

ONTWERP EEN OPEN TUNNELBAK IN 10 MINUTEN

EEN PARAMETRISATIE VAN EEN OPEN TUNNELBAK WAARIN EEN
CONSTRUCTIEF ONTWERP WORDT GEOPTIMALISEERD

Eindrapportage





COLOFON

Project:	ONTWERP EEN OPEN TUNNELBAK IN 10 MINUTEN
Titel:	Een parametrisatie van een open tunnelbak waarin een constructief ontwerp wordt geoptimaliseerd
Ondertitel:	Eindrapportage
Status:	Definitief
Versie:	A
Datum:	14 juni 2018
Opleiding:	Civiele Techniek – Constructief Ontwerp
Afstudeerbedrijf:	Wagemaker te Rosmalen
Onderwijsinstelling:	Avans Hogeschool te 's-Hertogenbosch
Afstudeerperiode:	B11/B12 periode van februari 2018 t/m juli 2018
Afstudeerdocenten:	Michael van Nielen Jaap van Veldhoven
Afstudeerbegeleiders:	Dennis Schoenmakers (DSc) Jeffrey Haverhals (JHa)
Auteur(s):	Jeroen Heijkoop (JHe) Rick Wijnbeek (RWi)
Email adres:	j.heijkoop@student.avans.nl fw.wijnbeek@student.avans.nl

Vrijgegeven door:



Foto voorpagina: (European Roads, N35 Salland-Twentetunnel, 2014)

Voorwoord

Voor u ligt de afstudeerscriptie “Ontwerp een open tunnelbak in 10 minuten”. Deze scriptie is geschreven ten behoeve van het afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan de Avans Hogeschool te 's Hertogenbosch. De afstudeeropdracht is in opdracht van Wagemaker uitgevoerd.

In samenwerking met Wagemaker is een afstudeeropdracht opgesteld, waarin het gehele constructieve ontwerp van een open tunnelbak constructie, wordt geïmplementeerd in een ontwerptool.

Als eerste willen wij onze begeleiders vanuit Avans Hogeschool ing. Michael van Nielen PMSE en ing. Jaap van Veldhoven MSEng bedanken voor hun begeleiding gedurende de afstudeerperiode. Verder willen wij de constructeurs van Adviesbureau voor Bouwconstructies Wagemaker B.V. bedanken, met in het bijzonder onze bedrijfsbegeleiders dr.ir. Dennis Schoenmakers en ing. Jeffrey Haverhals MSEng. Ook gaat onze dank uit naar ing. Johan de Groot voor het delen van zijn kennis over het parametrische ontwerp en naar ing. Jan Vereijken voor de ondersteuning op het gebied van ICT.

Als laatste willen wij ir. Chris van der Ploeg bedanken van ABT B.V. Ingenieursbureau Delft. Zijn gastvrijheid en uitgebreide presentatie heeft ons geholpen bij het onderzoek.

Wij hopen dat onze scriptie een bijdrage levert aan het automatiseren van de bouwwereld en wensen u veel plezier tijdens het lezen van ons onderzoek.

Rick Wijnbeek & Jeroen Heijkoop

's Hertogenbosch, 14 juni 2018

Samenvatting

Steeds meer gelijkvloerse kruisingen, worden omgebouwd tot ongelijkvloerse kruisingen. Ook worden veel nieuwe ongelijkvloerse kruisingen aangelegd. In een groot aantal gevallen wordt hierbij een onderdoorgang toegepast. Bij deze methode wordt veelal een open tunnelbak toegepast welke nodig is vanwege de grondwaterstand. De tunnelbak fungeert hier als waterkering.

Pas in een later stadium van het ontwerpproces kunnen aangenomen afmetingen gevalideerd worden. Hierdoor moet bij geen optimaal ontwerp van de dimensies de gehele constructieve berekening opnieuw uitgevoerd worden, wat erg tijdrovend is. De onderdoorgangen worden op dit moment berekend door middel van een semi-automatische berekening, waarin de constructeur de verschillende handelingen veelvuldig opnieuw moet uitvoeren. Ook is deze berekening niet eenvoudig of maar deels herbruikbaar voor andere projecten.

Het doel van deze afstudeeropdracht is om voor Wagemaker een onderzoek uit te voeren naar de mogelijkheden om een berekening te parametriseren door middel van een ontwerptool, welke gericht is op een definitief ontwerp van een open tunnelbak. De onderzoeksvraag die daaruit voortkomt, luidt: "Hoe is het mogelijk om een ontwerptool te ontwikkelen voor een parametrisch DO-berekening van een open tunnelbak?".

Dit onderzoek is verdeeld in vier delen. Deel I bevat het vooronderzoek met de voor- en nadelen van een ontwerptool. Ook is een softwareonderzoek uitgevoerd evenals een variantenstudie en een onderzoek naar de gebruikers en ontwerpaspecten van een tunnelbak. Er wordt afgesloten met een conclusie waaruit blijkt hoe én of het mogelijk is om de ontwerptool op te stellen. Deel II is het belastingsonderzoek. Hierin is een stroomschema voor de ontwerptool opgesteld met daarna de verklaring van de werking van de ontwerptool. Ook is er een casus opgesteld, welke vervolgens gebruikt is om de ontwerptool op te stellen. De belastingen op de constructie zijn bepaald en verwerkt in de ontwerptool waarna ten slotte de modellering in SCIA Engineer is onderzocht. Deel III van het onderzoek is het berekeningsonderzoek met hierin de berekening van de vloeren, wanden en de opdrijving. Als laatste is in deel IV een optimalisatieonderzoek uitgevoerd. De gebruikte onderzoeksmethoden zijn exploratief onderzoek, kwantitatief onderzoek en deskresearch.

Uit het vooronderzoek is gebleken, dat de geometrische eigenschappen van een open tunnelbak uitermate geschikt zijn om te gebruiken voor parametrisaties. Na een intern bedrijfsonderzoek is vastgesteld dat de gebruikte software voor de parametrisatie zal bestaan uit SCIA Engineer en Microsoft Excel. Deze software is onderling te koppelen zodat het mogelijk wordt om een dynamische ontwerptool te creëren. Deze ontwerptool is parallel aan het onderzoek opgebouwd, om met name het antwoord op de hoofdvraag te kunnen bewijzen. Om een goed werkende ontwerptool op te leveren aan het einde van het afstudeertraject, programmeert Dennis Schoenmakers de koppeling. Dit is gedaan in de vorm van een plug-in tussen Excel-SCIA-Excel. De benodigde gegevens om tot deze koppeling te komen, worden wel door ons aangeleverd. Ook de gegevens welke uit de koppeling als output gegenereerd worden, worden door ons verwerkt.

In deelonderzoek II is aandacht besteed aan het uitwerken van de mogelijke belastingen op de constructie én de bijbehorende belastingcombinaties. Doordat de belastingen parametrisch in de ontwerptool zijn gezet, zijn deze dynamisch geworden. Hiermee is gelijktijdig bewezen dat het mogelijk is om de belastingen te parametriseren. In het berekeningsonderzoek (onderzoek III) is onderzoek gedaan naar de constructieve berekening van de constructievloer en de wanden in de ULS en de SLS. Deze berekeningen zijn allemaal combinaties van invoergegevens en formules, en lenen zich daarom voor parametrisaties.

Uit het optimalisatieonderzoek (onderzoek IV) is gebleken dat vooraf gestelde verwachtingen, achteraf bijgesteld dienen te worden. De hoeveelheid wapening is niet afhankelijk van één enkele invoerparameter, maar veel vaker van meerdere parameters. Ook heeft het wapenen van een minimale hoeveelheid wapening een grote invloed op de hoeveelheid wapening.

De hoofdvraag is beantwoord door te stellen, dat het mogelijk is een DO-berekening van een open tunnelbak te parametriseren, door een ontwerptool te ontwikkelen. Dit door een berekeningsrapportage te ontwikkelen, ondersteund door de koppeling tussen Microsoft Excel en SCIA Engineer alsmede de uitvoering van grondige literatuurstudies.

Buiten het feit dat een parametrisatie een efficiënte manier is om een berekening uit te voeren, levert het ook inzicht om kwaliteit te leveren. Ten slotte is het aanbevolen om verschillende optimalisaties toe te voegen aan de ontwerptool. Ook aspecten van de afbakening, zoals voorgespannen constructies en paalfunderingen, kunnen naderhand toegevoegd worden.

Abstract

An increasing amount of traffic intersections are being rebuilt to grade-separated intersections. Many new multi-level crossings are also being constructed. In a few cases this is achieved with a dive-under or an underpass which is necessary because of the groundwater level. In this method, an open tunnel is often used which is necessary because of the groundwater level. The tunnel barge functions here as a flood defence.

Only later on in the design process the adopted dimensions can be validated. As a result, if the case of no optimal design of the dimensions, the entire structural calculation has to be carried out again, which is very time-consuming. The underpasses are currently calculated by means of a semi-automatic calculation, in which the engineer has to carry out the various operations frequently again. This calculation is also not easy or partly reusable for other projects.

The aim of this graduation project is to carry out a study, for Wagemaker during the course of six months, into the possibilities to parameterize a calculation by means of a design tool, which is aimed at a definitive design (DD) of an open tunnel. The research question that arises from this is: "How is it possible to develop a design tool for a parametric DD-calculation of an open tunnel?"

This study is divided into four parts. Part I contains the preliminary investigation with the advantages and disadvantages of a design tool. A software study was also carried out as well as a variant study of the users and design aspects of a tunnel. It concludes with showing how and if it is possible to build up the tool. Part II consists of the loads investigation. A flowchart for the design tool has been composed to explain how the design tool works. A case is also composed, which is then subsequently used to establish the tool. The loads on the structure have been determined and processed in the design tool, after which the modelling in SCIA Engineer has been examined. Part III of the research is the calculation study with the calculation of the floors, walls and the buoyancy. Finally, an optimization study is carried out in part IV. The research methods used are explorative and quantitative research and desk research.

The preliminary investigation has shown that the geometric properties of an open tunnel are extremely suitable for use for parameterizations. After an internal company survey it has been determined that the software used for the parameterization will consist of SCIA Engineer and Microsoft Excel. This software can be linked together so that it was possible to create a dynamic tool. This tool has been built up parallel to the research, in order to be able to prove the answer to the main question. In order to deliver a working design tool at the end of the graduation project, Dennis Schoenmakers will program the link. This is done in the form of a plug-in between Excel-SCIA Excel. The required data to come to this link are provided by us. We also process the data generated from the link as output.

In sub-study II, attention was paid to the elaboration of the possible loads on the structure and the associated load combinations. Because the loads have been placed in the tool, they have become dynamic. This proves simultaneously that it is possible to parameterize the loads. In the calculation study (sub-study III), research was carried out into the structural calculation of the construction floor and the walls in the ULS and the SLS. These calculations are all combinations of input data and formulas, and therefore lend themselves to parameterizations.

The optimization study (research IV) showed that predetermined expectations should be adjusted afterwards. The amount of reinforcement is not dependent on a single input parameter, but much more often on multiple parameters. Also, the reinforcement of a minimum amount of reinforcement has a major influence on the amount of reinforcement.

The main question has been answered by stating that it is possible to parameterise a DD-calculation of an open tunnel by developing a design tool. This by realising and developing a calculation report, supported by the link between Microsoft Excel and SCIA Engineer and the execution of thorough literature studies.

Apart from the fact that a parameterization is an efficient way to perform a calculation, it also provides insight to deliver quality. Finally, it is recommended to add several optimizations to the tool. Also, aspects of the demarcation, such as prestressed structures, can be added afterwards.

Inhoud

VOORWOORD	IV
SAMENVATTING.....	V
ABSTRACT	VII
1. INLEIDING.....	1
2. ONDERZOEKSACHTERGROND	2
2.1 AANLEIDING.....	2
2.2 PROBLEEMSTELLING	2
2.3 DOELSTELLING.....	2
2.4 ONDERZOEKSVRAGEN	3
2.5 ONDERZOEKSMETHODES	3
2.6 AFWIJKINGEN.....	3
2.7 LEESWIJZER.....	3
DEEL I - VOORONDERZOEK.....	5
I.1. WAAROM EEN ONTWERPTOOL?	6
I.1.1 PROCESVERBETERING	6
I.1.2 DUURZAAMHEID	6
I.1.3 NADELEN.....	7
I.1.4 INTERVIEW EXTERNE EXPERT	7
I.2. SOFTWAREONDERZOEK.....	9
I.2.1 SPREADSHEET	9
I.2.2 REKENPROGRAMMA	9
I.2.3 AFBAKENING	9
I.2.4 LINK TUSSEN PROGRAMMATUUR	10
I.3. VARIANTENSTUDIE TUNNELBAKKEN	11
I.3.1 STANDAARD TUNNELBAK.....	11
I.3.2 VERJONGING	11
I.3.3 TAPS TOELOPENDE WANDEN.....	12
I.3.4 SCHUINE WANDEN.....	12
I.3.5 VLOER MET OREN	13
I.3.6 VERKANTING VLOER.....	13
I.3.7 ASYMMETRISCHE DOORSNEDE	14
I.4. BEOOGDE GEBRUIKERS.....	15
I.4.1 SPOORWEGVERKEER	15
I.4.2 AUTOVERKEER	15
I.4.3 FIETSVRKEER.....	15
I.4.4 VOETGANGERS.....	15
I.4.5 ALGEMENE ASPECTEN.....	15
I.5. ONTWERPASPECTEN TUNNELBAK.....	16
I.5.1 KARAKTERISTIEKEN VOERTUIG/WEGGEBRUIKER	16

I.5.2	SPOORWEGVERKEER	17
I.5.3	AUTOVERKEER	18
I.5.4	FIETSVRKEER.....	23
I.5.5	VOETGANGERS.....	23
I.5.6	OVERIGE ONTWERPEISEN	23
I.6.	CONCLUSIE VOORONDERZOEK.....	24
DEEL II - BELASTINGSONDERZOEK		25
II.1.	STROOMSCHEMA.....	26
II.2.	DE ONTWERPTOOL.....	27
II.2.1	BEREKENINGSRAPPORTAGE TOT DE KOPPELING	27
II.2.2	KOPPELING	27
II.2.3	BEREKENINGSRAPPORTAGE NA DE KOPPELING	31
II.3.	CASUS.....	32
II.3.1	CONSTRUCTIEVE PARAMETERS	32
II.3.2	MATERIAALGEGEVENS.....	33
II.4.	BELASTINGEN.....	35
II.4.1	INVOERGEGEVENS	35
II.4.2	PERMANENTE BELASTING	35
II.4.3	VARIABELE BELASTING	37
II.4.4	BELASTINGCOMBINATIES.....	40
II.5.	SCIA ENGINEER MODELLERING	42
II.5.1	MODEL DWARSRICHTING MET EXCENTRICITEIT	42
II.5.2	MODEL DWARSRICHTING MET CENTRISCHE STAAFVERDELING	43
II.5.3	MODEL DWARSRICHTING MET CENTRISCHE EN PARTIËLE STAAFVERDELING	44
II.5.4	MODEL LANGSRICHTING	45
II.6.	CONCLUSIE BELASTINGSONDERZOEK	46
DEEL III - BEREKENINGSONDERZOEK		47
III.1.	WAPENINGSBEREKENING CONSTRUCTIEVLOER.....	48
III.1.1	HOOFDWAPENING – ULS – BUIGEND MOMENT EN NORMAALKRACHT	48
III.1.2	HOOFDWAPENING – SLS – SCHEURVORMING EN DOORBUIGING.....	51
III.1.3	HOOFDWAPENING - DETAILLERINGSREGELS	52
III.1.4	DWARKRACHTWAPENING – ULS – DWARKRACHT EN NORMAALKRACHT.....	52
III.1.5	DWARKRACHTWAPENING - DETAILLERINGSREGELS	53
III.2.	WAPENINGSBEREKENING WANDEN.....	54
III.2.1	HOOFDWAPENING – ULS – BUIGEND MOMENT	54
III.2.2	HOOFDWAPENING – SLS – SCHEURVORMING EN DOORBUIGING.....	56
III.2.3	HOOFDWAPENING – HORIZONTALE RICHTING	57
III.2.4	HOOFDWAPENING - DETAILLERINGSREGELS	58
III.2.5	DWARKRACHTWAPENING – ULS – DWARKRACHT	58
III.2.6	DWARKRACHTWAPENING – DETAILLERINGSREGELS	58

III.3. OPDRIJVING	59
III.3.1 AANDRIJVENDE BELASTING	59
III.3.2 RUSTENDE BELASTING	59
III.3.3 BELASTING FACTOREN	59
III.4. CONCLUSIE BEREKENINGSONDERZOEK	60
DEEL IV - OPTIMALISATIEONDERZOEK.....	61
IV.1. CONSTRUCTIEVLOERDIKTE.....	62
IV.2. WANDDIKTE.....	64
IV.3. BETONSTERKTEKLASSE	65
3. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN TOTAALONDERZOEK	66
3.1 CONCLUSIE	66
3.2 AANBEVELINGEN.....	66
4. LITERATUUR	68
5. BIJLAGENLIJST.....	70
BIJLAGE A1 – PLAN VAN AANPAK	
BIJLAGE A2 – PLANNING.....	
BIJLAGE A3 – LOGBOEK AFSTUDEERONDERZOEK	
BIJLAGE A4 – ENQUÊTE TOOL TUNNELBAK.....	
BIJLAGE A5 – INTERVIEW EXTERNE EXPERT.....	
BIJLAGE A6 - TAAKVERDELING	
BIJLAGE B1 – BELASTINGSONDERZOEK.....	
BIJLAGE B2 – CONTROLE EIGEN GEWICHT.....	
BIJLAGE C1 – ONDERZOEK SPREIDING VEERKEERBELASTING	
BIJLAGE C2 – ONDERZOEK SPREIDING VEERKEERBELASTING – UITVOER SCIA ENGINEER	
BIJLAGE D – MATERIAALEIGENSCHAPPEN	
BIJLAGE E – BEREKENINGSONDERZOEK	
BIJLAGE F1 – BEREKENINGSRAPPORTAGE	
BIJLAGE F2 – SCIA ENGINEER BEREKENINGSRAPPORTAGE	
BIJLAGE F3 – HANDBEREKENING 1 BELASTINGSGEVAL.....	
BIJLAGE G – OPTIMALISATIE VLOER.....	

1. Inleiding

Steeds meer gelijkvloerse kruisingen, worden omgebouwd tot ongelijkvloerse kruisingen. Ook worden veel nieuwe ongelijkvloerse kruisingen aangelegd. Dit om incidenten te voorkomen en de doorstroming te bevorderen. In een groot aantal gevallen wordt hierbij een onderdoorgang toegepast. Bij deze methode wordt veelal een open tunnelbak toegepast welke nodig is vanwege de grondwaterstand. De tunnelbak fungeert hier als waterkering. De berekeningen hiervoor zijn semi-automatisch, waardoor er een veelvuldig herhaald proces benodigd is om tot een eindresultaat te komen.

Het doel van het onderzoek is om te onderzoeken hoe een ontwerptool ontwikkeld kan worden voor een parametrische DO-berekening van een open tunnelbak. Dit is een vorm van efficiënt en duurzaam ontwerpen waarmee ingespeeld wordt op de automatisering van de bouwindustrie.

Het onderzoek wordt afgebakend door het hanteren van normen en richtlijnen die alleen relevant zijn voor een open tunnelbak. Ook zijn sommige opmerkingen van de begeleiders en eigen gestelde eisen onderdeel van de afbakening.

Dit onderzoek is verdeeld in 4 delen. Deel I bevat het vooronderzoek. In dit vooronderzoek worden aspecten zoals duurzaamheid, software, tunnelbakken, beoogde gebruiker en ontwerpeisen onderzocht. Deel I wordt afgesloten met een conclusie waaruit blijkt hoe én of het mogelijk is om de ontwerptool op te stellen. De gebruikte onderzoeksmethoden zijn exploratief en kwantitatief onderzoek.

Deel II bestaat uit het belastingsonderzoek. Als eenmaal bepaald is hoe de ontwerptool ontwikkeld wordt, worden belastingen bepaald en wordt de vaardigheid in de software verbeterd. Ook wordt een casus opgesteld, welke vervolgens gebruikt wordt om de ontwerptool op te stellen. De gebruikte onderzoeksmethode voor het belastingsonderzoek zal voornamelijk deskresearch zijn.

Deel III van het onderzoek is het berekeningsonderzoek. In dit onderzoek worden de berekeningen, die benodigd zijn, uiteengezet. De ontwerptool wordt opgesteld om te bewijzen dat de voorgeschreven methode daadwerkelijk functioneert. De gebruikte onderzoeksmethode is deskresearch.

Als laatste wordt in deel IV een optimalisatieonderzoek uitgevoerd. Hierin worden testen uitgevoerd met mogelijke optimalisaties ten behoeve van de ontwerptool. Gelijktijdig wordt aangetoond dat de ontwerptool voor meerdere situaties werkt en zodoende voldoet aan de verwachtingen.

2. Onderzoeksachtergrond

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksachtergrond beschreven. Hierin worden de aanleiding, probleemstelling, doelstelling en hoofdvragen onder andere beschreven.

2.1 Aanleiding

Steeds meer gelijkvloerse kruisingen, worden omgebouwd tot ongelijkvloerse kruisingen. Ook worden veel nieuwe ongelijkvloerse kruisingen aangelegd. Bij deze methode wordt veelal een open tunnelbak toegepast welke nodig is vanwege de grondwaterstand. De weggebruiker kruist de (spoor)weg door middel van een onderdoorgang. Bij deze methode wordt veelal een open tunnelbak toegepast. De expertise van Wagemaker ligt onder andere bij het constructieve ontwerp van deze onderdoorgangen. Hierdoor krijgt Wagemaker veel opdrachten voor het constructieve ontwerp van deze open tunnelbakken.

2.2 Probleemstelling

Als er een open tunnelbak wordt toegepast om verkeersstromen te geleiden, worden er vaak aannames gedaan wat betreft de dimensies van de open tunnelbak. Pas in een later stadium van het ontwerpproces kunnen deze afmetingen gevalideerd worden. Hierdoor wordt bij niet optimale aannames van de dimensies, de gehele constructieve berekening opnieuw uitgevoerd. Dit proces is erg tijdrovend.

De onderdoorgangen worden op dit moment berekend door middel van een tijdrovende semi-automatische berekening, waarin de constructeur de verschillende handelingen veelvuldig opnieuw moet uitvoeren. Wapeningsberekeningen voor moot A dienen bijvoorbeeld ook uitgevoerd te worden voor moot B. Dit houdt in dat de volledige berekening voor een nagenoeg gelijke moot, opnieuw uitgevoerd wordt.

Als laatste is het momenteel niet mogelijk om de gehele constructieve berekeningen voor de open tunnelbakken te gebruiken tijdens meerdere projecten. Echter zijn deze projecten in de basis qua geometrie en belastingen gelijk aan elkaar, waardoor parametrisatie een uitweg kan bieden.

2.3 Doelstelling

Het parametriseren draagt bij aan het automatiseren van de gehele bouwindustrie. De bouw is een van de weinige industrieën, welke nog niet volledig geautomatiseerd is. Veel berekeningen worden handmatig of semi-automatisch uitgevoerd. Er wordt veelvuldig gebruik gemaakt van spreadsheets, echter zijn deze spreadsheets niet zodanig opgebouwd dat deze volledig geautomatiseerd kunnen worden. De wereld van BIM maakt steeds meer zijn intrede, waardoor handmatige berekeningen onwenselijk worden en automatisaties en geïntegreerde berekeningsrapportages de nieuwe trend zijn. Ook leent een parametrisatie zich voor BIM-modellen en kunnen bijvoorbeeld tekeningen als output gegenereerd worden. Het parametriseren van de gehele berekening en de daarbij behorende berekeningsrapportage is een klein onderdeel van het enorme veranderingsproces die de toekomst van de bouwwereld met zich meebrengt. Waar nodig, wordt in het onderzoek met externe experts gesproken.

Het doel van deze afstudeeropdracht is om voor Wagemaker een onderzoek uit te voeren naar de mogelijkheden om een berekening te parametriseren. Dit door middel van een ontwerptool, welke gericht is op een definitief ontwerp van een open tunnelbak. De meetbaarheid van deze opdracht vertaalt zich in het eindproduct, de ontwerptool, met als output de validatie van de wapening en dimensies. De ontwerptool wordt opgesteld als bewijs dat de voorgeschreven methode in het

onderzoek werkt. Ook zal het vooronderzoek essentieel zijn voor de samenstelling van het onderzoek en de ontwerptool.

2.4 Onderzoeksvragen

Om een goed onderzoek uit te voeren, worden er hoofd- en deelvragen geformuleerd. Dit om gericht onderzoek uit te voeren. De deelvragen worden per deelonderzoek behandeld. De hoofdvraag wordt beantwoord in de conclusie.

2.4.1 Hoofdvraag

Hoe is het mogelijk om een ontwerptool te ontwikkelen voor een parametrisch DO-berekening van een open tunnelbak?

2.4.2 Deelvragen

Deze hoofdvraag wordt onderverdeeld in een aantal deelvragen:

- 1 Wat zijn de voordelen en nadelen van een ontwerptool
- 2 Hoe kan duurzaamheid geïmplementeerd worden in het onderzoek?
- 3 Welke software is beschikbaar voor de ontwerptool?
- 4 Hoe kan de beschikbare software gebruikt worden om de ontwerptool te ontwikkelen?
- 5 Hoe kan de rekenprogrammatuur in combinatie met de ontwerptool optimaal gebruikt worden?
- 6 Wie zijn de beoogde gebruikers van de tunnelbak en wat heeft dat voor consequenties voor het ontwerp en de belastingen?
- 7 Welke belastingen zijn van toepassing op een open tunnelbak?
- 8 Welke belastingcombinaties dienen er gegenereerd te worden?
- 9 Welke constructieve berekeningen moeten uitgevoerd worden om tot een DO-berekening te komen en waaraan moeten deze berekeningen voldoen?
- 10 Wat is de invloed van de geometrie op de berekening?
- 11 Hoe kunnen deze constructieve berekeningen in een ontwerptool verwerkt worden?

2.5 Onderzoeksmethodes

De gebruikte onderzoeksmethoden zijn exploratief onderzoek, kwantitatief onderzoek en deskresearch. Exploratief onderzoek wordt uitgevoerd als niet duidelijk is welke resultaten het onderzoek op gaat leveren. Dit wordt uitgevoerd door middel van een enquête. Belangrijke factoren in dit onderzoek zijn de relaties tussen de onderwerpen. Kwantitatief onderzoek wordt gebruikt om hoe- of waaromvragen te beantwoorden. Bepaalde variabelen hoeven niet onderzocht maar geïnterpreteerd te worden. Als laatste wordt deskresearch gebruikt om data van derden, zoals normen, te verzamelen. Voor de verschillende literatuuronderzoeken zal deze methode gebruikt worden.

2.6 Afwijkingen

De afwijkingen ten opzichte van het plan van aanpak worden besproken. Er zijn na genoeg geen afwijkingen geweest. Wel is er gekozen om de berekening extra af te bakenen. Voorspanning in de constructie, wordt buiten beschouwing gelaten omdat dit andere methodes van berekenen met zich meebrengt. Ook wordt de geometrie van de tunnelbak opgesteld voor één enkele gebruiker. Meerdere gebruikers, zoals een tunnelbak met fiets- en autoverkeer, worden buiten beschouwing gelaten.

2.7 Leeswijzer

De hoofdrapportage is opgedeeld in een viertal onderzoeken. Als eerste wordt het vooronderzoek behandeld. Hierin worden deelvragen 1, 2, 3, 4, 5 en 6 behandeld. Het onderzoek wordt vervolgd met een belastingonderzoek, hierin wordt aan de hand van een stroomschema en een opgesteld

casus alle belastingen welke op de tunnelbak werken behandeld. Dit wordt gedaan in combinatie met deelvragen 7 en 8. Als laatste wordt het berekeningsonderzoek behandeld. Hierin wordt de gehele berekening onderzocht. Ook worden deelvragen 9, 10 en 11 beantwoord. Als laatste wordt in deel IV een optimalisatieonderzoek uitgevoerd. Er wordt een optimale vloerdikte en wanddikte gevonden. De hoofdvraag wordt beantwoord in de conclusie en de aanbevelingen van het totaalonderzoek.



