. Variant 2: Bescherming van stortsteen met colloïdaal beton.....	55
7.4. Variant 3: Beschermingen asfalt en beton	56
7.5. Variant 4: Drempelconstructie	56
7.6. Conclusie	57

8. Uitwerking vrijdragende beschermingsconstructie	58
8.1. Algemeen.....	58
8.2. Ontwerpberekening	59
8.3. Uitvoeringsaspecten.....	63
8.4. Bodemsnelheden.....	64
8.5. Conclusie	65
9. Discussie	66
10. Conclusie	69
11. Aanbevelingen.....	72
Bibliografie	73
Figurenlijst.....	77
Tabellenlijst	81
Appendix A Velsertunnels.....	83
Appendix B Scheepvaart.....	89
Appendix C Risicoanalyse calamiteiten scheepvaart NZK	92
Appendix D Ontwerpgrafieken vallend scheepsanker (VALANK)	98
Appendix E Grootte impactbelasting vallend scheepsanker	100
Appendix F Penetratiediepte vallend en slepend scheepsanker	102
Appendix G Belasting zinkend schip	105
Appendix H Bepaling maatgevende vallende scheepsanker	106
Appendix I Bepaling maatgevende zinkende schip	112
Appendix J Bepaling krachten doorsnede Velserspoortunnel.....	118
Appendix K Bepaling krachten doorsnede Velserautotunnel.....	126
Appendix L Weerstand doorsnede Velsertunnels.....	132
Appendix M Afleiding impactsnelheid vallend anker met dekking	140
Appendix N Resultaten faalkansberekening zinkend schip	143

1. Inleiding

Het Noordzeekanaal verbindt de Haven van Amsterdam met de Noordzee via de Sluizen van IJmuiden. In de huidige situatie is de Noordersluis maatgevend voor de maximale diepgang¹ van de scheepvaart op het Noordzeekanaal. Op dit moment wordt Zeesluis IJmuiden gebouwd, die begin 2022 gerealiseerd moet zijn, waardoor het schutproces van zeeschepen onafhankelijk wordt van het getij. Met de realisatie van Zeesluis IJmuiden² is de Noordersluis niet langer maatgevend voor de maximale diepgang op het Noordzeekanaal. In deze nieuwe situatie zal de bodemligging van het Noordzeekanaal maatgevend zijn voor de maximale diepgang van de scheepvaart.

In opdracht van het Centraal Nautisch Beheer en Rijkswaterstaat is door Horvat & Partners in 2017 onderzoek gedaan naar de diepgang van scheepvaart op het Noordzeekanaal. Uit dit onderzoek bleek dat de diepteligging van de Velserspoortunnel maatgevend is bij het verdiepen van het Noordzeekanaal. Daarnaast werd in het onderzoek geconcludeerd dat de huidige situatie van de Velserspoortunnel niet voldoet aan de geldende eisen omtrent de minimale tunneldekking en kielspeling, welke noodzakelijk zijn tegen calamiteiten als vallende scheepsankers en aanvaringen. De uitkomsten van het onderzoek gaven bovendien aanleiding om Marin opdracht te geven voor onderzoek naar marginale schepen op het Noordzeekanaal. In het onderzoek van Marin (2019) werd aangetoond dat de dynamische kielspeling boven verschillende Noordzeekanaal tunnels te klein is. Tevens bleek dat in alle onderzochte situaties de optredende bodemsnelheden, veroorzaakt door schroefwerking en retourstroom, de kritische snelheid van de tunneldekking overschreden.

Naast de Velserspoortunnel zijn ook bij de andere Noordzeekanaal tunnels nog veel onzekerheden met betrekking tot de tunneldekking. Aangezien de constructieve veiligheid van de tunnels niet in het geding mag komen, is het van belang dat er meer inzicht verkregen wordt in de tunnelveiligheid bij scheepvaart calamiteiten. De invloed van de tunneldekking op de weerstand van de tunnels tegen de calamiteiten staat hierbij centraal. Dit resulteert in de volgende onderzoeksvraag:

Hoe kan de tunneldekking van de Noordzeekanaal tunnels worden geoptimaliseerd onder de vereiste veiligheid bij scheepvaart calamiteiten?

De hoofdvraag wordt opgesplitst in de volgende deelvragen:

- *Voldoen de Velsertunnels met de huidige tunneldekking aan de vereiste veiligheid omtrent calamiteitsbelastingen van scheepvaart?*
- *In hoeverre is er alternatieve bescherming van de Velsertunnels mogelijk waarmee de veiligheid van de tunnels zal toenemen?*
- *In hoeverre is er alternatieve bescherming van de Velsertunnels mogelijk waarmee de dikte van de tunnelbescherming zou kunnen afnemen?*

Op basis van literatuuronderzoek³ wordt inzicht verkregen in de scheepvaart calamiteiten om de optredende belastingen te kunnen bepalen. Vervolgens wordt de verkregen kennis toegepast op de casus van de Velsertunnels, waarbij de tunnels getoetst worden op de vereiste veiligheid bij calamiteitsbelastingen van scheepvaart. Tot slot worden alternatieve vormen van tunnelbescherming onderzocht voor de Velsertunnels, waarbij de meest geschikte oplossing wordt uitgewerkt.

¹ De maximale diepgang van een schip voor passage van de Noordersluis betreft 14.05 meter gemeten in zoet water. In zeewater gemeten is de maximale diepgang van een schip voor passage van de Noordersluis 13.75 m.

² Zeesluis IJmuiden wordt met een diepte van 18 meter dieper dan de 15 meter diepe Noordersluis.

³ In het rapport wordt voor een groot deel gebruik gemaakt van Nederlandse literatuur. Enerzijds komt dit door de grote hoeveelheid aanwezige literatuur bij Rijkswaterstaat. Daarnaast telt Nederland veel tunnels onder vaarwegen, met de daarbij behorende beperkte tunneldekkingen, waardoor er veel kennis aanwezig is.

De opbouw van dit rapport is als volgt. Hoofdstuk 2 beschrijft de situatie en de randvoorwaarden van de Velsertunnels. In Hoofdstuk 3 worden de door scheepvaart veroorzaakte calamiteitsbelastingen behandeld. Hoofdstuk 4 geeft een beoordeling van de huidige situatie van de Velsertunnels met betrekking tot deze calamiteitsbelastingen. Hoofdstuk 5 behandelt de faalkansen van de Velsertunnels door scheepvaart calamiteiten. In Hoofdstuk 6 wordt ingegaan op alternatieve vormen van tunnelbescherming waaruit tevens enkele varianten zullen voortkomen. Deze varianten worden vervolgens inzake de calamiteitsbelastingen verder uitgewerkt in Hoofdstuk 7. In de Hoofdstuk 8 wordt meest geschikte variant verder uitgewerkt. Hoofdstuk 9 behandelt de discussie waarin wordt gereflecteerd op de toegepaste methoden en aannames van het onderzoek. In Hoofdstuk 10 wordt de onderzoeksvraag beantwoord en Hoofdstuk 11 geeft de aanbevelingen van het onderzoek.

2. Situatie en randvoorwaarden

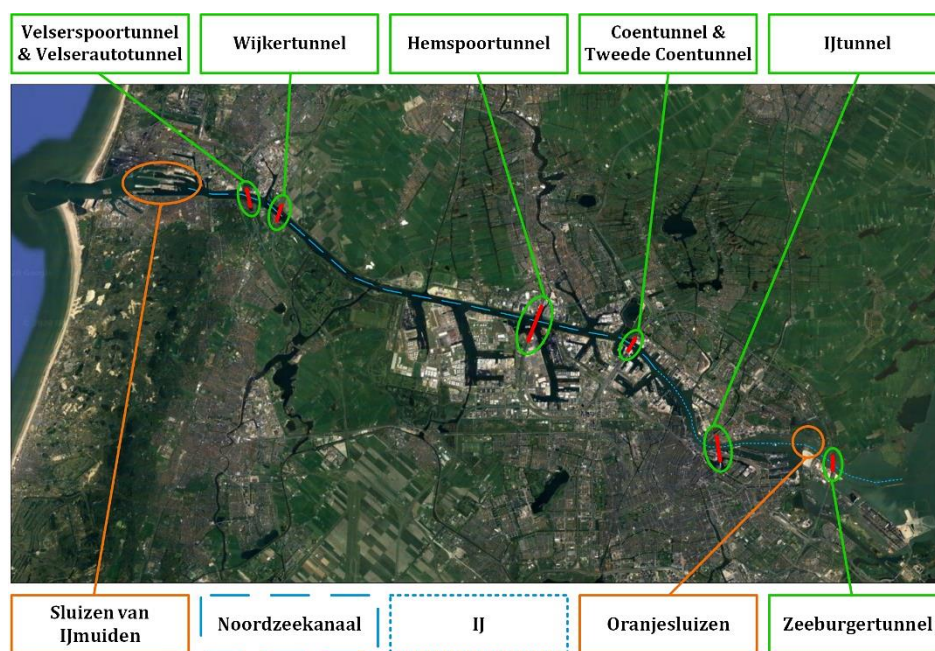
In dit hoofdstuk worden de situatie en randvoorwaarden van de Velsertunnels omtrent scheepvaart calamiteiten behandeld. Paragraaf 2.1 beschrijft de situatie van het Noordzeekanaal. In paragraaf 2.2 wordt ingegaan op de Velsertunnels. Paragraaf 2.3 behandelt scheepvaart op het Noordzeekanaal. De tunneldekking op de Velsertunnels wordt beschreven in paragraaf 2.4. Paragraaf 2.5 behandelt de vereiste tunnelveiligheid van de Velsertunnels met betrekking tot de calamiteitsbelastingen.

2.1. Noordzeekanaal

In deze paragraaf wordt de situatie van het Noordzeekanaal beschreven. Allereerst wordt ingegaan op het Noordzeekanaal in het algemeen, daarna worden de afmetingen van het Noordzeekanaal besproken om ten slotte de vaarregels op het Noordzeekanaal te behandelen.

2.1.1. Algemeen

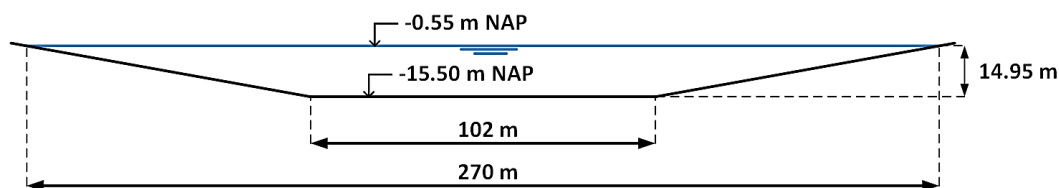
Het Noordzeekanaal loopt van de Sluizen van IJmuiden tot aan het IJ net na de Coentunnels, met een lengte van ongeveer 21 km. Zeeschepen moeten vanaf de Noordersluis circa 10 km op het kanaal afleggen voordat de eerste haven (Afrikahaven) wordt bereikt. Het beginsel van het Noordzeekanaal dateert reeds uit 1876 met beperkte afmetingen (Rijkswaterstaat, 1957). Over de jaren is het kanaal vervolgens diverse keren verruimd en verdiept tot het huidige profiel. Figuur 2-1 geeft een overzicht van het Noordzeekanaal met de tunnels gelegen onder het kanaal.



Figuur 2-1: Overzicht Noordzeekanaal met de bijbehorende tunnels (Google Maps (2020), bewerkt met Visio).

2.1.2. Afmetingen

Het waterpeil op het Noordzeekanaal fluctueert tussen NAP -0.30 m en NAP -0.55 m (Horvat & Partners, 2017). Uit het onderzoek van Marin (2019) volgt dat ter plaatse van de Velsertunnels de bodembreedte van het Noordzeekanaal 102 m bedraagt. De breedte van het kanaal ter hoogte van de waterlijn is 270 m volgens de rapporten van Deltares (2019) en Camerik (1999). Het Noordzeekanaal heeft een Nautisch Gegarandeerde Diepte (NGD) van NAP -15.50 m. Deze gegarandeerde bovengrens voor de bodemligging wordt echter niet overal gehaald (Marin, 2019). De ondiepste plekken binnen de vaargeul ter plaatse van de Velsertunnels liggen ongeveer op NAP -15.2 meter (Marin, 2019). Figuur 2-2 geeft een schematische doorsnede van het Noordzeekanaal weer bij het waterpeil op NAP -0.55 meter en de bodemdpte gelijk aan de NGD.



Figuur 2-2: Schematische weergave afmetingen Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels (bodem op NGD).

2.1.3. Vaarregels

In de huidige situatie met de Noordersluis is de maximale diepgang van scheepvaart op het Noordzeekanaal 14.05 meter in zoet water en 13.75 meter in zeewater (Port of Amsterdam, 2017). Verder is de grootste toegestane lengte van een schip 350 meter en de maximale breedte bedraagt 45 meter (Port of Amsterdam, 2017). Tabel 2-1 geeft een overzicht van de maximale toegestane snelheid voor scheepvaart in het Noordzeekanaal per diepgangsklasse ter plaatse van de Velsertunnels (Port of Amsterdam, 2020). De snelheden van 6 en 8 km/h zijn sinds 30 juli 2020 van kracht en gelden alleen ter plaatse van de Velsertunnels (Port of Amsterdam, 2020). Tevens geldt bij passage van de Velsertunnels dat het niet is toegestaan om scheepvaart met een grotere diepgang dan 13.55 meter te ontmoeten of op te lopen (Port of Amsterdam, 2020). Regelmatig overschrijdt scheepvaart op het Noordzeekanaal echter de maximale diepgang of de maximaal toegestane snelheid wat alsmede een grotere diepgang veroorzaakt (Horvat & Partners, 2017).

Diepgang (m)	Maximum snelheid	
	(km/h)	(\approx knopen)
$T < 4.0$	18	9.7
$4.0 \leq T < 8.0$	14	7.5
$8.0 \leq T < 13.55$	12	6.5
$13.55 \leq T < 13.85$	8	4.3
$T \geq 13.85$	6	3.2

Tabel 2-1: Maximaal toegestane snelheid van schepen op het NZK bij de Velsertunnels (Port of Amsterdam, 2020).

2.2. Velsertunnels

In deze paragraaf wordt ingegaan op de casus van de Velsertunnels. Eerst wordt algemeen ingegaan op de Velsertunnels, vervolgens wordt de bouwmethode van de Velsertunnels behandeld om ten slotte in te gaan op de positie van de Velsertunnels.

2.2.1. Algemeen

In Figuur 2-1 is reeds een overzicht weergegeven van de tunnels gelegen onder het Noordzeekanaal. De Velserspoortunnel en Velserautotunnel zijn de twee meest westelijk gelegen tunnels van de zes tunnels gelegen onder het Noordzeekanaal. De Velsertunnels vormen voor het gedeelte van de Amsterdamse haven waar de marginale scheepvaart aanlegt de grootste barrière, met betrekking tot de diepteligging van alle Noordzeekanaal tunnels. In dit onderzoek zijn de Velsertunnels daarom als casus gekozen. De spoortunnel maakt met twee sporen onderdeel uit van de spoorlijn Haarlem-Uitgeest en wordt beheerd door ProRail. De autotunnel is met twee rijstroken in beide richtingen onderdeel van de A22 (Velsen-Beverwijk) en wordt beheerd door Rijkswaterstaat.

2.2.2. Bouwmethode

De Velsertunnels zijn gebouwd volgens de open-bouwputmethode, waarbij eerst het zuidelijke gedeelte van het kanaal werd ingericht als bouwput terwijl het noordelijke gedeelte van het kanaal ruimte gaf voor het omgelegde kanaal (Rijkswaterstaat, 1957). Deze bouwput bestond uit een kistdam waarachter een ronde bouwkuip werd geheid met daarachter de zuidelijke bouwput. Nadat de bouw door de oorlog stil had gelegen werd een grotere ronde bouwkuip geheid omdat besloten werd om een dubbelbaans autotunnel te bouwen (Rijkswaterstaat, 1957).

Toen het zuidelijke gedeelte van de tunnels gereed was werd het noordelijke gedeelte van het kanaal ingericht als bouwput en werd het zuidelijke deel van de vaarweg hersteld (Rijkswaterstaat, 1957). Wederom werd hierbij een kistdam gebouwd, waarachter zich de noordelijke bouwput bevond. Deze kistdam werd boven het reeds voltooide gedeelte van de tunnels geplaatst met een brugplaat op de tunnels als fundering (Rijkswaterstaat, 1957). De damwanden van deze kistdammen zijn na het voltooien van de werkzaamheden getrokken en de kuipwanden werden afgebrand. De brugplaat en de resten van de kuipwanden zijn in de huidige situatie nog steeds aanwezig (Rijkswaterstaat, 1957). Appendix A.1 geeft een schematisch overzicht weer van de bouw van de Velsertunnels.

2.2.3. Positie

Tabel 2-2 geeft de relevante gegevens van de Velsertunnels weer met betrekking tot de positie, afkomstig uit het rapport van Camerik (1999). Alle gevonden literatuur met betrekking tot de diepteligging van de Velsertunnels bevestigt deze gegevens in grote lijnen. In Appendices A.2 en A.3 worden de tekeningen van de dwars- en lengtedoorsneden van de spoor- en autotunnel getoond (Camerik, 1999). Appendices A.4 en A.5 geven schematisch de langsdoorsneden van de spoor- en autotunnel weer.

Er dient te worden opgemerkt dat in Tabel 2-2 wordt aangenomen dat de ligging van het diepste punt van het dak van de tunnels op de as van het Noordzeekanaal ligt. Echter zou dit diepste punt zich ook op een kleine afstand van de kanaal-as kunnen bevinden. Er wordt geschat dat de afstand tussen het diepste punt van de tunnel en de as van het Noordzeekanaal maximaal enkele meters zal bedragen. Dit zou kunnen resulteren in een maximale afwijking van een paar centimeter in de diepteligging van het tunneldak van de Velsertunnels.

	Velserspoortunnel	Velserautotunnel
<i>Lengte totaal [m]</i>	3290 ⁴	1644
<i>Lengte gesloten deel [m]</i>	2067 ⁴	768
<i>Totale hoogte tunnel [m]</i>	9.04	7.77
<i>Totale breedte tunnel [m]</i>	12.25	32.47
<i>Dikte tunneldak [m]</i>	1.15	1.45
<i>Hoogte afgeschuinde hoek [m]</i>	3.45	0.55
<i>Ligging bovenkant tunnel (op kanaal-as) [m NAP]</i>	-16.38	-17.34
<i>Boogstraal R_v [m]</i>	7000	2500
<i>Afstand overgang boog naar helling [m]</i>	112.88	87.67
<i>Helling [-]</i>	1/60	1/28.5
<i>Kruisingshoek kanaal-as met tunneltracé [°]</i>	65	65

Tabel 2-2: Gegevens met betrekking tot de positie van de Velsertunnels (Camerik, 1999).

Uit metingen⁵ die recent in opdracht van Rijkswaterstaat zijn uitgevoerd blijkt dat de werkelijke diepteligging van het tunneldak goed overeenkomt met de gegevens in Tabel 2-2. De orde-grootte van een mogelijke afwijking in de verticale positie van de tunnel wordt geschat op enkele centimeters. Daarom worden in dit onderzoek de gepresenteerde gegevens uit Tabel 2-2 aangehouden betreffende de positie van de Velsertunnels.

Beide Velsertunnels zijn overigens voorzien van een waterdichte bekleding (circa 2 cm dik) die wordt beschermd door een beschermenschil van circa 11 cm gewapend beton (Camerik, 1999).

⁴ (Rijkswaterstaat, 1957)

⁵ DEEP B.V. Hydrografie en Geofysica (28/08/20)

2.3. Scheepvaart

In deze paragraaf wordt de scheepvaart op het Noordzeekanaal behandeld. De hydronautische aspecten worden besproken om vervolgens in te gaan op de afmetingen en de vaarwegpositie.

2.3.1. Hydronautische aspecten

De (statische) diepgang van een schip is de verticale afstand tussen de waterlijn en het laagste vaste punt van het (stilliggende) schip. Een schip welke vanaf IJmuiden richting de Amsterdamse haven vaart, zal een toenemende diepgang ervaren door de afnemende saliniteit (Horvat & Partners, 2017). In het onderzoek wordt volledig zoet water aangenomen ter plaatse van de Velsertunnels.

De kielspeling is gelijk aan het verschil tussen de waterdiepte en de diepgang van een schip. Squat is de afname van de kielspeling bij een varend schip. Een voortbewegend schip verdringt water bij de boeg wat terugstroomt onder en langs het schip (retourstroom) om het verplaatste watervolume van de scheepsromp te vervangen (Şerban, Katona, & Panaitescu, 2015). In ondiepe en/of smalle vaarwateren wordt een drukval veroorzaakt volgens de Wet van Bernoulli omdat de snelheid van de waterdeeltjes toeneemt (Şerban, Katona, & Panaitescu, 2015). Deze drukval leidt tot het verticaal zinken en trimmen⁶ van de scheepsromp⁷ (Şerban, Katona, & Panaitescu, 2015). Vergelijking (2-1) geeft een formule voor de maximale squat afhankelijk van de blokcoëfficiënt (C_B)⁸, de blokkeerfactor (S)⁹ en de vaarsnelheid in knopen (V_K) t.o.v. het water (Şerban, Katona, & Panaitescu, 2015). Uit de vergelijking blijkt dat de squat meer dan kwadratisch toeneemt bij toenemende vaarsnelheid.

$$\delta_{max} = \frac{C_B \cdot S^{0.81} \cdot V_K^{2.08}}{20} \quad (2-1)$$

Op het Noordzeekanaal gaat Rijkswaterstaat uit van tenminste 95 cm statische kielspeling (stilliggend schip) en wordt gerekend met een squat van 50 cm (Horvat & Partners, 2017). Dit resulteert in een dynamische kielspeling van 45 cm. Rijkswaterstaat stelt deze 45 cm voor de dynamische kielspeling als acceptabele ondergrens op basis van 'good-practice' (Horvat & Partners, 2017).

Een voortbewegend schip kan hoge bodemsnelheden veroorzaken door schroefwerking en retourstroom. Als gevolg van te hoge bodemsnelheden zou de tunneldekking kunnen eroderen. Appendices B.1 en B.2 gaan verder in op de bodemsnelheden door retourstroom en schroefwerking.

2.3.2. Afmetingen en positie

Voor de toekomstige situatie met de Zeesluis IJmuiden zijn de ontwerpschepen WOZMAX en OASIS-klasse gedefinieerd (Marin, 2019). Het scheepstype WOZMAX heeft afmetingen van 330 x 57 x 14.05 meter en het OASIS-klasse cruiseschip heeft de afmetingen 362 x 47.4 x 9.3 meter (Marin, 2019).

Er dient te worden opgemerkt dat een schip een grotere breedte van de vaarweg nodig heeft (padbreedte) dan de breedte van het schip door zijwind en de vetergang van het schip (Bezuyen, Stive, Vaes, Vrijling, & Zitman, 2012).

Appendix B.3 behandelt de positie van scheepvaart op het Noordzeekanaal t.p.v. de Velsertunnels.

⁶ Het voor- of achterover hellen van het schip (langsscheeps) afhankelijk van de blokcoëfficiënt.

⁷ De maximum squat vindt plaats bij de boeg als C_B groter is dan 0.7 en bij de spiegel als C_B kleiner is dan 0.7. Indien C_B ongeveer gelijk is aan 0.7 zal er geen trim effect optreden (Şerban, Katona, & Panaitescu, 2015).

⁸ De blokcoëfficiënt (C_B) is de verhouding tussen het onder water volume van het schip en het volume van een rechthoekig blok met de afmetingen van het schip onder water.

⁹ De blokkeerfactor (S) is gelijk aan de oppervlakte van de ondergedompelde doorsnede van het schip gedeeld door de oppervlakte van de doorsnede van het kanaal (Şerban, Katona, & Panaitescu, 2015).

2.4. Tunneldekking

In deze paragraaf wordt de tunneldekking op de Velsertunnels behandeld. Hierbij wordt eerst algemeen ingegaan op de tunneldekking, vervolgens wordt gekeken naar de samenstelling van de dekking op de Velsertunnels om uiteindelijk de restanten uit de bouwfase toe te lichten.

2.4.1. Algemeen

De aanwezige dekking op de Noordzeekanaal tunnels heeft als functie om de tunnels te beschermen tegen calamiteitsbelastingen van scheepvaart. De dekking heeft geen functie om opdrijven te voorkomen zoals wel het geval is bij geboorde tunnels en de Zeeburgertunnel. Uit de *Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken* (ROK) volgt dat de bovenzijde van het dak van een zinktunnel voorzien moet zijn van een beschermlaag zoals is beschreven in het rapport VAL 99-18 (Rijkswaterstaat, 2017).

Op dit moment hanteert Rijkswaterstaat als uitgangspunt een gronddekking van minimaal 1 m op de tunnels in het Noordzeekanaal op basis van onderzoeken en ervaring (Wolsink, 2005). Verdieping van de vaarweg door het verminderen van deze vereiste 1 m als dikte van de dekking wordt dan ook niet toelaatbaar geacht (Wolsink, 2005). Appendix A.4 laat zien dat de dekking op de Velserspoortunnel kleiner is dan de vereiste dekking wanneer de Nautisch Gegarandeerde Diepte wordt gehanteerd voor het Noordzeekanaal. Appendix A.5 laat zien dat de Velserautotunnel wel voldoet aan de minimale dekking bij hantering van de NGD.

2.4.2. Samenstelling

De tunneldekking op de Velsertunnels bestaat uit grof materiaal waaronder puin en grind (Rijkswaterstaat WNN, 2017). Het is onbekend of onder het grove materiaal nog zand of grond aanwezig is. In 2006 is onder het vaarwegprofiel een steenslag (graniet 16/22) als dekking aangebracht bij het onderhoudsbaggerwerk. De ontwikkelingen in de tijd laten echter zien dat deze laag niet stabiel is. In 2017 is een onderzoek naar de bodemsamenstelling verricht door duikers. Boven het tunneldak van de Velserspoortunnel werd een ca. 10 cm dikke laag slib aangetroffen, met daaronder ca. 50-80 cm breuksteen en daaronder een zeer harde kleilaag met een geschatte dikte van ca. 5-20 cm (Rijkswaterstaat WNN, 2017). Aan de west- en oostzijde van de spoortunnel is geen grind en/of breuksteen aangetroffen. Er is bij het onderzoek niet in geslaagd om het daadwerkelijke dak van de Velserspoortunnel vast te stellen (Rijkswaterstaat WNN, 2017).

2.4.3. Restanten bouwfase

Op de Velsertunnels is nog steeds een gekromde betonplaat aanwezig welke in de bouwfase is toegepast als fundering van de 2^e kistdam (Rijkswaterstaat, 1957). De bovenkant van de plaat bevindt zich op NAP -15.50 m (Rijkswaterstaat, 1958). Figuur A-3 geeft deze gewapende betonnen plaat weer tijdens de bouw (Appendix A.1). Figuur A-4 geeft de afmetingen van de plaat en positie op de Velsertunnels weer. De betonplaat zou mogelijk als tunnelbescherming kunnen dienen. Het eventueel weghalen van deze plaat zou daarnaast risico's met zich mee kunnen brengen.

Tevens stelde een duikonderzoek in 2003 vast dat er damwand restanten aanwezig zijn ter plaatse van de Velsertunnels. De damwanden steken volgens dit onderzoek maximaal 10 cm boven de bodem uit (150 cm bij een plaatselijke verdieping). Op het tunneldak van de Velsertunnels zijn geen damwandrestanten aangetroffen. De damwand restanten betreffen waarschijnlijk de afgebrande wanden van de bouwkuip omdat men in de bouwfase van de tunnels niet in staat was om deze wanden te verwijderen (Rijkswaterstaat, 1957). De damwanden van de kistdammen konden wel worden getrokken na voltooiing van de werkzaamheden (Rijkswaterstaat, 1957).

2.5. Tunnelveiligheid

In deze paragraaf wordt de vereiste tunnelveiligheid van de Velsertunnels behandeld met betrekking tot calamiteitsbelastingen van scheepvaart. Eerst wordt ingegaan op de eisen met betrekking tot de waterveiligheid. Vervolgens worden de eisen ten aanzien van de constructieve veiligheid beschreven.

2.5.1. Waterveiligheid

Bij tunnels wordt de waterkering rondom de tunnelafrit gevormd door zogenaamde kanteldijken¹⁰ (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Door toepassing van deze kanteldijken maakt een tunnel geen onderdeel uit van de waterkering. De kanteldijk voorkomt immers dat het achterland inundeert wanneer de tunnel zou falen. Dit is het geval voor de afgezonken wegtunnels in Nederland. Spoortunnels daarentegen hebben lang niet altijd kanteldijken¹¹, deze zullen dan voorzien zijn van valdeuren. De tunnel is in dat geval wel onderdeel van de waterkering omdat bij gecombineerd falen van zowel de tunnel als de valdeur het achterland zal inunderen.

De kruinhoogtes van de oevers langs het Noordzeekanaal zijn ongeveer gelijk aan het maaiveld buiten het kanaal. De oevers langs het Noordzeekanaal zijn dan ook niet bestemd tot directe kering van hoog water (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). De toeritten van de Velserspoortunnel en Velserautotunnel bestaan uit betonnen wanden die doorlopen tot het hoogste punt van de aansluitende wegen. Bij de Velserspoortunnel zijn geen valdeuren aanwezig zoals bij andere spoortunnels wel het geval is. Wanneer de Velsertunnels falen zal de omgeving geen significante nadelige gevolgen ondervinden. Het deel van de Velsertunnels dat zich onder het Noordzeekanaal bevindt heeft daardoor geen waterkerende functie. Voor de andere Noordzeekanaal tunnels gelden soortgelijke situaties waardoor alle Noordzeekanaal tunnels niet aan de eisen voor waterkeringen hoeven te voldoen bij calamiteitsbelastingen van de scheepvaart.

2.5.2. Constructieve veiligheid

Uit het Bouwbesluit 2012 volgt dat de betrouwbaarheid van een constructie dient te voldoen aan de NEN-EN 1990 bij nieuwbouw en NEN 8700 bij bestaande bouw. Omdat de Velsertunnels vallen onder bestaande constructies is de NEN 8700 van toepassing waarin de grondslagen voor de constructieve beoordeling van bestaande bouw worden behandeld. Figuur 2-3 geeft de betrouwbaarheidsindices bij verbouw weer volgens de NEN 8700. Volgens de ROK dienen tunnels onder hoofdvaarwegen te worden ingedeeld in gevolgklasse CC3 (Rijkswaterstaat, 2017). Dit zou inhouden dat de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.8$ dient te worden gehanteerd.

Minimumwaarden betrouwbaarheidsindices bij verbouw			
Gevolgklasse	Minimum-referentieperiode	β	
		Wind niet dominant	Wind dominant
CC3	15 jaar ^b	3,8 (3,6)	3,3 ^a (2,6)
CC2	15 jaar ^b	3,3 (3,1)	2,5 ^a
CC1	15 jaar	2,8	1,8

^a Hierbij is de ondergrens voor persoonlijke veiligheid maatgevend.
^b In het algemeen wordt aanbevolen een restlevensduur en derhalve een referentieperiode van 30 jaar.
 De waarden tussen haakjes mogen alleen zijn toegepast bij bouwwerken waarvoor een omgevingsvergunning voor het bouwen is verleend onder het Bouwbesluit 2003 of daarvoor.

Figuur 2-3: Minimumwaarden voor de betrouwbaarheidsindex bij minimumreferentieperiode (UGT) (NEN 8700, 2015).

¹⁰ Deze in grond uitgevoerde kanteldijken dienen aan te sluiten op het punt waar het weglichaam voldoende kerende hoogte heeft (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

¹¹ Vanwege de flauwe hellingen van een spoortunnel zouden de kanteldijken zeer lang moeten worden.

In de *Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken* (RBK) wordt echter een aanvulling gegeven op de NEN 8700. De RBK kan worden gebruikt voor het beoordelen van de constructieve veiligheid van bestaande kunstwerken door middel van berekening en onderzoek (Rijkswaterstaat, 2013). De RBK bepalingen zijn daarbij maatgevend boven die van de NEN 8700 (Rijkswaterstaat, 2013). Figuur 2-4 geeft een overzicht van de verschillende veiligheidsniveaus afkomstig uit de RBK waarbij het gebruiksniveau is aangegeven. Rijkswaterstaat hanteert de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.3$ als ondergrens voor de constructieve veiligheid van bestaande kunstwerken (Rijkswaterstaat, 2013).

		Blijvend 6.10 a	Blijvend 6.10 b	Verkeer	Wind	Overig veranderlijk
	β	$\gamma_{G, sup}$	$\xi_{\gamma_{G, sup}}$	$\gamma_{0,1}$	$\gamma_{0,1}$	$\gamma_{0,1}$
Nieuwbouw	4,3	1,40	1,25	1,50	1,65	1,65
Verbouw	3,6	1,30	1,15	1,30	1,60	1,50
Gebruik	3,3	1,25	1,15	1,25	1,50	1,30
Afkeur	3,1	1,25	1,10	1,25	1,50	1,30

Figuur 2-4: Veiligheidsniveaus kunstwerken volgens de RBK 1.1 (Rijkswaterstaat, 2013).

De Velsertunnels dienen in de huidige situatie van gebruik dus minimaal te voldoen aan de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.3$, aangezien de RBK maatgevend is boven de NEN 8700. Bij de restlevensduur van de Velsertunnels dient een minimum van 30 jaar te worden aangehouden (Rijkswaterstaat, 2013). Deze restlevensduur is ook gebruikt bij de uitgevoerde renovatie van de Velserautotunnel in 2016. Met de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.3$ en de restlevensduur van 30 jaar is de toegestane faalkans voor de Velsertunnels gelijk aan $1.61 \cdot 10^{-5}$ per jaar.

Bij vervanging van de huidige tunneldekking door een beschermende constructie wordt dit als verbouw gezien waardoor dient te worden voldaan aan de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.6$. Met de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.6$ en de restlevensduur van 30 jaar is de toegestane faalkans voor de Velsertunnels in de situatie van de beschermingsconstructie gelijk aan $5.3 \cdot 10^{-6}$ per jaar.

Er dient te worden opgemerkt dat in de betrouwbaarheidsindex alle belastingen dienen te worden meegenomen. Naast calamiteitsbelastingen van scheepvaart zijn er ook de calamiteitsbelastingen zoals brand en explosies. De kans op het gelijktijdig optreden van meerdere calamiteitsbelastingen is zodanig klein dat de calamiteitsbelastingen los van elkaar in rekening worden gebracht¹². Er zal verder dan ook niet worden ingegaan op de calamiteitsbelastingen van brand en explosies. Bij de calamiteitsbelastingen van de scheepvaart dienen de Velsertunnels dus voor alle calamiteiten afzonderlijk aan de toegestane faalkansen te voldoen. De jaarlijkse toegestane faalkans is voor de huidige situatie gelijk aan $1.61 \cdot 10^{-5}$ en bij realisatie van een beschermende constructie $5.3 \cdot 10^{-6}$.

¹² Dit kan worden gezien als dat de momentaanfactoren van de verschillende calamiteiten gelijk aan nul zijn in de deterministische situatie. Er wordt hiermee aangenomen dat bijvoorbeeld de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een tunnelbrand nooit gelijktijdig zullen optreden.

3. Calamiteitsbelastingen scheepvaart

Dit hoofdstuk behandelt de calamiteitsbelastingen van scheepvaart voor tunnels onder de vaarweg. Allereerst wordt in paragraaf 3.1 algemeen ingegaan op de scheepvaart calamiteiten. Vervolgens worden de calamiteiten van een vallend scheepsanker, een slepend scheepsanker, een zinkend schip en een aanvarend schip inhoudelijk behandeld in paragrafen 3.2 t/m 3.5.

3.1. Algemeen

In Appendix C zijn de resultaten gepresenteerd van de risicoanalyse van de Velsertunnels bij scheepvaart calamiteiten voor de huidige situatie van het Noordzeekanaal. Uit de analyse volgt dat de calamiteiten van een vallend scheepsanker, slepend scheepsanker, zinkend schip en aanvarend schip een risico zouden kunnen vormen voor de constructieve veiligheid van de Velsertunnels. In dit hoofdstuk zullen deze calamiteiten daarom theoretisch worden behandeld.

Optredende bodemsnelheden door schroefwerking of retourstroom kunnen resulteren in erosie van de tunneldekking waardoor de weerstand van de tunnels tegen andere calamiteiten afneemt. Echter zullen de tunnels op zichzelf niet falen door optredende bodemsnelheden door schroefwerking en retourstroom, waardoor deze niet als calamiteit worden behandeld. In Appendices B.1 en B.2 wordt wel ingegaan op de bodemsnelheden door retourstroom en schroefwerking.

3.2. Vallend scheepsanker

In deze paragraaf wordt de calamiteit van een vallend scheepsanker behandeld. Er wordt ingegaan op de kwalitatieve beschrijving van de calamiteit, de belastinggrootte en de tunnelweerstand.

3.2.1. Kwalitatieve beschrijving

Een vallend scheepsanker¹³ dat op een tunnel valt kan resulteren in (lokaal) bezwijken van het tunneldak. TNO (2009) stelt dat pons en dwarskracht de maatgevende bezwijkmechanismen van de tunnel zijn. Verder wordt aangegeven dat er mogelijk afspatten van het beton aan de binnenkant van de tunnel plaatsvindt waardoor er potentieel letsel kan optreden bij personen in de tunnel. Deze eventuele schade blijft beperkt tot het gebied waar het anker het dak treft, waardoor er geen globaal bezwijken optreedt. Echter zal na lokaal bezwijken waarschijnlijk lekkage optreden (TNO, 2009).

Hemelop (2000) concludeerde al eerder dat zonder afdekking van het tunneldak met een laag zand en/of grind, het dak al snel kan bezwijken onder de stootbelasting van een vallend anker. Volgens Hemelop zijn de maatgevende mechanismen pons en het afspatten van een laag beton aan de onderkant van het dak, door de schokgolf in het dak. Dit is in overeenstemming met bovenstaande. De loskomende betonnen schollen aan de binnenkant van de tunnel worden veroorzaakt door de opgewekte drukgolf die aan de onderzijde van het tunneldak als trek golf terugkeert (Wolsink, 2008).

Een vallend scheepsanker is het gevolg van materieel falen of menselijk handelen (TNO, 1995). Het anker zal met toenemende snelheid van het scheepsdek richting het wateroppervlak vallen (TNO, 1995). Het scheepsanker kan hierbij met of zonder ankerketting vallen. Bij aanwezigheid van de ankerketting zal de snelheid aan het wateroppervlak lager zijn dan bij een los scheepsanker. Echter neemt de snelheid onder water toe bij een aanwezige ankerketting en af voor een los anker (Zhu, Hao, & Zhang, 2019). Bij voldoende diep water¹⁴ bereikt het vallende scheepsanker een constante asymptotische eindsnelheid ongeacht aanwezigheid van de ankerketting (Zhu et al., 2019). Dit maakt de eindsnelheid onafhankelijk van aanwezigheid van een ankerketting en de valhoogte boven water.

¹³ Vallende spudpalen worden gezien als vallende ankers met gewicht van de spudpaal (Rijkswaterstaat, 2017).

¹⁴ Het Noordzeekanaal (circa 15 meter diep) wordt voldoende diep geacht voor het bereiken van deze snelheid.

3.2.2. Grootte belasting

De impact van een vallend scheepsanker op een tunnel is afhankelijk van de ankermassa, de grootte van het impact-oppervlak en de impact-snelheid (TNO, 1995). Globale schattingen geven aan dat de valsnelheid van scheepsankers in water ca. 7-9 m/s bedraagt en dat de meest voorkomende ankermassa's tussen de 150 kg en 27 ton liggen (TNO, 1995). Vergelijking (3-1) geeft een afleiding voor het dwarsoppervlak van een scheepsanker (m^2) afhankelijk van de ankermassa (kg) en de factor c_a ¹⁵ (TNO, 1995). Het contactoppervlak van het vallende scheepsanker¹⁶ met het tunneldak wordt aangenomen op een derde van het dwarsoppervlak van het anker (TNO, 2009). Vergelijking (3-2) geeft een verband weer voor de eindsnelheid van een vallend scheepsanker afhankelijk van de massa (kg) en factor c_v ¹⁷ (TNO, 1995). Alle moderne schepen zijn met stokloze ankers uitgerust (TNO, 1995).

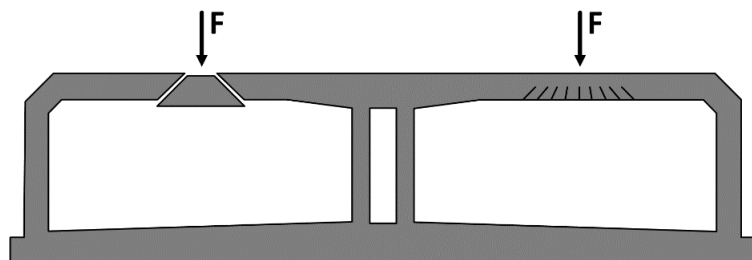
$$A = c_a \cdot m_{anker}^{2/3} \quad (3-1)$$

$$v_{eind} = c_v \cdot m_{anker}^{1/6} \quad (3-2)$$

Appendix E geeft een methode voor het bepalen van de optredende impactbelasting door een vallend scheepsanker op respectievelijk beton en een granulaire beschermlaag.

3.2.3. Weerstand tunnel

Uit het VALANK project volgt dat rechtstreeks raken van de tunnel door een vallend scheepsanker dient te worden voorkomen (Hemelop, 2000). Zonder afdekking kan het tunneldak al snel bezwijken onder de stootbelasting van een vallend scheepsanker (Hemelop, 2000). Met de ontwerpgrafieken uit Appendix D kan de belasting op het tunneldak bij aanwezige gronddekking worden bepaald. Deze grafieken geven meer een orde-grootte dan exacte waarde voor de belasting wegens de complexiteit van de berekeningen (Hemelop, 2000). De ROK stelt dat zonder uitgebreide dynamische berekening bij de calamiteit van een vallend scheepsanker op het tunneldak, uitgegaan mag worden van een statisch equivalente belasting¹⁸ voor het bezwijkmechanisme van buiging en de dynamische belasting voor het bezwijken op pons (Rijkswaterstaat, 2017). Echter worden beide bezwijkmechanismen in dit onderzoek getoetst onder de statisch equivalente belasting aangezien de onderbouwing voor het verschil in belasting tussen pons en buiging in de ROK ontbreekt. Figuur 3-1 toont schematisch de bezwijkmechanismen van pons en buiging bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Wanneer de belasting zich dicht bij de wand bevindt zou het tunneldak ook op dwarskracht kunnen bezwijken.



Figuur 3-1: Bezwijkmechanismen pons (links) en buiging (rechts) door een vallend scheepsanker (schematisch weergegeven).

¹⁵ De factor c_a varieert per ankertype tussen 0.0040 en 0.0099 $m^2/kg^{2/3}$ (TNO, 1995). Gemiddeld over de ankertypen is de factor c_a gelijk aan 0.0062 $m^2/kg^{2/3}$ (TNO, 2009).

¹⁶ In het algemeen hebben scheepsankers een botte onderkant en treedt er geen meswerking op (TNO, 1995).

¹⁷ Hierbij is de stromingsweerstand gelijk aan de ondergedompelde massa. De factor c_v varieert per ankertype tussen 1.07 en 1.68 $m/skg^{1/6}$ (TNO, 1995). Gemiddeld is de factor c_v gelijk aan 1.40 $m/skg^{1/6}$ (TNO, 2009).

¹⁸ Hierbij wordt de grootte van de wrijvingskracht (optredende in de afdeklaag) op het tijdstip van de grootste vertragingversnelling F_{max} uit de ontwerpgrafieken van VALANK afgeleid (Rijkswaterstaat, 2017). De statisch equivalente belasting is dan $2F_{max}$ en de dynamische belasting is gelijk aan F_{max} (Rijkswaterstaat, 2017).

3.3. Slepend scheepsanker

In deze paragraaf wordt de calamiteit van een slepend scheepsanker behandeld. De calamiteit wordt kwalitatief beschreven en er wordt ingegaan op de weerstand van de tunnel tegen de calamiteit.

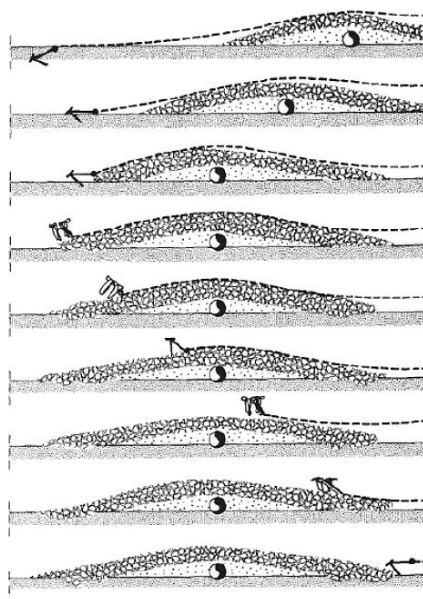
3.3.1. Kwalitatieve beschrijving

Een scheepsanker dat door de bodem van de vaarweg sleept kan achter een tunnel blijven haken of over het tunneldak schrapen. Bij de calamiteit beweegt een schip zich voort met het anker uit als gevolg van materieel falen of menselijk handelen. Het slepende scheepsanker zal net zo lang door de bodem slepen totdat er genoeg weerstand wordt ontwikkeld, om de trekkracht van de ankerketting op te vangen, waardoor het anker uit de bodem treedt (Saveur, 1997). Een anker mobiliseert deze weerstand in de bodem vanwege het gewicht en de vorm terwijl er horizontaal aan de ankerketting wordt getrokken. De capaciteit van een scheepsanker kan gemakkelijk tien tot twintig keer het gewicht van het anker bedragen en de sleepafstand van het scheepsanker kan meer dan een kilometer bedragen voordat het schip afgeremd is (Saveur, 1997).

Als een slepend scheepsanker achter een obstakel blijft haken, kan de ankerketting breken (de Vries, 1988). Saveur geeft aan dat zonder bescherming van het tunneldak een slepend scheepsanker achter de zijkant van de tunnel kan blijven haken waardoor de ankerketting breekt door de kinetische energie van het schip. Hierdoor kan de tunnel beschadigen en verliest het schip remcapaciteit.

3.3.2. Weerstand tunnel

Wanneer een tunnel geraakt wordt door een slepend scheepsanker zou deze globaal gezien in staat moeten zijn om de belasting op te kunnen nemen wegens de laterale stijfheid (Saveur, 1997). De ROK geeft aan dat indien een slepend scheepsanker mogelijk achter een constructie kan haken, de constructie hierop berekend moet worden (Rijkswaterstaat, 2017). Om te voorkomen dat een slepend scheepsanker achter het tunneldak blijft haken, kunnen de beide bovenhoeken van een tunnel worden afgeschuind en er kan een beschermende constructie worden aangebracht (Vrijling & Bezuyen, 1998). De bescherming op de tunnel moet zorgen dat een slepend scheepsanker uitbreekt voordat de tunnel wordt gepasseerd, en na de passage moet het anker zich weer kunnen ingraven om zo het schip te kunnen vertragen (de Vries, 1988). Figuur 3-2 toont het gedrag van een slepend scheepsanker bij een steenbescherming van een zinker. Bij een tunnel dient de bescherming dezelfde werking te hebben op het slepende scheepsanker als in de figuur voor de zinker is weergegeven.



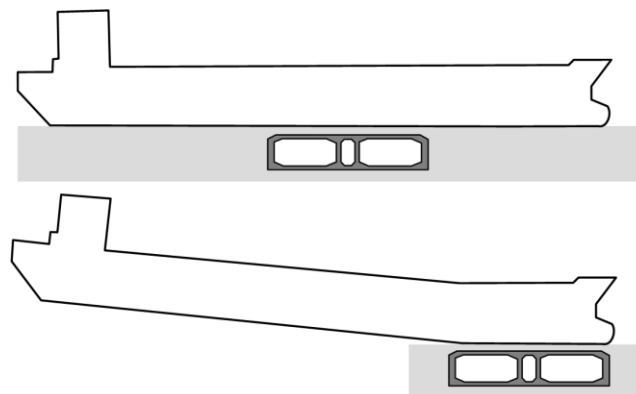
Figuur 3-2: Slepend scheepsanker op bescherming van zinker (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007).

3.4. Zinkend schip

In deze paragraaf wordt ingegaan op de calamiteit van een zinkend schip op een tunnel. Allereerst wordt een kwalitatieve beschrijving gegeven, vervolgens wordt ingegaan op de grootte van de belasting om ten slotte de weerstand van een tunnel tegen de calamiteit te behandelen.

3.4.1. Kwalitatieve beschrijving

Wanneer een schip tot zinken komt boven een tunnel kan het gewicht van het gezonken schip resulteren in grote krachten op de tunnel waardoor de tunnel zou kunnen bezwijken. Van Lagen (2016) geeft in zijn onderzoek een overzicht van de verschillende manieren hoe een schip op de tunnel tot zinken kan komen. Er wordt grofweg onderscheid gemaakt tussen een horizontaal zinkend schip en een schip dat zinkt onder een hoek. Volgens van Lagen is de kans dat een schip zinkt onder een hoek driemaal groter dan de kans dat een schip in horizontale positie zinkt. Daarentegen wordt de kans dat een zinkend schip de tunnel raakt driemaal groter aangenomen voor een schip in horizontale positie dan een schip onder een hoek (van Lagen, 2016). Dit resulteert volgens van Lagen in ongeveer gelijke kansen van optreden voor zowel een schip dat horizontaal tot zinken komt als een schip dat zinkt onder een hoek. Ter plaatse van de tunnel zal een overhellend of zinkend schip snel de bodem raken en worden gestabiliseerd door de bodem waardoor kapseizen van grote schepen niet zal plaatsvinden (Saveur, 1997). Zowel Saveur als van Lagen geven aan dat de kans klein is dat een schip in lengte richting op de tunnel terecht zal komen. Het scenario dat een schip zinkt in de lengte richting van de tunnel zal daarom niet in beschouwing worden genomen. Figuur 3-3 geeft schematisch een horizontaal zinkend schip en een zinkend schip onder een hoek weer op de tunnel. Een schip zinkend onder een hoek zal plastisch vervormen (van Lagen, 2016).



Figuur 3-3: Schematische weergave van een horizontaal zinkend schip (boven) en een zinkend schip onder een hoek (onder).

3.4.2. Belastinggrootte

De calamiteitsbelasting van een zinkend schip volgt uit het verschil tussen de massa en het resterende drijfvermogen van het schip (Saveur, 1997). Deze belasting ligt volgens Saveur in de orde van grootte van 20 tot 24 kN/m² voor normale lading en 88 tot 103 kN/m² bij een zware lading. Vrijling en Bezuyen (1998) stellen dat de belastinggrootte bij de calamiteit lastig te bepalen is wegens het dynamische karakter van de belasting. Deze belasting is naast grootte en massa van het schip afhankelijk van de zinksnelheid. Bij de Storebælt tunnel en Westerschelde tunnel is 100 kN/m² statische belasting aangehouden over een oppervlakte van 250 m² (Vrijling & Bezuyen, 1998). De ROK geeft voor binnenvaart en zeeschepen respectievelijk de maximale belastingen¹⁹ 50 kN/m² en 150 kN/m² (Rijkswaterstaat, 2017). Daarnaast mag de jaarlijkse overschrijdingskans van de calamiteitsbelasting van een zinkend schip maximaal $1.3 \cdot 10^{-5}$ bedragen (Rijkswaterstaat, 2017).

¹⁹ Deze belastingen zijn inclusief het dynamische effect (Rijkswaterstaat, 2017). Bij tunnels onder waterwegen met zeescheepvaart dient de belasting behorende bij zeeschepen te worden toegepast (Rijkswaterstaat, 2017).

Van Lagen geeft aan dat de belasting van een zinkend schip onder een hoek met een belasting tussen 50 tot 300 kN/m² maatgevend is boven een horizontaal zinkend schip. Dit betreft alleen de statische belasting van een zinkend schip. Koning (1992) geeft aan dat voor schepen met een lengte van 100 m de optredende dynamische kracht vergelijkbaar is met de optredende statische kracht. Bij schepen van 200 m is de optredende dynamische kracht slechts een fractie van de optredende statische kracht (Koning, 1992). Aangezien de grotere schepen uiteindelijk resulteren in de hoogste belastingen op de tunnels, is het aandeel van dynamische belasting slechts een fractie bij de hoogst optredende belastingen op de tunnel (van Lagen, 2016). Verder hebben de zwaarst beladen schepen in het Noordzeekanaal meestal een kielspeling kleiner dan een meter waardoor het zinkende schip nauwelijks kan versnellen en met een relatief lage snelheid de bodem zal raken. Daarom zal het dynamische deel van de belasting van een zinkend schip niet in beschouwing worden genomen.

Een horizontaal gezonken schip wordt ondersteund door zowel de tunnel als de omliggende bodem. De tunnel zal verhoudingsgewijs een hogere belasting opnemen dan de omliggende bodem gezien de stijfheid van de tunnel groter is dan die van de bodem (van Lagen, 2016). De toename in de belasting bedraagt respectievelijk 80% en 60% voor een monolithische en gesegmenteerde tunnel vergeleken met de gelijkmatig verdeelde belasting (van Lagen, 2016).

Appendix G geeft een methode weer voor de bepaling van de calamiteitsbelasting van een zinkend schip voor zowel horizontaal zinken als zinken onder een hoek.

3.4.3. Weerstand tunnel

Saveur stelt dat onder normale omstandigheden een tunnel in staat moet zijn om de belastingen van een zinkend schip op te nemen. Een uitzondering hierop is een beladen bulkschip dat op de tunnel tot zinken komt (Saveur, 1997). Daarnaast kan de calamiteit van een zinkend schip uitwerking hebben op de longitudinale kwaliteit van de tunnel (Saveur, 1997).

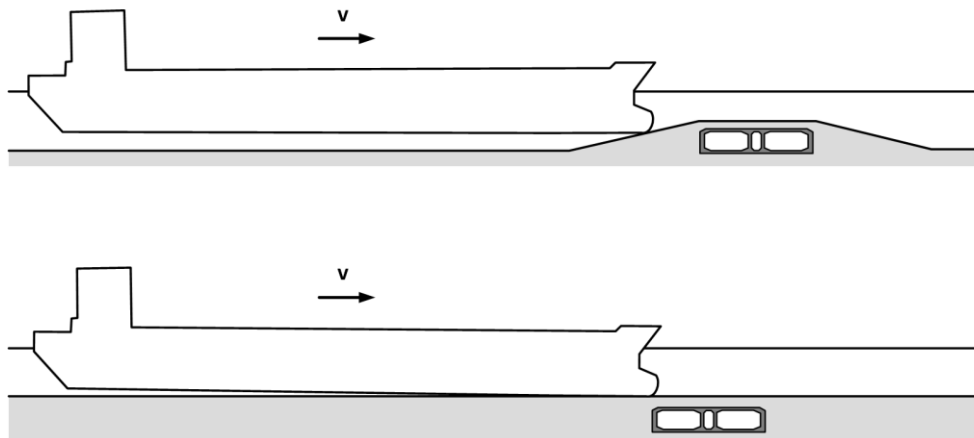
De doorsnede van de tunnel dient bij de calamiteitsbelasting van een zinkend schip gecontroleerd te worden op optredende momenten en dwarskrachten. Verder dient de tunnel bij de calamiteit van een zinkend schip in de lengterichting te worden gecontroleerd op de optredende zettingen en de capaciteit van de voegen.

3.5. Aanvarend schip

In deze paragraaf wordt de calamiteit van een aanvarend schip behandeld. De calamiteit wordt kwalitatief beschreven en er wordt ingegaan op de grootte van de belasting en de weerstand van de tunnel tegen de calamiteit.

3.5.1. Kwalitatieve beschrijving

De calamiteit van een aanvarend schip treedt op wanneer een schip door een te grote diepgang de kanaalbodem en/of de tunnel raakt. Voor scheepvaart loodrecht op de tunnel kan er grofweg onderscheid worden gemaakt tussen de situatie waarbij de tunnel boven de kanaalbodem ligt en de situatie waarbij de tunnel onder de kanaalbodem ligt (van Lagen, 2016). Figuur 3-4 geeft de calamiteit van een aanvarend schip schematisch weer voor deze twee verschillende situaties. In het geval dat de tunnel boven de kanaalbodem ligt kan een aanvarend schip de tunnel(bescherming) van de zijkant raken. Hierbij zou een schip door de tunneldekking kunnen doordringen, een schip zou over de tunneldekking kunnen schuiven of de tunnel kan over de ondergrond schuiven (van Lagen, 2016). Bij de situatie van een tunnel gelegen onder de kanaalbodem is de kans op aanvaring veel kleiner. Hierbij wordt het onderscheid gemaakt in een schip dat door de tunneldekking doordringt, waarbij de tunnel zou kunnen worden geraakt (bij een zeer geringe tunneldekking), en een schip welke over de kanaalbodem schuift.



Figuur 3-4: Schematische weergave van een aanvarend schip loodrecht op de tunnel met respectievelijk de tunnel gelegen boven de kanaalbodem (boven) en onder de kanaalbodem (onder).

Er dient te worden opgemerkt dat het type tunneldekking invloed heeft op de calamiteitsbelasting van een aanvarend schip. Een schip dat door een laag slib vaart, op afstand van het tunneldak, zal geen schade kunnen veroorzaken. Daarentegen kan een schip dat aanvaart op een tunneldekking van stortsteen resulteren in schade aan zowel het schip als de tunnelbescherming.

Verder dient te worden opgemerkt dat een aanvarend schip boven de tunnel zou kunnen stranden als het schip compleet tot stilstand komt. Dit resulteert in een relatief lage verticale belasting op de tunnel, gezien de geringe resulterende neerwaartse kracht, welke de tunnel waarschijnlijk zal kunnen weerstaan. Deze belasting zal lager zijn dan die van de calamiteit van een zinkend schip waardoor in het onderzoek verder niet wordt ingegaan op strandende schepen.

3.5.2. Belastinggrootte en weerstand tunnel

Een aanvarend schip welke door de tunnelbescherming doordringt en de tunnel raakt kan in hoge krachten op de tunnel resulteren. Uit de ROK volgt dat de frontale, representatieve equivalente statische kracht F_{dx} (MN) door een stootbelasting van rivier- en kanaalverkeer tegen starre obstakels met vergelijking (3-3)²⁰ kan worden bepaald (Rijkswaterstaat, 2017). Hierbij is E het kinetische energieniveau van het schip (MNm) welke bepaald wordt met vergelijking (3-4)²¹ aan de hand van het draagvermogen van het schip (ton) en de snelheid van het schip (m/s).

$$F_{dx} = 3.3 \cdot \sqrt{E} + 5.6 \quad (3-3)$$

$$E = 0.55 \cdot m \cdot v^2 \quad (3-4)$$

Bij bovenstaande vergelijkingen is uitgegaan dat het schip frontaal botst en volledig tot stilstand komt. Wanneer een aanvarend schip slechts langs de tunnel(bescherming) schampt zal dan ook een veel kleinere kracht worden uitgeoefend op de tunnel.

Als een schip de tunnel aanvaart en de bovenhoek van de tunnel raakt, kan worden aangenomen dat de belasting van het schip voornamelijk wordt opgenomen door normaalkrachten in het tunneldak (van Lagen, 2016). De verwachting is dat de tunnelwanden dan zullen bezwijken op dwarskracht.

²⁰ De formule gaat uit van botsing tegen een star obstakel waarbij de energie volledig wordt opgenomen door vervorming van het schip waardoor het schip (zwaar) beschadigd raakt (Rijkswaterstaat, 2017).

²¹ De factor 0.55 i.p.v. 0.50 in de vergelijking wordt gebruikt om de massa van het water die met een schip meebeweegt in rekening te brengen (Rijkswaterstaat, 2017).

4. Beoordeling Velsertunnels in de huidige situatie

Dit hoofdstuk beoordeelt de Velsertunnels onder de calamiteitsbelastingen van scheepvaart in de huidige situatie. Achtereenvolgens worden de calamiteiten van een vallend scheepsanker (paragraaf 4.1), slepend scheepsanker (paragraaf 4.2), zinkend schip (paragraaf 4.3) en aanvarend schip (paragraaf 4.4) behandeld. In paragraaf 4.5 wordt de conclusie beschreven.

4.1. Vallend scheepsanker

In deze paragraaf vindt de beoordeling van de Velsertunnels plaats bij de calamiteit van een vallend scheepsanker in de huidige situatie. Subparagraaf 4.1.1 gaat algemeen in op de Velsertunnels, in subparagraaf 4.1.2 worden de optredende krachten door de calamiteit bepaald om in subparagraaf 4.1.3 de optredende krachten te toetsen aan de tunnelweerstand.

4.1.1. Algemeen

In Appendix H zijn de maatgevende ankermassa's bepaald voor een vallend scheepsanker op de Velserspoortunnel en Velserautotunnel. Hieruit volgt dat bij de calamiteit de gemiddelde sterkte van beide tunnels getoetst dient te worden bij een ankermassa van 2500 kg en de rekenwaarde van de sterkte van de tunnels dient getoetst te worden bij een ankermassa van 1200 kg. Met vergelijkingen (3-1) en (3-2) uit subparagraaf 3.2.2 kunnen nu het dwarsoppervlak en de eindsnelheid van het vallende scheepsanker worden bepaald. Tabel 4-1 toont de resultaten van de vergelijkingen voor de gemiddelde waarde van de factor c_a ($0.0062 \text{ m}^2/\text{kg}^{2/3}$) en de gemiddelde en hoge waarde van factor c_v ($1.40 \text{ m}/\text{skg}^{1/6}$ en $1.68 \text{ m}/\text{skg}^{1/6}$).

Parameter			Vergelijking	Massa scheepsanker	
				1200 kg	2500 kg
Dwarsoppervlak ($c_a = 0.0062 \text{ m}^2/\text{kg}^{2/3}$)	A	[m ²]	(3-1)	0.70	1.14
Eindsnelheid ($c_v = 1.40 \text{ m}/\text{skg}^{1/6}$)	v_{eind}	[m/s]	(3-2)	4.56	5.16
Eindsnelheid ($c_v = 1.68 \text{ m}/\text{skg}^{1/6}$)	v_{eind}	[m/s]	(3-2)	5.48	6.19

Tabel 4-1: Dwarsoppervlak en eindsnelheid voor de ankermassa's 1200 en 2500 kg.

De resultaten uit de tabel zijn vergeleken met verschillende toegepaste ankertypes uit de praktijk, waaruit bleek dat het dwarsoppervlak redelijk overeenkomt. De eindsnelheden van de ankermassa's verschillen echter aanzienlijk tussen het gebruik van de gemiddelde en hoge waarde van de factor c_v . De ROK stelt dat de valsnelheid in water op 9 m/s aangehouden dient te worden, ongeacht het type anker en de waterdiepte (Rijkswaterstaat, 2017). Er wordt gekozen om de eindsnelheden van 6 en 9 m/s in de berekening mee te nemen in combinatie met beide maatgevende scheepsankers.

4.1.2. Bepaling optredende kracht

Bij de bepaling van de optredende kracht van het vallende scheepsanker wordt onderscheid gemaakt in de situatie waarin er geen tunneldekking aanwezig is en de situatie met de huidige aanwezige tunneldekking. Verder wordt zoals aangegeven in subparagraaf 4.1.1 een onderverdeling gemaakt in de snelheden van 6 en 9 m/s en ankermassa's van 1200 en 2500 kg.

Allereerst zal worden ingegaan op de situatie waarin er geen tunneldekking aanwezig is. Hierbij raakt het scheepsanker dus met de eindsnelheid het tunneldak. De impactbelasting op de beton kan worden bepaald met de methode van Appendix E.1. Tabel 4-2 geeft de resultaten weer van de berekende dynamische en statisch equivalente krachten voor de verschillende ankermassa's en impact-snelheden. Er dient te worden opgemerkt dat de eindsnelheden van de ankermassa's nu gelijk zijn aan de snelheid van impact aangezien er geen tunneldekking aanwezig is. Daarnaast wordt het impact oppervlak aangenomen op een derde van het dwarsoppervlak (zoals beschreven in

subparagraaf 3.2.2). Voor de elasticiteitsmodulus van het beton wordt 34000 N/mm^2 in rekening gebracht (Tabel L-1 uit Appendix L.1). De gereduceerde ankermassa met het verplaatste water wordt bepaald door de ankermassa te vermenigvuldigen met de verhouding van het volumegewicht van staal boven en onder water. Er is overigens geen onderscheid gemaakt tussen de spoor- en autotunnel aangezien er in deze situatie geen tunneldekking wordt meegenomen.

Parameter			Vergelijking	Maatgevende ankermassa			
				$V_{\text{impact}} = 6 \text{ m/s}$		$V_{\text{impact}} = 9 \text{ m/s}$	
				1200 kg	2500 kg	1200 kg	2500 kg
Impact oppervlak	A_{impact}	[m ²]	A/3	0.23	0.38	0.23	0.38
Equivalente diameter	D_e	[m]	(E-1)	0.55	0.70	0.55	0.70
Gereduceerde massa met verplaatste water	M_w	[kg]	$M_a \cdot (6.8/7.8)$	1046	2180	1046	2180
Penetratie parameter	N	[-]	(E-2)	0.0026	0.0026	0.0039	0.0039
Penetratiediepte	X	[m]	(E-3)	0.014	0.018	0.021	0.027
Tijdsduur impact	T_d	[s]	(E-4)	0.0024	0.0030	0.0024	0.0030
Maximale equivalente dynamische kracht	$F_{\text{max,dyn}}$	[kN]	(E-5)	2641.9	4307.7	3962.8	6461.5
Statisch equivalente kracht	F_{stat}	[kN]	(E-6) ²²	5283.7	8615.3	7925.6	12923.0

Tabel 4-2: Bepaling dynamische en statisch equivalente kracht voor de situatie zonder tunneldekking (hierdoor is er geen verschil tussen de Velserspoortunnel en de Velserautotunnel).

Nu zal de situatie met de huidige tunneldekking op de Velsertunnels worden behandeld. De penetratiediepte van een vallend scheepsanker kan worden bepaald met vergelijking (F-2)²³ uit Appendix F.1. Met de vergelijking worden de penetratiedieptes 0.70 en 0.88 meter verkregen voor de ankermassa's van 1200 en 2500 kg. Tabel 4-3 geeft de tunneldekking²⁴ weer voor de Velsertunnels op de kanaal-as en op de rand van de vaarweg. Door het vergelijken van de penetratiediepte met de aanwezige tunneldekking wordt geconcludeerd dat de autotunnel niet zal worden geraakt door de maatgevende scheepsankers. Echter kan niet worden uitgesloten dat de spoortunnel geraakt zou worden door de maatgevende scheepsankers.

	Tunneldekking	
	Velserspoortunnel	Velserautotunnel
Kanaal-as	0.88 m	1.84 m
Rand vaarweg	0.65 m	1.21 m

Tabel 4-3: Overzicht tunneldekking Velsertunnels (zie Appendices A.4 en A.5).

Met vergelijkingen (E-7)²⁵ en (E-8) uit Appendix E.2 kan de impactbelasting op de tunnel worden bepaald bij een aanwezige granulaire beschermlaag. Deze vergelijkingen zijn alleen geldig wanneer het anker geen contact maakt met het tunneldak. Voor de spoortunnel zal de werkelijk optredende kracht op het tunneldak hoger zijn wanneer deze wordt geraakt door het vallende scheepsanker. Tabel 4-4 toont de resultaten waarbij geen onderscheid is gemaakt tussen de spoor- en autotunnel.

²² Bij de bepaling van de statisch equivalente kracht is DLF = 2 aangehouden. Dit is het theoretisch maximum voor een massaveersysteem met één vrijheidsgraad onder plotselinge dynamische belasting (Chao et al., 2020).
²³ Deze vergelijking is afgeleid voor de penetratie van een vallend scheepsanker in zand en kan als conservatief worden beschouwd voor de Velsertunnels aangezien er grover materiaal aanwezig is op de Velsertunnels (o.a. puin en grind) (subparagraaf 2.4.2).

²⁴ Deze tunneldekking is bepaald door de bodem van de vaarweg aan te nemen op NGD (subparagraaf 2.1.2). De werkelijke tunneldekking zal hier dus van afwijken afhankelijk van de positie in de vaarweg.

²⁵ In de vergelijkingen is conservatief een penetratiediepte van 0.5 m ingevuld wat in overeenstemming is met het rapport van Coentunnel Construction (2009). Uit de vergelijkingen (E-7) en (E-8) volgt namelijk dat kleinere penetratiedieptes leiden tot hogere optredende krachten.

Parameter			Vergelijking	Maatgevende ankermassa			
				$V_{\text{impact}} = 6 \text{ m/s}$		$V_{\text{impact}} = 9 \text{ m/s}$	
				1200 kg	2500 kg	1200 kg	2500 kg
Dynamische kracht	F_{dyn}	[kN]	(E-7) ²⁶	86.4	180.0	194.4	405.0
Statisch equivalente kracht	F_{stat}	[kN]	(E-8)	172.8	360.0	388.8	810.0

Tabel 4-4: Bepaling dynamische en statisch equivalente kracht voor de situatie met tunneldekking (zonder raken van het tunneldak door het vallende scheepsanker, waardoor er geen verschil is tussen de Velsertunnels).

Tabel 4-5 geeft de afgeleide waarden voor de dynamische en statisch equivalente kracht uit de ontwerpgrafieken van VALANK (Appendix D) voor de ankermassa's van 1000 en 2000 kg (Hemelop, 2000). De statisch equivalente kracht²⁷ is twee maal de dynamische kracht (Rijkswaterstaat, 2017).

Parameter			Maatgevende ankermassa			
			$V_{\text{impact}} = 6 \text{ m/s}$		$V_{\text{impact}} = 9 \text{ m/s}$	
			1000 kg	2000 kg	1000 kg	2000 kg
Dynamische kracht	F_{dyn}	[kN]	81	151	140	326
Statisch equivalente kracht	F_{stat}	[kN]	162	302	280	652

Tabel 4-5: Afgeleide waarden dynamische en statisch equivalente kracht met ontwerpgrafieken VALANK (Hemelop, 2000).

Bij het vergelijken van Tabel 4-4 en Tabel 4-5 wordt opgemerkt dat, ondanks de ankermassa's wat verschillen, de ontwerpgrafieken van VALANK in overeenstemming lijken te zijn met de methode uit Appendix E.2 (vergelijkingen (E-7) en (E-8)). Hierdoor worden de verkregen waarden in Tabel 4-4 voldoende betrouwbaar geacht om verder mee te nemen in de berekening.

Voor de Velserspoortunnel werd al aangegeven dat het maatgevende scheepsanker het tunneldak zou kunnen raken. De daarbij optredende kracht zal hoger zijn dan de berekende krachten uit Tabel 4-4 en lager dan de krachten in Tabel 4-2. Om de optredende krachten te bepalen wordt de impactsnelheid op het tunneldak geschat met behulp van de ontwerpgrafiek behorende bij 0.5 meter gronddekking (Figuur D-1 van Appendix D.1). Uit Figuur D-1 volgt dat de impactsnelheden van een 1000 en 2000 kg anker 1.25 en 3.50 m/s bedragen bij een eindsnelheid van 10 m/s en respectievelijk 0 en 2.25 m/s bij de eindsnelheid van 8 m/s. Op basis hiervan wordt voor de spoortunnel een schatting gemaakt van de impactsnelheden op het tunneldak door de maatgevende scheepsankers van 1200 en 2500 kg, gegeven 0.65 meter tunneldekking voor de spoortunnel (rand vaarweg). Er wordt geschat dat de impactsnelheden voor het 1200 en 2500 kg anker 0.5 en 1.5 m/s bedragen bij de eindsnelheid van 6 m/s en respectievelijk 1 en 3 m/s bij een de eindsnelheid van 9 m/s. Met de methode van Appendix E.1 worden de optredende krachten bepaald. Tabel 4-6 toont de optredende krachten op de Velserspoortunnel bij het raken van het tunneldak door de tunneldekking heen.

Parameter			Vergelijking	Maatgevende ankermassa			
				$V_{\text{eind}} = 6 \text{ m/s}$		$V_{\text{eind}} = 9 \text{ m/s}$	
				1200 kg	2500 kg	1200 kg	2500 kg
Impactsnelheid	V_{impact}	[m/s]	-	0.5	1.5	1	3
Maximale equivalente dynamische kracht	$F_{\text{max,dyn}}$	[kN]	(E-5)	220.2	1076.9	440.3	2153.8
Statisch equivalente kracht ²⁸	F_{stat}	[kN]	(E-6)	440.3	2153.8	880.6	4307.7

Tabel 4-6: Bepaling statisch equivalente kracht Velserspoortunnel voor de situatie met tunneldekking (bij het raken van tunneldak door de tunneldekking heen).

²⁶ In de vergelijkingen (E-7) en (E-8) is conservatief een penetratiediepte van 0.5 m ingevuld (zie voetnoot 25).

²⁷ De afgeleide waarde voor de wrijvingskracht F_{max} uit de ontwerpgrafieken van VALANK betreft de grootte van de wrijvingskracht, optredende in de afdeklaag, op het tijdstip van de grootste vertragsversnelling (Rijkswaterstaat, 2017).

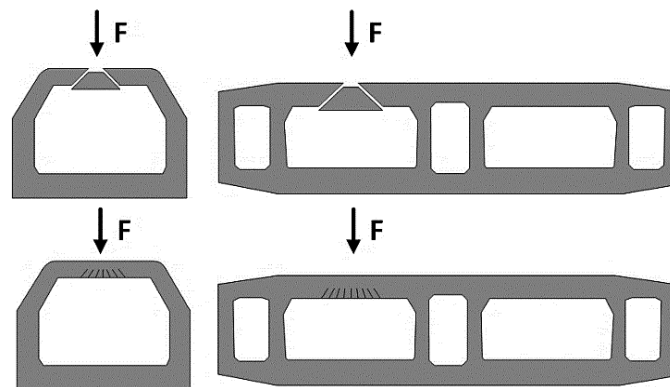
²⁸ Er is DLF = 2 aangehouden bij vergelijking (E-6), bepaling van statisch equivalente kracht (net als in Tabel 4-2).

4.1.3. Beoordeling

Deze subparagraaf behandelt de beoordeling van de Velsertunnels op de calamiteit van een vallend scheepsanker door de weerstand van de tunnels te toetsen op de optredende krachten. In subparagraaf 4.1.1 was reeds beschreven dat de gemiddelde sterkte van beide tunnels getoetst dient te worden bij een ankermassa van 2500 kg en de rekenwaarde van de sterkte van de tunnels bij een ankermassa van 1200 kg. Er zal bij de beoordeling echter (conservatief) gebruik gemaakt worden van de karakteristieke sterkte van de tunnel in plaats van de gemiddelde sterkte bij de ankermassa van 2500 kg. De reden hiervoor is dat overschatting van de tunnelsterkte voorkomen dient te worden²⁹.

In subparagraaf 4.1.2 zijn de optredende krachten bepaald die op het tunneldak worden uitgeoefend onder de calamiteit van een vallend scheepsanker. In subparagraaf 3.2.3 is reeds aangegeven dat het tunneldak gecontroleerd dient te worden op de bezwijkmechanismen van pons en buiging bij de statisch equivalente belasting voor de calamiteit van een vallend scheepsanker. Appendix L behandelt de weerstand van de Velsertunnels waarbij ingegaan wordt op de momentcapaciteit (Appendix L.2) en de ponscapaciteit (Appendix L.4).

De statisch equivalente belasting wordt aangebracht op de minst gunstige positie in de dwarsrichting van de tunnel zoals weergegeven in Figuur 4-1. In de lengterichting van de tunnel wordt echter aangenomen dat het scheepsanker niet nabij een voeg van een tunnelmoot op de tunnel valt. Bij het bezwijken op pons wordt aangenomen dat een ponskegel uit het tunneldak wordt gedrukt. Bij het bezwijken op buiging zal het tunneldak bezwijken op het optredende veldmoment. Er is niet ingegaan op het bezwijken op dwarskracht omdat bezwijken op pons maatgevend is.



Figuur 4-1: Bezwijkmechanismen van pons (boven) en buiging (onder) bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.

Eerst zal worden ingegaan op de beoordeling van de Velsertunnels op het bezwijkmechanisme van pons door een vallend scheepsanker. De optredende schuifspanning kan worden bepaald met behulp van vergelijking (4-1) afkomstig uit Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1). De effectieve hoogtes van de Velsertunnels zijn reeds gegeven in Tabel L-8 en de statisch equivalente krachten zijn bepaald in Tabel 4-2, Tabel 4-4 en Tabel 4-6. Het beschouwde controle-omtrek (u_i) wordt bepaald uit de omtrek van een cirkel met een diameter gelijk is aan de som van de equivalente diameter van het scheepsanker (zie Tabel 4-2) en tweemaal de effectieve hoogte van het tunneldak ($u_i = (D+2d)\pi$)³⁰. De factor β wordt aangehouden op 1.5 om geen volledig centrische pons aan te nemen.

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d} \quad (4-1)$$

²⁹ Aangezien er onzekerheden aanwezig zijn omtrent de sterkte van de Velsertunnels (vooral het betonstaal). Het is conservatief om de karakteristieke sterkte te gebruiken in plaats van de gemiddelde sterkte.

³⁰ Dit is een kleinere aangenomen controle-omtrek dan volgt uit NEN-EN 1992-1-1 waarbij $u_1 = (D + 4d)\pi$.

Tabel 4-7 en Tabel 4-8 tonen de beoordeling van de ponscapaciteit van de Velsertunnels bij de calamiteit van een vallend scheepsanker respectievelijk zonder en met aanwezige tunneldekking. Bij Tabel 4-8 wordt voor de Velserspoortunnel onderscheid gemaakt tussen het al dan niet raken van het tunneldak door de tunneldekking heen. De waardes tussen haakjes geven de resultaten weer voor het raken van het tunneldak van de Velserspoortunnel door de tunneldekking heen.

	Velserspoortunnel						Velserautotunnel					
	V _{Ed} [kN]	d _{eff} [mm]	u _i [mm]	V _{Ed} [N/mm ²]	V _{Rd,c} / V _{Rk,c} [N/mm ²]	U.C.	V _{Ed} [kN]	d _{eff} [mm]	u _i [mm]	V _{Ed} [N/mm ²]	V _{Rd,c} / V _{Rk,c} [N/mm ²]	U.C.
Anker massa 1200 kg en v _{impact} = 6 m/s	5284	1071	8442	0.88	0.52	1.67	5284	1371	10327	0.56	0.44	1.26
Anker massa 1200 kg en v _{impact} = 9 m/s	7926	1071	8442	1.31	0.52	2.51	7926	1371	10327	0.84	0.44	1.89
Anker massa 2500 kg en v _{impact} = 6 m/s	8615	1071	8915	1.35	0.63	2.15	8615	1371	10799	0.87	0.53	1.64
Anker massa 2500 kg en v _{impact} = 9 m/s	12923	1071	8915	2.03	0.63	3.23	12923	1371	10799	1.31	0.53	2.46

Tabel 4-7: Beoordeling ponscapaciteit tunneldak Velsertunnels bij de maatgevende ankers (situatie zonder tunneldekking).

	Velserspoortunnel						Velserautotunnel					
	V _{Ed} [kN]	d _{eff} [mm]	u _i [mm]	V _{Ed} [N/mm ²]	V _{Rd,c} / V _{Rk,c} [N/mm ²]	U.C.	V _{Ed} [kN]	d _{eff} [mm]	u _i [mm]	V _{Ed} [N/mm ²]	V _{Rd,c} / V _{Rk,c} [N/mm ²]	U.C.
Anker massa 1200 kg en v _{impact} = 6 m/s	173 (440)	1071	8442	0.03 (0.07)	0.52	0.05 (0.14)	173	1371	10327	0.02	0.44	0.04
Anker massa 1200 kg en v _{impact} = 9 m/s	389 (881)	1071	8442	0.06 (0.15)	0.52	0.12 (0.28)	389	1371	10327	0.04	0.44	0.09
Anker massa 2500 kg en v _{impact} = 6 m/s	360 (2154)	1071	8915	0.06 (0.34)	0.63	0.09 (0.54)	360	1371	10799	0.04	0.53	0.07
Anker massa 2500 kg en v _{impact} = 9 m/s	810 (4308)	1071	8915	0.13 (0.68)	0.63	0.20 (1.08)	810	1371	10799	0.08	0.53	0.15

Tabel 4-8: Beoordeling ponscapaciteit tunneldak Velsertunnels bij de maatgevende ankers voor de situatie met tunneldekking. De waardes tussen haakjes voor de spoortunnel betreffen het raken van het tunneldak door de dekking heen.

Bij de beoordeling van de Velsertunnels op het bezwijkmechanisme van buiging door een vallend scheepsanker wordt gebruik gemaakt van de statisch equivalente krachten uit Tabel 4-4 en Tabel 4-6. Er wordt niet ingegaan op de statisch equivalente krachten bij de situatie zonder tunneldekking (Tabel 4-2) aangezien de optredende momenten zodanig hoog zijn dat in geen van de situaties op buiging wordt voldaan. Appendix J en Appendix K geven een methode voor de bepaling van de optredende doorsnedekrachten in de Velsertunnels met behulp van MatrixFrame. Appendices J.3 en K.3 tonen de resultaten van de doorsnedekrachten in de Velsertunnels onder de bepaalde statisch equivalente krachten³¹. De statisch equivalente krachten zijn hierbij aangebracht op de meest ongunstige positie van de tunnel (Figuur 4-1). In de lengterichting van de tunnel wordt een spreiding van de belasting aangenomen die gelijk is aan de som van tweemaal de dikte van het tunneldak en de equivalente diameter van het scheepsanker. Tabel 4-9 toont de beoordeling van Velsertunnels op het bezwijkmechanisme van buiging bij de calamiteit van een vallend scheepsanker voor de situatie met tunneldekking. Bij de Velserspoortunnel wordt onderscheid gemaakt tussen het al dan niet raken van het tunneldak door de tunneldekking heen. De waardes tussen haakjes geven de resultaten weer voor het raken van het tunneldak van de Velserspoortunnel door de tunneldekking heen.

³¹ De resultaten zijn getoond voor de statisch equivalente krachten van 360 en 810 kN. Er dient te worden opgemerkt dat invloed van spreiding van deze belasting over de lengterichting wordt meegenomen.

	Velserspoortunnel				Velserautotunnel			
	F _{stat,eq} [kN]	M _{Ed,velld} [kNm/m]	M _{Rd} / M _{Rk} [kNm/m]	U.C.	F _{stat,eq} [kN]	M _{Ed,velld} [kNm/m]	M _{Rd} / M _{Rk} [kNm/m]	U.C.
Ankermassa 1200 kg en $v_{impact} = 6$ m/s	173 (440)	731.5 (875.0)	1611.9	0.45 (0.54)	173	1369.6	1750.3	0.78
Ankermassa 1200 kg en $v_{impact} = 9$ m/s	389 (881)	847.6 (1111.9)	1611.9	0.53 (0.69)	389	1477.9	1750.3	0.84
Ankermassa 2500 kg en $v_{impact} = 6$ m/s	360 (2154)	822.3 (1738.0)	1808.7	0.45 (0.96)	360	1455.6	1955.4	0.74
Ankermassa 2500 kg en $v_{impact} = 9$ m/s	810 (4308)	1052.0 (2837.7)	1808.7	0.58 (1.57)	810	1674.0	1955.4	0.86

Tabel 4-9: Beoordeling momentcapaciteit tunneldak Velsertunnels bij de maatgevende ankers (situatie met tunneldekking).

Uit Tabel 4-7 volgt dat zonder aanwezige tunneldekking, de Velsertunnels in geen van de situaties voldoen op het bezwijkmechanisme van pons. Tabel 4-8 laat zien dat de Velsertunnels voldoen op het bezwijkmechanisme van pons wanneer de tunneldekking in staat is om contact tussen het scheepsanker en de tunnel te voorkomen. Bij de Velserspoortunnel kan met de huidige tunneldekking echter niet worden uitgesloten dat het scheepsanker het tunneldak raakt door de tunneldekking heen. In het geval dat een 2500 kg scheepsanker met een impactsnelheid van 9 m/s de spoortunnel door de dekking heen raakt, voldoet de spoortunnel niet op het bezwijkmechanisme van pons.

Voor het bezwijkmechanisme van buiging was reeds aangegeven dat het tunneldak van de Velsertunnels niet voldoet wanneer er geen tunneldekking aanwezig is. Uit Tabel 4-9 blijkt dat de Velsertunnels voldoen op het bezwijkmechanisme van buiging wanneer de tunneldekking in staat is om contact tussen het scheepsanker en de tunnel te voorkomen. Met de huidige tunneldekking kan voor de spoortunnel echter niet uitgesloten worden dat het scheepsanker het tunneldak raakt door de tunneldekking heen. De spoortunnel voldoet in dat geval niet voor een ankermassa van 2500 kg in combinatie met een impactsnelheid van 9 m/s.

Kortom, bij de Velserautotunnel kan op basis van de berekende penetratiediepte worden gesteld dat de maatgevende ankers het tunneldak niet zullen raken. Hierbij voldoet de autotunnel voor alle situaties op beide bezwijkmechanismen van pons en buiging. Bij de Velserspoortunnel daarentegen kan op basis van de berekende penetratiediepte niet worden uitgesloten dat de maatgevende ankers het tunneldak raken. De spoortunnel voldoet hierdoor niet voor alle combinaties van ankermassa en impactsnelheid op de bezwijkmechanismen van pons en buiging.

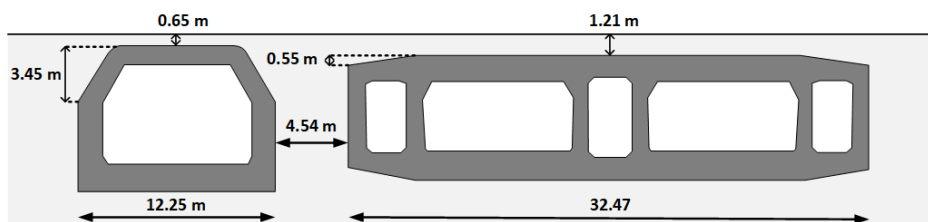
De werkelijk optredende calamiteitsbelasting door een vallend scheepsanker zal kleiner zijn dan de berekende waardes aangezien de DLF in werkelijkheid kleiner zal zijn dan 2.0. Daarnaast is de invloed van de impactsnelheid van het scheepsanker op de tunnel(dekking) van grote invloed, waarbij de eis uit de ROK van 9 m/s veel hogere krachten op de tunnel veroorzaakt dan de berekende snelheden van circa 6 m/s (Tabel 4-1). Mogelijk valt de ROK te conservatief uit voor de eindsnelheden van de ankermassa's van 1200 en 2500 kg. Verder is de invloed van de gewapende betonnen beschermerschil niet meegenomen in de berekening waardoor de werkelijke tunnelweerstand hoger zal uitvallen.

Er dient echter te worden opgemerkt dat de gebruikte methoden in deze paragraaf zeer theoretisch zijn waardoor er nog veel onzekerheid bestaat omtrent het werkelijke gedrag van de tunnel bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Voor de situaties waarin het tunneldak globaal voldoet op de bezwijkmechanismen van pons en buiging kan dus niet worden uitgesloten dat de beton aan de binnenzijde van de tunnel af zou kunnen spatten.

4.2. Slepnd scheepsanker

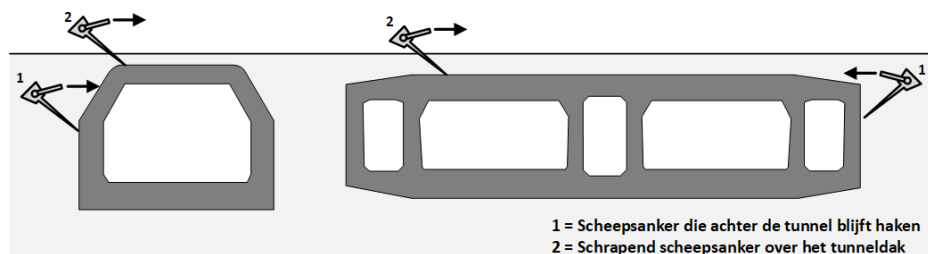
In deze paragraaf wordt de huidige situatie van de Velsertunnels beoordeeld bij de calamiteit van een slepend scheepsanker. Een slepend scheepsanker kan achter een tunnel blijven haken of over het tunneldak schrapen (paragraaf 3.3). Aan de hand van de methodiek van Appendix H is de maatgevende ankermassa van een slepend scheepsanker voor beide tunnels op 4010 kg³² bepaald. Appendix F.2 geeft een methode voor de bepaling van de maximale penetratiediepte van een slepend scheepsanker. Met vergelijking (F-3) wordt de maximale penetratiediepte bepaald op 1.87 m voor het 4010 kg anker. De methode is echter onderhevig aan conservatieve aannames waardoor de werkelijke penetratiediepte lager zal zijn. Daarnaast bevindt zich boven de Velsertunnels grover materiaal dan zand (subparagraaf 2.4.2) waardoor de penetratiediepte mede lager zal uitvallen.

Figuur 4-2 toont de afmetingen van de Velsertunnels op de rand van de vaarweg. De spoor- en autotunnel zijn beiden voorzien van een afgeschuinde hoek van respectievelijk 3.45 en 0.55 m hoog (Tabel 2-2 uit subparagraaf 2.2.3) en de dekking op de rand van de vaarweg is respectievelijk 0.65 en 1.21 m (Appendices A.4 en A.5). De som van de dekking en de hoogte van de afgeschuinde hoek bedraagt 4.10 en 1.76 m voor de spoor- en autotunnel. Bij de spoortunnel is de som van de dekking en hoogte van de afgeschuinde hoek duidelijk hoger dan de maximale penetratiediepte, waardoor het maatgevende slepende scheepsanker niet achter de spoortunnel zal blijven haken. Echter is de maximale penetratiediepte bij de autotunnel 11 cm groter dan de som van de dekking en hoogte van de afgeschuinde hoek (op de rand van de vaarweg). Aangezien de werkelijke penetratiediepte kleiner zal zijn dan de theoretisch berekende penetratiediepte (zoals bovenstaand beschreven) en doordat de tunneldekking voor het merendeel van de tunnel groter is dan 1.21 meter, wordt gesteld dat het maatgevende slepende scheepsanker niet achter de autotunnel zal blijven haken.



Figuur 4-2: Afmetingen Velsertunnels op de rand van de vaarweg omtrent de calamiteit van een slepend scheepsanker.

Figuur 4-3 toont schematisch de calamiteit van een slepend scheepsanker op de Velsertunnels. Zoals bovenstaand beschreven zal het maatgevende slepende scheepsanker niet achter de tunnels blijven haken, waardoor de tunnels niet worden berekend op de breukkracht van een hakend scheepsanker. Daarnaast is op de Velsertunnels een gewapende betonnen beschermerschil aanwezig (subparagraaf 2.2.3) waardoor het tunneldak tegen schrapende ankers wordt beschermd (Wolsink, 2004). Daarom wordt gesteld dat de Velsertunnels voldoen op de calamiteit van een slepend scheepsanker.



Figuur 4-3: Schematische weergave van de calamiteit van een slepend scheepsanker op de Velsertunnels.

³² De jaarlijkse kans van optreden voor de calamiteit van een slepend scheepsanker bedraagt $2.81 \cdot 10^{-5}$ voor beide Velsertunnels. Deze kans volgt uit het product van de jaarlijkse kans van optreden $2.54 \cdot 10^{-9}$ per passerend schip (uit Tabel C-1 van Appendix C) en het aantal passerende schepen van 11088 (uit Appendix H.1).

4.3. Zinkend schip

In deze paragraaf vindt een beoordeling plaats van de Velsertunnels in de huidige situatie bij de calamiteit van een zinkend schip. Appendix I presenteert de bepaling van de maatgevende zinkende schepen voor de Velsertunnels. Voor de spoor- en autotunnel blijken bulkschepen van respectievelijk 34205 en 37055 ton maatgevend. Met de methode uit Appendix G wordt de calamiteitsbelasting van een zinkend schip bepaald voor de maatgevende schepen van de Velsertunnels. Tabel 4-10 geeft een overzicht van de resultaten. Hierbij is als scheepsbelasting ijzererts aangenomen en is de invloed van de tunneldekking op spreiding van de belasting verwaarloosd gezien de geringe dikte (van Lagen, 2016).

Bij een zinkend schip onder een hoek is verder aangenomen dat een bulkschip van 180 m vijf compartimenten van circa 30 m bevat. Aangenomen wordt dat de maximale belasting wordt bereikt bij drie volgelopen compartimenten. Hierdoor worden de berekende waarden afgekapt op de totale volgelopen lengte van 90 m. Een groter aantal volgelopen compartimenten zal leiden tot een grotere totale resulterende kracht van het zinkende schip, echter zal het steunoppervlak van het schip dan ook toenemen waardoor de resulterende kracht per oppervlak zal afnemen (van Lagen, 2016).

Parameter			Vergelijking	Maatgevende zinkende schip	
				Velserspoortunnel	Velserautotunnel
Lengte	L_{oa}	[m]	–	180.0	177.9
Breedte	B	[m]	–	30.0	28.6
Diepgang	T	[m]	–	10.1	10.9
Holte	H	[m]	–	14.7	15.0
Vrijboord	F	[m]	–	4.6	4.1
Draagvermogen	DWT	[ton]	–	34205	37055
Eigengewicht schip ³³	W	[kN]	(G-1)	94270	71897
Belasting horizontaal zinkend schip	L_1	[kN]	(G-2)	286033	283956
Watergewicht per m	w	[kN/m]	(G-3)	2693	2541
Afstand volgelopen ³⁴	X	[m]	(G-4)	90 (122.2)	90 (115.1)
Belasting zinkend schip onder hoek	L_2	[kN]	(G-5)	18810	40954

Tabel 4-10: Overzicht bepaling calamiteitsbelasting zinkend schip op de Velsertunnels aan de hand van Appendix G.

Met de verkregen belastingen van een horizontaal zinkend schip (L_1) en een zinkend schip onder een hoek (L_2) kan de resulterende belasting worden bepaald door middel van het steunoppervlak. Voor een horizontaal zinkend schip wordt aangenomen dat het steunoppervlak (A_1) gelijk is aan 80% van de lengte maal de breedte van het schip. Aangezien de tunnel stijver is dan de omliggende bodem wordt vervolgens een toename van 80%³⁵ in rekening gebracht voor de belasting (subparagraaf 3.4.2). De resulterende belasting voor een horizontaal zinkend schip wordt nu bepaald door de totale belasting te delen door het steunoppervlak ($q_1 = 1.8 \cdot L_1 / A_1$). Voor een zinkend schip onder een hoek wordt aangenomen dat het steunoppervlak (A_2) gelijk is aan 80% van de breedte van het schip keer de breedte van de tunnel³⁶. Voor een zinkend schip onder een hoek wordt de resulterende belasting bepaald door de totale belasting te delen door het steunoppervlak ($q_2 = L_2 / A_2$). Tabel 4-11 geeft de resulterende belastingen op het tunneldak weer voor de Velsertunnels.

³³ De blokcoëfficiënt van een bulkschip wordt aangenomen op $C_B = 0.80$.

³⁴ Tussen haakjes worden de berekende waarden weergegeven welke vervolgens zijn afgekapt op 90 meter (wegens het feit dat het steunoppervlak van het gezonken schip veel groter is waardoor de resulterende belasting kleiner zal zijn).

³⁵ Conservatief aangenomen dat de tunnel volkomen monolithisch gedrag vertoont.

³⁶ Bij de spoortunnel is de breedte van het dak circa 7.5 meter en voor de autotunnel wordt de halve breedte van de tunnel aangenomen zoals van Lagen (2016) in zijn onderzoek aanhoudt.

Resulterende belasting op tunneldak			Maatgevende zinkende schip	
			Velserspoortunnel	Velserautotunnel
Steunoppervlak horizontaal zinkend schip	A ₁	[m ²]	4320	4070
Belasting horizontaal zinkend schip	q ₁	[kN/m ²]	119.2	125.6
Steunoppervlak zinkend schip onder een hoek	A ₂	[m ²]	180	372
Belasting schip zinkend onder een hoek	q ₂	[kN/m ²]	104.5	110.1

Tabel 4-11: Overzicht resulterende calamiteitsbelasting van een zinkend schip op de Velsertunnels.

In Appendix J en Appendix K zijn de optredende momenten, dwarskrachten en normaalkrachten in de Velsertunnels bepaald met behulp van MatrixFrame. Appendices J.4 en K.4 tonen de resultaten van de snedekrachten in de Velsertunnels bij de calamiteit van een zinkend schip. Hierbij zijn de maatgevende belastingen uit Tabel 4-11 op het tunneldak aangebracht in combinatie met de belastingen in de normale situatie (zie Appendices J.1 en K.1). In het tunneldak en de vloer treden de hoogste krachten op waardoor de weerstand van de tunnel hierop dient te worden gecontroleerd.

Uit Appendix I volgt dat de calamiteitsbelasting van een zinkend schip getoetst dient worden bij de gemiddelde waarden voor de materiaaleigenschappen aan de sterktekant. Er zal bij de beoordeling echter (conservatief) gebruik gemaakt worden van de karakteristieke sterkte van de tunnel in plaats van de gemiddelde sterkte. De reden hiervoor is dat overschatting van de tunnelsterkte dient te worden voorkomen³⁷. In Appendix L is weerstand van de Velsertunnels bepaald waarbij ingegaan wordt op de momentcapaciteit (Appendix L.2) en de dwarskrachtcapaciteit (Appendix L.3).

Tabel 4-12 geeft de beoordeling weer de karakteristieke dwarskracht- en (veld)momentcapaciteit uit Appendices L.2 en L.3 bij de optredende dwarskrachten en (veld)momenten uit Appendices J.4 en K.4. In de tabel zijn de resultaten van de veldmomenten weergegeven aangezien deze maatgevend zijn boven de steunpuntsmomenten. De momentcapaciteit van de Velsertunnels is bepaald in Tabel L-5. Met betrekking tot de dwarskracht bij de autotunnel is voor het tunneldak de doorsnede nabij het middentunnelkanaal maatgevend (doorsnede stippellijn in Figuur L-5) en voor de tunnelvloer de doorsnede aan de andere zijde van de tunnel (doorgetrokken lijn in Figuur L-5). Bij de autotunnel is de dwarskrachtcapaciteit zonder dwarskrachtwapening maatgevend³⁸ (Tabel L-6) en bij de spoortunnel de dwarskrachtcapaciteit met invloed van de wapening (Tabel L-7).

Opgemerkt dient te worden dat bij de autotunnel de optredende dwarskrachten in het tunneldak en de tunnelvloer in Appendices J.4 en K.4 in het hart van de tunnelwand zijn bepaald. De optredende dwarskrachten worden daarom gecorrigeerd naar de maatgevende positie in het tunneldak en de tunnelvloer met betrekking tot de dwarskrachtcapaciteit. Figuur 4-4 geeft dit schematisch weer.

	Velserspoortunnel						Velserautotunnel					
	V _{Ed} [kN/m]	V _{Rk} [kN/m]	U.C.	M _{Ed,veld} [kNm/m]	M _{Rk,veld} [kNm/m]	U.C.	V _{Ed} [kN/m]	V _{Rk} [kN/m]	U.C.	M _{Ed,veld} [kNm/m]	M _{Rk,veld} [kNm/m]	U.C.
Tunneldak	1087	1539	0.71	1415	1809	0.78	1535 ³⁹	1108	1.39	2147	1955	1.10
Tunnelvloer	1928	3947	0.49	2563	3933	0.65	1685 ⁴⁰	1119	1.51	2636	3364	0.78

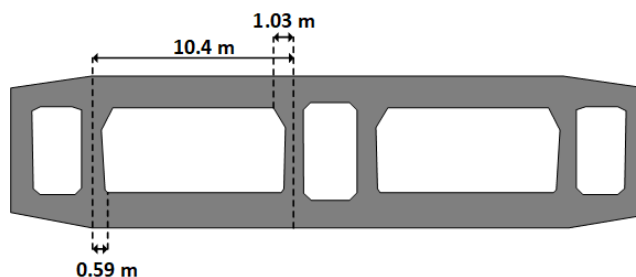
Tabel 4-12: Beoordeling moment- en dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels bij de calamiteit van een zinkend schip.

³⁷ Aangezien er onzekerheden aanwezig zijn omtrent de sterkte van de Velsertunnels (vooral het betonstaal). Het is conservatief om de karakteristieke sterkte te gebruiken in plaats van de gemiddelde sterkte.

³⁸ De dwarskrachtcapaciteit zonder dwarskrachtwapening in rekening te brengen (Tabel L-6) geeft voor de autotunnel een hogere weerstand dan de dwarskrachtcapaciteit met wapening (Tabel L-7), zie Appendix L.3.

³⁹ Gecorrigeerd met de factor 0.81 om het effect van de console mee te nemen (Figuur 4-4). De lengte van de dwarskrachtverdeling is $(1897/(1897+1750)) \cdot 10.4 = 5.4$ m waardoor de factor gelijk is aan $(5.4-1.03)/5.4 = 0.81$.

⁴⁰ Gecorrigeerd met de factor 0.88 om het effect van de tunnelmuur dikte mee te nemen. De lengte van de dwarskrachtverdeling is $(1904/(1904+1965)) \cdot 10.4 = 5.1$ m waardoor de factor gelijk is aan $(5.3-0.59)/5.3 = 0.88$.



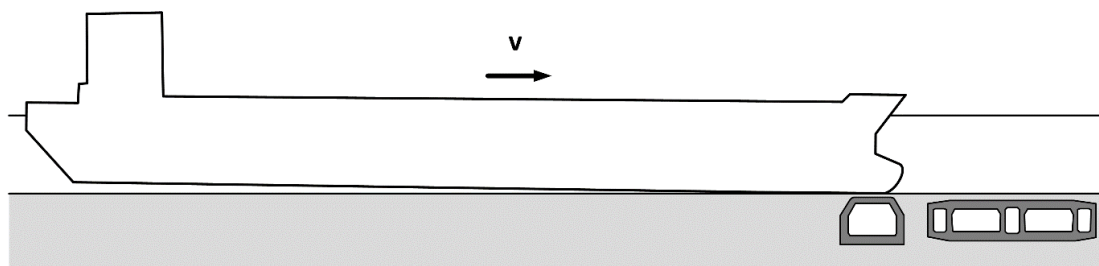
Figuur 4-4: Afmetingen consoles bij het tunneldak van de Velserautotunnel.

Uit Tabel 4-12 kan worden opgemaakt dat de spoortunnel voldoet onder de calamiteitsbelasting van het zinkende schip voor zowel het tunneldak als de tunnelvloer. De autotunnel daarentegen voldoet niet onder de calamiteitsbelasting van een zinkend schip. Het tunneldak voldoet niet op dwarskracht- en momentcapaciteit, terwijl de tunnelvloer alleen niet op de dwarskrachtcapaciteit voldoet.

In de berekening is geen rekening gehouden met eventuele zettingen en vervormingen onder de calamiteitsbelasting van het zinkende schip. Eventueel hierbij gepaard gaande spanningsverdelingen kunnen de werkelijke lasten op de tunnels anders doen uitvallen. Het gedrag van de tunnels in de lengterichting zal daarnaast verder niet worden behandeld.

4.4. Aanvarend schip

In deze paragraaf wordt de huidige situatie van de Velsertunnels beoordeeld bij de calamiteit van een aanvarend schip. De Velsertunnels zijn gelegen onder de kanaalbodem waardoor de calamiteit van een aanvarend schip plaatsvindt zoals weergegeven in Figuur 4-5. In Tabel 2-2 was reeds aangegeven dat de Velsertunnels een kruisingshoek van 65 graden met de kanaal-as maken. Echter wordt wegens de complexiteit aangenomen dat de calamiteit van een aanvarend schip loodrecht op de tunnel zal plaatsvinden. Daarnaast wordt aangenomen dat enkel marginale schepen in staat zouden kunnen zijn om de Velsertunnels aan te varen. Verder worden aanvaringen van kleinere schepen aan de zijanten van het Noordzeekanaal, buiten de vaargeul, niet in beschouwing genomen omdat de tunneldekking relatief groot is en de resulterende kracht relatief klein zal zijn.



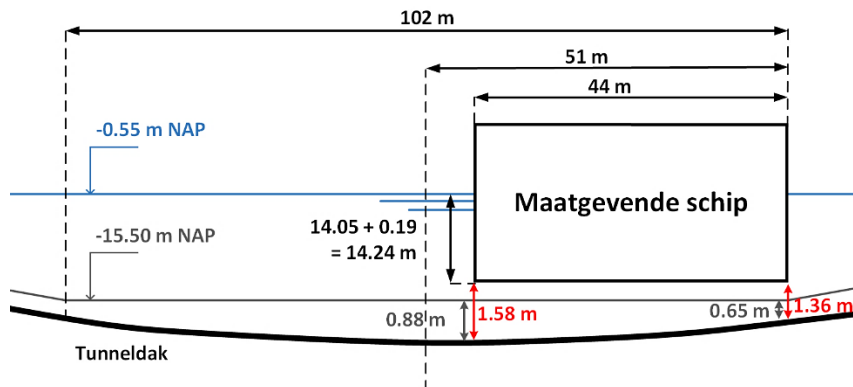
Figuur 4-5: Schematische weergave van een aanvarend schip op de Velsertunnels (loodrecht op de tunnels).

Uit de LISA gegevens 2018 volgt dat het maximale aanvarende schip⁴¹ in de huidige situatie afmetingen heeft van 44m x 255m x 14.05m. Voor dit maatgevende schip geldt dat de maximale snelheid 6 km/h bedraagt (Tabel 2-1 uit subparagraaf 2.1.3). Het feit dat het schip wordt beloofd leidt tot de aanname dat het schip de maximumsnelheid niet zal overschrijden. Daarnaast wordt de positie van het schip aangehouden zoals weergegeven in Figuur 4-6. Met vergelijking (B-8)⁴² van Appendix B.4, de Huuska/Guliev formule uit het Marin rapport, is de boegsquat van het maatgevende schip bepaald op 0.19 m waardoor de dynamische diepgang gelijk is aan 14.24 m. Aan de rand van de vaarweg heeft het maatgevende schip dan 0.71 m dynamische kielspeling en een

⁴¹ Dit schip is niet afgeleid uit de vereiste veiligheid maar betreft het maximale schip van de huidige situatie.

⁴² Uit het Marin onderzoek (2019) volgt dat de Huuska/Guliev formule het beste gebruikt kan worden voor de berekening van de boegsquat. Bij de squat berekening is de block-coëfficiënt aangenomen op $C_B = 0.85$.

afstand van 1.36 m tot het tunneldak bij de Velserspoortunnel. Bij de Velserautotunnel is de afstand tussen het schip en het tunneldak 1.92 m. Er dient te worden opgemerkt dat de kanaalbodem hier op -15.50 m NAP is aangenomen maar dat de ondiepste punten binnen de vaargeul liggen op -15.20 m NAP (subparagraaf 2.1.2). Hierdoor zou de dynamische kielspeling plaatselijk 0.41 m kunnen bedragen. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat de squat in de oude situatie, voor de snelheidsverlaging van de marginale scheepvaart op 30 juli 2020 in werking trad, 60 cm groter⁴³ was en de dynamische kielspeling 0.11 meter zou zijn bij de vaarwegbodem op -15.50 m NAP.



Figuur 4-6: Schematische weergave Noordzeekanaal met het maatgevende schip ter plaatse van de Velserspoortunnel.

Aangezien de Velsertunnels gelegen zijn onder de kanaalbodem kan een aanvarend schip resulteren in een schip dat door de tunneldekking doordringt en een schip welke over de kanaalbodem schuift (subparagraaf 3.5.1). Gegeven de relatief constante kanaalbodem en de aanwezige tunneldekking wordt uitgesloten dat een aanvarend schip de Velsertunnels frontaal zou kunnen aanvaren. Een aanvarend schip zou echter wel over de tunneldekking of het tunneldak kunnen schuiven en daarbij een wrijvingskracht op het tunneldak kunnen uitoefenen. Deze wrijvingskracht zal slechts een fractie zijn van de optredende kracht die wordt berekend in het geval van een frontale botsing van een schip met een star obstakel. Een eventueel strandend schip wordt niet in beschouwing genomen omdat de optredende verticale belasting kleiner zal zijn dan de calamiteitsbelasting van een zinkend schip (subparagraaf 3.5.1).

De spoortunnel is van de Velsertunnels maatgevend bij de calamiteit van een aanvarend schip. De reden hiervoor is dat oostgaande scheepvaart op het Noordzeekanaal gemiddeld een grotere diepgang heeft dan westgaande scheepvaart en dat de spoortunnel minder diep gelegen is dan de autotunnel. De Velserspoortunnel zal daarom middels een berekening gecontroleerd worden op de optredende wrijvingskracht die een aanvarend schip zou kunnen uitoefenen. De stootbelasting van rivier- en kanaalverkeer tegen starre obstakels wordt bepaald met vergelijking (3-3) waarbij het kinetische energieniveau van het schip wordt bepaald met vergelijking (3-4). Voor de spoortunnel wordt uitgegaan dat de optredende wrijvingskracht respectievelijk 5% en 10%⁴⁴ van de frontale equivalente statische kracht bedraagt voor de vaarsnelheden van 6 en 12 km/h. De optredende kracht per meter lengte tunnel wordt vervolgens bepaald door de wrijvingskracht te delen door de breedte van het schip. Tabel 4-13 geeft de berekende optredende wrijvingskrachten weer voor de spoortunnel bij de calamiteit van een aanvarend schip voor de vaarsnelheden van 6 en 12 km/h.

⁴³ Vóór 30 juli 2020 bedroeg de maximumsnelheid voor marginale scheepvaart 12 km/h bij de Velsertunnels (subparagraaf 2.1.3). De squat wordt dan berekend op 0.79 m. Op de rand van de vaarweg resulteert dit in 0.11 meter dynamische kielspeling en resp. 0.76 en 1.32 meter afstand tot tunneldak voor de spoor- en autotunnel.

⁴⁴ Er dient te worden opgemerkt dat deze percentages aannames zijn. In de situatie dat de snelheid van het marginale schip 12 km/h bedraagt is de squat 60 cm groter en de dynamische kielspeling dus 60 cm kleiner waardoor het schip eerder een grotere wrijvingskracht op de tunnel uit zal oefenen.

Parameter			Vergelijking	Maatgevende aanvarende schip	
				$v = 6 \text{ km/h}$	$v = 12 \text{ km/h}$
<i>Kinetische energie schip</i>	E	[MJ]	$(3-3)^{45}$	168.1	672.0
<i>Frontale representatieve equivalente statische kracht</i>	F_{dx}	[MN]	(3-4)	48.4	91.2
<i>Geschatte fractie optredende kracht t.o.v. frontale kracht</i>	f	[-]	-	0.05	0.10
<i>Geschatte optredende kracht</i>	F_{tot}	[kN]	$f \cdot F_{dx}$	2420	9120
<i>Optredende kracht per lengte tunnel</i>	F	[kN/m]	F_{tot}/B	55	207

Tabel 4-13: Bepaling calamiteitsbelasting van een aanvarend schip op de Velserspoortunnel.

Appendix J.5 geeft de resultaten weer van de berekening in MatrixFrame voor de Velserspoortunnel onder de calamiteitsbelasting van een aanvarend schip van 207 kN met meter lengte tunnel. De optredende snedekrachten voldoen hierbij ruimschoots aan de capaciteit van de spoortunnel (Appendix L). De spoortunnel voldoet daarmee voor beide vaarsnelheden van 6 en 12 km/h. De kans dat de calamiteit van een aanvarend schip optreedt is daarbij wel hoger voor de hogere vaarsnelheid aangezien de dynamische kielspeling dan aanzienlijk kleiner is.

Zoals reeds beschreven is de diepgang van westgaande scheepvaart gemiddeld kleiner dan de oostgaande scheepvaart en ligt de autotunnel tevens dieper dan de spoortunnel waardoor de optredende calamiteitsbelasting voor de autotunnel kleiner⁴⁶ zal zijn. Er wordt daarom aangenomen dat de autotunnel voldoet op deze calamiteitsbelasting. Beide Velsertunnels voldoen daarmee onder de calamiteit van een aanvarend schip.

4.5. Conclusie

In dit hoofdstuk is de huidige situatie van de Velsertunnels onderzocht op de calamiteiten van een vallend scheepsanker, slepend scheepsanker, zinkend schip en aanvarend schip. De Velsertunnels voldoen aan de vereiste veiligheid bij de calamiteiten van een slepend scheepsanker en een aanvarend schip. Bij de calamiteit van een vallend scheepsanker voldoet de spoortunnel niet op de bezwijkmechanismen van pons en buiging voor de situatie van de huidige tunneldekking. De autotunnel voldoet wel in de huidige situatie. Beide tunnels voldoen overigens niet in de situatie wanneer er geen dekking op de tunnels aanwezig is. Bij de calamiteit van een zinkend schip voldoet de autotunnel niet op de moment- en dwarskrachtcapaciteit. De spoortunnel voldoet echter wel onder de calamiteit van een zinkend schip.

De spoortunnel voldoet niet op de calamiteit van een vallend scheepsanker en de autotunnel voldoet niet op de calamiteit van een zinkend schip. In Hoofdstuk 5 wordt daarom verder ingaan op de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip op de Velsertunnels.

⁴⁵ Er is gerekend met een massa van 110000 ton en snelheden van respectievelijk 1.67 en 3.33 m/s.

⁴⁶ De Velserspoortunnel heeft een beschermende werking op de Velserautotunnel voor de oostgaande scheepvaart met betrekking tot de calamiteit van een aanvarend schip.

5. Bepaling faalkansen Velsertunnels

In dit hoofdstuk worden de faalkansen van de Velsertunnels in de huidige situatie bepaald voor de calamiteiten van een vallend scheepsanker (paragraaf 5.1) en een zinkend schip (paragraaf 5.2). Er zal hierbij gebruik worden gemaakt van een database van het Loodswezen (LISA gegevens van 2018) in combinatie met Python waarin simulaties worden uitgevoerd. In paragraaf 5.3 wordt de conclusie behandeld omtrent de faalkansen van een vallend scheepsanker en zinkend schip.

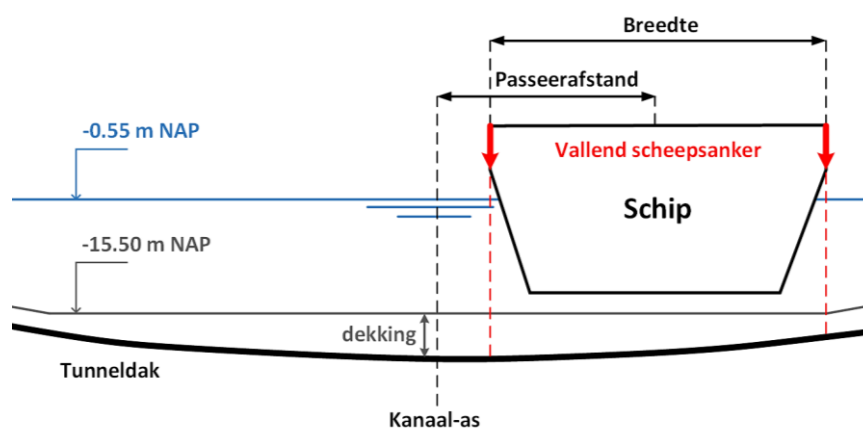
5.1. Vallend scheepsanker

In deze paragraaf worden de faalkansen van de Velsertunnels onder de calamiteit van een vallend scheepsanker bepaald voor de huidige situatie. Allereerst wordt ingegaan op de methode (subparagraaf 5.1.1), vervolgens worden de resultaten gepresenteerd (subparagraaf 5.1.2) waarna de discussie wordt behandeld (subparagraaf 5.1.3).

5.1.1. Methode

Met behulp van Python worden de faalkansen van de Velsertunnels door een vallend scheepsanker bepaald volgens de Monte Carlo methode. Dit houdt in dat een aantal simulaties (N) wordt verricht waarbij een scheepsanker van een willekeurig schip op een willekeurige positie boven de tunnel valt. De voorwaardelijke faalkans⁴⁷ van de Velsertunnels door een vallend scheepsanker wordt uiteindelijk bepaald door het totaal aantal simulaties dat tot falen leidt te delen door het totaal aantal simulaties. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de bezwijkmechanismen van pons en buiging.

Met de LISA gegevens van 2018 zijn de schepen die de Velsertunnels hebben gepasseerd in kaart gebracht. Voor elke schip wordt de ankermassa bepaald door middel van de methode in Appendix H.2, middels de lengte, breedte, diepgang en het draagvermogen van het schip uit de LISA gegevens. Het vaarwegprofiel wordt aangehouden zoals weergegeven in Figuur 2-2 en voor de positie van de Velsertunnels worden de gegevens uit Tabel 2-2 gebruikt. De tunneldekking resulteert uit het verschil in diepteligging tussen het vaarwegprofiel en de tunnel. Voor de passeerafstanden van de scheepvaart wordt gebruik gemaakt van de normale verdeling van het gemiddelde schip uit Tabel B-1 van Appendix B.3. Opgemerkt moet worden dat deze positie het midden van het schip betreft, een vallend scheepsanker zal met de halve breedte van het schip afwijken van deze positie. Figuur 5-1 geeft schematisch de situatie van het vallende scheepsanker weer.

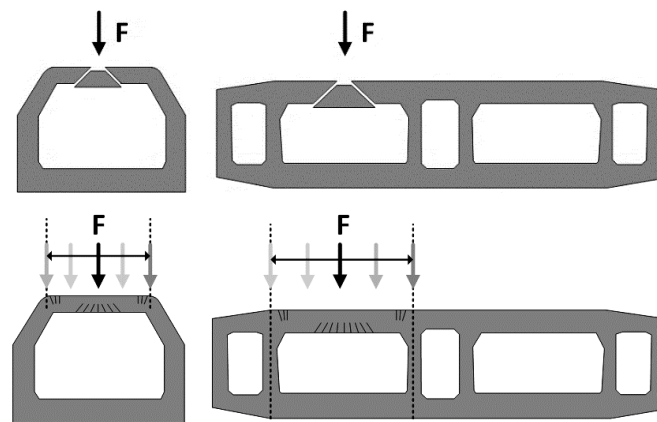


Figuur 5-1: Schematisch overzicht van de situatie van een vallend scheepsanker op het tunneldek (doorsnede kanaal).

⁴⁷ De faalkans gegeven dat de tunnel geraakt wordt door een vallend scheepsanker. De totale faalkans wordt bepaald met het product van de voorwaardelijke faalkans en de kans van optreden van de calamiteit.

Met vergelijkingen (3-1)⁴⁸ en (3-2)⁴⁹ worden het dwarsoppervlak van het scheepsanker en de eindsnelheid bepaald afhankelijk van de berekende ankermassa. De penetratiediepte van een vallend scheepsanker wordt vervolgens bepaald met vergelijking (F-2) van Appendix F.1. In het geval dat de penetratiediepte kleiner is dan de tunneldekking en de tunnel niet door het anker wordt geraakt, kan de impactbelasting bepaald worden met vergelijkingen (E-7) en (E-8) van Appendix E.2. Als de penetratiediepte groter dan de tunneldekking is en het anker de tunnel raakt, dan wordt de impactbelasting bepaald met de methode van Appendix E.1⁵⁰. Hierbij wordt de impactsnelheid van het scheepsanker na het passeren van de tunneldekking bepaald met vergelijking (M-2) en Figuur M-4 van Appendix M.

De Velsertunnels worden gecontroleerd op de bezwijkmechanismen van pons en buiging. Voor de tunnelweerstand tegen buiging⁵¹ en pons⁵² worden de karakteristieke waarden uit Appendices L.2 en L.4 gebruikt. De bezwijkmechanismen van pons en buiging worden gecontroleerd onder de statisch equivalente belasting van de calamiteit. In de breedterichting wordt de minst gunstige positie van de calamiteitsbelasting aangenomen met betrekking tot de bezwijkmechanismen zoals weergegeven in Figuur 5-2. Bij het bezwijkmechanisme van pons wordt de belasting midden op het tunneldak geplaatst en wordt de optredende schuifspanning bepaald met vergelijking (4-1)⁵³. Bij het bezwijkmechanisme van buiging worden de optredende momenten bepaald onder de minst gunstige positie⁵⁴ van de statisch equivalente belasting met een vuistregel voor een tweezijdig ingeklemde ligger. In de berekening wordt bij de tunnelweerstand geen rekening gehouden met een lagere weerstand nabij de voeg van de tunnelnoten. Verder is de invloed van de aanwezige betonnen beschermerschil op de weerstand van de tunnel verwaarloosd. Een simulatie faalt wanneer er niet wordt voldaan op de controle van één of beide bezwijkmechanismen.



Figuur 5-2: Bezwijkmechanismen van pons (boven) en buiging (onder) bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.

⁴⁸ De factor c_a is gelijk genomen aan $0.0062 \text{ m}^2/\text{kg}^{2/3}$ (zie subparagraaf 3.2.2).

⁴⁹ De factor c_v is conservatief gelijk gesteld aan $1.68 \text{ m}/\text{skg}^{1/6}$ (zie subparagraaf 3.2.2).

⁵⁰ Bij bepaling van de statisch equivalente kracht door middel van vergelijking (E-6), wordt de maximale waarde $\text{DLF} = 2.0$ aangehouden.

⁵¹ De karakteristieke veldmomentcapaciteit van het tunneldak bedraagt 1809 en 1955 kNm/m voor de spoor- en autotunnel (Tabel L-5). De karakteristieke capaciteit van het steunpuntsmoment van het tunneldak is 2383 kNm/m voor de spoortunnel en bedraagt respectievelijk 2967 en 3261 kNm/m voor het buitenste en binnenste steunpunt van de autotunnel ter plaatse van de rijbaan (Tabel L-5).

⁵² De karakteristieke ponscapaciteit is $0.63 \text{ N}/\text{mm}^2$ en $0.53 \text{ N}/\text{mm}^2$ voor de spoor- en autotunnel (Tabel L-9).

⁵³ De factor β wordt op 1.5 aangehouden en het beschouwde controle-omtrek (u_i) wordt bepaald zoals in subparagraaf 4.1.3.

⁵⁴ De positie op het tunneldak (in breedterichting) waar de aangebrachte statisch equivalente belasting leidt tot de grootst optredende momenten (inclusief de permanent optredende momenten van Appendices J.2 en K.2).

5.1.2. Resultaten

Tabel 5-1 en Tabel 5-2 tonen de resultaten van de voorwaardelijke faalkansen voor respectievelijk de spoor- en autotunnel bij een aantal simulaties van $N = 10^5$. Er is onderscheid gemaakt in verschillende diepteliggingen van de kanaalbodem om de invloed van de bodemdiepte op de faalkans te kunnen analyseren. Daarnaast wordt als referentie tussen haakjes de voorwaardelijke faalkans gegeven bij de door de ROK gehanteerde eindsnelheid van 9 m/s. Uit de resultaten blijkt de toename in de faalkans duidelijk zichtbaar bij een afname in tunneldekking. Uit subparagraaf 2.1.2 blijkt dat de Nautisch Gegarandeerde Diepte (NGD) van het Noordzeekanaal NAP -15.50 meter bedraagt, en dat ter plaatse van de Velsertunnels ondiepere stukken op circa NAP -15.20 meter aanwezig zijn. Gegeven dat de bodem ter plaatse van de Velsertunnels eerder ondieper dan dieper is, worden de resultaten van de bodem op -15.50 m NAP verder meegenomen in de faalkansberekening.

	Oostgaande scheepvaart	Westgaande scheepvaart
Kanaalbodem op -15.50 m NAP	0.5753 (0.9985)	0.5294 (0.9346)
Kanaalbodem op -15.60 m NAP	0.7468 (0.9999)	0.6994 (0.9417)
Kanaalbodem op -15.70 m NAP	0.9511 (0.9999)	0.8910 (0.9441)

Tabel 5-1: Voorwaardelijke faalkansen vallend scheepsanker Velserspoortunnel (Python).

	Oostgaande scheepvaart	Westgaande scheepvaart
Kanaalbodem op -15.50 m NAP	0.0890 (0.0979)	0.0658 (0.0701)
Kanaalbodem op -15.60 m NAP	0.1306 (0.1451)	0.1041 (0.1147)
Kanaalbodem op -15.70 m NAP	0.1891 (0.2120)	0.1580 (0.1762)

Tabel 5-2: Voorwaardelijke faalkansen vallend scheepsanker Velserautotunnel (Python).

In Tabel H-1 van Appendix H zijn de kansen van optreden en het aantal passerende schepen reeds bepaald voor de Velsertunnels bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Tabel 5-3 geeft de resulterende totale faalkansen van de Velsertunnels door een vallend scheepsanker.

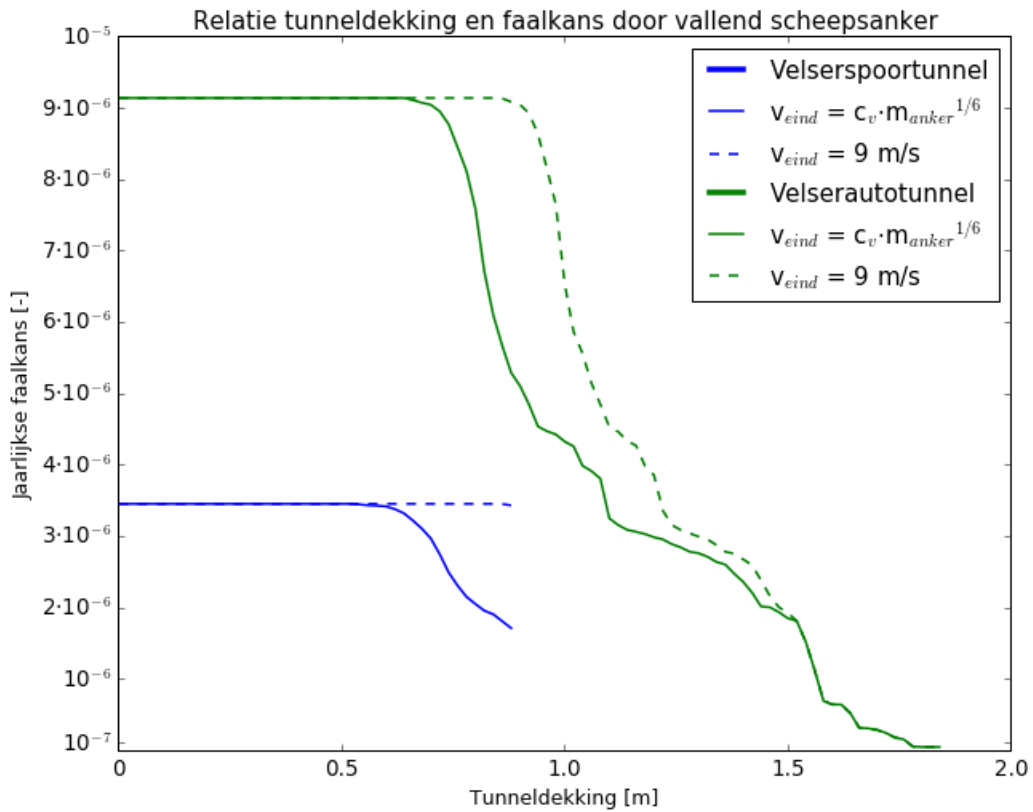
Tunnel	Kans van optreden (per schip per jaar)	Faalkans bij optreden		Faalkans (per jaar)		
		Oost	West	Oost	West	Totaal
Velserspoortunnel	$3.11 \cdot 10^{-10}$	0.58	0.53	$9.98 \cdot 10^{-7}$	$9.14 \cdot 10^{-7}$	$1.91 \cdot 10^{-6}$
Velserautotunnel	$8.24 \cdot 10^{-10}$	0.09	0.07	$4.11 \cdot 10^{-7}$	$3.20 \cdot 10^{-7}$	$7.32 \cdot 10^{-7}$

Tabel 5-3: Overzicht faalkansen Velsertunnels door de calamiteit van een vallend scheepsanker.

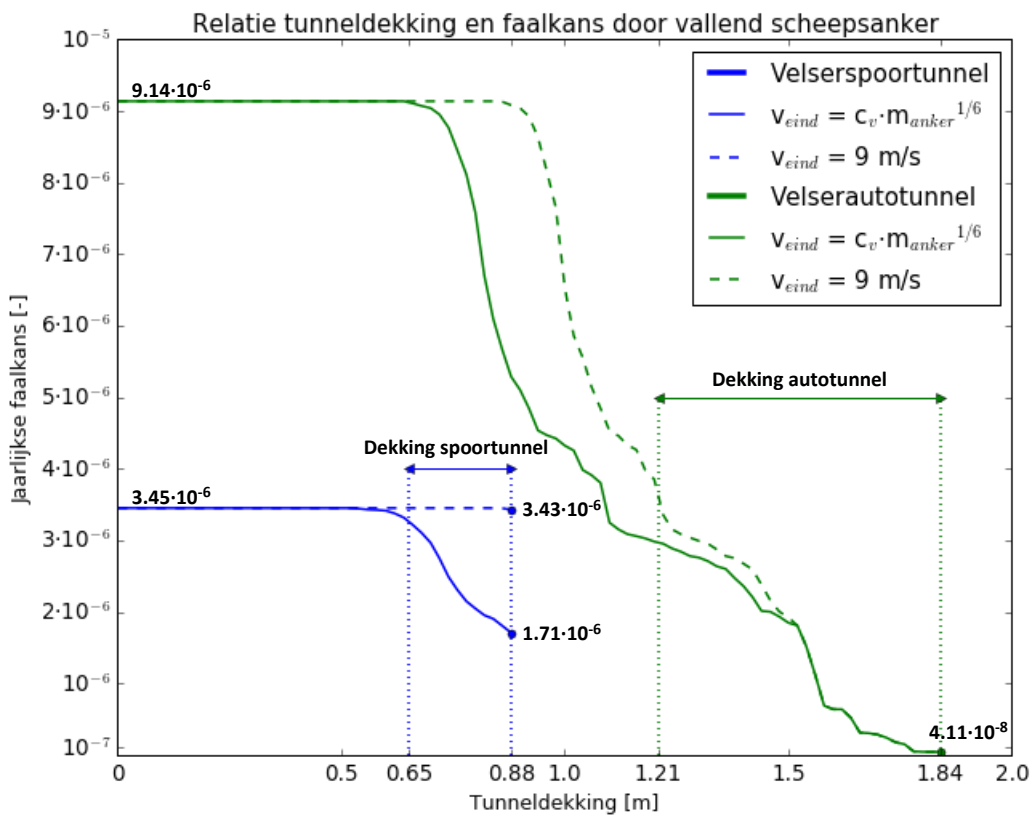
Figuur 5-3 geeft de relatie weer tussen de tunneldekking en de faalkans door een vallend scheepsanker voor de Velsertunnels. Er is voor de eindsnelheid van het scheepsanker daarnaast onderscheid gemaakt tussen de vergelijking (3-2) en de door de ROK gehanteerde 9 m/s. Met de vergelijking worden voor de lagere ankermassa's kleinere eindsnelheden verkregen dan 9 m/s (subparagraaf 4.1.1). Figuur 5-4 geeft wederom de relatie tussen tunneldekking en faalkans door een vallend scheepsanker voor de Velsertunnels, inclusief de huidige tunneldekking⁵⁵.

Uit de figuur kunnen een aantal zaken worden opgemaakt. Allereerst valt op dat bij een dekking kleiner dan circa 0.50 meter de faalkansen van beide tunnels gelijk zijn aan de kans van optreden. Bij toenemende dekking nemen de faalkansen echter wel af. Hierbij zijn de faalkansen hoger als de eindsnelheden van het scheepsanker op 9 m/s worden aangehouden (ROK) dan wanneer gebruik wordt gemaakt van vergelijking (3-2). Voor de autotunnel kan worden opgemaakt dat bij een dekking groter dan circa 1.5 meter, geen verschil meer aanwezig is tussen de toegepaste eindsnelheden. Een verklaring hiervoor ligt in het feit dat de faalkansen bij de hogere dekking vooral bepaald worden door de zwaardere scheepankers. De berekende eindsnelheid volgens vergelijking (3-2) is hoger voor de zwaardere scheepankers, waardoor het verschil met de eindsnelheid van 9 m/s kleiner wordt.

⁵⁵ Onder de aanname dat de kanaalbodem op NGD van NAP -15.50 m ligt (subparagraaf 2.1.2).



Figuur 5-3: Relatie tussen tunneldekking en de faalkans door de calamiteit van een vallend scheepsanker voor de Velsertunnels.



Figuur 5-4: Relatie tussen tunneldekking en de faalkans door de calamiteit van een vallend scheepsanker voor de Velsertunnels (met de huidige tunneldekking op respectievelijk de rand van de vaarweg en de kanaal-as).

5.1.3. Discussie

Bij de simulaties waarin de spoortunnel faalde bleek de tunnel meestal niet te voldoen op zowel pons als buiging. Ook voldeed de tunnel in sommige gevallen niet op pons. Echter kwam het niet voor dat de tunnel enkel niet op buiging voldeed. Bij de autotunnel bleek de tunnel bij falen ook in de meeste gevallen niet te voldoen op beide bezwijkmechanismen. Daarnaast voldeed de tunnel in een enkel geval niet op het bezwijkmechanisme van pons. Bij beide tunnels komt het dus niet voor dat de tunnels enkel op het bezwijkmechanisme van buiging niet voldoen. Dit is in overeenstemming met de literatuur uit subparagraaf 3.2.1 waarin gesteld wordt dat onder de calamiteit van een vallend scheepsanker bezwijken op pons of dwarskracht zal optreden.