Deel I - vooronderzoek

In deel I van het onderzoek wordt het vooronderzoek uitgevoerd. De hoofdvraag van het onderzoek is: “Hoe is het mogelijk om een ontwerptool te ontwikkelen voor een parametrisch DO-berekening van een open tunnelbak?”. In het vooronderzoek wordt uiteengezet hoe én of het mogelijk is om de ontwerptool op te stellen. Hiermee wordt antwoord gegeven op deelvragen 1,2,3,4,5 en 6.

Allereerst is daar een grondige literatuurstudie voor benodigd. Dit literatuuronderzoek zal voornamelijk bestaan uit normenstudie. Ook zal de berekening van een open tunnelbak aan de hand van de normen volledig worden onderzocht en uiteengezet. Dit zal voornamelijk een exploratief en kwantitatief onderzoek zijn.

Het vooronderzoek wordt uitgevoerd aan de hand van softwareonderzoek, een variantenstudie op de tunnelbakken, de beoogde gebruikers en de ontwerpaspecten die voor de diverse gebruikers verschillen. Duurzaamheid zal behandeld worden, en ook zal er een enquête binnen de organisatie verspreid worden, waarin de constructeurs hun voorkeuren en suggesties ten opzichte van een ontwerptool kenbaar kunnen maken.

Deel I wordt afgesloten met een conclusie waarin de bevindingen uiteengezet worden.

I.1. Waarom een ontwerptool?

In de eerste plaats moet men zich afvragen waarom een ontwerptool noodzakelijk is. Zoals in het plan van aanpak is gesteld, zijn de berekeningen voor tunnelbakken handberekeningen. Deze berekeningen zijn semi-automatisch, waardoor er een veelvuldig herhaald proces benodigd is om tot een eindresultaat te komen. Zeker als constructies in vormgeving aan elkaar gelijk zijn, wat bij tunnelbakken vaak het geval is, moet de constructeur de verschillende handelingen veelvuldig opnieuw uitvoeren.

I.1.1 Procesverbetering

Op de vraag waarom een ontwerptool benodigd is, kan als antwoord gegeven worden dat een ontwerptool zorgt voor een aanzienlijke procesverbetering. Door deze ontwerptool kan een berekening, welke normaliter ongeveer anderhalve week in beslag neemt, in een dagdeel uitgevoerd worden. Door deze automatisatie wordt er tevens gezorgd voor een vorm van fouteneliminatie. Als de ontwerptool eenmaal gecontroleerd en vrijgegeven is, kan men ervanuit gaan dat deze correct is in zijn berekeningen.

Iets wat parallel loopt aan fouteneliminatie zijn faalkosten. Het maken van fouten levert bijna altijd vertraging op. Dit brengt extra kosten met zich mee die, door een ontwerptool minimaal of te beperken zijn.

En misschien wel het belangrijkste aspect: efficiënt werken. Een ontwerptool zorgt door procesverbetering voor efficiëntie in de berekening.

I.1.2 Duurzaamheid

Duurzaamheid is een begrip waar tijdens het onderzoek rekening mee gehouden moet worden. Daarvoor is inzicht nodig in duurzaamheid. Vaak wordt duurzaamheid vertaald naar de 3 p's. People, planet en profit: mensen, milieu en winst (Wikipedia, 2017). Verduurzamen van leef- en werkomgeving. In het geval van dit onderzoek is het een verduurzaming van de werkomgeving: het proces. Een aantal aspecten van het proces die verduurzaamd kunnen worden, zijn:

- Inefficiënt gebruik van manuren door een semi-automatische handberekening.
- Hoeveelheid materiaal reduceren door een iteratief optimalisatieproces in te bouwen in de ontwerptool.
- Voorbeeld: Dwarskrachtcapaciteit is afhankelijk van de betonsterkteklasse. Als de dwarskrachtcapaciteit niet afdoende is, kan de betonsterkteklasse verhoogd worden. De prijs per m³ ligt hoger, maar zorgt dat er geen beugelwapening benodigd is.

Materiaalreductie betekent minder uitstoot en afwezigheid van bijvoorbeeld dwarskrachtwapening of betonmassa betekent minder kosten en arbeidsuren. In feite passen alle 3 de p's bij dit aspect.

Een ander aspect van de 3 p's wat bij de ontwerptool toegepast wordt, is people. Het welzijn van de werknemers staat hoog in het vaandel bij Wagemaker. Het is dus bijkomend voordeel dat de ontwerptool het welzijn verbetert. Procesverbetering en automatisering geeft een verminderde werkdruk dus minder stress. Ook zijn er minder handelingen nodig. Doordat de berekening geautomatiseerd wordt, worden de manuren geminimaliseerd. Dit zorgt voor een hogere efficiëntie.

Een term die gehanteerd wordt, en die uitstekend aansluit bij het onderzoek is:

"Lean en Green stimuleert organisaties om met elkaar te groeien naar een hoger duurzaamheidsniveau, door maatregelen te nemen die niet alleen kostenbesparingen opleveren,

maar gelijktijdig milieubelasting reduceren én tot een efficiëntere inrichting van de bedrijfs- en logistieke processen leiden” (Lean & Green NL, n.d.).

I.1.3 Nadelen

Het grootste gevaar van een ontwerptool is dat deze eenvoudig in het gebruik is, waardoor iemand met weinig vakkennis ook de ontwerptool kan aansturen. Hierdoor kunnen er fouten gemaakt worden. Omdat er voor de ontwerptool wel degelijk vakkennis benodigd is, is het aan Wagemaker de taak om te zorgen dat de ontwerptool te allen tijde wordt aangestuurd door een constructeur. Dit om de controleerbaarheid en kwaliteit te garanderen.

Een ander nadeel is, dat er in de toekomst wellicht een revisie op de EuroCode normen uitgebracht wordt. Hierdoor zal de ontwerptool wellicht niet meer voldoen, waardoor de ontwerptool herzien moet worden. Dit is echter met een handberekening ook niet onoverkomelijk.

I.1.4 Interview externe expert

Om de visie op parametriseren te verbreden is er besloten om met een externe expert te sparren over het onderwerp. Er is intern aanbevolen om met Chris van der Ploeg, van ABT B.V. Ingenieursbureau Delft, te gaan praten. Daar hij al geruime tijd werkt aan het opstellen van parametrisaties voor berekeningen én geregeld spreker is op conferenties over parametriseren, was het zeer leerzaam om met hem gesproken te hebben. De volledige uitwerking van dit interview staat in “Bijlage A5 – Interview externe expert”.

I.1.4.1 Parametriseren

Voordat men gaat beginnen met parametriseren, moet men zich afvragen waarom je zou willen parametriseren. De conventionele berekeningsmethodes duren mogelijk lang, maar maken gebruik van bewezen technieken en methodes. Daarbij is bij sommige constructeurs de angst aanwezig voor het onbekende en is er een andere mindset nodig om de controle over een berekening gedeeltelijk los te laten en door een automatisatie uit te laten voeren.

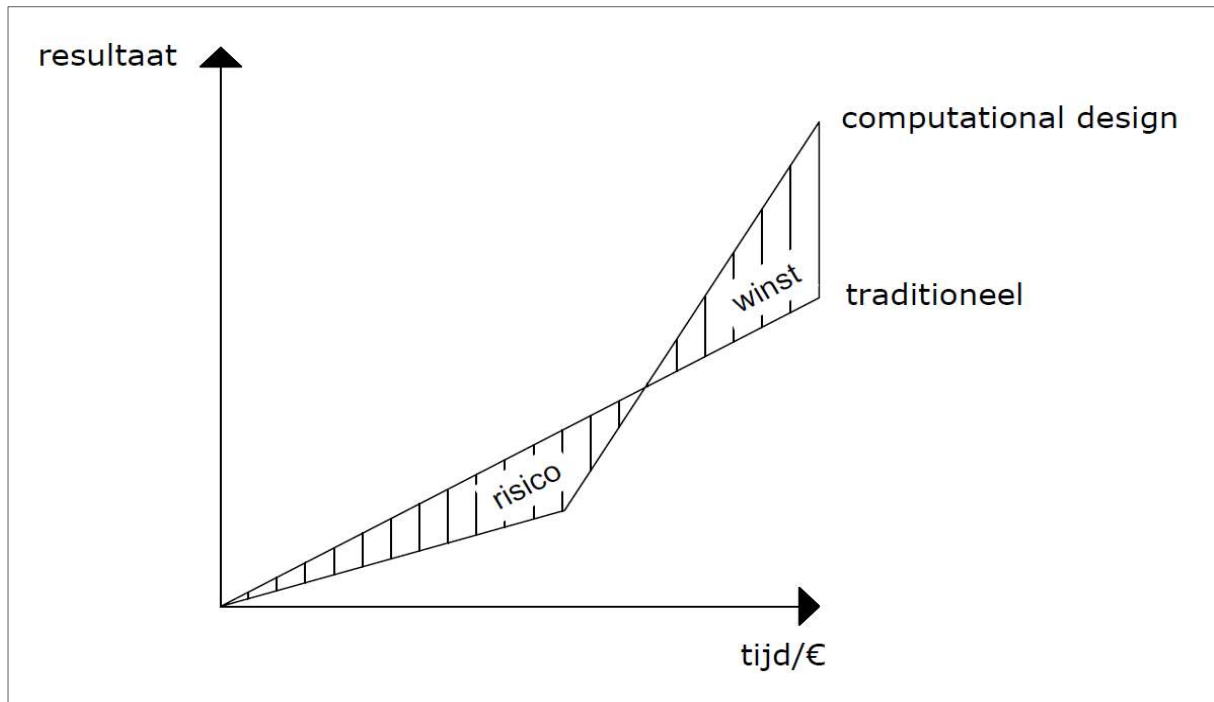
Waarom parametriseren:

- Ontwerpvariatie;
- Inspelen op verandering;
- Generatief ontwerp;
- Simuleren voor inzicht;
- Leren van variatie door simulatie.

Al deze voordelen dragen bij aan een verbetering van de huidige methodes. Ook is het mogelijk om efficiëntie en inzicht toe te voegen, waarin complexe landschappen en het zoeken naar een optimum aan bod komen. Als volgorde van het proces kan genoemd worden: Think – Make rules – Codes – Enter. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de 80/20 regel. 80% van de regels worden van tevoren vastgesteld. De overige 20% volgt tijdens de toepassing. Deze van tevoren vastgestelde regels (80%) worden relatief snel in het parametrisch model ingebouwd, er wordt gesteld dat deze regels ongeveer 20% van de tijd kost. De overige tijd wordt besteed aan de onbekende 20% van de regels.

Hierbij wordt van tevoren geanticipeerd op eventuele wijzigingen. Wel is het in het belang van een project om duidelijke randvoorwaardes te hanteren. Dit om enige afbakening in het proces te hebben. Met andere woorden: de spelregels opstellen. Tekeningen – Informatie – Regels (logica) = parametriseren. Men begint altijd met het opstellen van de spelregels om inzicht te krijgen in de hoeveelheid van de werkzaamheden.

Al deze aspecten van parametriseren zijn samen te vatten onder de term computational design. Computational design betekend letterlijk het vormgeven met behulp van rekenkracht van computer en scripting. In figuur I.1 is het principe van computational design weergegeven.



Figuur I.1: Computational design versus traditioneel

Het opstellen van het model kost tijd en levert in beginsel weinig op. Na verloop van tijd is er het omslagpunt waarna men winst gaat maken. Deze winst is niet altijd in geld uit te drukken maar vaker in kwaliteit.

I.1.4.2 Maatschappelijke relevantie parametriseren

Buiten het feit dat een parametrisatie een efficiënte manier is om een berekening uit te voeren, levert het ook inzicht om kwaliteit te leveren. Door variatie en optimalisatie in het proces op te nemen gaat de berekening niet per se sneller, want er kunnen meer varianten toegepast worden (en uiteindelijk ook gevraagd worden), maar uiteindelijk zou je daarmee kwaliteit kunnen winnen.

Een parametrisch model en de stappen die daartoe leiden kunnen alleen goed uitgevoerd worden. Gebeurt dit niet, of ontbreken er stappen, dan werkt het model niet. Parametrisch ontwerp vereist een logisch, van tevoren opgesteld, stappenplan. Deze denkwijze ("computational thinking") kan een meerwaarde zijn voor handmatige berekening.

Voor de buitenwereld, met daarin onder anderen opdrachtgevers, is kwaliteit van wezenlijk belang. Ook de schaalbaarheid (toepasbaarheid) op andere projecten heeft zijn voordelen. Een bevestiging van de keuzes welke gemaakt worden, geven onder andere zekerheid, veiligheid en risicobeheersing mee aan de parametrisatie.

I.2. Softwareonderzoek

Na het hoe en waarom, wordt gekeken naar de software, waarin de ontwerptool opgebouwd wordt. De mogelijkheden om de spreadsheet ontwerptool in op te stellen, zijn Mathcad en Excel. De modellering en uiteindelijke krachtsberekening wordt uitgevoerd in SCIA Engineer of Technosoft Construct.

I.2.1 Spreadsheet

De eerste optie welke bekeken wordt is Mathcad. Mathcad is een wiskundig programma, waarin eenvoudig kleinere berekeningen gemaakt worden. Mathcad heeft als voordeel, dat de formules welke gebruikt worden in de berekening zichtbaar blijven. Hierdoor is het eenvoudiger om een eventuele fout uit de berekening te halen. Ook is Mathcad redelijk eenvoudig in het gebruik (PTC-Mathcad, 2018).

Het nadeel is echter dat het programma minder structuur heeft. Het programma leent zich om grote berekeningen uit te voeren, maar heeft een verminderde leesbaarheid vergeleken met bijvoorbeeld Excel. De mogelijkheid om via Mathcad een rekenprogramma zoals SCIA Engineer aan te sturen is aanwezig, maar de mogelijkheden zijn minder bekend bij ons. Dit is het grootste nadeel van Mathcad. Het programma wordt relatief weinig gebruikt en de koppeling welke gemaakt moet worden is niet voorhanden (Engineering, 2018).

De tweede optie is om de ontwerptool op te bouwen in Excel. Het grote voordeel van Excel is de algemene bekendheid. Er zijn door ons en Wagemaker al veel berekeningen uitgevoerd in Excel en er kunnen gehele berekeningsrapportages vanuit Excel gemaakt worden. Excel bezit ontzettend veel functies, zoals de scroll-down menu's en de zoekfuncties, welke gebruikt kunnen worden. Het nadeel van Excel is echter dat, mits de spreadsheets niet goed geprogrammeerd zijn, de spreadsheets lastig te controleren zijn. De formules zijn niet zichtbaar, dit maakt het lastiger om een eventuele fout te herleiden.

I.2.2 Rekenprogramma

De geometrie en belastingen worden vertaald naar een rekenprogramma. Een van de rekenprogramma's welke toegepast kan worden is SCIA Engineer. In SCIA Engineer is het mogelijk om in zowel een 2D als een 3D omgeving het model op te bouwen. Tevens wordt er gekozen tussen een staafmodel of een platenmodel. Voor geavanceerde berekeningen is SCIA uitermate geschikt. De link tussen SCIA en de ontwerptool is zeer goed te maken. SCIA is compatibel met zowel Mathcad als Excel. Ook is SCIA het programma waarvoor de licenties beschikbaar zijn, bij zowel Wagemaker als ons (SCIA Engineer, 2018)

Een ander rekenprogramma is Technosoft Construct. In Technosoft is het enkel mogelijk om 2D staafmodellen in te voeren. De koppeling tussen Technosoft en Excel is ook mogelijk. Het grootste nadeel van Technosoft is, dat er binnen de organisatie en bij ons geen licenties beschikbaar zijn. Hierdoor wordt het gebruik van Technosoft feitelijk onmogelijk. Ook zijn geavanceerde berekeningen in Technosoft moeilijker uit te voeren.

I.2.3 Afbakening

Om een goede keuze te kunnen maken wat betreft het opstellen van een ontwerptool, moet men zich afvragen wie er allemaal stakeholder zijn in de totstandkoming van de ontwerptool. De stakeholders bestaan uit alle constructeurs van Wagemaker en ons.

Om een gedegen keuze te maken, wordt er een onderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek bestaat uit een enquête met aanvullende interviews. De enquêtes zijn bijgevoegd in “Bijlage A4 - Enquête tool tunnelbak”.

Uit de enquêtes blijkt dat het merendeel van de constructeurs een voorkeur heeft voor de softwarepakketten SCIA Engineer en Microsoft Excel. Daarnaast wordt er veelal gebruik gemaakt van software zoals Dbet EC2 (doorsnede-berekeningen). De ontwerptool zal dusdanig opgebouwd zijn dat dit programma niet meer benodigd is.

Een ander aspect van de ontwerptool dat graag teruggezien wordt, is het uitwerken van de ontwerptool in een berekeningsrapport, mits deze nog aanpasbaar blijft voor eventuele wijzigingen.

De berekening wordt uitgevoerd in SCIA Engineer, omdat dit het programma is welke door het afstudeerbedrijf gebruikt en aanbevolen wordt. Voor dit programma zijn tevens de licenties aanwezig bij ons.

I.2.4 Link tussen programmatuur

Om een goed werkende ontwerptool op te stellen, wordt er een koppeling gemaakt tussen Excel en het rekenprogramma SCIA Engineer. Deze koppeling valt echter buiten de scope van de opdracht. Om deze koppeling te kunnen realiseren is een grote voorkennis van het programmeren benodigd. Er is simpelweg geen tijd om dit geheel uit te zoeken.

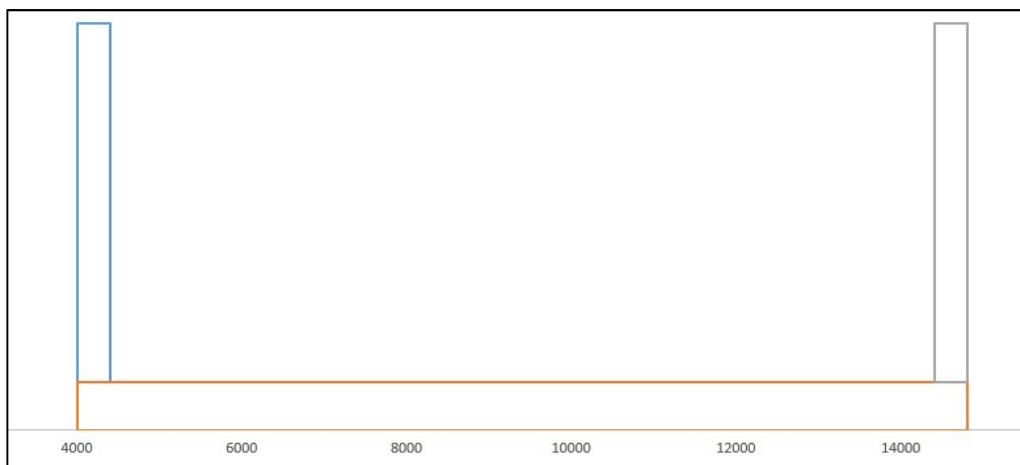
Om een goed werkende ontwerptool op te leveren aan het einde van het afstudeertraject, programmeert Dennis Schoenmakers de koppeling. De benodigde gegevens om tot deze koppeling te komen, worden wel door ons aangeleverd. Ook de gegevens welke uit de koppeling als output gegenereerd worden, worden door ons verwerkt.

I.3. Variantenstudie tunnelbakken

De open tunnelbak wordt in een U-vorm uitgevoerd. Echter wordt er met de invulling van deze U-vorm veel gevarieerd. Er wordt onderzoek gedaan naar de verschillende mogelijkheden en bekeken in hoeverre deze mogelijkheden in de ontwerptool meegenomen worden. Tunnelbakken voor gemengd gebruikersverkeer (zoals fiets- en autoverkeer), worden buiten beschouwing gelaten zodat de baksymmetrie niet aangetast wordt en omdat dit in een later stadium van het onderzoek (programmeren) voordelen heeft.

I.3.1 Standaard tunnelbak

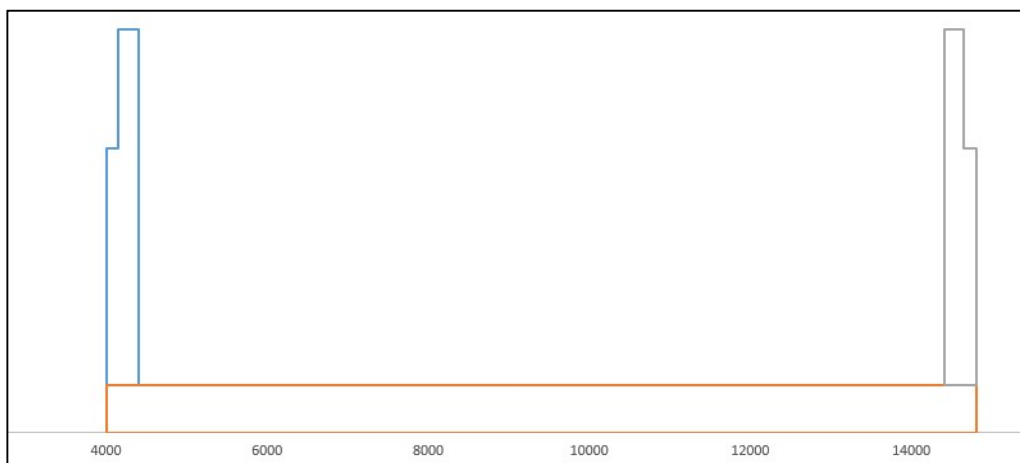
De geometrie welke voor de standaard tunnelbak wordt aangehouden, is de geometrie met rechte wanden en geen extra toegevoegde elementen. De tunnelbak wordt weergegeven in figuur I.2. Deze geometrie is de basis voor de open tunnelbak.



Figuur I.2: Standaard geometrie open tunnelbak

I.3.2 Verjonging

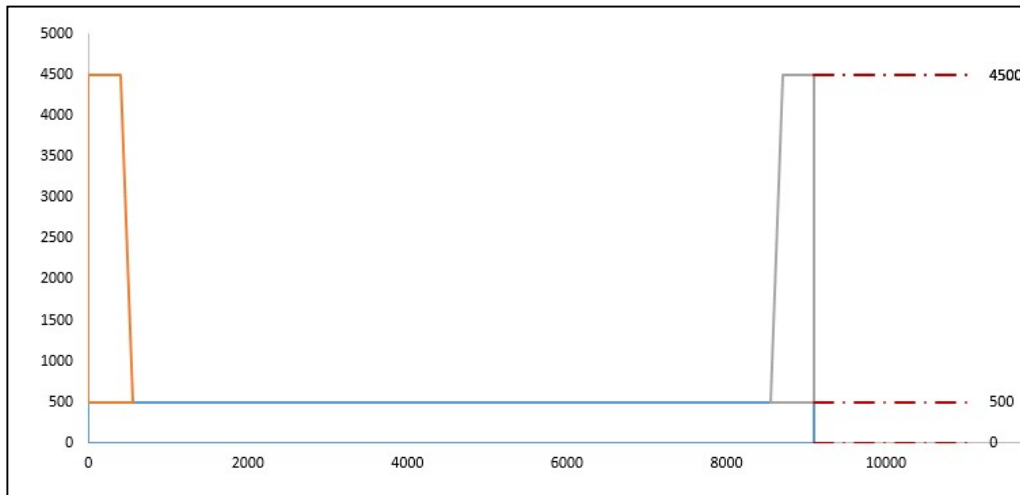
De eerste aanpassing ten opzichte van de standaard geometrie, is een wand waarin verjonging is toegepast. Aangezien de krachtsverdeling aan de onderzijde van de wand het grootste is (grotere korrel- en waterspanning), wordt er in sommige gevallen volstaan met een verjongde wand. Deze wand heeft een versprongen geometrie. Deze verjonging wordt ook om esthetische redenen uitgevoerd, zodat op het maaiveld een slanke wand te zien is. Ook is een vermindering van het betonvolume voordelig. De verjonging is weergegeven in figuur I.3.



Figuur I.3: Open tunnelbak met verjongde wanden

I.3.3 Taps toelopende wanden

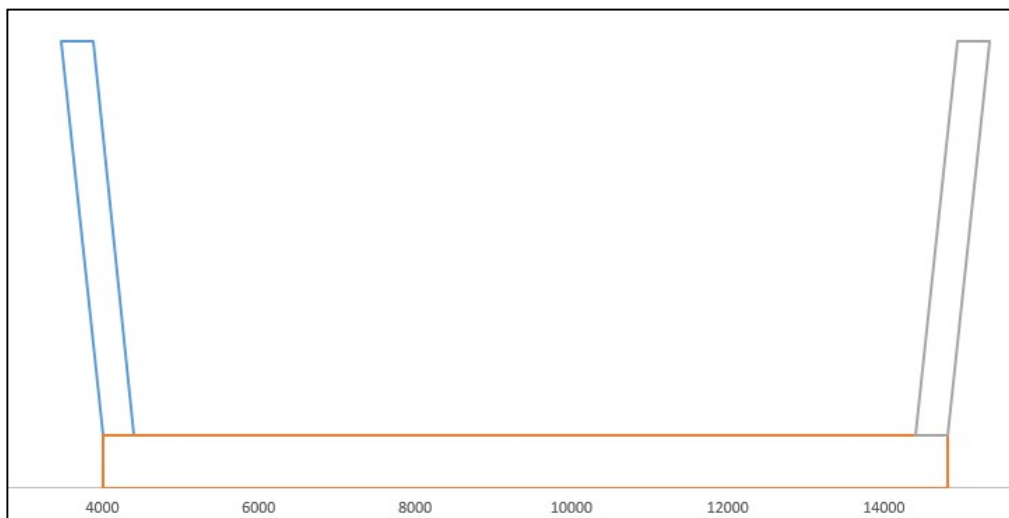
Naast de wanden met verjonging, worden er ook wanden uitgevoerd met een taps toelopende wanddikte. Deze wanden worden uitgevoerd, omdat de krachtswerking in het onderste gedeelte van de wanden groter is dan in de bovenste gedeeltes. Ook wordt deze wand uitgevoerd om esthetische redenen en is de geometrie voordelig voor de opname van de krachtswerking als gevolg van de gronddruk. Ook ontstaat er een bredere doorsnede doordat de geometrie met taps toelopende wanden is uitgevoerd. Deze geometrie is weergegeven in figuur I.4.



Figuur I.4: Taps toelopende wanden

I.3.4 Schuine wanden

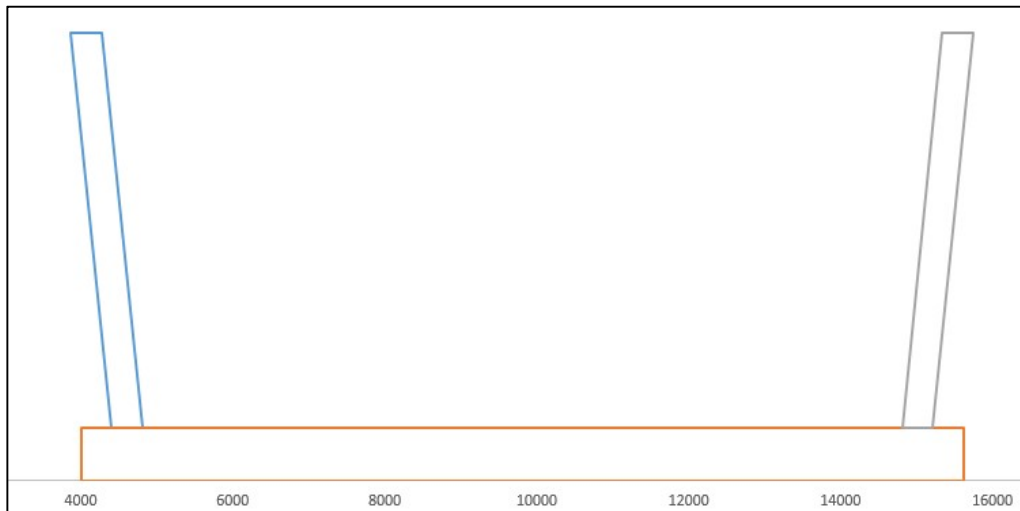
Ook worden er veel tunnelbakken met schuine wanden uitgevoerd. Deze schuine wanden worden om esthetische redenen toegepast. Net zoals in paragraaf 3.3 ontstaat er een bredere doorsnede, doordat de geometrie met schuine wanden is uitgevoerd. Het enige grote verschil met taps toelopende wanden is het betonvolume. Deze geometrie is weergegeven in figuur I.5.