Verder dient te worden opgemerkt dat in de faalkansberekening voor elke simulatie steeds de minst gunstige positie van de statisch equivalente kracht in de breedterichting van de tunnel is gekozen. Dit kan als conservatief worden beschouwd omdat het vallende scheepsanker in werkelijkheid over de gehele breedte de tunnel zou kunnen raken. Voor de autotunnel is daarbij nog eens uitgegaan dat het scheepsanker altijd boven de rijbaan op het tunneldak valt. Ook deze aanname kan als conservatief worden beschouwd. Er staat echter tegenover dat in de lengterichting is aangenomen dat het vallende scheepsanker niet nabij de voeg van de tunnelmoot terecht komt.

5.2. Zinkend schip

In deze paragraaf worden de faalkansen van de Velsertunnels onder de calamiteit van een zinkend schip bepaald voor de huidige situatie. Allereerst wordt ingegaan op de methode (subparagraaf 5.2.1), vervolgens worden de resultaten gepresenteerd (subparagraaf 5.2.2) waarna de discussie wordt behandeld (subparagraaf 5.2.3).

5.2.1. Methode

Met behulp van Python worden de faalkansen van de Velsertunnels door een zinkend schip bepaald aan de hand van de LISA gegevens van 2018. Met de LISA gegevens is de passerende scheepvaart van de Velsertunnels in kaart gebracht. De voorwaardelijke faalkans wordt bepaald door het aantal schepen dat bij zinken leidt tot het falen van de tunnel te delen door het totaal aantal passerende schepen. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen horizontaal zinken en zinken onder een hoek (subparagraaf 3.4.1). Met de methode uit Appendix G wordt de calamiteitsbelasting van een zinkend schip voor alle schepen bepaald. De lengte, breedte, diepgang, holte en het draagvermogen van het schip volgen uit de LISA gegevens. Voor de blokcoëfficiënt (C_B) wordt 0.90 aangehouden voor tankschepen, 0.75 voor container- en vrachtschepen, 0.70 voor passagiers- en roroschepen en 0.80 voor andere typen schepen. Met vergelijking (G-1) wordt het eigengewicht van het schip bepaald.

De totale optredende kracht bij een horizontaal zinkend schip (L_1) wordt bepaald met vergelijking (G-2). Bij het scheepstype tanker wordt de lading niet in beschouwing genomen aangezien de dichtheid van olie kleiner is dan water. Voor roroschepen en cruiseschepen wordt aangenomen dat 50% van de lading bestaat uit staal en de rest van de lading een gelijke dichtheid heeft als water. Voor alle overige scheepstypen wordt een lading van ijzererts aangenomen. Het steunoppervlak (A_1) voor een horizontaal zinkend schip wordt aangenomen gelijk te zijn aan 80% van de lengte keer de breedte van het schip. Aangezien de tunnel stijver is dan de omliggende bodem wordt een toename van 60%⁵⁶ in rekening gebracht voor de belasting (subparagraaf 3.4.2). De resulterende belasting voor een horizontaal zinkend schip wordt bepaald door de totale belasting te delen door het steunoppervlak ($q_1 = 1.6 \cdot L_1 / A_1$).

⁵⁶ Deze waarde behorende bij een gesegmenteerde tunnel is gepakt omdat de waarde van de monolithische tunnel te conservatief wordt geacht i.v.m. zettingen voor de situatie van de Velsertunnels (subparagraaf 3.4.2).

Voor een zinkend schip onder een hoek wordt met vergelijking (G-3) het binnenstromende watergewicht per meter berekend. Voor tankers wordt het volumegewicht van olie gebruikt met de aangenomen waarde van 8.5 kN/m^3 . Voor rorosschepen en cruiseschepen wordt wederom aangenomen dat 50% van de lading bestaat uit staal en de rest van de lading een gelijke dichtheid heeft als water. Met vergelijking (G-4) wordt de afstand bepaald waarover een schip vol met water loopt. Deze afstand wordt begrensd op de helft van de lengte van een schip⁵⁷. De totale optredende kracht van een zinkend schip onder een hoek (L_2) wordt bepaald met vergelijking (G-5). Het steunoppervlak (A_2) wordt voor een schip zinkend onder een hoek aangenomen gelijk te zijn aan 80% van de breedte van het schip keer de breedte van de tunnel⁵⁸. De resulterende belasting voor een zinkend schip onder een hoek wordt bepaald door de totale belasting te delen door het steunoppervlak ($q_2 = L_2 / A_2$).

De weerstand van de Velsertunnels tegen de calamiteit van een zinkend schip is bepaald met behulp van MatrixFrame. Voor beide tunnels is de maximale calamiteitsbelasting van een zinkend schip bepaald waarbij de tunnel nog net in staat is om de belasting te weerstaan. Appendices J.6 en K.5 tonen de bepaling van de weerstand voor respectievelijk de spoor- en autotunnel. De spoortunnel blijkt maximaal een calamiteitsbelasting van 179.6 kN/m^2 te kunnen weerstaan waarbij de tunnel nog net voldoet op de moment- en dwarskrachtcapaciteit (Appendix J.6). De autotunnel blijkt maximaal een calamiteitsbelasting van 25 kN/m^2 te kunnen weerstaan waarbij de tunnel kritisch is op de dwarskrachtcapaciteit in zowel het tunneldak als de vloer (Appendix K.5).

De tunnel zal nu falen wanneer de resulterende belasting door een zinkend schip groter is dan de kritische belasting van de tunnel. In de faalkansberekening zijn de tunnellinging, de invloed van de tunneldekking en de positie van de schepen niet meegenomen.

5.2.2. Resultaten

Tabel 5-4 en Tabel 5-5 geven de resultaten weer van de voorwaardelijke faalkansen voor respectievelijk de spoor- en autotunnel onder de calamiteit van een zinkend schip. In de faalkansberekening is onderscheid gemaakt tussen een schip dat horizontaal zinkt en een schip welke zinkt onder een hoek. In paragraaf 3.4.1 is reeds gesteld dat een horizontaal zinkend schip en een zinkend schip onder een hoek gelijke kansen van optreden hebben. De totale voorwaardelijke faalkans worden voor de Velsertunnels dan ook bepaald door het gemiddelde te nemen van de voorwaardelijke faalkansen van deze twee manieren van zinken. Appendix N geeft de resultaten van de faalkansberekening bij de calamiteit van een zinkend schip visueel weer. De totale faalkansen van de autotunnel zijn duidelijk hoger dan die van de spoortunnel. Bij de spoortunnel is de faalkans onder een horizontaal zinkend schip fors lager dan een zinkend schip onder een hoek. Bij de autotunnel zijn de verschillen tussen de faalkansen een stuk kleiner. Het verschil tussen oost en westgaande scheepvaart is voor beide tunnels en manieren van zinken verwaarloosbaar.

	Oostgaande scheepvaart	Westgaande scheepvaart
<i>Horizontaal zinkend schip</i>	0.0017	0.0017
<i>Zinkend schip onder een hoek</i>	0.0348	0.0349
Totaal	0.0183	0.0183

Tabel 5-4: Voorwaardelijke faalkansen zinkend schip Velserspoortunnel (Python).

⁵⁷ Wanneer een schip vol met water loopt over een grotere afstand wordt verwacht dat het steunoppervlak onder het schip toe zal nemen, en de belasting (kracht per oppervlak) daarmee af zal nemen.

⁵⁸ Bij de spoortunnel is de breedte van het dak circa 7.5 meter maar wordt de totale breedte van de tunnel in rekening gebracht (12.25 meter), aangezien de belasting anders onrealistisch hoog zal zijn. Bij de autotunnel wordt de halve breedte van de tunnel aangenomen zoals in het onderzoek van Van Lagen (2016).

	Oostgaande scheepvaart	Westgaande scheepvaart
Horizontaal zinkend schip	0.9975	0.9979
Zinkend schip onder een hoek	0.7810	0.7793
Totaal	0.8893	0.8886

Tabel 5-5: Voorwaardelijke faalkansen zinkend schip Velsertunnel (Python).

In Tabel I-1 van Appendix I zijn de kansen van optreden en het aantal passerende schepen reeds bepaald voor de Velsertunnels bij de calamiteit van een zinkend schip. Tabel 5-6 geeft de resulterende totale faalkansen van de Velsertunnels door een zinkend schip.

Tunnel	Kans van optreden (per schip per jaar)	Faalkans bij optreden		Faalkans (per jaar)		
		Oost	West	Oost	West	Totaal
Velserspoortunnel	$1.04 \cdot 10^{-8}$	0.02	0.02	$1.15 \cdot 10^{-6}$	$1.15 \cdot 10^{-6}$	$2.31 \cdot 10^{-6}$
Velserautotunnel	$1.11 \cdot 10^{-8}$	0.89	0.89	$5.47 \cdot 10^{-5}$	$5.48 \cdot 10^{-5}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$

Tabel 5-6: Overzicht faalkansen Velsertunnels door de calamiteit van een zinkend schip.

5.2.3. Discussie

Er dient te worden opgemerkt dat het dynamische deel van de calamiteitsbelasting door een zinkend schip niet in beschouwing is genomen in de berekening (subparagraaf 3.4.2). Voor de grote schepen is het dynamische deel van de belasting slechts een fractie ten opzichte van het statische deel, bij kleinere schepen met een lengte van 100 meter is dit dynamische deel echter ongeveer even groot als het statische deel van de belasting (subparagraaf 3.4.2). Voor de kleinere scheepvaart kan de totale optredende kracht dus zijn onderschat in de berekening. Daar staat dan echter weer tegenover dat voor de meeste schepen een lading van ijzererts is aangenomen, waardoor de belasting hoger wordt ingeschat dan de werkelijkheid. Verder wordt in de berekening de invloed van de tunneldekking op de krachtsafdracht niet meegenomen.

Daarnaast kan een kanttekening geplaatst worden bij de bepaling van de optredende belasting van een zinkend schip onder een hoek bij de aanname omtrent het steunoppervlak. In de berekening is aangenomen dat dit steunoppervlak gelijk is aan 80% van de breedte van het schip keer de breedte van de tunnel. Echter zal het steunoppervlak in werkelijkheid afhankelijk zijn van de plastische vervorming van het schip. Per schip of scheepstype zou deze vervorming kunnen verschillen.

Verder is het opmerkelijk dat de voorwaardelijke faalkans van de Velsertunnel door de calamiteit van een zinkend schip aanzienlijk hoger is dan de door Van Lagen (2016) bepaalde faalkans voor de Wijkertunnel. Van Lagen komt voor de Wijkertunnel op een faalkans van 0.007, wat fors lager is dan de faalkans van 0.89 voor de Velsertunnel. De voorwaardelijke faalkans van de Velserspoortunnel is met 0.02 qua orde-grootte wel vergelijkbaar met de door Van Lagen bepaalde faalkans van de Wijkertunnel.

Het verschil in voorwaardelijke faalkans tussen de spoor- en autotunnel kan al worden opgemerkt in de maximale calamiteitsbelasting waarbij de tunnels nog net voldoen op de optredende krachten. De maximale calamiteitsbelasting door een zinkend schip betreft voor de spoor- en autotunnel respectievelijk 179.6 kN/m^2 en 25 kN/m^2 . De oorzaak van deze verschillen wordt vooral toegewezen aan de hogere weerstand⁵⁹ van de spoortunnel door de combinatie van een kleinere overspanning en relatief meer aangebrachte wapening.

⁵⁹ De tunnelweerstand is bepaald in Appendix L, waarbij de momentcapaciteit is berekend in Appendix L.2 en de dwarskrachtcapaciteit in Appendix L.3.

5.3. Conclusie

In paragrafen 5.1 en 5.2 zijn de faalkansen van de Velsertunnels bepaald voor respectievelijk de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een zinkend schip. Tabel 5-7 geeft de totale resultaten van de faalkansberekening weer. Uit de tabel kan worden opgemaakt dat voor de spoortunnel de jaarlijkse faalkansen voor de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een zinkend schip vergelijkbaar zijn. Bij de autotunnel daarentegen is de jaarlijkse faalkans door een zinkend schip fors groter dan de faalkans door een vallend scheepsanker.

Tunnel	Jaarlijkse faalkans	
	<i>Vallend scheepsanker</i>	<i>Zinkend schip</i>
Velserspoortunnel	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$2.31 \cdot 10^{-6}$
Velserautotunnel	$7.32 \cdot 10^{-7}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$

Tabel 5-7: Overzicht faalkansen Velsertunnels voor de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip.

Uit subparagraaf 2.5.2 volgt voor de Velsertunnels een jaarlijkse toegestane faalkans van $1.61 \cdot 10^{-5}$ die geldt bij een betrouwbaarheidsindex $\beta = 3.3$ en de restlevensduur van 30 jaar. Deze toegestane faalkans omvat alle mogelijke faalmechanismen waardoor de tunnels zouden kunnen falen. De jaarlijkse faalkansen door een vallend scheepsanker zijn voor zowel de spoor- als autotunnel een orde-grootte kleiner dan de toegestane faalkans. Hierdoor wordt gesteld dat de Velsertunnels in de huidige situatie aan de vereiste betrouwbaarheid voldoen bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Wanneer de eindsnelheid van het scheepsanker op 9 m/s wordt aangehouden ongeacht de ankermassa, zal de faalkans voor de spoortunnel circa tweemaal groter zijn en de faalkans van de autotunnel ongeveer gelijk blijven, waardoor beide tunnels nog steeds voldoen. De jaarlijkse faalkans door een zinkend schip is voor de spoortunnel een orde-grootte kleiner dan de toegestane faalkans. Bij de autotunnel is de faalkans echter een orde-grootte hoger dan de toegestane faalkans. Hierdoor voldoet de spoortunnel aan de vereiste betrouwbaarheid op de calamiteit van een zinkend schip in de huidige situatie, maar voldoet de autotunnel niet.

Er dient te worden opgemerkt dat de faalkansberekening onderhevig is aan zeer theoretische aannames en methoden waardoor er nog onzekerheid is omtrent het werkelijk gedrag van de tunnels. Daarom dienen de faalkansen eerder als orde-grootte dan als exact getal te worden geïnterpreteerd.

6. Alternatieve tunnelbeschermingen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op alternatieve tunnelbeschermingen voor de Velsertunnels. In paragrafen 6.1 en 6.2 worden respectievelijk mogelijke maatregelen en constructieve oplossingen gepresenteerd die in staat zijn om de veiligheid van de Velsertunnels inzake scheepvaart calamiteiten te vergroten of de dikte van de tunneldekking zouden kunnen verkleinen. Paragraaf 6.3 beoordeelt deze maatregelen en constructieve oplossingen waaruit enkele varianten zullen worden opgesteld.

6.1. Maatregelen

In deze paragraaf worden de mogelijke maatregelen behandeld welke de veiligheid van de tunnel tegen calamiteiten van scheepvaart kunnen verhogen.

6.1.1. Verlaging maximum vaarsnelheid

Een lagere vaarsnelheid zorgt voor een kleinere squat van het schip wat resulteert in een grotere kielspeling. Hierdoor worden zowel de kans op de calamiteit van een aanvarend schip als de hierbij optredende belasting op de tunnel kleiner waardoor de tunnelveiligheid toeneemt (paragraaf 4.4). Zoals reeds aangegeven in Tabel 2-1 (subparagraaf 2.1.3) is de maximumsnelheid voor scheepvaart met een diepgang groter dan 13.85 m (zoet water) sinds 30 juli 2020 verlaagd van 12 naar 6 km/h. Uit onderzoek van Marin (2019) volgt dat de Huuska/Guliev formule het best gebruikt kan worden voor berekening van de boegsquat bij marginale scheepvaart op het Noordzeekanaal, zie vergelijking (B-8) van Appendix B.4. Voor het maatgevende schip in de huidige situatie⁶⁰ is met de formule bepaald dat de squat met 60 cm⁶¹ is afgenomen door de snelheidsverlaging van 12 naar 6 km/h. Deze maatregel is reeds toegepast waardoor deze in het onderzoek niet verder wordt behandeld.

6.1.2. Handhaven vaarsnelheid en diepgang

Zoals reeds aangegeven in subparagraaf 2.1.3 worden de maximale diepgang of de maximaal toegestane snelheid regelmatig overschreden door de scheepvaart op het Noordzeekanaal (Horvat & Partners, 2017). Beide overschrijdingen resulteren in een kleinere kielspeling waardoor de kans op een aanvarend schip met de tunnel zal toenemen (paragraaf 4.4). Verder leidt een hogere snelheid tot een hogere calamiteitsbelasting van een aanvarend schip (paragraaf 4.4). Betere handhaving van de snelheid en diepgang van de scheepvaart kan het aantal overschrijdingen laten afnemen waardoor de veiligheid van de tunnel zal toenemen. Strikte monitoring van de snelheid en sancties voor de scheepsbemanning bij het overtreden van de snelheid zou een mogelijke maatregel kunnen zijn. Verder zou de kielspeling onder water door sensoren gemeten kunnen worden waarbij opnieuw sancties kunnen worden uitgedeeld aan overtreders. Laatstgenoemde zou bovendien gecombineerd kunnen worden met een constructieve toepassing in de vorm van een betonnen drempel.

6.1.3. Controle scheepsankers

De kans op de calamiteit van een vallend scheepsanker wordt onder andere veroorzaakt⁶² door materieel bezwijken of menselijk handelen. Om de kans van optreden op de calamiteit te verkleinen zouden controles kunnen worden uitgevoerd voor scheepsankers en lieren. Dit zou bijvoorbeeld door het Loodswezen kunnen worden gedaan bij oostgaande marginale schepen die de sluis passeren. Daarnaast zou gecontroleerd kunnen worden of de bemanning goed is opgeleid met betrekking tot bediening van de ankerlier. Deze controle zou ook voor spudpalen kunnen worden uitgevoerd.

⁶⁰ Uit de LISA gegevens 2018 volgen de afmetingen 44m x 255m x 14.05m van het maatgevende schip met betrekking tot de grootste squat (over de Velsertunnels).

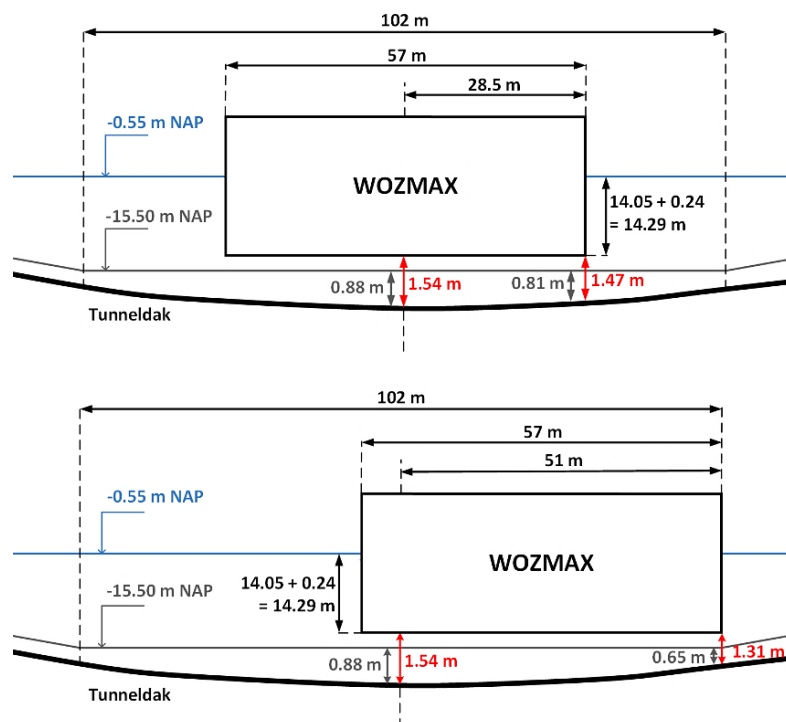
⁶¹ Squat berekening is uitgevoerd met de aangenomen block-coëfficiënt van 0.85. Bij de snelheid 12 km/h is de squat berekend op 79 cm en bij de snelheid 6 km/h is de berekende squat 19 cm.

⁶² Er wordt overigens aangenomen dat ter plaatse van de Velsertunnels al een ankerverbod geldt (TNO, 1995).

6.1.4. Versmallen vaarwegprofiel

Het vaarwegprofiel kan worden versmald waarbij éénrichtingsverkeer⁶³ geldt voor marginale scheepvaart (Horvat & Partners, 2017). Aan de rand van de vaarweg ligt de bovenkant van het dak van de Velsertunnels minder diep dan in het midden van de vaarweg (zie Appendices A.4 en A.5). Hierdoor is de afstand tussen het tunneldak en een varend schip kleiner aan de rand van de vaarweg dan op de kanaal-as. Enerzijds kan het versmallen van de vaarweg resulteren in een lagere kans op calamiteiten als een aanvarend of zinkend schip waardoor de tunnelveiligheid toeneemt. Anderzijds bestaat de mogelijkheid om de tunneldekking te kunnen verkleinen om een grotere diepgang mogelijk te maken boven de Velsertunnels. Om ervoor te zorgen dat marginale schepen zich aan het versmalde vaarwegprofiel houden kan gebruik worden gemaakt van remmingswerken of boeien.

Voor de Velserspoortunnel is het effect van de maatregel schematisch inzichtelijk gemaakt voor het toekomstige maatgevende schip⁶⁴ in Figuur 6-1. Hierbij is de dynamische diepgang van het schip bepaald door de som te nemen van de statische diepgang en de berekende squat. De squat is berekend met de Huuska/Guliev formule⁶⁵ uit het onderzoek van Marin (2019), zie vergelijking (B-8) van Appendix B.4. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat ondanks dat de spoortunnel een grote boogstraal⁶⁶ heeft, de kleinste afstand tussen het varende schip en de spoortunnel met 16 cm toeneemt wanneer de vaarweg wordt versmald ter plaatse van de Velsertunnels. De Velserautotunnel heeft een kleinere boogstraal waardoor de afstand tussen het schip en de bovenkant van de tunnel met 44 cm zou kunnen toenemen. Echter ligt de autotunnel dieper dan de spoortunnel waardoor de diepte van de spoortunnel maatgevend is.



Figuur 6-1: Schematische weergave Noordzeekanaal met het toekomstige scheepstype WOZMAX in het geval van een versmalde vaarweg (boven) en de huidige vaarweg (beneden) ter plaatse van de Velsertunnels.

⁶³ Momenteel is het ter plaatse van de Velsertunnels al reeds niet toegestaan om scheepvaart met een grotere diepgang groter dan 13,55 m te ontmoeten zoals aangegeven in subparagraaf 2.1.3 (Port of Amsterdam, 2020).

⁶⁴ Het scheepstype WOZMAX heeft afmetingen van 330 x 57 x 14,05 meter (paragraaf 2.3.2).

⁶⁵ Bij de berekening van de squat is de block-coëfficiënt aangenomen op 0,85 en de vaarsnelheid is 6 km/h.

⁶⁶ De boogstraal van de Velserspoortunnel bedraagt 7000 m en bij de Velserautotunnel is de boogstraal 2500 m (zoals reeds in Tabel 2-2 van paragraaf 2.2.3 is aangegeven).

6.2. Constructieve oplossingen

In deze paragraaf wordt ingegaan op de mogelijke constructieve tunnelbeschermingen die de veiligheid van de tunnels tegen scheepvaartcalamiteiten kunnen verhogen en/of de dikte van de tunnelbescherming kunnen verkleinen.

6.2.1. Algemeen

Een constructie kan op verschillende manieren de calamiteitsbelasting van een vallend scheepsanker opnemen. Allereerst kan de belasting direct afgedragen worden naar de tunnelwanden waardoor het tunneldak niet wordt belast (TNO, 2009). Daarnaast kan de spreiding van de belasting over het tunneldak worden toegepast waardoor de spanningen worden verlaagd (TNO, 2009). Bovendien kan een gelaagde constructie worden toegepast waardoor de duur van de puls op de constructie wordt verhoogd en de belasting piek wordt verlaagd door middel van impedantiesprongen⁶⁷ (TNO, 2009). Ten slotte kan er gebruik worden gemaakt van energieabsorptie waardoor de stootbelasting op het tunneldak wordt gereduceerd. Hierbij kan gekozen worden voor gecontroleerd bezwijken van de beschermingsconstructie op het tunneldak waardoor de kinetische energie van het vallende scheepsanker wordt gedissipeerd (TNO, 2009). Daarnaast kan het principe van waterverdriving worden toegepast door ruimten in de beschermingsconstructie met water te vullen. Bij vervorming van de constructie moet het water verplaatsen waardoor energie wordt gedissipeerd (TNO, 2009).

Bij de calamiteit van een slepend scheepsanker dient de tunnelbescherming ervoor te zorgen dat het anker niet achter de tunnel kan blijven haken en dat het tunneldak wordt beschermd. De calamiteit van een aanvarend schip kan worden voorkomen door een fysieke drempel aan te leggen. Tegen de calamiteit van een zinkend schip zal de tunnelbescherming weinig bescherming kunnen bieden.

6.2.2. Alternatief A: Bescherm laag van grind/stortsteen

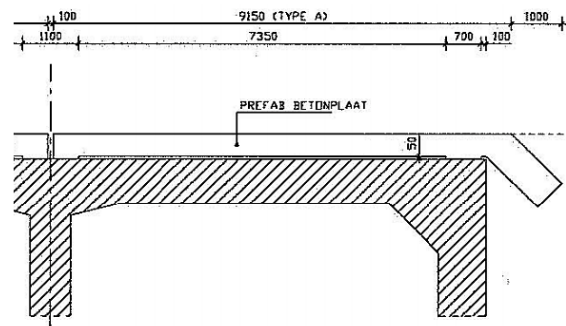
De meeste Noordzeekanaal tunnels zijn beschermd door een laag stortsteen of grind. Hoge bodemsnelheden door schroefwerking en retourstroom kunnen leiden tot erosie van deze beschermingen. Er kan gebruik gemaakt worden van colloïdaal beton welke tussen de stortsteen penetreert waardoor de bescherm laag beter bestendig wordt tegen erosie (Van Oord, 2018). Bij de Tweede Coentunnel is gebruik gemaakt van open steenasfalt matten om een hogere weerstand te bieden tegen hoge bodemsnelheden (Coentunnel Construction, 2011). De elasticiteitsmodulus van de bescherm laag heeft hierbij grote invloed op de krachtsafdracht (Coentunnel Construction, 2011).

6.2.3. Alternatief B: Vrijdragende beschermingsconstructie

Een vrijdragende beschermingsconstructie bevindt zich grotendeels los van het tunneldak doordat de constructie is opgelegd boven de wanden van de tunnel. De calamiteitbelasting van een vallend scheepsanker wordt door de constructie afgedragen naar de tunnelwanden waardoor schade aan het tunneldak wordt geminimaliseerd. Figuur 6-2 geeft de beschermingsconstructie weer die op de HSL tunnel onder de Dordtsche Kil is aangebracht (TNO, 2009). De ruimte tussen de constructie en het tunneldak is hier gevuld met water. Door de hoge stijfheid van water onder impactbelasting wordt de belasting verspreid, maar worden trillingen beperkt gedempt⁶⁸ (TNO, 2009). De Velserspoortunnel heeft een beperkte breedte waardoor deze beschermingsconstructie zou kunnen worden toegepast. De Velserautotunnel daarentegen heeft een te grote breedte om dit constructietype toe te passen.

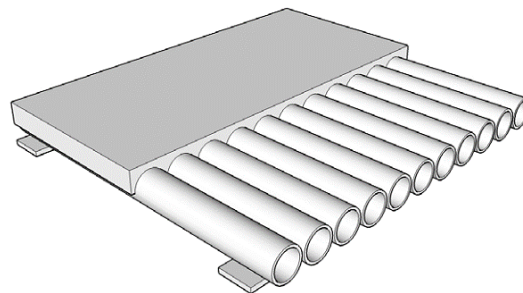
⁶⁷ De impedantie van een materiaal is de weerstand tegen trillingen en kan worden bepaald met de bulkmodulus en dichtheid ($Z = \sqrt{E\rho}$) (TNO, 2009). De grootste effectiviteit van de constructie wordt verkregen door de impedantiesprong tussen de lagen te maximaliseren (TNO, 2009). Dit kan worden bereikt door toepassing van een stijve toplaag met een flexibele onderlaag (TNO, 2009).

⁶⁸ Door de relatief kleine impedantiesprong tussen de constructie en het water (TNO, 2009).



Figuur 6-2: Beschermingsconstructie op de tunnel van de HSL onder de Dordtsche Kil (TNO, 2009).

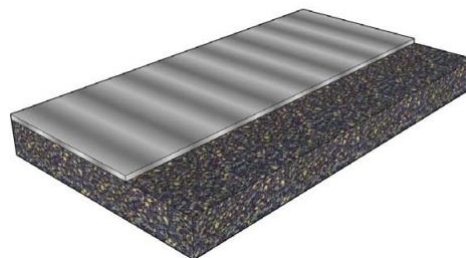
Figuur 6-3 geeft een andere vrijdragende constructie waarbij gebruik wordt gemaakt van een combinatie van met lucht gevulde buizen afgedekt door beton (TNO, 2009). De afgesloten met lucht gevulde buizen zorgen voor een groot plastisch vermogen waardoor de belasting wordt gedempt (TNO, 2009). Tussen de buizen en het tunneldak zou een dempend materiaal⁶⁹ kunnen worden aangebracht waardoor naast het afdragen van de last ook energieabsorptie plaatsvindt (TNO, 2009). Dit alternatief zou qua afmetingen geschikt kunnen zijn voor beide Velsertunnels.



Figuur 6-3: Vrijdragende beschermingsconstructie van stalen buizen afgedekt door beton (TNO, 2009).

6.2.4. Alternatief C: Sandwichconstructie

Een sandwichconstructie is over het gehele oppervlak in contact met het tunneldak. Bij de calamiteit van een vallend scheepsanker biedt dit voordelen voor de directe krachtafdracht op het tunneldak, echter is het nadeel dat de tunneldakconstructie minder wordt ontlast (TNO, 2009). Door de gelaagde constructie wordt de duur van de puls op de constructie verhoogd en de piek van de belasting verlaagd zoals beschreven in subparagraaf 6.2.1. Er dient gebruik te worden gemaakt van een relatief sterke en stijve toplaag en een slappe tussenlaag voor optimale werking van de constructie (TNO, 2009). Als toplaag zouden de materialen staal of beton toegepast kunnen worden. Het spreidend vermogen van de toplaag neemt toe bij het vergroten van de dikte (TNO, 2009). Voor de tussenlaag zou bijvoorbeeld gebruik kunnen worden gemaakt van schuimbeton.

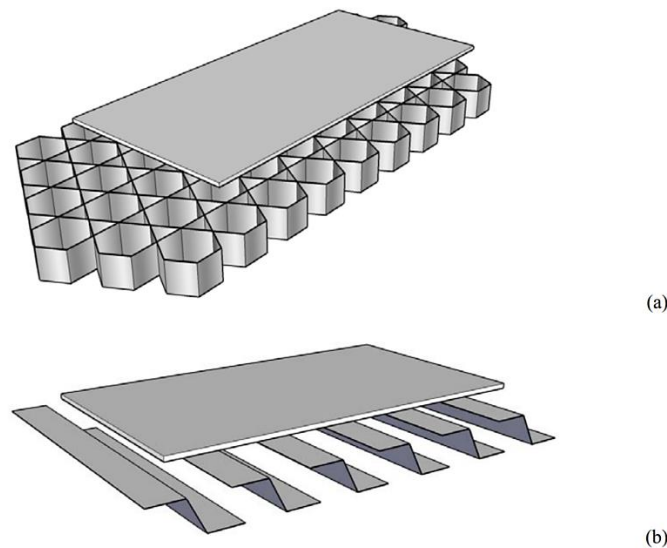


Figuur 6-4: Principe van een sandwichconstructie (TNO, 2009).

⁶⁹ Het meest effectief is om de beschermingsconstructie volledig los te koppelen van het tunneldak met een ruimte van lucht, echter is dit lastig te realiseren (TNO, 2009).

6.2.5. Alternatief D: Constructie met kreukelzone

Een constructie met kreukelzone maakt gebruik van energieabsorptie om de calamiteitsbelasting van een vallend scheepsanker op te kunnen nemen (TNO, 2009). De kinetische energie van het vallende scheepsanker wordt hierbij gedissipeerd door het gecontroleerd bezwijken van de beschermconstructie. Figuur 6-5 geeft voorbeelden van constructies met een kreukelzone betreffende respectievelijk een honinggraatstructuur van staal of aluminium en stalen damwanden (TNO, 2009). Door toepassing van een dikke en stijvere toplaag wordt de kreukelzone over een groter oppervlak aangesproken waardoor de effectiviteit afneemt (TNO, 2009).



Figuur 6-5: Honinggraatconstructie (a) en damwanden (b) als kreukelzone (TNO, 2009).

6.2.6. Alternatief E: Afdeklaag asfalt of beton

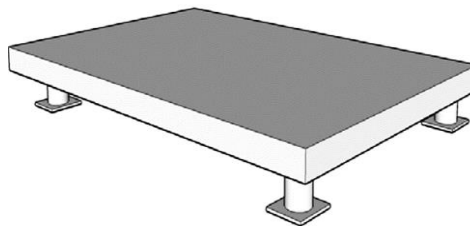
De tunnels zouden voorzien kunnen worden van een enkele afdeklaag van beton of asfalt. Door de beschermende laag wordt bij de calamiteit van een vallend scheepsanker extra spreiding van de belasting gerealiseerd waardoor de optredende spanningen worden verlaagd (TNO, 2009). Eventuele schade wordt niet voorkomen, echter zal deze geconcentreerd worden in de toplaag (TNO, 2009). Bij gebruik van meer plastische materialen zoals asfalt en lichtbeton wordt de spreidende werking kleiner maar neemt de energieabsorptie toe (TNO, 2009).

Bij de Liefkeshoektunnel is gebruik gemaakt van een asfaltmatras van circa 30 cm dik bedekt met een grindlaag met een dikte van 1 m. De asfaltmatrassen zijn hier aangebracht op een minimaal circa 2.5 meter dikke grondlaag (Wens, et al., 1992). De Vlaketunnel is beschermd door eenzelfde type matras (TNO, 2009). De beschermende werking van asfaltmatrassen is erop gericht om de impactbelasting van een vallend scheepsanker over een groter oppervlak van de tunnel te verdelen en slepende scheepsankers boven de tunnel te geleiden in combinatie met de grindlaag (TNO, 1995).

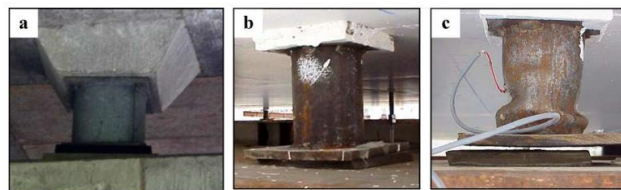
De Vries (1988) geeft aan dat 100-150 mm betondekking op het dak van de tunnel voldoende bescherming biedt tegen de schade door de calamiteit van een vallend scheepsanker. Ook dient 10% extra wapening te worden toegepast om de dynamische belasting op te nemen (de Vries, 1988). Volgens Saveur (1997) is de diepte van het verbrijzelde beton in de impactzone niet groter is dan 0.15 m. Er wordt aanbevolen een minimale beschermingsdikte van 0.15 m te gebruiken tegen calamiteiten als vallende en slepende scheepsankers (Saveur, 1997). De onderbouwing en literatuurverwijzingen voor de experimenten in deze twee studies ontbreken echter waardoor niet verder wordt ingegaan op de beweringen van De Vries en Saveur.

6.2.7. Alternatief F: Energie dissiperende constructie

Als bescherming tegen de calamiteit van een vallend scheepsanker kan gebruik worden gemaakt van een concept dat is gebaseerd op de bescherming van autotunnels tegen vallende rotsen in bergachtige gebieden. Het concept bestaat uit een vrijdragende betonnen plaat die is opgelegd op vier opleggingen zoals schematisch weergegeven in Figuur 6-6 (TNO, 2009). De energie van de impact wordt gedissipeerd door schade aan de gewapende betonplaat en het uitknikken van de stalen opleggingen (Delhomme, Mommessin, Mougine, & Perrotin, 2005). Figuur 6-7 toont de oplegging van die uitknikt onder de impactbelasting (Delhomme et al., 2015). Omdat de opleggingen, door de afgeschuinde hoeken van de Velsertunnels, niet boven de buitenwanden kunnen worden geplaatst wordt de benodigde overspanning van de betonplaat groter dan de breedte van de tunnel. Voor de Velserautotunnel is dit alternatief daardoor niet mogelijk wegens de grote breedte, maar bij de Velserspoortunnel zou het alternatief eventueel kunnen worden toegepast.



Figuur 6-6: Schematische weergave concept bescherming autotunnel (TNO, 2009).



Figuur 6-7: Oplegging van de constructie (a), oplegging van de geteste constructie (b), uitgeknikte oplegging van de geteste constructie (c) (Delhomme et al., 2005).

6.2.8. Alternatief G: Geotube

Geotubes worden wereldwijd toegepast met uiteenlopende toepassingen zoals kustbescherming en waterbouwkundige kunstwerken. Een Geotube is een constructie met een buisachtige vorm gemaakt van een zeer stevig omhulsel van geotextiel gevuld met een materiaal, meestal zand wegens de onsamendrukbare eigenschap (Koffler, Choura, Bendriss, & Zengerink, 2008). Een Geotube zou de tunnels kunnen beschermen tegen de calamiteiten van een vallend en slepend scheepsanker. Met Geotubes kan een constructie worden gemaakt die flexibel, monolithisch, continu en goed bestand tegen waterkrachten is (Koffler et al., 2008). Het geotextiel is namelijk in staat om zeer hoge trekkrachten op te nemen. De Geotube kan op de locatie worden gemaakt door het omhulsel met lokaal aanwezig materiaal te vullen met behulp van hydraulische pompen (Koffler et al., 2008). De buis is gemaakt van een speciaal geotextiel welke in staat is om water eruit te laten stromen maar het vulmateriaal te behouden (Koffler et al., 2008). Bij het Noordzeekanaal zou de gebaggerde grond wellicht gebruikt worden om de Geotubes te produceren.



Figuur 6-8: Voorbeeld toepassing Geotube: Beschermingsdijk (TenCate Geosynthetics, 2020).

6.2.9. Alternatief H: Drempelconstructie

Een constructie die fungeert als drempel kan voorkomen dat aanvaringen tussen scheepvaart en de tunnel plaatsvinden. Aangezien de huidige fysieke barrière van de Noordersluis inzake de diepgang van de scheepvaart wegvalt met de opening van Zeesluis IJmuiden, zal de kans op de calamiteit van een aanvarend schip kunnen toenemen (Horvat & Partners, 2017). Een drempelconstructie ten westen van de Velsertunnels zou fysiek kunnen afdwingen dat scheepvaart zich aan de maximaal toegestane diepgang houdt. Tevens zouden in deze drempel sensoren kunnen worden geplaatst die de kielspeling van de passerende scheepvaart meet (reeds beschreven in subparagraaf 6.1.2). Aan de hand hiervan kunnen sancties volgen tegen schepen die zich niet aan de maximale diepgang houden. Ook kan met de data van de gemeten kielspeling meer inzicht worden verkregen in de squat van scheepvaart op het Noordzeekanaal. Dit alternatief zal niet worden meegenomen in de multicriteria-analyse aangezien dit alternatief lastig kan worden vergeleken met de andere alternatieven. Dit alternatief biedt namelijk bescherming tegen de calamiteit van een aanvarend schip waar de andere alternatieven bescherming bieden tegen de calamiteit van een vallend scheepsanker. Dit alternatief wordt verder uitgewerkt in paragraaf 7.5 wegens de verwachte effectiviteit en duurzaamheid.

6.3. Beoordeling alternatieve oplossingen

In deze paragraaf worden de gepresenteerde maatregelen en constructieve oplossingen beoordeeld. Aan de hand van de beoordeling wordt een aantal variant tunnelbeschermingen opgesteld welke verder zullen worden meegenomen in het onderzoek.

6.3.1. Beoordeling maatregelen

Het versmallen van het vaarwegprofiel genereert de mogelijkheid voor een grotere diepgang van de scheepvaart op het Noordzeekanaal. Deze maatregel zal daarom verder worden meegenomen in het onderzoek. Op de maatregel omtrent de handhaving van de vaarsnelheid en diepgang van de scheepvaart wordt op zichzelf verder niet ingegaan in het onderzoek. De handhaving is via alternatief H wel gecombineerd met een constructieve oplossing zoals beschreven in 6.2.9. De maatregel inzake de controle op scheepsankers zou effectief kunnen zijn in het verlagen van de kans van optreden bij de calamiteiten van vallende en slepende scheepsankers. Deze maatregel zal verder niet worden meegenomen in de uitwerking van de varianten omdat het effect van de maatregel niet eenvoudig te kwantificeren is. Op de maatregel betreffende de verlaging van de maximum vaarsnelheid wordt in het onderzoek verder niet ingegaan aangezien deze maatregel reeds is toegepast in de praktijk.

6.3.2. MCA constructieve oplossingen

Op basis van vijf categorieën wordt een multicriteria-analyse uitgevoerd voor de constructieve oplossingen van alternatieven A t/m G. De vijf categorieën betreffen effectiviteit, duurzaamheid, uitvoerbaarheid, kosten en beschikbare kennis. Per categorie worden de alternatieven beoordeeld met een score van 1 tot 5, waarbij een hoge score inhoudt dat een alternatief goed is in een categorie. Daarnaast zijn voor de categorieën verschillende wegeningen aangebracht om het belang van de verschillende categorieën van elkaar te onderscheiden. De beoordeling van een alternatief in een bepaalde categorie vindt plaats door middel van het vergelijken met de andere alternatieven. In paragraaf 6.2.9 is reeds aangegeven dat alternatief H niet zal worden beoordeeld in de analyse.

Qua effectiviteit scoren de alternatieven B en F zeer hoog omdat de kans op schade zeer klein wordt geacht bij de calamiteit van een vallend scheepsanker (TNO, 2009). Alternatief A wordt veelal toegepast als bescherming van tunnels maar benodigd een zekere dikte van de beschermlaag waardoor dit alternatief aan de lage kant scoort op effectiviteit. Van de andere alternatieven is de effectiviteit lastiger in te schatten. De alternatieven C en D worden geacht gemiddeld te scoren op effectiviteit. Van alternatieven E en G wordt verwacht dat deze lager scoren.

Alternatief E heeft op het gebied van duurzaamheid de maximale score gekregen omdat de verwachte levensduur hoog is. Alternatieven A en G scoren iets lager omdat verwacht wordt dat enige inspectie benodigd zal zijn. Dit geldt ook voor alternatieven B en C welke bovendien corrosie gevoelige onderdelen zullen bevatten en daardoor een gemiddelde score krijgen. Bij de alternatieven D en F zijn de corrosiegevoelige onderdelen nog lastiger te inspecteren waardoor deze laag scoren.

De uitvoering zal voor alle alternatieven niet eenvoudig zijn omdat de huidige tunneldekking eerst (deels) verwijderd dient te worden en er minimale scheepvaarthinder plaats kan vinden. Alternatief A scoort relatief het hoogste op de uitvoering omdat de huidige dekking wellicht gedeeltelijk kan worden hergebruikt en aannemers veel ervaring hebben met stortsteen. Alternatief E scoort ook hoog, vanwege de ervaring bij aannemers met asfalt en onderwater beton. Bij de andere alternatieven wordt verwacht dat de uitvoering nog lastiger zal zijn. Alternatief F scoort het laagste op de uitvoering wegens de benodigde nauwkeurigheid voor de positionering van de opleggingen.

Qua kosten scoren alternatieven B, D en F aan de lage kant omdat de bewerking en materialen duurder zijn dan bij de andere alternatieven. Alternatief E scoort hoog omdat de materialen van dit alternatief relatief goedkoop zijn. De andere alternatieven scoren gemiddeld.

Alternatieven A en E scoren hoog op beschikbare kennis aangezien vergelijkbare oplossingen in het verleden al op tunnels zijn toegepast. Alternatief C en D scoren laag op beschikbare kennis omdat deze oplossingen nog een concept zijn. De overige alternatieven scoren gemiddeld omdat deze in een enigszins andere vorm reeds zijn toegepast.

Tabel 6-1 geeft de resultaten van de multicriteria-analyse weer. Er dient te worden opgemerkt dat de multicriteria-analyse is uitgevoerd op basis van het vergelijken van alternatieven. Er dient dan ook te worden opgemerkt dat de totale scores tot stand zijn gekomen op basis van inschattingen. Dit houdt in dat de multicriteria-analyse geen leidende maar ondersteunende rol heeft bij de variantkeuze.

Alternatief	Effectiviteit (weging: 3)	Duurzaamheid (weging: 2)	Uitvoerbaarheid (weging: 2)	Kosten (weging: 2)	Beschikbare kennis (weging: 1)	Totaal
A	2	4	5	3	4	34
B	5	3	2	2	3	32
C	3	3	2	3	2	27
D	3	2	2	2	1	22
E	2	5	4	4	4	36
F	5	2	1	2	3	28
G	2	4	3	3	3	29

Tabel 6-1: Multicriteria-analyse constructieve oplossingen tunnelbescherming

6.3.3. Variantkeuze tunnelbescherming

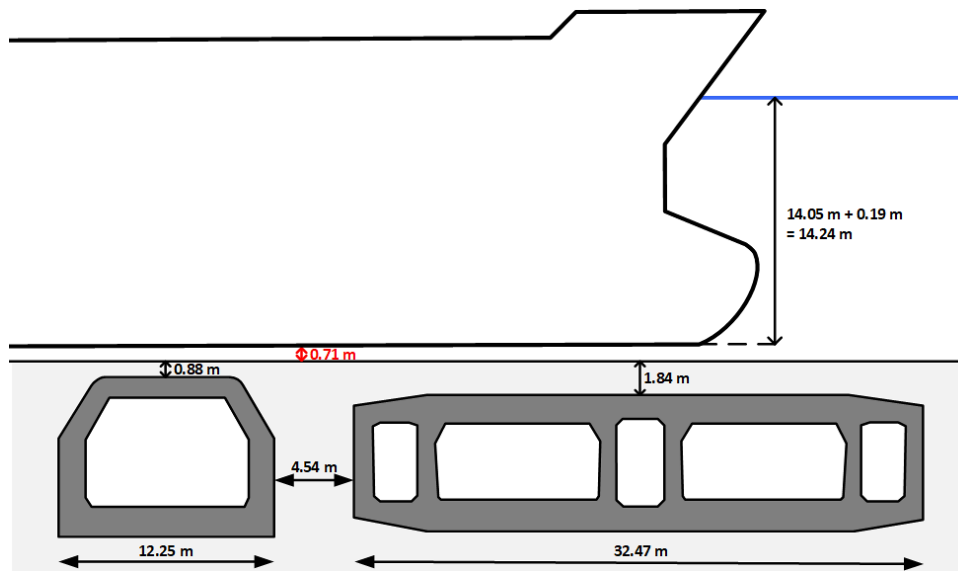
In Tabel 6-1 zijn de resultaten van de multicriteria-analyse gepresenteerd. Daarnaast scoren alternatieven A, B en E ook hoog. Alternatieven C, F en G scoren echter wat lager. Het slechtst scorende alternatief blijkt alternatief D te zijn. Er zullen nu drie varianten worden opgesteld met behulp van de verkregen resultaten uit de multicriteria-analyse. De drie varianten zullen worden opgesteld op basis van de alternatieven A, B en E welke hoog scoorden in de multicriteria-analyse. Als eerste variant wordt een vrijdragende constructie gekozen vanwege de effectiviteit, zoals gepresenteerd in alternatief B. De tweede variant betreft de bescherming door stortsteen of grind omwille van de ervaring met dit type bescherming (alternatief A). De derde variant bestaat uit één of meerdere lagen beton en/of asfalt (alternatief E) waarbij tevens wordt gekeken of het principe van de sandwich constructie kan worden toegepast (alternatief C). Laatstgenoemde variant wordt duurzaam geacht en heeft relatief lage materiaal kosten. Daarnaast wordt de drempelconstructie van alternatief H verder uitgewerkt in een vierde variant (zoals beschreven in 6.2.9).

7. Varianten

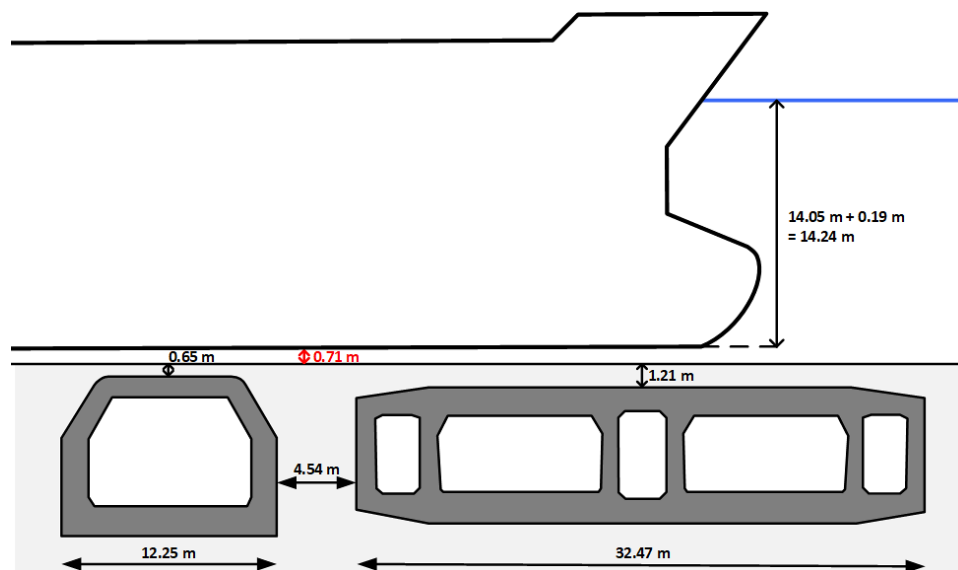
Dit hoofdstuk behandelt verschillende varianten voor de bescherming van de Velsertunnels tegen calamiteitsbelastingen van de scheepvaart. Eerst wordt algemeen ingegaan op de situatie van de Velsertunnels (paragraaf 7.1) om aansluitend in te gaan op vier varianten (paragraaf 7.2 t/m 7.5).

7.1. Algemeen

Alternatieve tunnelbeschermingen van de Velsertunnels kunnen de tunnelveiligheid bij scheepvaart calamiteiten verhogen of de dikte van de tunnelbescherming verkleinen (paragraaf 6.2). Bij de varianten in dit hoofdstuk worden beide doeleinden als uitgangspunt genomen. De spoortunnel is maatgevend bij het minimaliseren van de dikte van de tunnelbescherming. Figuur 7-1 en Figuur 7-2 tonen schematisch de huidige situatie van de Velsertunnels op de kanaal-as en rand van de vaarweg bij een marginaal schip. Hierbij is uitgegaan dat de kanaalbodem op de Nautisch Gegarandeerde Diepte van NAP -15.50 m ligt (subparagraaf 2.1.2). Bij de varianten kan tevens worden uitgegaan van het versmalde vaarwegprofiel voor marginale scheepvaart zoals beschreven in subparagraaf 6.1.4.



Figuur 7-1: Geschematiseerde huidige situatie van het Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels op de kanaal-as.



Figuur 7-2: Geschematiseerde huidige situatie van het Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels op de huidige rand van de vaarweg (vaarweg 102 m breed).

7.2. Variant 1: Vrijdragende beschermingsconstructie

Een vrijdragende beschermingsconstructie bevindt zich los van het tunneldak en is opgelegd boven de wanden van de tunnel. Bij de calamiteit van een vallend scheepsanker draagt deze constructie de lasten af naar de tunnelwanden waardoor schade aan het tunneldak zoveel mogelijk wordt beperkt. Daarnaast zou de beschermingsconstructie de calamiteitsbelasting van een zinkend schip kunnen afdragen op de tunnelwanden om zo het tunneldak te ontzien van hoge belastingen⁷⁰.

Figuur 7-3 geeft de variant van de vrijdragende beschermingsconstructie weer voor de Velsertunnels. De prefab constructie op de Velserspoortunnel bestaande uit stalen buizen en gewapend beton is gebaseerd op een combinatie van de beschermingsconstructies van de gewapende betonplaat en de stalen buizen afgedekt met beton (Figuur 6-2 en Figuur 6-3 van subparagraaf 6.2.3). De stijve gewapende betonnen toplaag zal bij de calamiteit van een vallend scheepsanker goed in staat zijn om de impact-belasting te spreiden en daarnaast energie te absorberen door gedeeltelijk te bezwijken. De afgesloten met lucht gevulde buizen zorgen voor een groot plastisch vermogen waardoor de belasting gedempt wordt (subparagraaf 6.2.3). Om de afgeschuinde hoeken aan de spoortunnel te behouden, tegen de calamiteit van een slepend scheepsanker, worden de stalen buizen in de vorm van de afgeschuinde hoek geproduceerd. Het omgebogen deel van de buizen wordt volledig omhuld door beton om een enigszins uniform opleggingsoppervlak te creëren.

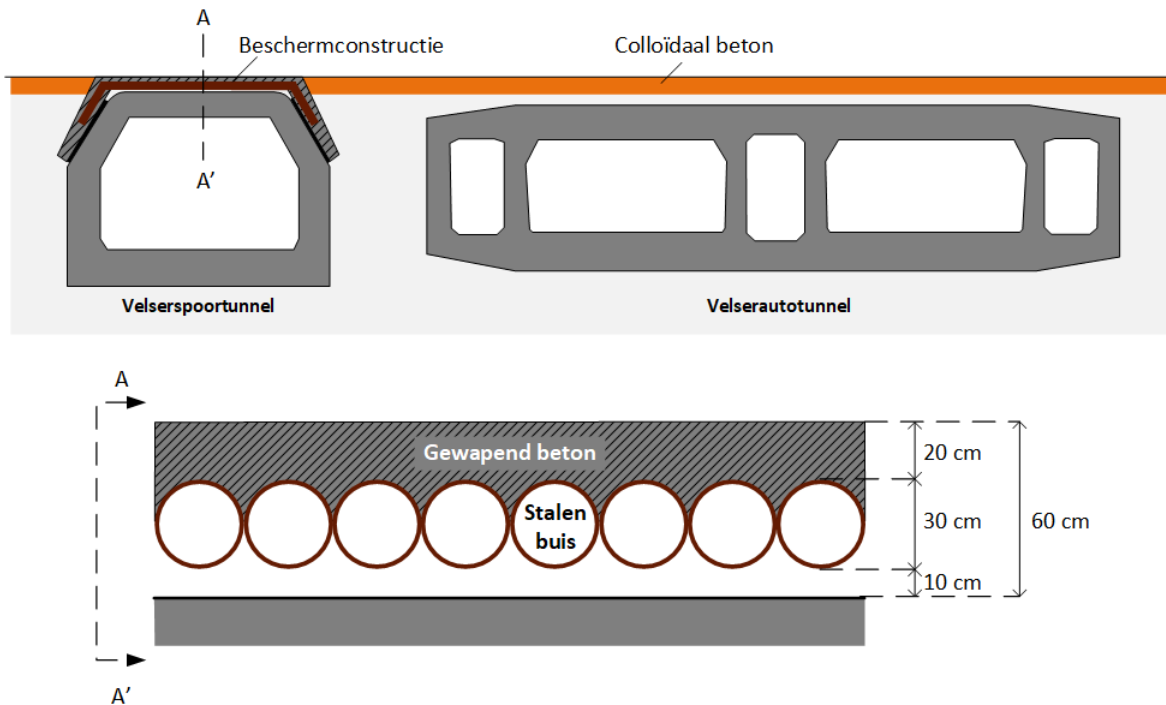
De beschermingsconstructie zal middels rubberen verbindingen worden opgelegd boven de schuine wanden van de spoortunnel. De rubberen opleggingen moeten trillingen dempen en daarnaast enige tolerantie bieden bij de plaatsing van de prefab elementen. De ruimte tussen de constructie en het tunneldak is in het ontwerp gevuld met water. De hoge stijfheid van water onder impactbelasting zorgt ervoor dat de belasting wordt verspreid maar zal trillingen beperkt dempen (subparagraaf 6.2.1). Tussen de buizen en het tunneldak zou ook een dempend materiaal kunnen worden aangebracht waardoor naast het afdragen van de last ook extra energieabsorptie plaatsvindt.

Er wordt geacht dat de vrijdragende beschermingsconstructie op de spoortunnel gerealiseerd kan worden met een dikte van circa 60 cm. Hierbij is uitgegaan dat de laag gewapend beton circa 20 cm dik is, de stalen buizen een buitendiameter hebben van 30 cm en dat de benodigde ruimte tussen de constructie en de tunnel 10 cm bedraagt. Wanneer deze beschermingsconstructie gecombineerd wordt met het versmalde vaarwegprofiel uit subparagraaf 6.1.4, kan de tunneldekking circa 21 cm⁷¹ worden verkleind op de maatgevende positie. De bodem van de vaarweg zou zich dan op circa -15.70 m NAP bevinden ter plaatse van de Velsertunnels (binnen de grenzen van de versmalde vaarweg).

Voor de Velserautotunnel geldt dat in het geval dat de vaarwegbodem op -15.70 m komt te liggen, de tunneldekking over de hele tunnel nog steeds minimaal een meter bedraagt. Door toepassing van colloïdaal beton op de (deels) huidige tunneldekking kan de weerstand van de autotunnel tegen de calamiteit van een vallend scheepsanker worden verhoogd terwijl de dikte van de bescherming kleiner wordt. Door toepassing van colloïdaal beton wordt de tunneldekking tevens bestendiger tegen bodemsnelheden door schroefwerking en retourstroom (Appendices B.1 en B.2). Naast de autotunnel wordt ook de rest van de vaarwegbodem ter plaatse van de Velsertunnels voorzien van colloïdaal beton om erosie te voorkomen (Figuur 7-3). Wanneer de huidige tunneldekking (deels) kan blijven liggen kunnen kosten worden bespaard.

⁷⁰ Er dient te worden opgemerkt dat wanneer het tunneldak wordt ontzien bij de calamiteit van een zinkend schip er nog steeds grote momenten en dwarskrachten kunnen ontstaan in de tunnelwanden en vloer.

⁷¹ Uit subparagraaf 6.1.4 volgt dat de tunneldekking bij het versmalde vaarwegprofiel op de maatgevende positie gelijk is aan 81 cm. Wanneer de beschermingsconstructie circa 60 cm bedraagt volgt hieruit een reductie in tunneldekking van circa 21 cm.



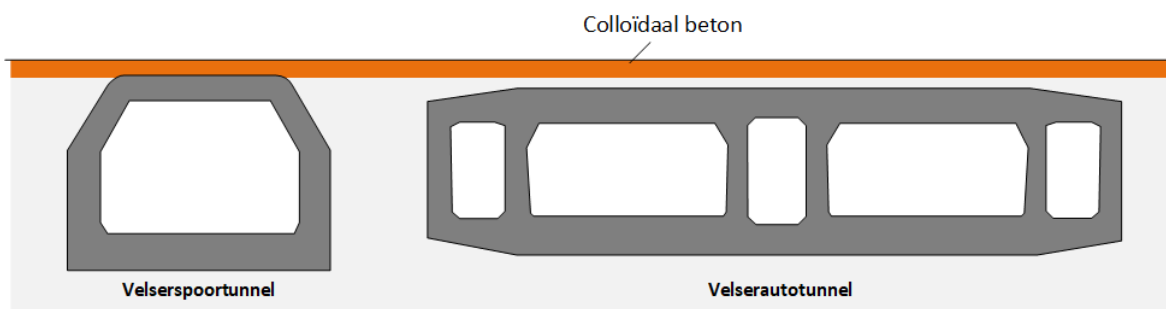
Figuur 7-3: Variant 1 – Vrijdragende beschermingsconstructie (afmetingen doorsnede zijn orde-grootte).

7.3. Variant 2: Bescherming van stortsteen met colloïdaal beton

In deze variant wordt gebruik gemaakt van stortsteen met colloïdaal beton. De Velsertunnels zijn, net als de meeste Noordzeekanaal tunnels, beschermd door middel van een tunneldekking van stortsteen of grind. Hoge bodemsnelheden door schroefwerking en retourstroom (Appendices B.1 en B.2) kunnen echter leiden tot erosie van dit type bescherming. Door gebruik te maken van colloïdaal beton, welke tussen de stortsteen penetreert, wordt de beschermlaag beter bestendig tegen erosie.

Figuur 7-4 toont dat beide Velsertunnels in deze variant worden voorzien van een beschermlaag van stortsteen met colloïdaal beton. Wanneer de kwaliteit van (een deel van) de huidige dekking nog voldoet, hoeft de tunneldekking enkel te worden aangevuld met nieuwe steenstort op geërodeerde plekken. De laag colloïdaal beton die bovenop de stortstenen laag zal worden aangebracht zorgt, naast de verhoogde weerstand tegen bodemsnelheid, ook voor een stijvere toplaag waardoor de optredende calamiteitsbelasting van een vallend scheepsanker beter zal worden verspreid.

Wegens de toleranties bij steenstort wordt bij deze variant gekozen om de tunneldekking aan te houden tot het huidige niveau van de kanaalbodem van NAP -15.50 m. Hierdoor wordt geen ruimte voor diepgang van scheepvaart gewonnen maar kan wel de huidige vaarwegbreedte van 102 meter gehandhaafd worden. De variant kan zorgen voor een hogere tunnelveiligheid bij de calamiteit van een vallend scheepsanker, maar de variant beschermt niet tegen de calamiteit van een zinkend schip.



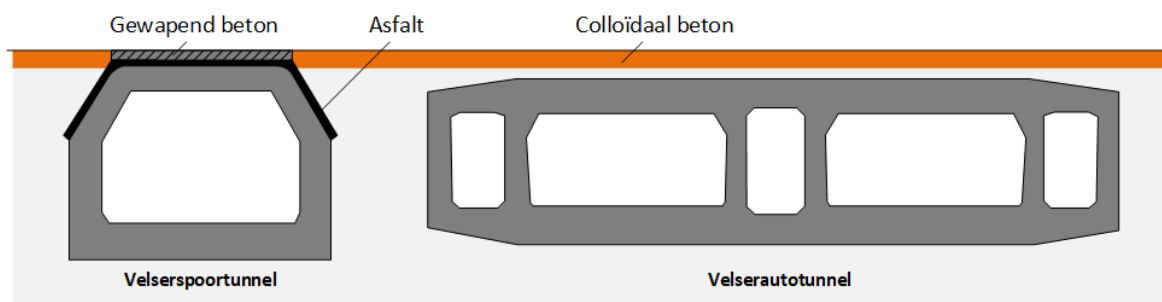
Figuur 7-4: Variant 2 – Bescherming van grind/stortsteen met colloïdaal beton

7.4. Variant 3: Bescherm lagen asfalt en beton

In deze variant wordt gebruik gemaakt van een laag asfalt met daarop een laag (gewapend) beton als bescherming van de Velsertunnels tegen de calamiteit van een vallend scheepsanker. De lagen zijn over het gehele oppervlak in contact met het tunneldak waardoor er goede spreiding van de belasting kan worden gerealiseerd en optredende spanningen worden verlaagd (subparagraaf 6.2.6). Met de twee verschillende lagen wordt geprobeerd om het principe van een sandwich constructie⁷² toe te passen. Bij een sandwich constructie wordt gebruik gemaakt van een relatief sterke en stijve toplaag met een slappe tussenlaag (subparagraaf 6.2.4).

Figuur 7-5 toont een ontwerp van de gelaagde tunnelbescherming uit asfalt en beton op de Velserspoortunnel. In de toplaag van (gewapend) beton⁷³ zal schade optreden maar zal de belasting goed worden verspreid, terwijl de laag asfalt wat meer energie zou moeten adsorberen waardoor het tunneldak minder zwaar wordt belast (subparagraaf 6.2.6). De Velserautotunnel wordt wederom beschermd door middel van colloïdaal beton, zoals reeds beschreven in paragraaf 7.2.

Er wordt geacht dat de gelaagde tunnelbescherming op de spoortunnel gerealiseerd kan worden met een dikte van circa 60 cm. Zowel de betonnen laag als de laag asfalt zullen hierbij circa 30 cm dik zijn. In combinatie met het versmalde vaarwegprofiel (subparagraaf 6.1.4) kan de tunneldekking circa 21 cm worden verkleind op de maatgevende positie. De bodem van de vaarweg zou dan op circa -15.70 m NAP bevinden ter plaatse van de Velsertunnels.



Figuur 7-5: Variant 3 – Combinatie bescherm lagen van asfalt en beton.

7.5. Variant 4: Dremmelconstructie

Deze paragraaf behandelt de variant van een dremmelconstructie om de Velsertunnels betere bescherming te bieden tegen de calamiteit van een aanvarend schip. De opening van Zeesluis IJmuiden zorgt ervoor dat de fysieke barrière van de Noordersluis inzake de diepgang van de scheepvaart wegvalt, waardoor de kans op de calamiteit van een aanvarend schip zal toenemen (Horvat & Partners, 2017). Een dremmelconstructie zou de rol van de huidige Noordersluis kunnen overnemen door als fysieke barrière te dienen met betrekking tot de diepgang van de scheepvaart. Een dremmelconstructie ten westen van de Velsertunnels wordt het meest effectief geacht aangezien oostgaande scheepvaart gemiddeld een grotere diepgang heeft dan westgaande scheepvaart (Marin, 2019). De verwachte effectiviteit van de dremmelconstructie zal tweeledig zijn. Een schip dat ondanks de regelgeving een te grote diepgang heeft zal in aanvaring komen met de dremmel in plaats van met de tunnel. Hierdoor wordt eventuele schade of bezwijken van de tunnel voorkomen. Daarbij wordt verwacht dat het aantal overtredingen van de diepgang en snelheid zal afnemen wanneer de realisatie van de dremmelconstructie duidelijkheid biedt inzake de beschikbare diepgang. Hierdoor zal de kans op de calamiteit van een aanvarend schip afnemen.

⁷² Door de gelaagde constructie wordt de duur van de puls op de constructie verhoogd en de piek van de belasting verlaagd (subparagraaf 6.2.1).

⁷³ Er kan gekozen worden voor de beton te wapenen afhankelijk van de vereiste stijfheid en sterkte.

Naast de fysieke functie van de drempelconstructie zou deze ook kunnen worden uitgerust met sensoren die in staat zijn om de kielspeling van passerende scheepvaart te meten. Hierdoor kunnen sancties volgen tegen scheepvaart die de maximale dynamische diepgang overschrijdt. Daarnaast wordt hiermee een database gecreëerd van alle scheepvaart op het Noordzeekanaal omtrent de kielspeling. Hierdoor zou bijvoorbeeld meer inzicht kunnen worden verkregen met betrekking tot de squat van de scheepvaart op het Noordzeekanaal. Dit kan vervolgens leiden tot aanscherping van de huidige richtlijnen omtrent de maximale (statische) diepgang en de minimaal benodigde kielspeling. Er dient te worden opgemerkt dat de snelheid van de scheepvaart ook gemeten dient te worden om de resultaten goed te kunnen interpreteren.

De drempelconstructie zou bijvoorbeeld gemaakt kunnen worden van een combiwand met daarop een gewapende betonnen balk. Bij het ontwerp van de drempelconstructie dient rekening te worden gehouden dat een slepend scheepsanker niet achter de drempel kan blijven haken. Dit kan worden bereikt door de hoeken van de drempel afgeschuind te realiseren, zoals bij tunnels gedaan wordt.

7.6. Conclusie

Variant 1 (vrijdragende beschermingsconstructie) wordt het meest effectief geacht in het beschermen van de tunnel bij de calamiteit van een vallend scheepsanker vergeleken met de andere varianten. Daarnaast zou de variant ook effectief kunnen zijn voor het ontlasten van het tunneldak bij de calamiteit van een zinkend schip. Echter zal deze variant ook de hoogste kosten en meest complexe uitvoering hebben. Variant 2 (stortsteen met colloïdaal beton) zal daarentegen lagere kosten hebben, maar de effectiviteit tegen de calamiteit van een vallend scheepsanker is lager bij deze variant. Variant 3 (bescherm laag van asfalt en beton) wordt effectiever geacht dan variant 2 maar zal minder effectief zijn dan variant 1. Daarnaast is meer onzekerheid aanwezig in het bezwijkmechanisme bij variant 2 en 3. Variant 4 (drempelconstructie) is zeer effectief tegen de calamiteit van een aanvarend schip. In de huidige situatie worden de Velsertunnels echter voldoende veilig geacht tegen de calamiteit van een aanvarend schip. Deze variant wordt relevanter wanneer verdieping van het Noordzeekanaal plaatsvindt.

Om de nodige diepgang in het onderzoek te verkrijgen wordt gekozen om één van de varianten verder uit te werken. Besloten wordt om variant 1 verder uit te werken aangezien de beoogde effectiviteit die zowel theoretisch als in praktijk kan worden behaald. Ondanks de hogere verwachte kosten en complexere uitvoering wordt deze variant het meest geschikt geacht.

In Hoofdstuk 8 zal de vrijdragende beschermingsconstructie op de Velserspoortunnel verder worden uitgewerkt om de toepasbaarheid van de beschermingsconstructie te onderzoeken. Er zal niet verder ingegaan worden op de colloïdale bescherming op de Velserautotunnel.

8. Uitwerking vrijdragende beschermingsconstructie

In dit hoofdstuk wordt de vrijdragende beschermingsconstructie van variant 1 uit Hoofdstuk 7 op de Velserspoortunnel verder uitgewerkt. In paragraaf 8.1 wordt algemeen ingegaan op de vrijdragende beschermingsconstructie. Paragraaf 8.2 gaat op de dimensionering van de beschermingsconstructie in door middel van een globale ontwerpberekening. In paragraaf 8.3 worden de uitvoeringsaspecten behandeld. Paragraaf 8.4 gaat uiteindelijk in op de weerstand van de huidige tunneldekking tegen snelheden nabij de bodem ter plaatse van de Velsertunnels. Paragraaf 8.5 behandelt de conclusie.

8.1. Algemeen

De vrijdragende beschermingsconstructie op de Velserspoortunnel dient te voldoen aan de vereiste constructieve veiligheid van de RBK. In paragraaf 2.5 is reeds beschreven dat bij vervanging van de huidige tunneldekking door een beschermende constructie dit als verbouw wordt gezien waardoor dient te worden voldaan aan de betrouwbaarheidsindex van $\beta = 3.6$. De betrouwbaarheid hangt af van de spreiding aan zowel de belastingkant als de sterktekant. Bij calamiteiten als een vallend scheepsanker of een zinkend schip wordt de grootste onzekerheid in de belasting verwacht. De invloedscoëfficiënt van de belasting wordt hierdoor gelijk genomen aan $\alpha_s = 1.0$ waardoor die van de sterkte gelijk is aan $\alpha_r = 0$ (TNO, 2009). Voor de toetsing van de tunnel bij de calamiteit mag hierdoor voor de sterkte uitgegaan worden van de gemiddelde waarde van de materiaalsterkte (TNO, 2009). Om te voorkomen dat onderschatting⁷⁴ van de tunnelsterkte tot stand komt wordt gebruik gemaakt van de karakteristieke sterkte in plaats van de gemiddelde sterkte. Met deze betrouwbaarheid en de restlevensduur van 30 jaar is de toegestane faalkans voor de spoortunnel gelijk aan $5.3 \cdot 10^{-6}$ per jaar.

Voor de calamiteit van een vallend scheepsanker wordt op vergelijkbare wijze als in Appendix H de maatgevende ankermassa behorend bij de jaarlijkse toegestane faalkans van $5.3 \cdot 10^{-6}$ bepaald⁷⁵ op 2367 kg. Afgerond bedraagt het maatgevende scheepsanker dan 2500 kg. Daarnaast dient de nieuwe constructieve bescherming minimaal even veilig te zijn als de huidige tunneldekking. In Python is daarom de ankermassa bepaald waaronder de spoortunnel in de huidige situatie, bij 0.88 meter dekking op de kanaal-as, net niet meer zou voldoen. De ankermassa is dan gelijk aan 4500 kg. De constructieve bescherming dient dus te voldoen op beide ankermassa's van 2500 en 4500 kg. In de berekening wordt als referentie verder de ankermassa van 8200 kg meegenomen behorende bij een toegestane faalkans van $1.0 \cdot 10^{-6}$ voor de Velserspoortunnel (Appendix H).

Voor de calamiteit van een zinkend schip wordt dezelfde methode toegepast als in Appendix I om het maatgevende schip te bepalen behorend bij de jaarlijkse toegestane faalkans van $5.3 \cdot 10^{-6}$. Hierbij wordt het scheepstype tanker niet in beschouwing genomen⁷⁶. Het maatgevende schip is een bulkschip van 81827 ton. Het schip heeft een lengte van 229 meter, een breedte van 32.3 meter en een diepgang van 7.8 meter.

Er dient te worden opgemerkt dat de beschermingsconstructie globaal wordt gedimensioneerd om de toepasbaarheid van de constructie aan te tonen. Het betreft dus geen gedetailleerd ontwerp.

⁷⁴ Aangezien er onzekerheden aanwezig zijn omtrent de sterkte van de Velsertunnels (vooral het betonstaal). Het is conservatief om de karakteristieke sterkte te gebruiken in plaats van de gemiddelde sterkte.

⁷⁵ Toevalligerwijs is de ankermassa hetzelfde als bij de betrouwbaarheid $\beta = 3.3$ met de restlevensduur van 30 jaar wat tot de toegestane faalkans van $1.61 \cdot 10^{-5}$ leidde. De reden hiervoor is dat beide toegestane faalkansen buiten het bereik van de ankermassa's van zeeschepen vallen. Daarom wordt conservatief de kleinste ankermassa van 2367 kg aangehouden als maatgevend anker (Appendix H.4).

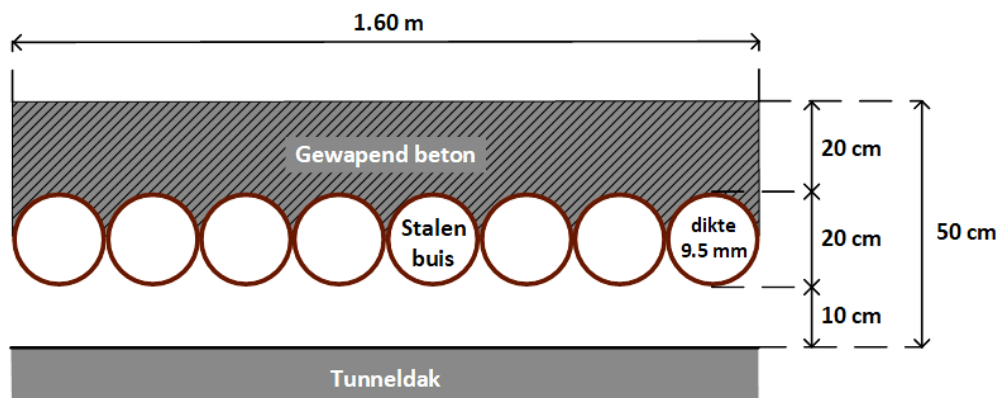
⁷⁶ Een olietanker dient eerst veel olie te lekken voordat het tot zinken komt. Daarnaast heeft een gezonken olietanker een relatief kleine belasting op de tunnel (van Lagen, 2016).

8.2. Ontwerpberekening

In deze paragraaf wordt de vrijdragende beschermingsconstructie van de Velserspoortunnel gedimensioneerd. Allereerst wordt het constructieve ontwerp behandeld (subparagraaf 8.2.1), vervolgens wordt de constructie op de calamiteitsbelasting van een vallend scheepsanker getoetst (subparagraaf 8.2.2) om te slotte de constructie te beoordelen bij de calamiteit van een zinkend schip (subparagraaf 8.2.3).

8.2.1. Ontwerp vrijdragende beschermingsconstructie

In deze paragraaf wordt de vrijdragende beschermingsconstructie van de Velserspoortunnel gedimensioneerd op basis van een grove ontwerpberekening. De parameters van het ontwerp van de beschermingsconstructie zijn gevarieerd waarbij de constructie globaal is geoptimaliseerd met betrekking tot de minimale dikte en weerstand tegen de calamiteitsbelastingen van het vallende scheepsanker en het zinkende schip. Op basis hiervan is gekozen voor een beschermingsconstructie bestaande uit 8 stalen buizen met een diameter van 20 cm en 9.5 mm dikte, met bovenop 20 cm beton. Er wordt 10 cm aangehouden voor de afstand⁷⁷ tussen de constructie en het tunneldak. Elk prefab element heeft hierdoor een hoogte van 50 cm en een breedte van 1.60 meter. Figuur 8-1 toont de doorsnede van de constructie schematisch met de daarbij behorende afmetingen. In combinatie met het versmalde vaarwegprofiel van subparagraaf 6.1.4 zal de bovenkant van de beschermingsconstructie zich bij de maatgevende positie op -15.82 m NAP bevinden. Dit houdt een reductie van de tunneldekking in van ruim 30 cm.



Figuur 8-1: Ontwerp vrijdragende beschermingsconstructie (doorsnede)

Er wordt gebruik gemaakt van betonkwaliteit C60/75 (hogesterktebeton) en staalkwaliteit S355. Er wordt gerekend met de karakteristieke waarden van de materiaaleigenschappen zoals beschreven in paragraaf 8.1. Tabel 8-1 toont de parameters van de gedimensioneerde constructie. In de tabel zijn tevens de buigstijfheid en het gewicht van de constructie bepaald. De buigstijfheid van de constructie bedraagt $3.2 \cdot 10^8 \text{ Nm}^2$ en het gewicht van de constructie is 1207 kg per meter overspanning. Met vergelijking (8-1) is de eigenfrequentie van de constructie bepaald afhankelijk van de buigstijfheid en het gewicht per meter overspanning (Spijkers, Vrouwenvelder, & Klaver, 2005). De factor C is gelijk aan 22.4 onder de aanname van een tweezijdig ingeklemde ligger. De eigenfrequentie wordt berekend op 178.8 rad/s. Uit de eigenfrequentie is de eigentrilling van de constructie bepaald⁷⁸. De eigentrilling van de beschermingsconstructie wordt bepaald op 0.035 s.

$$\omega_n = C \cdot \sqrt{EI/\rho AL^4} \quad (8-1)$$

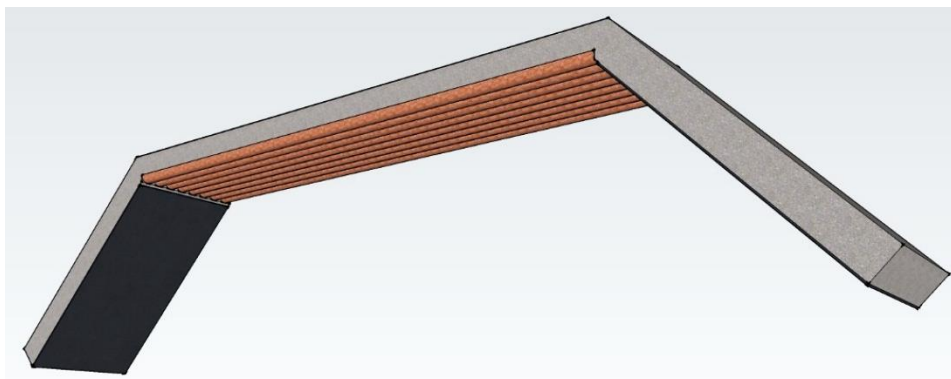
⁷⁷ In deze afstand is meegenomen dat de beschermingsconstructie enige tolerantie moet hebben om de constructie tijdens de uitvoering succesvol op de tunnel te kunnen plaatsen.

⁷⁸ De eigentrilling is bepaald door middel van de eigenfrequentie met $T_e = 2\pi/\omega_n$.

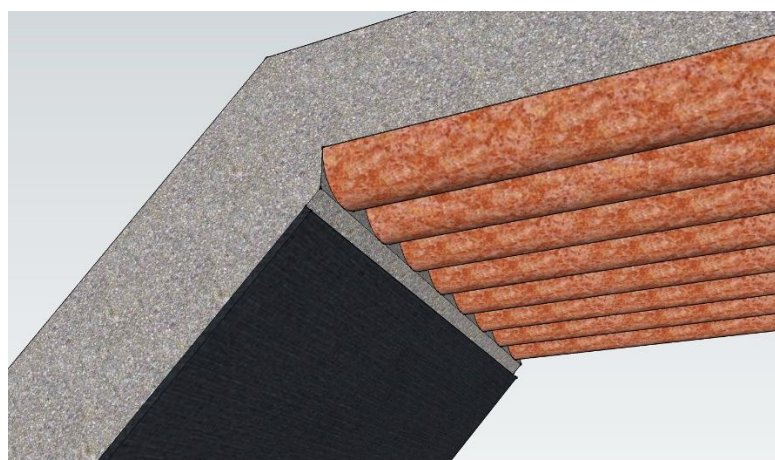
Parameters vrijdragende beschermingsconstructie			
Minimale dikte betonnen laag	h_c	[m]	0.20
Diameter stalen buizen	D	[m]	0.20
Dikte stalen buizen	t	[mm]	9.5
Aantal stalen buizen	n	[-]	8
Afstand tot tunneldak	a	[m]	0.10
Totale hoogte constructie	h_{tot}	[m]	0.50
Totale breedte prefab element	B_{tot}	[m]	1.60
Totale overspanning constructie ⁷⁹	L	[m]	8.0
Karakteristieke betonsterkte	f_{ck}	[N/mm ²]	60
Karakteristieke staalsterkte	f_{yk}	[N/mm ²]	355
Elasticiteitsmodulus beton	E_{cm}	[N/mm ²]	39100
Elasticiteitsmodulus staal	E_s	[N/mm ²]	210000
Gewicht constructie	ρA	[kg/m]	1207
Buigstijfheid constructie	EI	[Nm ²]	$3.2 \cdot 10^8$
Eigenfrequentie	ω_n	[rad/s]	178.8
Eigentrilling constructie	T_e	[s]	0.035

Tabel 8-1: Parameters van de vrijdragende beschermingsconstructie

Figuur 8-2 toont in 3D het ontwerp van een prefab element van de vrijdragende constructie van de Velserspoortunnel. Figuur 8-3 geeft een detail van het 3D ontwerp weer. In paragraaf 7.2 is reeds ingegaan op de onderdelen waaruit de constructie bestaat. In onderstaande figuren zijn de stalen buizen, het gewapende beton en de rubberen opleggingsvlak te onderscheiden.



Figuur 8-2: Overzicht 3D ontwerp prefab element vrijdragende beschermingsconstructie.



Figuur 8-3: Detail 3D ontwerp prefab element vrijdragende beschermingsconstructie.

⁷⁹ Dit betreft de geschatte overspanning van het horizontale gedeelte van de beschermingsconstructie.

8.2.2. Calamiteit vallend scheepsanker

De beschermingsconstructie wordt nu gecontroleerd op de calamiteit van een vallend scheepsanker. In paragraaf 8.1 is reeds aangegeven dat de beschermingsconstructie dient te voldoen bij de ankermassa's van 2500 kg en 4500 kg. De ankermassa van 8200 kg is meegenomen ter referentie. De eindsnelheid en het dwarsoppervlak van het scheepsanker worden bepaald met de vergelijkingen uit subparagraaf 3.2.2. Tussen haakjes is de door de ROK voorgeschreven eindsnelheid van 9 m/s in de berekening meegenomen. Met de methode van Appendix E is de statisch equivalente kracht bepaald voor de drie ankermassa's. Hierbij is de statisch equivalente kracht afhankelijk van de DLF welke wordt bepaald uit de ratio tussen de eigentrilling van de constructie en de tijdsduur van de impact.

Parameter			Vergelijking	Maatgevende ankermassa		
				2500 kg	4500 kg	8200 kg
Eindsnelheid scheepsanker	V_{impact}	[m/s]	(3-2) ⁸⁰	6.19 (9.0)	6.83 (9.0)	7.54 (9.0)
Dwarsoppervlak scheepsanker	A	[m ²]	(3-1) ⁸¹	1.14	1.69	2.52
Impact oppervlak	A_{impact}	[m ²]	A/3	0.38	0.56	0.84
Equivalente diameter	D_e	[m]	(E-1)	0.70	0.85	1.03
Gereduceerde massa met verplaatste water	M_w	[kg]	$M_a \cdot (6.8/7.8)$	2179	3923	7149
Penetratie parameter	N	[-]	(E-2)	0.0025 (0.0037)	0.0028 (0.0037)	0.0031 (0.0037)
Penetratiediepte	X	[m]	(E-3)	0.018 (0.025)	0.023 (0.031)	0.032 (0.038)
Tijdsduur impact	T_d	[s]	(E-4)	0.0028	0.0034	0.0042
Maximale equivalente dynamische kracht	$F_{\text{max,dyn}}$	[kN]	(E-5)	4767.2 (6932.3)	7780.3 (10257.9)	12828.1 (15303.6)
Ratio tussen eigentrilling en tijdsduur impact	T_d/T_e	[-]	T_d/T_e	0.08	0.10	0.12
Dynamic Load Factor	DLF	[-]	Figuur E-1 ⁸²	0.30	0.30	0.38
Statisch equivalente kracht	F_{stat}	[kN]	(E-6)	1430.2 (2079.7)	2334.1 (3077.4)	4856.9 (5794.2)

Tabel 8-2: Optredende statisch equivalente krachten op de beschermingsconstructie door een vallend scheepsanker.

De beschermingsconstructie dient te worden gecontroleerd op de momentcapaciteit omdat de constructie op het bezwijkmechanisme van buiging zal bezwijken. Tabel 8-3 geeft de controle van de beschermingsconstructie op buiging weer onder de calamiteit van een vallend scheepsanker. In de berekening is een effectieve breedte⁸³ van de constructie aangenomen die gelijk is aan tweemaal de equivalente diameter van het impact oppervlak van het vallende scheepsanker. Van de stalen buizen wordt aangenomen dat de vloeisterkte over het gehele oppervlak wordt behaald. Hieruit kunnen de resulterende staalkracht en de betondrukhoogte⁸⁴ worden bepaald, om vervolgens de hefboomsarm te berekenen. De plastische momentcapaciteit wordt bepaald door het product van de resulterende staalkracht met de hefboomsarm. De maximaal optredende momenten worden bepaald middels de statisch equivalente krachten uit Tabel 8-2 met een vuistregel van een tweezijdig ingeklemde ligger. Tussen haakjes zijn in de tabel de resultaten weergegeven wanneer de eindsnelheid van het vallende scheepsanker gelijk aan 9 m/s wordt gesteld in plaats van gebruik van vergelijking (3-2).

⁸⁰ De factor c_v is conservatief gelijk gesteld aan $1.68 \text{ m/skg}^{1/6}$ (zie subparagraaf 3.2.2).

⁸¹ De factor c_a is gelijk genomen aan $0.0062 \text{ m}^2/\text{kg}^{2/3}$ (zie subparagraaf 3.2.2).

⁸² Voor de bepaling van de DLF uit Figuur E-1 is een lineair verband aangenomen voor de DLF tussen T_d/T_e gelijk aan 0.1 en 0.2. Voor de DLF is in de berekening een minimale waarde van 0.30 gehanteerd.

⁸³ De effectieve breedte is maximaal gelijk aan de breedte van het prefab element (1.6 meter).

⁸⁴ Van de betondrukhoogte wordt alleen de minimale dikte van de beton meegenomen in de berekening. Vervolgens wordt over deze hoogte een constante betonsterkte aangenomen die gelijk is aan $0.85f_{ck}$.

Parameter			Maatgevende ankeremassa		
			2500 kg	4500 kg	8200 kg
Effectieve breedte	b_{eff}	[m]	1.40	1.60	1.60
Effectief aantal buizen	n_{eff}	[-]	7	8	8
Resulterende staalkracht	N_s	[kN]	14128.5	16146.8	16146
Betondrukhoogte	x	[mm]	198	198	198
Hefboomsarm	z	[m]	0.20	0.20	0,20
Plastische momentcapaciteit	$M_{\text{Rk,pl}}$	[kNm]	2841	3246	3246
Optredende moment	M_{Ed}	[kNm]	1430 (2080)	2334 (3077)	4857 (5794)
Unity Check	U.C.	[-]	0.50 (0.73)	0.72 (0.95)	1.50 (1.78)

Tabel 8-3: Controle beschermingsconstructie op buiging bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.

Uit de tabel kan worden opgemaakt dat de constructie voldoet voor de ankeremassa's van 2500 en 4000 kg (ongeacht de eindsnelheid van het scheepsanker). Dit houdt in dat de Velserspoortunnel in de situatie van de beschermingsconstructie voldoet aan de vereiste betrouwbaarheid van $\beta = 3.6$. Tevens heeft de tunnel met de beschermingsconstructie minstens dezelfde betrouwbaarheid als in de huidige situatie met betrekking tot de calamiteit van een vallend scheepsanker. Bij de ankeremassa van 8200 kg zal de constructie bezwijken waarbij naar verwachting de energie van het vallende scheepsanker grotendeels gedissipeerd zal worden. Hierdoor is het aannemelijk dat de spoortunnel zelfs een hogere betrouwbaarheid zou kunnen hebben dan in de huidige situatie.

8.2.3. Calamiteit zinkend schip

De beschermingsconstructie wordt op de calamiteit van een zinkend schip beoordeeld voor het maatgevende schip van paragraaf 8.1. Tabel 8-4 geeft een overzicht van de berekening van de calamiteitsbelasting van het maatgevende zinkende schip volgens de methode uit Appendix G. De scheepslading is aangenomen op ijzererts. De blokcoëfficiënt van een bulkschip wordt aangenomen op $C_B = 0.80$. Bij een zinkend schip onder een hoek is aangenomen dat niet meer dan de helft van het aantal compartimenten van het schip bij de maximale belasting vol loopt. Hierdoor is de berekende waarde afgekapt op de halve lengte van het schip. Als meer compartimenten vollopen zal naast de totale kracht ook het steunoppervlak toenemen, waardoor de resulterende belasting zal afnemen.

Parameter			Vergelijking	Maatgevende zinkende schip
Lengte	L_{oa}	[m]	-	229.0
Breedte	B	[m]	-	32.3
Diepgang	T	[m]	-	14.05
Holte	H	[m]	-	20.2
Vrijboord	F	[m]	-	6.15
Draagvermogen	DWT	[ton]	-	81827
Eigengewicht schip	W	[kN]	(G-1)	12090
Belasting horizontaal zinkend schip	L_1	[kN]	(G-2)	501324
Watergewicht per m	w	[kN/m]	(G-3)	3776
Afstand volgelopen ⁸⁵	X	[m]	(G-4)	114.5 (148.5)
Belasting zinkend schip onder hoek	L_2	[kN]	(G-5)	23495

Tabel 8-4: Overzicht bepaling calamiteitsbelasting zinkend schip op de beschermingsconstructie met Appendix G.

⁸⁵ Tussen haakjes wordt de berekende waarde weergegeven die vervolgens is afgekapt op 114.5 meter (omdat het steunoppervlak van het gezonken schip groter wordt waardoor de resulterende belasting kleiner zal zijn).

Met de berekende belastingen van een horizontaal zinkend schip (L_1) en een zinkend schip onder een hoek (L_2) kan de resulterende belasting worden bepaald middels het steunoppervlak. Bij een horizontaal zinkend schip wordt aangenomen dat het steunoppervlak (A_1) gelijk is aan 80% van de lengte maal de breedte van het schip. Aangezien de tunnel stijver is dan de omliggende bodem wordt vervolgens een toename van 80%⁸⁶ in rekening gebracht voor de belasting (subparagraaf 3.4.2). De resulterende belasting wordt bepaald door de totale belasting te delen door het steunoppervlak ($q_1 = 1.8 \cdot L_1 / A_1$). Voor een zinkend schip onder een hoek wordt aangenomen dat het steunoppervlak (A_2) gelijk is aan 80% van de breedte van het schip keer de breedte van de beschermingsconstructie. De resulterende belasting wordt bepaald door de totale belasting te delen door het steunoppervlak ($q_2 = L_2 / A_2$). Tabel 8-5 geeft de resulterende belastingen op de beschermingsconstructie.

Resulterende belasting op tunneldak			Maatgevende zinkende schip
<i>Steunoppervlak horizontaal zinkend schip</i>	A_1	[m ²]	5910
<i>Belasting horizontaal zinkend schip</i>	q_1	[kN/m ²]	152.7
<i>Steunoppervlak zinkend schip onder een hoek</i>	A_2	[m ²]	258.4
<i>Belasting schip zinkend onder een hoek</i>	q_2	[kN/m ²]	90.9

Tabel 8-5: Overzicht resulterende calamiteitsbelasting van een zinkend schip op de beschermingsconstructie.

De calamiteitsbelasting van een horizontaal schip blijkt uit Tabel 8-5 maatgevend te zijn met een belasting van 152.7 kN/m². Met een vuistregel voor een tweezijdig scharnierend opgelegde ligger wordt (conservatief) het optredende maximale veldmoment bepaald op 1954.6 kNm. Uit Tabel 8-3 volgt dat de plastische momentcapaciteit 3246 kNm bedraagt. De beschermingsconstructie voldoet daardoor aan de vereiste betrouwbaarheid bij de calamiteit van een zinkend schip. De calamiteit van een vallend scheepsanker is maatgevend boven een zinkend schip met betrekking tot het ontwerp van de vrijdragende beschermingsconstructie.

8.3. Uitvoeringsaspecten

Om de beschermingsconstructie te kunnen plaatsen op de Velserspoortunnel zal een zeer complexe uitvoering moeten plaatsvinden. Deze complexe uitvoering zal hinder voor de scheepvaart met zich mee kunnen brengen. De Haven van Amsterdam zal bij hinder aan de scheepvaart, ook al is het gering, mogelijk (financiële) gevolgen kunnen ondervinden. Tijdens de uitvoering dient hinder van scheepvaart daarom zoveel mogelijk te worden voorkomen, al zal dat nooit volledig kunnen. Het gehele uitvoeringstraject zal geoptimaliseerd moeten worden om de belemmeringen voor de scheepvaart zoveel mogelijk te minimaliseren.

Voorafgaand aan de uitvoering dient de kanaalbodem bij de Velsertunnels tot in detail in kaart te worden gebracht. In paragraaf 2.4.3 werd reeds ingegaan op de aanwezigheid van damwand restanten en de gekromde betonplaat en in paragraaf 2.4.2 werd de samenstelling van de tunneldekking op de Velserspoortunnel behandeld. Door middel van inspecties dienen alle onzekerheden omtrent de restanten en tunneldekking inzichtelijk te worden gemaakt.

De uitvoering begint met de productie van de beschermingsconstructie. Op een gespecialiseerde fabriekslocatie dienen de prefab elementen te worden geproduceerd. Elk prefab element heeft een breedte van 1.60 meter waardoor er circa 64 elementen benodigd zullen zijn om de tunnel over de kanaalbodem van 102 meter af te dekken. Nadat de productie is voltooid dienen de elementen te worden verplaatst naar een opslaglocatie zo dicht mogelijk bij de Velsertunnels in de buurt.

⁸⁶ Er is conservatief aangenomen dat de tunnel volkomen monolithisch gedrag vertoont.

Tegelijkertijd met de productie van de prefab elementen zal de kanaalbodem ter plaatse van de Velsertunnels in gereedheid worden gebracht door alle aanwezige restanten te verwijderen. Om de scheepvaart in dit stadium nauwelijks te hinderen dienen de werkzaamheden geleidelijk te worden uitgevoerd. Nadat de restanten verwijderd zijn dient de huidige tunneldekking te worden verwijderd. Omdat de tunnel in deze situatie kwetsbaar is dienen voorzorgsmaatregelen te worden genomen. Er kan hierbij gedacht worden aan tijdelijke maatregelen voor de scheepvaart of in het uiterste geval tijdelijke sluiting van de spoortunnel.

Nu de tunnel bloot is komen te liggen dient inspectie plaats te vinden aan het tunneldak en kunnen eventuele herstelwerkzaamheden worden gepleegd. Vervolgens kan worden gestart met de plaatsing van de prefab elementen. Elk element wordt langzaam afgezonken naar het tunneldak en nauwkeurig geplaatst met behulp van meetapparatuur en duikers. Ook hier dient plaatsing zodanig te worden uitgevoerd zodat zich minimale hinder voor de scheepvaart voordoet. Bij plaatsing aan de ene zijde van de vaarweg kan aan de andere zijde nog scheepvaart passeren.

Nu de beschermingsconstructie op de spoortunnel is gerealiseerd kan de omliggende bodem van de vaarweg worden aangepakt. De sliblaag dient alvorens te worden verwijderd om het grove materiaal tot het gewenste niveau aan te vullen of te verwijderen. Het grove materiaal wordt vervolgens met colloïdaal beton gepenetreerd om de vaarwegbodem bestendig te maken tegen optredende bodemsnelheden. Na de realisatie kan de vaarweg weer volledig worden benut en kunnen de tijdelijke beperkingen voor scheepvaart die golden gedurende de uitvoering worden opgeheven.

8.4. Bodemsnelheden

In deze paragraaf wordt ingegaan op de optredende bodemsnelheden door scheepvaart ter plaatse van de Velsertunnels. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de vaarwegbodem van -15.50 en -15.80 meter NAP. Voor de snelheid van het maatgevende schip⁸⁷ wordt onderscheid gemaakt tussen de huidige maximumsnelheid van 6 km/h en de maximumsnelheid die voor 30 juli 2020 gold van 12 km/h (subparagraaf 2.1.3). De boegsquat voor de snelheden van 6 en 12 km/h is reeds bepaald op respectievelijk 0.19 en 0.79 meter (paragraaf 4.4). Met de methodes van Appendices B.1 en B.2⁸⁸ zijn de optredende bodemsnelheden door retourstroom en schroefwerking van schepen bepaald. Tabel 8-6 geeft de resultaten van deze snelheden weer.

Optredende bodemsnelheden door scheepvaart			v = 6 km/h		v = 12 km/h	
			-15.50 m NAP	-15.80 m NAP	-15.50 m NAP	-15.80 m NAP
Bodemsnelheid retourstroom	u_r	[m/s]	0.50	0.49	1.24	1.19
Bodemsnelheid schroefwerking	u_b	[m/s]	1.15	0.98	1.39	1.08

Tabel 8-6: Bepaalde bodemsnelheden door retourstroom en schroefwerking van het huidige maatgevende schip.

Voor de huidige bodembescherming ter plaatse van de Velsertunnels bedraagt de kritische stroomsnelheid 1 m/s (Deltares, 2019). Uit de tabel kan worden opgemaakt dat deze weerstand kan worden overschreden door de optredende bodemsnelheden van het huidige maatgevende schip. Dit lijkt in overeenstemming met de constatering van subparagraaf 2.4.2 dat de huidige tunneldekking over de tijd niet stabiel is gebleken. Uit de tabel volgt verder dat verdieping van de vaarweg zal leiden tot lagere optredende bodemsnelheden waardoor de tunneldekking stabiel zal zijn. Daarnaast zijn de optredende bodemsnelheden voor het maatgevende schip afgenomen met de snelheidsverlaging van 12 naar 6 km/h.

⁸⁷ Het maatgevende schip in de huidige situatie heeft afmetingen van 44m x 255m x 14.05m (paragraaf 4.4).

⁸⁸ Bij de snelheid van 6 km/h is het aangewend vermogen van het schip op 15% van het geïnstalleerd vermogen aangehouden tegenover 30% voor de snelheid van 12 km/h.

8.5. Conclusie

Door toepassing van de vrijdragende beschermingsconstructie op de Velserspoortunnel in combinatie met het versmalde vaarwegprofiel van subparagraaf 6.1.4 kan een reductie in de dikte van de tunnelbescherming worden gerealiseerd van ruim 30 cm ten opzichte van de huidige situatie. Daarnaast zal de tunnelveiligheid tegen scheepvaart calamiteiten als het vallende scheepsanker en het zinkende schip door de beschermingsconstructie toenemen ten opzichte van de huidige situatie.

De eventuele uitvoering van de vrijdragende beschermingsconstructie zal zeer complex zijn omdat hinder van de scheepvaart geminimaliseerd dient te worden. Echter zijn maatregelen beschikbaar om de hinder enigszins te beperken. De verdieping van de vaarweg, welke gepaard gaat met toepassing van de beschermingsconstructie op de spoortunnel, zorgt ervoor dat veroorzaakte bodemsnelheden door schroefwerking en retourstroom kleiner zullen zijn dan in de huidige situatie. Dit zorgt ervoor dat de tunneldekking stabiel zal worden.

Er dient te worden opgemerkt dat in de berekening niet is ingegaan op de uitgeoefende belasting op de tunnelwanden door toepassing van de beschermingsconstructie. De tunnelwanden worden geacht om deze belasting te weerstaan. In de wanden van de spoortunnel zal de normaalkracht toenemen onder de belasting van het gewicht van de constructie. Het tunneldak zal daarbij ietwat ontlast worden omdat de huidige tunneldekking niet meer op het dak zal rusten.

9. Discussie

In het onderzoek is getracht om uitgebreid in te gaan op de veiligheid van de Velsertunnels onder calamiteitsbelastingen door scheepvaart. De calamiteiten van een vallend scheepsanker, een slepend scheepsanker, een zinkend schip en een aanvarend schip zijn gekwantificeerd onder diverse aannames en theoretische methoden. Bij de interpretatie van de resultaten dient dan ook te worden opgemerkt dat er onzekerheden aanwezig zijn omtrent het werkelijke gedrag van tunnels tijdens de calamiteiten. In dit hoofdstuk wordt gereflecteerd op de toegepaste methoden van het onderzoek.

Allereerst dient te worden opgemerkt dat het onderzoek alleen uitgebreid ingaat op de calamiteiten van een vallend scheepsanker, een slepend scheepsanker, een zinkend schip en een aanvarend schip. Andere calamiteiten zoals een vallende spudpaal of een vallende container zijn qua risico lager ingeschat waardoor deze niet verder uitgebreid zijn behandeld. Daarnaast is ingegaan op optredende bodemsnelheden door schroefwerking of retourstroom omdat deze tot erosie van de tunneldekking kunnen leiden. Echter kunnen door scheepvaart veroorzaakte snelheden nabij de bodem op zichzelf niet tot het falen van de tunnel leiden.

Verder dient te worden opgemerkt dat het vaarwegprofiel in het onderzoek is geschematiseerd tot Figuur 2-2 met de bodemdiepte gelijk aan de Nautisch Gegarandeerde Diepte van -15.50 meter NAP. Het werkelijke vaarwegprofiel vertoont plaatselijke afwijkingen van dit geschematiseerde profiel waaronder ondieptes op circa -15.20 NAP ter plaatse van de Velsertunnels. Met betrekking tot de calamiteit van een vallend scheepsanker zullen deze ondieptes een grotere tunneldekking met zich meebrengen waardoor de werkelijke weerstand tegen de calamiteiten hoger zou kunnen uitvallen.

Daarnaast is gebruik is gemaakt van de database van het loodswezen over 2018 voor alle informatie van de scheepvaart op het Noordzeekanaal. Er dient te worden opgemerkt dat door een grote verandering in de samenstelling van de scheepvaart op het Noordzeekanaal deze database in de toekomst minder representatief zou kunnen zijn.

In de deterministische berekening is bepaald dat de Velsertunnels voldoen op de calamiteiten van een slepend scheepsanker en een aanvarend schip. Hierbij zijn de Velsertunnels niet berekend op de mogelijk uitgeoefende kracht van een slepend scheepsanker dat blijft haken, omdat op basis van de berekende penetratiediepte beredeneerd is dat dit niet zal voorkomen. Bij de calamiteit van een aanvarend schip is frontale aanvaring van de tunnels uitgesloten en is de spoortunnel vervolgens berekend op de mogelijk uitgeoefende wrijvingskracht van een aanvarend schip. Deze wrijvingskracht is bepaald als fractie van de berekende frontale equivalente statische kracht. De spoortunnel voldoet vervolgens ruimschoots op de belasting waardoor voor de autotunnel is aangenomen dat deze ook voldoet op de calamiteit. Op zowel de calamiteit van een slepend scheepsanker als de calamiteit van een aanvarend schip is na de deterministische berekening niet verder ingegaan omdat de Velsertunnels geacht worden te voldoen op de calamiteit.

Bij de calamiteit van een vallend scheepsanker volgt uit de faalkansberekening dat de Velsertunnels voldoen. In de berekening is aangenomen dat de calamiteitsbelasting op de minst gunstige positie van het tunneldak optreedt met betrekking tot de bezwijkmechanismen van pons en buiging. Echter is niet in beschouwing genomen dat het scheepsanker (in de lengterichting) ter plaatse van de voeg van een tunnelmoot terecht kan komen, waar de weerstand van de tunnel tegen de calamiteit lager zal zijn. De invloed van de aanwezige gewapende beschermerschil is niet in de berekening meegenomen bij de tunnelweerstand. Verder is gebruik gemaakt van de karakteristieke sterkte van de tunnel welke waarschijnlijk lager is dan de werkelijke sterkte van de tunnel.

In de berekening is onderscheid gemaakt in de bezwijkmechanismen van pons en buiging waarop het tunneldak zou kunnen falen onder de calamiteit van een vallend scheepsanker. Bezijken op dwarskracht wordt niet meegenomen aangezien bezijken op pons maatgevend wordt geacht. Uit de resultaten van de faalkansberekening volgt dat het bezwijkmechanisme van pons licht maatgevend is boven het bezwijkmechanisme van buiging. Dit is in overeenstemming met de literatuur waarin gesteld wordt dat onder de calamiteit van een vallend scheepsanker bezijken op pons zal optreden. Opgemerkt dient te worden dat in het onderzoek wordt geacht dat de tunnel faalt wanneer deze niet voldoet op één of beide bezwijkmechanismen. In werkelijkheid kan schade aan de tunnel door loskomende betonschollen niet worden uitgesloten op basis van deze definitie van falen.

De optredende calamiteitsbelasting door een vallend scheepsanker is onderhevig aan verschillende aannames. De werkelijk optredende belasting zal afwijken van de van de theoretisch bepaalde omdat er veel onzekerheden zijn. In de berekening is voor het bezwijkmechanisme van pons, net als voor buiging, de statisch equivalente belasting gebruikt. De ROK stelt echter dat het bezwijkmechanisme van pons gecontroleerd dient te worden onder de dynamische belasting, maar een goede onderbouwing onderbreekt hierbij. Verder is de maximale *Dynamic Load Factor* van 2 aangenomen in de berekening, behorend bij een massaveersysteem met één vrijheidsgraad onder plotselinge dynamische belasting. In werkelijkheid zal de DLF waarschijnlijk lager uitvallen. Daarnaast is verschil aangebracht in de eindsnelheid van het scheepsanker volgens vergelijking (3-2) en de opgelegde eindsnelheid van 9 m/s door de ROK. De faalkansen van de Velsertunnels kunnen fors verschillen tussen deze eindsnelheden zoals in Figuur 5-4 is weergegeven.

Er zijn dus diverse aannames gedaan om de faalkansen van de Velsertunnels te kunnen bepalen bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Wegens de onzekerheden omtrent de calamiteitsbelasting en het bezwijkmechanisme die in werkelijkheid optreden dienen de berekende faalkansen als orde-grootte te worden geïnterpreteerd. Er dient te worden opgemerkt dat de faalkans van de calamiteit voor een groot deel wordt bepaald door de kans van optreden.

Voor de calamiteit van een zinkend schip blijkt zowel uit de deterministische berekening als de faalkansberekening dat de autotunnel niet voldoet bij de calamiteitsbelasting, terwijl de spoortunnel wel voldoet op de optredende krachten. In de faalkansberekening werd de jaarlijkse faalkans van de spoortunnel circa honderd keer kleiner bepaald dan de faalkans van de autotunnel. De verschillen tussen de tunnels worden hierbij veroorzaakt door de hogere weerstand van de spoortunnel tegen de calamiteitsbelasting. Het verschil in de maximaal op te nemen calamiteitsbelasting is aanzienlijk met 179.6 kN/m² en 25 kN/m² voor respectievelijk de spoor- en autotunnel (Appendices J.6 en K.5). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de dwarskrachtcapaciteit van de autotunnel maatgevend is voor de maximaal op te nemen calamiteitsbelasting. Echter wordt verwacht dat de werkelijke dwarskrachtcapaciteit van de autotunnel hoger zal liggen dan de gehanteerde karakteristieke sterkte volgens Eurocode 2. Zo werd voor de autotunnel onder andere een lagere dwarskrachtcapaciteit bepaald wanneer de schuin lopende langswapening in rekening werd gebracht t.o.v. de doorsnede van het tunneldak of vloer zonder de schuine langswapening wapening (Appendix L.3).

Verder zijn diverse aannames gedaan bij de bepaling van de optredende calamiteitsbelasting door een zinkend schip. Bij de bepaling van de calamiteitsbelasting is het dynamische deel niet in rekening gebracht, omdat dit voor de grote schepen verwaarloosbaar is ten opzichte van het statische deel. Bij kleinere schepen is dit deel van de belasting echter wel vergelijkbaar met het statische deel waardoor de optredende belasting onderschat wordt. Daar staat tegenover dat de invloed van de tunneldekking niet in beschouwing wordt genomen bij de krachtsafdracht. Verwacht wordt dat de tunneldekking in staat is om het dynamische deel van de belasting gedeeltelijk te kunnen dempen. In de berekening wordt verder voor de meeste schepen een lading van ijzererts aangenomen wat als conservatief kan worden gezien. Eventuele zettingen of vervormingen van de

tunnels onder de calamiteitsbelasting zijn niet in beschouwing genomen, evenals het longitudinale gedrag van de tunnels. Er is dan ook geen controle uitgevoerd op de capaciteit van de zinkvoegen onder de calamiteit van een zinkend schip. Bovendien is niet ingegaan op de plastische vervorming van een zinkend schip onder een hoek, wat invloed heeft op het steunoppervlak en daarmee de optredende belasting. In werkelijkheid kan de plastische vervorming er dan ook voor zorgen dat de optredende belasting van een zinkend schip onder een hoek anders uitvalt. Daarnaast is in het onderzoek niet ingegaan op de situatie dat een zinkend schip onder een hoek net naast de tunnel tot zinken komt en horizontale gronddruk op de tunnel uitoefent.

Alles overziend wordt ingeschat dat de bepaalde faalkansen van de Velsertunnels door de calamiteit van een zinkend schip in werkelijkheid eerder lager dan hoger zullen zijn aangezien de aannames over het algemeen conservatief zijn. Er dient tot slot te worden opgemerkt dat de faalkansen door de calamiteit voor een groot deel worden bepaald door de kans van optreden. Bij overschatting van de kans van optreden wordt de faalkans daardoor ook te hoog ingeschat.

In het onderzoek zijn maatregelen en constructieve oplossingen in kaart gebracht die de veiligheid van tunnels bij scheepvaart calamiteiten kunnen verhogen of de dikte van de bescherming op de tunnel kunnen verminderen. De constructieve oplossingen zijn vergeleken op basis van een multicriteria-analyse waaruit vier varianten zijn opgesteld voor de bescherming van de Velsertunnels. De meest geschikte variant is uiteindelijk verder uitgewerkt om de toepasbaarheid te onderzoeken.

Bij de maatregelen die tot snelheidsverlaging van de scheepvaart leiden neemt zowel de kans op de calamiteit van een aanvarend schip als de daarbij optredende calamiteitsbelasting af. Er dient te worden opgemerkt dat de snelheidsverlaging daarnaast een effect kan hebben op de kans van optreden voor een zinkend schip. Er kan beredeneerd worden dat schepen zich bij een lagere vaarsnelheid langer boven de tunnel bevinden waardoor de kans op een zinkend schip zou toenemen. Andersom kan echter worden beredeneerd dat de kans op scheepsongevallen bij een lagere vaarsnelheid kleiner zal zijn waardoor de kans op een zinkend schip afneemt. Er is in het onderzoek daarom geen relatie gelegd tussen de vaarsnelheid en de kans dat een schip zinkt.

De uitwerking van de vrijdragende beschermingsconstructie op de Velserspoortunnel is uitgevoerd aan de hand van een ontwerp-berekening. De constructie is hierbij gedimensioneerd op basis van een globale berekening met de calamiteitsbelastingen van een vallend scheepsanker en een zinkend schip. Aangezien het geen gedetailleerde berekening betreft is er nog onzekerheid aanwezig omtrent de toepasbaarheid van de constructie.

Er dient te worden opgemerkt dat toepassing van de vrijdragende beschermingsconstructie op de Velserautotunnel de veiligheid van de tunnel tegen de calamiteit van een zinkend schip niet kan vergroten aangezien enkel het tunneldak zou worden ontlast. De autotunnel zou dan nog steeds niet voldoen op de dwarskrachtcapaciteit van de tunnelvloer.

10. Conclusie

Het doel van dit onderzoek was om enerzijds meer inzicht te krijgen in de bescherming van de Noordzeekanaal tunnels tegen scheepsvaart calamiteiten en anderzijds om te onderzoeken of de tunnelbescherming geminimaliseerd kan worden. In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvraag en de onderliggende deelvragen. De hoofdvraag van het onderzoek luidde als volgt:

Hoe kan de tunneldekking van de Noordzeekanaal tunnels worden geoptimaliseerd onder de vereiste veiligheid bij scheepsvaart calamiteiten?

Op basis van literatuuronderzoek naar calamiteitsbelastingen van scheepvaart is nagegaan hoe deze belastingen kunnen worden gekwantificeerd. Vervolgens is de verkregen kennis toegepast op de casus van de Velsertunnels. Daarnaast is een inventarisatie gedaan naar mogelijke alternatieve vormen van tunnelbescherming waarbij de meest geschikte oplossing verder is uitgewerkt voor de casus. Allereerst zullen de drie deelvragen worden beantwoord alvorens er zal worden overgegaan tot de beantwoording van de hoofdvraag.

1. Voldoen de Velsertunnels met de huidige tunneldekking aan de vereiste veiligheid omtrent calamiteitsbelastingen van scheepvaart?

De huidige tunneldekking op de Velsertunnels, bestaande uit grof materiaal waaronder puin en grind, heeft als enige functie om de tunnels te beschermen tegen calamiteitsbelastingen van scheepvaart. Middels een risicoanalyse is inzicht verkregen in de mogelijke calamiteiten die door de scheepvaart worden veroorzaakt en een risico vormen voor de constructieve veiligheid van de Velsertunnels. De calamiteiten van een vallend scheepsanker, een slepend scheepsanker, een zinkend schip en een aanvarend schip worden relevant geacht. De Velsertunnels dienen in de huidige situatie minimaal te voldoen aan de betrouwbaarheidsindex van $\beta = 3.3$, wat bij een restlevensduur van 30 jaar resulteert in de jaarlijkse toegestane faalkans van $1.61 \cdot 10^{-5}$.

De Velsertunnels zijn getoetst op de calamiteitsbelastingen middels een deterministische berekening waarbij de maatgevende ankermassa's en schepen afgeleid zijn uit de toegestane faalkans. De Velsertunnels voldoen bij de calamiteit van een slepend scheepsanker aan de vereiste veiligheid. Door de afgeschuinde bovenhoeken van de tunnels zal een slepend scheepsanker niet achter de tunnels blijven haken en de aanwezige betonnen beschermerschil beschermt het tunneldak tegen schrapende ankers. Daarnaast voldoen de Velsertunnels bij de calamiteit van een aanvarend schip. Hierbij wordt een frontale aanvaring van de tunnels uitgesloten en kunnen de tunnels de mogelijk uitgeoefende wrijvingskracht door een aanvarend schip weerstaan. Op de calamiteit van een vallend scheepsanker wordt door de spoortunnel niet voldaan. Daarnaast voldoet de autotunnel niet bij de calamiteit van een zinkend schip.

Op de calamiteiten van de vallend scheepsanker en een zinkend schip is vervolgens verder ingegaan met behulp van een faalkansberekening. De Velsertunnels voldoen met de huidige tunneldekking aan de vereiste veiligheid bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. De jaarlijkse faalkansen door een vallend scheepsanker zijn voor zowel de spoor- als autotunnel een orde-grootte kleiner dan de toegestane faalkans. De spoortunnel voldoet qua orde-grootte faalkans verder ook op de calamiteit van een zinkend schip. Echter is de jaarlijkse faalkans door een zinkend schip voor de autotunnel groter dan de toegestane faalkans, waardoor deze niet voldoet onder de calamiteit. Tabel 10-1 toont de jaarlijkse faalkansen van de Velsertunnels bij de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een zinkend schip.

Tunnel	Jaarlijkse faalkans	
	Vallend scheepsanker	Zinkend schip
Velserspoortunnel	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$2.31 \cdot 10^{-6}$
Velserautotunnel	$7.32 \cdot 10^{-7}$	$1.10 \cdot 10^{-4}$

Tabel 10-1: Overzicht faalkansen Velsertunnels door de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip.

2. In hoeverre is er alternatieve bescherming van de Velsertunnels mogelijk waarmee de veiligheid van de tunnels zal toenemen?

In het onderzoek is ingegaan op zowel maatregelen als constructieve oplossingen om de betrouwbaarheid van de Velsertunnels onder scheepvaart calamiteiten te verhogen. De mogelijke maatregelen betreffen een betere handhaving op snelheid en diepgang van scheepvaart, controles op de conditie van scheepsankers en het instellen van een versmalde vaarweg voor marginale scheepvaart. Verder is de reeds toegepaste verlaging van de vaarsnelheid erg effectief gebleken aangezien dit de squat van de scheepvaart aanzienlijk heeft doen afnemen.

Bij de constructieve oplossingen zijn vier varianten opgesteld op basis van de resultaten uit een multicriteria-analyse van verschillende alternatieven. De vrijdragende beschermingsconstructie (variant 1) wordt het meest effectief geacht in het beschermen van het tunneldak bij de calamiteit van een vallend scheepsanker en zinkend schip. Bescherming door stortsteen met colloïdaal beton (variant 2) en een beschermlaag van asfalt en beton (variant 3) zijn minder effectief maar zullen daarentegen lagere kosten hebben. De drempelconstructie (variant 4) is zeer effectief tegen de calamiteit van een aanvarend schip en zou tevens kunnen worden uitgerust met sensoren.

De vrijdragende beschermingsconstructie (variant 1) wordt als meest geschikt beschouwd voor toepassing op de Velserspoortunnel. Na verdere uitwerking van deze constructie lijkt het mogelijk te zijn om middels de vrijdragende beschermingsconstructie de veiligheid van de tunnel te vergroten tegen de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een zinkend schip.

De veiligheid van de autotunnel tegen de calamiteit van een zinkend schip zal niet kunnen worden vergroot door toepassing van een vrijdragende beschermingsconstructie aangezien enkel het tunneldak zal worden ontlast. De maatgevende dwarskrachtcapaciteit van de tunnelvloer zal door toepassing van de constructie niet worden vergroot.

3. In hoeverre is er alternatieve bescherming van de Velsertunnels mogelijk waarmee de dikte van de tunnelbescherming zou kunnen afnemen?

De Velserspoortunnel is qua diepteligging maatgevend voor alle Noordzeekanaal tunnels. Op de spoortunnel kan een vrijdragende beschermingsconstructie worden gerealiseerd bestaande uit prefab elementen van 50 cm hoog en 1.60 m breed. De constructie bestaat uit stalen buizen met een diameter van 20 cm en 9.5 mm dikte met daarop 20 cm beton. Tussen de constructie en het tunneldak is 10 cm ruimte aangehouden. In combinatie met het versmalde vaarwegprofiel zou de beschermingsconstructie een afname van ruim 30 cm in de tunneldekking kunnen realiseren. De vaarwegbodem op het maatgevende punt zou dan circa op -15.82 m NAP komen te liggen.

Hoofdvraag: Hoe kan de tunneldekking van de Noordzeekanaal tunnels worden geoptimaliseerd onder de vereiste veiligheid bij scheepvaart calamiteiten?

De Velsertunnels voldoen in de situatie met de huidige tunneldekking aan de vereiste veiligheid voor de calamiteiten van een vallend scheepsanker, een slepend scheepsanker en een aanvarend schip. Op de calamiteit van een zinkend schip voldoet de autotunnel echter niet aan de vereiste veiligheid. Daarnaast is de huidige tunneldekking niet stabiel onder de optredende bodemsnelheden door

scheepvaart. Voor de Velserspoortunnel is bepaald dat door realisatie van een vrijdragende beschermingsconstructie de dikte van de tunnelbescherming kan afnemen terwijl de veiligheid van de tunnel onder scheepvaart calamiteiten tegelijkertijd zou toenemen.

In het algemeen kan voor de Noordzeekanaal tunnels worden gesteld dat door toepassing van een beschermende constructie in plaats van de huidige tunneldekking, zowel de dikte van de tunnelbescherming kan afnemen, als dat de constructieve veiligheid van de tunnel tegen scheepvaart calamiteiten zou kunnen toenemen. Het principe van de vrijdragende beschermingsconstructie lijkt constructief gezien goed toepasbaar.

11. Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de aanbevelingen van het onderzoek uiteengezet.

- Aanbevolen wordt om vervolgonderzoek te doen naar het gedrag van tunnels onder scheepvaart calamiteiten. De invloed van de tunneldekking op de veiligheid van de tunnels tegen scheepvaart calamiteiten dient hierbij centraal te staan. De bezwijkmechanismen van de tunnels onder de scheepvaart calamiteiten kunnen nauwkeuriger te worden geschematiseerd met behulp van FEM berekeningen.
- Er wordt aanbevolen om tevens de constructieve veiligheid van de andere Noordzeekanaal tunnels te bepalen onder de calamiteitsbelastingen van scheepvaart. De gehanteerde methodiek in het onderzoek kan hiervoor worden gebruikt. Daarnaast is het interessant om voor de andere Noordzeekanaal tunnels ook het verband tussen de faalkans door een vallend scheepsanker en de dikte tunneldekking af te leiden. Dit leidt tot meer inzicht in de invloed van de tunneldekking op de weerstand tegen de calamiteit van een vallend scheepsanker.
- Daarnaast wordt aanbevolen om de vrijdragende beschermingsconstructie gedetailleerder te ontwerpen op de calamiteitsbelastingen van een vallend scheepsanker en een zinkend schip. In het onderzoek is de vrijdragende beschermingsconstructie globaal gedimensioneerd op deze calamiteiten. Echter is niet op detailniveau naar het bezwijken van de constructie onder de calamiteiten gekeken. Ook de invloed van de constructie op de tunnel dient verder te worden onderzocht. Om de constructie verder te optimaliseren zal gebruik moeten worden gemaakt van geavanceerde FEM berekeningen.
- De beheerders van het Noordzeekanaal en de Noordzeekanaal tunnels wordt aanbevolen om de mogelijkheden van de maatregelen uit paragraaf 6.1 verder te onderzoeken indien het noodzakelijk wordt geacht om de veiligheid van de tunnels te doen toenemen. Daarnaast wordt aanbevolen om de toepasbaarheid van de vrijdragende beschermingsconstructie voor de Noordzeekanaal tunnels verder te onderzoeken. In het onderzoek is alleen ingegaan op bescherming aan de buitenzijde van de tunnels tegen scheepvaart calamiteiten. Daarom dient de optie tot het versterken van de tunnels van binnenuit verder in kaart te worden gebracht. De tunnel kan bijvoorbeeld van binnenuit worden versterkt door het bijplaatsen van wapening.
- Er wordt aanbevolen om na te gaan of de *Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken* kan worden aangescherpt met betrekking tot de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip. Hierbij dient gekeken te worden naar de formule voor het bepalen van de ankermassa aangezien deze de hoge ankermassa's lijkt te onderschatten t.o.v. de door TNO gehanteerde methode⁸⁹. Verder lijkt de door de ROK voorgeschreven valsnelheid van 9 m/s voor vallende scheepsankers aan de hoge kant voor de lagere ankermassa's hetgeen als conservatief kan worden gezien. Daarnaast lijkt de door de ROK gehanteerde maximaal optredende belasting door zeeschepen aan de lage kant vergeleken met de literatuurstudie en resultaten uit het onderzoek.

⁸⁹ Beide methoden zijn behandeld in Appendix H.2.

Bibliografie

- AVIV (2011). *Achtergronddocument RBM II - Versie 2.0*. Adviseurs externe veiligheid en risicoanalisten, Enschede.
- Bezuyen, K. G., Stive, M. J. F., Vaes, G. J. C., Vrijling, J. K., & Zitman, T. J. (2012). *Inleiding Waterbouwkunde*. Collegedictaat CT 2320, TU Delft, Faculty CiTG.
- Camerik, R. (1999). *Advies betreffende vermindering van gronddekking op Velsertunnels en Wijkertunnel*. Project Zeepoort IJmond. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Documentnummer: 3030-P-99.076.
- Chao, Z., Hong, H., Kaiming, B., & Xueyuan, Y. (2020). Dynamic amplification factors for a system with multiple-degrees-of-freedom. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(2), 363–375. doi:<https://doi.org/10.1007/s11803-020-0567-9>
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London.
- Coentunnel Construction (2009). *Tweede Coentunnel - DO Afgezonken Tunnel - Vallende Ankers, bepaling belasting op de tunnel*. InfraProvider Coentunnel Tracé, 2.02.04 Kruisingsysteem Noordzeekanaal, Documentnummer: CT2-23-2-RAP-0-00-003.
- Coentunnel Construction (2011). *Tweede Coentunnel - UO Afgezonken Tunnel - Studie naar grondverbetering, taludstabiliteit en bescherming van het tunneldak tegen impact van scheepsankers*. Infra provider Coentunnel-tracé, 2.02.04 Kruisingsysteem "Noordzeekanaal", 2.02.04.04 Kruisingsysteem Tweede Coentunnel, Documentnummer: CT2-23-2-RAP-0-00-119.
- de Leeuw van Weenen, R. P. (1995). *Ankers op tunneldaken, een analyse van kansen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat. RWS-rapport WB696-R-95002. Utrecht.
- de Vries, S. B. (1988). Ships and tunnels: particular loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 3(4), 369–373. doi:[https://doi.org/10.1016/0886-7798\(88\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0886-7798(88)90008-9)
- Delhomme, F., Mommessin, M., Mougine, J. P., & Perrotin, P. (2005). *Behavior of a structurally dissipating rock-shed: experimental analysis and study of punching effects*. *International Journal of Solids and Structures* 42 (2005) 4204–4219.
- Deltares (2019). *North Sea Canal propeller induced bed velocities assessment*. Reference: 11203473-000-HYE-0003.
- DNV GL (2015). *Faalkansberekening Nieuwe Waterweg bundel 45-001*. Projectnaam: RA Nieuwe Waterweg, Document nummer: GCS.122178, Groningen.
- Gibson, F., & Williams-Crew, R. (2020). Development of Anchor Penetration Models for Cable Burial Risk Assessment. *Offshore Technology Conference*. doi:<https://doi.org/10.4043/30901-ms>
- Google Maps (2020). Satellietfoto Noordzeekanaal. Opgehaald van <https://www.google.nl/maps/@52.4339477,4.8055,23253m/data=!3m1!1e3>

- Hemelop, D. W. (2000). *Onderzoek vallend scheepsanker op tunneldak - Samenvattende Eindrapportage*. Project VALANK. Documentnummer: VAL99-18. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat. Utrecht.
- Horvat & Partners (2017). *Onderzoek Diepgang Scheepvaart Noordzeekanaal - Definitief Rapport*. Rapportnummer: 16025-R-001, Delft.
- Koffler, A., Choura, M., Bendriss, A., & Zengerink, E. (2008). *Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction*. Springer Science + Business Media B.V. 2008.
- Koning, J. (1992). *Zinkende schepen boven een tunnel trace in de pas van Terneuzen*. Marin (Maritiem Research Instituut Nederland), Wageningen.
- Kooijman, G. (2005). *2e coentunnel - Vallend anker*. Intern memo Bouwdienst Rijkswaterstaat d.d. 23 augustus 2005.
- Kuik, L. J. (1986). Design And Construction Of Stabilization And Protection Of Subsea Pipelines And Cables Up To 1,000-M Water Depths. *Offshore Technology Conference*, 557–564. doi:<https://doi.org/10.4043/5219-ms>
- Marin (2019). *Onderzoek marginale schepen op het Noordzeekanaal*. Rapport nr. 31224-1-MO-rev 0.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007). *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen*.
- NB NEN-EN 1992-1-1 (2020). *Nationale bijlage bij NEN-EN 1992-1-1+C2 Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*.
- NEN 8700 (2015). *Grondslagen voor de constructieve beoordeling van bestaande bouw en het constructief ontwerp ten behoeve van verbouw*.
- NEN-EN 1992-1-1+C2 (2004). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*.
- Port of Amsterdam (2017, 7 juni). *Beleidsregels passage marginale schepen door de Noordersluis IJmuiden en het Noordzeekanaal*. Opgehaald van <https://www.portofamsterdam.com/nl/aankondiging/beleidsregels-passage-marginale-schepen-door-de-noordersluis-ijmuiden-en-het>
- Port of Amsterdam (2019). *Jaarrapportage 2019, Publieke Taken, Divisie Havenmeester*.
- Port of Amsterdam (2020, 30 juli). *Vaststelling maximum vaarsnelheid Noordzeekanaal en het Afgesloten IJ tot aan het Stenen Hoofd in Amsterdam*. Opgehaald van <https://www.portofamsterdam.com/nl/aankondiging/vaststelling-maximum-vaarsnelheid-noordzeekanaal-en-het-afgesloten-ij-tot-aan-het>
- ProRail (1953). *Spoorwegtunnel, Wapening moten II en IV*.
- Rijkswaterstaat (1952). *Wapening autotunnel, Moot 1, Dak en Vloer*. Rijkswaterstaat Directie Sluizen en Stuwen, Tunnels te Velsen, 02-12-1952, Utrecht.
- Rijkswaterstaat (1957). *De Velsertunnels*. Utrecht: N.V. De Technische Uitgeverij H. Stam, te Haarlem, in samenwerking met Het Nederlandse Instituut van Middelbare en Hogere Technici.

- Rijkswaterstaat (1958). *Tunnels te Velzen, Auto- en spoortunnel, Diepteligging bovenkant dak*. Rijkswaterstaat Directie Sluizen en Stuwen, T-3514, Utrecht.
- Rijkswaterstaat (2000). *Ontwerp van schutsluizen - Deel 2*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht.
- Rijkswaterstaat (2013). *Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken - RBK 1.1*. Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand kunstwerk bij verbouw, gebruik en afkeur. RTD 1006:2013.
- Rijkswaterstaat (2017). *Richtlijn Ontwerp Kunstwerken - ROK 1.4*. RTD 1001:2017.
- Rijkswaterstaat WNN (2017). *Memo Velserspoortunnel; Onderzoek naar (be)dekking en diepte ligging ter hoogte van de vaar-bak/geul*. Rijkswaterstaat West-Nederland Noord, IJmuiden, 8 mei 2017.
- Saveur, J. (1997). Chapter 6 Hazard Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(2), 135–144. doi:[https://doi.org/10.1016/s0886-7798\(97\)90018-3](https://doi.org/10.1016/s0886-7798(97)90018-3)
- Schiereck, G. J., & Verhagen, H. J. (2016). *Introduction to Bed, bank and shore protection - Engineering the interface of soil and water*. Delft: Delft Academic Press / VSSD.
- Şerban, S. P., Katona, C., & Panaitescu, V. N. (2015). *The analysis of squat and underkeel clearance for different ship types in a trapezoidal crosssection channel*. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 77, Iss. 3, 2015. ISSN 1454-2358.
- Spijkers, J. M.-J., Vrouwenvelder, A. W.-C.-M., & Klaver, E. C. (2005). *Structural Dynamics CT 4140, Part 1 - Structural Vibrations*. Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- TenCate Geosynthetics (2020). *Beschermingsdijken*. Opgeroepen op mei 30, 2020, van Tencate Geosynthetics EMEA: <https://www.tencategeo.eu/nl/oplossingen/overview/1611/Beschermingsdijken>
- TNO (1995). *VALANK – Literatuurstudie vallend anker op tunneldak*. TNO Bouw, Centrum voor Mechanische Constructies. TNO-rapport: 95-WEC-R0845. Rijswijk.
- TNO (2009). *Vallend anker op de Kiltunnel*. TNO Bouw en Ondergrond. Project Kiltunnel Valank. TNO-rapport: TNO-034-DTM-2009-01332. Delft.
- van Lagen, G. (2016). *Immersed tunnels subjected to a sunken ship load*. Master thesis, Royal HaskoningDHV, Delft University of Technology.
- Van Oord (2018). *Technische Notitie: Bestorting Zinkerleiding - Verdieping Oostelijke Vaargeul Botlekbrug*. Documentnummer: 18.4985-TN-COA-001.
- Verruijt, A. (2010). *Grondmechanica*. Technische Universiteit Delft.
- Vrijling, J. K., & Bezuyen, K. G. (1998). *Waterbouwkundige Kunstwerken Bijzondere Onderwerpen*. Collegedictaat Ctw5305.
- Wens, F., Meyvis, L., van Eerdenbrugh, C., De Saint Aubain, G., Pauwels, W., & Elskens, F. (1992). *Liefkenshoektunnel: Protection of the tunnel against damage caused by ship anchors by means of asphalt mattresses*. IOth International Harbour Congress, Antwerpen, België.