Figuur I.5: Schuine wanden

I.3.5 Vloer met oren

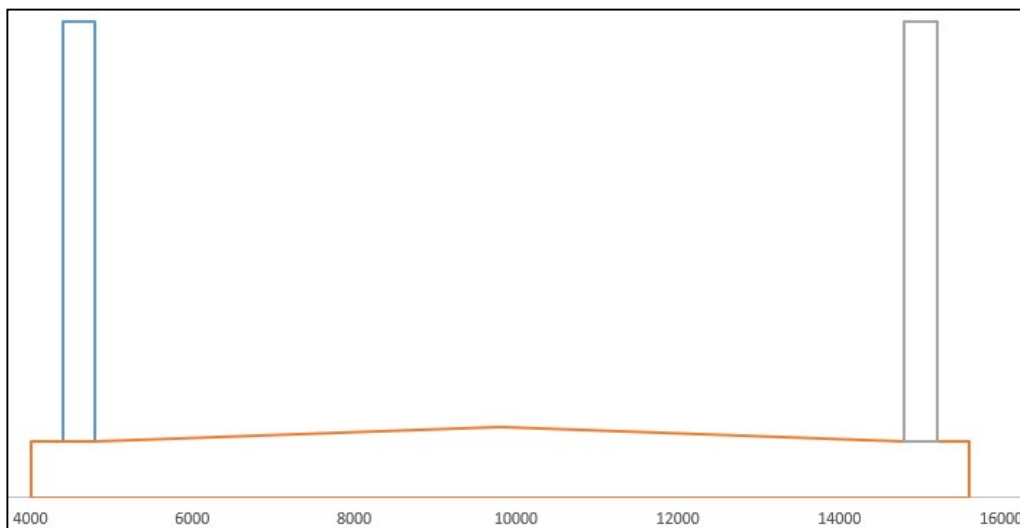
Vaak dient de tunnelbak voldoende eigen gewicht te hebben, om opdrijving te voorkomen. Aan de vloer van de tunnelbak worden 'oren' toegepast om het eigen gewicht te verhogen. De grondmassa zorgt tevens voor een extra neerwaartse belasting. De oren kunnen tevens worden uitgevoerd om de bekisting op te stellen. Deze oren worden vaak uitgevoerd in combinatie met schuine wanden. Deze geometrie is weergegeven in figuur I.6.



Figuur I.6: "Oren" in combinatie met schuine wanden

I.3.6 Verkanting vloer

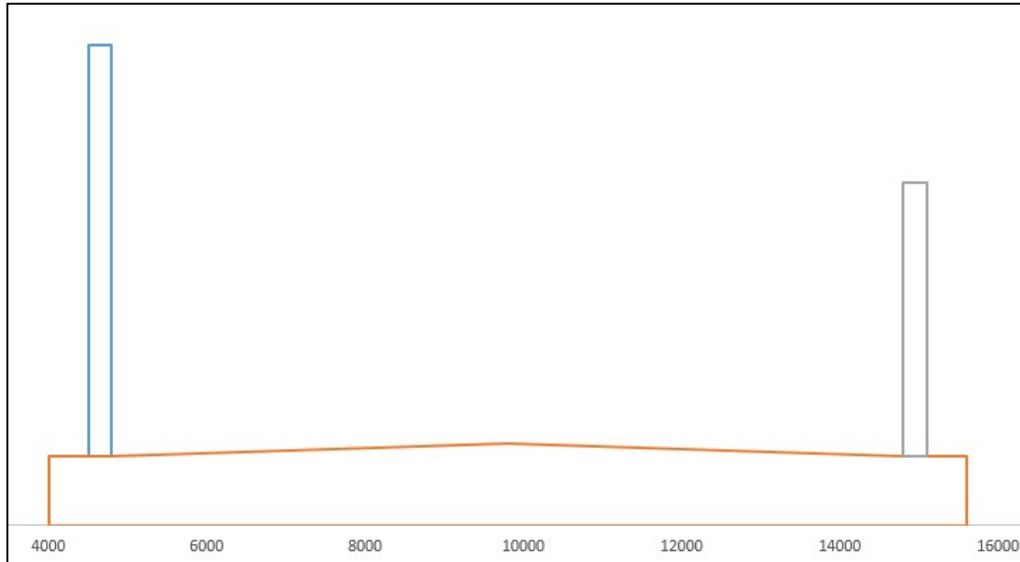
Elke tunnelbak wordt uitgevoerd met een verkanting. Deze verkanting wordt veelal uitgevoerd in de constructieve betonnen vloer. Hierdoor kan het asfalt gelijkmatig aangebracht worden. De verkanting is noodzakelijk om de afwatering in de tunnelbak te regelen. De verkanting wordt veelal in combinatie met bovengenoemde aspecten, zoals oren, schuine wanden of verjonging, uitgevoerd. Deze geometrie is weergegeven in figuur I.7.



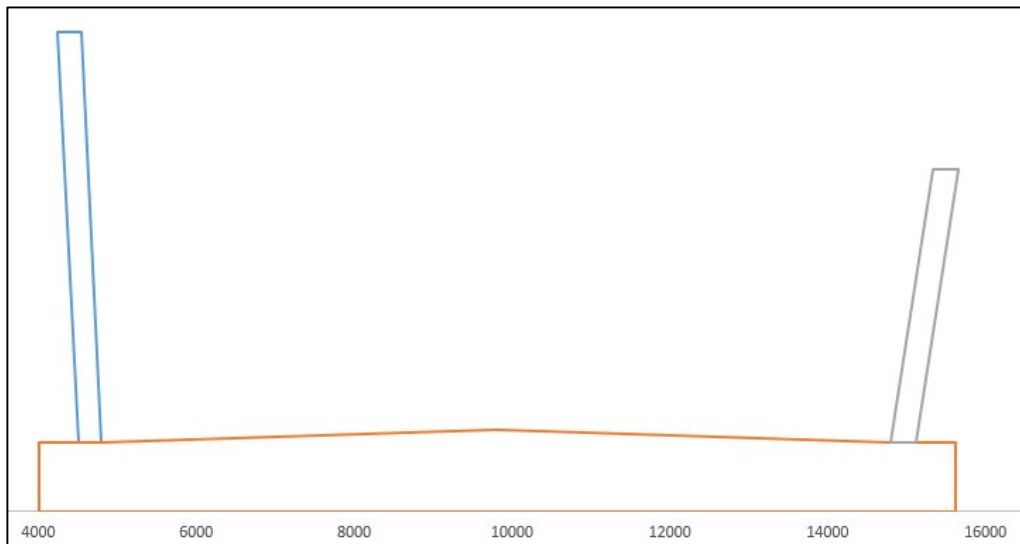
Figuur I.7: Tunnelbak met verkanting in de vloer

I.3.7 Asymmetrische doorsnede

Er kan gekozen worden om de doorsnede asymmetrisch te maken. Als de maaiveldhoogte verschilt aan beide zijden van de tunnelbak, kunnen de wanden bijvoorbeeld een verschillende hoogte krijgen. Tevens kunnen de wanden onder een verschillende hoek geplaatst worden. Ook kan er gevarieerd worden in de lengte van de oren, of de verjonging in de wand. Deze geometrieën zijn weergegeven in figuur I.8 en I.9.



Figuur I.8: Asymmetrische doorsnede rechte wanden



Figuur I.9: Asymmetrische doorsnede schuine wanden

I.4. Beoogde gebruikers

Tunnelbakken hebben diverse functies, wat ervoor zorgt dat ze verschillende gebruikers hebben. Deze gebruikers zijn in 4 categorieën onder te verdelen.

1. Spoorwegverkeer
2. Autoverkeer (wegverkeer)
3. Fietsverkeer (wegverkeer)
4. Voetgangers

I.4.1 Spoorwegverkeer

Spoorwegverkeer is in heel Nederland aanwezig, omdat dit een belangrijk onderdeel van het ov-netwerk van Nederland is. Daar gelijkvloerse kruisingen met ander wegverkeer veelal voor overlast zorgen, kiest onder anderen ProRail ervoor om dit te verhelpen met ongelijkvloerse kruisingen. Omdat tunnelbakken benodigd zijn die naar de onderdoorgangen leiden moeten deze bestand zijn tegen de belastingen die voortkomen uit de aslasten van een treinstel. De eisen aan een tunnelbak voor spoorwegverkeer worden in hoofdstuk 5 van dit onderzoek behandeld.

Daar het eigenlijk niet voorkomt dat een spoorwegtunnel gemengd verkeer faciliteert, kan er gekozen worden voor een niet al te complexe vormgeving. In bijvoorbeeld Rotterdam komt het voor dat een wegverkeersonderdoorgang sporadisch een tramlijn faciliteert.

I.4.2 Autoverkeer

Auto's zijn de meest voorkomende gebruikers van tunnelbakken in Nederland. Kruisende verkeersstromen ontlopen elkaar door gebruik te maken van een onderdoorgang. De kruisende wegen kunnen gebiedsontsluitingswegen, provinciale wegen, autowegen en autosnelwegen zijn. Soms is een onderdoorgang onder een spoorlijn of watergang ook het geval.

I.4.3 Fietsverkeer

Fietsverkeer is naast autoverkeer de meest voorkomende gebruiker van tunnelbakken. Omdat fietsers toch een kwetsbare schakel in het verkeer blijven, wordt er vaak gekozen om ze met een onderdoorgang te laten kruisen met bijvoorbeeld een provinciale weg. Dit zodat de verkeersveiligheid verhoogd wordt en het autoverkeer geen hinder ondervindt.

I.4.4 Voetgangers

Tunnelbakken voor voetgangers onderscheiden zich door de relatief eenvoudige geometrie. Dit omdat voetgangers relatief weinig belastingen afgeven aan de constructie, hoeft deze niet extreem zwaar uitgevoerd te worden. Dit kan echter ook een nadeel zijn omdat er tegen opdrijven weinig tegendruk gegeven wordt, omdat het eigen gewicht laag is.

I.4.5 Algemene aspecten

In fietsonderdoorgangen kan het voorkomen dat een calamiteitervoertuig moet passeren. Hier moeten sommige tunnelbakken voor fietsverkeer dus op berekend worden. Overige ontwerpaspecten waar men rekening mee moet houden, zijn het profiel van vrije ruimte en de afvoer van hemelwater. Ook verlichtingsarmatuur speelt een rol, daar deze nog gecumuleerd moet worden bij het profiel van vrije ruimte. Voor al deze typen wegen, met als gebruiker de auto, zijn verschillende richtlijnen en normen opgesteld. De ontwerp-eisen voor breedtes van auto- en fietsverkeer staan in CROW-publicatie 328 - 331, de ASVV 2012 en de ROA 2017 en worden in hoofdstuk 5 uiteengezet.

I.5. Ontwerpaspecten tunnelbak

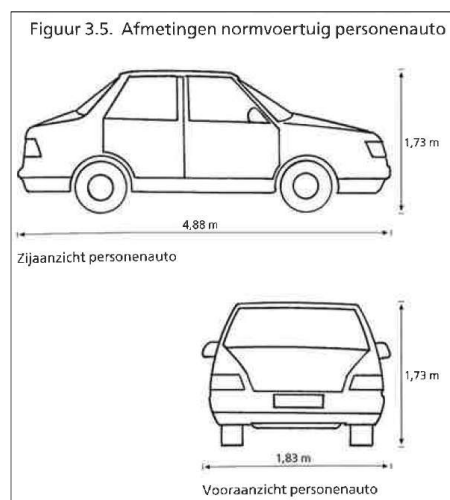
De verschillende gebruikers, beschreven in hoofdstuk 4, hebben hun eigen ontwerpeisen voor tunnelbakken. In dit hoofdstuk worden de verschillende eisen uiteengezet.

I.5.1 Karakteristieken voertuig/weggebruiker

Als eerste worden de afmetingen van de verschillende voertuigen en weggebruikers vastgelegd. Het profiel van vrije ruimte is hiervan namelijk afhankelijk. De karakteristieken van de voertuigen/weggebruiker zijn weergegeven in tabel I.1. In figuur I.10 en I.11 is weergegeven waar de waarden afkomstig van zijn. (CROW, 2013, d)

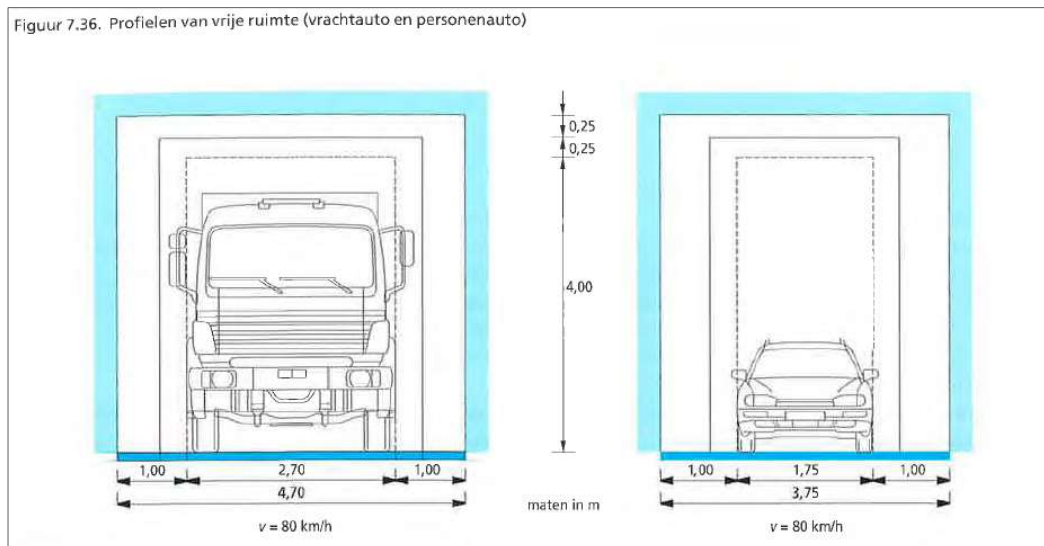
Tabel I.1: Karakteristieken voertuig/weggebruiker (CROW 328 hoofdstuk 3)

Ontwerpvoertuig	Lengte (m)	Breedte (m)	Hoogte (m)
Personenauto	4.88	1.83	1.73
Motorfiets	2.32	0.80	1.20
Vrachtauto (ongeleed)	12.00	2.55	4.00
Aanhangwagen	8.90	2.55	4.00
Vrachtauto met aanhanger	19.25	2.55	4.00
Trekker	6.55	2.55	4.00
Oplegger	14.40	2.55	4.00
Trekker met oplegger	16.50	2.55	4.00
Autobus	13.50	2.55	4.00
Landbouwvoertuig	12.00	3.00	4.00
Aanhangwagen	12.00	3.00	4.00
Landbouwvoertuig met aanhanger	18.00	3.00	4.00
Bromfiets	1.90	0.75	1.09
Brommobiel	3.03	1.52	1.51
Fiets	1.94	0.64	1.23
Voetganger	0.60	0.60	2.00
Rolstoel	1.50	0.80	1.70
Tram	37.00	2.65	3.60
Hulpverleningsvoertuig	12.00	2.60	4.20
Ruiters	-	1.00	2.00



Figuur I.10: Figuur 3.5 CROW-publicatie 328

Het profiel van vrije ruimte is opgebouwd uit verkeersruimte en objectafstand. Dit is het minimale profiel waaraan een tunnelbak moet voldoen. Ook rekent Wagemaker bovenop de 4.60 m vrije ruimte voor vrachtauto's en personenauto's nog 0.05 m speling. Deze speling is voor zetting, doorbuiging, eventuele asfaltoverlagingen en bouwtoleranties. In tabel I.2 zijn deze profielen weergegeven.



Figuur I.11: PVR figuur 7.36 CROW-publicatie 328

Tabel I.2: Profiel van Vrije Ruimte

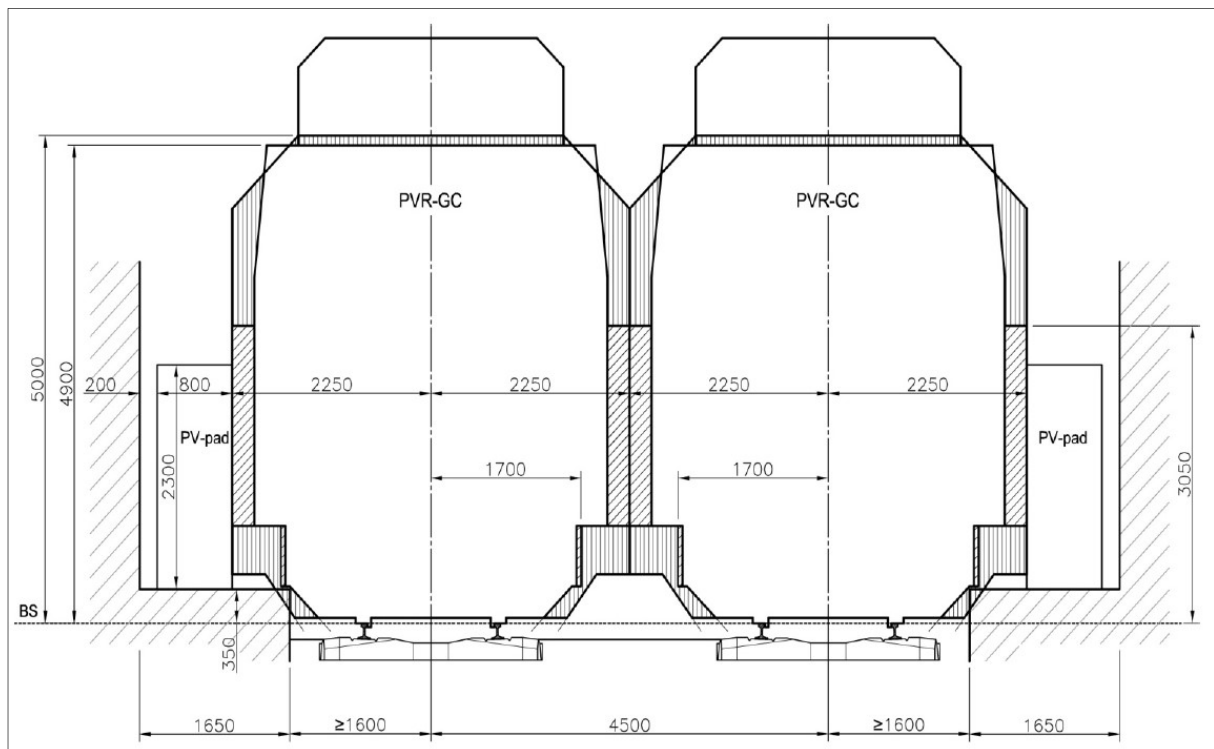
Ontwerpvoertuig	Breedte (m)	Hoogte (m)
Personenauto	3.75 (1.75 + 2x1.00)	2.71 (2.06 + 0.60 + 0.05)
Vrachtauto	4.70 (2.70 + 2x1.00)	4.65 (4.00 + 0.60 + 0.05)
Fiets	2.00 (0.75 + 2x0.625)	2.50
Voetganger	1.50	2.50
Ruiter	2.00 (1.00 + 2x0.50)	3.00
Tram	4.65 (2.65 + 2x1.00)	4.65
Hulpverleningsvoertuig	4.60 (2.60 + 2x1.00)	4.65
Trein	4.50	6.00/6.15 (5.00 + 1.00 of 1.15)

I.5.2 Spoorwegverkeer

Spoorwegverkeer heeft zeer specifieke eisen wat de tunnelbakken betreft. Daardoor kan een trein niet in een tunnelbak rijden, welke tegelijkertijd geschikt is voor autoverkeer. Er moeten speciale voorzieningen getroffen worden en er moeten bovenleidingen geplaatst worden in geval van een geëlektrificeerd spoor. Het profiel wat gehanteerd wordt, is het PVR-GC (zie tabel I.3 en figuur I.12). Dit profiel wordt gehanteerd worden bij elk, aan te leggen, spoor en is gebaseerd op het grootste beladingsprofiel voor goederenvervoer. Het profiel kan maximaal 1500V – 25kV aan (ProRail, 2013).

Tabel I.3: Tunnelbak met 2x1 spoorrichting

Onderdeel	Breedte (m)
Vrije ruimte (m)	0.20
Vluchtpad (m)	0.80
Spoorrichting links (m)	4.50
Spoorrichting rechts (m)	4.50
Vluchtpad (m)	0.80
Vrije ruimte (m)	0.20
Totaal (m)	11.00



Figuur I.12: Bijlage 6 OVS0026

I.5.3 Autoverkeer

Autoverkeer is te verdelen in 4 verschillende wegen. Auto(snel)wegen, provinciale wegen, gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen. In deze paragraaf zijn de ontwerpisen van de verschillende wegen uiteengezet.

I.5.3.1 Auto(snel)wegen

Indien een tunnelbak te breed wordt, is dit nadelig omdat de bak dan kan gaan opbarsten. Als de bak relatief smal is, dan zijn de afmetingen en het eigen gewicht die daaruit voortkomen nog voldoende om de waterdruk tegen te gaan. Daarna wordt deze druk te groot en zijn er trekpalen nodig om opbarsten tegen te gaan. Omdat in de ontwerptool alleen funderingen op staal worden beschouwd, is dit onderdeel van de afbakening van de ontwerptool. Ook kan een architect een breedte opgeven, welke dan aangehouden dient te worden.

Binnenin de tunnelbak zijn een aantal ontwerpaspecten van toepassing, die consequenties hebben voor de breedte van de tunnelbak. Er kan als afschermingsvoorziening gekozen worden voor barriers en geleiderails. Geleiderails hebben een breedte van 0.60 m en hebben vervolgens een uitbuigingsruimte/inspectiepad van 0.50 m nodig. Dubbele geleiderails hebben een breedte van 0.80 m. Barriers hebben een standaardbreedte van 0.60 m, hebben geen uitbuigingsruimte/inspectiepad nodig en kunnen dus, mits als halve barrier, tegen de tunnelwand geplaatst worden. Ook kan in plaats van een afschermingsvoorziening voor een middenberm gekozen worden of 2 halve barriers met tussenruimte als de afschermingsvoorziening aan moet sluiten op een tunnelwand.

Een redresseerstrook wordt in een tunnelbak bijna altijd vervangen door een obstakelafstand in verband met obstakelvrees. Daar een redresseerstrook 0.60 m breed is en een obstakelafstand 1.00m breed is vanaf de binnenkant van de kantstreep, is de obstakelafstand maatgevend. Indien er een vluchtstrook wordt toegepast, vervalt deze obstakelafstand en wordt een breedte van 3.15 m vanaf de buitenkant van de kantstreep toegepast.

Hemelwaterafvoer is ook een ontwerpaspect waardoor de breedte gewijzigd kan worden. In beide situaties heeft de vloer een afschot naar de wanden toe (dakprofiel). Indien de hemelwaterafvoervoorziening haaks op de rijrichting wordt geplaatst, zijn er geen consequenties. Indien deze afvoer parallel aan de rijrichting geplaatst wordt, zijn er wel degelijk consequenties. De kolkgeul zorgt namelijk voor een verbreding. De obstakelafstand komt te vervallen en wordt vervangen door een redresseerstrook van 0.60 m. Vanaf deze redresseerstrook wordt een afstand van 1.00 m tot de afschermingsvoorziening aangehouden. Deze ruimte wordt in beslag genomen door een kolkinlaat en afwateringsgeul.

Rekening wordt gehouden met bochtverbreding. Als door het horizontaal alignement de tunnelbak in een boogstraal ligt, zal bochtverbreding worden toegepast. Bij een binnenbochtboogstraal van 100 m zal de bochtverbreding 0.05 m bedragen, wat ervoor zorgt dat de rijstrookbreedte 3.55 m wordt. Bij een binnenbochtstraal van 90 m bedraagt de bochtverbreding 0.15 m en bij een straal van 80 m is deze 0.25 m. Kleinere bochtstralen worden op autosnelwegen niet toegepast en bij grotere bochtstralen is de bochtverbreding te verwaarlozen (Rijkwaterstaat, 2017).

In tabel I.4 is een variant met 2x2 rijstroken uitgewerkt. De lengtemarkering kan variëren en is weergegeven in tabel I.5.

Tabel I.4: Tunnelbak met 2x2 rijstroken en barriers

Onderdeel	Breedte (m)
Afschermingsvoorziening (m)	0.35
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Kantstreep (m)	0.20
Rijstrook (m)	3.50
Deelstreep (m)	0.15
Rijstrook (m)	3.50
Kantstreep (m)	0.20
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Afschermingsvoorziening (m)	0.60
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Kantstreep (m)	0.20
Rijstrook (m)	3.50
Deelstreep (m)	0.15
Rijstrook (m)	3.50
Kantstreep (m)	0.20
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Afschermingsvoorziening (m)	0.35
Totaal (m)	20.40

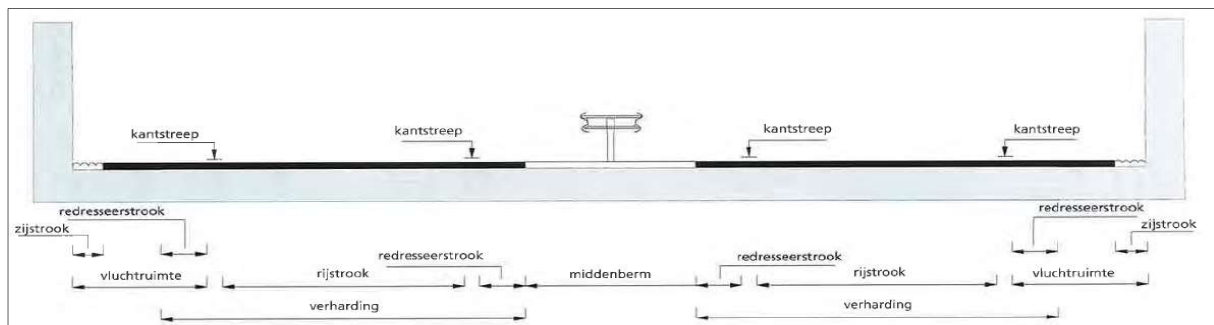
Tabel I.5: Patronen lengtemarkering

Vontwerp (km/u)	Kantstreep (m)	Deelstreep (m)	Blokmarkering (m)
130	0.20	0.15	1-3, (0.45)

I.5.3.2 Provinciale wegen

Bij provinciale wegen moet er onderscheid gemaakt worden, tussen wegen met een maximumsnelheid van 90 km/u en een maximumsnelheid die lager is dan 90 km/u. In tabel I.6 t/m I.8 zijn de waardes, afkomstig uit CROW-publicatie 331, uiteengezet (CROW, 2013, a).

De ontwerpaspecten voor redresseerstroken en de toepassing daarvan is gelijk aan die van autosnelwegen. De toepassing van vluchtstroken is ook gelijk aan die van autosnelwegen maar de ontwerpaspecten verschillen. De vluchtstrook heeft een breedte van 2.45 m. Daarin zit 0.20 m kantstreep, 0.50 m uitstapbreedte en 1.75 m breedte van een personenauto. De ontwerpaspecten met betrekking tot afschermingsvoorzieningen, hemelwaterafvoer en bochtverbreding zijn ook gelijk.