- Wolsink, G. M. (2004). *Nut en noodzaak van bescherming van tunnels tegen vallende scheepsankers*. Memo Rijkswaterstaat.
- Wolsink, G. M. (2005). *Afdekking op tunnels in Noordzeekanaal i.v.m. vallende scheepsankers*. Memo Rijkswaterstaat.
- Wolsink, G. M. (2008). *Onderzoek naar de haalbaarheid van de vaargeulverdieping Dordtsche Kil t.p.v. Kiltunnel; in relatie tot het risico van vallende scheepsankers*. Memo Rijkswaterstaat.
- Zhu, X., Hao, Q., & Zhang, J. (2019). Buried Depth of a Submarine Pipeline Based on Anchor Penetration. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8), 257.
doi:<https://doi.org/10.3390/jmse7080257>

Figurenlijst

<i>Figuur 2-1: Overzicht Noordzeekanaal met de bijbehorende tunnels (Google Maps (2020), bewerkt met Visio)</i>	12
<i>Figuur 2-2: Schematische weergave afmetingen Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels (bodem op NGD).....</i>	13
<i>Figuur 2-3: Minimumwaarden voor de betrouwbaarheidsindex bij minimumreferentieperiode (UGT) (NEN 8700, 2015).....</i>	17
<i>Figuur 2-4: Veiligheidsniveaus kunstwerken volgens de RBK 1.1 (Rijkswaterstaat, 2013).....</i>	18
<i>Figuur 3-1: Bezwijkmechanismen pons (links) en buiging (rechts) door een vallend scheepsanker (schematisch weergegeven).....</i>	20
<i>Figuur 3-2: Slepnd scheepsanker op bescherming van zinker (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007).....</i>	21
<i>Figuur 3-3: Schematische weergave van een horizontaal zinkend schip (boven) en een zinkend schip onder een hoek (onder).....</i>	22
<i>Figuur 3-4: Schematische weergave van een aanvarend schip loodrecht op de tunnel met respectievelijk de tunnel gelegen boven de kanaalbodem (boven) en onder de kanaalbodem (onder).....</i>	24
<i>Figuur 4-1: Bezwijkmechanismen van pons (boven) en buiging (onder) bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.....</i>	28
<i>Figuur 4-2: Afmetingen Velsertunnels op de rand van de vaarweg omtrent de calamiteit van een slepend scheepsanker.....</i>	31
<i>Figuur 4-3: Schematische weergave van de calamiteit van een slepend scheepsanker op de Velsertunnels</i>	31
<i>Figuur 4-4: Afmetingen consoles bij het tunneldak van de Velserautotunnel.....</i>	34
<i>Figuur 4-5: Schematische weergave van een aanvarend schip op de Velsertunnels (loodrecht op de tunnels) ...</i>	34
<i>Figuur 4-6: Schematische weergave Noordzeekanaal met het maatgevende schip ter plaatse van de Velserspoortunnel</i>	35
<i>Figuur 5-1: Schematisch overzicht van de situatie van een vallend scheepsanker op het tunneldak (doorsnede kanaal)</i>	37
<i>Figuur 5-2: Bezwijkmechanismen van pons (boven) en buiging (onder) bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.....</i>	38
<i>Figuur 5-3: Relatie tussen tunneldekking en de faalkans door de calamiteit van een vallend scheepsanker voor de Velsertunnels.....</i>	40
<i>Figuur 5-4: Relatie tussen tunneldekking en de faalkans door de calamiteit van een vallend scheepsanker voor de Velsertunnels (met de huidige tunneldekking op respectievelijk de rand van de vaarweg en de kanaal-as) ..</i>	40
<i>Figuur 6-1: Schematische weergave Noordzeekanaal met het toekomstige scheepstype WOZMAX in het geval van een versmalde vaarweg (boven) en de huidige vaarweg (beneden) ter plaatse van de Velsertunnels.....</i>	46
<i>Figuur 6-2: Beschermingsconstructie op de tunnel van de HSL onder de Dordtsche Kil (TNO, 2009)</i>	48
<i>Figuur 6-3: Vrijdragende beschermingsconstructie van stalen buizen afgedekt door beton (TNO, 2009).....</i>	48
<i>Figuur 6-4: Principe van een sandwichconstructie (TNO, 2009).....</i>	48
<i>Figuur 6-5: Honingraatconstructie (a) en damwanden (b) als kreukelzone (TNO, 2009).....</i>	49
<i>Figuur 6-6: Schematische weergave concept bescherming autotunnel (TNO, 2009).....</i>	50
<i>Figuur 6-7: Oplegging van de constructie (a), oplegging van de geteste constructie (b), uitgeknikte oplegging van de geteste constructie (c) (Delhomme et al., 2005).....</i>	50
<i>Figuur 6-8: Voorbeeld toepassing Geotube: Beschermingsdijk (TenCate Geosynthetics, 2020)</i>	50
<i>Figuur 7-1: Geschematiseerde huidige situatie van het Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels op de kanaal-as.....</i>	53
<i>Figuur 7-2: Geschematiseerde huidige situatie van het Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels op de huidige rand van de vaarweg (vaarweg 102 m breed)</i>	53
<i>Figuur 7-3: Variant 1 – Vrijdragende beschermingsconstructie (afmetingen doorsnede zijn orde-grootte)</i>	55
<i>Figuur 7-4: Variant 2 – Bescherming van grind/stortsteen met colloïdaal beton</i>	55
<i>Figuur 7-5: Variant 3 – Combinatie beschermlagen van asfalt en beton.....</i>	56
<i>Figuur 8-1: Ontwerp vrijdragende beschermingsconstructie (doorsnede).....</i>	59
<i>Figuur 8-2: Overzicht 3D ontwerp prefab element vrijdragende beschermingsconstructie.....</i>	60
<i>Figuur 8-3: Detail 3D ontwerp prefab element vrijdragende beschermingsconstructie</i>	60

<i>Figuur A-1: Fasen bij de bouw van de Velsertunnels (Rijkswaterstaat, 1957)</i>	83
<i>Figuur A-2: Het schiereiland aan de zuidoever met links de zuidelijke bouwput, in het midden de bouwkuip met aan de rechterkant de eerste kistdam (Rijkswaterstaat, 1957)</i>	83
<i>Figuur A-3: Het storten van de brugplaat over de tunnels in de zuidelijke bouwput, als fundering voor de kistdam van de noordelijke put (Rijkswaterstaat, 1957)</i>	84
<i>Figuur A-4: Diepteligging bovenkant dak auto- en spoortunnel te Velzen (Rijkswaterstaat, 1958)</i>	84
<i>Figuur A-5: Dwarsdoorsnede van de Velserspoortunnel (Camerik, 1999)</i>	85
<i>Figuur A-6: Lengtedoorsnede van de Velserspoortunnel (Camerik, 1999)</i>	85
<i>Figuur A-7: Dwarsdoorsnede van de Velserautotunnel (Camerik, 1999)</i>	85
<i>Figuur A-8: Lengtedoorsnede van de Velserautotunnel (Camerik, 1999)</i>	85
<i>Figuur A-9: Schematische weergave tunneldekking Velserspoortunnel op kanaal-as t.o.v. NGD (Python)</i>	86
<i>Figuur A-10: Schematische weergave tunneldekking Velserspoortunnel op rand kanaal t.o.v. NGD (Python)</i>	86
<i>Figuur A-11: Schematische weergave tunneldekking Velserautotunnel op kanaal-as t.o.v. NGD (Python)</i>	86
<i>Figuur A-12: Schematische weergave tunneldekking Velserautotunnel op rand kanaal t.o.v. NGD (Python)</i>	87
<i>Figuur A-13: Wapeningstekening doorsnede Velserspoortunnel (ProRail, 1953)</i>	87
<i>Figuur A-14: Wapeningstekening doorsnede Velserautotunnel (Rijkswaterstaat, 1952)</i>	88
<i>Figuur B-1: Diagram van Schijf (Bezuyen et al., 2012)</i>	89
<i>Figuur D-1: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 0.5 m (Hemelop, 2000)</i>	98
<i>Figuur D-2: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 1.0 m (Hemelop, 2000)</i>	98
<i>Figuur D-3: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 1.5 m (Hemelop, 2000)</i>	99
<i>Figuur D-4: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 2.0 m (Hemelop, 2000)</i>	99
<i>Figuur E-1: Waarde ‘Dynamic Load Factor’ (DLF) afhankelijk van T_d/T_e (Saveur, 1997)</i>	100
<i>Figuur F-1: Verband tussen vloeilengte [mm] en ankermassa [kg] voor de afgelezen data punten van ankertype Bruce MK4 uit (Gibson & Williams-Crew, 2020)</i>	103
<i>Figuur F-2: Verband tussen het tonnage van schepen, het ankergewicht en de penetratiediepte (Kuik, 1986)</i> .	104
<i>Figuur H-1: Histogram ankermassa’s scheepvaart boven de Velsertunnels (Python)</i>	108
<i>Figuur H-2: Jaarlijkse overschrijdingskansen ankermassa’s scheepvaart boven de Velsertunnels (Python)</i>	108
<i>Figuur H-3: Overschrijdingskans ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserspoortunnel (Python)</i>	109
<i>Figuur H-4: Overschrijdingskans ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserautotunnel (Python)</i>	109
<i>Figuur H-5: Maatgevende ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserspoortunnel (Python)</i> .110	
<i>Figuur H-6: Maatgevende ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserautotunnel (Python)</i> .	110
<i>Figuur I-1: Histogram draagvermogen (DWT) van de scheepvaart boven de Velsertunnels in ton (Python)</i>	113
<i>Figuur I-2: Jaarlijkse overschrijdingskansen draagvermogen scheepvaart boven de Velsertunnels (Python)</i>	113
<i>Figuur I-3: Overschrijdingskans draagvermogen bij calamiteit zinkend schip bij Velserspoortunnel (Python)</i> ...	114
<i>Figuur I-4: Overschrijdingskans draagvermogen bij calamiteit zinkend schip bij Velserautotunnel (Python)</i>	114
<i>Figuur I-5: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserspoortunnel (Python)</i>	115
<i>Figuur I-6: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserautotunnel (Python)</i>	115
<i>Figuur I-7: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserspoortunnel wanneer het scheepstype tanker niet wordt meegenomen (Python)</i>	117
<i>Figuur I-8: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserautotunnel wanneer het scheepstype tanker niet wordt meegenomen (Python)</i>	117
<i>Figuur J-1: Overzicht belastingen op de Velserspoortunnel (normale situatie)</i>	118
<i>Figuur J-2: Geometrie Velserspoortunnel in MatrixFrame</i>	119
<i>Figuur J-3: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel in de normale situatie (MatrixFrame)</i>	119
<i>Figuur J-4: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel in de normale situatie (MatrixFrame)</i>	120
<i>Figuur J-5: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel in de normale situatie (MatrixFrame)</i>	120
<i>Figuur J-6: Statisch equivalente belasting van 360 kN aangebracht op de Velserspoortunnel voor 1m lengte (MatrixFrame)</i>	121
<i>Figuur J-7: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij de statische equivalente belasting van 360 kN (MatrixFrame)</i>	121

<i>Figuur J-8: Statisch equivalente belasting van 810 kN aangebracht op de Velserspoortunnel voor 1m lengte (MatrixFrame)</i>	121
<i>Figuur J-9: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij de statische equivalente belasting van 810 kN (MatrixFrame)</i>	121
<i>Figuur J-10: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame)</i>	122
<i>Figuur J-11: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame)</i>	122
<i>Figuur J-12: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame)</i>	122
<i>Figuur J-13: Belasting aanvarend schip op de Velserspoortunnel van 207 kN verdeeld over het tunneldak (MatrixFrame)</i>	123
<i>Figuur J-14: Aangenomen zijwaartse gronddrukken door de optredende calamiteitsbelasting (MatrixFrame)</i> ..	123
<i>Figuur J-15: Optredende resulterende gronddrukken bij de optredende calamiteitsbelasting (MatrixFrame)</i> ..	123
<i>Figuur J-16: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteitsbelasting aanvarend schip (MatrixFrame)</i>	124
<i>Figuur J-17: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteitsbelasting aanvarend schip (MatrixFrame)</i>	124
<i>Figuur J-18: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteitsbelasting aanvarend schip (MatrixFrame)</i>	124
<i>Figuur J-19: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame)</i>	125
<i>Figuur J-20: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame)</i>	125
<i>Figuur J-21: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame)</i>	125
<i>Figuur K-1: Overzicht belastingen op de Velserautotunnel (normale situatie)</i>	126
<i>Figuur K-2: Geometrie Velserautotunnel in MatrixFrame</i>	127
<i>Figuur K-3: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel in de normale situatie (MatrixFrame)</i>	128
<i>Figuur K-4: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel in de normale situatie (MatrixFrame)</i>	128
<i>Figuur K-5: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel in de normale situatie (MatrixFrame)</i>	128
<i>Figuur K-6: Statisch equivalente belasting van 360 kN aangebracht op de Velserautotunnel voor 1m lengte (MatrixFrame)</i>	129
<i>Figuur K-7: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij de statische equivalente belasting van 360 kN (MatrixFrame)</i>	129
<i>Figuur K-8: Statisch equivalente belasting van 810 kN aangebracht op de Velserautotunnel voor 1m lengte (MatrixFrame)</i>	129
<i>Figuur K-9: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij de statische equivalente belasting van 810 kN (MatrixFrame)</i>	129
<i>Figuur K-10: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame)</i>	130
<i>Figuur K-11: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame)</i>	130
<i>Figuur K-12: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame)</i>	130
<i>Figuur K-13: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame)</i>	131
<i>Figuur K-14: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame)</i>	131
<i>Figuur K-15: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame)</i>	131
<i>Figuur L-1: Bi-lineair spanning-rek-relatie beton (NEN-EN 1992-1-1)</i>	132
<i>Figuur L-2: Geschematiseerde spannings-rek-relatie betonstaal (NEN-EN 1992-1-1)</i>	133
<i>Figuur L-3: Bepaling momentcapaciteit voor doorsnede onder combinatie van buiging en normaalkracht (in de figuur is de situatie van de rekenwaarde weergegeven)</i>	133
<i>Figuur L-4: Overzicht doorsnedes voor de bepaling van de momentcapaciteit</i>	134
<i>Figuur L-5: Overzicht doorsnedes voor de bepaling van de dwarskrachtcapaciteit</i>	135
<i>Figuur L-6: Overzicht doorsnedes voor de bepaling van de ponscapaciteit</i>	138
<i>Figuur M-1: Afgeleide energieabsorptie vallend scheepsanker door tunneldekking per meter penetratiediepte (Python)</i>	141
<i>Figuur M-2: Afgeleide verband voor de parameter a van de lineaire functie (Python)</i>	141

<i>Figuur M-3: Afgeleide verband voor de parameter b van de lineaire functie (Python).....</i>	<i>141</i>
<i>Figuur M-4: Afgeleide energieabsorptie tunneldekking per penetratiediepte voor verschillende ankermassa's (Python).....</i>	<i>142</i>
<i>Figuur N-1: Draagvermogen van passerende scheepvaart ter plaatse van de Velsertunnels (Python)</i>	<i>143</i>
<i>Figuur N-2: Totale kracht van een horizontaal zinkend schip op de Velsertunnels (Python)</i>	<i>143</i>
<i>Figuur N-3: Belasting van een horizontaal zinkend schip op de Velsertunnels (Python).....</i>	<i>143</i>
<i>Figuur N-4: Totale kracht van een schip zinkend onder een hoek op de Velsertunnels (Python)</i>	<i>144</i>
<i>Figuur N-5: Belasting door een zinkend schip onder een hoek op de Velserautotunnel (Python)</i>	<i>144</i>
<i>Figuur N-6: Belasting door een zinkend schip onder een hoek op de Velserspoortunnel (Python)</i>	<i>144</i>

Tabellenlijst

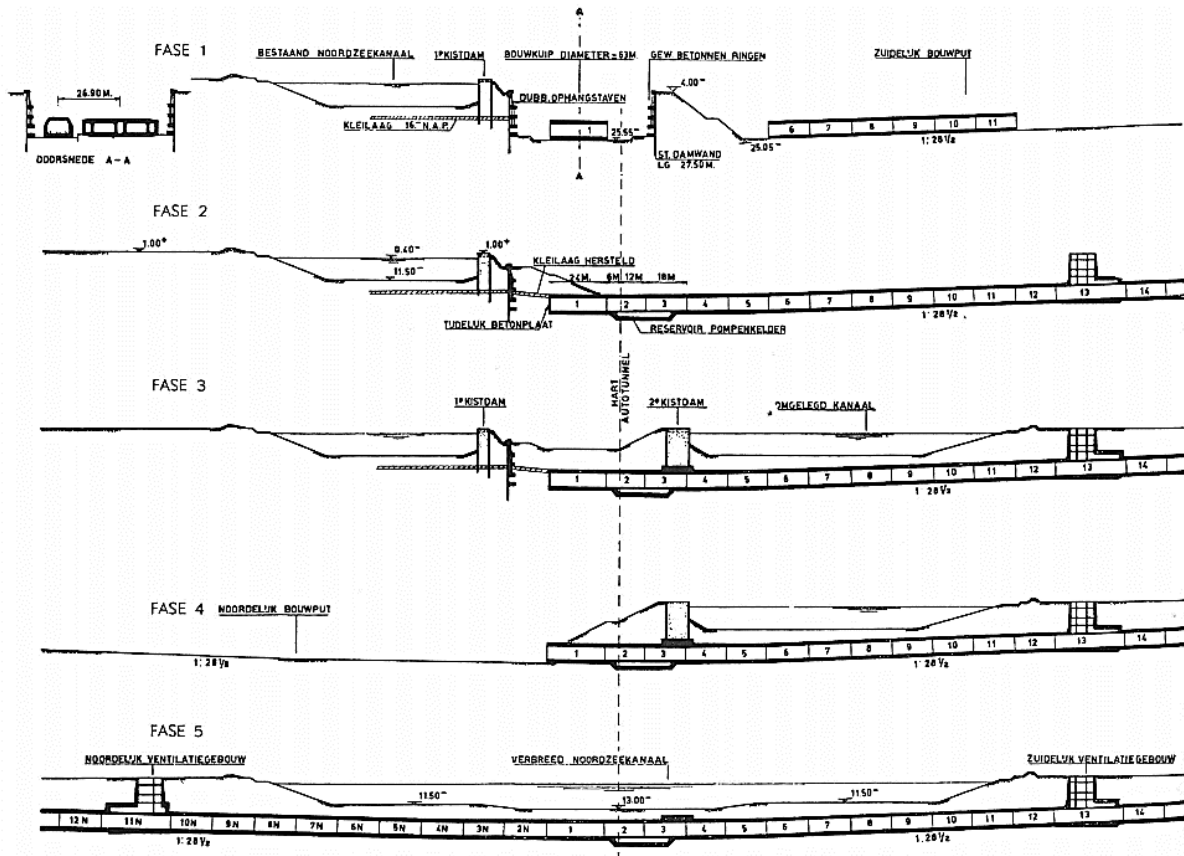
Tabel 2-1: Maximaal toegestane snelheid van schepen op het NZK bij de Velsertunnels (Port of Amsterdam, 2020).	13
Tabel 2-2: Gegevens met betrekking tot de positie van de Velsertunnels (Camerik, 1999).	14
Tabel 4-1: Dwarsoppervlak en eindsnelheid voor de ankermassa's 1200 en 2500 kg.	25
Tabel 4-2: Bepaling dynamische en statisch equivalente kracht voor de situatie zonder tunneldekking (hierdoor is er geen verschil tussen de Velserspoortunnel en de Velserautotunnel).	26
Tabel 4-3: Overzicht tunneldekking Velsertunnels (zie Appendices A.4 en A.5).	26
Tabel 4-4: Bepaling dynamische en statisch equivalente kracht voor de situatie met tunneldekking (zonder raken van het tunneldak door het vallende scheepsanker, waardoor er geen verschil is tussen de Velsertunnels).	27
Tabel 4-5: Afgeleide waardes dynamische en statisch equivalente kracht met ontwerpgrafieken VALANK (Hemelop, 2000).	27
Tabel 4-6: Bepaling statisch equivalente kracht Velserspoortunnel voor de situatie met tunneldekking (bij het raken van tunneldak door de tunneldekking heen).	27
Tabel 4-7: Beoordeling ponscapaciteit tunneldak Velsertunnels bij de maatgevende ankers (situatie zonder tunneldekking).	29
Tabel 4-8: Beoordeling ponscapaciteit tunneldak Velsertunnels bij de maatgevende ankers voor de situatie met tunneldekking. De waardes tussen haakjes voor de spoortunnel betreffen het raken van het tunneldak door de dekking heen.	29
Tabel 4-9: Beoordeling momentcapaciteit tunneldak Velsertunnels bij de maatgevende ankers (situatie met tunneldekking).	30
Tabel 4-10: Overzicht bepaling calamiteitsbelasting zinkend schip op de Velsertunnels aan de hand van Appendix G.	32
Tabel 4-11: Overzicht resulterende calamiteitsbelasting van een zinkend schip op de Velsertunnels.	33
Tabel 4-12: Beoordeling moment- en dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels bij de calamiteit van een zinkend schip.	33
Tabel 4-13: Bepaling calamiteitsbelasting van een aanvarend schip op de Velserspoortunnel.	36
Tabel 5-1: Voorwaardelijke faalkansen vallend scheepsanker Velserspoortunnel (Python).	39
Tabel 5-2: Voorwaardelijke faalkansen vallend scheepsanker Velserautotunnel (Python).	39
Tabel 5-3: Overzicht faalkansen Velsertunnels door de calamiteit van een vallend scheepsanker.	39
Tabel 5-4: Voorwaardelijke faalkansen zinkend schip Velserspoortunnel (Python).	42
Tabel 5-5: Voorwaardelijke faalkansen zinkend schip Velserautotunnel (Python).	43
Tabel 5-6: Overzicht faalkansen Velsertunnels door de calamiteit van een zinkend schip.	43
Tabel 5-7: Overzicht faalkansen Velsertunnels voor de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip.	44
Tabel 6-1: Multicriteria-analyse constructieve oplossingen tunnelbescherming	52
Tabel 8-1: Parameters van de vrijdragende beschermingsconstructie	60
Tabel 8-2: Optredende statisch equivalente krachten op de beschermingsconstructie door een vallend scheepsanker	61
Tabel 8-3: Controle beschermingsconstructie op buiging bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.	62
Tabel 8-4: Overzicht bepaling calamiteitsbelasting zinkend schip op de beschermingsconstructie met Appendix G.	62
Tabel 8-5: Overzicht resulterende calamiteitsbelasting van een zinkend schip op de beschermingsconstructie.	63
Tabel 8-6: Bepaalde bodemsnelheden door retourstroom en schroefwerking van het huidige maatgevende schip.	64
Tabel 10-1: Overzicht faalkansen Velsertunnels door de calamiteiten van een vallend scheepsanker en zinkend schip.	70

Tabel B-1: Passeerafstanden scheepvaart bij de Velsertunnels afgeleid van gegevens van het onderzoek van Marin (2019).	91
Tabel B-2: De vijf scheepstypen volgens Marin (2019).	91
Tabel C-1: Overzicht risico's voor de Velsertunnels door scheepvaart calamiteiten op het Noordzeekanaal	92
Tabel C-2: Aangenomen verdeling van de overschrijding van de maximumsnelheid door scheepvaart op het Noordzeekanaal.	95
Tabel F-1: Vergelijk penetratiedieptes tussen vergelijking (F-2) en ontwerpgrafieken van project VALANK (Hemelop, 2000).	102
Tabel F-2: Factor bodemtype voor penetratiediepte (Gibson & Williams-Crew, 2020).	102
Tabel F-3: Vergelijk penetratiedieptes tussen vergelijking (F-3) en de bovengrens van de figuur van Kuik (Kuik, 1986).	103
Tabel H-1: Overzicht kansen van optreden bij de calamiteit van een vallend anker boven de Noordzeekanaal tunnels.	106
Tabel H-2: Overzicht maatgevende ankermassa's voor de twee toelaatbare overschrijdingskansen.	111
Tabel H-3: Overzicht maatgevende ankermassa's bij de toelaatbare overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar bij zowel de kans van optreden als een tweemaal zo grote kans van optreden.	111
Tabel I-1: Overzicht kansen van optreden bij de calamiteit van een zinkend schip boven de Noordzeekanaal tunnels.	112
Tabel I-2: Overzicht maatgevende schepen bij een overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar.	116
Tabel I-3: Overzicht maatgevende schepen bij een overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar (zonder het scheepstype 'tanker' mee te nemen in de berekening).	116
Tabel J-1: Overzicht belastingen op de Velserspoortunnel (normale situatie).	119
Tabel K-1: Overzicht belastingen op de Velserautotunnel (normale situatie).	127
Tabel L-1: Eigenschappen betonsterkteklasse C35/45 (NEN-EN 1992-1-1).	132
Tabel L-2: Aangenomen eigenschappen glad betonstaal Velsertunnels (Rijkswaterstaat, 2013).	132
Tabel L-3: Gegevens langswapening veldmoment in de dwarsrichting van het tunneldak en de vloer van de Velsertunnels uit tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953), zie Appendices A.6 en A.7.	134
Tabel L-4: Gegevens langswapening steunpuntmoment in de dwarsrichting van het tunneldak en de vloer van de Velsertunnels uit tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953), zie Appendices A.6 en A.7.	134
Tabel L-5: Bepaling momentcapaciteit Velsertunnels voor het tunneldak en de tunnelvloer.	135
Tabel L-6: Bepaling dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels voor het tunneldak en de tunnelvloer (geen dwarskrachtwapening).	136
Tabel L-7: Bepaling dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels voor het tunneldak en de tunnelvloer (met de schuin lopende langswapening in rekening gebracht als dwarskrachtwapening).	137
Tabel L-8: Gegevens wapening tunneldak van de Velsertunnels uit tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953).	138
Tabel L-9: Resultaten dwarskrachtweerstand voor de tunneldaken van de Velsertunnels onder pons.	139
Tabel M-1: Bepaling energieabsorptie door tunneldekking met de VALANK grafiek van 1.5m gronddekking (Figuur D-3).	140

Appendix A Velsertunnels

A.1. Bouw van de Velsertunnels

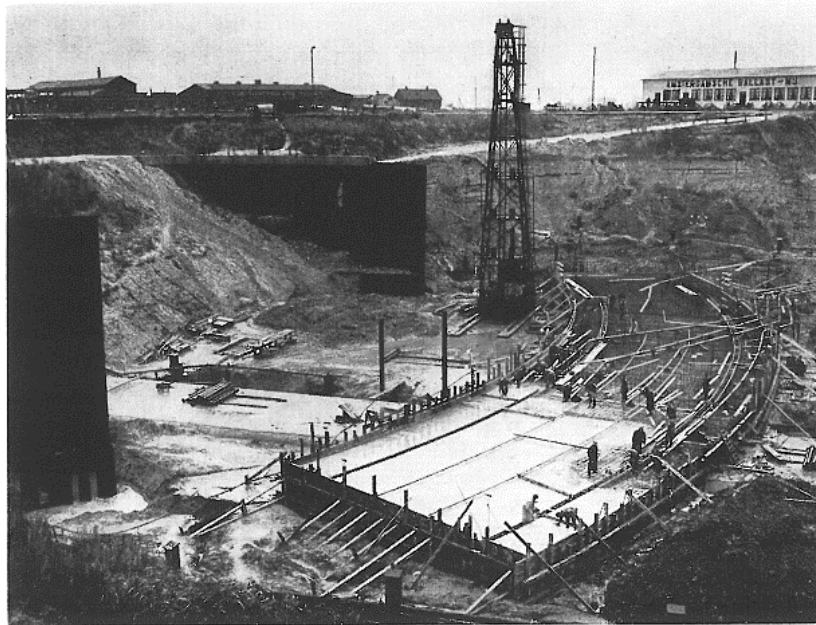
Figuur A-1 geeft een schematische overzicht van de bouwfasen bij de Velsertunnels (Rijkswaterstaat, 1957). In Figuur A-2 is de bouwkuip met zuidelijke bouwput goed zichtbaar (Rijkswaterstaat, 1957). Hierbij zijn zowel de bouwkuip van voor de oorlog als de grotere naoorlogse bouwkuip goed zichtbaar. Figuur A-3 en Figuur A-4 geven de brugplaat weer, die als fundering diende voor de kistdam van de noordelijke bouwput (Rijkswaterstaat, 1957).



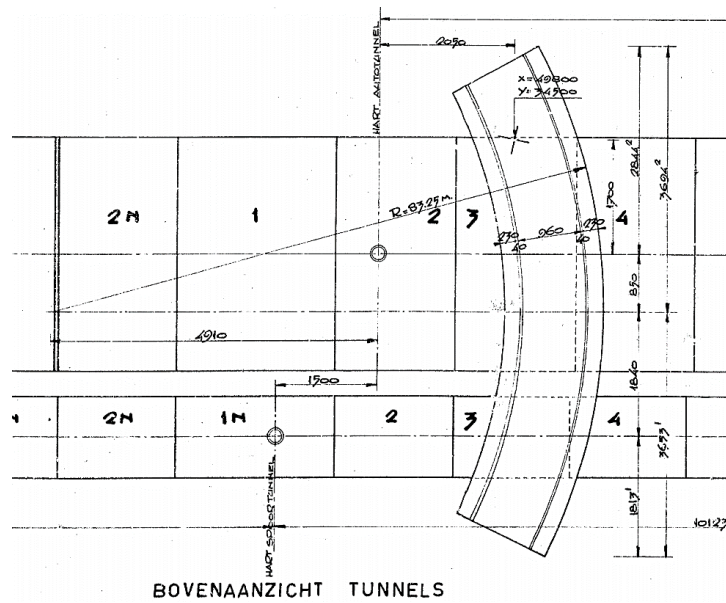
Figuur A-1: Fasen bij de bouw van de Velsertunnels (Rijkswaterstaat, 1957).



Figuur A-2: Het schiereiland aan de zuidoever met links de zuidelijke bouwput, in het midden de bouwkuip met aan de rechterkant de eerste kistdam (Rijkswaterstaat, 1957).



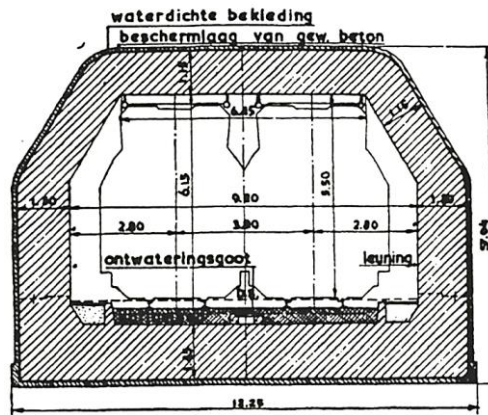
Figuur A-3: Het storten van de brugplaat over de tunnels in de zuidelijke bouwput, als fundering voor de kistdam van de noordelijke put (Rijkswaterstaat, 1957).



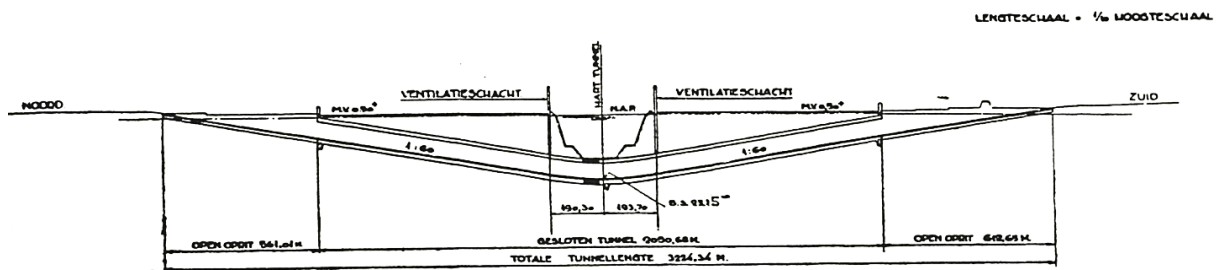
Figuur A-4: Diepteligging bovenkant dak auto- en spoortunnel te Velzen (Rijkswaterstaat, 1958).

A.2. Dwars- en lengtedoorsnedes Velserspoortunnel

Figuur A-5 en Figuur A-6 tonen respectievelijk de dwarsdoorsnede en lengtedoorsnede van de Velserspoortunnel (Camerik, 1999).



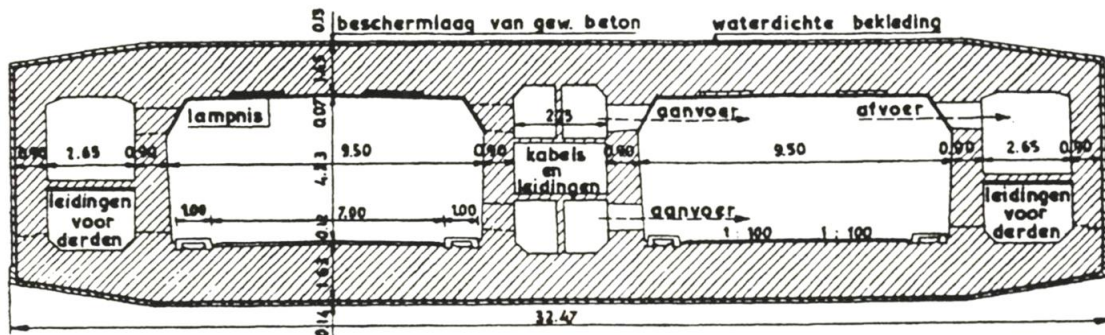
Figuur A-5: Dwarsdoorsnede van de Velserspoortunnel (Camerik, 1999).



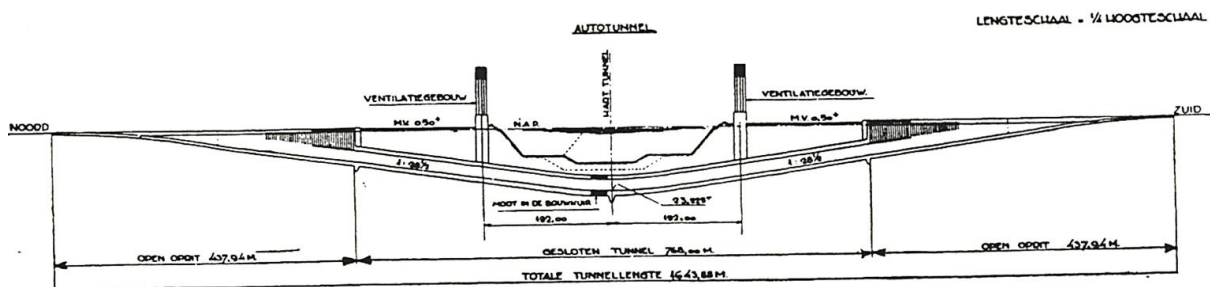
Figuur A-6: Lengtedoorsnede van de Velserspoortunnel (Camerik, 1999).

A.3. Dwars- en lengtedoorsnedes Velserautotunnel

Figuur A-7 en Figuur A-8 geven respectievelijk de dwarsdoorsnede en lengtedoorsnede van de Velserautotunnel weer (Camerik, 1999).



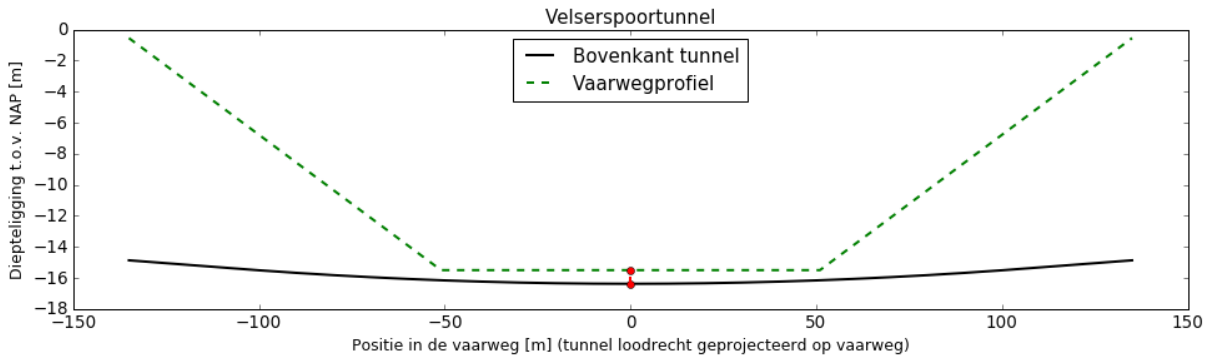
Figuur A-7: Dwarsdoorsnede van de Velserautotunnel (Camerik, 1999).



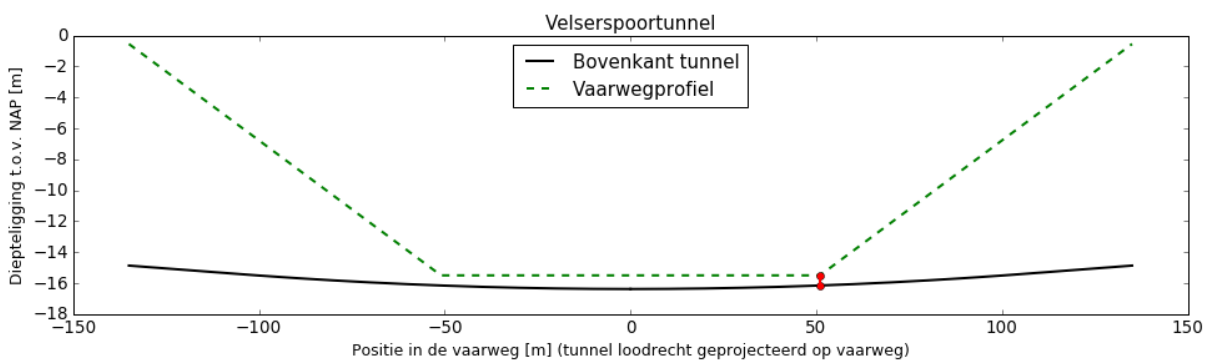
Figuur A-8: Lengtedoorsnede van de Velserautotunnel (Camerik, 1999).

A.4. Diepteligging Velserspoortunnel

Figuur A-9 en Figuur A-10 geven schematisch de tunneldekking op de Velserspoortunnel weer ten opzichte van de Nautisch Gegarandeerde Diepte (NGD) van -15.50 m NAP. Figuur A-9 toont de diepteligging van de bovenkant van de spoortunnel op de kanaal-as (= 0 m op tunnel-as) op -16.38 m NAP, wat resulteert in een tunneldekking van 0.88 m. Figuur A-10 toont de diepteligging van de bovenkant van de spoortunnel op de rand van de vaarweg (= 56.27 m op tunnel-as) op -16.15 m NAP, wat resulteert in een tunneldekking van 0.65 m.



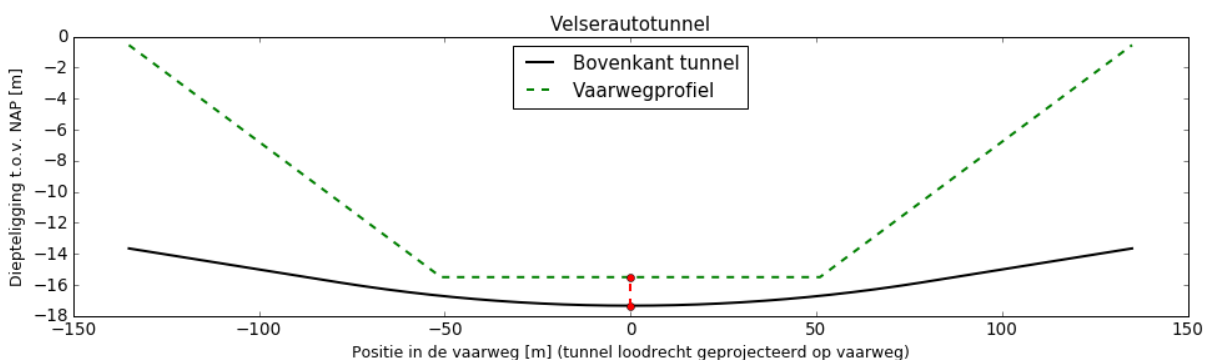
Figuur A-9: Schematische weergave tunneldekking Velserspoortunnel op kanaal-as t.o.v. NGD (Python).



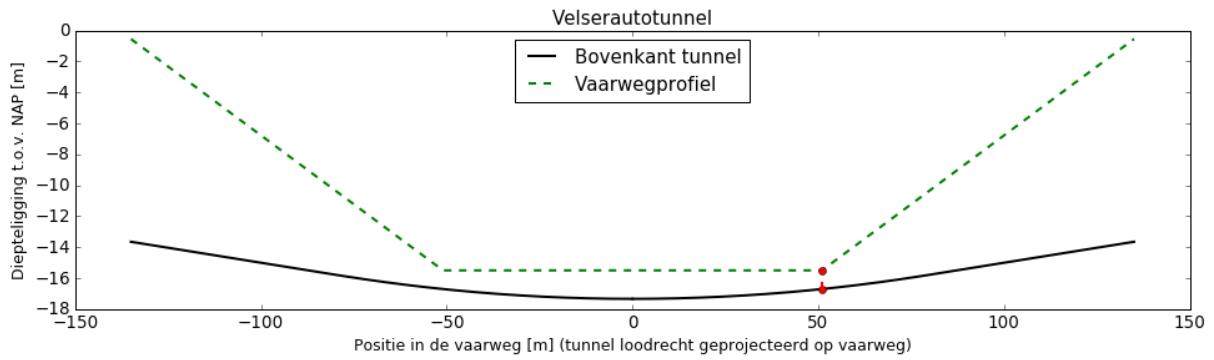
Figuur A-10: Schematische weergave tunneldekking Velserspoortunnel op rand kanaal t.o.v. NGD (Python).

A.5. Diepteligging Velserautotunnel

Figuur A-11 en Figuur A-12 geven schematisch de tunneldekking op de Velserautotunnel weer ten opzichte van de Nautisch Gegarandeerde Diepte (NGD) van -15.50 m NAP. Figuur A-11 toont de diepteligging van de bovenkant van de autotunnel op de kanaal-as (= 0 m op tunnel-as) op -17.34 m NAP, wat resulteert in een tunneldekking van 1.84 m. Figuur A-12 toont de diepteligging van de bovenkant van de autotunnel op de rand van de vaarweg (= 56.27 m op tunnel-as) op -16.71 m NAP, wat resulteert in een tunneldekking van 1.21 m.



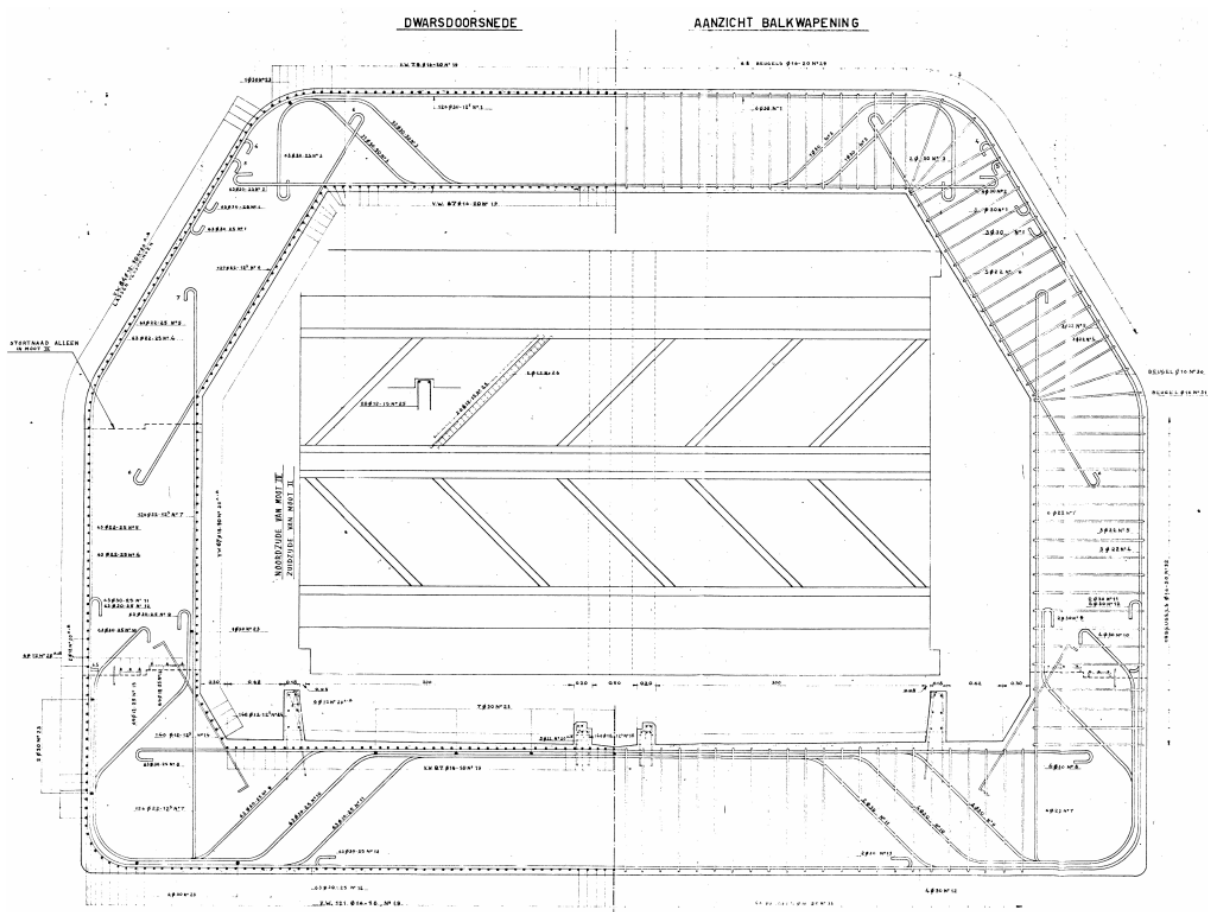
Figuur A-11: Schematische weergave tunneldekking Velserautotunnel op kanaal-as t.o.v. NGD (Python).



Figuur A-12: Schematische weergave tunneldekking Velserautotunnel op rand kanaal t.o.v. NGD (Python).

A.6. Wapeningstekening Velserspoortunnel

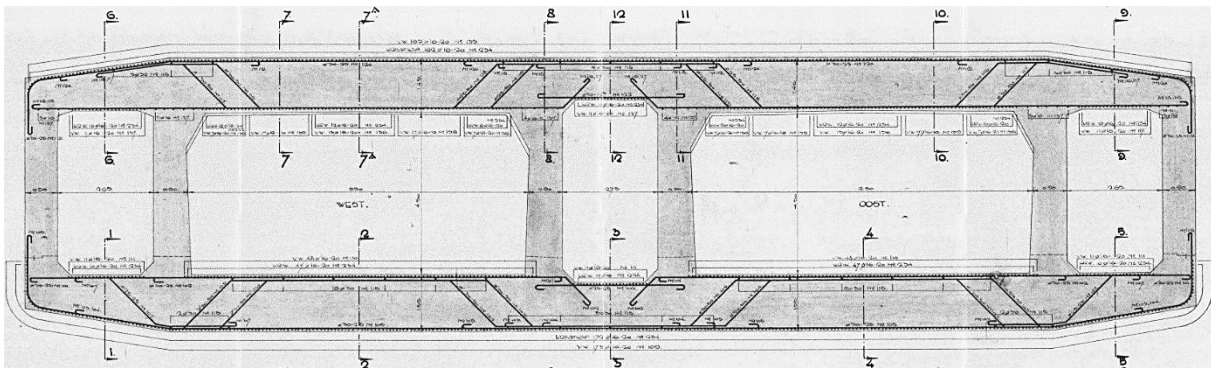
Figuur A-13 toont de wapening in de doorsnede van de Velserspoortunnel (ProRail, 1953).



Figuur A-13: Wapeningstekening doorsnede Velserspoortunnel (ProRail, 1953).

A.7. Wapeningstekening Velserautotunnel

Figuur A-14 toont de wapening in de doorsnede van de Velserautotunnel (Rijkswaterstaat, 1952).



Figuur A-14: Wapeningstekening doorsnede Velserautotunnel (Rijkswaterstaat, 1952).

Appendix B Scheepvaart

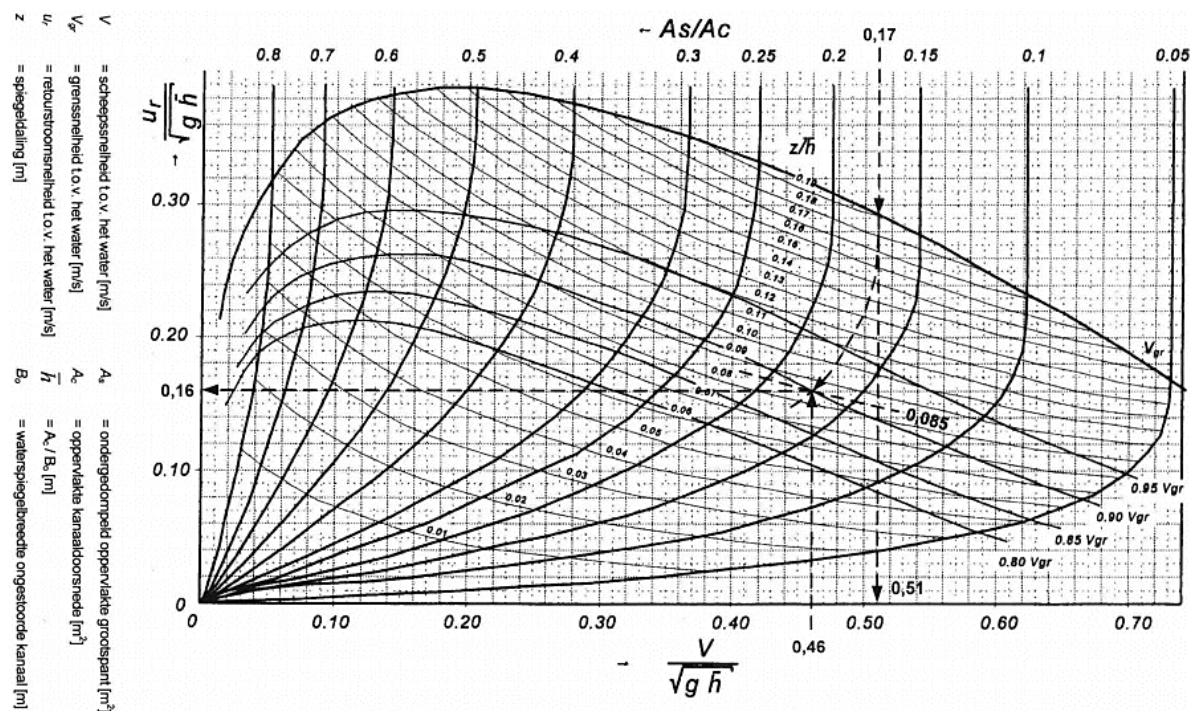
B.1. Retourstroom

Bij een voortbewegend schip stroomt het water dat door de boeg wordt verdrongen naar het achterschip om de vrijgekomen ruimte op te vullen (Bezuyen, Stive, Vaes, Vrijling, & Zitman, 2012). Hierdoor vindt er een retourstroom plaats onder het schip. Aan de hand van vergelijkingen (B-1) en (B-2) kunnen de retourstroom (u_r) en spiegeldaling (z)⁹⁰ iteratief worden bepaald (Bezuyen et al., 2012). Deze formules zijn afgeleid voor een geschematiseerde situatie waarbij een schip met een constante snelheid vaart in een prismatisch kanaal (Bezuyen et al., 2012). Het oppervlak van de doorsnede van het ondergedompelde deel van een schip (A_s) wordt bepaald door de breedte en de diepgang te vermenigvuldigen. De oppervlakte van de doorsnede van het kanaal (A_c) en de breedte van de waterspiegel van het ongestoorde kanaal (B_0) kunnen worden afgeleid uit Figuur 2-2.

$$u_r = \left(\frac{1}{1 - \frac{A_s}{A_c} - \frac{B_0 \cdot z}{A_c}} - 1 \right) \cdot v \tag{B-1}$$

$$z = \frac{(v + u_r)^2 - v^2}{2g} \tag{B-2}$$

Bovenstaande vergelijkingen resulteren in het bepalen van de wortels van een derdegraads vergelijking. In plaats hiervan kan ook het diagram van Schijf (1949) gebruikt kunnen worden (Bezuyen et al., 2012). Figuur B-1 toont het diagram van Schijf.



Figuur B-1: Diagram van Schijf (Bezuyen et al., 2012).

⁹⁰ Spiegeldaling is de verlaging van de waterspiegel door een voortbewegend schip. Squat is de daling van het schip door de spiegeldaling. Bij de geschematiseerde situatie van vergelijkingen (B-1) en (B-2) is spiegeldaling identiek aan de squat. In werkelijkheid is de squat gelijk aan de maximale spiegeldaling.

B.2. Schroefwerking

Scheepspropellers veroorzaken een straalstroom met een grotere snelheid dan de omgeven water massa. Deze straalstroom vertoont qua mechanisme enige overeenkomst met stroming uit een duiker (Schierreck & Verhagen, 2016). De hoge snelheden van de turbulente stroming kunnen ervoor zorgen dat de tunneldekking erodeert. De bodemsnelheden door schroefwerking zijn afhankelijk van het scheepsvermogen en de diameter van de schroef (Rijkswaterstaat, 2000).

Het geïnstalleerde scheepsvermogen (kW) kan worden bepaald met vergelijking (B-3), welke is afgeleid op basis van een groot aantal binnenvaartschepen (Schierreck & Verhagen, 2016). Het geïnstalleerde vermogen is in te schatten met de lengte (L), breedte (B) en diepgang (T) van het schip. De 10% overschrijdingswaarde van het gemiddeld verwachte vermogen wordt verkregen door de uitkomst van de vergelijking met 1.25 te vermenigvuldigen (Schierreck & Verhagen, 2016).

$$P = 0.66 \cdot L \cdot (2 \cdot T + B) \quad (B-3)$$

Wanneer de propeller diameter onbekend is kan deze worden geschat met vergelijking (B-4) afkomstig uit de Rock Manual (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007). Het betreft een empirische relatie die is opgesteld door WL|Delft Hydraulics.

$$D_p = 0.0133 \cdot (P \cdot 10^3)^{0.365} \quad (B-4)$$

Voor een schroef zonder straalbuis is de effectieve diameter (D_0) gelijk aan 71% van de echte schroefdiameter (Rijkswaterstaat, 2000). De stroomsnelheid achter de schroef kan worden bepaald met behulp van vergelijking (B-5) (Rijkswaterstaat, 2000). Hierbij wordt het aangewende vermogen (P_d) van een varend schip aangehouden op 30% van het geïnstalleerde vermogen (P) (Deltares, 2019).

$$u_p = 1.15 \cdot \left(\frac{P_d}{D_0^2} \right)^{1/3} \quad (B-5)$$

De maximale snelheid boven de bodem⁹¹ kan vervolgens worden bepaald met vergelijking (B-6) (Rijkswaterstaat, 2000). De verticale afstand tussen de straal-as en de bodem (d_p) wordt aangenomen gelijk te zijn aan de som van de kielspeling en halve schroefdiameter aangezien de schroef zich enkele centimeters boven de scheepsbodem bevindt (Rijkswaterstaat, 2000). Het aantal schroeven is in de vergelijking aangeven met n.

$$u_{bp} = 0.30 \cdot u_p \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{D_0}{d_p} \quad (B-6)$$

Bij een voortbewegend schip worden de straalsnelheden gecompenseerd door de snelheid van het schip (Schierreck & Verhagen, 2016). In dat geval kan een indicatie van de bodemsnelheid worden gevonden door de uitkomsten van vergelijking (B-6) te verlagen met de snelheid van het schip. Vergelijking (B-7) geeft een door RWS/DHL (1988) aanbevolen conservatieve methode voor het bepalen van de bodemsnelheid door schroefwerking. De reeds bepaalde maximale bodemsnelheid wordt in deze vergelijking gereduceerd met de helft van de snelheid van het schip (Schierreck & Verhagen, 2016).

$$u_b = u_{bp} - 0.5 \cdot v_s \quad (B-7)$$

⁹¹ In deze bodemsnelheid is nog niet het effect van turbulentie meegenomen, dat dient aan de weerstandskant bij een stabiliteitsberekening van de bodem te worden meegenomen d.m.v. een factor.

B.3. Positie scheepvaart Noordzeekanaal

Marin (2019) heeft onderzoek verricht naar de passeerafstanden van scheepvaart op het Noordzeekanaal. Tabel B-1 geeft de passeerafstanden en standaardafwijkingen weer voor de scheepvaart ter plaatse van de Velsertunnels, welke zijn afgeleid uit de resultaten van het onderzoek van Marin. Er is onderscheid gemaakt tussen vijf verschillende scheepsklassen welke weergegeven zijn in Tabel B-2 (Marin, 2019). Tevens zijn de gemiddelde passeerafstand en standaardafwijking over de scheepsklassen bepaald. De positie van het schip in de vaarweg is positief ten noorden van de kanaal-as en negatief ten zuiden van de kanaal-as.

	Coaster		Panamax		Handysize		Capesize		Cruiseschip		Gemiddeld	
	Oost	West	Oost	West	Oost	West	Oost	West	Oost	West	Oost	West
Passeerafstand t.o.v. as kanaal [m]	-25.1	20.6	-5.2	20.7	-15.2	14.4	2.5	18.4	-26.5	-13.0	-17.1	16.4
Standaardafwijking [m]	20.3	21.7	17.4	24.4	17.3	19.5	13.2	16.2	14.4	16.8	18.0	20.7
Aantal	467	459	180	180	377	376	77	82	72	72	1173	1169

Tabel B-1: Passeerafstanden scheepvaart bij de Velsertunnels afgeleid van gegevens van het onderzoek van Marin (2019).

Scheepstype	Lengte [m]	Breedte [m]
Coaster	140 – 150	21 – 24
Panamax	221 – 230	31 – 32.5
Handysize	183 – 184	32 – 33
Capesize	245 – 292	43 – 45
Cruiseschip	> 291	> 31

Tabel B-2: De vijf scheepstypen volgens Marin (2019).

B.4. Huuska/Guliev formule voor bepaling van de boegsquat

Uit het onderzoek van Marin (2019) volgt dat de Huuska/Guliev formule het beste gebruikt kan worden voor de berekening van de boegsquat. Deze formule heeft volgens Marin geen beperkingen in het toepassingsbereik van marginale scheepvaart op het Noordzeekanaal.

Met vergelijking (B-8) wordt de squat (S_d) van een voortbewegend schip in meter berekend volgens Huuska/Guliev (Marin, 2019). Hierbij wordt het Froude getal (F_{nh}) bepaald door $F_{nh} = V/\sqrt{gh}$ en de volumetrische verplaatsing van het schip (V) in m^3 wordt bepaald met $V = C_B \cdot L \cdot B \cdot T$. De lengte van het schip ter hoogte van de waterlijn in meter is weergegeven met L_{wl} . De factor K_s is afhankelijk van de blokkeerfactor (S^{92}) en er is aangehouden dat de factor $C_s = 2.0$ (Marin, 2019).

$$S_d = C_s \cdot \frac{V}{L_{wl}^2} \cdot \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} \cdot K_s \quad (B-8)$$

$$K_s = \begin{cases} 7.45 \cdot S + 0.76 & S > 0.03 \\ 1 & S \leq 0.03 \end{cases}$$

⁹² De blokkeerfactor (S) is gelijk aan de oppervlakte van de ondergedompelde doorsnede van het schip gedeeld door de oppervlakte van de doorsnede van het kanaal.

Appendix C Risicoanalyse calamiteiten scheepvaart NZK

In deze appendix wordt een risicoanalyse van de Velsertunnels gepresenteerd met betrekking tot scheepvaart calamiteiten voor de huidige situatie van het Noordzeekanaal. De risicoanalyse heeft als doel om de mogelijke risico's voor de Velsertunnels in kaart te brengen en de grootte van deze risico's enigszins te kunnen vergelijken. Allereerst zal worden ingegaan op de verschillende risico's en de bijbehorende kansen van optreden (Appendix C.1) waarna de resultaten van de risicoanalyse vervolgens worden geëvalueerd (Appendix C.2).

C.1. Overzicht risico's met kansen van optreden

Tabel C-1 geeft een overzicht van de mogelijke risico's voor de Velsertunnels in de huidige situatie. Per risico is de resulterende calamiteit en de kans van optreden weergegeven om de relevantie van de risico's inzichtelijk te maken. Opgemerkt dient te worden dat de kansen van optreden theoretisch zijn en dat in deze appendix niet op de weerstand van de tunnels wordt ingegaan waardoor er geen conclusies kunnen worden getrokken over het falen van de tunnels. Onder de tabel zijn de risico's verder toegelicht (C.1.1 t/m C.1.13).

	Risico	Resulterende calamiteit	Kans van optreden (per schip per jaar)
1	Een schip gaat voor anker boven de tunnel	Vallend scheepsanker	$3.11 \cdot 10^{-10}$ (spoortunnel) $8.24 \cdot 10^{-10}$ (autotunnel)
2	Een normaal geïnstalleerd scheepsanker gaat verloren boven de tunnel (door menselijk handelen of materieel falen)		
3	Een niet geïnstalleerd scheepsanker gaat overboord boven de tunnel		
4	Een schip gaat voor anker of een normaal geïnstalleerd anker gaat verloren vlak voordat het schip boven de tunnel vaart	Slepend scheepsanker	$2.54 \cdot 10^{-9}$
5	Een schip komt boven de tunnel tot zinken	Zinkend schip	$1.04 \cdot 10^{-8}$ (spoortunnel) $1.11 \cdot 10^{-8}$ (autotunnel)
6	Een scheepslading (container) gaat boven de tunnel overboord van het schip		$1.04 \cdot 10^{-10}$ (spoortunnel) $1.11 \cdot 10^{-10}$ (autotunnel)
7	Een schip verliest een spudpaal tijdens de vaart nabij de tunnel	Vallend / slepend scheepsanker	$3.11 \cdot 10^{-11}$ (spoortunnel) $8.24 \cdot 10^{-11}$ (autotunnel)
8	Een schip verliest een spudpaal tijdens werkzaamheden nabij de tunnel		
9	Een marginaal schip heeft een grotere diepgang dan de waterdiepte boven de tunnels (binnen de randen van de vaarweg)	Aanvarend schip	$7.64 \cdot 10^{-7}$ $7.85 \cdot 10^{-8}$
10	Een marginaal schip raakt teveel uit koers en vaart buiten de randen van de vaarweg boven de tunnels		
11	Een marginaal schip heeft een zeer kleine kielspeling waardoor de scheepsschroef dicht bij de bodem komt en hoge bodemsnelheden veroorzaakt boven de tunnel	Bodemsnelheden schroefwerking	$1.73 \cdot 10^{-2}$
12	Een marginaal schip veroorzaakt hoge bodemsnelheden door een zeer groot schroefvermogen boven de tunnel		
13	Een marginaal schip veroorzaakt hoge bodemsnelheden door retourstroom boven de tunnel	Bodemsnelheden retourstroom	$5.92 \cdot 10^{-3}$

Tabel C-1: Overzicht risico's voor de Velsertunnels door scheepvaart calamiteiten op het Noordzeekanaal

C.1.1. Een schip gaat voor anker boven de tunnel

Ter plaatse van een tunnel geldt in principe altijd een ankerverbod (TNO, 1995). Er wordt daarom aangenomen dat dit verbod ook geldt ter plaatse van de Velsertunnels. Echter is er ondanks het verbod nog steeds de mogelijkheid dat een schip ter plaatse van de tunnel voor anker gaat. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan een noodstop van een onbestuurbaar schip. Een schip welke boven de tunnel voor anker gaat kan resulteren in de calamiteit van een vallend scheepsanker. De kans van optreden wordt voor dit risico gecombineerd berekend met risico 2.

C.1.2. Een normaal geïnstalleerd scheepsanker gaat verloren boven de tunnel

Het falen van de lier, het breken van de ketting of foutieve bediening van de bemanning kan resulteren in het feit dat een normaal geïnstalleerd scheepsanker overboord gaat (TNO, 1995). Als dit gebeurt boven de tunnel kan dit resulteren in de calamiteit van een vallend scheepsanker. De calamiteit van een slepend scheepsanker wordt bij dit risico niet in beschouwing genomen aangezien een slepend scheepsanker reeds voor de tunnel door de bodem moet worden getrokken om diep in de grond te penetreren en de tunnel te kunnen raken. Appendix H.1 gaat uitgebreid in op de kansen van optreden van een vallend scheepsanker boven alle Noordzeekanaal tunnels. De kans dat een scheepsanker boven de Velsertunnels valt wordt bepaald op $P_B = 3.11 \cdot 10^{-10}$ en $P_B = 8.24 \cdot 10^{-10}$ per passerend schip per jaar voor de spoor- en autotunnel (risico's 1 en 2 tezamen).

C.1.3. Een niet geïnstalleerd scheepsanker gaat overboord boven de tunnel

Naast reeds behandelde risico's 1 en 2 zou ook een niet geïnstalleerd scheepsanker overboord kunnen gaan (TNO, 1995). Dit zou kunnen resulteren in de calamiteit van een vallend scheepsanker wanneer deze situatie zich voordoet boven de tunnel. Het scenario dat een niet geïnstalleerd scheepsanker overboord gaat, kan zich volgens TNO vrijwel alleen bij een storm op zee voordoen. Daarom wordt de kans dat een niet geïnstalleerd anker op de tunnel terecht komt verwaarloosbaar geacht in verhouding tot risico's 1 en 2.

C.1.4. Een schip verliest een normaal geïnstalleerd scheepsanker vlak voor tunnel passage

Wanneer een schip voor anker gaat of een normaal geïnstalleerd scheepsanker verloren gaat voordat het schip over de tunnel vaart kan de calamiteit van een slepend scheepsanker optreden. Het anker sleept dan door de bodem over de tunnel heen. Om de kans op dit risico te kunnen bepalen dient een aanname gemaakt te worden betreffende de gemiddelde afstand die benodigd is voor een schip om tot stilstand te komen na het uitwerpen van het anker. Saveur (1997) geeft aan dat deze afstand voor sommige schepen zelfs meer dan één kilometer kan zijn. Om de kans te kunnen berekenen wordt er een gemiddelde waarde van $x = 100$ m aangenomen voor deze afstand. Volgens dezelfde methode als in Appendix H.1 is gepresenteerd voor het vallende scheepsanker wordt nu de kans van optreden voor het slepende scheepsanker bepaald. Door in vergelijking (H-1) in plaats van de breedte van de tunnel, de afstand $x = 100$ meter in te vullen, wordt de kans van optreden van het slepende scheepsanker bepaald op $P_B = 2.54 \cdot 10^{-9}$.

C.1.5. Een schip komt tot zinken boven de tunnel

Wanneer een schip tot zinken zou komen boven de tunnel zou dit kunnen resulteren in een grote calamiteitsbelasting van een zinkend schip op de tunnel. Als deze belasting groter zou zijn dan de weerstand van de tunnel, zou dit in het slechtste geval tot falen van de tunnel kunnen leiden. Appendix I.1 gaat uitgebreid in op de kansen van optreden van een zinkend schip boven de tunnel voor alle Noordzeekanaal tunnels. De kans dat een schip tot zinken komt boven de Velsertunnels wordt bepaald op $1.04 \cdot 10^{-8}$ en $1.11 \cdot 10^{-8}$ per passerend schip per jaar voor respectievelijk de spoor- en autotunnel.

C.1.6. Een scheepslading (container) gaat boven de tunnel overboord van het schip

Als een container van een schip overboord gaat zal deze vollopen met water om vervolgens te zinken. Een vallende container dient volgens de ROK daarom te worden beschouwd als zinkend schip (Rijkswaterstaat, 2017). Er wordt aangenomen dat de kans op een vallende container tien maal kleiner⁹³ is dan de kans op een zinkend schip. Daarnaast wordt aangenomen dat de kans dat een container precies boven de tunnel tot zinken komt ook tien maal kleiner⁹⁴ is dan een zinkend schip. Dit leidt tot de kans dat het risico van een vallende container boven de tunnel optreedt gelijk aan $1.04 \cdot 10^{-10}$ en $1.11 \cdot 10^{-10}$ per passerend schip per jaar voor respectievelijk de spoor- en autotunnel.

C.1.7. Een schip verliest een spudpaal tijdens de vaart nabij de tunnel

Spudpalen worden gebruikt om werkschepen of werkplatformen te stabiliseren op de bodem (DNV GL, 2015). Tijdens de vaart van een schip zou een spudpaal door menselijk handelen of materieel falen verloren kunnen gaan, wat zou kunnen resulteren in een vallende spudpaal. Het is aannemelijk dat een vallende spudpaal enkele meters in de bodem kan dringen (DNV GL, 2015). Door de ROK worden vallende spudpalen gezien als vallende scheepsankers met het gewicht van de spudpaal (Rijkswaterstaat, 2017). Een schip die met een uitstekende spudpaal door de bodem sleept wordt beschouwd als slepend scheepsanker.

Om voor dit risico de kans van optreden te bepalen wordt conservatief aangenomen dat alle schepen spudpalen hebben en dat 20% van alle schepen 'vrije val' spudpalen hebben (DNV GL, 2015). Verder wordt aangenomen dat de kans dat een spudpaal valt een factor 2 kleiner is dan de kans dat een schip zijn anker verliest (waardoor $P_A = 1 \cdot 10^{-3}$). Door deze aannames wordt de kans op een vallende spudpaal op de tunnels tien keer zo klein als de kans van een vallend scheepsanker. Dit resulteert respectievelijk in de kansen van optreden voor de spoor- en autotunnel $P_B = 3.11 \cdot 10^{-11}$ en $P_B = 8.24 \cdot 10^{-11}$ per passerend schip per jaar.

C.1.8. Een schip verliest een spudpaal tijdens werkzaamheden nabij tunnel

Tijdens werkzaamheden nabij de tunnel kan het risico bestaan dat een schip een spudpaal verliest boven de tunnel. Hierdoor zou een vallende spudpaal op de tunnel terecht kunnen komen. Zoals reeds beschreven bij risico 7 wordt een vallende spudpaal volgens de ROK gezien als vallend scheepsanker. In de buurt van de Velsertunnels ligt een aanmeerplaats waar o.a. in het verleden een platform met zware spudpalen is afgemeerd. Er wordt gesteld dat de aannemers die werkzaamheden aan oevers of bodems uitvoeren het grootste risico zullen zijn (DNV GL, 2015). Omdat deze gereguleerde werkzaamheden onder toezicht van Rijkswaterstaat zullen plaatsvinden en de ligging van de tunnels bekend is wordt de kans op dit risico echter verwaarloosbaar geacht in verhouding tot risico 7.

C.1.9. Marginaal schip heeft een te grote diepgang boven de tunnel binnen de vaarweg

Een marginaal schip kan een zodanig grote diepgang hebben waardoor de kielspeling gelijk wordt aan nul en het schip de bodem van de vaarweg zou kunnen raken (binnen de randen van de vaarweg). Wanneer dit plaatsvindt boven de tunnel zou dit kunnen resulteren in de calamiteit van een aanvarend schip. Bij dit risico worden schepen beschouwd die op het diepe gedeelte van de vaarweg (op NAP -15.50 m) beschikken over een grotere diepgang dan de waterdiepte.

⁹³ Door DNV GL is bij de faalkansberekening van een zinkerbundel onder de Nieuwe Waterweg beredeneerd dat 1 op de 10 scheepsschades zal leiden tot het vallen van een container (DNV GL, 2015).

⁹⁴ De lengte van een container is met 12 meter een factor 25 kleiner dan de 'kritische lengte' van circa 300 meter die is bepaald in Appendix I.1. De aanname dat de kans op het zinken boven de tunnel door een container 10 maal kleiner is dan bij een schip is dus een conservatieve aanname.

Om de kans van optreden te bepalen wordt gebruik gemaakt van de LISA gegevens van 2018. Hieruit wordt de statische diepgang van de scheepvaart gebruikt. Vervolgens wordt voor deze schepen de squat berekend met behulp van vergelijking (2-1). Bij het bepalen van de squat is uitgegaan dat 80% van de scheepvaart zich houdt aan de maximumsnelheden gegeven in Tabel 2-1. Verder wordt aangenomen dat 20% van de scheepvaart deze maximumsnelheden overschrijdt met een bepaalde factor volgens de verdeling in Tabel C-2. Voor de blokcoëfficiënt (C_B) wordt 0.90 aangehouden voor tankschepen, 0.75 voor containerschepen en 0.80 voor andere typen schepen. Het vaarwegprofiel wordt aangehouden zoals Figuur 2-2. De blokkeerfactor (S) per schip wordt bepaald aan de hand van de afmetingen uit de LISA gegevens en het vaarwegprofiel. De dynamische diepgang wordt nu bepaald door de som te nemen van de statische diepgang en de squat.

Overschrijding snelheid	Percentage van aantal schepen
1.1 · v	10%
1.2 · v	5%
1.3 · v	2.5%
1.4 · v	1.5%
1.5 · v	1%

Tabel C-2: Aangenomen verdeling van de overschrijding van de maximumsnelheid door scheepvaart op het Noordzeekanaal.

Wanneer de dynamische diepgang groter is dan de beschikbare waterdiepte zal het schip de bodem raken. De kans van optreden wordt bepaald door het aantal schepen dat de bodem raakt te delen door het totaal aantal schepen. Uit de berekening volgt een kans van optreden van $7.64 \cdot 10^{-6}$ per schip per jaar. Om het effect van optreden boven de tunnel⁹⁵ mee te nemen wordt deze kans door 10 gedeeld, wat resulteert in een kans van optreden van $7.64 \cdot 10^{-7}$ per passerend schip per jaar.

Opgemerkt dient te worden dat in de huidige situatie de kans op een aanvarend schip beperkt is aangezien de beperkte diepte van de Noordersluis het doorlaten van te zwaar beladen schepen voorkomt (Horvat & Partners, 2017). Aangezien deze fysieke barrière in de toekomstige situatie met de realisatie van Zeesluis IJmuiden vervalt, is de verwachting dat het risico op een aanvarend schip zal toenemen voor die situatie.

C.1.10. Marginaal schip raakt uit koers en vaart buiten de vaarweg boven de tunnel

Een marginaal schip met een grote diepgang kan uit koers raken buiten de vaarweg waardoor de diepgang groter zou kunnen zijn dan de waterdiepte (kielspeling gelijk aan nul). Wanneer dit plaatsvindt boven de tunnel zou dit kunnen resulteren in de calamiteit van een aanvarend schip. Bij dit risico worden schepen beschouwd die op een ondieper gedeelte (kleinere diepte dan NAP -15.50 m) van de vaarweg beschikken over een grotere diepgang dan de waterdiepte.

Om de kans van optreden te bepalen wordt wederom gebruik gemaakt van de LISA gegevens van 2018. De dynamische diepgang wordt op vergelijkbare wijze bepaald als risico 9 met als verschil dat de positie van het schip nu ook in beschouwing wordt genomen. Aangenomen wordt dat schepen met een grote diepgang zich accurater door de vaarweg manoeuvreren dan een gemiddeld schip. Voor de positie in de vaarweg wordt daarom een gemiddelde passeerafstand van 2.5 m t.o.v. de kanaal-as en een standaardafwijking van 13.16 m toegepast. Deze waardes volgen uit het Marin rapport (2019) voor het oostgaande⁹⁶ scheepstype 'Capesize' over de Velsertunnels (zie Tabel B-1 van Appendix B.3). Het toepassen van de gemiddelde waardes voor de scheepspositie uit Tabel B-1 zou hier een onrealistisch hoge afwijking geven voor marginale schepen.

⁹⁵ Aanname dat het ondiepere gedeelte van het Noordzeekanaal ter plaatse van de Velsertunnels tien keer zo groot is als de breedte van de Velsertunnels.

⁹⁶ Oostgaande scheepvaart heeft in het Noordzeekanaal gemiddeld een grotere diepgang dan westgaand.

In de berekening wordt een N aantal simulaties gedaan waarbij steeds een willekeurig schip wordt gekozen met de daarbij behorende dynamische diepgang en een willekeurige passeerafstand van het schip t.o.v. de kanaal-as. Wanneer de dynamische diepgang van het schip groter is dan de waterdiepte op de locatie van het schip en het schip zich buiten de vaarweg bevindt, wordt de simulatie geteld als optreden van het risico. De kans van optreden wordt bepaald door het aantal simulaties waarbij de diepgang groter is dan de beschikbare waterdiepte te delen over het totaal aantal simulaties. De kans van optreden wordt berekend op $7.85 \cdot 10^{-7}$ per passerend schip per jaar (waarbij $N = 10^8$). Evenals bij risico 9 wordt deze kans van optreden door 10 gedeeld om het effect van optreden boven de tunnel mee te nemen. Dit resulteert in de kans van optreden die gelijk is aan $7.85 \cdot 10^{-8}$ per passerend schip per jaar. Deze kans van optreden is grofweg tien keer zo klein als bij het vorige risico van een marginaal schip met een te grote diepgang binnen de randen van de vaarweg (risico 9).

C.1.11. Hoge bodemsnelheden boven de tunnel door kleine kielspeling marginaal schip

Bij marginale schepen met een kleine kielspeling kan de schroef zich in de buurt van de kanaalbodem bevinden. Dit kan resulteren in hoge bodemsnelheden door schroefwerking boven de tunnel wat erosie van de kanaalbodem zou kunnen veroorzaken. Boven de Velsertunnels zou dit na verloop van tijd kunnen resulteren in een afname van de tunneldekking. Op zichzelf leidt dit niet tot het falen van de tunnel, echter zal hierdoor de weerstand van de tunnel tegen de andere calamiteiten kunnen afnemen. De kans van optreden wordt voor dit risico gecombineerd berekend met risico 12, welke eveneens kan resulteren in hoge bodemsnelheden door schroefwerking.

C.1.12. Hoge bodemsnelheden boven de tunnel door groot schroefvermogen marginaal schip

Marginale schepen met een groot schroefvermogen kunnen hoge bodemsnelheden veroorzaken waardoor erosie van de vaarwegbodem zou kunnen plaatsvinden. Wanneer dit regelmatig voorkomt ter plaatse van de tunnel, zou de tunneldekking kunnen verminderen, waardoor de weerstand van de tunnel tegen andere calamiteiten zou kunnen afnemen. Onderstaand wordt de kans op te hoge bodemsnelheden door schroefwerking bepaald voor risico 11 en 12 tezamen.

Om de kans van optreden te bepalen wordt gebruik gemaakt van de LISA gegevens van 2018. Appendix B.2 gaat inhoudelijk in op bodemsnelheden door schroefwerking en met vergelijkingen (B-3) t/m (B-7) kan de optredende bodemsnelheid worden bepaald⁹⁷. Met de afmetingen van de scheepvaart uit de LISA gegevens, het vaarwegprofiel van Figuur 2-2 en de maximumsnelheden van Tabel 2-1 wordt voor elk schip de optredende bodemsnelheid door schroefwerking bepaald. Deltares heeft in opdracht van Marin de schroefstraalbelasting op de kanaalbodem onderzocht voor het Noordzeekanaal waarbij o.a. de tunneldekking boven de Velsertunnels is beoordeeld. De huidige bodembescherming bestaat volgens het onderzoek uit grind van 16/22 mm waardoor boven de Velsertunnels de kritische stroomsnelheid 1 m/s bedraagt (Deltares, 2019).

De kans dat te hoge bodemsnelheden door schroefwerking optreden wordt bepaald door het aantal overschrijdingen door scheepvaart van de kritische bodemsnelheid te delen door het totaal aantal passerende schepen boven de Velsertunnels. De kans van optreden wordt berekend op $1.73 \cdot 10^{-2}$ per passerend schip per jaar (voor risico's 11 en 12 tezamen).

⁹⁷ Er wordt in de berekening gebruikt gemaakt van de 10% overschrijdingswaarde van het gemiddeld verwachte vermogen. Daarnaast wordt het aantal schroeven (n) in de berekening voor alle schepen op één aangenomen.

C.1.13. Hoge bodemsnelheden boven de tunnel door retourstroom van een marginaal schip
Marginale schepen kunnen een retourstroom onder het schip veroorzaken welke hoge snelheden bij de vaarwegbodem kan veroorzaken. Als de weerstand van de bodem tegen deze snelheden wordt overschreden, zou er erosie van de vaarwegbodem kunnen plaatsvinden. Wanneer dit ter plaatse van de tunnel regelmatig voorkomt, kan dit na verloop van tijd zorgen voor een afname van de tunneldekking. Dit resulteert op zichzelf niet direct tot het falen van de tunnel, maar zou de weerstand van de tunnel tegen andere calamiteiten kunnen verlagen.

Om de kans van optreden te bepalen wordt gebruik gemaakt van de LISA gegevens van 2018. Appendix B.1 gaat inhoudelijk in op het principe van retourstroom en met vergelijkingen (B-1) en (B-2) kunnen de retourstroom en spiegeldaling worden bepaald. Met de afmetingen van de scheepvaart uit de LISA gegevens, het vaarwegprofiel van Figuur 2-2 en de maximumsnelheden van Tabel 2-1 kan voor elk schip de retourstroom worden berekend. Voor de weerstand van de tunneldekking is, evenals bij risico's 11 en 12, de kritische stroomsnelheid van 1 m/s uit het onderzoek van Deltares (2019) toegepast.

De kans dat te hoge bodemsnelheden door retourstroom optreden wordt bepaald door het aantal overschrijdingen door scheepvaart van de kritische bodemsnelheid te delen door het totaal aantal passerende schepen boven de Velsertunnels. De kans van optreden wordt berekend op $5.92 \cdot 10^{-3}$ per passerend schip per jaar.

C.2. Evaluatie risicoanalyse

Uit de risicoanalyse volgt dat de calamiteiten van een vallend scheepsanker, slepend scheepsanker, zinkend schip en aanvarend schip een risico zouden kunnen vormen voor de constructieve veiligheid van de Velsertunnels. Deze calamiteiten dienen dan ook diepgaander te worden behandeld om de veiligheid van de Velsertunnels onder deze calamiteiten in de huidige situatie te kunnen toetsen.

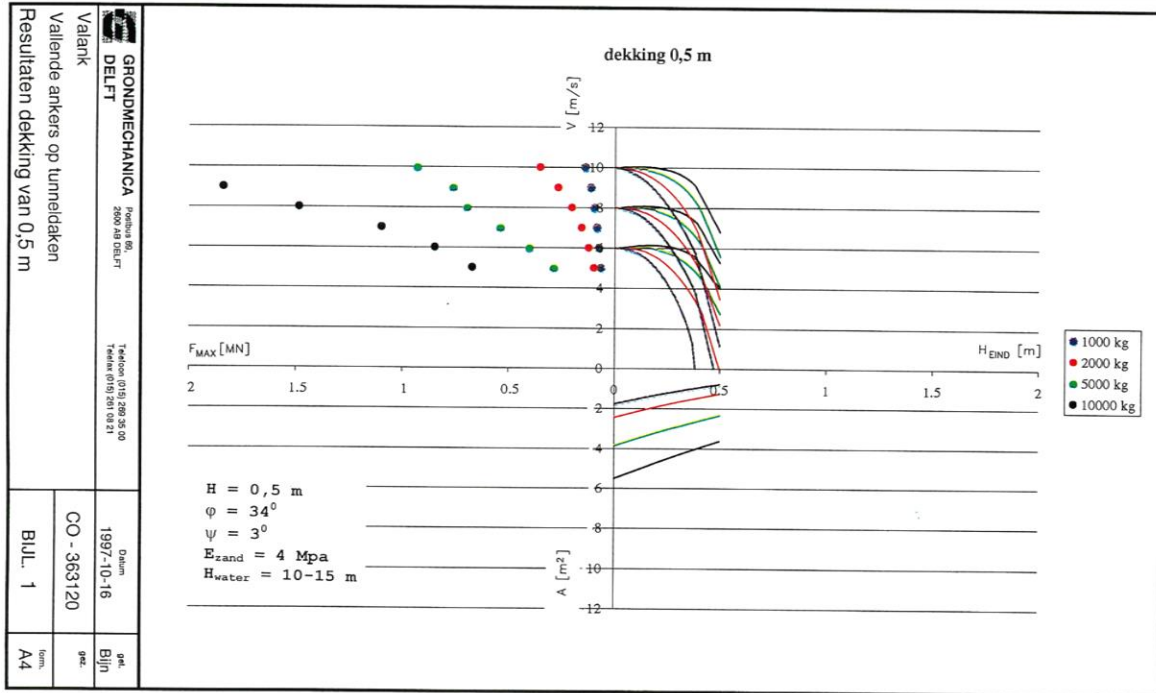
Het risico op een vallende spudpaal is veel kleiner dan het risico op een vallend scheepsanker. Bovendien wordt een vallende spudpaal qua mechanisme beschouwd als de calamiteit van een vallend scheepsanker. Hierdoor zal in het onderzoek verder niet worden ingegaan op een vallende spudpaal. Het risico op een zinkende container is verwaarloosbaar ten opzichte van het risico op een zinkend schip. Daarnaast wordt een zinkende container qua mechanisme beschouwd als de calamiteit van een zinkend schip. Dit resulteert in het feit dat er in het onderzoek niet apart zal worden ingegaan op een zinkende container.

Hoge bodemsnelheden door schroefwerking of retourstroom van scheepvaart zullen niet leiden tot het direct falen van de Velsertunnels, maar kunnen wel resulteren in een kleinere tunneldekking waardoor de weerstand van de tunnels tegen andere calamiteiten afneemt. Deze calamiteiten zullen daarom verder worden meegenomen in het onderzoek, zei het niet in een leidende rol.

Appendix D Ontwerpgrafieken vallend scheepsanker (VALANK)

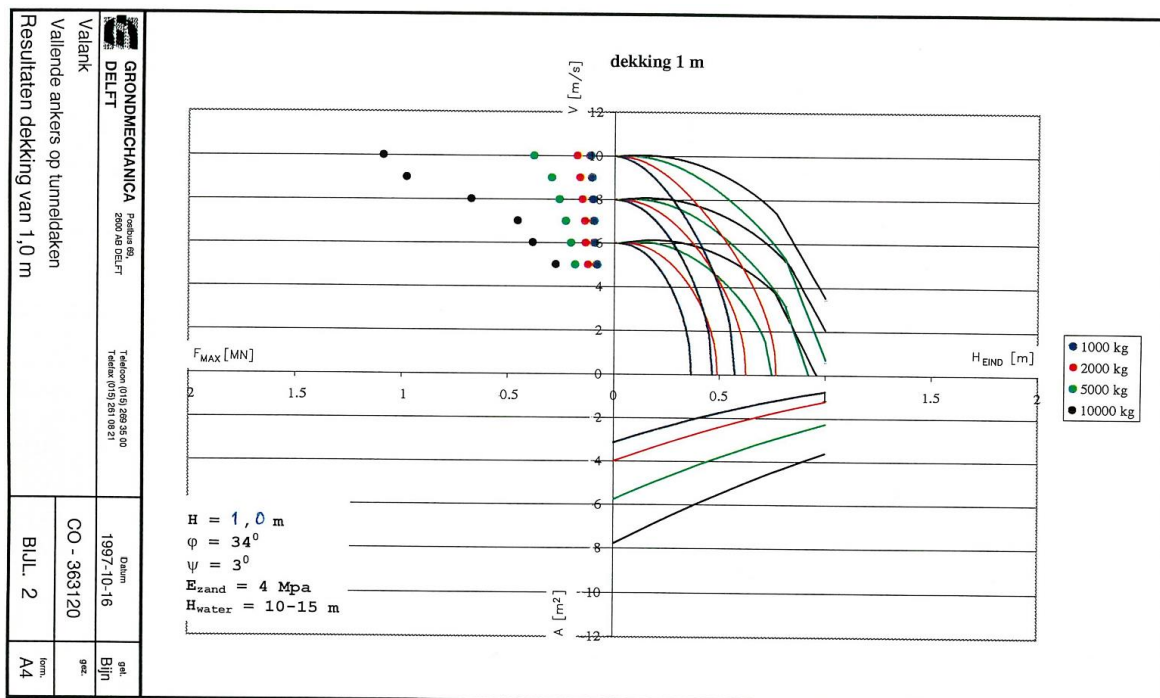
Met behulp van onderstaande ontwerpgrafieken kunnen de maximale indringing van het anker in de grondlaag, de eventuele eindsnelheid van het anker, de maximale kracht tijdens de indringing van het anker en het oppervlak van het tunneldak waarover deze kracht werkt worden bepaald.

D.1. Gronddekking van 0.5 m



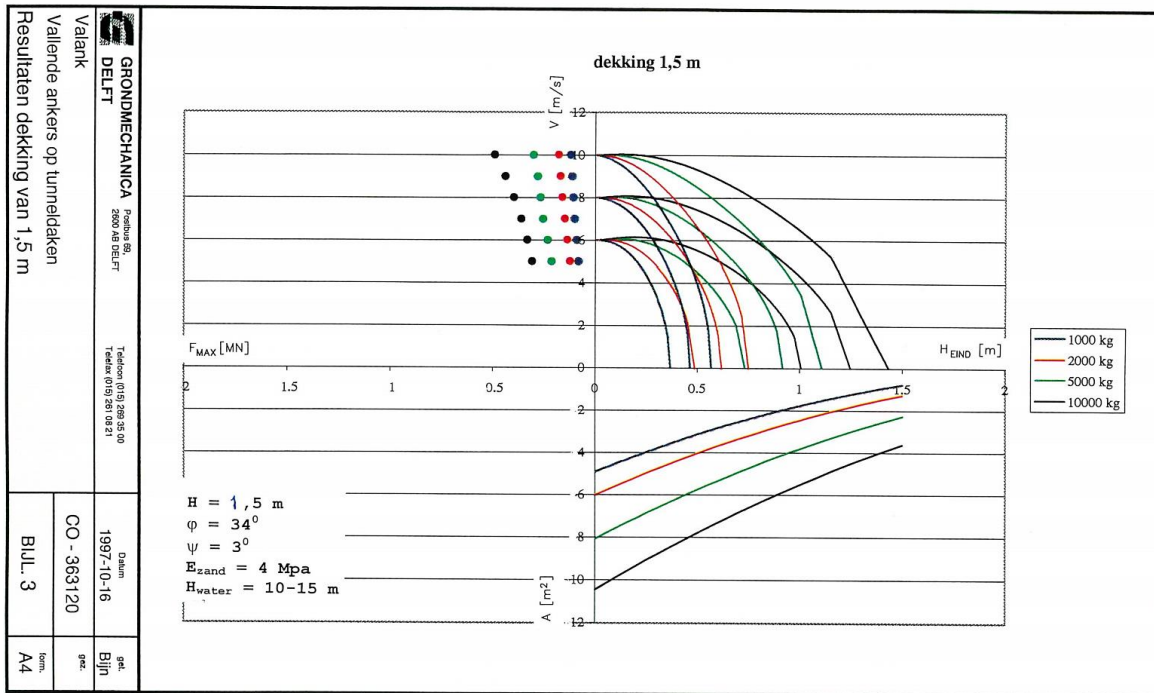
Figuur D-1: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 0.5 m (Hemelop, 2000).

D.2. Gronddekking van 1.0 m



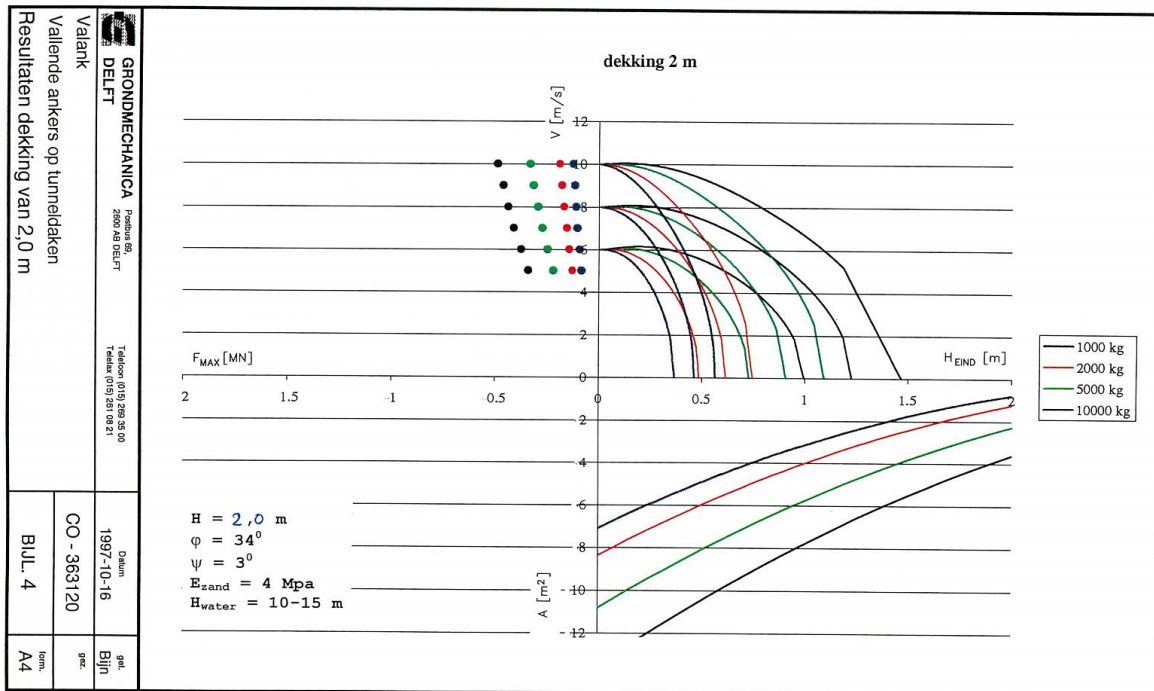
Figuur D-2: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 1.0 m (Hemelop, 2000).

D.3. Gronddekking van 1.5 m



Figuur D-3: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 1.5 m (Hemelop, 2000).

D.4. Gronddekking van 2.0 m



Figuur D-4: Ontwerpgrafiek vallend anker op tunneldak met een gronddekking van 2.0 m (Hemelop, 2000).

Appendix E Grootte impactbelasting vallend scheepsanker

Op basis van de methode van Saveur (1997) kan de grootte van de impactbelasting door een vallend scheepsanker worden bepaald op respectievelijk beton en een granulaire beschermlaag.

E.1. Impactbelasting vallend scheepsanker op beton

Onderstaand wordt een methode gegeven waarmee de grootte van de impactbelasting door een vallend scheepsanker op beton kan worden bepaald. Aan de hand van vergelijkingen (E-1) t/m (E-3) kan de penetratiediepte van een scheepsanker in beton worden bepaald bij de impactbelasting van een vallend scheepsanker. Met vergelijking (E-1) en (E-2) worden respectievelijk de equivalente diameter van het impact-oppervlak (D_e) en de penetratie parameter (N) bepaald (Saveur, 1997). Vergelijking (E-3) geeft vervolgens de penetratiediepte in meter (Saveur, 1997).

$$D_e = \sqrt{4A/\pi} \quad (E-1)$$

$$N = V_i \cdot \sqrt{\frac{M_w}{E_c \cdot D_e^3}} \quad (E-2)$$

$$X = 10 \cdot N \cdot D_e \quad (E-3)$$

waarin:

- A = Impact-oppervlak vallende scheepsanker [m^2]
- D_e = Equivalente diameter van het impact-oppervlak [m]
- V_i = Impact snelheid waarmee het scheepsanker de beton raakt [m/s]
- M_w = Anker massa gereduceerd met de massa van het verplaatste water [kg]
- E_c = Elasticiteitsmodulus in de longitudinale richting van de beton [N/m^2]
- N = Penetratie parameter [-]
- X = Penetratiediepte anker in de beton [m]

Vergelijkingen (E-4) en (E-5) bepalen de tijdsduur van de impact (T_d) en de maximale dynamische equivalente kracht (Saveur, 1997). Vergelijking (E-6) geeft het verband tussen de dynamische en de statische equivalente kracht door middel van de *Dynamic Load Factor* (DLF) (Saveur, 1997).

$$T_d = X/V_i \quad (E-4)$$

$$F_{max,dyn} = M_w \cdot \frac{V_i}{T_d} \quad (E-5)$$

$$F_{stat} = DLF \cdot F_{max,dyn} \quad (E-6)$$

Figuur E-1 geeft de DLF waarde bij de gegeven verhouding T_d/T_e ⁹⁸ (Saveur, 1997). De theoretische maximum waarde van de DLF is gelijk aan 2.0⁹⁹ (Chao, Hong, Kaiming, & Xueyuan, 2020).

T_d/T_e	max	1.0	0.4	0.2	0.1
DLF	2.0	1.6	1.0	0.7	0.3

Figuur E-1: Waarde 'Dynamic Load Factor' (DLF) afhankelijk van T_d/T_e (Saveur, 1997).

⁹⁸ Voor betonnen afgezonken verkeertunnels is de eigenperiode T_e ongeveer gelijk aan 0.02 s (Saveur, 1997).

⁹⁹ Massaveersysteem met één vrijheidsgraad onder plotselinge dynamische belasting (Chao et al., 2020).

E.2. Impactbelasting vallend scheepsanker op granulaire beschermlaag

Onderstaand wordt een methode gegeven waarmee de grootte van de impactbelasting door een vallend scheepsanker op een granulaire beschermlaag kan worden bepaald. Met vergelijking (E-7) kan de dynamische impactbelasting worden bepaald door tweemaal de kinetische energie te delen door de penetratiediepte¹⁰⁰ (Saveur, 1997). Vergelijking (E-8) geeft de statisch equivalente belasting voor een relatief lange penetratietijd¹⁰¹ (Saveur, 1997). Saveur stelt dat een penetratiediepte (X) van circa 0.3 m wordt verwacht voor de meeste ankers, gegeven dat beschermlaag dik genoeg is om direct contact tussen anker en tunneldak te voorkomen.

$$F_{dyn} = 2 \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot M_a \cdot V_i^2}{X} \quad (E-7)$$

$$F_{stat} = 2 \cdot F_{dyn} = \frac{2 \cdot M_a \cdot V_i^2}{X} \quad (E-8)$$

waarin:

M_a = Massa scheepsanker [kg]

X = Penetratiediepte in de beschermlaag [m]

V_i = Impact snelheid waarmee het anker de beschermlaag raakt [m/s]

Er wordt aangenomen dat de belasting zich spreidt over een oppervlak met een effectieve diameter gelijk aan de som van de equivalente diameter van het impact-oppervlak (D_e) en de dikte van het tunneldak (Saveur, 1997).

¹⁰⁰ Deze formule is geldig onder de voorwaarde dat de beschermlaag dik genoeg is om direct contact tussen het scheepsanker en het tunneldak te voorkomen (Saveur, 1997).

¹⁰¹ Uit Figuur E-1 kan worden opgemaakt dat de maximale waarde van de DLF gelijk is aan 2.0 wanneer de tijdsduur van impact relatief groot is t.o.v. de eigenperiode van de tunnel.

Appendix F Penetratiediepte vallend en slepend scheepsanker

Onderstaand worden de penetratiedieptes voor een vallend en slepend scheepsanker gegeven.

F.1. Penetratiediepte vallend scheepsanker

Zhu, Hao en Zhang (2019) hebben de penetratiediepte van een vallend scheepsanker in de zeebodem onderzocht voor de bepaling van een veilige diepte voor onderzeese pijpleidingen. Vergelijkingen (F-1) en (F-2) schatten de penetratiediepte van een vallend scheepsanker effectief op basis van de ankermassa voor respectievelijk klei en zand (Zhu et al., 2019). Hierbij is z de penetratiediepte in meter en M is de massa van het anker in ton. Er dient te worden opgemerkt dat de vergelijkingen slechts geldig zijn wanneer de waterdiepte groot genoeg is zodat de snelheid van het vallende scheepsanker onafhankelijk wordt van de valhoogte boven water. Er wordt aangenomen dit het geval is voor het Noordzeekanaal met een diepte van circa 15 meter.

$$z = 1.736025 + 0.195281 \cdot M - 0.007310 \cdot M^2 + 0.000140 \cdot M^3 \quad (F-1)$$

$$z = 0.514570 + 0.164297 \cdot M - 0.008163 \cdot M^2 + 0.000163 \cdot M^3 \quad (F-2)$$

Tabel F-1 vergelijkt uitkomsten tussen vergelijking (F-2) en de ontwerpgrafieken van project VALANK (Hemelop, 2000). In de ontwerpgrafiek wordt de valsnelheid van 10 m/s gebruikt welke groter is dan de door de ROK aangehouden 9 m/s (Rijkswaterstaat, 2017). Voor de gegeven massa's kan worden opgemaakt dat vergelijking (F-2) grotere waarden voor de berekende penetratiediepte geeft dan wordt verkregen met de ontwerpgrafieken. Het wordt daarom veilig geacht om vergelijking (F-2) te gebruiken bij berekenen van de penetratiediepte van een vallend scheepsanker in zand.

Massa (ton)	Bepaalde penetratiediepte vallend scheepsanker [m]	
	Vergelijking (F-2)	Ontwerpgrafieken VALANK ¹⁰²
1	0.67	0.57
2	0.81	0.75
5	1.15	1.09
10	1.50	1.47

Tabel F-1: Vergelijk penetratiedieptes tussen vergelijking (F-2) en ontwerpgrafieken van project VALANK (Hemelop, 2000).

F.2. Penetratiediepte slepend scheepsanker

Gibson en Williams-Crew (2020) geven een vergelijking waarmee de penetratiediepte van een slepend scheepsanker kan worden bepaald in de context van begraven kabels. In vergelijking (F-3) is het verband weergegeven (Gibson & Williams-Crew, 2020). Hierbij is d_{pen} de penetratiediepte in meter, l_{vloei} de vloeilengte in meter, θ_{vloei} de vloeihoek in graden en f_{bodem} een factor welke afhankelijk is van het bodem type. Voor de vloeihoek wordt $\theta_{vloei} = 45^\circ$ gebruikt¹⁰³ en de factor afhankelijk van het bodem type kan worden afgeleid uit Tabel F-2.

$$d_{pen} = l_{vloei} \cdot \sin(\theta_{vloei}) \cdot f_{bodem} \quad (F-3)$$

Bodem type	Factor bodem type
zand, stevig tot hard klei	1
zachte tot stevige klei	3-5

Tabel F-2: Factor bodemtype voor penetratiediepte (Gibson & Williams-Crew, 2020).

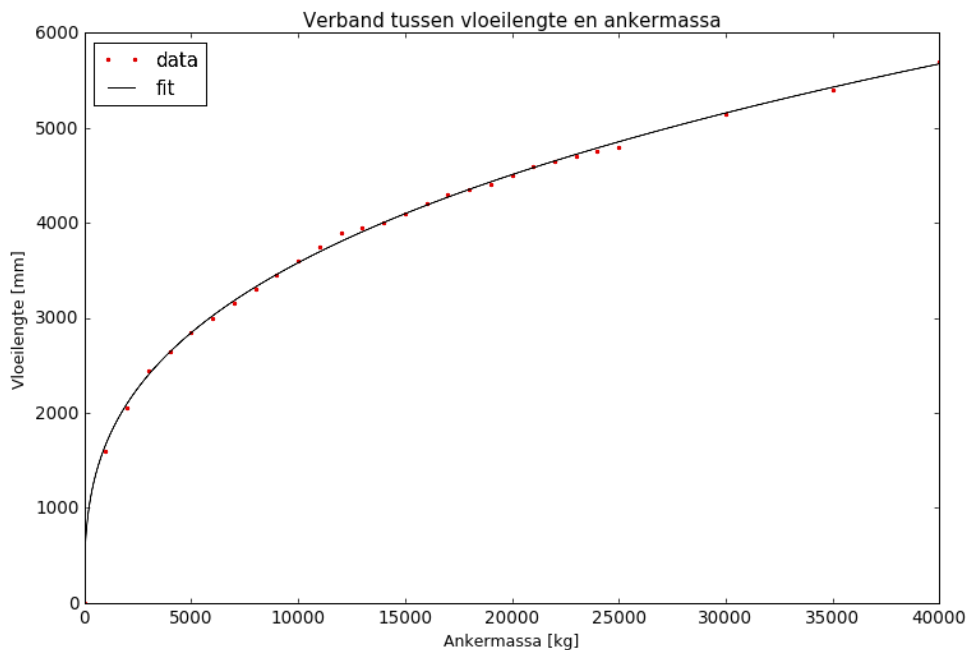
¹⁰² Zie Figuur D-4 uit Appendix D met valsnelheid 10 m/s.

¹⁰³ Deze waarde is gegeven voor het stokloze ankertype en is tevens de meest conservatief gegeven waarde.

Gibson en Williams-Crew (2020) presenteren in hun studie een figuur waarin voor verschillende ankertypen het verband is weergegeven tussen de vloeilengte in millimeter en de ankermassa in kg. De figuur kan hier niet worden weergegeven vanwege auteursrechten. Om vergelijking (F-3) toepasbaar te maken voor verschillende scheepstypen waarvan het ankertype niet bekend is zal er een wiskundig verband worden afgeleid aan de hand van de figuur van Gibson en Williams-Crew. Aangezien het verband tussen vloeilengte en ankermassa verschillend is per ankertype wordt het verband van de Bruce MK4 gebruikt. Dit ankertype geeft de grootste vloeilengte voor de ankermassa's waardoor de penetratiediepte vervolgens conservatief kan worden benaderd.

Vergelijking (F-4) is afgeleid door in Python een goede fit te maken door de afgelezen waardes uit de figuur van Gibson en Williams-Crew wat schematisch is weergegeven in Figuur F-1. Hierbij is de vloeilengte gegeven in mm en de ankermassa in kg. De penetratiediepte kan nu worden bepaald voor een gegeven ankermassa.

$$l_{vloei} = 168.082 \cdot m^{0.3321} \tag{F-4}$$

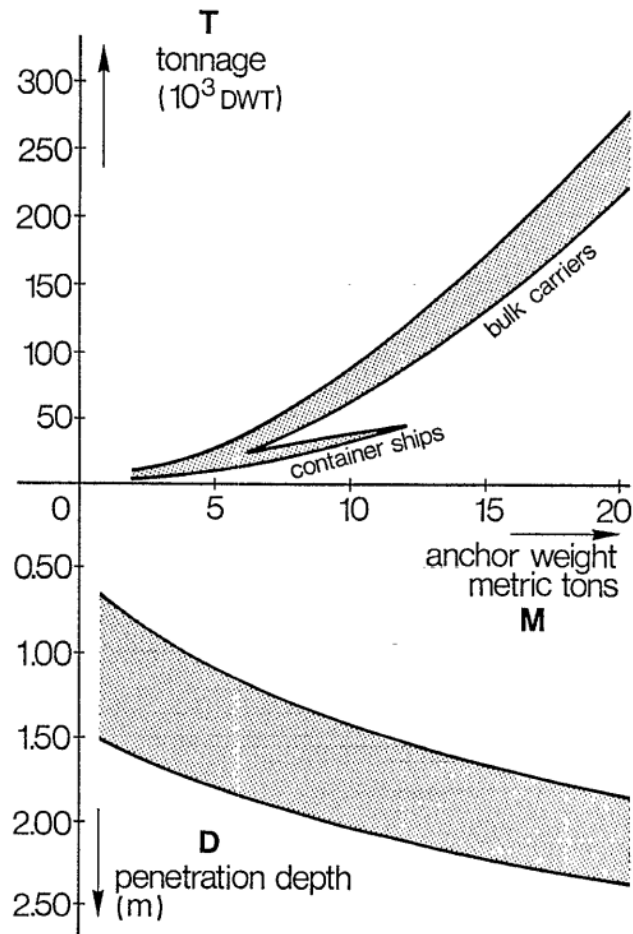


Figuur F-1: Verband tussen vloeilengte [mm] en ankermassa [kg] voor de afgelezen data punten van ankertype Bruce MK4 uit (Gibson & Williams-Crew, 2020).

Tabel F-3 vergelijkt de uitkomsten van vergelijking (F-3) met een figuur van Kuik (1986). Deze figuur geeft een relatie weer tussen de ankermassa in ton en de penetratiediepte van een slepend anker, zie Figuur F-2. Van de figuur zijn waardes afgelezen van de bovengrens voor verschillende ankermassa's (Kuik, 1986). Uit de tabel kan worden opgemaakt dat vergelijking (F-3) hogere waardes geeft voor de penetratiediepte van een slepend scheepsanker dan de bovengrens van de figuur van Kuik (1986). Het wordt veilig geacht om vergelijking (F-3) te gebruiken voor de berekening van de penetratiediepte van een slepend scheepsanker in zand.

Massa (ton)	Bepaalde penetratiediepte slepend scheepsanker [m]	
	Vergelijking (F-3)	Bovengrens figuur Kuik (1986)
5	2.01	1.80
10	2.53	2.05
15	2.90	2.20
20	3.19	2.35

Tabel F-3: Vergelijk penetratiedieptes tussen vergelijking (F-3) en de bovengrens van de figuur van Kuik (Kuik, 1986).



Figuur F-2: Verband tussen het tonnage van schepen, het ankergewicht en de penetratiediepte (Kuik, 1986).

Appendix G Belasting zinkend schip

Onderstaand wordt een methode gegeven voor het bepalen van de statische resulterende krachten voor zowel een horizontaal zinkend schip als een schip zinkend onder een hoek volgens Saveur (1997). Met behulp van vergelijking (G-1) kan het eigengewicht van een schip worden bepaald wanneer de breedte (B), lengte (L), diepgang (T) en het draagvermogen van het schip (DWT) gegeven zijn. C_B is de aangenomen blokcoëfficiënt, de eerste factor 10 is het volumegewicht van water in kN/m^3 en de tweede factor 10 is de omzetting van ton naar kN.

$$W = C_B \cdot B \cdot L \cdot T \cdot 10 - DWT \cdot 10 \quad (G-1)$$

Voor de situatie van een horizontaal zinkend schip kan de resulterende kracht van het schip op de vaarwegbodem worden bepaald met vergelijking (G-2) voor een bulkschip met ijzererts (Saveur, 1997). Hierbij is aangenomen dat de lading voor 90% uit ijzererts bestaat en voor 10% uit lichte lading met aangenomen volumegewichten van respectievelijk 30 en 10 kN/m^3 . Verder is voor het volumegewicht van het schip staal aangenomen met 70 kN/m^3 .

$$L_1 = W \cdot \left(\frac{70 - 10}{70}\right) + 0.9 \cdot DWT \cdot 10 \cdot \left(\frac{30 - 10}{30}\right) \quad (G-2)$$

Wanneer een schip tot zinken komt onder een hoek kan de totale kracht van het schip worden bepaald met vergelijkingen (G-3), (G-4) en (G-5) afkomstig van Saveur (1997). Vergelijking (G-3) geeft het watergewicht dat binnenstroomt in het schip per meter lengte voor een bulkschip met ijzererts. De holte van het schip (H) is de verticale afstand tussen de onderkant van het bovenste doorlopende dek en de kiellijn. Met vergelijking (G-4)¹⁰⁴ wordt de afstand bepaald waarover een schip met water vol loopt (X). Deze afstand dient vervolgens te worden afgerond op een geheel aantal volgelopen compartimenten van een schip. Het vrijboord (F) wordt bepaald door het verschil tussen de holte en diepgang van een schip. De resulterende kracht dat het schip uitoefent op de bodem van de vaarweg kan worden bepaald met vergelijking (G-5).

$$w = C_B \cdot B \cdot H \cdot 10 - \left(W \cdot \left(\frac{10}{70}\right) + 0.1 \cdot DWT \cdot 10 + 0.9 \cdot DWT \cdot 10 \cdot \left(\frac{10}{30}\right) \right) / L \quad (G-3)$$

$$X = \sqrt{\frac{(0.9 \cdot B \cdot L \cdot F \cdot 10) \cdot L}{w}} \quad (G-4)$$

$$L_2 = w \cdot X - 0.9 \cdot B \cdot L \cdot F \cdot 10 \quad (G-5)$$

¹⁰⁴ De factor 0.9 in vergelijkingen (G-4) en (G-5) betreft de aangenomen blokcoëfficiënt van het vrijboord gedeelte van schip.

Appendix H Bepaling maatgevende vallende scheepsanker

In deze appendix wordt de maatgevende vallende scheepsanker bepaald voor de tunnels gelegen onder het Noordzeekanaal.

H.1. Kans van optreden

Het falen van de lier, het breken van de ketting of foutieve bediening door de bemanning kan leiden tot het feit dat een scheepsanker overboord gaat (TNO, 1995). Wanneer dit boven een tunnel plaatsvindt resulteert dit in de calamiteit van een vallend scheepsanker. Volgens de ROK mag worden aangenomen dat de kans op ankerverlies $P_A = 2 \cdot 10^{-3}$ per schip per jaar bedraagt (Rijkswaterstaat, 2017). Deze kans is afkomstig uit de literatuurstudie van TNO (1995) naar een vallend scheepsanker op een tunneldak welke het heeft ontleend aan Buckie (1979)¹⁰⁵. De door Buckie gepresenteerde gegevens hebben betrekking op schepen met een lengte van 240 m of meer, gebouwd tussen 1965 en 1977 en in de vaart tussen 1969 en 1978 waardoor de cijfers gedateerd zijn (TNO, 1995). Kooijman houdt de kans op ankerverlies gelijk aan $2 \cdot 10^{-3}$ omdat voor de binnenvaart geen (faal)gegevens aanwezig zijn (Kooijman, 2005). Bij gebrek aan recentere cijfers wordt daarom de kans op ankerverlies in het onderzoek gelijk gehouden aan $P_A = 2 \cdot 10^{-3}$ per schip per jaar.

De kans dat een anker op het dak van de tunnel valt gegeven dat het schip zijn anker verliest wordt met vergelijking (H-1) bepaald volgens de ROK (Rijkswaterstaat, 2017). Hierbij is b_{tunnel} de breedte van de tunnel in meter en v_{schip} de vaarsnelheid van het schip in m/s.

$$P_{B|A} = b_{tunnel} / (0.75 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot v_{schip}) \quad (H-1)$$

Voor de Noordzeekanaal tunnels kan nu de kans van optreden worden bepaald voor de calamiteit van een vallend scheepsanker. Er wordt een snelheid van 12 km/h aangenomen zodat $v_{schip} = 3.33$ m/s. De kans van een vallend scheepsanker op het dak van de tunnel (per passerend schip per jaar) wordt bepaald met $P_B = P_{B|A} \cdot P_A$. De jaarlijkse kans van een vallend scheepsanker op het tunneldak (P_N) wordt berekend door P_B te vermenigvuldigen met het aantal passerende schepen ($P_N = P_B \cdot N$). Het aantal zeeschepen over 2018 bedroeg 11692 in het Noordzeekanaal (Port of Amsterdam, 2019) terwijl uit de LISA gegevens van 2018 blijkt dat er 11041 schepen zijn beloofd. Hieruit volgt dat het aantal zeeschepen op het Noordzeekanaal 5.9% hoger ligt dan het aantal schepen in de LISA gegevens. Het aantal schepen (N) wordt daarom bepaald met het aantal passerende schepen volgens de LISA gegevens plus 5.9%. Tabel H-1 geeft een overzicht van de kansen van optreden bij de calamiteit van een vallend scheepsanker voor de Noordzeekanaal tunnels.

Tunnel	Breedte (m)	$P_{B A}$ (-)	P_B (per schip per jaar)	N (aantal schepen)	P_N (per jaar)
Velserspoortunnel	12.25	$1.56 \cdot 10^{-7}$	$3.11 \cdot 10^{-10}$	11088	$3.45 \cdot 10^{-6}$
Velserautotunnel	32.47	$4.12 \cdot 10^{-7}$	$8.24 \cdot 10^{-10}$	11088	$9.14 \cdot 10^{-6}$
Wijkertunnel	30.25	$3.84 \cdot 10^{-7}$	$7.67 \cdot 10^{-10}$	10377	$7.96 \cdot 10^{-6}$
Hemspoortunnel	21.44	$2.72 \cdot 10^{-7}$	$5.44 \cdot 10^{-10}$	6584	$3.58 \cdot 10^{-6}$
Coentunnel	23.15	$2.94 \cdot 10^{-7}$	$5.87 \cdot 10^{-10}$	2735	$1.61 \cdot 10^{-6}$
Tweede Coentunnel	30	$3.81 \cdot 10^{-7}$	$7.61 \cdot 10^{-10}$	2735	$2.08 \cdot 10^{-6}$

Tabel H-1: Overzicht kansen van optreden bij de calamiteit van een vallend anker boven de Noordzeekanaal tunnels.

¹⁰⁵ Buckie A.K., Ten year review of defects and failures in large ships' anchoring and mooring equipment, Conference on mooring large ships over 150,000 dwt, Institute of Marine Engineers, Londen UK, december 1979.

H.2. Bepaling van de ankermassa

Onderstaand wordt de bepaling van de ankermassa beschreven op basis van twee methoden. Bij de kansverdeling van de ankermassa's zal de methode worden gebruikt waarmee de grootste ankermassa berekend wordt.

H.2.1. Methode 1

De bepaling van de ankermassa per schip gebeurt volgens de methode uit het rapport van een vallend scheepsanker op de Kiltunnel (TNO, 2009). Voor de relatie tussen de vereiste ankermassa geldt bij benadering voor stokloze boegankers de vergelijkingen (H-2) en (H-3). De eerste term in vergelijking (H-2) heeft betrekking op de ankerketting t.g.v. scheepsbewegingen waarin massa-effecten overheersen, de tweede term met de windbelasting op het schip en de derde term heeft als doel een onderscheid te maken tussen tankers en andere scheepstypen (TNO, 1995). Aan de hand van vergelijking (H-4) wordt de waterverplaatsing bepaald (de Leeuw van Weenen, 1995).

$$EN = \Delta^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot B \cdot h + \frac{A}{10} \quad (H-2)$$

$$m_{anker} \approx 3 \cdot EN \quad (H-3)$$

$$\Delta = L \cdot B \cdot D \cdot \delta \quad (H-4)$$

waarin:

m_{anker} = Ankermassa [kg]

EN = Equipment Number

Δ = Waterverplaatsing [m³]

L = Lengte van het schip [m]

B = Breedte van het schip [m]

D = Diepgang van het schip [m]

δ = Blokfactor, deze corrigeert voor het volumeverschil tussen de rompvorm en een rechte doos, $\delta = 0.8$ [-]

A = Blootgestelde zijoppervlak door wind, $A = L \cdot h$ [m²]

h = Hoogte van de waterlijn tot de top van de hoogste opbouw waarvan de breedte groter is dan $B/4$ [m]

Vergelijking (H-5) geeft een uitdrukking voor hoogte h (de Leeuw van Weenen, 1995).

$$h = 2 \cdot D \quad (H-5)$$

H.2.2. Methode 2

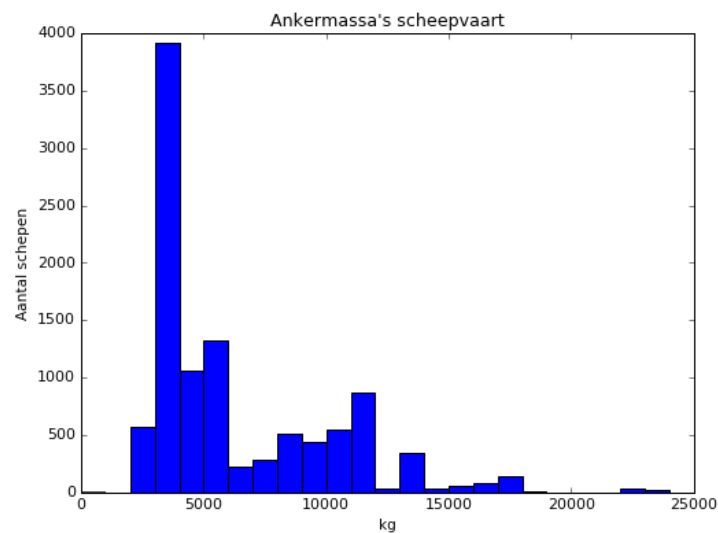
In de ROK wordt een andere methode voorgesteld bij de bepaling van de massa van een scheepsanker. Vergelijking (H-6) geeft deze relatie¹⁰⁶ uit de ROK weer (Rijkswaterstaat, 2017). De ankermassa kan hierbij worden bepaald (in kg) aan de hand van het draagvermogen (DWT in ton) van het schip.

$$m_{anker} = 40 \cdot \sqrt{DWT + 3500} \quad (H-6)$$

¹⁰⁶ De vergelijking is oorspronkelijk afkomstig uit Luger D. (2006). *Developments in anchor technology and anchor penetration in the seabed.*

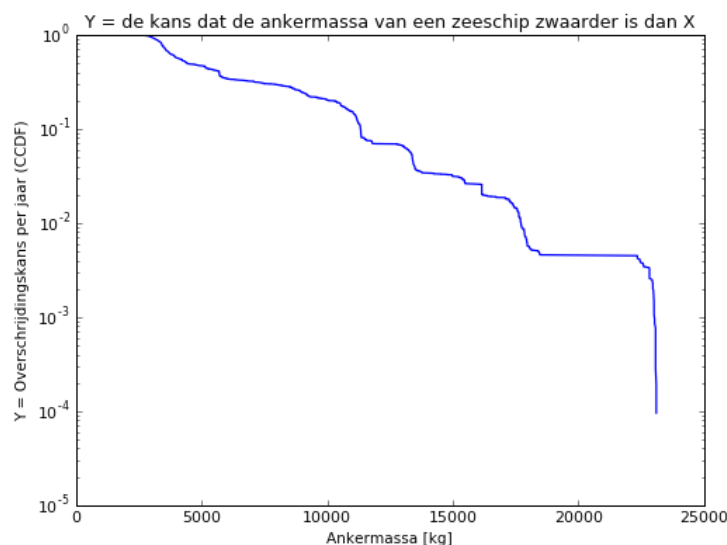
H.3. Kansverdeling massa's vallend anker

Om de kansverdeling van de ankermassa's van de scheepvaart te bepalen wordt gebruik gemaakt van de LISA gegevens van 2018. Voor elk schip dat over een tunnel vaart wordt de ankermassa bepaald met de twee methoden uit Appendix H.2. De hoogste ankermassa uit deze beide methoden wordt verder meegenomen in de berekening. Figuur H-1 geeft het histogram van de bepaalde ankermassa's van scheepvaart boven de Velsertunnels weer.



Figuur H-1: Histogram ankermassa's scheepvaart boven de Velsertunnels (Python).

Alle ankermassa's worden nu gesorteerd van laag naar hoog en voorzien van een nummer (1 t/m het aantal passerende schepen over de tunnel). Vervolgens wordt de CDF¹⁰⁷ bepaald door het volgordenummer van de ankermassa te delen door de som van het aantal ankermassa's plus één (TNO, 2009). De CCDF¹⁰⁸ wordt vervolgens bepaald door het verschil tussen 1 met de CDF te nemen (TNO, 2009). De CCDF geeft voor elke ankermassa de jaarlijkse kans dat deze massa wordt overschreden door een scheepsanker van een varend schip over de tunnel. Figuur H-2 toont deze jaarlijkse overschrijdingskansen van de ankermassa's van de scheepvaart boven de Velsertunnels.

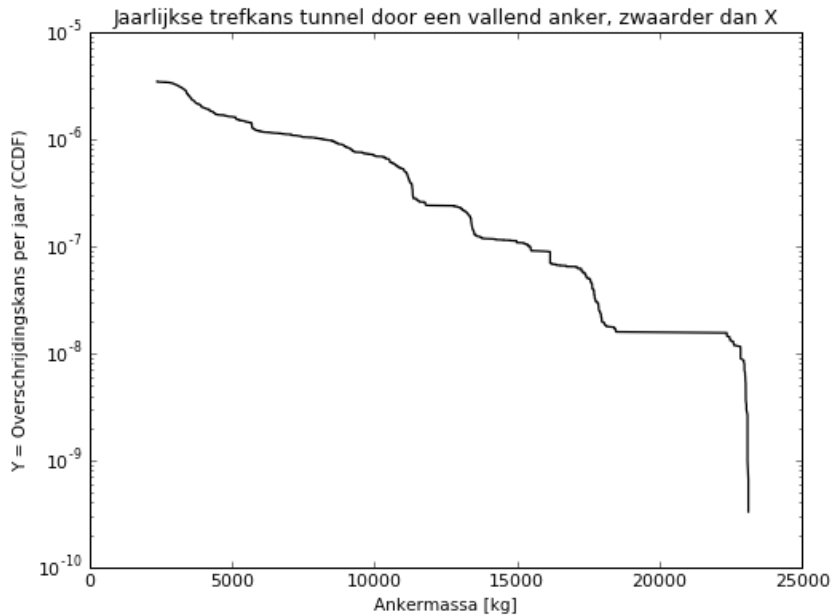


Figuur H-2: Jaarlijkse overschrijdingskansen ankermassa's scheepvaart boven de Velsertunnels (Python).

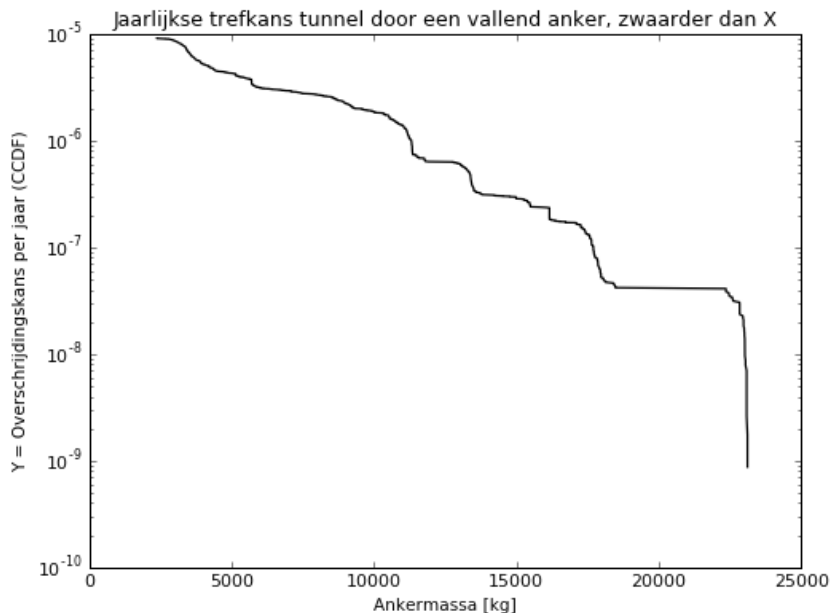
¹⁰⁷ Cumulatieve Distributie Functie

¹⁰⁸ Complementaire Cumulatieve Distributie Functie

De overschrijdingskans van de ankermassa bij de calamiteit van een vallend scheepsanker wordt bepaald door de overschrijdingskansen van de ankermassa's van de scheepvaart te vermenigvuldigen met de kans van optreden van de calamiteit. Voor de Velsertunnels houdt dit in dat Figuur H-2 wordt vermenigvuldigd met de jaarlijkse kans van optreden van de calamiteit van een vallend scheepsanker uit Tabel H-1. Voor de Velserspoortunnel is de jaarlijkse kans van optreden gelijk aan $3.45 \cdot 10^{-6}$. Figuur H-3 geeft de overschrijdingskans van de ankermassa weer voor de Velserspoortunnel bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Voor de Velserautotunnel is de jaarlijkse kans van optreden gelijk aan $9.14 \cdot 10^{-6}$. Figuur H-4 geeft de overschrijdingskans van de ankermassa weer voor de Velserautotunnel bij de calamiteit van een vallend scheepsanker.



Figuur H-3: Overschrijdingskans ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserspoortunnel (Python).

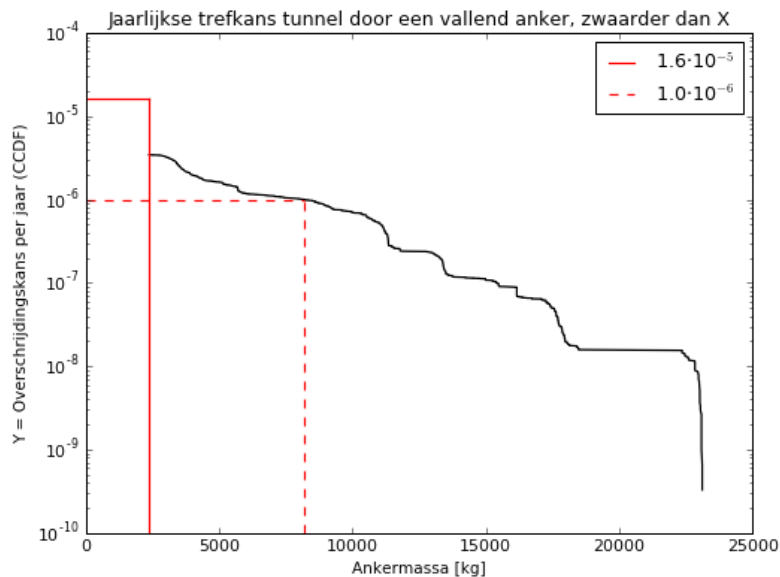


Figuur H-4: Overschrijdingskans ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserautotunnel (Python).

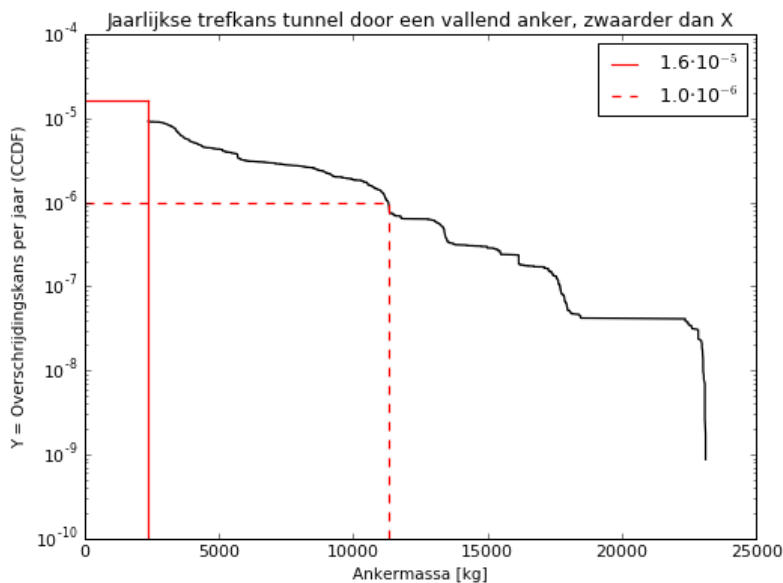
H.4. Afleiden maatgevende ankermassa

Uit paragraaf 2.5 volgt dat de betrouwbaarheidsindex gelijk dient te zijn aan $\beta = 3.3$ voor de Velsertunnels bij een restlevensduur van 30 jaar. Dit resulteerde in de toegestane faalkans van $1.61 \cdot 10^{-5}$ per jaar. De betrouwbaarheid hangt af van de spreiding aan zowel de belastingkant als de sterktekant. Bij een calamiteit van een vallend scheepsanker wordt de grootste onzekerheid in de belasting verwacht. Er wordt daarom van een toelaatbare overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar uitgegaan voor het maatgevende anker. Hierdoor wordt de invloedscoëfficiënt van de belasting gelijk genomen aan $\alpha_s = 1.0$ waardoor die van de sterkte gelijk is aan $\alpha_r = 0$ (TNO, 2009). Voor de toetsing van het tunneldak bij de calamiteit van een vallend scheepsanker mag hierdoor voor de sterkte uitgegaan worden van de gemiddelde waarden van de materiaaleigenschappen (TNO, 2009).

Uit de ROK volgt dat het maatgevende anker van de tunnel bepaald dient te worden bij de overschrijdingskans van $1.0 \cdot 10^{-6}$ per jaar (Rijkswaterstaat, 2017). Deze norm is niet maatgevend voor de Velsertunnels (zie subparagraaf 2.5.2) maar wordt ter referentie meegenomen. Figuur H-5 en Figuur H-6 geven de bepaling van de maatgevende ankermassa's weer voor de Velsertunnels.



Figuur H-5: Maatgevende ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserspoortunnel (Python).



Figuur H-6: Maatgevende ankermassa bij calamiteit vallend scheepsanker op de Velserautotunnel (Python).

Uit Figuur H-5 en Figuur H-6 volgt dat de toelaatbare overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar buiten het bereik van de ankermassa's van zeeschepen valt. Daarom wordt conservatief de kleinste ankermassa 2367 kg aangehouden als maatgevend anker. Bij de toelaatbare overschrijdingskans van $1.0 \cdot 10^{-6}$ per jaar zijn de maatgevende ankermassa's van de spoortunnel en autotunnel respectievelijk 8186 en 11307 kg. Tabel H-2 geeft de verkregen maatgevende ankermassa's voor alle Noordzeekanaal tunnels weer voor de twee verschillende toelaatbare overschrijdingskansen.