Figuur I.13: Figuur 5.2 CROW-publicatie 331

Tabel I.6: Tunnelbak met 2x2 rijstroken en geleiderails

	v = 90 km/u		v < 90 km/u	
Onderdeel	Breedte (m)		Breedte (m)	
	1 rijstrook	≥ 2 rijstroken	1 rijstrook	≥ 2 rijstroken
Uitbuigingsruimte/inspectiepad (m)	0.50	0.50	0.50	0.50
Afschermingsvoorziening (m)	0.60	0.60	0.60	0.60
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00	1.00	0.60	0.60
Kantstreep (m)	0.20	0.20	0.15	0.15
Rijstrook (m)	3.00	3.25	3.00	3.10
Deelstreep (m)	-	0.15	-	0.15
Rijstrook (m)	-	3.25	-	3.10
Kantstreep (m)	0.20	0.20	0.15	0.15
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00	1.00	0.60	0.60
Afschermingsvoorziening (m)	0.80	0.80	0.80	0.80
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00	1.00	0.60	0.60
Kantstreep (m)	0.20	0.20	0.15	0.15
Rijstrook (m)	3.00	3.25	3.00	3.10
Deelstreep (m)	-	0.15	-	0.15
Rijstrook (m)	-	3.25	-	3.10
Kantstreep (m)	0.20	0.20	0.15	0.15
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00	1.00	0.60	0.60
Afschermingsvoorziening (m)	0.60	0.60	0.60	0.60
Uitbuigingsruimte/inspectiepad (m)	0.50	0.50	0.50	0.50
Totaal (m)	13.80	21.10	12.00	18.70

Tabel I.7: Patronen lengtemarkering

V_{ontwerp} (km/u)	Kantstreep (m)	Deelstreep (m)	Blokmarkering (m)
90	0.20	0.15	1-3, (0.45)
< 90	0.15	0.15	1-3, (0.30)

Tabel I.8: Breedte redresseerstrook

Type rijbaan	V_{ontwerp} 90 km/u (m)	V_{ontwerp} < 90 km/u (m)
Hoofdrijbaan	0.60	0.30

I.5.3.3 Gebiedsontsluitingswegen

Er zijn 2 typen wegen te onderscheiden bij gebiedsontsluitingswegen. Wegtype I en wegtype II. Daar wegtype I werkt met een rijbaanscheiding in de vorm van een middenberm, van minimaal 3.00 m, wordt deze buiten beschouwing gelaten. Dit is namelijk een niet economisch wegtype voor toepassing in een tunnelbak. Wegtype II is een enkelbaans weg met 2x1 rijstrook.

De ontwerpaspecten voor redresseerstroken en de toepassing daarvan is gelijk aan die van autosnelwegen. De toepassing van vluchtstroken is ook gelijk aan die van autosnelwegen maar de ontwerpaspecten verschillen. De vluchtstrook heeft een breedte van 2.40 m. Daarin zit 0.15 m kantstreep, 0.50 m uitstapbreedte en 1.75 m breedte ten behoeve van een personenauto. De waarden afkomstig uit CROW-publicatie 330 zijn uiteengezet in tabel I.9 t/m I.13. Om tabel I.9 te vormen zijn tabel I.10 t/m I.13 benodigd (CROW, 2013, b).

Tabel I.9: Tunnelbak met 2x1 rijstroken en barriers

Onderdeel	Breedte (m)
Afschermingsvoorziening (m)	0.35
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Kantstreep (m)	0.15
Rijstrook (m)	2.75
Scheidingsstreep (m)	0.15
Rijrichtingscheiding (m)	0.80
Scheidingsstreep (m)	0.15
Rijstrook (m)	2.75
Kantstreep (m)	0.15
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Afschermingsvoorziening (m)	0.35
Totaal (m)	9.60

Er kunnen verschillende patronen lengtemarkeringen worden toegepast. Een kantstreep 3-3, (0.15) houdt in dat de streep 0.15 m breed is. De lengte is telkens 3 meter met 3 meter tussenruimte.

Tabel I.10: Patronen lengtemarkering

V_{ontwerp} (km/u)	Scheidingsstreep (m)	Kantstreep (m)	Deelstreep (m)	Blokmarkering (m)
80	(0.15)	3-3, (0.15)	3-9, (0.15)	1-3, (0.40)

Tabel I.11: Rijstrookbreedte in rechtstanden en horizontale bogen > 300 m

	Breedte (m)	
Situatie	$V = 100$ km/u	$V = 80$ km/u
Afzonderlijke rijstrook	3.00	2.75

Tabel I.12: Obstakelafstand

Obstakelafstand	Breedte (m)
Voorkeur (vlucht- en bergingszone)	≥ 2.40
Normaal	≥ 1.00
Minimaal (indien beperkte lengte)	≥ 0.60

Tabel I.13: Breedte redresseerstrook (exclusief markering)

	Breedte (m)		
V _{ontwerp} (km/u)	Minimaal	Normaal	Maximaal
100	0.30	0.40	0.60
80	0.30	0.30	0.60

I.5.3.4 Erftoegangswegen

De ontwerpaspecten voor redresseerstroken en de toepassing ervan is gelijk aan die van autosnelwegen. Vluchtstroken worden nooit toegepast bij erftoegangswegen. De gegevens zijn opgesomd in tabel I.14 en tabel I.15. (CROW, 2013, c)

Tabel I.14: Tunnelbak met 2x1 rijstroken en barriers

Onderdeel	Breedte (m)
Afschermingsvoorziening (m)	0.35
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Kantstreep (m)	0.15
Rijstrook (m)	2.70
Scheidingsstreep (m)	0.15
Rijrichtingscheiding (m)	0.80
Scheidingsstreep (m)	0.15
Rijstrook (m)	2.70
Kantstreep (m)	0.15
Obstakelafstand vanaf binnenkant kantstreep (m)	1.00
Afschermingsvoorziening (m)	0.35
Totaal (m)	9.50

Tabel I.15: Rijstrookbreedte

	Breedte (m)	
Situatie	Minimaal profiel	Ideaal profiel
Eenrichtingsverkeer auto + fiets	3.40	3.85
Eenrichtingsverkeer auto, tweerichtingsverkeerfiets	3.85	4.40
Tweeichtingsverkeer auto, gebaseerd op ontwerpvoertuig personenauto en tweerichtingsverkeer fiets	4.80	5.80

I.5.4 Fietsverkeer

Het minimale profiel van een eenrichtingsfietspad heeft een breedte van 1.50 m. Dit is echter minimaal, want optimaal is deze breedte 2.00 m. In het geval van een tweerichtingsfietspad is de minimale breedte dus 3.00 m. Optimaal is deze breedte 4.00 m, maar vaak kiest men voor de middenweg en dat is 3.50 m. De deelstreep tussen beide rijstroken is 0.15 m breed, maar deze is verwerkt in de 3.50 m.

Net als andere weggebruikers hebben fietsers ook te maken met obstakelvrees, de tunnelwand. De afstand tussen de fietsers en het obstakel bedraagt aan beide kanten van het fietspad 0.625 m. Daarmee komt de totale breedte van een fietspad door een tunnelbak op 4.75 m te liggen (tabel I.16) (CROW, 2012).

Tabel I.16: Tunnelbak voor fietspad met 2x1 rijstroken

Onderdeel	Breedte minimaal (m)	Breedte optimaal (m)	Breedte optioneel (m)
Obstakelafstand (m)	0.625	0.625	0.625
Rijstrook (m)	1.50	2.00	1.75
Deelstreep (m)	0.15 (al verwerkt)	0.15 (al verwerkt)	0.15 (al verwerkt)
Rijstrook (m)	1.50	2.00	1.75
Obstakelafstand (m)	0.625	0.625	0.625
Totaal (m)	4.25	5.25	4.75

I.5.5 Voetgangers

Als richtlijn is gegeven dat voetpaden een optimale breedte van 1.80 m hebben. Minimaal is een breedte benodigd van 1.20 m. Ter plaatse van versmallingen in het voetpad is het toegestaan om het voetpad 0.90 m breed te maken. Een regulier profiel heeft een voetpadbreedte van 1.50 m. Variaties hierop zijn natuurlijk mogelijk. Een obstakelafstand is niet van toepassing bij een voetpad in een tunnelbak (tabel I.17) (CROW, 2012).

Tabel I.17: Voetpad

Onderdeel	Breedte minimaal (m)	Breedte normaal (m)	Breedte optimaal (m)
Obstakelafstand (m)	-	-	-
Voetpad (m)	1.20	1.50	1.80
Voetpad 2 richtingen (m)	2.40	3.00	3.60
Obstakelafstand (m)	-	-	-

I.5.6 Overige ontwerpisen

Bovenop het profiel van vrije ruimte, kan het mogelijk zijn dat er bijvoorbeeld lichtarmaturen in de gesloten tunnelbak worden geplaatst. Hierdoor moet de wandhoogte, waarop de tunnelbak aansluit, bijgesteld worden. Ook kan een architect het een en ander in een architectonisch vormgevingsdocument of beeldkwaliteitsplan vastleggen. Voor de diepteligging is de dekdikte van het gesloten deel bepalend, evenals het profiel van vrije ruimte en de vloerdikte van het open gedeelte.

Gemengd gebruik van de tunnel is tevens een frequent verschijnsel. Dit zorgt ervoor dat aanvullende voorzieningen, in de vorm van een verhoogde rijbaanscheiding tussen bijvoorbeeld fiets- en wegverkeer, getroffen moeten worden.

I.6. Conclusie vooronderzoek

Wat zijn de voor- en nadelen van een ontwerptool (deelvraag 3)? Een parametrisatie is een efficiënte manier om een berekening uit te voeren. Ook levert een parametrisatie inzicht om kwaliteit te leveren. Door variatie en optimalisatie in het proces op te nemen gaat de berekening niet per se sneller, want er kunnen door tijdswinst meer varianten toegepast worden. Deze stap in het proces kan na verloop van tijd dan ook gevraagd worden, waarmee men uiteindelijk kwaliteit wint. Het grootste nadeel is dat een parametrisatie eenvoudiger is zijn gebruik is. Het is echter beslist noodzakelijk dat iemand met vakkennis de ontwerptool aanstuurt.

Er is gekeken hoe duurzaamheid geïmplementeerd kan worden in het onderzoek (deelvraag 2). In het resultaat van het onderzoek, de ontwerptool, is duurzaamheid aanwezig. Het welzijn van de werknemers wordt verbeterd, terwijl gelijktijdig, door optimalisatie, kostenbesparingen verwezenlijkt wordt en milieubelastingen gereduceerd wordt.

Deelvraag 3 wordt beantwoord door te onderzoeken welke software voorhanden is. Na het onderzoeken van de software, en het houden van een enquête binnen Wagemaker, is te concluderen dat de meest geschikte software Microsoft Excel en SCIA Engineer zijn. Microsoft Excel is een programma dat te gebruiken is, zonder een al te grote voorkennis. Ook is in Excel de koppeling met SCIA Engineer te realiseren. Dit gecombineerd geeft dat Microsoft Excel en SCIA Engineer uitermate geschikt zijn om de ontwerptool mee op te stellen en daarom is er voor deze software gekozen.

Hoe kan de beschikbare software gebruikt worden om de ontwerptool te ontwikkelen (deelvraag 4)? De gegevens die in Excel ingevoerd worden zijn parameters en worden daarom als invoerwaardes voor formules gebruikt. Daar formules in Microsoft Excel opgebouwd zijn uit numerieke waardes en gekoppelde cellen, geeft dat een voordeel voor de constructeur. Een deel van deze waardes wordt vooraf geprogrammeerd, zodat met één druk op de knop de tabel voor verschillende breedtes of betoneigenschappen gevisualiseerd wordt.

SCIA Engineer is te koppelen aan Excel wat betekent dat in Microsoft Excel een bestandsformaat gemaakt wordt, welke ingelezen wordt in SCIA Engineer. In SCIA Engineer wordt dan de berekening uitgevoerd, waarna een uitvoerbestand gemaakt wordt. Dit bestand is weer in te lezen door Excel. Hiermee wordt de handmatige invoer van SCIA Engineer buiten spel gezet. In het kader van procesverbetering, is dit een belangrijke factor die meespeelt in de keuze. Hiermee is deelvraag 5 (Hoe kan de rekenprogrammatuur in combinatie met de ontwerptool optimaal gebruikt worden?) beantwoord.

De onderzochte varianten worden gebruikt bij het opzetten van de ontwerptool. Daarover in deel II meer. Wie zijn de beoogde gebruikers van de tunnelbak en wat heeft dat voor consequenties voor het ontwerp en de belastingen (deelvraag 6)? Er was aanvankelijk gedacht dat de breedte (afhankelijk van de gebruiker), onderzocht in hoofdstuk 5 van deel I, in Microsoft Excel gezet zouden worden. Naderhand is besloten dat er te veel factoren aanwezig zijn, waardoor afwijkende breedtes toegepast kunnen worden. De breedte van de tunnelbak wordt in zijn geheel als invoerwaarde gegeven in de ontwerptool.

Als laatste wordt er afgebakend op de gebruikers van de ontwerptool. Er wordt voor gekozen om de tunnelbak alleen op te stellen voor autoverkeer. Dit in overleg met Wagemaker.



Deel II - Belastingsonderzoek

In deel II van het onderzoek wordt het belastingsonderzoek uitgevoerd. Hierbij moet men denken aan onderzoek naar water- en gronddrukken en verkeersbelastingen. Het belastingsonderzoek geeft antwoord op deelvragen 7 en 8.

Als eerste wordt het stroomschema behandeld. Dit stroomschema is de leidraad voor de gehele uitwerking van de ontwerptool. Ook wordt het tot stand komen van de koppeling behandeld, waardoor er een goed beeld wordt gecreëerd wat er tijdens deze koppeling, welke zich achter de schermen afspeelt, gebeurt.

Vervolgens wordt de casus behandeld. Deze casus is het rekenhart voor dit onderzoek. De berekening wordt opgesteld aan de hand van deze casus.

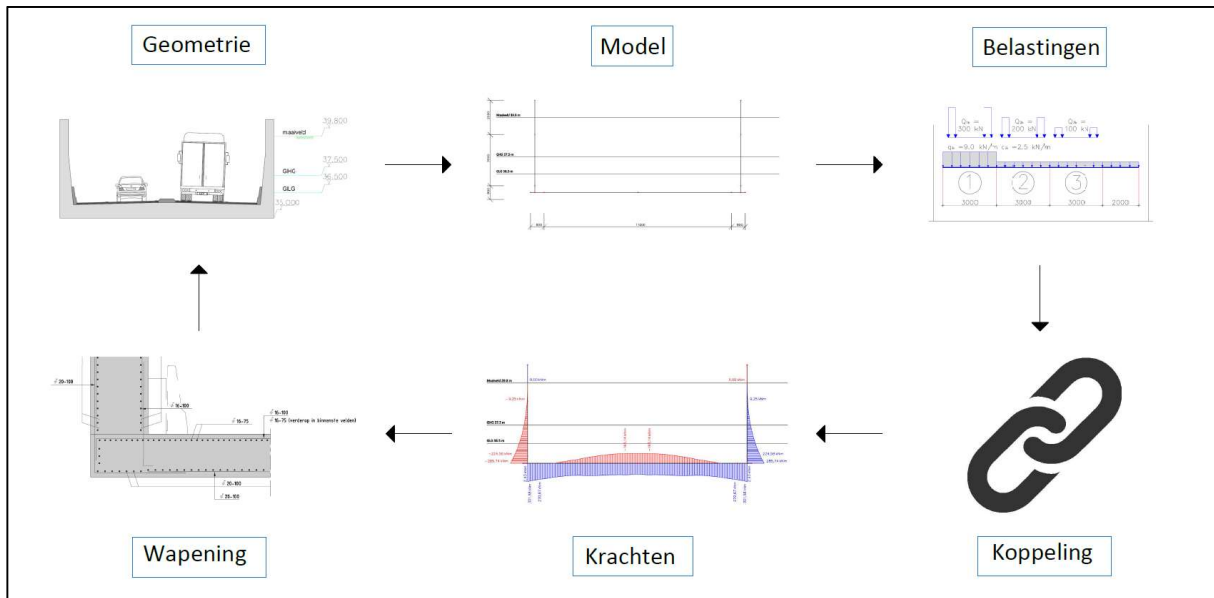
Daarnaast is een grondige normenstudie benodigd om tot een complete lijst met belastingen te komen. Deze normenstudie is de onderbouwing voor alle belastingen die werken op een tunnelbak.

Dit belastingsonderzoek is opgebouwd uit de volgende onderdelen: invoergegevens, permanente belasting, variabele belasting en de belastingcombinaties. Ook wordt de constructie ingevoerd in SCIA Engineer om de mogelijke clashes in de berekening te filteren en zodoende een model op te stellen, welke de werkelijkheid het beste benaderd.

Als het belastingsonderzoek is afgesloten, en de modellering in SCIA Engineer voltooid is, dan kan het berekeningsonderzoek aanvangen.

II.1. Stroomschema

Om de berekening volledig te automatiseren, wordt er een koppeling gemaakt tussen de ontwerptool en het rekenprogramma (SCIA Engineer). Om de stappen inzichtelijk te maken, wordt er gebruik gemaakt van een stroomschema. Dit stroomschema is weergegeven in figuur II.1. Deze stappen worden in hoofdstuk II.2 nader beschreven.



Figuur II.1: Stroomschema koppeling programmatuur

Als eerste dient de geometrie vastgesteld te worden. De geometrie is bepaald in het voorontwerp. Omdat de ontwerptool in de DO-fase gebruikt wordt, maar ook in een VO-fase (of tenderfase) te gebruiken is, is de geometrie als invoerwaarde voor de berekening in te geven. Vanuit deze geometrie wordt het staafmodel opgebouwd. Dit staafmodel is in feite het model wat wordt gehanteerd door SCIA Engineer.

Vervolgens dienen alle permanente en variabele belastingen berekend te worden. Deze belastingen worden op het staafmodel geplaatst.

In de ontwerptool wordt een koppeling gemaakt, waardoor de ontwerptool, die een XML-invoerbestand genereert, het rekenprogramma SCIA Engineer aanstuurt. De ontwerptool zorgt ervoor dat vanuit de geometrie het staafmodel wordt opgebouwd en de verschillende belastingen worden berekend en verwerkt.

Vanuit het rekenprogramma worden de momenten-, dwarskracht- en normaalkrachtlijnen gegenereerd. Deze uitkomsten worden verwerkt in de ontwerptool, waarmee de benodigde wapening berekend wordt.

II.2. De ontwerptool

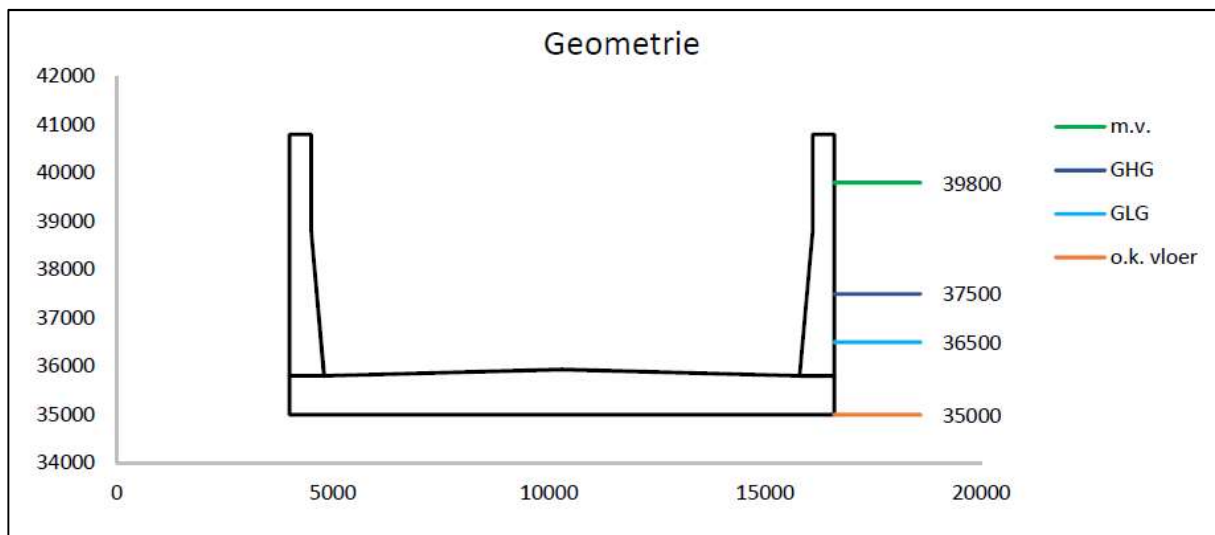
In dit hoofdstuk wordt de parametrische ontwerptool beschreven, met specifiek de plug-in (koppeling) tussen Microsoft Excel – SCIA Engineer – Microsoft Excel. In de basis werkt de ontwerptool zoals gevisualiseerd is in het stoomschema van hoofdstuk II.1. De ontwerptool bestaat uit drie onderdelen. Het 1^{ste} deel vormt de berekeningsrapportage tot de koppeling, met hierin geometrische, geotechnische en constructieve parameters.

De koppeling zelf is een combinatie geweest van het werk van Dennis Schoenmakers en ons. Om een goed werkende ontwerptool op te leveren aan het einde van het afstudeertraject, programmeert Dennis Schoenmakers de koppeling. Dit is gedaan in de vorm van een plug-in tussen Excel-SCIA-Excel. De benodigde gegevens om tot deze koppeling te komen, worden wel door ons aangeleverd. Dit vormt het 2^e deel van de ontwerptool.

Het derde deel is de berekeningsrapportage na de koppeling. De gegevens welke uit de koppeling als output gegenereerd worden, worden door ons verwerkt. De krachten zijn nu bekend, waarna deze ingevoerd kunnen worden in de wapeningsberekeningen. Deze uitkomsten vertalen zich in een wapeningsresumé. De berekeningsrapportage is weergegeven in “Bijlage F1 – Berekeningsrapportage”.

II.2.1 Berekeningsrapportage tot de koppeling

In dit deel van de berekeningsrapportage wordt de geometrie ingevoerd, wat leidt tot figuur II.2. Verder wordt de betonsterkteklasse, etc. ingevoerd. De ontwerptool is dusdanig opgebouwd, dat de permanente en variabele belasting op basis van de geometrie berekend worden. Dit heeft als voordeel dat dit niet handmatig hoeft te gebeuren. Ook zijn de belastingcombinaties ingebouwd.



Figuur II.2: Geometrie

II.2.2 Koppeling

De koppeling is opgesteld aan de hand van een aantal Microsoft Excel-werkbladen. De werking is als volgt. Er is een loop-routine ontwikkeld waardoor vanuit één Microsoft Excel bestand alles aangestuurd kan worden. Deze routine is verwerkt in een snelkoppeling. Als op deze snelkoppeling gedrukt wordt, zal de routine gestart worden, waarna de verschillende bestanden aangeroepen worden. Dit is nodig om de berekening in SCIA Engineer te kunnen voltooien.

Achter deze snelkoppeling zit een batchfile. Deze file start Microsoft Excel op die een autorun op VBA uitvoert. Deze VBA bestaat uit diverse macro's. Eerst wordt er een kopie van de invoergegevens gemaakt en een dummybestand gegenereerd. Dit is een Esa-XML-invoerbestand dat door SCIA Engineer in te lezen is en nodig is omdat er restricties op onze studentenversie zitten. Als de berekening in SCIA Engineer is voltooid, worden Esa- en XML-bestanden geëxporteerd. Een kopie wordt gemaakt die door ons te koppelen is aan de ontwerptool. De koppeling is dusdanig opgesteld dat eerst de dwarsrichting van de constructie berekend wordt, benodigd voor de wapening in de 1^e laag. Daarna pas de langsrichting, benodigd voor de wapening in de 2^e laag.

II.2.2.1 Dwarsrichting

Voor de dwarsrichting is de sheet, met Snorlax (Pokémon) als snelkoppeling opgesteld. Snorlax wordt gebruikt om de dwarsrichting en de langsrichting uit elkaar te halen, deze Pokémon heeft verder geen functie.

Projectgegevens

 Benchmark open moten
 Open moot - fundering op staal
 Raamwerkberekening
 RWi - JHe
 Mei 2018

Set generic settings for SCIA

 Updated SCIA Model Model_SCIA_update
 Associated *.xml Model_SCIA_update.xml
 Associated *.xml.def Model_SCIA_update.xml.def

M01-Browse SCIA Engineer directory

M02-Browse working directory

M04-Update SCIA Model

M05-Open Model update

M08-Run LIN calculation

M09-Update results

M00-Full update

M03-Write new XML file for updating

C:\Program Files (x86)\SCIA\Engineer16.1

H:\Allen\DSc\SCIA_EngineerXML_Engine_RWi_JHe

Status

Macro M01	Set ESA_XML.exe working directory	✓	(optional)
Macro M02	Set current working directory	✗	
Macro M03	Create SCIA Engineer input file	✓	
Macro M04	Update the calculation model	✓	
Macro M08	Run Linear Elastic calculation	✓	
Macro M08	Check if new tabular results are available	✓	
Macro M09	Update tabular results	✓	

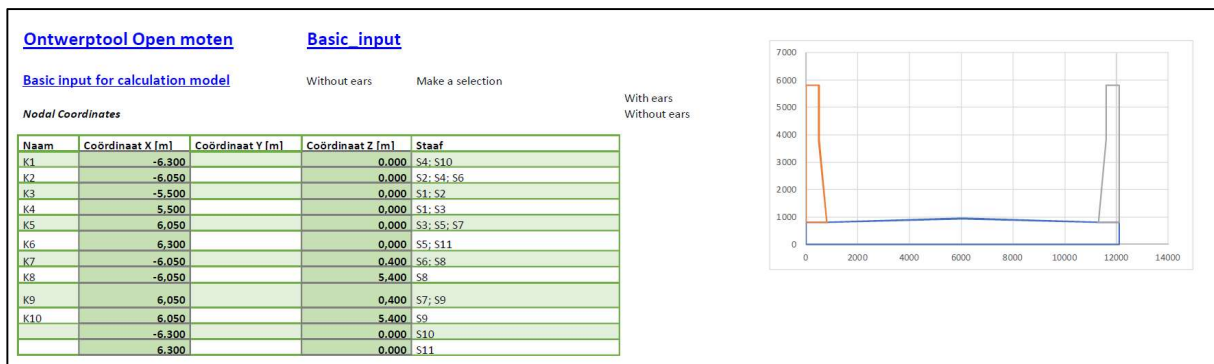
MXX-Open_Basic_Input



Figuur II.3: Dwarsrichting Snorlax

De sheet met de koppeling heeft vier bestanden nodig om SCIA Engineer aan te kunnen sturen. De bestanden zijn door Wagemaker opgesteld, maar door ons ingevuld en gekoppeld aan de ontwerptool. Het eerste bestand bevat het staafmodel in tabelvorm. De staven bestaan uit knopen

en coördinaten. Hiervan wordt een tabel gemaakt, welke SCIA Engineer kan inlezen. Ook staan in dit bestand de materiaaleigenschappen per doorsnede. Zie figuur II.4.



Figuur 11.4: Staafmodel

Het tweede bestand bevat de belastingsgevallen die gekoppeld zijn aan de ontwerptool. Zie figuur II.5. Deze belastingsgevallen moeten ook in tabelvorm genoteerd worden, zodat SCIA Engineer het bestand in kan lezen.

Ontwerpvol Open moten		Basic loading specs															
Loading calculation model																	
Load cases																	
Load groups																	
p5_index																	
Niet relevant																	
Naam	Omschrijving	Actie type	Relatietype	Specificatie	Lasterope	Richting	Duur	*Master'	Index Actie tv	Lgroup number	Index Load tv	Index specs	Index Duur	Index direction	Index master		
R01	Eigen gewicht	Permanent	Eigen gewicht		1-G1-Permanent	-7				1	0						
R02a	Ruimende belasting - Rem.	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R02b	Ruimende belasting - Overig	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R02c	Afval	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R03	Deming	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R04a	Waterdruk-Rouwfase-Permanent	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R04b	Waterdruk-Rouwfase-Variable	Variable	Static	Standard	1-G2-WX_variabel		Kort	Geen	1	2	0	100	2	1	0		
R05a	Komelrdr-Rouwfase-Permanent	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R05b	Komelrdr-Rouwfase-Variable	Variable	Static	Standard	1-G2-WX_variabel		Kort	Geen	1	2	0	100	2	1	0		
R06a	Waterdruk-Eindfase-Permanent	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R06b	Waterdruk-Eindfase-Variable	Variable	Static	Standard	1-G2-WX_variabel		Kort	Geen	1	2	0	100	2	1	0		
R07a	Komelrdr-Eindfase-Permanent	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R07b	Komelrdr-Eindfase-Variable	Variable	Static	Standard	1-G2-WX_variabel		Kort	Geen	1	2	0	100	2	1	0		
R08	Krimp	Variable	Static	Standard	1-G3-Krimp		Kort	Geen	1	5	0	100	2	1	0		
R09a	Ruimbelasting - Links	Variable	Static	Standard	1-G7-Standard		Kort	Geen	1	7	0	100	2	1	0		
R09b	Bovenbelasting-Rechts	Variable	Static	Standard	1-G7-Standard		Kort	Geen	1	7	0	100	2	1	0		
R011	Omslagverf	Variable	Static	Standard	1-G7-Standard		Kort	Geen	1	7	0	100	2	1	0		
R012	Permet	Permanent	Standard		1-G1-Permanent				0	1	1			1			
R013a	Thermisch Zomer jaarliks	Variable	Static	Standard	1-G4-Thermisch-jaar		Kort	Geen	1	4	0	100	2	1	0		
R013b	Thermisch Zomer Daerliks	Variable	Static	Standard	1-G5-Thermisch-jaar		Kort	Geen	1	5	0	100	2	1	0		
R013c	Thermisch Winter jaarliks	Variable	Static	Standard	1-G4-Thermisch-jaar		Kort	Geen	1	4	0	100	2	1	0		
R013d	Thermisch Winter Daerliks	Variable	Static	Standard	1-G5-Thermisch-jaar		Kort	Geen	1	5	0	100	2	1	0		
R014a	Vandfries Link	Variable	Static	Standard	1-G7-Standard		Kort	Geen	1	7	0	100	2	1	0		
R014b	Vandfries Rechts	Variable	Static	Standard	1-G7-Standard		Kort	Geen	1	7	0	100	2	1	0		
R015a	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		
R015b	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		
R015c	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		
R015d	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		
R015e	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		
R015f	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		
R015g	Model Configuratie	Variable	Static	Standard	1-G6-Model		Kort	Geen	1	6	0	100	2	1	0		

Figuur 11.5: Belastingsgevallen

Het derde bestand bevat alle optredende belastingen. Het voorwerk hiervoor is gedaan in de tool. Ook dit bestand is in te lezen door SCIA Engineer.