Tunnel	Maatgevende ankermassa (kg)	
	$P_{eis} = 1.6 \cdot 10^{-5}$ (per jaar)	$P_{eis} = 1.0 \cdot 10^{-6}$ (per jaar)
Velserspoortunnel	2367	8186
Velserautotunnel	2367	11307
Wijkertunnel	2367	11224
Hemspoortunnel	2367	7983
Coentunnel	2367	3394
Tweede Coentunnel	2367	3633

Tabel H-2: Overzicht maatgevende ankermassa's voor de twee toelaatbare overschrijdingskansen.

Rekening houdend met de onzekerheid in de kans van optreden van de calamiteit van een vallend scheepsanker wordt gekeken naar de invloed van een grotere kans van optreden op de maatgevende ankermassa. Tabel H-3 geeft de maatgevende ankermassa's weer voor de Noordzeekanaal tunnels bij de toelaatbare overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar voor zowel de kansen van optreden van de Noordzeekanaal tunnels als een tweemaal zo grote kans. Op de Velserautotunnel na, veranderen de maatgevende ankermassa's niet bij het toepassen van deze tweemaal grotere kans van optreden.

Tunnel	Maatgevende ankermassa (kg)	
	P_N	$2 \cdot P_N$
Velserspoortunnel	2367	2367
Velserautotunnel	2367	3237
Wijkertunnel	2367	2367
Hemspoortunnel	2367	2367
Coentunnel	2367	2367
Tweede Coentunnel	2367	2367

Tabel H-3: Overzicht maatgevende ankermassa's bij de toelaatbare overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar bij zowel de kans van optreden als een tweemaal zo grote kans van optreden.

Opgemerkt moet worden dat naast de situatie waarbij de spreiding aan de belastingkant maatgevend wordt geacht, de omgekeerde situatie waarin de spreiding aan de sterktekant maatgevend is, ook dient te worden gecontroleerd. Dit houdt in dat de rekenwaarde van de sterkte van het tunneldak wordt getoetst bij de ankermassa van een binnenvaartschip¹⁰⁹ (TNO, 2009). De maximale ankermassa van een binnenvaartschip wordt aangenomen op 1200 kg (Kooijman, 2005).

Dus bij de calamiteit van een vallend scheepsanker wordt de gemiddelde sterkte van de tunnel getoetst bij een ankermassa van 2500 kg¹¹⁰ en de rekenwaarde van de sterkte van de tunnel wordt getoetst bij een ankermassa van 1200 kg.

¹⁰⁹ Doordat aan de belastingkant de toelaatbare overschrijdingskans groter zal zijn (sterktekant maatgevend in deze aangenomen situatie) volgt dat deze verder buiten het bereik van de ankermassa van een zeeschip valt. Daarom dient rekening te worden gehouden met de maximale ankermassa van een binnenvaartschip.

¹¹⁰ Afgeronde waarde i.v.m. onzekerheden omtrent de afleiding van de ankermassa's en de kansen van optreden.

Appendix I Bepaling maatgevende zinkende schip

In deze appendix wordt het maatgevende zinkende schip bepaald voor de tunnels gelegen onder het Noordzeekanaal.

I.1. Kans van optreden

Wanneer een schip tot zinken komt boven een tunnel resulteert dit in de calamiteit van een zinkend schip. De Vries (1988) geeft aan dat de kans op een zinkend schip erg klein is onder normale omstandigheden. De kans zou kleiner dan de calamiteiten van een vallend of slepend scheepsanker zijn (de Vries, 1988). Saveur stelt dat er geen gegevens bekend zijn van grote schepen die gezonken zijn op een tunnel, echter zijn meerdere kleinere schepen wel gezonken of gestrand op een tunnel (Saveur, 1997). Uit het achtergronddocument RBM II volgt een scheepsschadefrequentie¹¹¹ die gelijk is aan $4.14 \cdot 10^{-7}$ per schip per kilometer per jaar bij de hoogste bevaarbaarheidsklasse¹¹² (AVIV, 2011). Echter is de RBM II uitsluitend toepasbaar voor vaarwegen met binnenvaartschepen en kan niet gebruikt worden voor zeeschepen (AVIV, 2011).

Van Lagen (2016) heeft in zijn onderzoek de kans bepaald dat een zinkend schip terechtkomt op de Wijkertunnel op circa $7.7 \cdot 10^{-5}$ per jaar. Wanneer deze kans wordt gedeeld door het aantal schepen¹¹³, wordt de kans op de calamiteit van een zinkend schip bepaald op $1.12 \cdot 10^{-8}$ per schip per jaar. Van Lagen heeft de kans bepaald op basis van gegevens van de Nederlandse waterwegen en studies van de *Øresund Link*. De kans van $1.12 \cdot 10^{-8}$ voor de calamiteit van een zinkend schip op de Wijkertunnel zal worden gebruikt om de kansen van de andere Noordzeekanaal tunnels te bepalen.

Tabel I-1 geeft een overzicht van de kansen van optreden bij de calamiteit van een zinkend schip voor de Noordzeekanaal tunnels. Voor elke tunnel wordt de kritische lengte bepaald waarbinnen een zinkend schip op de tunnel terecht kan komen¹¹⁴. Deze kritische lengte wordt bepaald door tweemaal de lengte van het schip op te tellen bij de breedte van de tunnel (van Lagen, 2016). Voor de lengte van het schip wordt per tunnel de gemiddelde lengte van de scheepvaart bepaald met behulp van de LISA gegevens. Aan de hand van de verhoudingen tussen de kritische lengtes kunnen de jaarlijkse kansen per passerend schip worden bepaald op basis van de Wijkertunnel voor de andere Noordzeekanaal tunnels. De jaarlijkse kans van optreden wordt bepaald door het aantal schepen¹¹⁵ te vermenigvuldigen met de jaarlijkse kans per passerend schip.

Tunnel	Breedte (m)	Gemiddelde L_{oa} (m)	Kritische lengte (m)	P_{schip} (per schip per jaar)	N (aantal schepen)	P_N (per jaar)
<i>Velserspoortunnel</i>	12.25	138.5	290	$1.04 \cdot 10^{-8}$	11088	$1.15 \cdot 10^{-4}$
<i>Velserautotunnel</i>	32.47	138.5	310	$1.11 \cdot 10^{-8}$	11088	$1.23 \cdot 10^{-4}$
<i>Wijkertunnel</i>	30.25	141.5	313	$1.12 \cdot 10^{-8}$	10377	$1.17 \cdot 10^{-4}$
<i>Hemspoortunnel</i>	21.44	136.5	295	$1.06 \cdot 10^{-8}$	6584	$6.98 \cdot 10^{-5}$
<i>Coentunnel</i>	23.15	130	283	$1.02 \cdot 10^{-8}$	2735	$2.78 \cdot 10^{-5}$
<i>Tweede Coentunnel</i>	30	130	290	$1.04 \cdot 10^{-8}$	2735	$2.85 \cdot 10^{-5}$

Tabel I-1: Overzicht kansen van optreden bij de calamiteit van een zinkend schip boven de Noordzeekanaal tunnels.

¹¹¹ Het betreft de kans op een ongeval met penetratie van de huid van het schip (AVIV, 2011).

¹¹² De bevaarbaarheidsklasse is een internationale vaarwegindeling met een onderverdeling in bevaarbaarheid middels zes klassen aan de hand van het laadvermogen en afmetingen van de scheepvaart (AVIV, 2011).

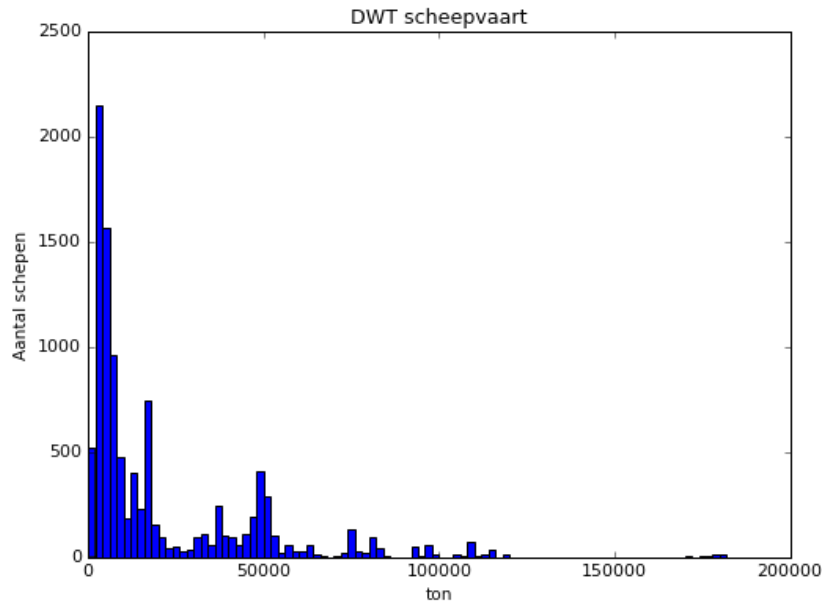
¹¹³ Het aantal schepen boven de Wijkertunnel betreft volgens het onderzoek 6850 (van Lagen, 2016).

¹¹⁴ Aangenomen wordt dat het merendeel van de scheepvaart loodrecht op de tunnel tot zinken zal komen.

¹¹⁵ De bepaling van het aantal schepen is reeds toegelicht in Appendix H.1.

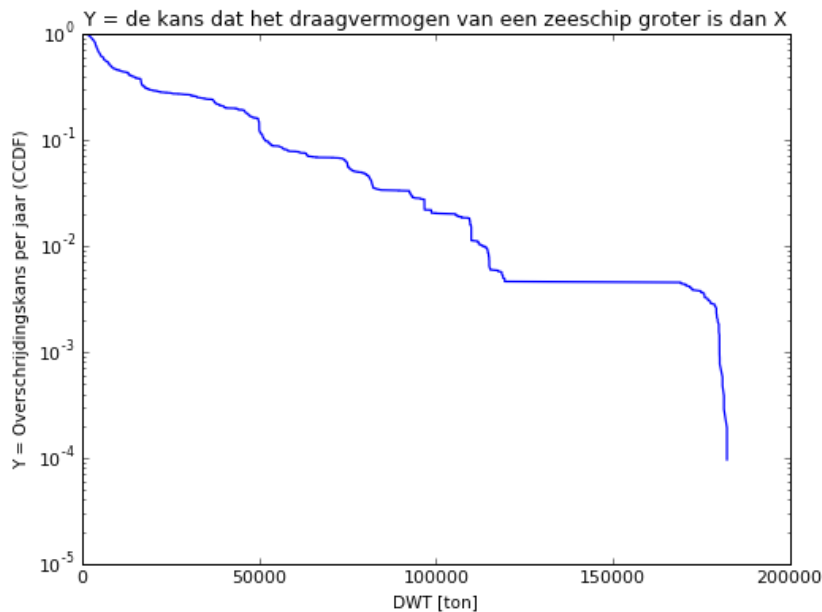
1.2. Kansverdeling draagvermogen scheepvaart

Voor de kansverdeling van het draagvermogen van de scheepvaart op het Noordzeekanaal wordt gebruik gemaakt van de LISA gegevens 2018. Figuur I-1 geeft het histogram van het draagvermogen (DWT) van scheepvaart boven de Velsertunnels weer.



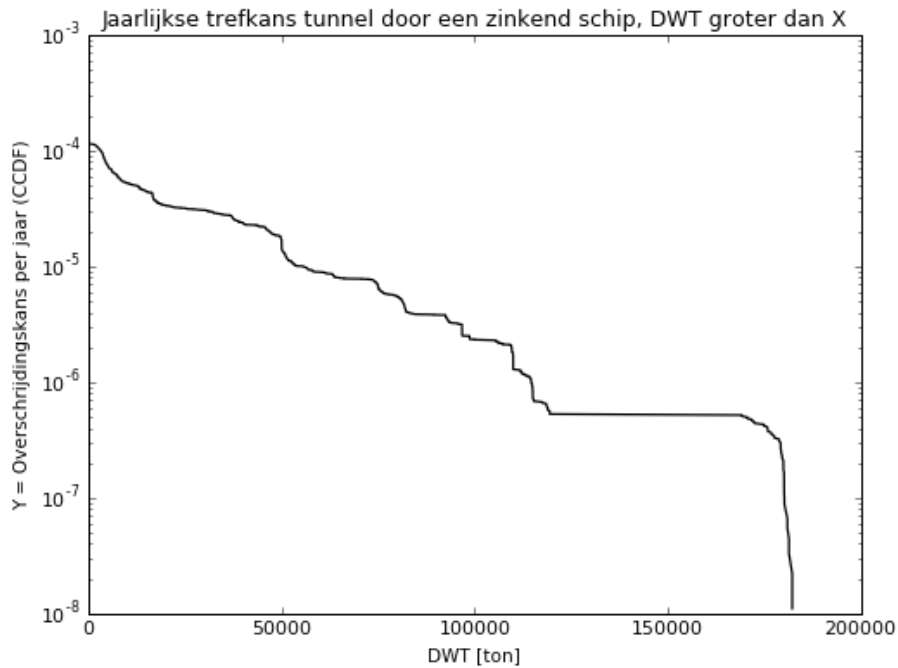
Figuur I-1: Histogram draagvermogen (DWT) van de scheepvaart boven de Velsertunnels in ton (Python).

Op dezelfde wijze als in Appendix H.3 voor de kansverdeling van ankermassa's wordt nu de kansverdeling van het draagvermogen van de scheepvaart bepaald. De draagvermogens worden gesorteerd van laag naar hoog en van een nummer voorzien (1 t/m het aantal passerende schepen). De CDF wordt bepaald door het volgordenummer van per schip te delen door de som van het aantal schepen plus één. De CCDF wordt bepaald door het verschil tussen 1 met de CDF te nemen. Met de CCDF wordt voor elk draagvermogen de jaarlijkse overschrijdingskans gegeven. Figuur I-2 toont deze jaarlijkse overschrijdingskansen van het draagvermogen van de scheepvaart boven de Velsertunnels.

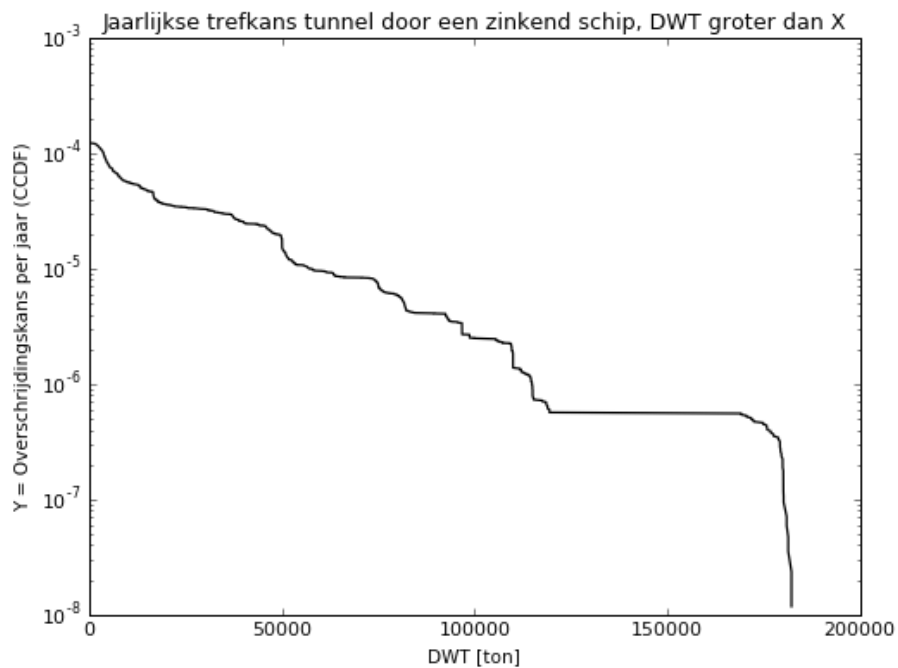


Figuur I-2: Jaarlijkse overschrijdingskansen draagvermogen scheepvaart boven de Velsertunnels (Python).

De overschrijdingskans van het draagvermogen van een schip bij de calamiteit van een zinkend schip wordt bepaald door de overschrijdingskansen van het draagvermogen van de scheepvaart te vermenigvuldigen met de kans van optreden van de calamiteit. Voor de Velsertunnels houdt dit in dat Figuur I-2 wordt vermenigvuldigd met de jaarlijkse kans van optreden van de calamiteit van een zinkend schip uit Tabel I-1. Voor de Velserspoortunnel is de jaarlijkse kans van optreden gelijk aan $1.15 \cdot 10^{-4}$. Figuur I-3 geeft de overschrijdingskans van het draagvermogen van een schip weer voor de Velserspoortunnel bij de calamiteit van een zinkend schip. Voor de Velserautotunnel is de jaarlijkse kans van optreden gelijk aan $1.23 \cdot 10^{-4}$. Figuur I-4 geeft de overschrijdingskans van het draagvermogen van een schip weer voor de Velserautotunnel bij de calamiteit van een zinkend schip.



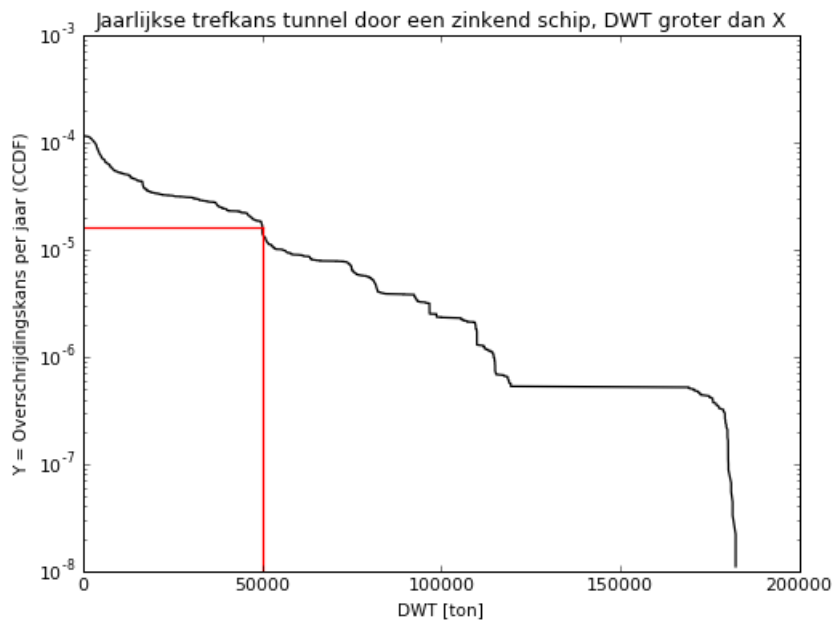
Figuur I-3: Overschrijdingskans draagvermogen bij calamiteit zinkend schip bij de Velserspoortunnel (Python).



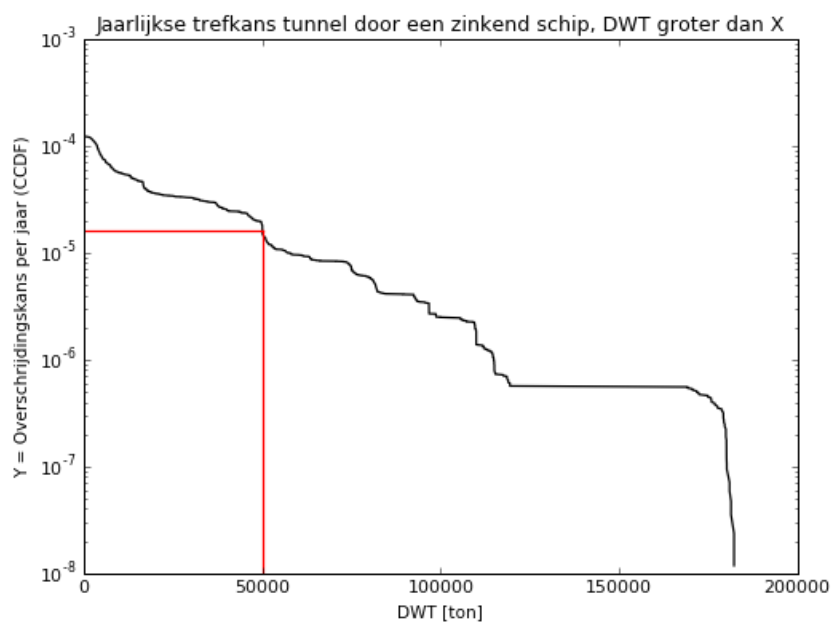
Figuur I-4: Overschrijdingskans draagvermogen bij calamiteit zinkend schip bij de Velserautotunnel (Python).

1.3. Afleiden maatgevende schip

Uit paragraaf 2.5 volgt dat de betrouwbaarheidsindex gelijk dient te zijn aan $\beta = 3.3$ voor de Velsertunnels bij een restlevensduur van 30 jaar, wat resulteert in de toegestane faalkans van $1.61 \cdot 10^{-5}$ per jaar. Zoals reeds behandeld in Appendix H.4, hangt de betrouwbaarheid af van de spreiding aan zowel de belastingkant als de sterktekant. Bij een calamiteit van een zinkend schip wordt de grootste onzekerheid in de belasting verwacht. Er wordt daarom uitgegaan van een toelaatbare overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar voor de bepaling van het maatgevende zinkende schip. Hierdoor is de invloedscoëfficiënt van de belasting gelijk aan $\alpha_s = 1.0$ waardoor die van de sterkte gelijk is aan $\alpha_r = 0$ (TNO, 2009). De calamiteitsbelasting van een zinkend schip kan daardoor getoetst worden bij de gemiddelde waarden voor de materiaaleigenschappen aan de sterktekant. Figuur I-5 en Figuur I-6 geven de bepaling van het maatgevende draagvermogen weer voor scheepvaart boven respectievelijk de Velserspoortunnel en de Velserautotunnel.



Figuur I-5: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserspoortunnel (Python).



Figuur I-6: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserautotunnel (Python).

Uit Figuur I-5 en Figuur I-6 kan worden opgemaakt dat het maatgevende draagvermogen circa 50000 ton bedraagt voor de Velsertunnels. Tabel I-2 geeft een overzicht van de maatgevende schepen weer voor de Noordzeekanaal tunnels inzake de calamiteit van een zinkend schip. Naast het draagvermogen zijn ook de andere relevante eigenschappen van deze schepen gepresenteerd.

Tunnel	Maatgevende schip				
	DWT (ton)	Lengte (L_{oa}) (m)	Breedte (m)	Diepgang (m)	Scheepstype
Velserspoortunnel	49997	183.0	32.2	13.30	Tanker
Velserautotunnel	49999	183.2	32.2	13.50	Tanker
Wijkertunnel	49999	183.2	32.2	13.50	Tanker
Hemspoortunnel	29827	175.0	26.0	10.63	Bulkschip
Coentunnel	3792	89.1	13.3	5.67	GC
Tweede Coentunnel	3850	88.6	12.5	5.42	GC

Tabel I-2: Overzicht maatgevende schepen bij een overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar.

Er dient echter te worden opgemerkt dat alle scheepstypen in beschouwing zijn genomen bij de afleiding van het maatgevende schip. Bij de Velsertunnels en de Wijkertunnel volgde hieruit dat het maatgevende schip een olietanker was. Echter dient een olietanker eerst veel olie te lekken voordat het tot zinken komt¹¹⁶ en bovendien geeft een gezonken olietanker een relatief kleine belasting¹¹⁷ op de tunnel (van Lagen, 2016). Daarom is de afleiding van het maatgevende zinkende schip nogmaals uitgevoerd waarbij het scheepstype tanker niet is meegenomen. Tabel I-3 geeft een overzicht weer van de maatgevende schepen inzake de calamiteit van een zinkend schip voor de Noordzeekanaal tunnels, waarbij het scheepstype tanker niet is meegenomen. Figuur I-7 en Figuur I-8 tonen de bepaling van het draagvermogen van het maatgevende schip voor respectievelijk de Velserspoortunnel en de Velserautotunnel. Per Noordzeekanaal tunnel dient het maatgevende schip die de grootste calamiteitsbelasting veroorzaakt te worden gebruikt uit Tabel I-2 en Tabel I-3. Voor de Velsertunnels houdt dit in dat de bulkschepen uit Tabel I-3 dienen te worden gebruikt.

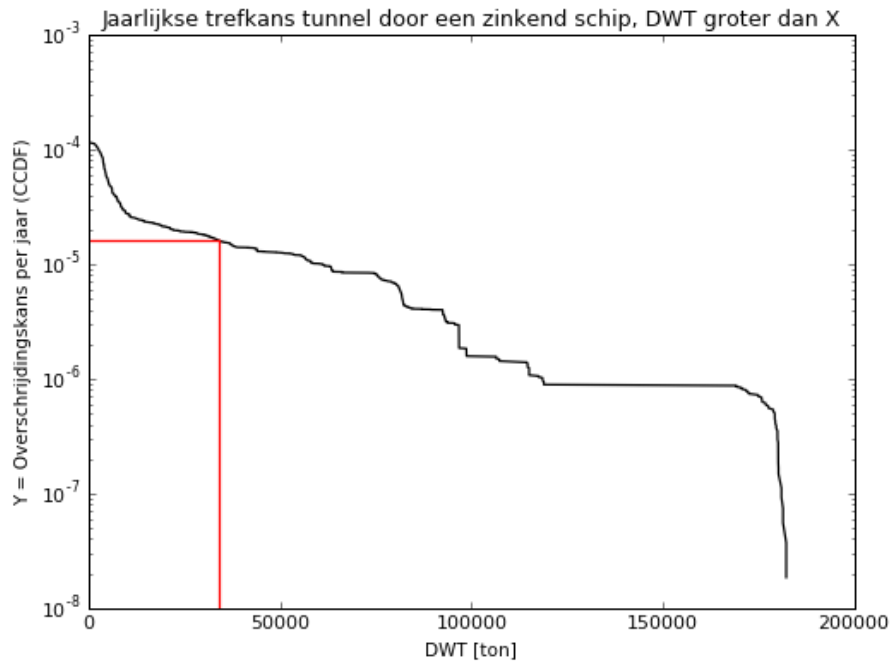
Tunnel	Maatgevende schip				
	DWT (ton)	Lengte (L_{oa}) (m)	Breedte (m)	Diepgang (m)	Scheepstype
Velserspoortunnel	34205	180	30.0	10.10	Bulkschip
Velserautotunnel	37055	177.9	28.6	10.87	Bulkschip
Wijkertunnel	38600	180.0	32	10.52	Bulkschip
Hemspoortunnel	12754	137.1	19.0	8.51	GC
Coentunnel	3700	88.0	13.4	4.91	GC
Tweede Coentunnel	3718	88.0	12.8	5.50	GC

Tabel I-3: Overzicht maatgevende schepen bij een overschrijdingskans van $1.6 \cdot 10^{-5}$ per jaar (zonder het scheepstype 'tanker' mee te nemen in de berekening).

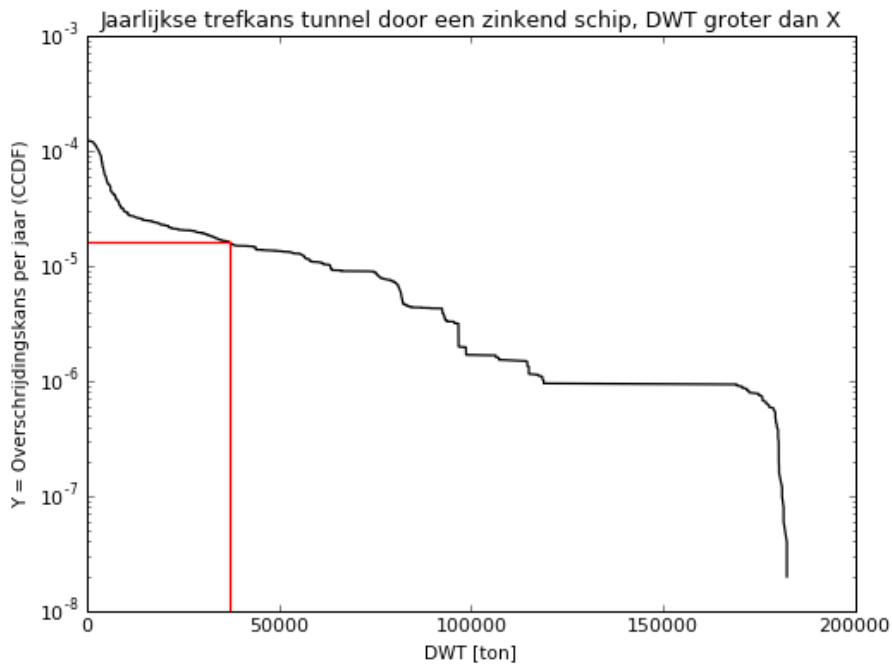
Opgemerkt moet worden dat naast de situatie waarbij de spreiding aan de belastingkant maatgevend wordt geacht, de omgekeerde situatie waarin de spreiding aan de sterktekant maatgevend is, ook dient te worden gecontroleerd. Echter wordt aangenomen dat de calamiteitsbelasting van het zinkende schip dan zodanig veel lager uitvalt dat deze situatie niet maatgevend zal zijn. Daarom wordt in het onderzoek op deze situatie niet verder ingegaan.

¹¹⁶ Doordat olie een lagere dichtheid dan water heeft (van Lagen, 2016).

¹¹⁷ De maximale calamiteitsbelasting bij een gezonken olietanker wordt veroorzaakt door het gewicht van het lege schip (van Lagen, 2016).



Figuur I-7: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserspoortunnel wanneer het scheepstype tanker niet wordt meegenomen (Python).



Figuur I-8: Maatgevende draagvermogen bij calamiteit zinkend schip op de Velserautotunnel wanneer het scheepstype tanker niet wordt meegenomen (Python).

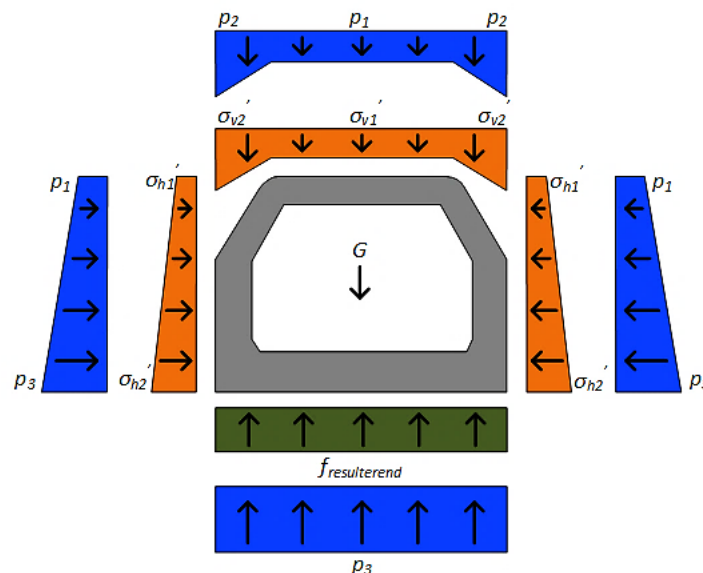
Appendix J Bepaling krachten doorsnede Velserspoortunnel

Deze appendix behandelt de optredende doorsnedekrachten in de Velserspoortunnel in de normale situatie en bij de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een zinkend schip.

J.1. Overzicht belastingen

In de berekening zullen de belastingen van het gewicht van de tunnel(dekking), de waterdrukken en de gronddrukken worden meegenomen¹¹⁸ voor de normale situatie. Figuur J-1 geeft een schematisch overzicht van deze belastingen op de tunnel. Bij de calamiteiten van een vallend scheepsanker of zinkend schip wordt de calamiteitsbelasting toegevoegd aan de belastingen van de normale situatie. Voor alle belastingen wordt de veiligheidsfactor gelijk aan 1.0 aangehouden omdat de berekening zich richt op buitengewone belastingen. Bij de berekening wordt de tunnel in de lengterichting 1 m lang aangehouden om zo de snedekrachten per meter tunnel te kunnen bepalen. De berekening zal worden uitgevoerd op het diepste punt van het tunneltracé aangezien de belastingen hier maatgevend zijn.

Tabel J-1 geeft een overzicht van de grootte van de belastingen op de Velserspoortunnel in de normale situatie. Bij het bepalen van het eigengewicht van de tunnel is het volumegewicht van gewapend beton aangenomen op 25 kN/m^3 . De waterdrukken zijn bepaald voor de situatie met het hoogste waterpeil, welke gelijk is aan -0.30 m NAP (beschreven in subparagraaf 2.1.2). Er is uitgegaan van 10 kN/m^3 voor het volumegewicht van water. Bij de tunneldekking en de omliggende grond is aangenomen dat het volumegewicht 20 kN/m^3 bedraagt. De verticale effectieve gronddruk wordt bepaald uit het verschil van de verticale gronddruk en de waterdruk. De horizontale effectieve gronddruk is gelijk aan 0.5 keer¹¹⁹ de verticale effectieve gronddruk. De resulterende effectieve gronddruk onder de tunnel wordt bepaald uit het krachtenevenwicht van de tunneldoorsnede. Bij de calamiteit van een zinkend schip zal de resulterende effectieve gronddruk dan ook hoger zijn dan in de normale situatie wegens de verticale belasting van het gezonken schip.



Figuur J-1: Overzicht belastingen op de Velserspoortunnel (normale situatie).

¹¹⁸ Andere belastingen, zoals verkeersbelasting, worden niet meegenomen in de berekening omdat de grootte van deze belastingen klein wordt geacht in verhouding met de belastingen die wel worden meegenomen.

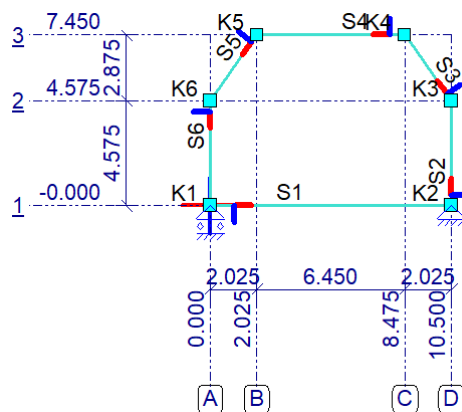
¹¹⁹ Er is neutrale gronddruk aangenomen waardoor geldt dat $\sigma_h' = K_0 \cdot \sigma_v'$ met aanname $K_0 = 0.5$ (Verruijt, 2010).

Krachten op de Velserspoortunnel	
Gewicht gewapend beton (1m tunnel)	1062.5 kN
Waterdruk p_1	160.8 kN/m ²
Waterdruk p_2	195.3 kN/m ²
Waterdruk p_3	251.2 kN/m ²
Verticale effectieve gronddruk σ_{v1}'	8.8 kN/m ²
Verticale effectieve gronddruk σ_{v2}'	43.3 kN/m ²
Horizontale effectieve gronddruk σ_{h1}'	4.4 kN/m ²
Horizontale effectieve gronddruk σ_{h2}'	49.6 kN/m ²

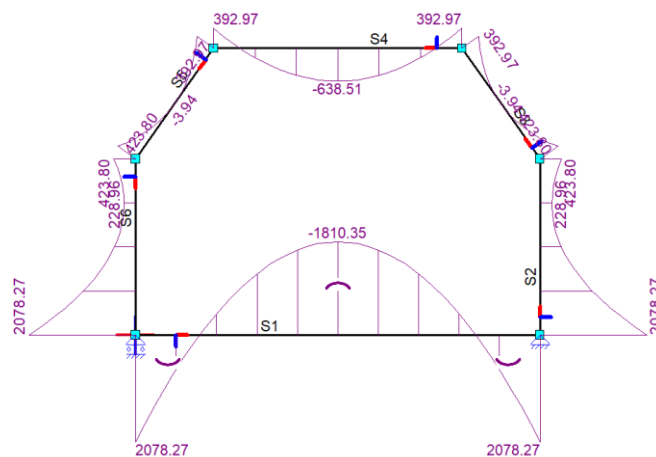
Tabel J-1: Overzicht belastingen op de Velserspoortunnel (normale situatie).

J.2. Optredende doorsnedekrachten in de normale situatie

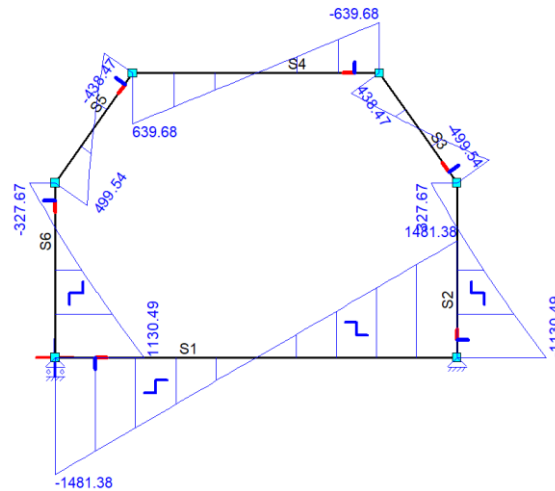
Met behulp van MatrixFrame worden de optredende doorsnedekrachten voor de normale situatie bepaald. Hierbij is de Velserspoortunnel gemodelleerd met oneindig stijve liggers en starre hoeken. De gemodelleerde constructie is niet verend opgelegd omdat er niet zal worden ingegaan op zettingen en de liggers als oneindig stijf zijn aangenomen. De resulterende gronddruk aan de onderzijde van de tunnel wordt bepaald door verticaal evenwicht zodat de oplegreacties van de aangebrachte opleggingen gelijk zijn aan nul. Figuur J-2 geeft de geometrie weer die is gebruikt voor de berekening in MatrixFrame. Voor de afstanden is in de geometrie gebruik gemaakt van de h.o.h. afstanden van de doorsnede van de Velserspoortunnel. De aangebrachte verdeelde belasting is gecompenseerd voor het feit dat de h.o.h. afstanden zijn aangenomen. Figuur J-3, Figuur J-4 en Figuur J-5 geven respectievelijk de resulterende momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn van de Velserspoortunnel weer in de normale situatie.



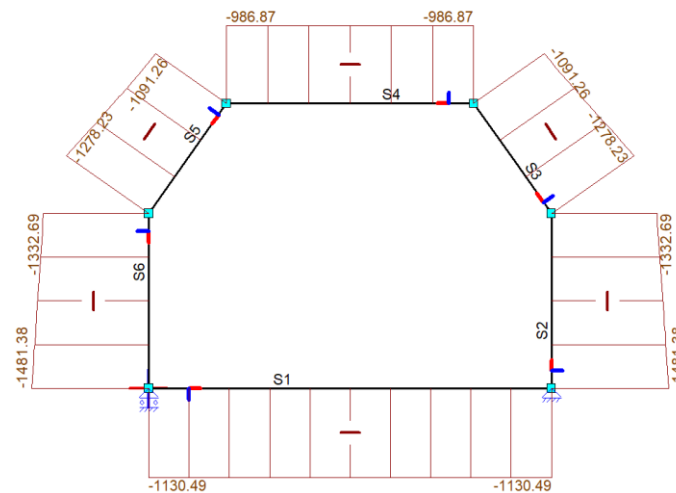
Figuur J-2: Geometrie Velserspoortunnel in MatrixFrame.



Figuur J-3: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel in de normale situatie (MatrixFrame).



Figuur J-4: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel in de normale situatie (MatrixFrame).

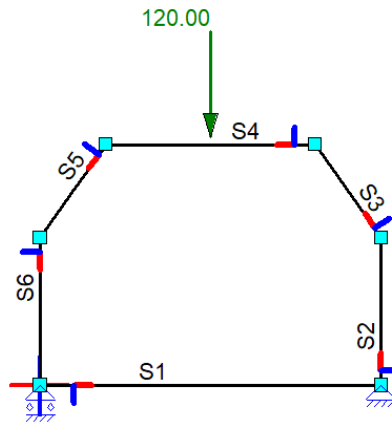


Figuur J-5: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel in de normale situatie (MatrixFrame).

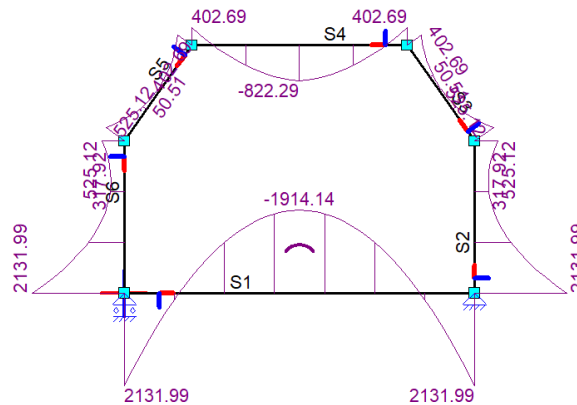
J.3. Optredende doorsnedekrachten bij de calamiteit van een vallend anker

Op dezelfde manier als beschreven in Appendix J.2 wordt nu het optredende buigende moment bepaald bij de calamiteit van een vallend scheepsanker in MatrixFrame. Er wordt gerekend met de statisch equivalente belastingen van Tabel 4-4. Deze belastingen worden gecompenseerd voor het feit dat de momentcapaciteit wordt gecontroleerd per meter lengte doorsnede terwijl de belastingen over een grotere afstand door de tunnel kunnen worden opgenomen. De spreiding wordt aangenomen op de som van tweemaal de dikte van het tunneldak en de equivalente diameter van het 2500 kg scheepsanker. Dit resulteert in een spreidingsafstand van 3.0 meter voor de spoortunnel waardoor de optredende belasting door deze spreidingsafstand wordt gedeeld.

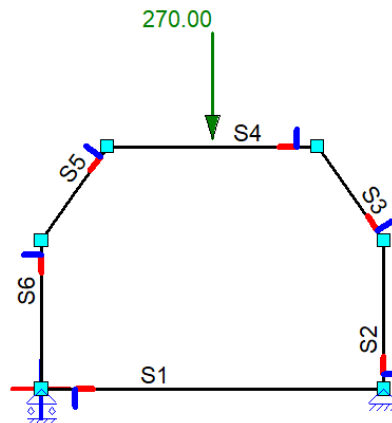
De belastingen van Tabel 4-4 worden hierdoor gedeeld door 3.0 en als puntlast op het tunneldak aangebracht zoals weergegeven in Figuur J-6 en Figuur J-8. Verder worden de belastingen van de normale situatie, zoals weergegeven in Figuur J-1, meegenomen in de berekening. Figuur J-7 en Figuur J-9 geven de momentenlijnen weer voor de statisch equivalente belastingen.



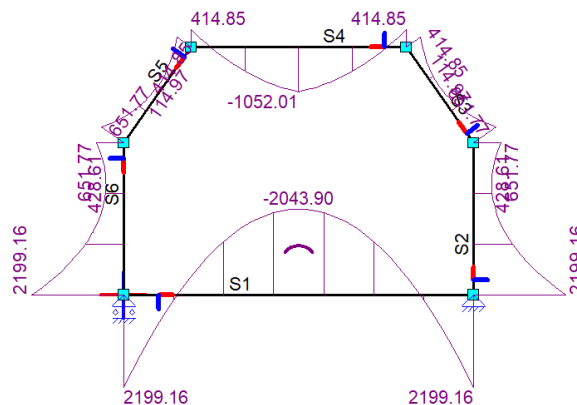
Figuur J-6: Statisch equivalente belasting van 360 kN aangebracht op de Velserspoortunnel voor 1m lengte (MatrixFrame).



Figuur J-7: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij de statische equivalente belasting van 360 kN (MatrixFrame).



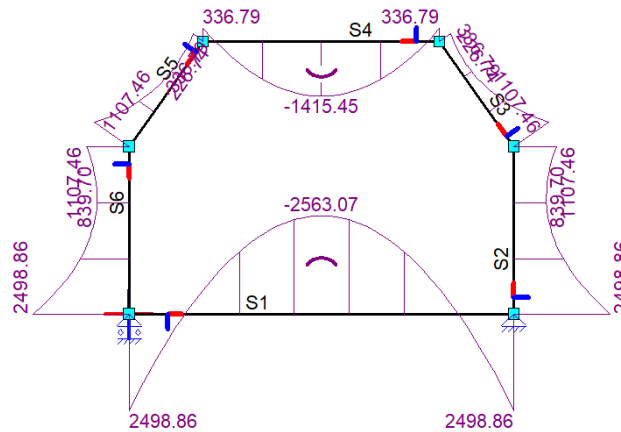
Figuur J-8: Statisch equivalente belasting van 810 kN aangebracht op de Velserspoortunnel voor 1m lengte (MatrixFrame).



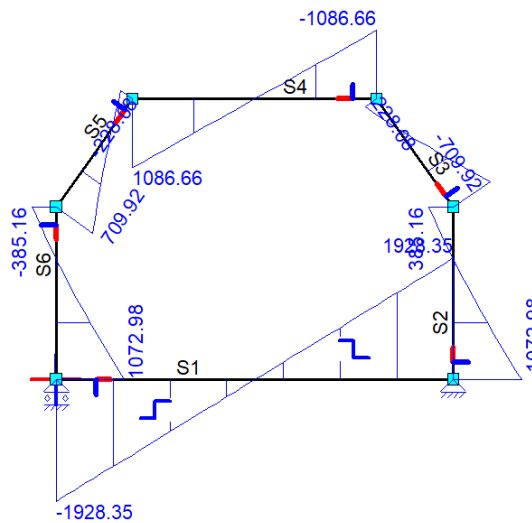
Figuur J-9: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij de statische equivalente belasting van 810 kN (MatrixFrame).

J.4. Optredende doorsnedekrachten bij de calamiteit van een zinkend schip

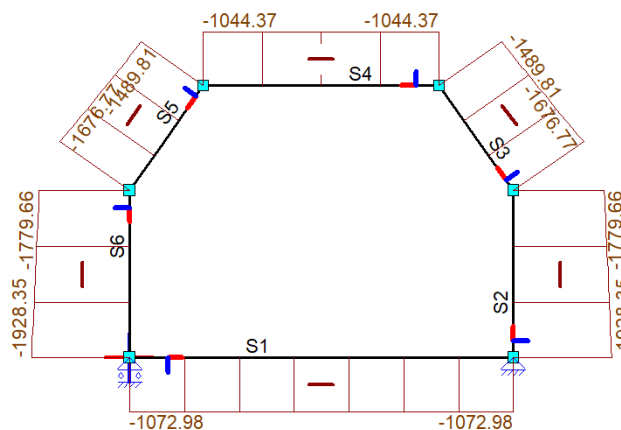
Op vergelijkbare manier als beschreven in Appendices J.2 en J.3 worden nu de optredende doorsnedekrachten bepaald bij de calamiteit van een zinkend schip in MatrixFrame. Op het tunneldak wordt nu een calamiteitsbelasting van 119.2 kN/m² aangebracht (Tabel 4-11 van paragraaf 4.3). Naast deze belasting worden de belastingen van de normale situatie, zoals weergegeven in Figuur J-1, wederom meegenomen in de berekening. Figuur J-10, Figuur J-11 en Figuur J-12 geven respectievelijk de resulterende momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn van de Velserspoortunnel weer bij de calamiteit van een zinkend schip.



Figuur J-10: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame).



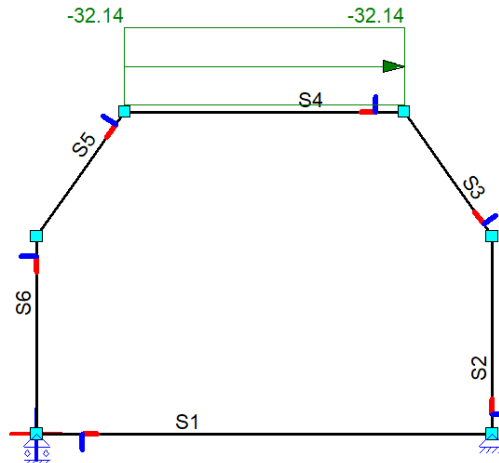
Figuur J-11: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame).



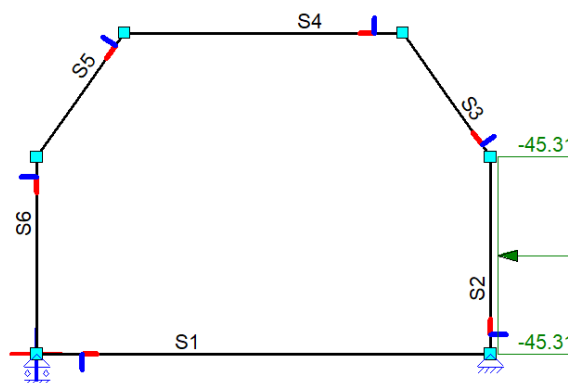
Figuur J-12: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame).

J.5. Optredende doorsnedekrachten bij de calamiteit van een aanvendend schip

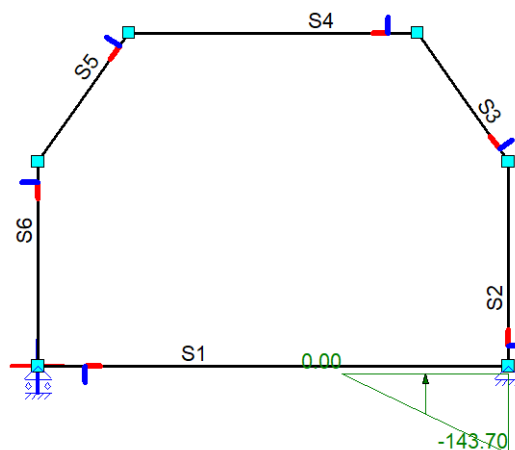
Met behulp van MatrixFrame zijn de optredende doorsnedekrachten bepaald bij de calamiteit van een aanvendend schip. Op het tunneldak wordt de calamiteitsbelasting van 207 kN aangebracht, zoals berekend in Tabel 4-13 van paragraaf 4.4. Naast deze belasting worden de belastingen van de normale situatie, zoals weergegeven in Figuur J-1, wederom meegenomen in de berekening. Figuur J-13, Figuur J-14 en Figuur J-15 tonen respectievelijk de aangebrachte belasting, zijwaartse gronddruk en resulterende gronddruk onder de tunnel bij de calamiteit van een aanvendend schip. Figuur J-16, Figuur J-17 en Figuur J-18 geven respectievelijk de resulterende momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn van de Velserspoortunnel weer bij de calamiteit van een aanvendend schip.



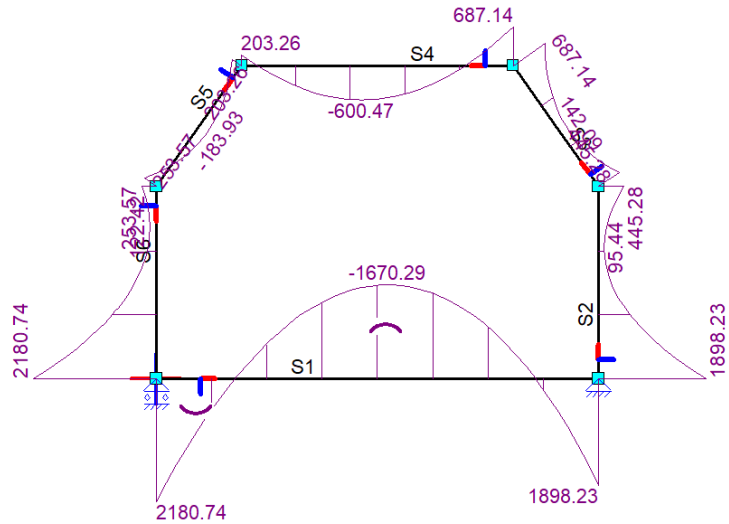
Figuur J-13: Belasting aanvendend schip op de Velserspoortunnel van 207 kN verdeeld over het tunneldak (MatrixFrame).



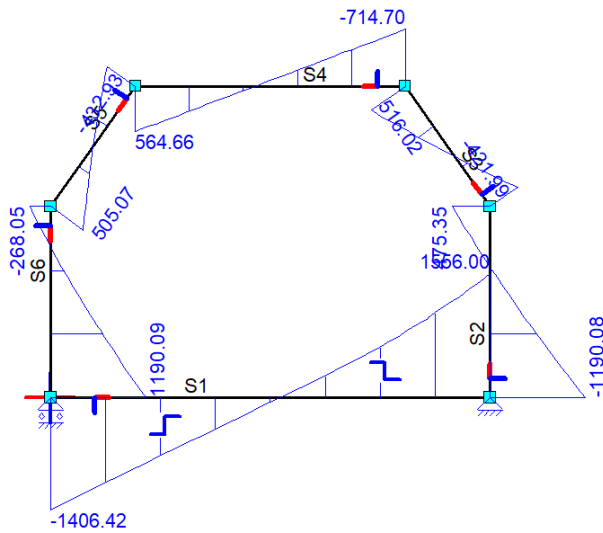
Figuur J-14: Aangenomen zijwaartse gronddrukken door de optredende calamiteitsbelasting (MatrixFrame).



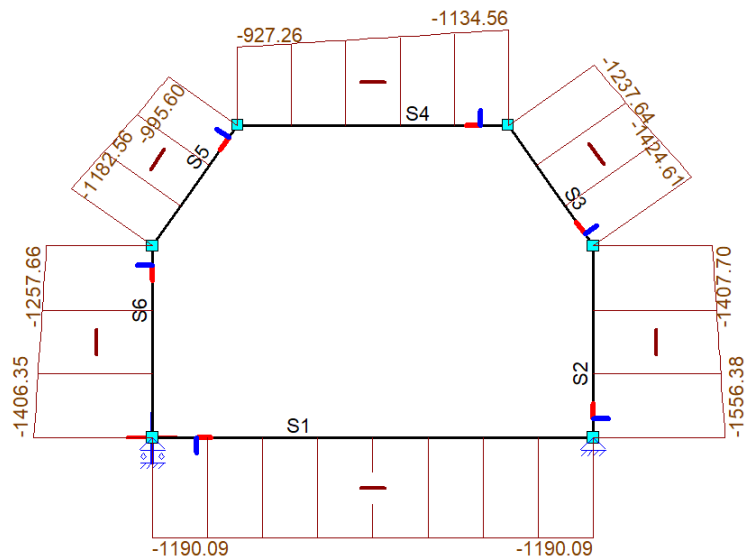
Figuur J-15: Optredende resulterende gronddrukken bij de optredende calamiteitsbelasting (MatrixFrame).



Figuur J-16: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteitsbelasting aanvarend schip (MatrixFrame).



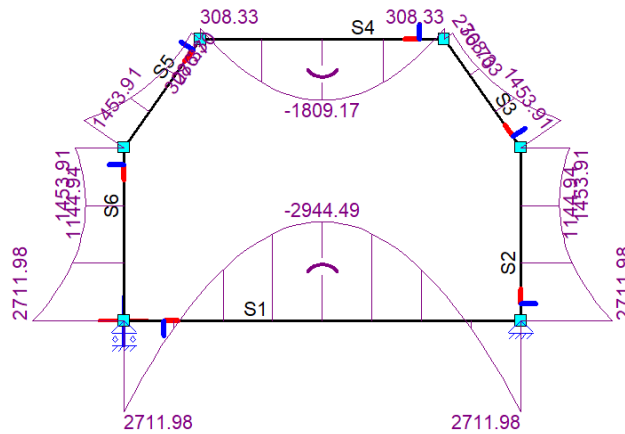
Figuur J-17: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteitsbelasting aanvarend schip (MatrixFrame).



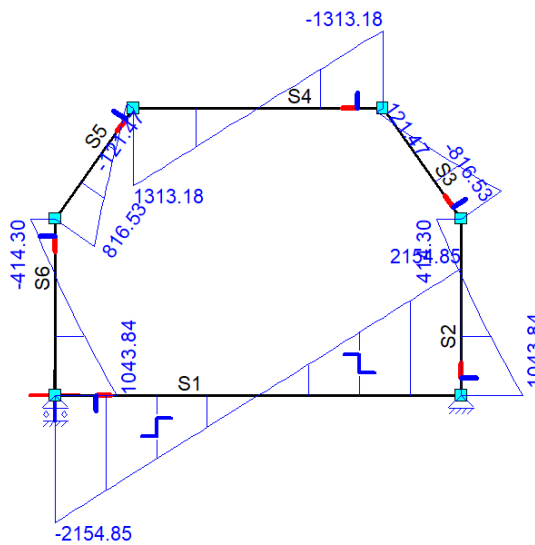
Figuur J-18: Normalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij calamiteitsbelasting aanvarend schip (MatrixFrame).

J.6. Optredende doorsnedekrachten bij de maximale belasting door een zinkend schip

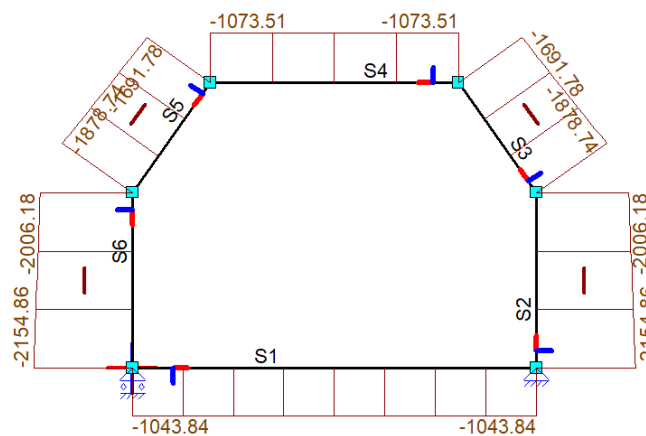
In MatrixFrame is de maximale belasting door de calamiteit van een zinkend schip bepaald waarbij de Velserspoortunnel nog in staat is om deze belasting op te kunnen nemen. De tunnelweerstand m.b.t. moment- en dwarskrachtcapaciteit is bepaald in Appendix L. De tunnel blijkt maximaal een calamiteitsbelasting van 179.6 kN/m² te kunnen weerstaan (i.c.m. de krachten van de normale situatie van Appendix J.2). Figuur J-19, Figuur J-20 en Figuur J-21 tonen respectievelijk de resulterende momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn onder deze maximale belasting.



Figuur J-19: Momentenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame).



Figuur J-20: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame).



Figuur J-21: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserspoortunnel bij maximale belasting zinkend schip (MatrixFrame).

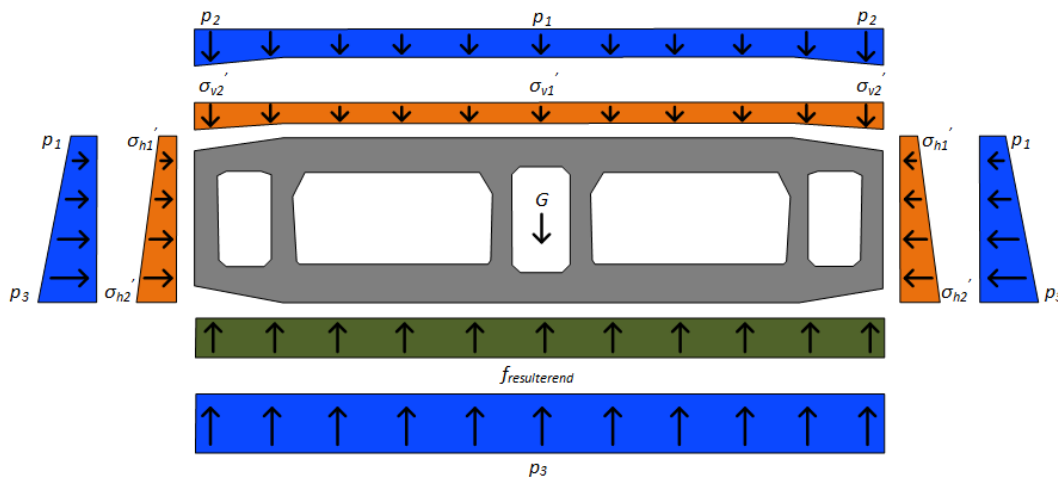
Appendix K Bepaling krachten doorsnede Velserautotunnel

Deze appendix behandelt de optredende doorsnedekrachten in de Velserautotunnel in de normale situatie en bij de calamiteiten van een vallend scheepsanker en een zinkend schip.

K.1. Overzicht belastingen

In de berekening zullen de belastingen van het gewicht van de tunnel(dekking), de waterdrukken en de grondrukken worden meegenomen¹²⁰ voor de normale situatie. Figuur K-1 geeft een schematisch overzicht van deze belastingen op de tunnel. Bij de calamiteiten van een vallend scheepsanker of zinkend schip wordt de calamiteitsbelasting toegevoegd aan de belastingen van de normale situatie. Voor alle belastingen wordt de veiligheidsfactor gelijk aan 1.0 aangehouden omdat de berekening zich richt op buitengewone belastingen. Bij de berekening wordt de tunnel in de lengterichting 1 m lang aangehouden om zo de snedekrachten per meter tunnel te kunnen bepalen. De berekening zal worden uitgevoerd op het diepste punt van het tunneltracé aangezien de belastingen hier maatgevend zijn.

Tabel K-1 geeft een overzicht van de grootte van de belastingen op de Velserautotunnel in de normale situatie. Bij het bepalen van het eigengewicht van de tunnel is het volumegewicht van gewapend beton aangenomen op 25 kN/m^3 . De waterdrukken zijn bepaald voor de situatie met het hoogste waterpeil, welke gelijk is aan -0.30 m NAP (beschreven in subparagraaf 2.1.2). Er is uitgegaan van 10 kN/m^3 voor het volumegewicht van water. Bij de tunneldekking en de omliggende grond is aangenomen dat het volumegewicht 20 kN/m^3 bedraagt. De verticale effectieve gronddruk wordt bepaald uit het verschil van de verticale gronddruk en de waterdruk. De horizontale effectieve gronddruk is gelijk aan 0.5 keer¹²¹ de verticale effectieve gronddruk. De resulterende effectieve gronddruk onder de tunnel wordt bepaald uit het krachtenevenwicht van de tunneldoorsnede. Bij de calamiteit van een zinkend schip zal de resulterende effectieve gronddruk dan ook hoger zijn dan in de normale situatie wegens de verticale belasting van het gezonken schip.



Figuur K-1: Overzicht belastingen op de Velserautotunnel (normale situatie).

¹²⁰ Andere belastingen, zoals verkeersbelasting, worden niet meegenomen in de berekening omdat de grootte van deze belastingen klein wordt geacht in verhouding met de belastingen die wel worden meegenomen.

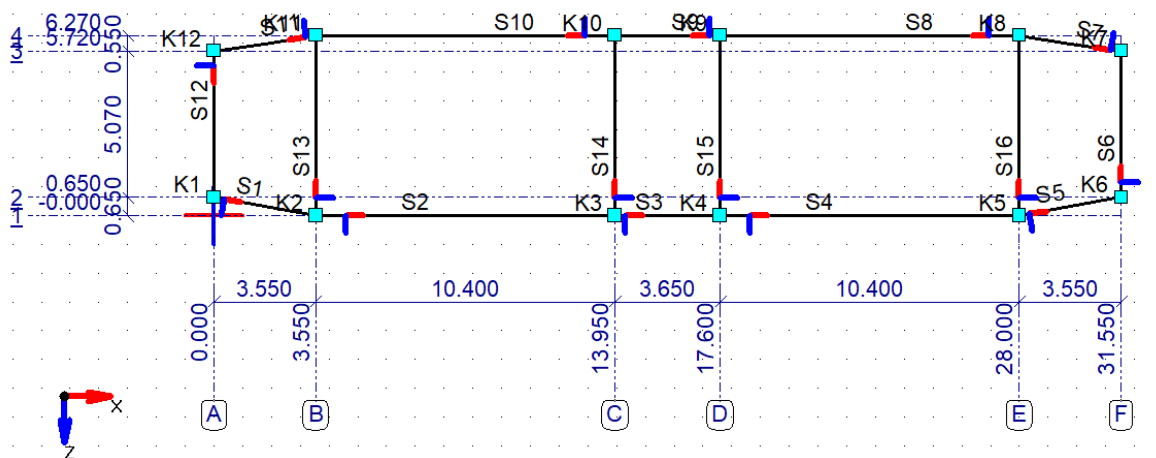
¹²¹ Er is neutrale gronddruk aangenomen waardoor geldt dat $\sigma_h' = K_0 \cdot \sigma_v'$ met aanname $K_0 = 0.5$ (Verruijt, 2010).

Krachten op de Velserautotunnel	
Gewicht gewapend beton (1m tunnel)	3077.7 kN
Waterdruk p_1	170.4 kN/m ²
Waterdruk p_2	175.9 kN/m ²
Waterdruk p_3	248.1 kN/m ²
Verticale effectieve gronddruk σ_{v1}'	18.4 kN/m ²
Verticale effectieve gronddruk σ_{v2}'	23.9 kN/m ²
Horizontale effectieve gronddruk σ_{h1}'	9.2 kN/m ²
Horizontale effectieve gronddruk σ_{h2}'	48.05 kN/m ²

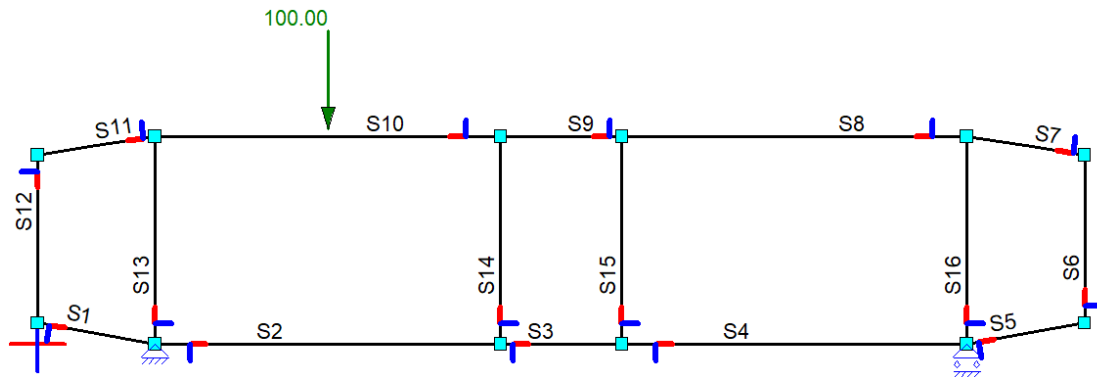
Tabel K-1: Overzicht belastingen op de Velserautotunnel (normale situatie).