Ontwerp/Opn. moten		Basis_loading_contents		Substitutie of Locus/area identification																		Indices									
Line item	Year	Location	Structure	Function	Block/Ident	Waarde (P.1 Index)	Waarde (P.2 Index)	Year	Environment	Index 1	Index 2	Index 3	Index 4	Index 5	Index 6	Index 7	Index 8	Index 9	Index 10	Index 11	Index 12	Index 13	Index 14	Index 15	Index 16	Index 17	Index 18	Index 19	Index 20		
Lijn1001	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980		
Lijn1002	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981		
Lijn1003	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982	1982		
Lijn1004	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983	1983		
Lijn1005	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984	1984		
Lijn1006	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985		
Lijn1007	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986		
Lijn1008	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987	1987		
Lijn1009	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1988		
Lijn1010	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989	1989		
Lijn1011	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990		
Lijn1012	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991	1991		
Lijn1013	1992	1992																													

Figuur II.6: Belastingen

Het vierde en laatste bestand bevat de combinatiesleutel. Deze is in de tool uiteengezet en hier aan gekoppeld.

Combinatiesleutel		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Consequence class 3		Belastinggevallen												
		1-5	10	11	2b/3b	15		31-70	25					
		Eigen gewicht	Rustende belasting	Korrel- en waterdrukken	Voorspanning	Krimp en kruip	Stempuntnuïtting	Mobiel - wegverkeer (LM1)	Thermische belastingen	Mechanisch verlichten	Opspanneffect	Bijzondere belastingen	Korrel	
		PB	PB	PB		PB	VB	VB	VB	VB	VB	AC	PB	
	γ_r	6.10A	1.30	1.30	1.00	0.00	0.00	1.35	0.00	1.50	1.50	1.00	1.30	
		6.10B	1.20	1.20	1.00	0.00	0.00	1.35	0.00	1.50	1.50	1.00	1.20	
		6.10AG	0.90	0.90	0.90	1.00	0.00	0.00	1.35	0.00	1.50	1.00	0.90	
		6.10BG	0.90	0.90	0.90	1.00	0.00	0.00	1.35	0.00	1.50	1.00	0.90	
		6.11B	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
		6.14B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
		6.15B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
		6.67FAT	1.00	1.00	1.00	1.00	-	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
	ψ_0		-	-	-	-	-	0.80	0.30	0.80	0.80	-	-	
	ψ_1		-	-	-	-	-	0.80	0.80	0.80	0.80	-	-	
	ψ_2		-	-	-	-	-	0.40	0.30	0.40	0.40	-	-	

Figuur II.7: Combinatiesleutel

Als de routine voltooid is en de berekening uitgevoerd is, dan worden de resultaten geëxporteerd naar Microsoft Excel. Deze resultaten zijn door ons gekoppeld aan onze ontwerptool, waarna de berekening van de wapening uitgevoerd wordt.

II.2.2.2 Langsrichting

Voor de langsrichting is exact dezelfde routine ontwikkeld maar dan met Munchlax (Pokémon).

Projectgegevens

Benchmark open moten

Open moot - fundering op staal

Raamwerkberekening - langsrichting

RWi - JHe

Mei 2018

Set generic settings for SCIA

Updated SCIA Model Model_SCIA_update

Associated *.xml Model_SCIA_update.xml

Associated *.xml.def Model_SCIA_update.xml.def

M01-Browse SCIA Engineer directory

C:\Program Files (x86)\SCIA\Engineer16.1

M02-Browse working directory

H:\Allen\DSc\SCIA_EngineerXML_Engine_RWi_JHe

M04-Update SCIA Model

M05-Open Model update

M08-Run LIN calculation

M09-Update results

M00-Full update

M03-Write new XML file for updating

Status

Macro M01	Set ESA_XML.exe working directory	✓	(optional)
Macro M02	Set current working directory	✗	
Macro M03	Create SCIA Engineer input file	✓	
Macro M04	Update the calculation model	✓	
Macro M08	Run Linear Elastic calculation	✓	
Macro M08	Check if new tabular results are available	✓	
Macro M09	Update tabular results	✓	

MXX-Open_Basic_Input



Figuur II.8: Langsrichting Munchlax

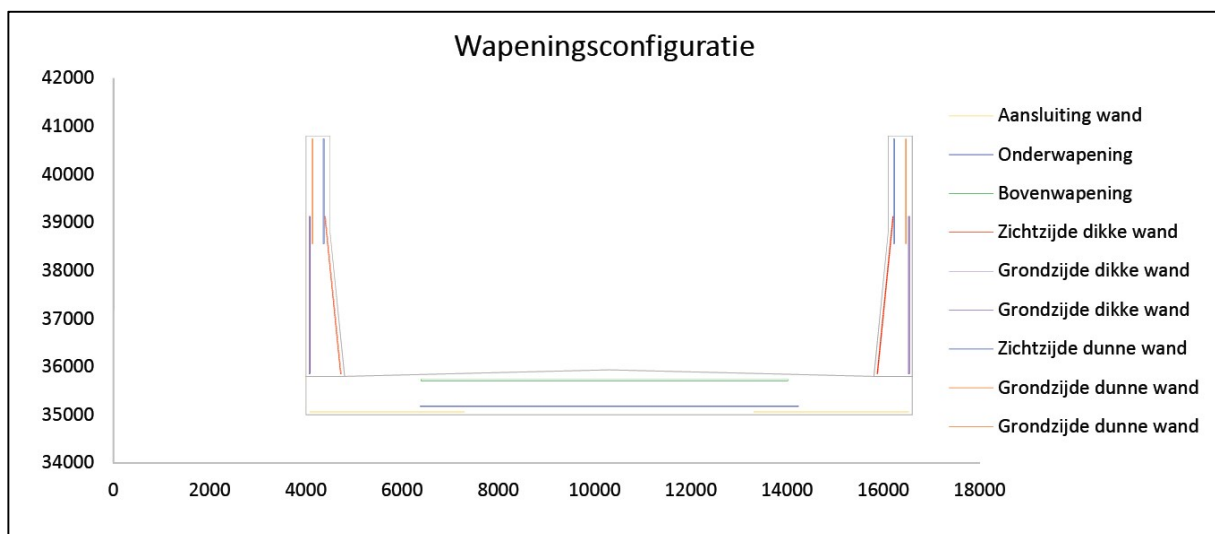
De koppeling is echter nog niet volmaakt. Dit is een zogenaamde Bèta-versie en een SCIA Engineeringsrapport moet nog als output gegeven kunnen worden. Dit is een van de vervelendste aspecten van het werken met SCIA Engineer en is verplicht bij het indienen van een berekening. In de toekomst kan deze rapportage automatisch gegenereerd worden.

II.2.3 Berekeningsrapportage na de koppeling

Nadat de koppeling zijn werk heeft gedaan, worden de krachten gekoppeld aan de ontwerptool. In het geval van de dunne horizontale wand moet in de draaitabel nog een dx ingesteld worden die de afstand, en het bijbehorende maximum, tot de doorsnedeovergang weergeeft.

Om de berekeningen te voltooien moeten alleen nog de wapeningsdiameters en de staafafstanden gekozen worden. In de berekeningen van de vloeren zit een macro verwerkt om de betondrukzone in de SLS te berekenen. Hiervoor moet de toetsencombinatie CONTRL+D gebruikt worden. Deze berekening heeft een minimum. Afhankelijk van de vorige berekening zal de macro het maximum of het minimum pakken. Als deze waarde niet voldoet dient deze routine nogmaals uitgevoerd te worden. Hiermee wordt de andere waarde van de uitkomst paraboool gevonden.

Deze berekeningen zijn verwerkt tot een wapeningsresumé met een bijbehorende wapeningsconfiguratie. Zie figuur II.9 voor de wapeningsconfiguratie. Deze geeft visuele ondersteuning aan de constructeur. Hierin is alleen de hoofdwapening weergegeven, exclusief lassen, etc. Ook kg wapening wordt als output gegeven.



Figuur II.9: Wapeningsconfiguratie.

II.3. Casus

In overleg met Wagemaker is een casus voor de tunnelbak vastgesteld als referentieproject, waarop de belastingen en berekeningen afgestemd worden. Deze opgestelde casus dient als leidraad voor de gehele berekening. De ontwerptool wordt opgesteld aan de hand van deze casus, vervolgens worden ook andere geometrieën uitgevoerd door middel van de ontwerptool. Allereerst is vastgesteld dat de tunnelbak plaats biedt aan 2x1 rijstroken met aan beide kanten een redresseerstrook. Ook is er een verhoogde middenberm aanwezig. De aanwezige grondsoort is zand. In figuur II.10 is de dwarsdoorsnede weergegeven.

II.3.1 Constructieve parameters

De belangrijkste peilmaten zijn de onderkant van de vloer, de GLG en GHG en het maaiveld;

- O.k. vloer 35.0m
- GLG 36.5m
- GHG 37.5m
- Maaiveld 39.8m

De tunnelbak wordt conform afbakening gefundeerd op staal en de referentieperiode bedraagt 100 jaar.

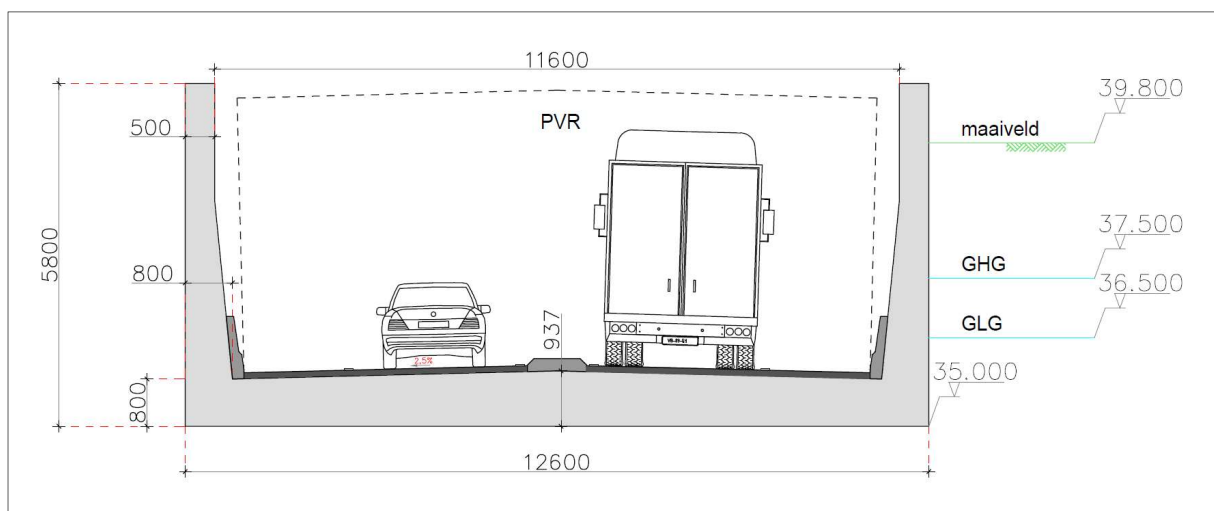
Constructieve gegevens en materiaaleigenschappen:

- C35/45
- CC2

Stijfheid van de ondergrond:

- $K_H = 1.0 \text{ MN/m}^2 \leftarrow$ $K_V = 10.0 \text{ MN/m}^2 \uparrow$

Het aantal vrachtwagens, welke de tunnelbak passeren, bedraagt 500000 vrachtwagen per jaar per rijstrook (N-wegen). Hierbij zijn de correctiefactoren $\alpha_{q,i} = 1,0$ gesteld.



Figuur II.10: Dwarsdoorsnede tunnelbak casus

II.3.2 Materiaalgegevens

Buiten de opgegeven parameters conform bovenstaande casus, dienen er ook andere parameters gedefinieerd te worden. Door het bepalen van parameters zoals: milieuklasse, betondekking en scheurwijdte, kan de gehele constructieve berekening uitgevoerd worden.

II.3.2.1 Milieuklasse

De milieuklasse wordt nader toegelicht in 'Bijlage D - Materiaaleigenschappen'. De toe te passen milieuklassen zijn afhankelijk van het constructieonderdeel. Wanneer de constructievloer bijvoorbeeld in zijn geheel onder de GLG ligt, wordt hiervoor een andere milieuklasse gevonden dan wanneer de GLG lager ligt.

II.3.2.2 Betondekking

De betondekking wordt nader toegelicht in 'Bijlage D - Materiaaleigenschappen'. De dekking wordt bepaald aan de hand van de milieuklasse. De dekking wordt berekend voor de bovenzijde van de constructievloer. De overige constructieonderdelen dienen aan de hand van dezelfde methode berekend te worden.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}.$$

Om de minimale betondekking c_{min} te bepalen, dient de constructie classificatie berekend te worden.

De milieuklassen voor de bovenzijde van de constructievloer is: XC2/XD3/XF4.

De minimale betondekking bedraagt conform de maatgevende milieuklasse (XD3) en constructieve classificatie S5: 50 mm.

De milieuklasse voor de onderzijde van de constructievloer is: XC2.

De minimale betondekking bedraagt conform de maatgevende milieuklasse en constructie classificatie: 30 mm. Echter dient deze minimale betondekking conform ROK 1.4 – art. 4.4.1.2 met 5 mm te worden vermeerderd, waardoor de minimale dekking 35 mm bedraagt.

Conform ROK1.4 – art. 4.4.1.3 (1) dient voor in-situ beton een uitvoeringstolerantie van $\Delta c_{dev} = 10$ mm aangehouden te worden. Ook dient deze toeslag aangehouden te worden voor het storten op een werkvloer.

De nominale betondekking voor de bovenzijde van de constructievloer bedraagt tenminste: $c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 50 + 10 = 60$ mm.

De nominale betondekking voor de onderzijde van de constructievloer bedraagt tenminste: $c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 35 + 10 = 45$ mm.

De toegepaste dekking kan op constructieve redenen hoger gekozen worden. In dit geval wordt er voor de gehele constructie gekozen voor $c_{toe} = 60$ mm.

II.3.2.3 Scheurwijdte

De scheurwijdte wordt uitgebreid toegelicht in 'Bijlage E - Berekeningsonderzoek'. Conform NEN-EN 1992-1-1/NB – Tabel 7.1N dient de maximale scheurwijdte (w_{max}) voor de maatgevende milieuklasse XD3 niet groter te zijn dan 0,20 mm.

Daarnaast dient de waterdichtheid van de constructievloer beschouwd te worden. Hiervoor dient de maximale stijghoogte van de waterkolom en de dikte van de vloer bekend te zijn. De maximale stijghoogte (h_D) bedraagt 1500 mm en de constructievloer (h_B) heeft een dikte van 800 mm.

De verhouding h_D/h_B bedraagt: $1500/800 = 1,88$. Dit geeft eveneens een maximale scheurwijdte van 0,20 mm.

De totale waarden van deze parameters voor alle constructieve onderdelen zijn beschreven in tabel II.1.

Tabel II.1: Waarden dekking en maximale scheurwijdte

Constructie- onderdeel	Milieuklasse	Constr. klasse	c_{min}	Δc_{dev}	c_{nom}	$c_{toegepast}$	w_{max}
	XCi / XD _i / XF _i / X _{ji}		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Tunnelvloer							
Bovenzijde	XC4/XD3/XF4	S5	50	10	60	60	0,20
Onderzijde	XC2	S5	35	10	45	60	0,20
Wanden							
Binnenzijde	XC4/XD3/XF4	S5	45	10	55	60	0,20
Grondzijde – tot 1.0 m onder mv	XC2/XC4	S5	30	10	40	60	0,20
Grondzijde – lager dan 1.0 m onder mv	XC2/XC4	S5	30	10	40	60	0,20

II.4. Belastingen

Om tot de belastingen te komen, welke benodigd zijn om een tunnelbak te berekenen, moet een normenstudie uitgevoerd worden. In dit hoofdstuk worden de invoergegevens, de permanente en variabele belastingen en de belastingcombinaties behandeld. De volledige uitwerking van deze belastingen is weergegeven in "Bijlage B1 - Belastingen".

II.4.1 Invoergegevens

Om tot bepaalde belastingen te kunnen komen, moeten er een aantal parameters vastgesteld worden.

Parameters zoals de geometrie en constructieve gegevens, worden in deze fase van de berekening (DO-fase) als invoerparameter opgesteld. Deze waarden zijn in een eerder stadium vastgesteld. Vanuit de casus worden ook enkele parameters opgegeven, zoals de geotechnische gegevens. Al deze parameters worden ingevoerd in de ontwerptool en deze dienen als basis voor de gehele constructieve berekening.

II.4.2 Permanente belasting

Onderstaand worden alle permanente belastingen beschreven. De permanente belastingen bestaan uit het eigen gewicht, de rustende belasting, grond-, water- en korreldrukken en kruip/krimp belasting.

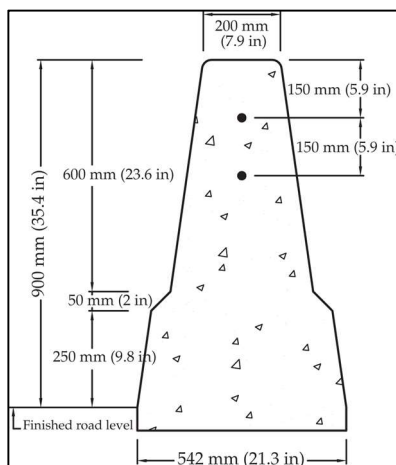
II.4.2.1 Eigen gewicht

Als eerste wordt het eigen gewicht van de tunnelbak behandeld. Het eigen gewicht wordt door SCIA Engineer zelf gegenereerd. Om deze reden zijn de verkanting in de constructievloer en de wanddikte accuraat gemodelleerd, zodat het eigen gewicht correct wordt beschreven. Het eigen gewicht van de constructie wordt gecontroleerd, 'Bijlage B2 – Controle eigen gewicht'.

II.4.2.2 Rustende belasting

Onderstaand zijn alle rustende belastingen gegeven, welke op de tunnelbak van toepassing zijn. De rustende belasting bestaat uit rijbaanscheiding en kantbescherming, de asfaltconstructie en eventueel de overgangsconstructie (CROW, 2013, a). Rustende belastingen welke zijn meegenomen in de beschouwing, zijn:

- Stepbarriers;



Figuur II.11: Afmetingen stepbarrier

- Geleiderails
- Dubbele geleiderails;

- Middenberm;
- Randelement;
- Asfaltconstructie;
- Overgangsconstructie.

In 'Bijlage B1 - Belastingen' zijn de rustende belastingen uitgebreider beschouwd.

II.4.2.3 Grond-, water- en korrelspanning

Ten aanzien van de optredende horizontale korreldrukken en waterdrukken is een onderscheid gemaakt in verschillende componenten. Voor de permanente belasting worden de volgende twee componenten meegenomen.

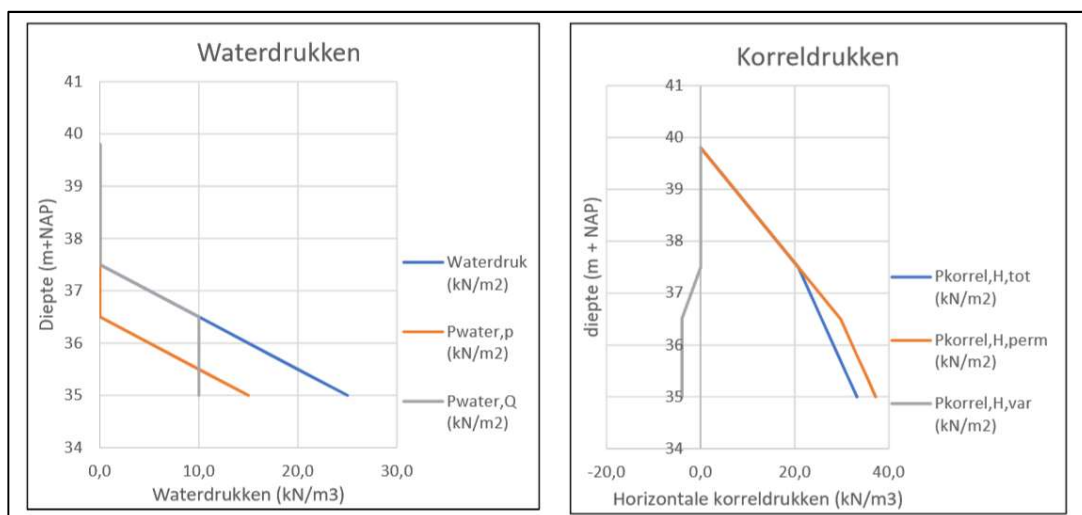
- Horizontale korreldruk (permanente belasting);
- Waterdruk (permanente belasting).

De basis voor de grondmechanica wordt gevormd door het beschouwen van de spanningen in de ondergrond. Grond bestaat uit water, korrels en poriën welke gevuld zijn met water of met lucht. Er wordt onderscheidt gemaakt tussen grondspanning, waterspanning en korrelspanning. Op basis van deze waarden kan de belasting op de wanden bepaald worden.

Om de belastingen te bepalen is de neutrale gronddrukcoëfficiënt benodigd. Deze coëfficiënt wordt berekend door middel van de hoek van inwendige wrijving (φ) en bedraagt:

$$k_0 = (1 - \sin(\varphi))$$

Door middel van een visuele controle, is het direct inzichtelijk dat de water- en korreldrukken correct berekend zijn. Deze visuele controle is weergegeven in figuur II.12. Hierin worden de water- en korreldrukken uitgezet ten opzicht van de diepte.



Figuur II.12: Visuele weergave water- en korreldrukken

II.4.2.4 Grondmassief op oor

De rustende belasting van de grond op de oren is als belasting meegenomen. De afmetingen van deze grondspie zijn afhankelijk van de wanddikte, wandhoogte en hellingshoek. De belasting resulteert in een neerwaartse druk op de oren.

II.4.2.5 Krimp en kruip

Er wordt rekening gehouden met de verandering van vervorming door stortfaseringen en dergelijke. De verandering van de krimpverkorting door onderliggende pakket zorgt voor een wrijving. Deze

wrijving resulteert in een normaaltrekkkracht in de betonconstructie. Hierbij relaxeert een gedeelte van het belastingeffect onder invloed van kruip. Tevens wordt de uitdrogingskrimp en autogene krimpverkortng meegenomen. Deze krimpverkortngs resulteren in een temperatuursverandering op de gehele constructie.

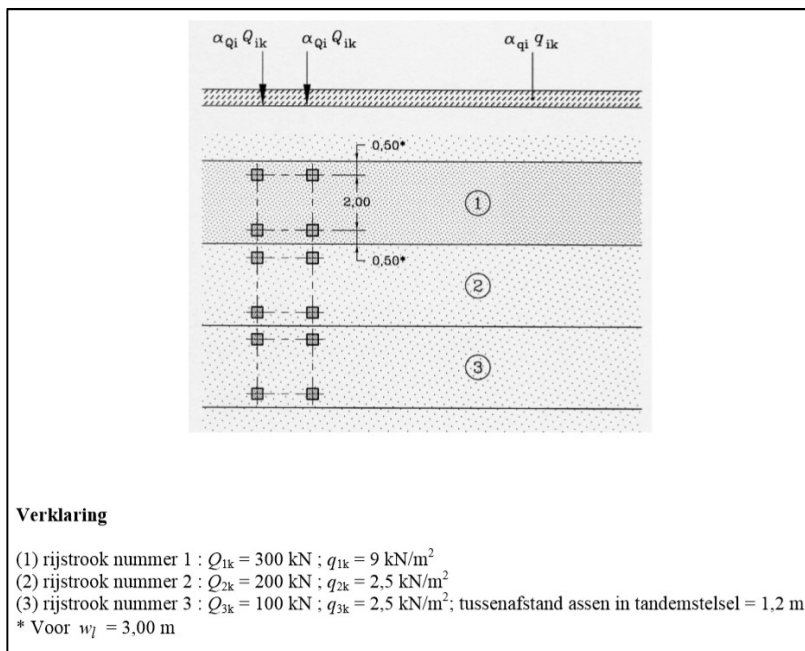
II.4.3 Variabele belasting

Onderstaand zijn alle variabele belastingen beschreven. Deze belastingen worden in het rekenmodel op de tunnelbak geplaatst. De variabele belasting bestaat onder andere uit de mobiele belasting, de verhoogde korreldruk, het opspaneffect en de thermische belasting. De volledige uitwerking van deze variabele belastingen is weergegeven in "Bijlage B1 - Belastingen".

II.4.3.1 Mobiele belasting op rijweg – LM1

Er is een mobiele belasting gehanteerd conform NEN-EN 1991-2 - art. 4.3. Er wordt onderscheidt gemaakt in vier Belastingmodellen (LM). De verkeersbelasting op de rijweg bestaat uit mobiele belastingen in de vorm van geconcentreerde aslasten (TS) en gelijkmatig verdeelde belastingen (UDL).

De tandemstelsels modelleren de verkeersbelasting door middel van twee aslasten, lang 2.0 m, met een onderlinge hart-op-hartafstand van 1.20 m (figuur II.13) De spreiding van de wielprenten wordt nader beschreven in "Bijlage C1 - Onderzoek spreiding verkeersbelasting".



Figuur II.13: Toepassing belastingmodel 1

II.4.3.2 Enkele aslast – LM2

Lastmodel 2 bestaat uit een enkele aslast $\beta_Q Q_{ak}$ die op iedere willekeurige positie van de rijweg behoort te zijn toegepast. Het contactoppervlak van ieder wiel behoort als een rechthoekig vlak, met zijden van 0,35 m en 0,60 m, in rekening te zijn gebracht.

II.4.3.3 Bijzondere voertuigen – LM3

Daar waar relevant, behoren belastingmodellen voor bijzondere voertuigen te zijn vastgesteld door de opdrachtgever. Omdat dit om specifieke situaties gaat, welke in de praktijk niet vaak voorkomen, wordt lastmodel 3 niet meegenomen in de ontwerptool.

II.4.3.4 Mensenmenigte – LM4

Conform NEN-EN 1991-2 art. 4.3.5 behoort een mensenmenigte, indien relevant, te zijn weergegeven door een belastingmodel bestaande uit een gelijkmatig verdeelde belasting gelijk aan 5 kN/m².

II.4.3.5 Rembelasting door wegverkeer

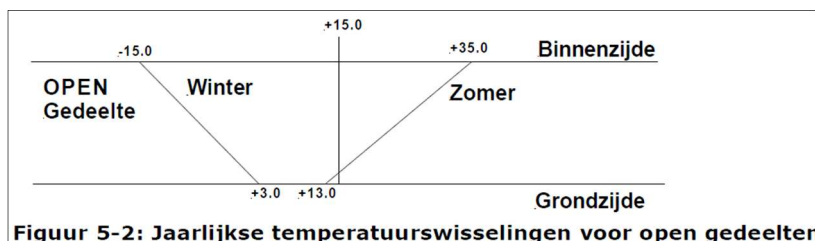
Er dient een remkracht Q_{lk} in rekening gebracht te worden, die werkt in de lengterichting en die aangrijpt ter hoogte van de bovenzijde van het wegdek. Versnellingskrachten behoren met dezelfde waarden als remkrachten, maar in tegengestelde richting, in rekening gebracht te zijn. In de praktijk betekent dit dat Q_{lk} zowel positief als negatief kan zijn.

Deze rembelasting heeft nauwelijks invloed op het globale constructieve gedrag van een tunnelbak en wordt in het vlak van de vloer afgedragen. Om deze reden is deze belasting niet meegenomen in de belastingcombinaties. Het oppervlak van de vloer is relatief groot ten opzichte van deze belasting. Hierdoor is de rembelasting verwaarloosbaar klein.

II.4.3.6 Thermische belasting

Als gevolg van de 4 seizoenen krijgen open tunnelbakken te maken met aanzienlijke temperatuurverschillen. Deze verschillen, met als gevolg het krimpen en uitzetten van de doorsnede, zorgen voor interne krachten in het beton. Om deze krachten inzichtelijk te krijgen is het nodig om een overzicht te maken van de thermische belasting op de tunnelbak.

Onderscheid wordt gemaakt tussen jaarlijkse temperatuurswisselingen en de dagelijkse wisselingen. Voor open moten moet de volgende temperatuurverdeling aangehouden worden. De referentietemperatuur is 15 °C. Zie figuur II.14 (figuur 5-2 ROK 1.4) voor deze referentietemperatuur en de wisselingen.



Figuur II.14: Jaarlijkse temperatuurswisselingen voor tunnelbakken

De dagelijkse temperatuurwisselingen zijn aangehouden in overeenstemming met ROK 1.4 – tabel 5-2, waardoor geldt voor een situatie met 100 mm asfalt:

- Maximumtemperatuur $\Delta T = 10$ °C
- Minimumtemperatuur $\Delta T = -5$ °C

Voor de bouwphase en de wanden worden de dagelijkse temperatuurwisselingen aangehouden voor een situatie zonder asfalt.

- Maximumtemperatuur $\Delta T = 20$ °C
- Minimumtemperatuur $\Delta T = -8$ °C

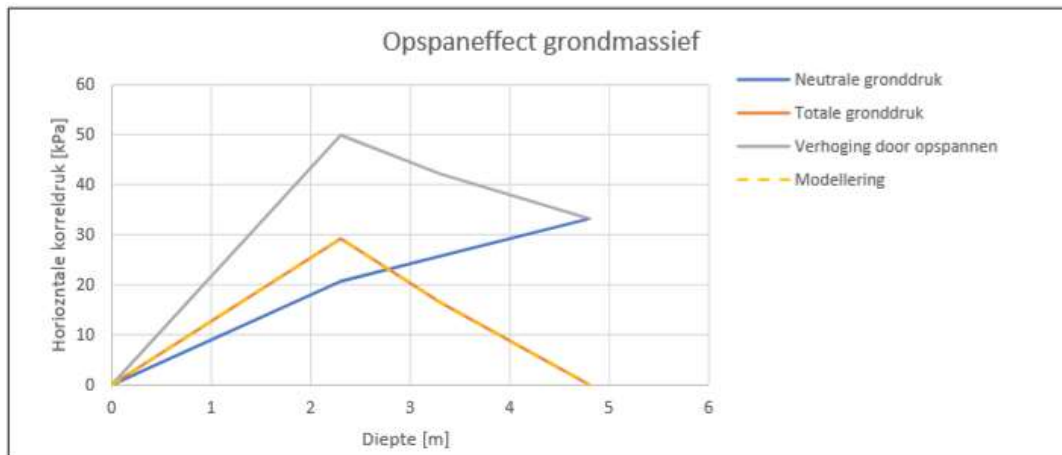
II.4.3.7 Bovenbelasting op maaiveldniveau

De stabiliteit, sterkte en vervormingen van constructies, zoals kelderwanden, kademuren, damwandconstructies en tunnelbakwanden, die naast een berijdbare strook terrein liggen, moeten ook zijn getoetst aan de eisen in de uiterste grenstoestand en in de bruikbaarheidsgrenstoestand met gronddrukken die voortkomen uit de volgende karakteristieke waarden van de terreinbelasting (p), aangrijpend over de volledige lengte van de wand en over een zone van ten minste 20 m breed.

II.4.3.8 Opspaneffect

In de tijd kan door fluctuerende temperaturen en eventuele waterstanden, de grondruk oplopen tot hogere waarden dan verondersteld wordt op basis van neutrale grondruk. Voor de wanden van de open moten wordt, om deze reden, rekening gehouden met het opspaneffect.

Opspannen treed op ten gevolge van jaarlijkse thermische belasting, en daarmee enkel de situatie “opwarmen”, omdat deze belasting zorgt voor beweging van de wand tegen de grond in (passieve grondruk). De modellering van het opspaneffect is weergegeven in figuur II.15.



Figuur II.15: Modellering opspaneffect

II.4.3.9 Mechanisch verdichten

Bij de bepaling van de grondruk op de achterzijde van de wand moet, conform NEN 9997 art. 9.5.5, rekening zijn gehouden met bijkomende drukken, veroorzaakt door het eventueel aanbrengen van aanvullingen en de daarbij gebruikte verdichtingsmethoden.

De extra grondrukken achter de wand, ten gevolge van verdichting van de aanvulgrond, hoeven niet te zijn opgeteld bij de grondrukken die het gevolg zijn van later werkende boven belasting door verkeer en opslag.

II.4.3.10 Sneeuwbelasting

De sneeuwbelasting op de open tunnelbak dient bepaald te zijn conform NEN-EN 1991-1-3. In Nederland wordt er te allen tijde gerekend met sneeuwbelasting voor blijvend/tijdelijke ontwerpsituaties (EN1991-1-3/NB art. 5.2(3)).

De sneeuwbelasting wordt niet meegenomen in de belastingcombinaties, aangezien NEN-EN 1990 - Tabel NB.16 voorschrijft dat sneeuwbelasting niet gecombineerd wordt met andere variabele belastingen (gelijktijdigheidregel). De sneeuwbelasting is zodanig klein dat deze niet maatgevend is.

II.4.4 Belastingcombinaties

De bruikbaarheidsgrenstoestand en de uiterste grenstoestand van een constructie dienen te worden getoetst. NEN-EN 1990-1-1 onderscheidt de volgende vier uiterste grenstoelstanden:

- EQU Beschouwing van het statisch evenwicht van de constructie;
- STR Heeft betrekking op de sterkte van de constructie. Er wordt getoetst op intern bezwijken en buitensporige vervormingen van de constructie of een constructieonderdeel;
- GEO Staat voor het bezwijken van de constructie ten gevolge van buitensporige vervorming van de ondergrond;
- FAT Een constructie of constructieonderdeel toetsen op vermoeiing.

De volledige uitwerking van deze belastingcombinaties is weergegeven in "Bijlage B1 - Belastingen".

II.4.4.1 Uiterste grenstoelstanden

Conform NEN-EN 1990-1-1 art. 6.4.3.2 en Tabel NB.12 - A2.4(B) is voor de uiterste grenstoelstand gebruik gemaakt van de uitdrukkingen 6.10a en 6.10 b. Hierop wordt getoetst.

Vergelijking 6.10a

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Vergelijking 6.10b

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

De buitengewone belastingcombinatie wordt bepaald conform NEN-EN 1990 art. 6.4.3.3 (2) formule 6.11b.

Vergelijking 6.11b

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

II.4.4.2 Bruikbaarheidsgrenstoelstand

Bij het toetsen van de bruikbaarheidsgrenstoelstanden dienen de uitdrukkingen 6.14a t/m 6.16b te worden gebruikt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in drie verschillende combinaties, de karakteristieke, frequente en quasi blijvende belastingcombinatie.

Karakteristieke combinatie (vergelijking 6.14b)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Frequente belastingcombinatie (vergelijking 6.15b)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Quasi-blijvende combinatie (vergelijking 6.16b)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

II.4.4.3 Belastingsfactoren

De belastingsfactoren zijn aangehouden conform NEN-EN 1990-1-1 - NB.13-A2.4(B) Deze belastingsfactoren zijn geldig voor wegverkeersbruggen. Deze factoren zijn afhankelijk van de gekozen gevolgklasse (CC1, CC2 of CC3).

II.4.4.4 Combinatiefactoren

Voor de aan te houden ψ -factoren wordt gebruik gemaakt van tabel NB.9 - A.2.1 van de NEN-EN 1990/NB ψ -factoren voor bruggen voor weg- en langzaam verkeer.

II.4.4.5 Resumerend overzicht (belastingscombinatiesleutel)

In tabel II.2 zijn de waardes van de belastingfactoren en combinatiefactoren gegeven voor de gevolgklasse.

Tabel II.2: Resumerend overzicht

Combinatiesleutel		Belastinggevallen										
CC2		Eigen gewicht	Rustende belasting	Korrel- en waterdrukken	Krimp en kruip	Verkeersbelasting (LM1)	Verkeersbelasting (LM2)	Bovenbelasting eind	Thermische belasting	Mechanisch verdichten	Opspanneffect	Bijzondere belasting
		PB	PB	PB	PB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	AC
	ULS - VLG 6.10A	1,30	1,30	1,30	0,00	1,35	1,35	1,50	0,00	1,50	1,50	1,00
	ULS - VLG 6.10B	1,20	1,20	1,20	0,00	1,35	1,35	1,50	0,00	1,50	1,50	1,00
	ULS - VLG 6.10A en 6.10B - gunstig	0,90	0,90	0,90	0,00	-	-	-	-	-	-	-
	SLS - VLG 6.14B / 6.15B / 6.16B	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ψ_0		-	-	-	-	0,80	0,00	0,80	0,30	1,00	1,00	-
ψ_1		-	-	-	-	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	1,00	-
ψ_2		-	-	-	-	0,40	0,00	0,40	0,30	1,00	1,00	-

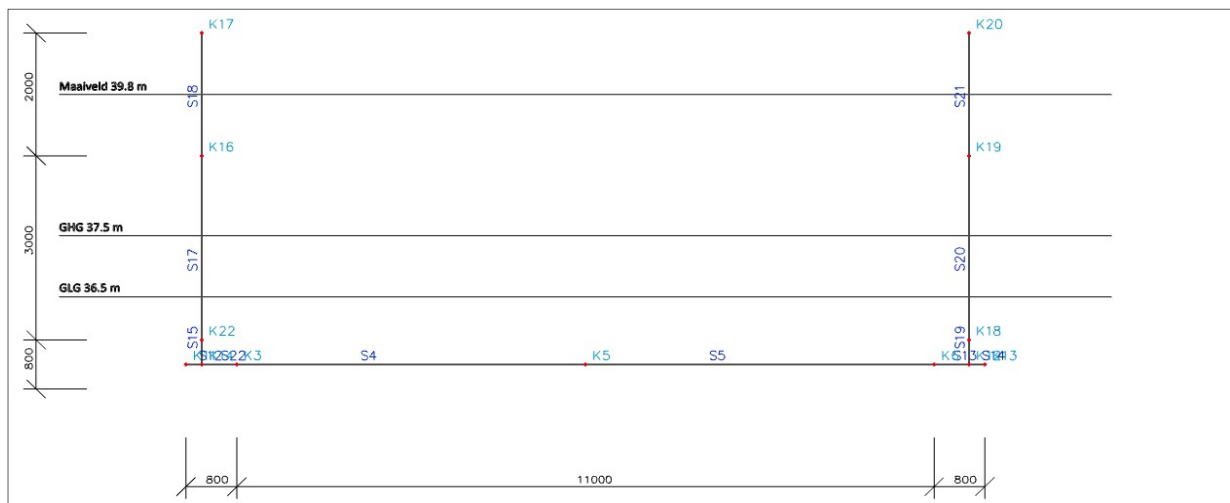
II.5. SCIA Engineer Modelling

Er zijn een drietal modellen opgesteld in het programma SCIA Engineer. Dit om inzicht te krijgen in de werking van de ontwerptool. Door dezelfde belastingen, belastingsgevallen, lastgroepen, combinaties en resultaatklassen maar een verschillende modellering te hanteren, kan een afweging voor de parametrisatie gemaakt worden.

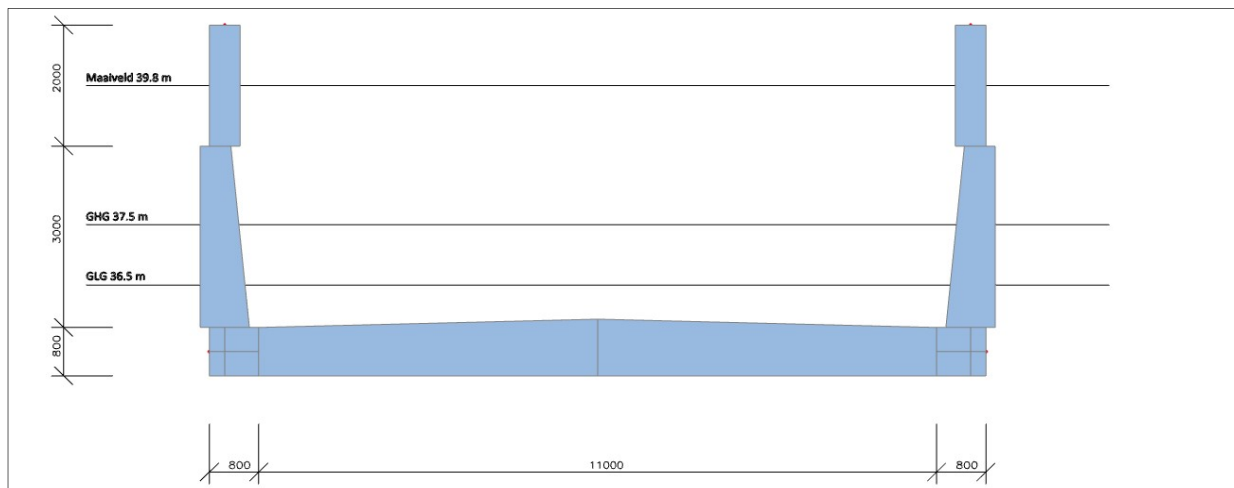
II.5.1 Model dwarsrichting met excentriciteit

Het eerste model welke opgebouwd is, is het model dat de werkelijkheid het meeste benaderd. De knopen zijn geplaatst op elke verandering van de doorsnede. De dunne wand is 500 mm breed. De dikke wand is 800 mm breed. De hartlijn van de dunnen wand, ligt op 250 mm vanaf de grondzijde van de constructie. Als deze hartlijn wordt doorgetrokken door de dikker wand, correspondeert het weergavemodel niet met de werkelijkheid: zie figuur II.17. Omdat dit in visuele verwarring geeft, wordt gekozen om een excentriciteit van 150 mm toe te voegen aan de hartlijn van de dikke wand.

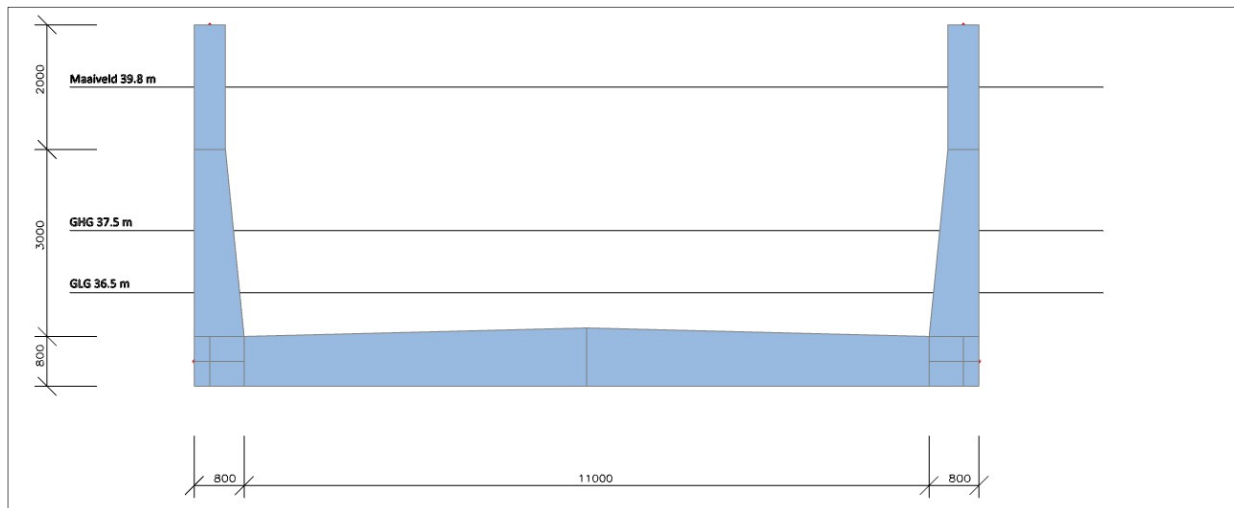
De wanden en vloeren hebben een elasticiteitsmodulus van $E_{cm}/2$ omdat gerekend wordt met een gescheurde doorsnede. De hoeken hebben een elasticiteitsmodulus van $E_{cm} * 10$ omdat dit een stijve verbinding benaderd. Ook krijgen de staven die vanaf de hartlijn van de vloer tot de bovenzijde van vloer lopen, een eigen gewicht van 0 omdat dit gewicht al aanwezig is. Dit is bij alle drie de modellen gehanteerd. Zie figuur II.16 en II.18 voor achtereenvolgende het staaf- en het weergavemodel. Dit is ook het model zoals het in SCIA Engineer opgesteld wordt met de ontwerptool.



Figuur II.16: Staaftmodel SCIA Engineer



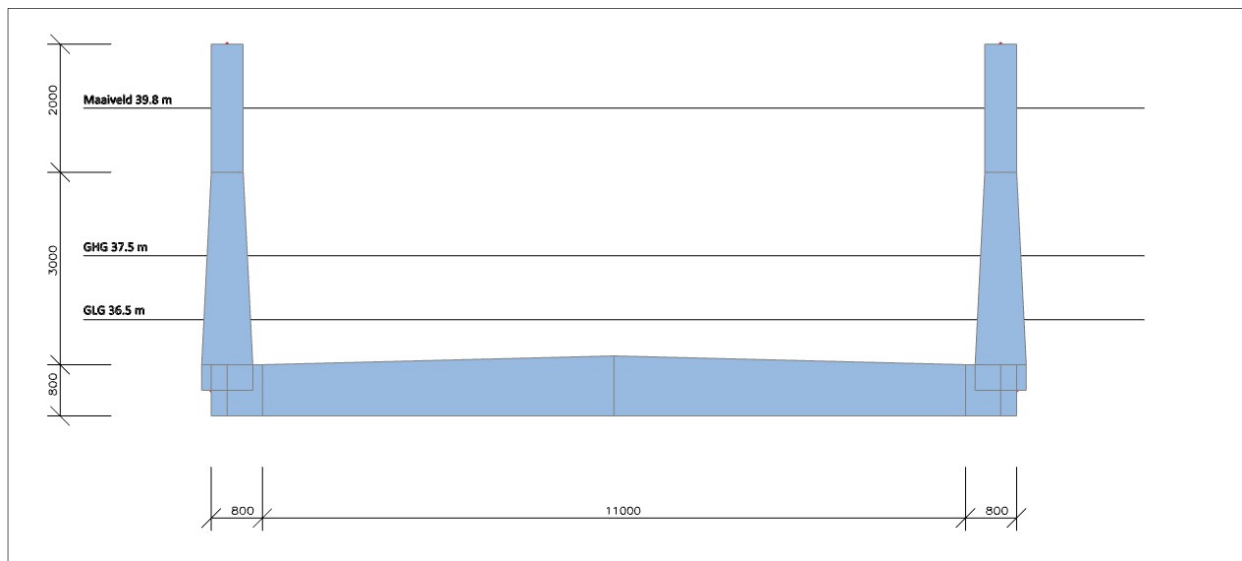
Figuur II.17: Weergavemodel SCIA Engineer



Figuur II.18: Weergavemodel SCIA Engineer (excentrisch)

II.5.2 Model dwarsrichting met centrische staafverdeling

Het tweede model wat opgebouwd is, is nagenoeg gelijk aan het eerste model, met het enige verschil dat alle wanden die eerst excentrische geplaatst waren, nu centrisch geplaatst zijn. Dit houdt in dat de wanden nu centrisch geplaatst zijn op de hartlijn van de bovenzijde van de wand. In het geval van deze geometrie 250 mm uit de buitenzijde van de wand. Omdat het verschil in krachten tussen model 1 en 2 dusdanig minimaal zijn, is gekozen om model 1 te hanteren. Dit omdat dan visuele verwarring wordt voorkomen. Zie figuur II.19 voor het weergavemodel.



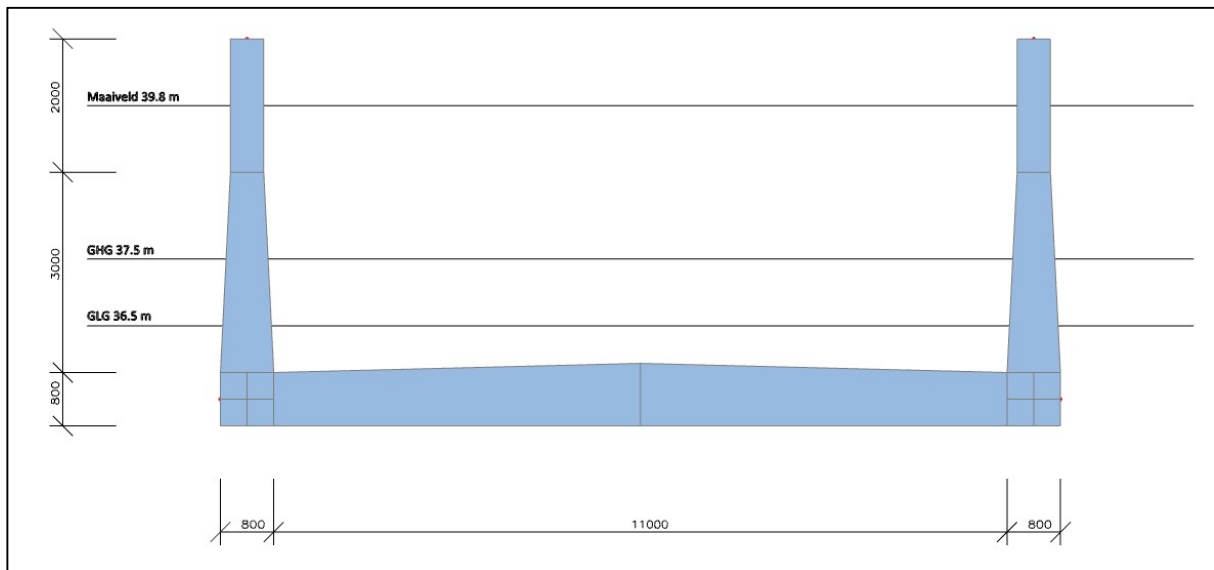
Figuur II.19: Weergavemodel SCIA Engineer (centrisch)

II.5.3 Model dwarsrichting met centrische en partiële staafverdeling

Bij het derde, en tevens laatste model wat is opgebouwd, is ervoor gekozen om de wand op te bouwen in segmenten. Dit om te onderzoeken of dit extra krachten meegeeft aan de constructie. Ook is de wand centrisch geplaatst op de hartlijn van de onderzijde van de wand. Dus op 400 mm in plaats van de 250 mm, zoals bij model 1 en 2 is aangehouden. Daar dit staafmodel de werkelijkheid onvoldoende benaderde, omdat de constructie niet in segmenten opgebouwd wordt, is besloten dat dit model komt te vervallen. Zie figuur II.20 en II.21 voor achtereenvolgende het staaf- en het weergavemodel.



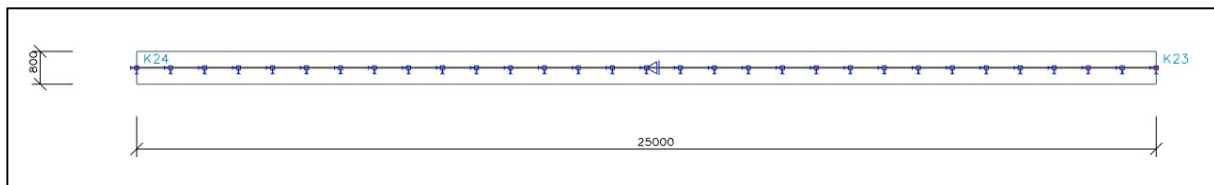
Figuur II.20: Staafmodel SCIA Engineer



Figuur II.21: Weergavemodel SCIA Engineer

II.5.4 Model langsrichting

In figuur II.22 is het model van de langsrichting weergegeven. Er is gekozen om de langsrichting van de vloer op zijn slankste doorsnede te modelleren: vloerdikte = 800 mm. Deze vloer is lijnvormig ondersteund en is voor de modellering in het midden vastgezet met een ondersteuning die in de y- en z-richting vrij kan bewegen. Dit weergavemodel van de langsrichting en het weergavemodel van de dwarsrichting (figuur II.18) worden door de ontwerptool opgesteld in SCIA Engineer.



Figuur II.22: Weergavemodel SCIA Engineer - langsrichting

II.6. Conclusie belastingsonderzoek

Om het belastingsonderzoek uit te voeren, is een stroomschema opgesteld. Aan de hand van dit stroomschema zijn de stappen gevolgd. De geometrie is in deze fase van de berekening al bekend (DO-fase), waardoor deze als invoergegevens verwerkt zijn.

Door middel van een koppeling tussen Microsoft Excel en SCIA Engineer, wordt het model opgesteld. Ook worden de uitkomsten via Microsoft Excel verwerkt in de wapeningsberekening.

Vervolgens is er een onderzoek uitgevoerd naar de belastingen, welke op de tunnelbak werken (deelvraag 7). Alle mogelijke belastingen zijn onderzocht, waarna de niet relevante belastingen (zoals sneeuwbelasting) niet zijn meegenomen in het verdere verloop van het onderzoek. Om tot een compleet belastingoverzicht te komen, is grondige normenstudie vereist. Ook is er gebruik gemaakt van een referentieproject van een open tunnelbak, welke door Wagemaker in een eerder stadium is uitgevoerd. De van toepassing zijnde belastingen zijn onder andere: Rustende belasting, water- en korreldrukken, verkeersbelasting en thermische belasting.

Vanuit de belastingen dienen belastingcombinaties gegeneerd te worden (deelvraag 8). Deze combinaties staan beschreven in NEN-EN 1990 – art. 6.4 en 6.5. In deze normen staan de combinaties accuraat beschreven. Het generen van deze combinaties is uitgevoerd door middel van deze norm.



Deel III - Berekeningsonderzoek

In deel III van het onderzoek wordt het berekeningsonderzoek uitgevoerd. Dit is een essentieel onderdeel van de berekeningsrapportage. Aan de hand van de krachten uit SCIA Engineer, op basis van de casus, kunnen de berekeningen uitgevoerd worden. De berekeningsmethodiek voor de constructievloer, wordt onderzocht in zowel de ULS als de SLS. Ook worden de deelvragen 9 en 11 in dit onderzoek beantwoord.

Deelvraag 10 geeft antwoord op de vraag of de geometrie invloed heeft op de constructieve berekening. Deze deelvraag wordt niet verder behandeld, omdat de wapeningsberekeningen doorsnede-berekeningen zijn. Hierin maakt het niet uit wat bijvoorbeeld de dikte van de constructievloeren en wanden is, want dit heeft geen invloed op de berekening, alleen op de uitkomst. Ook geeft het geen verschil of bijvoorbeeld de wanden schuin of recht uitgevoerd zijn. De snede-berekening is uniform dus ook de hoek van de wanden heeft geen invloed op de berekening maar alleen op de uitkomst.

Allereerst worden de constructievloer en de wanden berekend. Daarna wordt de opdrijving beschouwd. Er wordt afgesloten met een conclusie.

De vervolgstap voor het berekeningsonderzoek, is het optimalisatieonderzoek. Dit wordt in deel IV behandeld.