K.2. Optredende doorsnedekrachten in de normale situatie

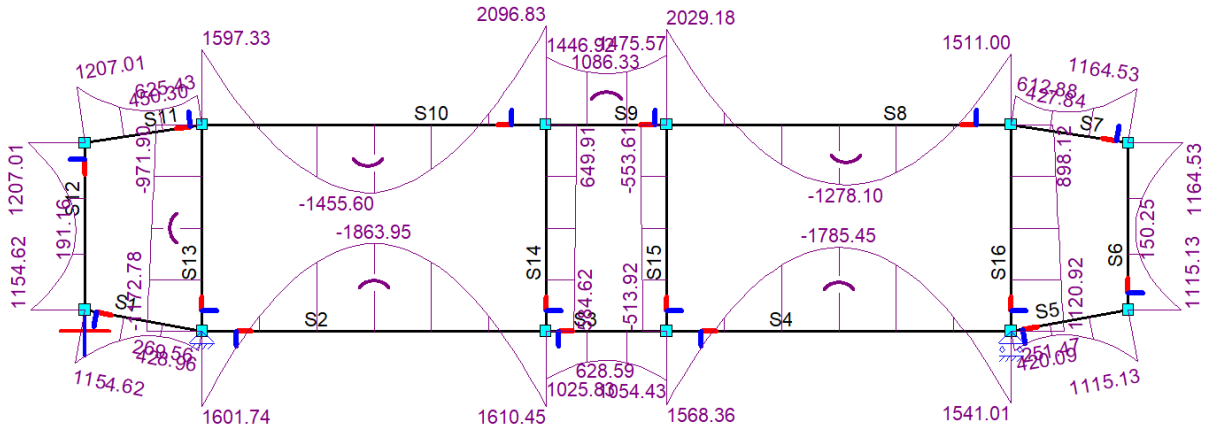
Met behulp van MatrixFrame worden de optredende doorsnedekrachten voor de normale situatie bepaald. Hierbij is de Velserautotunnel gemodelleerd met oneindig stijve liggers en starre hoeken. De gemodelleerde constructie is niet verend opgelegd omdat er niet zal worden ingegaan op zettingen en de liggers als oneindig stijf zijn aangenomen. De resulterende gronddruk aan de onderzijde van de tunnel wordt bepaald door verticaal evenwicht zodat de oplegreacties van de aangebrachte opleggingen gelijk zijn aan nul. Figuur K-2 geeft de geometrie weer die is gebruikt voor de berekening in MatrixFrame. Voor de afstanden is in de geometrie gebruik gemaakt van de h.o.h. afstanden van de doorsnede van de Velserautotunnel. De aangebrachte verdeelde belasting is gecompenseerd voor het feit dat de h.o.h. afstanden zijn aangenomen. Figuur K-3, Figuur K-4 en Figuur K-5 geven respectievelijk de resulterende momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn van de Velserautotunnel weer in de normale situatie.



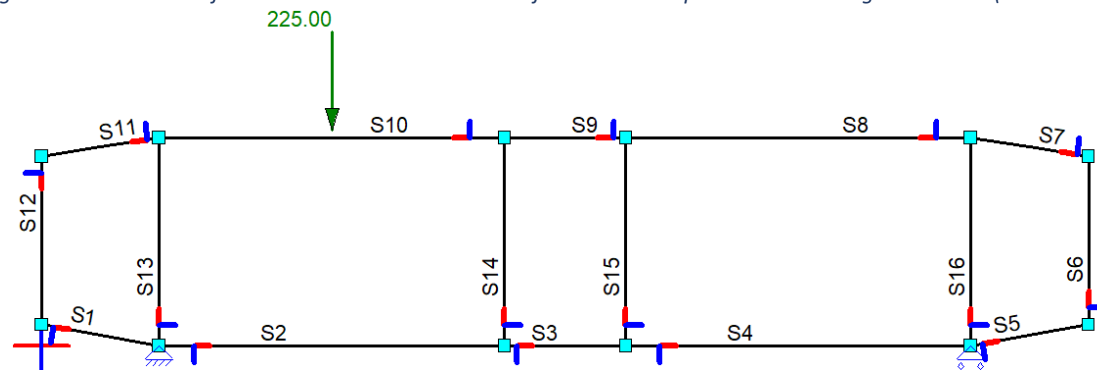
Figuur K-2: Geometrie Velserautotunnel in MatrixFrame.



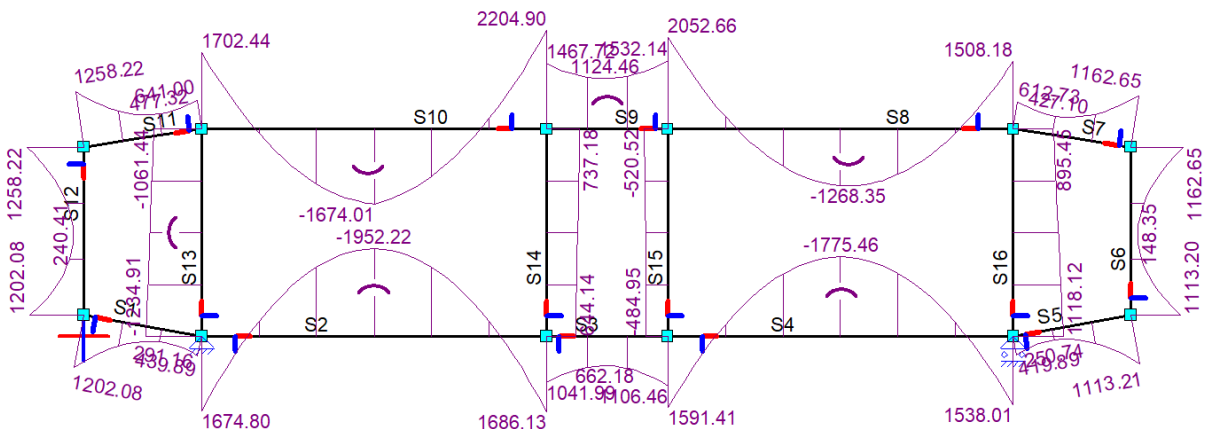
Figuur K-6: Statisch equivalente belasting van 360 kN aangebracht op de Velserautotunnel voor 1m lengte (MatrixFrame).



Figuur K-7: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij de statische equivalente belasting van 360 kN (MatrixFrame).



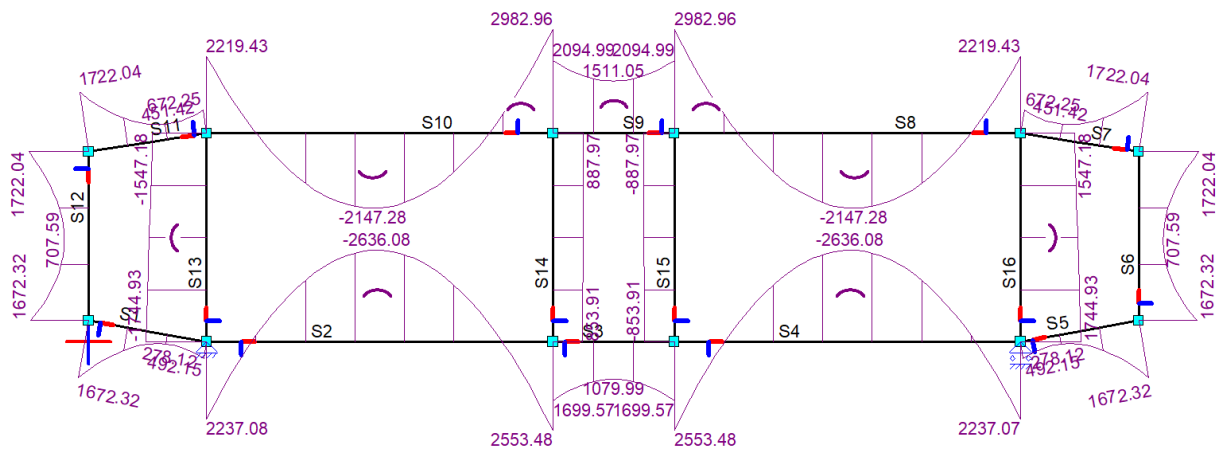
Figuur K-8: Statisch equivalente belasting van 810 kN aangebracht op de Velserautotunnel voor 1m lengte (MatrixFrame).



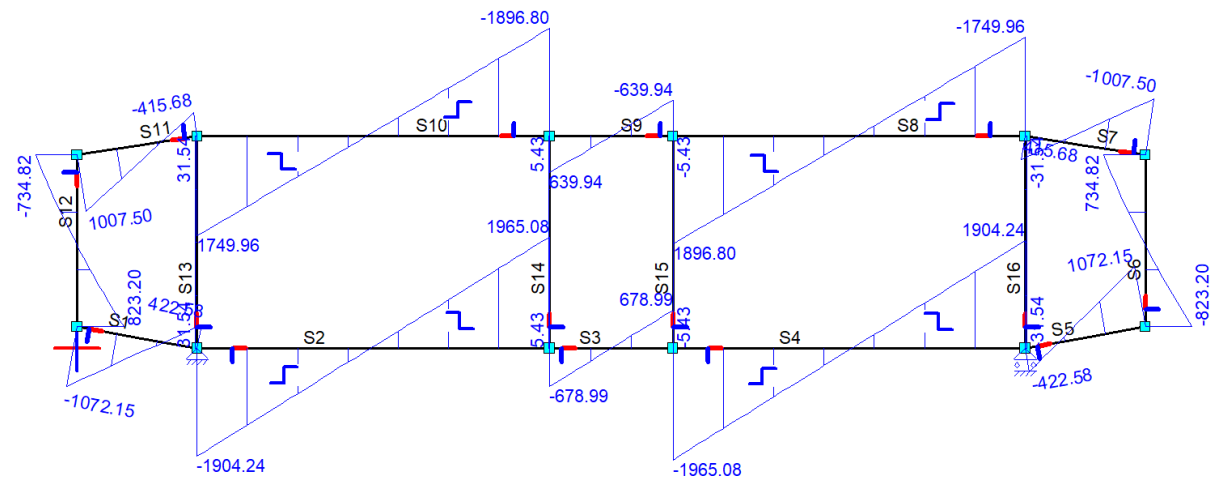
Figuur K-9: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij de statische equivalente belasting van 810 kN (MatrixFrame).

K.4. Optredende doorsnede krachten bij de calamiteit van een zinkend schip

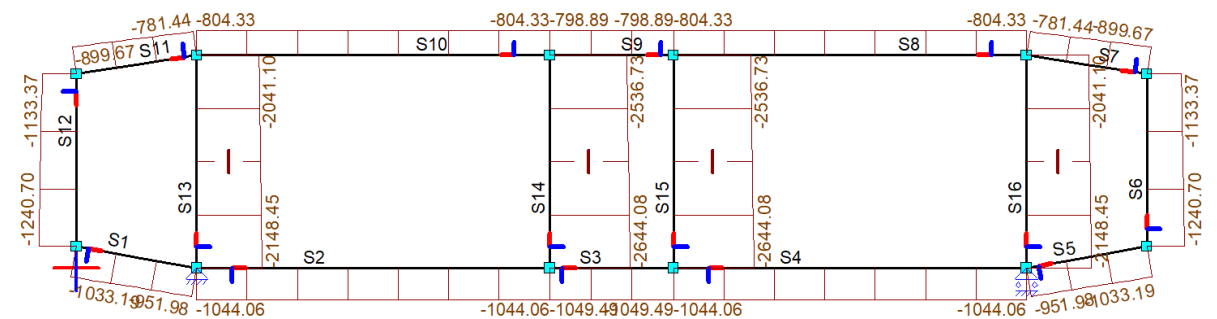
Op vergelijkbare manier als beschreven in Appendices K.2 en K.3 worden nu de optredende doorsnede krachten bepaald bij de calamiteit van een zinkend schip in MatrixFrame. Op het tunneldak wordt nu een calamiteitsbelasting van 125.6 kN/m² aangebracht (Tabel 4-11 van paragraaf 4.3). Naast deze belasting worden de belastingen van de normale situatie, zoals weergegeven in Figuur K-1, wederom meegenomen in de berekening. Figuur K-10, Figuur K-11 en Figuur K-12 geven respectievelijk de resulterende momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn van de Velserautotunnel weer bij de calamiteit van een zinkend schip.



Figuur K-10: Momentenlijn doorsnede Velserautotunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame).



Figuur K-11: Dwarskrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame).



Figuur K-12: Normaalkrachtenlijn doorsnede Velserautotunnel bij calamiteit zinkend schip (MatrixFrame).

Appendix L Weerstand doorsnede Velsertunnels

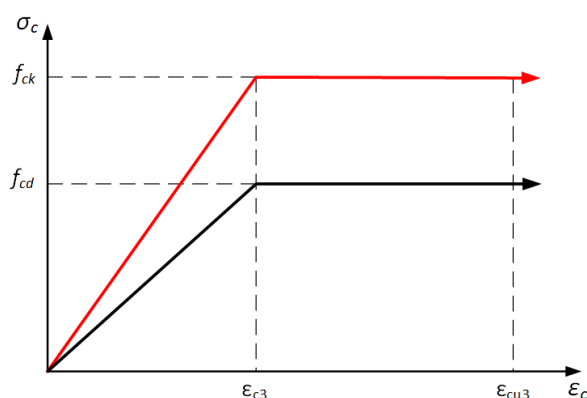
Deze appendix behandelt de bepaling van de weerstand van de Velsertunnels. Allereerst wordt ingegaan op de karakteristieken van de Velsertunnels (Appendix L.1). Vervolgens worden de momentcapaciteit (Appendix L.2), dwarskrachtcapaciteit (Appendix L.3) en ponscapaciteit (Appendix L.4) bepaald voor de Velsertunnels.

L.1. Karakteristieken Velsertunnels

Uit de RBK volgt dat bij berekening van tunnels van voor 1976, gebruik mag worden gemaakt van de betonsterkteklasse C35/45¹²² (Rijkswaterstaat, 2013). Figuur L-1 en Tabel L-1 tonen respectievelijk het aangenomen bi-lineair spanning-rek-diagram voor beton en de eigenschappen van de sterkteklasse C35/45 (NEN-EN 1992-1-1). De RBK stelt dat bij berekening aan betonstaal, bij constructies van voor 1964, nooit gebruik hoeft te worden gemaakt van lagere waarden dan $f_{yk} = 220 \text{ N/mm}^2$ en $f_{yd} = 191 \text{ N/mm}^2$ (Rijkswaterstaat, 2013). De Velsertunnels zijn gebouwd met glad staal. De RBK en Eurocode 2 zijn ook van toepassing op glad staal (Rijkswaterstaat, 2013). Figuur L-2 en Tabel L-2 tonen de spannings-rek-relatie¹²³ en eigenschappen van het betonstaal (NEN-EN 1992-1-1).

Betonsterkteklasse C35/45	
Karakteristieke cilinderdruksterkte:	$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$
Rekenwaarde druksterkte:	$f_{cd} = 23,33 \text{ N/mm}^2$
Betonstuik bij de piekspanning f_c :	$\epsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
Grenswaarde betonstuik:	$\epsilon_{cu3} = 3.5 \text{ ‰}$
Elasticiteitsmodulus:	$E_{cm} = 34000 \text{ N/mm}^2$

Tabel L-1: Eigenschappen betonsterkteklasse C35/45 (NEN-EN 1992-1-1).



Figuur L-1: Bi-lineair spanning-rek-relatie beton (NEN-EN 1992-1-1).

Eigenschappen betonstaal	
Karakteristieke vloeigrens:	$f_{yk} = 220 \text{ N/mm}^2$
Rekenwaarde van de vloeigrens:	$f_{yd} = 191 \text{ N/mm}^2$
Karakteristieke rek ¹²⁴ :	$\epsilon_{uk} = 3.0 \text{ ‰}$
Rekenwaarde van de rek ¹²⁵ :	$\epsilon_{ud} = 2.7 \text{ ‰}$
Elasticiteitsmodulus:	$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$

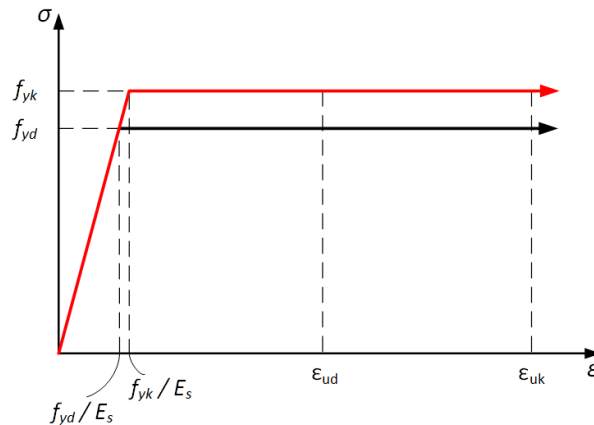
Tabel L-2: Aangenomen eigenschappen glad betonstaal Velsertunnels (Rijkswaterstaat, 2013).

¹²² Indien een tunnel geen zichtbare verschijnselen vertoont en er geen reden is om te twijfelen aan de toestand van de betonconstructie (Rijkswaterstaat, 2013).

¹²³ Uitgegaan van een horizontale tweede tak bij oude betonstaalsoorten volgens RBK (Rijkswaterstaat, 2013).

¹²⁴ Bij de renovatie van de Velserautotunnel is de minimum breukrek van het betonstaal op 3.0% vastgesteld.

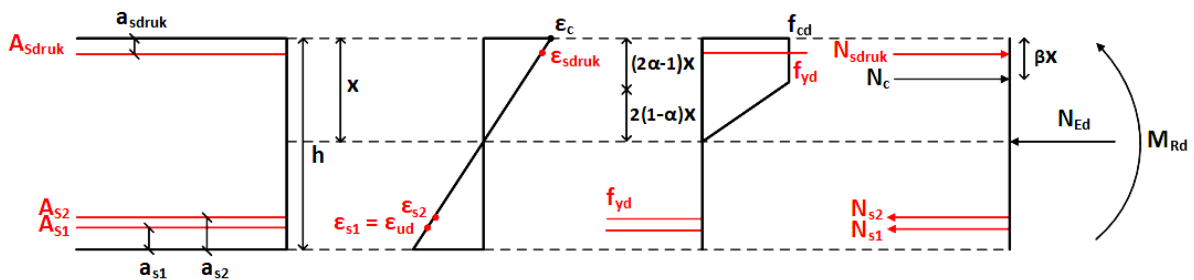
¹²⁵ Uit de Nationale Bijlage bij NEN-EN 1992-1-1 volgt dat $\epsilon_{ud} = 0.9\epsilon_{uk}$.



Figuur L-2: Geschematiseerde spannings-tek-relatie betonstaal (NEN-EN 1992-1-1).

L.2. Momentcapaciteit Velsertunnels

Voor de Velsertunnels dient de momentcapaciteit te worden bepaald voor het tunneldak en de tunnelvloer (dwarsrichting). Hierbij dient onderscheid te worden gemaakt in de karakteristieke waarde en de rekenwaarde van de momentcapaciteit. Figuur L-3 toont schematisch de bepaling van de momentcapaciteit voor een gewapende betonnen doorsnede welke belast wordt door een combinatie van buiging en normaalkracht. Voor de Velsertunnels geldt dat het wapeningspercentage en de breukrek van het betonstaal zodanig laag zijn dat het beton niet in staat is om maximale betonstuik ($\epsilon_c < \epsilon_{cu3}$) te bereiken¹²⁶. Daarom geldt dat de rek van het betonstaal gelijk is aan de breukrek en dat de staalspanning gelijk is aan de vloeispanning¹²⁷. De rekken in de betondrukzone (ϵ_c) worden bepaald uit de verhoudingen in het rekdiagram van Figuur L-3¹²⁸. De hoogte van de betondrukzone (x) wordt bepaald uit het krachterevenwicht van de doorsnede, zoals weergegeven in vergelijking (L-1). De spanning in de betondrukzone (f_c) is afhankelijk van het bereiken van betonstuik ϵ_{c3} . Voor de uiterste vezel van de betondrukzone wordt als uitgangspunt genomen dat betonstuik wordt bereikt¹²⁹. Verder geldt het uitgangspunt dat de drukwapening vloeit. De factoren α en β worden bepaald door middel van de verhoudingen van het rekdiagram uit Figuur L-3. De momentcapaciteit wordt bepaald per meter lengte van de tunnel waardoor b gelijk is aan 1000 mm.



Figuur L-3: Bepaling momentcapaciteit voor doorsnede onder combinatie van buiging en normaalkracht (in de figuur is de situatie van de rekenwaarde weergegeven).

$$N_c = \alpha \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \tag{L-1}$$

$$\Sigma H = 0 \rightarrow N_c + N_{sdruk} - N_{s1} - N_{s2} - N_{Ed} = 0$$

¹²⁶ Hierdoor zijn de waarden van factoren α en β dus lager dan 0.75 en 0.39.

¹²⁷ Er geldt dus dat $\epsilon_{s1} = \epsilon_{uk}$ en $f_y = f_{yk}$ (karakteristieke waarden) en $\epsilon_{s1} = \epsilon_{ud}$ en $f_y = f_{yd}$ (rekenwaarde).

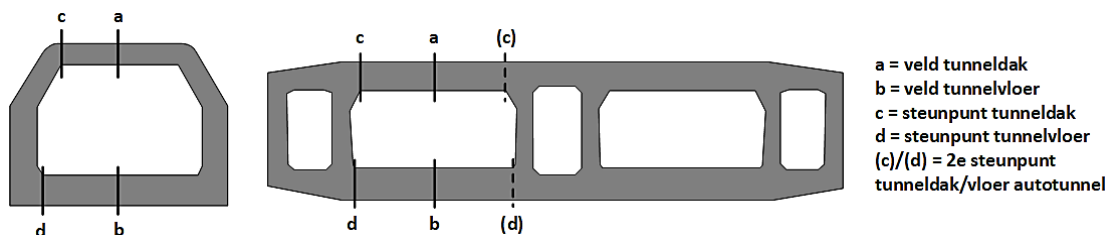
¹²⁸ De uiterste rek in de betondrukzone wordt bijvoorbeeld bepaald door $\epsilon_c = (x/(h-a_{s1}-x)) \cdot \epsilon_{s1}$.

¹²⁹ Waardoor $f_c = f_{ck}$ (karakteristieke waarde) en $f_c = f_{cd}$ (rekenwaarde).

De uitgangspunten omtrent het bereiken van betonstuik in de uiterste vezel van de betondrukzone en het vloeien van de drukwapening dienen te worden gecontroleerd alvorens de momentcapaciteit kan worden bepaald. Vervolgens wordt de momentcapaciteit worden bepaald met vergelijking (L-2).

$$M_{Rd} = N_c \cdot \left(\frac{h}{2} - \beta \cdot x\right) + N_{sdruk} \cdot \left(\frac{h}{2} - a_{sdr}\right) + N_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - a_{s1}\right) + N_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - a_{s2}\right) \quad (L-2)$$

Figuur L-4 toont schematisch de doorsnedes van de Velsertunnels waar de momentcapaciteit dient te worden bepaald. Voor beide tunnels wordt de weerstand bepaald voor zowel het tunneldak als de vloer, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen het veldmoment en het steunpuntsmoment. Bij de autotunnel verschilt de hoeveelheid wapening tussen de twee steunpunten waardoor de afwijkende gegevens van het 2^e steunpunt (met de stippellijn in de figuur) in de resultaten tussen haakjes worden getoond. Tabel L-3 geeft een overzicht van de gegevens van de langswapening ter plaatse van het veldmoment voor het tunneldak en vloer van de Velsertunnels. Tabel L-4 geeft een overzicht van de langswapening gegevens ter plaatse van het steunpuntsmoment (zie Appendices A.6 en A.7).



Figuur L-4: Overzicht doorsnedes voor de bepaling van de momentcapaciteit.

Parameter			Velserspoortunnel		Velserautotunnel	
			Dak	Vloer	Dak	Vloer
Dikte tunneldak	h	[mm]	1150	1450	1450	1550
Oppervlakte wapening	A _{s1}	[mm ²]	5655	5655	4791	5655
	A _{s2}	[mm ²]	-	5655	-	2827
	A _{sdruk}	[mm ²]	5655	5655	2827	2827
Afstand wapening	a _{s1}	[mm]	91	91	91	91
	a _{s2}	[mm]	-	151	-	151
	a _{sdruk}	[mm]	91	91	91	91
Normaalkracht (druk)	N _{Ed}	[kN/m]	986.87	1130.49	800.16	1048.22

Tabel L-3: Gegevens langswapening veldmoment in de dwarsrichting van het tunneldak en de vloer van de Velsertunnels uit tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953), zie Appendices A.6 en A.7.

Parameter			Velserspoortunnel		Velserautotunnel	
			Dak	Vloer	Dak	Vloer
Dikte tunneldak	h	[mm]	1150	1450	1450	1550
Oppervlakte wapening	A _{s1}	[mm ²]	5655	5655	5655	5655
	A _{s2}	[mm ²]	2827	5655	2827 (3927)	1963 (5655)
	A _{sdruk}	[mm ²]	2827	2827	1963 (2827)	5655
Afstand wapening	a _{s1}	[mm]	91	91	91	91
	a _{s2}	[mm]	151	151	151	151
	a _{sdruk}	[mm]	91	91	91	91
Normaalkracht (druk)	N _{Ed}	[kN/m]	986.87	1130.49	800.16	1048.22

Tabel L-4: Gegevens langswapening steunpuntsmoment in de dwarsrichting van het tunneldak en de vloer van de Velsertunnels uit tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953), zie Appendices A.6 en A.7.

Met behulp van de beschreven methodiek en de gegevens uit Tabel L-3 en Tabel L-4 wordt de momentcapaciteit bepaald voor de Velsertunnels. Tabel L-5 toont de momentcapaciteit voor het tunneldak en de tunnelvloer van de Velsertunnels zowel ter plaatse van het veld als ter plaatse van het steunpunt. Zoals bovenstaand reeds beschreven zijn de waarden tussen haakjes behorend aan het 2^e steunpunt van de autotunnel (aangegeven met stippellijn in Figuur L-4). De aangebrachte wapening verschilt tussen de twee steunpunten van de autotunnel. Uit de tabel kan worden opgemaakt dat de rekenwaarde van de momentcapaciteit circa een factor 1.13 kleiner is dan de karakteristieke waarde van de momentcapaciteit.

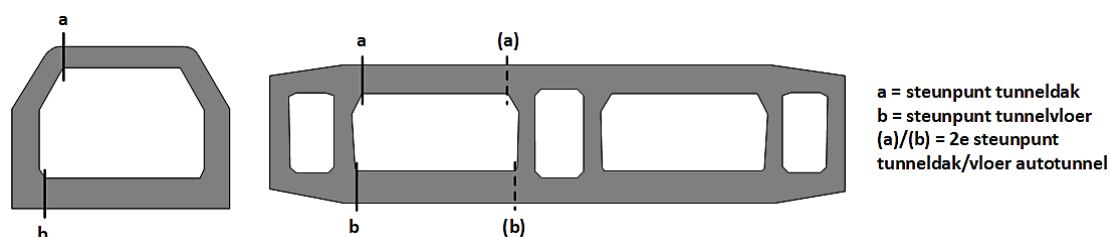
Parameter		Velserspoortunnel		Velserautotunnel	
		Dak	Vloer	Dak	Vloer
Karakteristieke momentcapaciteit (veld)	$M_{Rk, veld}$ [kNm/m]	1808.7	3933.0	1955.4	3363.8
Rekenwaarde momentcapaciteit (veld)	$M_{Rd, veld}$ [kNm/m]	1611.9	3481.4	1750.3	2990.3
Karakteristieke momentcapaciteit (steunpunt)	$M_{Rk, steun}$ [kNm/m]	2382.7	3934.5	2966.7 (3261.2)	3109.4 (4180.2)
Rekenwaarde momentcapaciteit (steunpunt)	$M_{Rd, steun}$ [kNm/m]	2106.5	3473.2	2619.6 (2873.4)	2777.3 (3696.8)

Tabel L-5: Bepaling momentcapaciteit Velsertunnels voor het tunneldak en de tunnelvloer.

L.3. Dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels

Bij de bepaling van de dwarskrachtcapaciteit van de Velsertunnels wordt ingegaan op de weerstand zonder aanwezige dwarskrachtwapening en de weerstand met de invloed van de huidige schuin lopende langswapening (zoals weergegeven in Appendices A.6 en A.7). Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen de karakteristieke weerstand en de rekenwaarde van de weerstand.

Figuur L-5 toont schematisch de doorsnedes van de Velsertunnels waar de dwarskrachtcapaciteit dient te worden bepaald. De weerstand tegen dwarskracht dient te worden bepaald ter plaatse van de steunpunten aangezien hier de hoogste dwarskrachten optreden. Bij de autotunnel verschilt de hoeveelheid wapening tussen de twee steunpunten waardoor de afwijkende gegevens van het 2^e steunpunt (met stippellijn in de figuur) in de resultaten tussen haakjes worden getoond.



Figuur L-5: Overzicht doorsnedes voor de bepaling van de dwarskrachtcapaciteit.

Allereerst wordt de dwarskrachtcapaciteit bepaald zonder dat de dwarskrachtwapening wordt beschouwd (L.3.1). Vervolgens wordt de dwarskrachtcapaciteit bepaald met inachtneming van de schuin lopende langswapening nabij de steunpunten van de Velsertunnels (L.3.2).

L.3.1. Dwarskrachtcapaciteit zonder aanwezige dwarskrachtwapening

Uitgaande van geen aanwezige dwarskrachtwapening wordt de dwarskrachtcapaciteit bepaald aan de hand van vergelijking (L-3), afkomstig uit Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1). De karakteristieke dwarskrachtweerstand kan worden bepaald door de factor γ_c gelijk aan 1.0 te stellen in plaats van de waarde 1.2.

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \geq [v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (L-3)$$

waarin:

$V_{Rd,c}$ = Rekenwaarde dwarskrachtweerstand (geen dwarskrachtwapening) [N]

$C_{Rd,c}$ = Factor, $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ met $\gamma_c = 1.2$ (beton, buitengewoon) [-]

k = Factor, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2.0$ [-]

d = Effectieve hoogte [mm]

b_w = Kleinste breedte van de dwarsdoorsnede (trekzone), $b_w = 1000$ [mm]

ρ_l = Wapeningsverhouding voor de langs(trek)wapening, $\rho_l = A_{sl}/b_w d \leq 0.02$ [-]

f_{ck} = Karakteristieke cilinderdruksterkte van beton na 28 dagen, $f_{ck} = 35$ [N/mm²]

k_1 = Factor, $k_1 = 0.15$ [-]

σ_{cp} = Drukspanning in beton, $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0.2 \cdot f_{cd}$ (druk positief) [N/mm²]

v_{min} = Ondergrens rekenwaarde afschuifweerstand beton zonder dwarskrachtwapening, $0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ [N/mm²]

Met behulp van vergelijking (L-3) en de gegevens omtrent de wapening kan de dwarskrachtcapaciteit worden bepaald voor de Velsertunnels. Tabel L-6 toont de dwarskrachtcapaciteit voor het tunneldak en de tunnelvloer van de Velsertunnels ter plaatse van het steunpunt. Zoals bovenstaand reeds beschreven zijn de waardes tussen haakjes behorend aan het 2^e steunpunt van de autotunnel (aangegeven met stippellijn in Figuur L-5). De aangebrachte wapening verschilt tussen de twee steunpunten van de autotunnel.

Parameter			Velserspoortunnel		Velserautotunnel	
			Dak	Vloer	Dak	Vloer
Dikte tunneldak	h	[mm]	1150	1450	1450	1550
Effectieve hoogte	d	[mm]	1039	1329	1339 (1334)	1444 (1429)
Oppervlakte langswapening	A _{sl}	[mm ²]	8482	11310	8392 (9582)	7618 (11310)
Wapeningsverhouding	ρ _l	[-]	0.0082	0.0085	0.0063 (0.0072)	0.0053 (0.0079)
Drukspanning beton	σ _{cp}	[N/mm ²]	0.86	0.78	0.55	0.68
Ondergrens afschuifweerstand	v _{min}	[N/mm ²]	0.36	0.34	0.34	0.33
Rekenwaarde dwarskrachtcapaciteit	V _{Rd,c}	[kN/m]	819.3	1013.1	893.1 (923.6)	932.0 (1036.2)
Karakteristieke dwarskrachtcapaciteit	V _{Rk,c}	[kN/m]	983.1	1215.7	1071.8 (1108.3)	1118.5 (1243.4)

Tabel L-6: Bepaling dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels voor het tunneldak en de tunnelvloer (geen dwarskrachtwapening).

L.3.2. Dwarskrachtcapaciteit met schuine langswapening

In Appendices A.6 en A.7 is weergegeven dat ter plaatse van de tunnelwanden de langswapening van de Velsertunnels schuin wegliep in het tunneldak en de tunnelvloer. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarom bepaald met behulp van vergelijkingen (L-4) en (L-5), afkomstig uit Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1). De kleinste dwarskrachtweerstand uit deze twee vergelijkingen is maatgevend. De karakteristieke dwarskrachtweerstand wordt bepaald door in vergelijking (L-4) de rekenwaarde van het staal (f_{ywd}) te vervangen door de karakteristieke waarde (f_{ywk}) en in vergelijking (L-5) de rekenwaarde van de beton (f_{cd}) te vervangen door de karakteristieke waarde (f_{ck}).

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \cdot \sin(\alpha) \quad (L-4)$$

waarin:

$V_{Rd,s}$ = Rekenwaarde dwarskrachtweerstand (hellende dwarskrachtwapening) [N]

A_{sw} = Oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de dwarskrachtwapening [mm²]

s = Hart-op-hartafstand van de beugels [mm]

z = Inwendige hefboomsarm van het buigend moment in de doorsnede [mm]

f_{ywd} = Rekenwaarde van de vloeigrens van de dwarskrachtwapening [N/mm²]

θ = Hoek drukdiagonaal van beton en de as van de ligger [rad]

α = Hoek tussen de dwarskrachtwapening en de as van de ligger [rad]

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) / (1 + \cot^2(\alpha)) \quad (L-5)$$

waarin:

$V_{Rd,max}$ = Rekenwaarde maximale dwarskracht die kan worden opgenomen door het element, begrensd door het bezwijken van de drukdiagonalen [N]

α_{cw} = Factor rekening houdend met spanning in de op druk belaste rand, $\alpha_{cw} \approx 1.0$ [-]

b_w = Minimale breedte tussen de trek- en drukrand, $b_w = 1000$ [mm]

v_1 = Sterktereductie factor beton gescheurd door dwarskracht, $v_1 = 0.6$ (C35/45) [-]

f_{cd} = Rekenwaarde betondruksterkte, $f_{cd} = 23.33$ [N/mm²]

Met behulp van vergelijkingen (L-4) en (L-5) en de gegevens omtrent de wapening wordt de dwarskrachtweerstand bepaald in Tabel L-7. De inwendige hefboomsarm is bepaald middels de berekende betondrukhoogte en β -factor van Appendix L.2. Uit de wapeningstekeningen volgt verder dat de hoek van de dwarskrachtwapening circa $\alpha = 45^\circ$ bedraagt voor beide Velsertunnels. De hart-op-hart afstand van de schuine wapening is 500 en 1000 mm voor de spoor- en autotunnel (Appendices A.6 en A.7). Daarnaast wordt aangehouden dat $\cot(\theta) = 2.5$. Voor het tunneldak van de autotunnel verschilt de schuin lopende langswapening tussen de twee steunpunten, waardoor de waarden van het 2^e steunpunt tussen haakjes zijn weergegeven (aangegeven met stippellijn in Figuur L-5). Opvallend is dat de dwarskrachtweerstand van de autotunnel lager is dan de bepaalde dwarskrachtweerstand zonder dwarskrachtwapening (zie Tabel L-6).

Parameter			Velserspoortunnel		Velserautotunnel	
			Dak	Vloer	Dak	Vloer
Oppervlakte wapening	A_{sw}	[mm ²]	1414	2827	1414 (981)	1414
Hart-op-hart afstand beugels	s	[mm]	500	500	1000	1000
Inwendige hefboomsarm	z	[mm]	1000	1282	1300	1407
Hoek drukdiagonaal	θ	[rad]	0.38	0.38	0.38	0.38
Hoek dwarskrachtwapening	α	[rad]	0.79	0.79	0.79	0.79
Rekenwaarde dwarskrachtweerstand	$V_{Rd,s}$	[kN/m]	1336.6	3426.9	868.7 (603.3)	940.2
Karakteristieke waarde dwarskrachtweerstand	$V_{Rk,s}$	[kN/m]	1539.5	3947.2	1000.6 (694.9)	1083.0
Rekenwaarde maximale dwarskracht	$V_{Rd,max}$	[kN/m]	6758.6	8664.6	8786.2	9509.4
Karakteristieke waarde maximale dwarskracht	$V_{Rk,max}$	[kN/m]	10137.9	12996.8	13179.3	14264.1

Tabel L-7: Bepaling dwarskrachtcapaciteit Velsertunnels voor het tunneldak en de tunnelvloer (met de schuin lopende langswapening in rekening gebracht als dwarskrachtwapening).

L.4. Ponscapaciteit Velsertunnels

In het tunneldak van de Velsertunnels is geen ponswapening aanwezig waardoor de ponsweerstand dient te worden bepaald met vergelijking (L-6) afkomstig uit Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1).

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \geq v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \quad (L-6)$$

waarin:

$v_{Rd,c}$ = Rekenwaarde dwarskrachtweerstand (geen dwarskrachtwapening) [N/mm²]

$C_{Rd,c}$ = Factor, $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ met $\gamma_c = 1.2$ (beton, buitengewoon) [-]

k = Factor, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2.0$ [-]

d = Effectieve hoogte, $d_{eff} = (d_y + d_z)/2$ [mm]

ρ_l = Wapeningsverhouding voor de langswapening, $\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0.02$, met ρ_{ly} en ρ_{lz} betreffende de op trek belaste wapening in y- en z-richting [-]

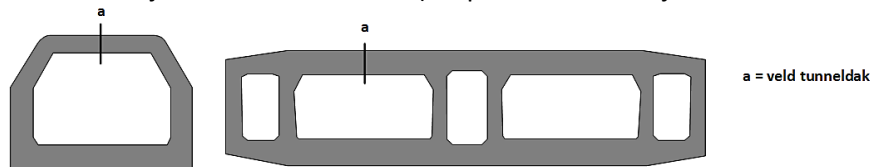
f_{ck} = Karakteristieke cilinderdruksterkte van beton na 28 dagen, $f_{ck} = 35$ [N/mm²]

k_1 = Factor, $k_1 = 0.1$ (druk) en $k_1 = 0.5$ (trek) [-]

σ_{cp} = Drukspanning in het beton ten gevolge van normaalkracht, $\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2$, met σ_{cy} en σ_{cz} normaalspanningen beton in y- en z-richting (druk positief) [N/mm²]

v_{min} = Ondergrens rekenwaarde afschuifweerstand beton zonder dwarskrachtwapening, $0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ [N/mm²]

Figuur L-6 toont schematisch de doorsnedes van de Velsertunnels waar de ponscapaciteit dient te worden bepaald. Tabel L-8 geeft een overzicht van de gegevens van de tunneldaken van de Velsertunnels, afgeleid uit de as-built tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953), zie Appendices A.6 en A.7. De informatie omtrent de wapening in de tabel betreft de op trek belaste wapening aan de binnenzijde van het tunneldak (ter plaatse van de rijbaan voor de autotunnel).



Figuur L-6: Overzicht doorsnedes voor de bepaling van de ponscapaciteit.

Parameter		Velserspoortunnel	Velserautotunnel
Dikte tunneldak	[mm]	1150	1450
Betondekking	[mm]	60	60
Diameter wapening lengterichting	[mm]	16	16
Diameter wapening dwarsrichting	[mm]	30	25 en 30 ¹³⁰
Afstand h.o.h. wapening lengterichting	[mm]	100	100
Afstand h.o.h. wapening dwarsrichting	[mm]	125	125
Effectieve hoogte d_y	[mm]	1082	1382
Effectieve hoogte d_z	[mm]	1059	1359
Effectieve hoogte d_{eff}	[mm]	1071	1371
Wapeningsverhouding langswapening ρ_{ly}	[-]	0.0019	0.0015
Wapeningsverhouding langswapening ρ_{lz}	[-]	0.0053	0.0035
Wapeningsverhouding langswapening ρ_l	[-]	0.0032	0.0023

Tabel L-8: Gegevens wapening tunneldak van de Velsertunnels uit tekeningen van Rijkswaterstaat (1952) en ProRail (1953).

¹³⁰ Bij de Velserautotunnel is de wapeningsdiameter om en om 25 en 30 mm (Rijkswaterstaat, 1952).

Bij de bepaling van de drukspanning is uitgegaan dat de normaalkrachten in de langsrichting verwaarloosbaar zijn t.o.v. de normaalkrachten in de dwarsrichting, waardoor de drukspanningen in het beton gelijk zijn aan de helft van de optredende normaalspanningen in de dwarsrichting ($\sigma_{cp} = 0.5\sigma_{cz}$). De optredende normaalkrachten van de spoor- en autotunnel in de dwarsrichting zijn weergegeven in Figuur J-5 en Figuur K-5 en bedragen respectievelijk 986.87 en 800.16 kN (druk) per meter tunnel in de lengte richting. De drukspanning (σ_{cp}) in het beton bedraagt hierdoor 0.43 en 0.28 N/mm² voor de spoor- en autotunnel.

Aan de hand van vergelijking (L-6) in combinatie met gegevens van Tabel L-8 en de bepaalde drukspanningen¹³¹ kan de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand worden bepaald. Voor de Velsertunnels is de dwarskrachtweerstand gepresenteerd in Tabel L-9¹³². De karakteristieke dwarskrachtweerstand is hierbij bepaald door bij toepassing van vergelijking (L-6) voor de factor γ_c de waarde 1.0 in te gebruiken in plaats van 1.2. Er dient te worden opgemerkt dat de invloed van de gewapende betonnen beschermerschil, welke is beschreven in subparagraaf 2.2.3, niet is meegenomen aan de weerstandskant van de Velsertunnels.

Parameter			Velserspoortunnel	Velserautotunnel
<i>Drukspanning beton</i>	σ_{cp}	[N/mm ²]	0.43	0.28
<i>Ondergrens afschuifweerstand</i>	v_{min}	[N/mm ²]	0.35	0.34
<i>Rekenwaarde dwarskrachtweerstand</i>	$v_{Rd,c}$	[N/mm ²]	0.52	0.44
<i>Karakteristieke dwarskrachtweerstand</i>	$v_{Rk,c}$	[N/mm ²]	0.63	0.53

Tabel L-9: Resultaten dwarskrachtweerstand voor de tunneldaken van de Velsertunnels onder pons.

¹³¹ Uit de Nationale Bijlage van Eurocode 2 volgt dat de factor $k_1 = 0.1$ aangezien de betondoorsnede drukspanningen bevat (NB NEN-EN 1992-1-1, 2020).

¹³² Bij de bepaling van de ponscapaciteit is de invloed van de randen tussen twee tunnelelementen niet in beschouwing genomen.

Appendix M Afleiding impactsnelheid vallend anker met dekking

In deze appendix wordt een verband afgeleid voor de energieabsorptie door de tunneldekking bij de calamiteit van een vallend scheepsanker. Er is gebruik gemaakt van de ontwerpgrafiek van VALANK bij een gronddekking van 1.5 meter, weergegeven in Figuur D-3 (Appendix D.3). Uit deze figuur is voor alle combinaties van de snelheid en ankermassa de penetratiediepte afgelezen. Verder is de energieabsorptie bepaald¹³³ voor de verschillende combinaties. Vervolgens is de energieabsorptie gedeeld door de penetratiediepte, om een verband te creëren tussen de energieabsorptie en de dikte van de tunneldekking. Tabel M-1 toont de resultaten van de berekende energieabsorptie per meter penetratiediepte voor de verschillende combinaties van snelheid en ankermassa uit Figuur D-3. Uit de tabel valt op te maken dat de energieabsorptie per meter penetratiediepte toeneemt bij een grotere eindsnelheid en ankermassa.

Eindsnelheid [m/s]	Ankermassa [kg]	Energieabsorptie [J]	Penetratiediepte [m]	Energieabsorptie per penetratiediepte [J/m]
10	10000	500000	1,47	340136,1
	5000	250000	1,09	229357,8
	2000	100000	0,75	133333,3
	1000	50000	0,57	87719,3
8	10000	320000	1,22	262295,1
	5000	160000	0,91	175824,2
	2000	64000	0,61	104918,0
	1000	32000	0,46	69565,2
6	10000	180000	0,99	181818,2
	5000	90000	0,73	123287,7
	2000	36000	0,49	73469,4
	1000	18000	0,37	48648,6

Tabel M-1: Bepaling energieabsorptie door tunneldekking met de VALANK grafiek van 1.5m gronddekking (Figuur D-3).

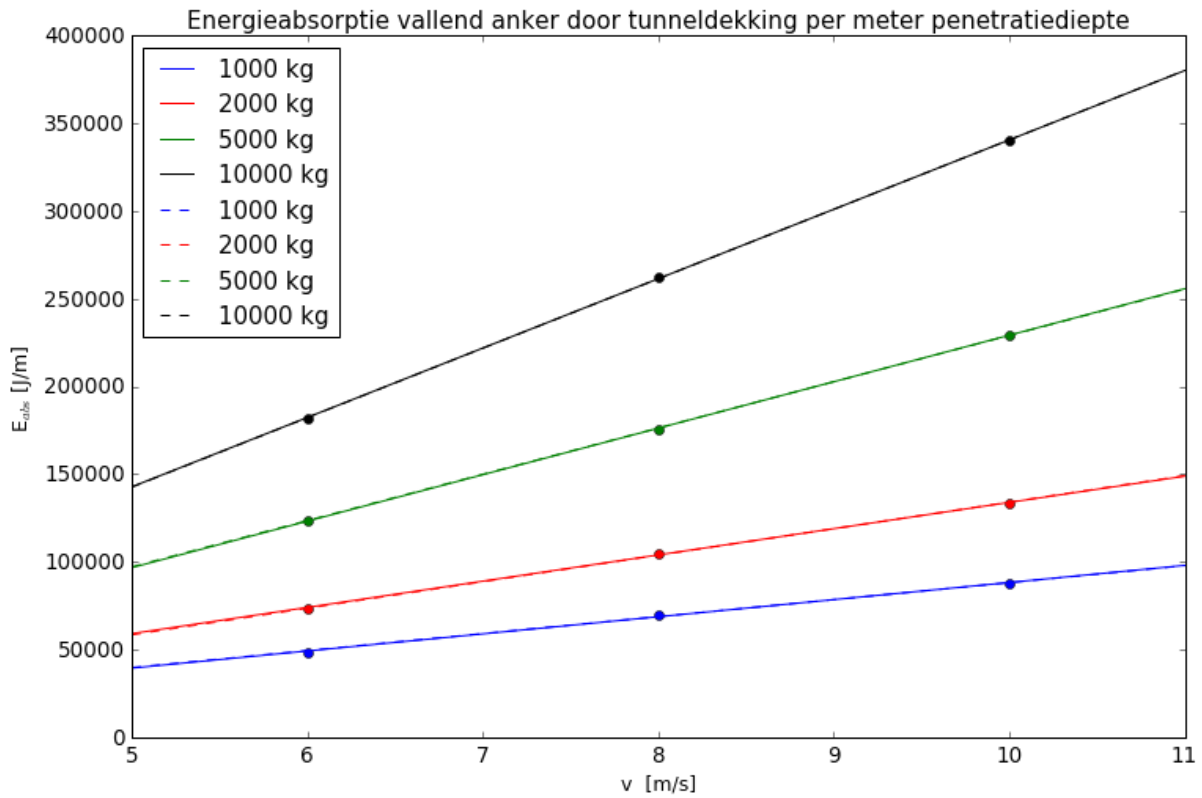
Met behulp van Python is een verband afgeleid voor energieabsorptie per meter penetratiediepte afhankelijk van de snelheid en massa van het scheepsanker. Figuur M-1 geeft de energieabsorptie weer voor de verschillende combinaties uit Tabel M-1 met de dikgedrukte punten. Voor de vier verschillende ankermassa's is een lineair verband afgeleid door de punten uit de tabel, welke is weergegeven met de doorgetrokken lijn (zie legenda).

De lineaire functie¹³⁴ is afhankelijk van de parameters a en b. Deze parameters zijn in Figuur M-2 en Figuur M-3 afgeleid als functie van de ankermassa¹³⁵. Met deze afgeleide verbanden voor parameters a en b is het mogelijk om de energieabsorptie per penetratiediepte te bepalen voor alle mogelijke ankermassa's. Dit is weergegeven in Figuur M-1 met de onderbroken lijnen voor de combinaties van Tabel M-1. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de onderbroken lijnen exact overeenkomen met de direct afgeleide lineaire verbanden (doorgetrokken lijnen) voor de verschillende combinaties. Daarom worden de verbanden van Figuur M-2 en Figuur M-3 verder gebruikt in de afleiding van de energieabsorptie per penetratiediepte afhankelijk van de ankermassa.

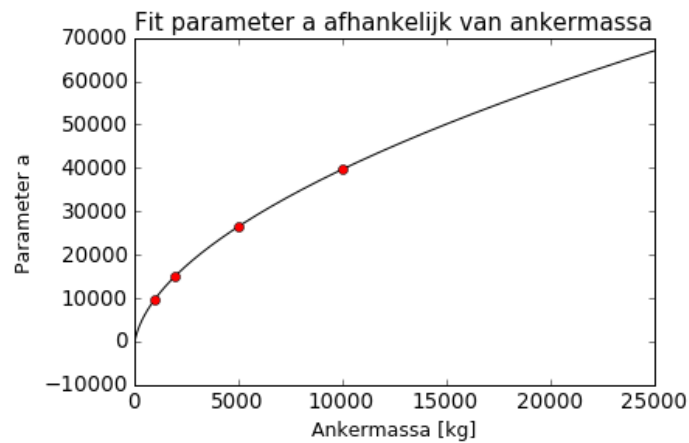
¹³³ De energieabsorptie is bepaald met de formule $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ aangezien de eindsnelheid gelijk aan nul is.

¹³⁴ De lineaire functie heeft de vorm $f(x) = a \cdot x + b$

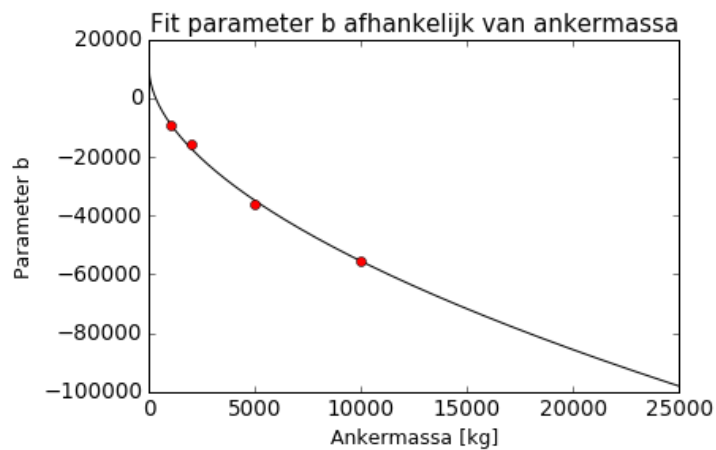
¹³⁵ Volgens de functie $f(x) = a \cdot (x^b) + c$.



Figuur M-1: Afgeleide energieabsorptie vallend scheepsanker door tunneldekking per meter penetratiediepte (Python).

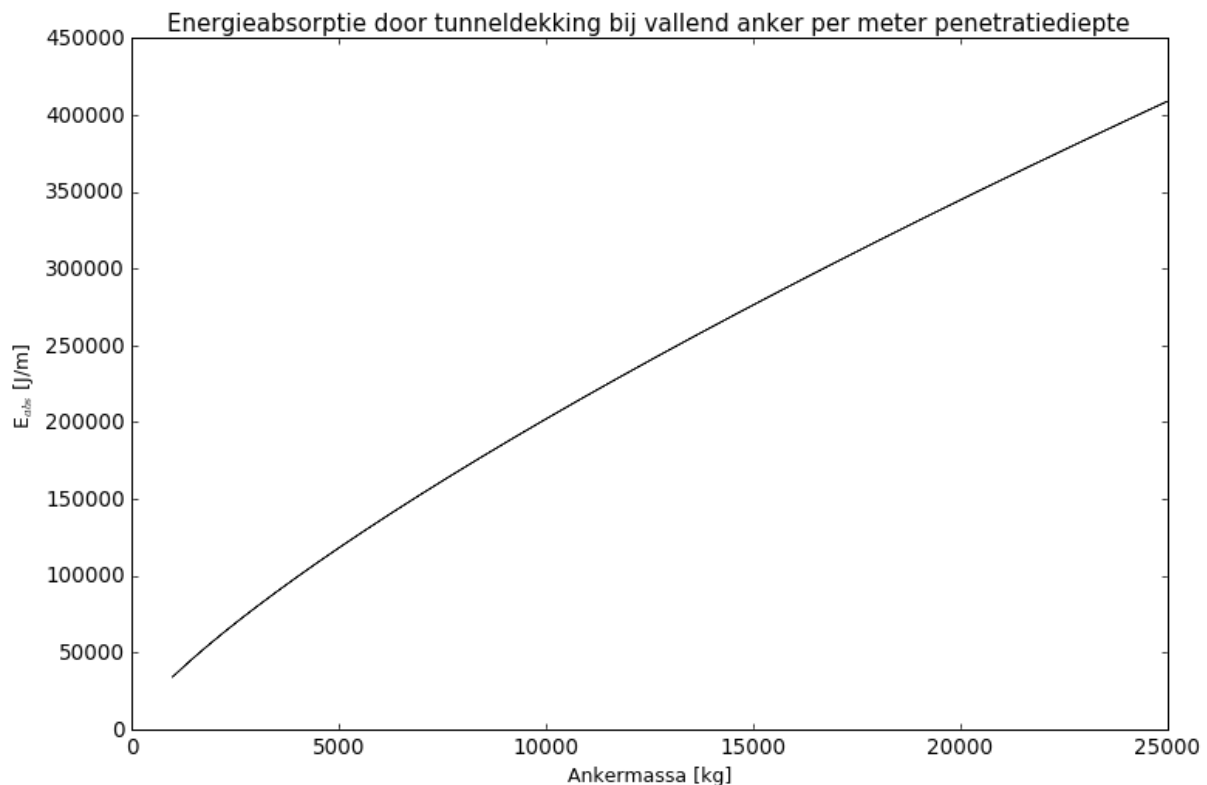


Figuur M-2: Afgeleide verband voor de parameter a van de lineaire functie (Python).



Figuur M-3: Afgeleide verband voor de parameter b van de lineaire functie (Python).

Door gebruik te maken van vergelijking (3-2) met $c_v = 1.40 \text{ m/skg}^{1/6}$ kan de energieabsorptie door de tunneldekking per meter penetratiediepte direct worden afgeleid van de ankermassa wat resulteert in het verband van Figuur M-4. Het verband is in formulevorm weergegeven met vergelijking (M-1).



Figuur M-4: Afgeleide energieabsorptie tunneldekking per penetratiediepte voor verschillende ankermassa's (Python).

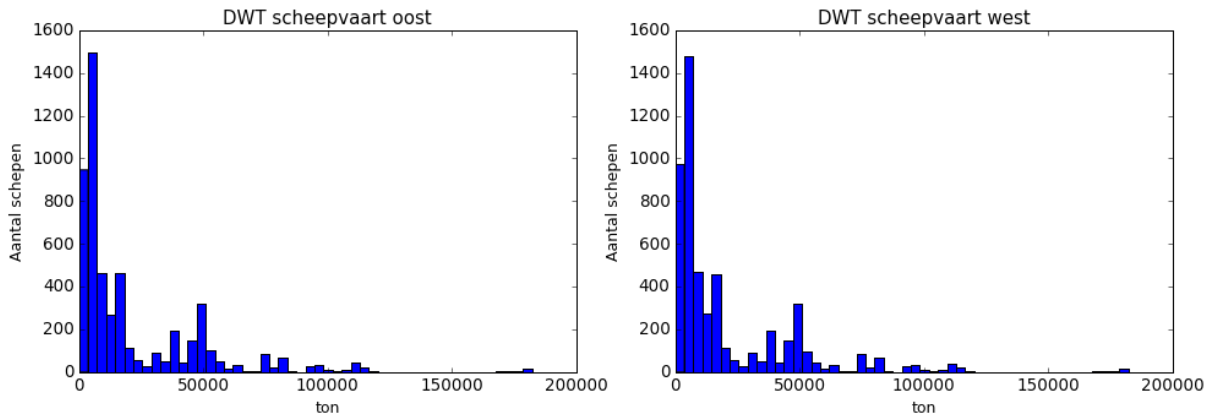
$$E_{abs} = 365.716 \cdot m_{anker}^{0.7173} - 423.779 \cdot m_{anker}^{0.54699} - 2852.337 \cdot m_{anker}^{1/6} + 9786.392 \quad (M-1)$$

Met vergelijking (M-1) kan nu bij een bepaalde ankermassa de energieabsorptie per meter penetratiediepte (E_{abs}) worden bepaald. Door vermenigvuldiging met de tunneldekking (d_{tun}) kan de totale energieabsorptie door de tunneldekking worden bepaald. Met vergelijking (M-2) kan de impactsnelheid van een vallend scheepsanker worden bepaald bij het raken van het tunneldak na het passeren van de tunneldekking (als de penetratiediepte groter dan de tunneldekking is).

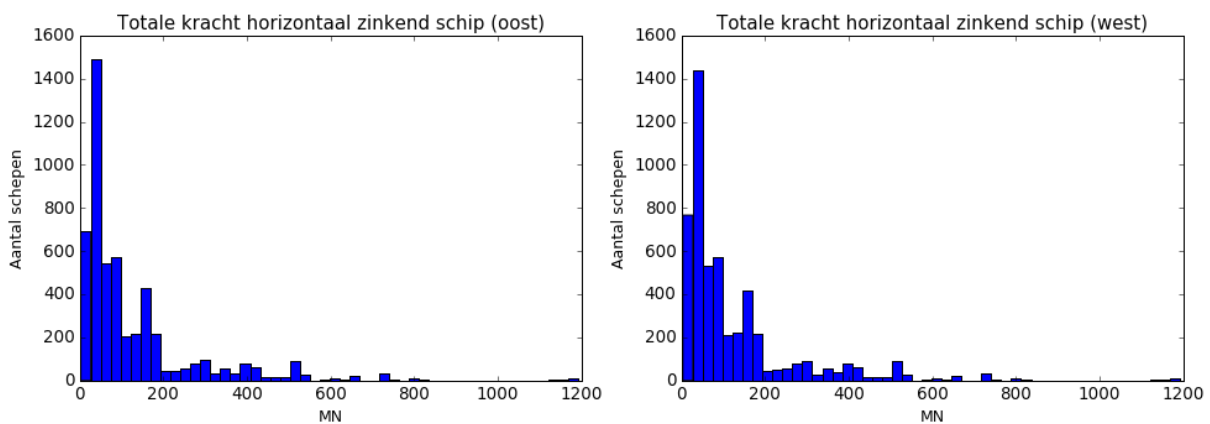
$$v_{impact} = \sqrt{\frac{0.5 \cdot m_{anker} \cdot v_{eind}^2 - E_{abs} \cdot d_{tun}}{0.5 \cdot m_{anker}}} \quad (M-2)$$

Appendix N Resultaten faalkansberekening zinkend schip

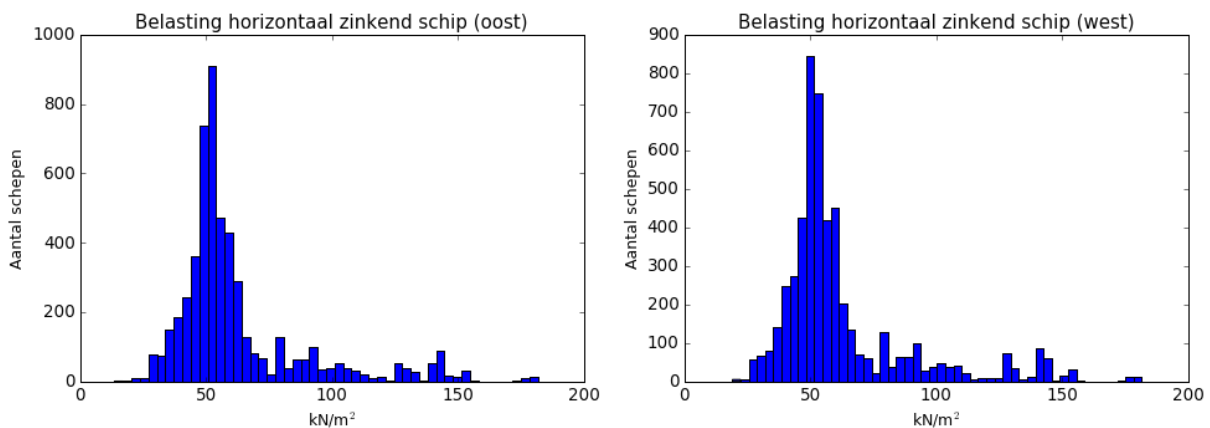
In deze appendix worden de resultaten van de faalkansberekening bij de calamiteit van een zinkend schip visueel weergegeven. Figuur N-1 geeft de verdeling van het draagvermogen van de passerende scheepvaart ter plaatse van de Velsertunnels weer. In Figuur N-2 wordt de verdeling van de totale kracht door een horizontaal zinkend schip getoond. Figuur N-3 presenteert de verdeling van de resulterende belasting weer onder een horizontaal zinkend schip. Figuur N-4 toont de verdeling van de totale kracht door een zinkend schip onder een hoek. Figuur N-5 en Figuur N-6 geven de verdeling van de resulterende belasting weer voor een zinkend schip onder een hoek voor respectievelijk de auto- en de spoortunnel.



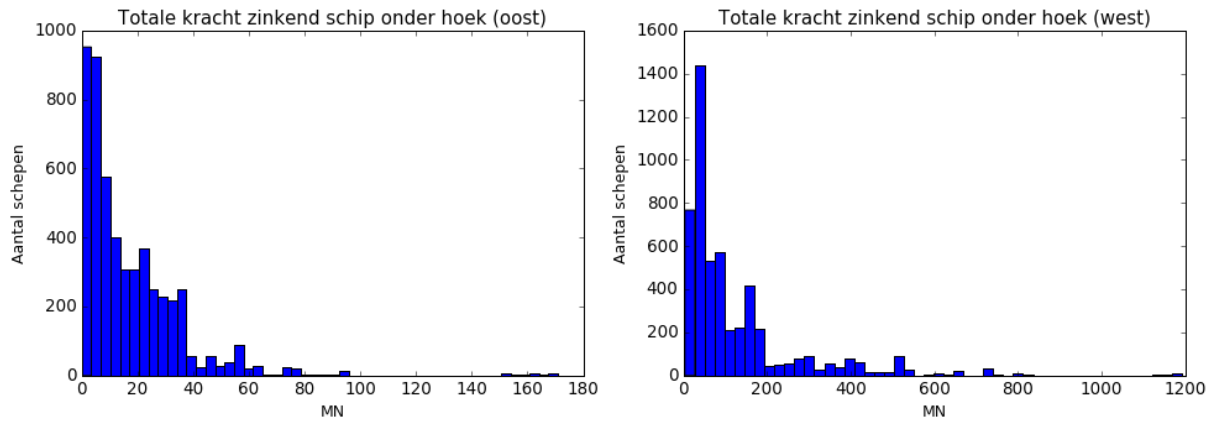
Figuur N-1: Draagvermogen van passerende scheepvaart ter plaatse van de Velsertunnels (Python).



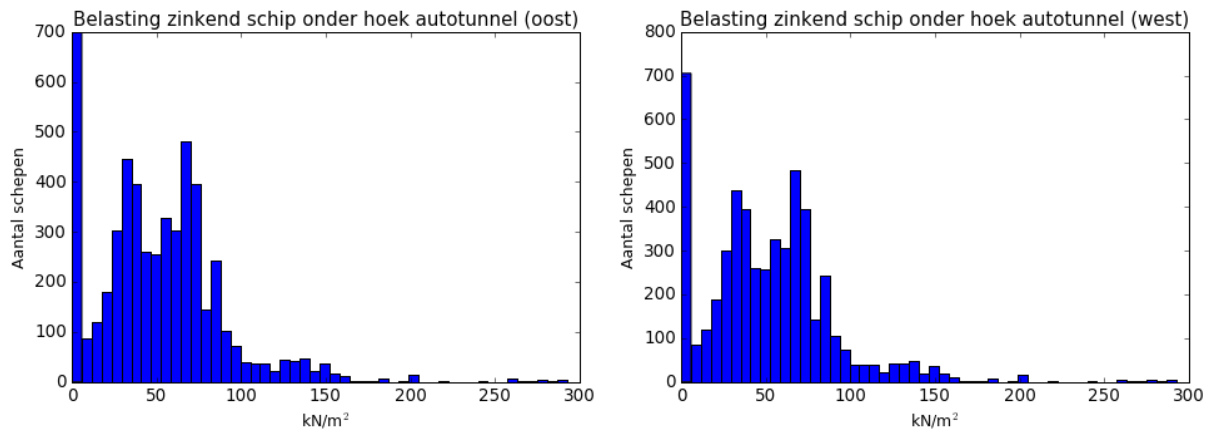
Figuur N-2: Totale kracht van een horizontaal zinkend schip op de Velsertunnels (Python).



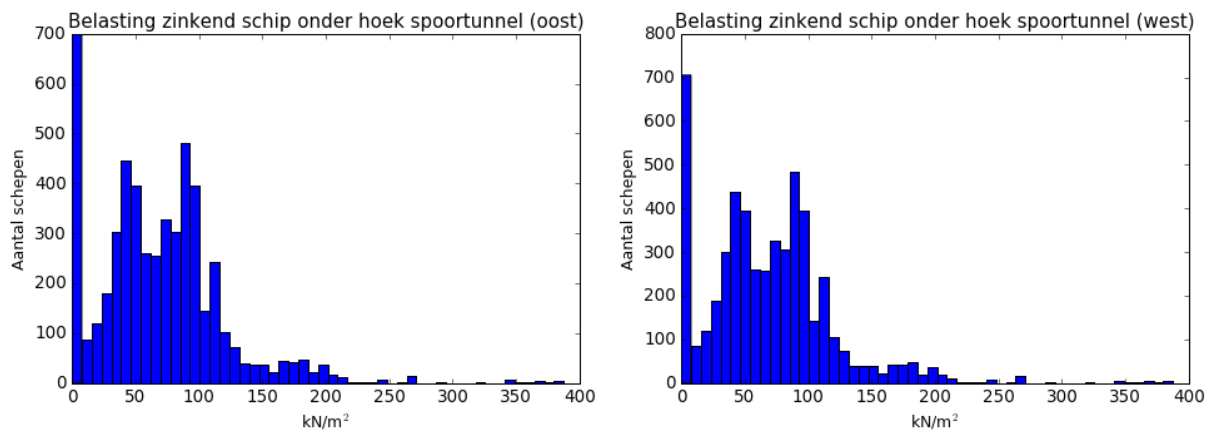
Figuur N-3: Belasting van een horizontaal zinkend schip op de Velsertunnels (Python).



Figuur N-4: Totale kracht van een schip zinkend onder een hoek op de Velsertunnels (Python).



Figuur N-5: Belasting door een zinkend schip onder een hoek op de Velserautotunnel (Python).



Figuur N-6: Belasting door een zinkend schip onder een hoek op de Velserspoortunnel (Python).