III.1. Wapeningsberekening constructievloer

De berekeningsmethodiek voor de constructievloer, wordt onderzocht in zowel de ULS als de SLS. Voor de uiterste grenstoestand (ULS) dient het buigend moment + normaalkracht en dwarskracht + normaalkracht gecontroleerd te worden. In de bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS) dienen de scheurvorming en de doorbuiging gecontroleerd te worden.

Om de vloer constructief te berekenen, dienen de volgende wapeningsoppervlaktes gedimensioneerd te worden.

- Hoofdwapening dwarsrichting bovenzijde (1^e laag)
- Hoofdwapening dwarsrichting onderzijde (1^e laag)
- Hoofdwapening dwarsrichting aansluiting wand (1^e laag)
- Verdeelwapening langsrichting bovenzijde (2^e laag)
- Verdeelwapening langsrichting onderzijde (2^e laag)
- Dwarskrachtwapening

Omdat de hoofdwapening en verdeelwapening in beginsel berekend worden via dezelfde berekeningsmethodiek, zal deze maar eenmaal uitgeschreven worden.

III.1.1 Hoofdwapening – ULS – Buigend moment en normaalkracht

Om de benodigde buigtrekwapening te bepalen, dienen de momenten en normaalkrachten uit het rekenprogramma SCIA Engineer bepaald te worden. De benodigde buigtrekwapening wordt bepaald door het buigend moment en de normaaldruk- of normaaltrekkracht.

De wapening wordt berekend aan de hand van de mechanica, met behulp van spannings- en rekfiguren.

De normaalkracht, welke voor de berekeningen gebruikt wordt, dient wanneer dit een drukkracht is gereduceerd te worden. Er wordt in de berekening met 25 procent verlies gerekend. Hier wordt conservatief mee gerekend, omdat de maximale normaaldrukkracht niet over de gehele constructiedoorsnede aanwezig is. Ook wordt er een factor 0,9 (gunstig) gebruikt.

III.1.1.1 Controle scheurmoment

Als eerste wordt het scheurmoment berekend. Als er onvoldoende wapening aanwezig is, zal het betonstaal niet in staat zijn de trekkracht van het beton over te nemen en zal het staal breken. Zo'n plotselinge toename brengt dus het gevaar van een brosse breuk in het wapeningsstaal met zich mee.

Conform NEN-EN 1992-2/NB – art. 9.2.1.1, dient $A_{s,min}$ berekend te zijn als $A_{s,min,1}$ vanuit NEN-EN 1992-1-1/NB – art. 9.2.1.1 (1). Hierin wordt het scheurmoment berekend, wanneer er sprake is van een normaaldruk- of normaaltrekkracht.

$$M_{E,min} = f_{ctm} * W * \frac{\eta}{\eta-1} \quad (\text{bij normaaldrukkracht})$$

Waarin:

$$W = \frac{1}{6} * b * h^2$$

$$\eta = \frac{e * A_c}{W}$$

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

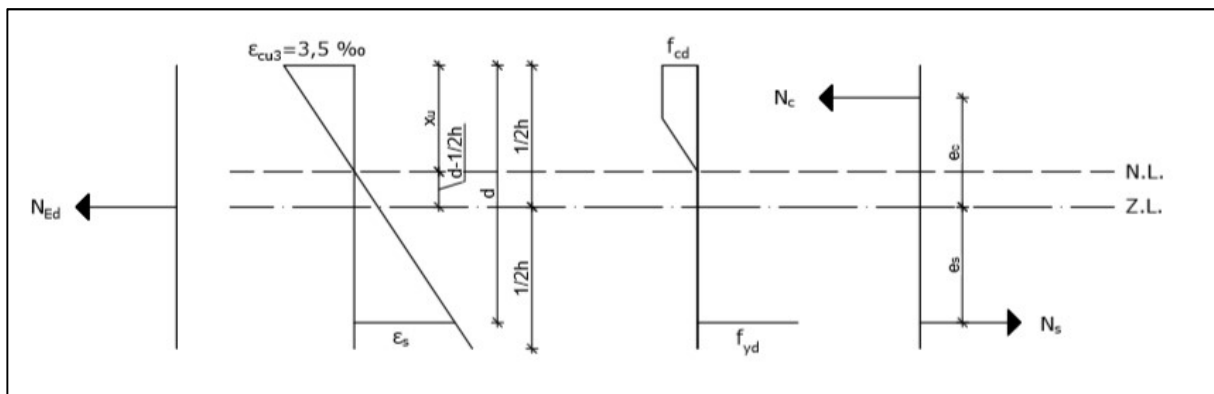
Wanneer $M_{E,min}$ groter is dan M_{Ed} , dient de minimale wapening aangehouden te worden.

$$A_{s,min} = \frac{M_{E,min}}{M_{Rd}} * A_{s,toe}$$

De minimale wapening wordt beschouwd in paragraaf III.1.3.1.

III.1.1.2 Controle bezwijkmoment

Het bezwijkmoment (M_{Rd}), wordt berekend aan de hand van het horizontale evenwicht. In figuur III.1 is het krachterspel weergegeven.



Figuur III.1: Spanning en rekfiguren gewapend beton

$$\sum H = 0 \gg N_c - N_s + N_{Ed} = 0$$

Hierin wordt N_{Ed} aangenomen als normaaltrekkkracht (normaaldrukkracht negatief invullen).

Hierin is N_c de kracht in het beton (oppervlakte betondrukzone * maximale spanning) en N_s de kracht in het staal (oppervlakte staal * maximale spanning).

Waarin:

$$N_c = \alpha * x_u * b * f_{cd}$$

$$N_s = A_s * f_{yd}$$

Dit horizontale evenwicht zorgt ervoor dat de hoogte van de maximale betondrukzone (x_u) berekend kan worden.

$$x_u = \frac{A_s * f_{yd} - N_{Ed}}{\alpha * b * f_{cd}}$$

De krachten in het beton en het betonstaal worden berekend. Ook is bekend waar de krachten aangrijpen, zodat deze vertaald kunnen worden in een moment. Dit moment is uiteindelijk het maximaal opneembare moment en dus het bezwijkmoment (M_{Rd}).

Om de excentriciteit van het staal te berekenen is de nuttige hoogte (d) benodigd.

$$d = h - c - 0,5 * \phi_{hw} \text{ (dwarsrichting in 1^e laag).}$$

Er wordt vanuit gegaan dat er geen beugels aanwezig zijn tijdens deze berekening.

$$e_s = -\frac{1}{2} h + d$$

$$e_c = \frac{1}{2}h - \beta * x_u$$

Het bezwijkmoment bedraagt:

$$M_{Rd} = N_c * e_c + N_s * e_s$$

Dit bezwijkmoment dient groter te zijn dan M_{Ed} .

III.1.1.3 Vloeien betonstaal

Het vloeien van het betonstaal dient, conform NEN-EN 1992-1-1 – Bijlage C, gecontroleerd te worden. Wanneer het betonstaal niet vloeit, wordt er geen waarschuwing voor bezwijken gegeven.

Vanuit gelijkvormigheid van de driehoeken vanuit figuur 1 wordt de rek in het staal berekend.

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3} * (d - x_u)}{x_u}$$

Deze rek in het betonstaal dient groter te zijn dan de vloeigrens:

$$\varepsilon = \sigma / E = f_{yk} / E_s = 435 / 200000 = 0,002175$$

III.1.1.4 Controle maximale betondrukzone

Conform NEN-EN 1992-1-1/NB – art 6.1 (9) dient de verhouding tussen de betondrukzone (x_u) en de nuttige hoogte (d) niet te groot te zijn. Als deze verhouding te groot wordt, bezwijkt het beton in de drukzone op stuik, voordat de wapening gaat vloeien. Voor betonsterkteklassen tot en met C50/60 ($f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$) geldt:

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

Ervan uitgaand dat te allen tijde staalsoort B500 ($f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$) gebruikt wordt, geldt voor de verhouding:

$$\frac{x_u}{d} = \frac{500}{500 + 435} = \frac{500}{935} = 0,535 \rightarrow x_u \leq 0,535 * d$$

Voor betonsterkteklasse groter dan C50/60 ($f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$) geldt:

$$\frac{x_u}{d} = \frac{\varepsilon_{cu3} * 10^6}{\varepsilon_{cu3} * 10^6 + 7 * f_{yd}}$$

III.1.1.5 Verdeelwapening

De wapening in langsrichting van de vloer (onder- en bovenwapening), wordt op dezelfde manier berekend. Echter dient er bij het moment van SCIA Engineer, de dwarscontractiecoëfficiënt (of poisson-factor) bij opgeteld te worden. Dit houdt in dat 20 procent van alle krachten van de dwarsrichting werken op de langsrichting. 20 Procent is de poisson-factor van beton. Daar beton een isotroop materiaal is, hangen de materiaaleigenschappen niet van de richting af, waardoor de poisson-factor altijd gelijk blijft.

De dwarscontractiecoëfficiënt bedraagt een factor 0,2 (ook conform ROK 1.4 – art. 7.3), dus 20 procent van het moment (M_{Ed}) in dwarsrichting.

Het rekenkundig moment in langsrichting bedraagt:

$$M_{Ed,langs} + 0,2 * M_{Ed,dwars}$$

III.1.2 Hoofdwapening – SLS – scheurvorming en doorbuiging

Voor de SLS combinatie, dient de scheurvorming en de doorbuiging van de constructie nader bekeken te worden.

III.1.2.1 Scheurvorming

Het is bekend dat een constructie altijd moet voldoen aan twee basiseisen, namelijk:

- Voldoende veiligheid (betrouwbaarheid);
- Geschikt voor gebruik (bruikbaarheid).

Voor de toetsing van de scheurvorming, is de tweede eis van toepassing. Goed functioneren heeft betrekking op de duurzaamheid van de constructie, ofwel de weerstand tegen aantasting van buiten. Het gevaar van wapeningsaantasting heeft vooral te maken met de grootte van de betondekking.

De maximale scheurwijdte w_{max} , wordt bepaald aan de hand van de milieuklasse. NEN-EN 1992-1-1/NB – Tabel 7.1N geeft de grenswaarden, weergegeven in figuur III.2.

Tabel 7.1N — Aanbevolen waarden van w_{max} en daarvan afgeleide grootheden			
Milieuklasse	Elementen met betonstaal en/of voorspanstaal zonder aanhechting	Elementen met een combinatie van betonstaal en voorspanstaal met aanhechting	Elementen met uitsluitend voorspanstaal met aanhechting
	Frequente belastingscombinatie	Frequente belastingscombinatie	Frequente belastingscombinatie
X0, XC1	$w_{max} \leq 0,40 \text{ mm}^a$	$w_{max} \leq 0,30 \text{ mm}$	$\Delta\sigma_p \leq \xi 275 \text{ MPa}$
XC2, XC3, XC4	$w_{max} \leq 0,30 \text{ mm}$	$w_{max} \leq 0,20 \text{ mm}$	$\Delta\sigma_p \leq \xi 175 \text{ MPa}$
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	$w_{max} \leq 0,20 \text{ mm}$	$w_{max} \leq 0,10 \text{ mm}$	$\Delta\sigma_p \leq \xi 75 \text{ MPa}$
^a Voor milieuklasse X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid; deze grens is gesteld om een in het algemeen aanvaardbaar uiterlijk te verkrijgen. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking zijn afgezwakt.			

Figuur III.2: Maximale scheurwijdte w_{max}

Echter moet de scheurwijdte w_k , conform NEN-EN 1992-3 – art. 7.3.1, ten behoeve van de waterdichtheid begrensd worden. De maximale scheurwijdte, wordt voor de gehele constructie op 0,2 mm aangehouden.

III.1.2.2 Berekening van scheurwijdtes

In NEN-EN 1992-1-1 – art. 7.3.3 zijn een tweetal tabellen weergegeven, waaruit de beheersing van de scheurwijdtes uitgevoerd kan worden. Echter is, conform NEN-EN 1992-2/NB – art. 7.3.4, scheurbeheersing zonder berekening niet toegelaten. De berekening wordt uitgevoerd volgens NEN-EN 1992-1-1 – art. 7.3.4.

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max} * k_c$$

De maximale scheurafstand $s_{r,max}$, wordt bepaald aan de hand van NEN-EN 1992-1-1 – vgl. 7.11:

$$s_{r,max} = k_3 * c + \frac{k_1 * k_2 * k_4 * \phi}{\rho_{p,eff}} \leq \max\{(50 - 0,8 f_{ck})\phi; 15\phi\}$$

De rek tussen het beton en het staal dient berekend te zijn conform NEN-EN 1992-1-1 vgl. 7.9:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e * \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 * \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Om deze rek te berekenen dient de hoogte van de betondrukzone x bekend te zijn. Deze berekening van x wordt behandeld in "Bijlage E - Berekeningsonderzoek".

De scheurwijdte wordt getoetst aan de volgende formule:

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max} * k_c$$

De waarde k_c afhankelijk van de nominale en toegepaste dekking:

$$k_c = c_{to} / c_{nom}$$

III.1.2.3 Doorbuiging

De doorbuiging dient gecontroleerd te worden, conform NEN-EN 1992-1-1 – art. 7.4 en ROK 1.4 – art. A.2.4.2 (3), waarbij geldt $w < 1/300 * lengte$. De constructievloer is gefundeerd op een bedding, waardoor de doorbuiging in de praktijk geringe waarden aanneemt.

III.1.3 Hoofdwapening - Detaillingsregels

Naast het rekenkundige gedeelte, dient de hoofdwapening, conform NEN-EN 1992-1-1 – H9, aan de nodige detaillingsregels te voldoen.

III.1.3.1 Minimale- en maximale wapeningsverhouding

De minimale wapening behoort ten behoeve van het scheurmoment niet groter te zijn dan:

$$A_{s,min} = \frac{M_{cr}}{M_{Rd}} * A_{s,toe}$$

Naast de bovenstaande minimale wapening (scheurmoment), dient de wapening aan de volgende detaillingsregels te voldoen.

De maximale wapeningsverhouding bedraagt conform (NEN-EN 1992-1-1 – art. 9.2.1.1 (3)):

$$A_{s,max} = 0,04 * A_c$$

De overlappingslengte en verankeringslengte wordt uitgewerkt in "Bijlage E - Berekeningsonderzoek"

III.1.4 Dwarskrachtwapening – ULS – Dwarskracht en normaalkracht

De dwarskracht op de constructie dient gecontroleerd te worden. De berekening wordt uitgevoerd conform NEN-EN 1992-1-1 – art. 6.2. De normaalkracht wordt meegenomen in de dwarskracht berekening. Een normaaldrukkracht heeft een positief effect en een normaaltrekkracht een negatief effect.

De dwarskracht (V_{Ed}) moet kleiner zijn dan de dwarskrachtweerstand (V_{Rd}). De dwarskrachtweerstand, wordt als volgt berekend:

$$V_{Rd} = [C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}] b * d \geq ((0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}) + k_1 * \sigma_{cp}) b * d$$

Wanneer de dwarskracht groter is dan de dwarskrachtweerstand, dient de gehele dwarskracht door de wapening (beugels) opgenomen te worden.

Het berekenen van elementen met dwarskrachtwapening, is gebaseerd op een vakwerkanalogie. De grenswaardes voor de hoek θ zijn:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \text{ (NEN-EN 1992-1-1/NB – art. 6.2.3 (2))}$$

De dwarskrachtweerstand bedraagt met verticale dwarskrachtwapening (EN-1992-1-1 – vgl. 6.8):

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} * z * f_{yd} * \cot \theta$$

Deze formule kan omgeschreven worden tot een ontwerpformule voor de benodigde dwarskrachtwapening. Gesteld wordt dat de optredende dwarskracht gelijk is aan de weerstand.

$$V_{Ed} = V_{Rd}$$

De ontwerpformule geeft een oppervlakte. Deze oppervlakte dient bij eventuele dubbelsnede beugels gehalveerd te worden.

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{Ed}}{z * f_{yd} * d * \cot \theta}$$

III.1.4.1 Controle drukdiagonaal

Als laatste dient de drukdiagonaal gecontroleerd te worden. Als er een overschot aan dwarskrachtwapening wordt toegepast, kan de drukdiagonaal van het beton bezwijken. Om dit te voorkomen wordt er een grenswaarde aan de dwarskrachtweerstand gesteld (NEN-EN 1992-1-1 – vgl. 6.9).

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} * b * z * v_1 * f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

Als $V_{Rd,max}$ wordt overschreden, dient de geometrie of betonsterkteklasse aangepast te worden.

III.1.5 Dwarskrachtwapening - Detaillierungsregels

Net zoals voor de hoofdwapening zijn er, in NEN-EN 1992-1-1 – art. 9.2.2, detaillierungsregels opgesteld voor de dwarskrachtwapening. Deze detaillierungsregels zijn weergegeven in “Bijlage E – Berekeningsonderzoek”.

III.2. Wapeningsberekening wanden

De berekeningsmethodiek voor de constructiewanden wordt onderzocht in zowel de ULS als de SLS. Voor de uiterste grenstoestand (ULS) dient het buigend moment en de dwarskracht gecontroleerd te worden. In de bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS) dienen de scheurvorming en de doorbuiging gecontroleerd te worden. Normaalkracht in de wanden wordt buiten beschouwing gelaten, omdat dit voornamelijk afkomstig van het eigen gewicht is en dit een gunstige werking heeft.

In deze berekening zal alleen de onderkant van de wand, ter plaatse van de aansluiting met de vloer, behandeld worden. De optimalisatie behorende bij een slankere wand, komt hier niet aan bod. Ook zal alleen de grondzijde berekend worden, daar deze trek moet opnemen. De zichtzijde neemt druk op en zal daarom alleen praktisch gewapend worden op basis van de wapening in de grondzijde.

Om de wand constructief te berekenen dienen de volgende wapeningsoppervlaktes gedimensioneerd te worden:

- Hoofdwapening – verticale richting grondzijde dikke wand (1^e laag);
- Hoofdwapening – verticale richting grondzijde dunne wand (1^e laag);
- Hoofdwapening – verticale richting zichtzijde dikke wand (1^e laag);
- Hoofdwapening – verticale richting zichtzijde dunne wand (1^e laag);
- Hoofdwapening – horizontale richting grondzijde dikke wand (2^e laag);
- Hoofdwapening – horizontale richting grondzijde dunne wand (2^e laag);
- Hoofdwapening – horizontale richting zichtzijde dikke wand (2^e laag);
- Hoofdwapening – horizontale richting zichtzijde dunne wand (2^e laag);
- Dwarskrachtwapening – dwarsrichting dikke wand
- Dwarskrachtwapening – dwarsrichting dunne wand

De aansluiting van de wanden met de vloer, is in hoofdstuk 2 al berekend.

III.2.1 Hoofdwapening – ULS – buigend moment

Om de benodigde buigtrekwapening te bepalen, dienen de momenten uit het rekenprogramma SCIA Engineer bepaald te worden. De benodigde buigtrekwapening, wordt bepaald door het buigend moment. Normaalkracht in de wanden, wordt voor deze berekening buiten beschouwing gelaten.

De wapening wordt berekend aan de hand van elementaire mechanica, met behulp van spanning-rek diagrammen.

III.2.1.1 Controle scheurmoment

Als eerste wordt het scheurmoment berekend. Als er onvoldoende wapening aanwezig is, zal het betonstaal niet in staat zijn de trekkracht van het beton over te nemen en zal het staal breken. Zo'n plotselinge toename brengt dus het gevaar van een brosse breuk in het wapeningsstaal met zich mee.

Conform NEN-EN 1992-2/NB – art. 9.2.1.1, dient $A_{s,min}$ berekend te zijn als $A_{s,min1}$ vanuit NEN-EN 1992-1-1/NB - art. 9.2.1.1 (1).

$A_{s,min1}$ is volgens art. 6.1 het benodigde oppervlak om het moment $M_{E,min}$ op te kunnen nemen.

$$M_{E,min} = f_{ctm} * W \quad \text{bij zuivere buiging;}$$

Waarin:

$$W = 1/6 * b * h^2$$

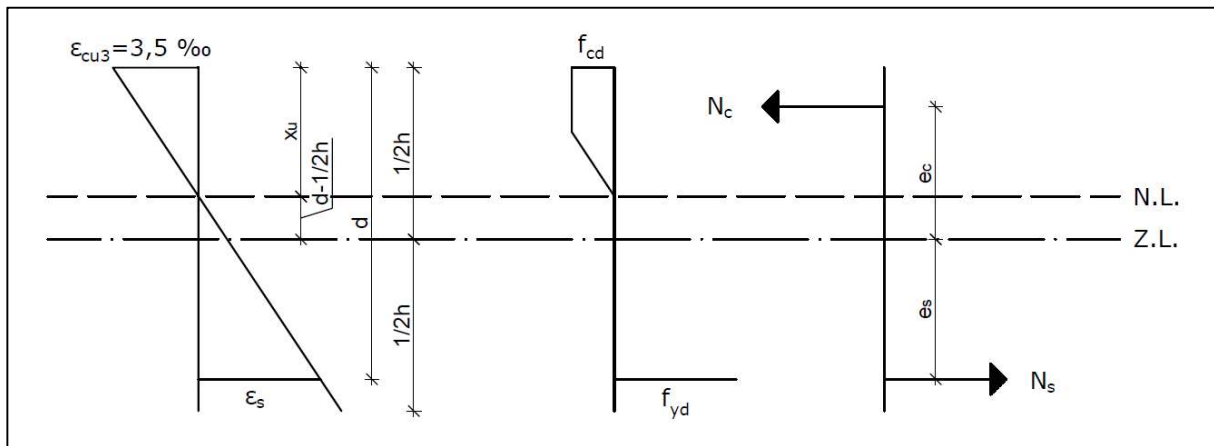
Wanneer $M_{E,min}$ groter is dan M_{Ed} , dient de minimale wapening aangehouden te worden.

$$A_{s,min} = \frac{M_{E,min}}{M_{Rd}} * A_{s,toe}$$

De minimale wapening wordt beschouwd in paragraaf III.1.3.1.

III.2.1.2 Controle bezwijkmoment

Het bezwijkmoment M_{Rd} , wordt berekend aan de hand van het horizontale evenwicht. In figuur III.3 is het krachterspel weergegeven.



Figuur III.3: Spanning en rekfiguren gewapend beton

$$\sum H = 0 \rightarrow N_c - N_s = 0$$

Hierin is N_c de kracht in het beton (oppervlakte betondrukzone * maximale spanning) en N_s de kracht in het staal (oppervlakte staal * maximale spanning).

Waarin:

$$N_c = \alpha * x_u * b * f_{cd}$$

$$N_s = A_s * f_{yd}$$

Dit horizontale evenwicht, zorgt ervoor dat de hoogte van de maximale betondrukzone x_u berekend kan worden.

$$x_u = \frac{A_s * f_{yd}}{\alpha * b * f_{cd}}$$

De krachten in het beton en het staal worden berekend. Ook is bekend waar de krachten aangrijpen, zodat deze vertaald kunnen worden in een moment. Dit moment is uiteindelijk het maximaal opneembare moment en dus het bezwijkmoment (M_{Rd}).

Om de excentriciteit van het staal te berekenen is de nuttige hoogte (d) benodigd.

$$d = h - c - \phi_{bgl} - 0,5 * \phi_{hw}$$

Er wordt vanuit gegaan dat er geen beugels aanwezig zijn tijdens deze berekening.

$$e_s = -\frac{1}{2}h + d$$

$$e_c = \frac{1}{2}h - \beta * x_u$$

Het bezwijkmoment bedraagt:

$$M_{Rd} = N_c * e_c + N_s * e_s$$

Dit bezwijkmoment dient groter te zijn dan M_{Ed} .

III.2.1.3 Vloeien betonstaal

Het vloeien van het betonstaal wordt gecontroleerd, zoals in paragraaf III.1.1.3 beschreven. Deze berekening is voor de constructievloer en de wanden gelijk.

III.2.1.4 Controle maximale betondrukzone

De berekening van de maximale betondrukzone, is gelijk aan deze berekening voor de constructievloer (paragraaf III.1.1.4).

III.2.2 Hoofdwapening – SLS – scheurvorming en doorbuiging

Voor de SLS combinatie, dienen de scheurvorming en de doorbuiging van de constructie gecontroleerd te worden.

III.2.2.1 Controle scheurwijdte

Het is bekend dat een constructie altijd moet voldoen aan twee basiseisen, namelijk:

- Voldoende veiligheid (betrouwbaarheid);
- Geschikt voor gebruik (bruikbaarheid).

Voor de toetsing van de scheurvorming is de tweede eis van toepassing. Goed functioneren heeft betrekking op de duurzaamheid van de constructie ofwel de weerstand tegen aantasting van buiten. Het gevaar van wapeningsaantasting heeft vooral te maken met de grootte en de dichtheid van de betondekking.

De maximale scheurwijdte w_{max} wordt bepaald aan de hand van de milieuklasse. NEN-EN 1992-1-1/NB – Tabel 7.1N geeft de grenswaarden, weergegeven in figuur III.4. Net zoals bij de constructievloer, wordt de scheurwijdte begrensd op 0,2 mm ten behoeve van de waterdichtheid van de constructie.

Tabel 7.1N — Aanbevolen waarden van w_{max} en daarvan afgeleide grootheden			
Milieuklasse	Elementen met betonstaal en/of voorspanstaal zonder aanhechting	Elementen met een combinatie van betonstaal en voorspanstaal met aanhechting	Elementen met uitsluitend voorspanstaal met aanhechting
	Frequente belastingscombinatie	Frequente belastingscombinatie	Frequente belastingscombinatie
X0, XC1	$w_{max} \leq 0,40 \text{ mm}^a$	$w_{max} \leq 0,30 \text{ mm}$	$\Delta\sigma_p \leq \xi 275 \text{ MPa}$
XC2, XC3, XC4	$w_{max} \leq 0,30 \text{ mm}$	$w_{max} \leq 0,20 \text{ mm}$	$\Delta\sigma_p \leq \xi 175 \text{ MPa}$
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	$w_{max} \leq 0,20 \text{ mm}$	$w_{max} \leq 0,10 \text{ mm}$	$\Delta\sigma_p \leq \xi 75 \text{ MPa}$
^a Voor milieuklasse X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid; deze grens is gesteld om een in het algemeen aanvaardbaar uiterlijk te verkrijgen. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking zijn afgezwakt.			

Figuur III.4: Maximale scheurwijdte w_{max}

III.2.2.2 Berekening van scheurwijdtes

In NEN-EN 1992-1-1 – art. 7.3.3 zijn een tweetal tabellen weergegeven, waaruit de beheersing van de scheurwijdtes uitgevoerd kan worden. Echter wordt conform EN-1992-1-1 – art. 7.3.4 een nauwkeurige berekening weergegeven.

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max} * k_c$$

De maximale scheurafstand $s_{r,max}$ wordt bepaald aan de hand van NEN-EN 1992-1-1 – vgl. 7.11:

$$s_{r,max} = k_3 * c + \frac{k_1 * k_2 * k_4 * \emptyset}{\rho_{p,eff}} \leq \max\{(50 - 0,8 f_{ck})\emptyset; 15\emptyset\}$$

De rek tussen het beton en het staal dient berekend te zijn conform NEN-EN 1992-1-1 – vgl. 7.9.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_{s,freq} - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e * \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 * \frac{\sigma_{s,freq}}{E_s}$$

Waarin:

$$\sigma_{s,freq} = \frac{M_{fr}}{M_{Rd}} * f_{yd} \text{ is } \sigma \text{ in de trekwapening, uitgaande van een gescheurde doorsnede;}$$

Om de scheurwijdte te berekenen, dient de hoogte van de betondrukzone x berekend te worden. Deze betondrukzone wordt berekend in “Bijlage E – Berekeningsonderzoek”.

De scheurwijdte wordt getoetst aan de volgende formule:

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max} * k_c$$

De waarde k_c is afhankelijk van de nominale en toegepaste dekking:

$$k_c = c_{nom}/c_{toe}$$

III.2.2.3 Horizontale uitwijking

Er is afgebakend dat voor de wanden geen toetsing voor horizontale uitwijking nodig is. Daar scheurvorming maatgevend is, zal de wand voldoende gewapend moeten worden om aan de scheurvormingseis te voldoen. Er mag vanuit worden gegaan dat deze wapening afdoende is voor om ook de horizontale uitwijking in te perken.

III.2.3 Hoofdwapening – Horizontale richting

De horizontale hoofdwapening wordt in wanden ook wel krimp- of kruipwapening genoemd. De horizontale hoofdwapening wordt berekening in het SLS-stadium van de wand, waar hij op scheurvorming getoetst moet worden. De wapening wordt berekend aan de hand van elementaire mechanica. Omdat de krachten op de wand dusdanig klein zijn, volstaat met het enkel en alleen aanbrengen van krimp- en kruipwapening in de langsrichting. Dit volgens het boek Betonconstructies onder Temperatuur- en Krimpvervormingen Hoofdstuk 5.8 Vereenvoudigde berekeningsmethode (Breugel, 1996).

III.2.3.1 Berekening rekken

Eerst worden de rekken bij een onvolledig ontwikkeld scheurpatroon (OOSP) en een volledig ontwikkeld scheurpatroon (VOSP) berekend. Om dit te kunnen berekenen zijn een aantal stappen benodigd, waarbij men begint met het scheurcriterium en eindigt met de staalspanning na scheuren.

Het scheurcriterium σ_{cr} wordt als volgt bepaald:

$$\sigma_{cr} = k * k_c * f_{ctm}$$

De scheurtrekkkracht wordt berekend.

$$N_{cr} = 1,0 * k * f_{ctm} * h_{c,ef} * b$$

Met dit gegeven kan de staalspanning na scheuren berekend worden.

$$\sigma_{s,cr} = \frac{N_{cr}}{A_s}$$

Rek waarbij OOSP → VOSP, kortdurende last: $\varepsilon_{fdc} = (60 + 2,4 * \sigma_{s,cr}) * 10^{-6} = [‰]$

Rek waarbij OOSP → VOSP, langdurige last: $\varepsilon_{fdc,\infty} = \gamma_{\infty} * \varepsilon_{fdc} = [‰]$

De waardes 60 en 2,4 gebruikt bij ε_{fd} zijn empirisch bepaald.

Als laatste toets moet nog blijken dat $\varepsilon_{krimp} \leq \varepsilon_{fdc}$. Dit omdat de constructie alleen al vanwege het uitharden en inkrimpen van het beton veel rekt. De reden dat ε_{fdc} gecontroleerd wordt, is om de aanname van de berekening te verifiëren.

III.2.3.2 Optredende gemiddelde korteduur scheurwijdte

De optredende gemiddelde korteduur scheurwijdte wordt berekend als volgt:

$$w_{m0} = 2 * \left\{ \frac{0,4 * \emptyset}{f_{cm,k} * E_s} * \sigma_{s,cr} * (\sigma_{s,cr} - \alpha_e * \sigma_{cr}) \right\}^{0,85}$$

III.2.3.3 Karakteristieke langeduur scheurwijdte

De langeduur scheurwijdte, wordt berekend aan de hand van de korteduur scheurwijdte.

$$w_{k\infty} = \gamma_s * \gamma_{\infty} * w_{m0}$$

Als toets moet blijken dat $w_k \leq w_{max}$.

III.2.4 Hoofdwapening - Detaillierungsregels

De minimale wapening is beschouwd in paragraaf III.1.3.1. De maximale wapeningsverhouding bedraagt conform NEN-EN 1992-1-1 – art. 9.6.2 (1):

$$A_{s,vmax} = 0,04 * A_c \quad \text{NEN-EN 1992-1-1/NB – art 9.6.2 (1)}$$

$$A_{s,hma} = 0,04 * A_c \quad \text{NEN-EN 1992-1-1/NB – art 9.6.2 (1)}$$

De overlappingslengte en verankeringslengte, wordt uitgewerkt in “Bijlage E Berekeningsonderzoek”

III.2.5 Dwarskrachtwapening – ULS – dwarskracht

De dwarskracht voor de constructiewanden wordt berekend, gelijk aan de dwarskrachtsberekening voor de constructievloer. Echter wordt er geen normaalkracht meegenomen in de berekening.

III.2.6 Dwarskrachtwapening – detaillierungsregels

Net zoals voor de hoofdwapening zijn er in NEN-EN 1992-1-1 – art. 9.2.2 detaillierungsregels opgesteld voor de dwarskrachtwapening. Deze detaillierungsregels zijn weergegeven in “Bijlage E – Berekeningsonderzoek”.

III.3. Opdrijving

De opdriving wordt gecontroleerd conform NEN 9997-1 – art. 2.4.7.4 en NEN 9997-1 –Bijlage A.4 Hierin dient de aandrijvende belasting kleiner te zijn dan de rustende belasting.

$$G_{dst,d} + Q_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d$$

III.3.1 Aandrijvende belasting

De aandrijvende belasting bestaat uit een permanent gedeelte en een variabel gedeelte.

Het permanente gedeelte bedraagt de opwaartse druk onder de gemiddeld lage grondwaterstand (GLG), het variabele gedeelte bedraagt de opwaartse druk tussen de GLG en de GHG.

De permanente aandrijvende belasting bedraagt:

$$G_{dst,d} = (GLG - o.k.vloer) * 10 * B_{vloer}$$

De variabele aandrijvende belasting bedraagt conform ROK 1.4 – art. 10.2:

$$Q_{dst,d} = (GHG - GLG) * 10 * B_{vloer}$$

Waarin GHG een fictieve grondwaterstand kan zijn. GHG bedraagt de minimale waarde van GHG en $GLG + (b.k.wand - GLG) / \gamma_{Qdst}$

III.3.2 Rustende belasting

De rustende belasting bestaat uit het eigen gewicht van de betonconstructie en het grondmassief welke aanwezig is op de eventuele oren van de constructie. In de casus zijn er geen oren aanwezig, waardoor $R_k = 0$ kN is.

De rustende belasting bestaat uit het eigen gewicht van de constructievloer en het eigen gewicht van beide wanden. Deze belasting is gecontroleerd in “Bijlage B2 - Controle eigen gewicht”.

III.3.3 Belasting factoren

Om het opdrijven te controleren, worden er aan de berekende belastingen factoren gekoppeld. Het eigen gewicht van de constructie werkt in deze berekening gunstig. Hoe groter het eigen gewicht, des te kleiner is de kans op opdriving. De partiële factoren worden weergegeven in NEN 9997-1 – Tabel A.4, deze tabel is onderstaand weergegeven. Wanneer de veranderlijke grondwaterstand, na vermenigvuldiging met $\gamma_{Q,dst} = 1,5$, fysiek niet kan optreden (boven b.k. wand), dan mag de fysieke grens, met $\gamma_{G,dst} = 1,0$, aangehouden worden (ROK 1.4 – art. 10.2).

Tabel III.1: UPL partiële factoren

Tabel A.15 — Partiële factoren op belastingen (γ_F)		
Belasting	Symbool	Waarde
Blijvend		
Ongunstig ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,0
Gunstig ^b	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Veranderlijk		
Ongunstig ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5
^a Aandrijvend.		
^b Weerstandbiedend.		

III.4. Conclusie berekeningsonderzoek

Welke constructieve berekeningen moeten uitgevoerd worden om tot een DO-berekening te komen (deelvraag 9)? De berekeningen die benodigd zijn, zijn wapeningsberekeningen voor de constructievloer, de wanden en ten gevolge van de controle van opdrijven. Deze berekeningen zijn in de ontwerptool verwerkt in de vorm van een berekeningsrapportage (deelvraag 11). De krachten worden vanuit Microsoft Excel ingeladen, waarna de wapening gekozen kan worden. De ontwerptool zorgt ervoor dat de berekening automatisch voltooid wordt. Deze berekeningen staan in “Bijlage F1 – Berekeningsrapportage”.

Zoals in de inleiding van dit deelonderzoek al is gesteld, heeft de geometrie geen invloed op de aard van de berekening. Daarom is deelvraag 10 niet verder behandeld. Voor de doorsnede-berekeningen die voor de vloeren en wanden uitgevoerd worden, maakt het namelijk niet uit of de wanden schuin of recht uitgevoerd worden. Dit zijn snedetoetsen die niet afhankelijk zijn van bijvoorbeeld de hoek van de wand. Ook een invoerparameter zoals de dikte heeft ook geen invloed op de berekening, alleen op de uitkomst.



Deel IV - Optimalisatieonderzoek

In deel IV van het onderzoek, wordt de werking van de ontwerptool verklaard. Met behulp van de ontwerptool wordt een optimalisatieonderzoek uitgevoerd. Voor de casus zijn bepaalde dimensies aangehouden en is de benodigde wapening berekend. Tijdens het optimalisatieonderzoek wordt steeds één variabele ten opzichte van de casus veranderd. Hierdoor kan er bekeken worden, welke invloed deze variabele heeft op de hoeveelheid wapening.

Als eerste wordt de vloerdikte beschouwd. De variabele hierin is deze dikte, de rest van de invoergegevens wordt gelijk gehouden aan de casus. Hierdoor kunnen duidelijke conclusies getrokken worden. De vloerdikte wordt uitgezet tegen de hoeveelheid wapening in kg/m^3 .

Vervolgens wordt de wanddikte beschouwd. Hierin worden de dikke wand bekeken. Ook bij dit onderzoek wordt er gekeken naar de totale wapening.

Als laatste wordt de invloed van de betonsterkteklasse beschouwd.

Omdat het wapenen op een praktische en uitvoerbare staafafstand een enorme invloed heeft op de hoeveelheid wapening, is ervoor gekozen hiermee geen rekening te houden. Er wordt gewapend op een minimale hoeveelheid wapening, waarmee de praktische hart-op-hart afstanden buiten beschouwing gelaten worden. Zo kan het voorkomen dat er een hart-op-hart afstand van 120 mm gekozen wordt, terwijl er in de praktijk eerder voor 125 mm (veelvoud van 25 mm) gekozen wordt.

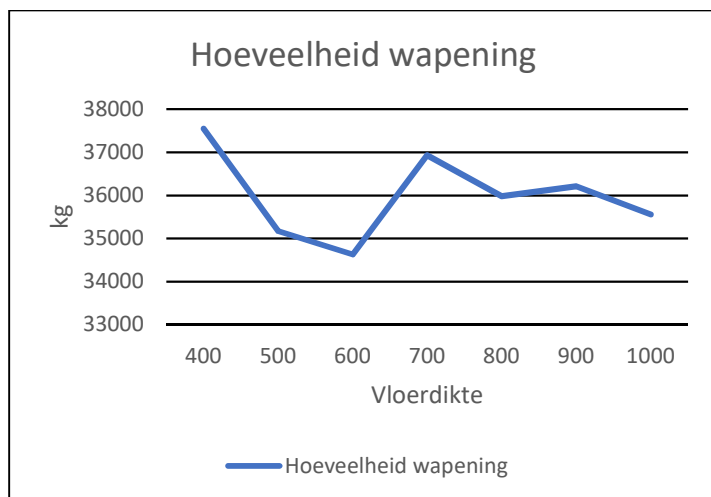
IV.1. Constructievloerdikte

Het eerste onderzoek is het onderzoek naar de constructieve vloerdikte. De verwachting is dat wanneer de vloerdikte dunner wordt, de hoeveelheid wapening zal stijgen.

De vloerdikte is variërend berekend vanaf een waarde van 400 mm tot een waarde van 1000 mm. De verkanting in de vloer is gelijk gebleven. Vanuit deze berekeningen wordt een grafiek (grafiek IV.1) weergegeven, waarin de vloerdikte is uitgezet tegen de wapening (kg). De waarden zijn overzichtelijk weergegeven in tabel IV.1. In de tabel en grafiek is de volledige hoeveelheid wapening weergegeven. Dus niet alleen de wapening benodigd voor de constructievloer.

Tabel IV.1: Waarden constructievloerdikte

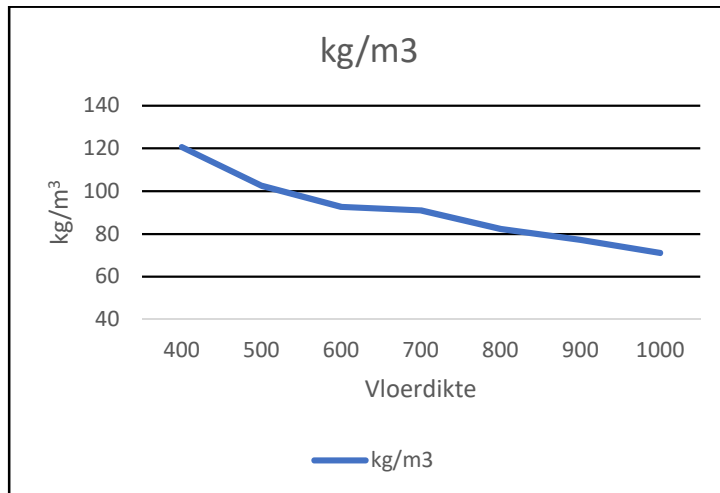
Vloerdikte	kg wapening	kg/m ³
400	37548	120,7
500	35174	102,6
600	34632	92,6
700	36930	91,0
800	35980	82,3
900	36211	77,3
1000	35561	71,1



Grafiek IV.1: Hoeveel wapening (kg)

De hoeveelheid wapening toont een andere grafiek dan op voorhand verwacht wordt. Dit heeft voornamelijk te maken met de minimale wapening. De wapening aan de bovenzijde van de constructievloer is vooral gebaseerd op minimale wapening. Dit omdat de normaalkracht hier groot is in vergelijking met het moment. Doordat waterdruk relatief laag is, valt deze bijna in zijn geheel weg tegen de neerwaartse belasting (eigen gewicht constructievloer). Voor de casus wordt een optimale vloerdikte van 600 mm gevonden.

Voor veel aannemers is het interessant om de hoeveelheid wapening in kg/m³ te weten. Vanuit deze gegevens wordt onder meer de kostprijs voor de constructie bepaald. In grafiek IV.2 is deze grafiek weergegeven.



Grafiek IV.2: Kg/m³

Uit grafiek IV.2 blijkt dat de hoeveelheid wapening in kg/m^3 relatief weinig zegt. Wanneer de wapening gelijk blijft, wat in beginsel ongeveer het geval is in deze optimalisatie, ziet de wapeningshoeveelheid in kg/m^3 er automatisch gunstig uit. Dit omdat de constructievloer dikker wordt. De hoeveelheid kg/m^3 geeft een vertekend beeld van de hoeveelheid wapening in de gehele constructie. Hierin is bijvoorbeeld niet weergegeven dat er in een vloer van 800 mm meer wapening gebruikt wordt, dan in een vloer van 600 mm.

Er wordt een bijlage opgesteld voor de verwerking van de optimale vloerdikte (600 mm) in de tool. Dit om de verschillen met de casus te weergeven. De bijlage heet "Bijlage G – Optimalisatie vloer".

IV.2. Wanddikte

Als tweede is de invloed van de wanddikte onderzocht. Ook hierin wordt gekeken naar de minimale wapening bij een variabele wanddikte. De dikke wand wordt beschouwd.

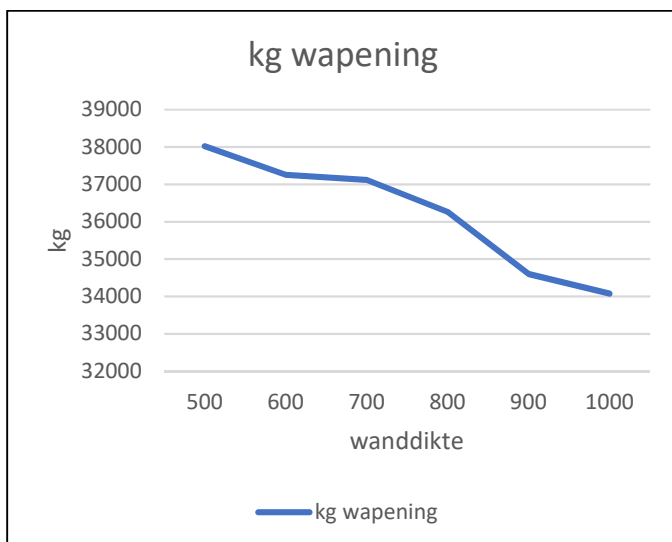
Omdat er ten opzichte van de casus slechts één variabele aangepast wordt, worden wanddikte tussen de 500 mm en de 1000 mm beschouwd. Tabel IV.2 geeft een overzicht van de gevonden waarden.

Tabel IV.2: Waarden wanddikte

Wanddikte	kg wapening	kg/m ³
500	38019	94,4
600	37254	89,9
700	37118	86,8
800	36263	82,9
900	34603	77,1
1000	34079	74,1

De hoeveelheid wapening (kg) wordt ook voor de wanddikte uitgezet tegenover de variabele wanddikte.

Hieruit blijkt dat de wanddikte in direct verband staat met de hoeveelheid wapening. Echter zijn de verschillen tussen een dikkere wand en de wapening niet groot. De wapening in de gehele constructie verschilt nauwelijks. Dit komt omdat wanneer de wand dikker wordt, de vloerbreedte (gehele constructie) ook breder wordt. Wanneer de wand in plaats van 800 mm, 1000 mm breed wordt, wordt de gehele vloer 2x 200 mm = 400 mm breder. Over de mootlengte van 25 m levert dit een behoorlijke hoeveelheid wapening. In grafiek IV.3 is de tabel in grafiekvorm weergegeven.



Grafiek IV.3: Kg wapening t.o.v. wanddikte

IV.3. Betonsterkteklasse

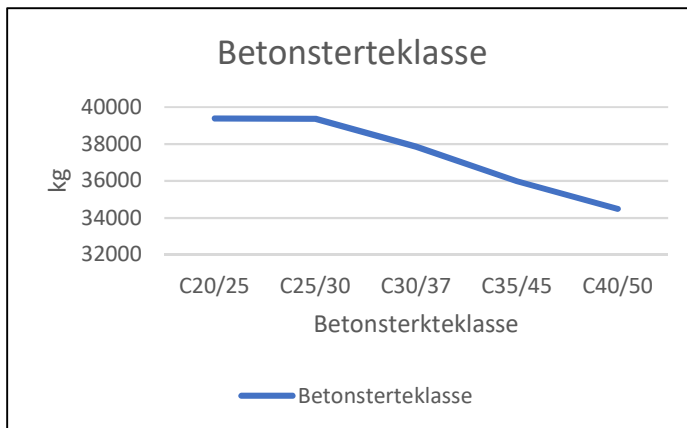
Als laatste wordt de invloed van de betonsterkteklasse onderzocht. De geometrie van de casus wordt aangehouden. Er worden betonsterkteklassen gekozen vanaf C20/25 t/m C40/50. De hoeveelheid wapening is weergegeven in tabel IV.3.

Tabel IV.3: Optimalisatie betonsterkteklasse

Betonsterkteklasse	kg wapening	kg/m ³
C20/25	39388	90,1
C25/30	39375	90,1
C30/37	37866	86,6
C35/45	35980	82,3
C40/50	34495	78,9

De hoeveelheid wapening loopt omlaag, naarmate een hogere betonsterkteklasse gekozen is. Dit is volledig volgens de gestelde hypothese. Echter is het verschil minder groot dan verwacht. Dit komt voornamelijk, omdat de constructie op sommige vlakken gewapend is volgens de minimale wapening. Een lagere betonsterkteklasse zorgt voor minder minimale wapening (f_{ctm} zit lineair in deze formule). Wanneer er een hogere betonsterkteklasse gekozen wordt, wordt er volstaan met minder wapening.

De waarden zijn in grafiek IV.4 overzichtelijk weergegeven.



Grafiek IV.4: Betonsterkteklasse

3. Conclusie en aanbevelingen totaalonderzoek

In dit onderzoek is onderzocht hoe het mogelijk is om een ontwerptool te ontwikkelen voor een parametrisch DO-berekening van een open tunnelbak. Het antwoord op deze hoofdvraag is gegeven door middel van een viertal onderzoeken. Onderzoek I bevat het vooronderzoek, onderzoek II het belastingsonderzoek, onderzoek III het berekenings- en onderzoek IV het optimalisatieonderzoek.

3.1 Conclusie

Uit het vooronderzoek is gebleken, dat de geometrische eigenschappen van een open tunnelbak uitermate geschikt zijn om te gebruiken voor parametrisaties. Na een intern bedrijfsonderzoek is vastgesteld dat de gebruikte software voor de parametrisatie zal bestaan uit SCIA Engineer en Microsoft Excel. Deze software is onderling gekoppeld door Dennis Schoenmakers, zodat het mogelijk is om een dynamische ontwerptool te creëren. Deze ontwerptool is parallel aan het onderzoek opgebouwd om met name het antwoord op de hoofdvraag te kunnen bewijzen.

Een belasting heeft als gevolg, krachtswerking op de tunnelbakconstructie. In deelonderzoek II is aandacht besteed aan het uitwerken van de mogelijke belastingen op de constructie én de bijbehorende combinaties. Doordat de belastingen in de ontwerptool zijn verwerkt en toegekend zijn aan het staafmodel waarmee SCIA Engineer werkt, zijn deze dynamisch geworden. Hiermee is gelijktijdig bewezen dat het mogelijk is om de belastingen te parametriseren.

In het berekeningsonderzoek is onderzoek gedaan naar de constructieve berekening van de constructievloer en de wanden in de ULS en de SLS. Ook is de opdrijving beschouwd. Deze berekeningen zijn allemaal combinaties van invoergegevens en formules, en lenen zich daarom voor parametrisaties.

Uit het optimalisatieonderzoek is gebleken dat het lastig is om vooraf verwachtingen te stellen aan een optimalisatie. Er zijn meerdere factoren afhankelijk van de hoeveelheid wapening. Ook blijkt dat een wapeningshoeveelheid in kg/m^3 weinig zegt over de hoeveelheid wapening in de constructie. Wel is met dit onderzoek de werking van de ontwerptool bewezen. De gehele constructieve berekening is in vijftien minuten uit te voeren. Ook is hierbij tijd voor het optimaal kiezen van de wapening.

De hoofdvraag is beantwoord door te stellen, dat het mogelijk is een DO-berekening van een open tunnelbak te parametriseren, door een ontwerptool te ontwikkelen. Dit door een berekeningsrapportage te ontwikkelen, ondersteund door de koppeling tussen Microsoft Excel en SCIA Engineer alsmede de uitvoering van grondige literatuurstudies.

3.2 Aanbevelingen

Daarnaast wordt er een aantal aanbevelingen gemaakt. Er kunnen verschillende verbeteringen aan de ontwerptool toegevoegd worden. Ook zijn in dit onderzoek alleen funderingen op staal beschouwd. Paalfunderingen zijn wenselijk als geen grondstabilisatie mogelijk is of als de grondwaterstand een fundering op staal niet toelaat. Voor deze situaties die niet zelden voorkomen, is het aanbevolen om dit toe te voegen in de ontwerptool. Ten slotte is een ongelijkmatige zetting na grondstabilisatie een probleem. Dit is ook toe te voegen in de tool.

Er is in dit onderzoek expliciet voor gekozen om voorspanning en ultrahogesterktebeton buiten beschouwing te laten, omdat dit andere methodes van berekenen met zich meebrengt. Een aanbeveling is om dit toe te voegen in de ontwerptool, daar voornamelijk voorspanning steeds vaker

gevraagd wordt. Doorsnedeverswakkingen, zoals kolken en dilatatievoegen, kunnen ook toegevoegd worden.

Ook de koppeling is nog niet volmaakt. Het is nog niet mogelijk om een SCIA Engineer rapportage als uitvoer weer te geven. Het opstellen van een rapportage kost veel tijd en het is mogelijk om een standaard bestand in de toekomst aan de koppeling te hangen, zodat deze tijd bespaard wordt. Buiten het feit dat een parametrisatie een efficiënte manier is om een berekening uit te voeren, levert het ook inzicht om kwaliteit te leveren. Ten slotte is het aan te raden, om de ontwikkelingen in de software te monitoren. Mogelijk kan de ontwerptool in de toekomst met minder tussenstappen werken.

Ook voor de toekomst zijn de voordelen voor deze ontwerptool aanwezig. De ontwerptool kan inspelen op de wereld van BIM, waardoor deze veelzijdiger wordt. Onder andere tekeningen en 3D-modellen kunnen hiermee gegenereerd worden.

4. Literatuur

- Breugel, K. v. (1996). *Betonconstructies onder Temperatuur- en Krimpvervormingen*. "s-Hertogenbosch: BetonPrisma.
- CROW. (2012). *ASVV 2012 - Aanbevelingen voor verkeersvoorzieningen binnen de bebouwde kom*. -: CROW.
- CROW. (2013, a). *CROW-publicatie 331: Handboek wegontwerp 2013 Regionale stroomwegen*. -: CROW.
- CROW. (2013, b). *CROW-publicatie 330: Handboek wegontwerp 2013 Gebiedsontsluitingswegen*. -: CROW.
- CROW. (2013, c). *CROW-publicatie 329: Handboek wegontwerp 2013 Erftoegangswegen*. -: CROW.
- CROW. (2013, d). *CROW-publicatie 328: Handboek wegontwerp 2013 Basiscireria*. Ede: CROW.
- Dura Vermeer. (2016, november maandag 14). *Dura Vermeer*. Opgehaald van Duravermeer.nl: <https://www.duravermeer.nl/nieuws/ongelijkvloerse-kruising-n276-met-dr-nolenslaan-geopend-door-dinky>
- Efko Beton. (2018, 03 02). *Efkobeton stootplaten*. Opgehaald van Efko Betonindustrie: <https://efkobeton.nl/infra/stootplaten/>
- Engineering. (2018, 02 9). Opgehaald van Matchad for Engineers: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/5236/Is-Mathcad-Right-for-Engineers.aspx>
- European Roads, N35 Salland-Twentetunnel. (2014, november 1). *flickr.com*. Opgehaald van flickr: <https://www.flickr.com/photos/chriszwolle/15495755048>
- Lean & Green NL. (n.d.). *lean-green.nl*. Opgehaald van Lean & Green NL: <http://www.lean-green.nl/over-lg/>
- NEN 9997-1. (2016). *Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1990+A1+A1/C2+NB. (2011). *Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1991-1-1+C1+NB. (2011). *Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen - Volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1991-1-5+C1+NB. (2011). *Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-5: Algemene belastingen - Thermische belasting*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1991-2+C1+NB. (2011). *Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1992-1-1+C2+NB. (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1992-2. (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Betonnen bruggen - Regels voor ontwerp, berekening en detaillering*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1992-3. (2006). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 3: Constructies voor keren en opslaan van stoffen*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- NEN-EN 1997-1. (2008). *Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp - Deel 1: Algemene regels*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- ProRail. (2013). *Ontwerpvoorschrift OVS00026: Profiel van Vrije Ruimte en ROde Meetgebied*. -: ProRail.
- ProRail. (2018, 02 05). Opgehaald van <https://www.eurekacup.nl/wp-content/uploads/2015/11/Opdracht-ProRail.pdf>
- PTC-Mathcad. (2018, 02 9). Opgehaald van PTC-Mathcad: <https://www.ptc.com/en/academic-program/products/ptc-mathcad>

Rijkswaterstaat. (2017). *Richtlijn Ontwerp Kunstwerken*. -: Rijkswaterstaat.

SCIA Engineer. (2018, 02 9). Opgehaald van Tips and trick over SCIA Engineer:

https://help.scia.net/17.1/en/tum/engineeringreport/tips_and_tricks.htm

staalbetonbruggen. (2018, 03 01). Opgehaald van TU Delft:

<http://mstudioblackboard.tudelft.nl/staalbetonbruggen/staalbetonbruggen5/hfdstuk5.htm>

Wikipedia. (2017, december 19). *People Planet Profit*. Opgehaald van Wikipedia.org:

https://nl.wikipedia.org/wiki/People_Planet_Profit

5. Bijlagenlijst

Bijlage A1 – Plan van Aanpak

Bijlage A2 – Planning

Bijlage A3 – Logboek afstudeeronderzoek

Bijlage A4 – Enquête tool tunnelbak

Bijlage A5 – Interview externe expert

Bijlage A6 - Taakverdeling

Bijlage B1 – Belastingsonderzoek

Bijlage B2 – Controle eigen gewicht

Bijlage C1 – Onderzoek spreiding veerkeerbelaasting

Bijlage C2 – Onderzoek spreiding veerkeerbelaasting – uitvoer SCIA Engineer

Bijlage D – Materiaaleigenschappen

Bijlage E – Berekeningsonderzoek

Bijlage F1 – Berekeningsrapportage

Bijlage F2 – SCIA Engineer berekeningsrapportage

Bijlage F3 – Handberekening 1 belastingsgeval

Bijlage G – Optimalisatie vloer

