

Parametrisch Ontwerpen van Duiker Constructies



Figuur 1: (Hunze en Aa's, 2020)

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

L.A. Tdlohreg
11 JANUARI 2024, PARAMARIBO

Afstudeer scriptie

Parametrisch Ontwerpen van Duiker constructies

Soort document: Bachelor scriptie

Naam: Len Tdlohreg

Opleiding: Civiele Techniek

Onderwijsinstelling: De Haagse Hogeschool

Versie: Definitief

Voorwoord

Met trots presenteer ik dit afstudeerrapport als vierdejaarsstudent aan de Haagse Hogeschool. Gedurende mijn derde studiejaar ontdekte ik mijn passie voor parametrisch ontwerpen binnen de civiele techniek tijdens een minor. Deze ontdekking vormde de basis voor mijn afstudeeronderzoek, uitgevoerd voor de Aannemingsmaatschappij Baitali N.V. (AMB N.V.), Suriname.

Dit rapport richt zich op het parametrisch ontwerpen van een duikerconstructie, een onderwerp dat me interesseerde vanwege het grote belang ervan bij het bestrijden van wateroverlast in Suriname. Het onderzoek vond plaats in dit prachtige land, waar ik niet alleen een waardevolle ervaring opdeed, maar ook genoot van de gastvrijheid van het bedrijf.

Ik wil graag mijn dank uitspreken aan Milad Elias en Shayer Nijman voor hun waardevolle steun bij de mechanische berekeningen. Speciale waardering gaat uit naar Dayenne Tjon-A-San voor haar begeleiding bij het opstellen van mijn onderzoek en het verloop van mijn stage. Mijn dank gaat ook uit naar mijn schoolbegeleiders in Nederland, die me gedurende dit proces hebben bijgestaan met waardevolle tips en feedback.

Dit afstudeerproject markeert het begin van mijn verdere ontwikkeling in het parametrisch ontwerpen, en ik hoop dat dit rapport niet alleen mijn eigen skills in deze discipline uitbreidt, maar ook van waarde is voor AMB N.V.. Ik ben dankbaar voor deze kans en kijk uit naar de verdere stappen in mijn professionele reis.

Len Tdlohreg

Samenvatting

Dit onderzoek beoogt aannemingsmaatschappij Baitali N.V. te ondersteunen bij het optimaliseren van duikerontwerpprocessen door over te stappen op parametrisch ontwerpen, wat een efficiënter proces mogelijk maakt door verschillende duikertypes te beoordelen aan de hand van diverse criteria. Met als hoofdvraag: “Hoe kan een duiker parametrisch ontworpen worden met optimalisatie via een kostenanalyse)?”.

Binnen het kader van parametrisch ontwerpen worden specifieke projectgrenzen vastgesteld, zoals het niet meenemen van debietsberekening, wegfunderingsberekening en duikerfunderingsberekening vanwege projectspecifieke factoren en tijdslimieten. Echter worden ze wel opgenomen als invulparameter vanwege de invloed op de berekening.

De datacollectie omvat hoofdzakelijk deskresearch voor het verkrijgen van diverse rekenmethodes en benodigde gegevens voor het Dynamo-script. Verder is er fieldresearch voor inzicht in praktische werkzaamheden en uitvoeringstijden. Wetenschappelijke artikelen van ingenieursbureaus, leveranciers en universiteiten zijn gebruikt als bronnen zonder specifieke beperkingen op publicatiejaar, met voorkeur voor recente werken.

De beperkte literatuur over duikerberekeningen in de grond leidde tot overleg met praktijkervaren ingenieurs voor validatie. Het script wordt zelf gevalideerd via verificatie in Excel. Het schrijven van het script was een leerzaam proces, waarbij de complexiteit toenam in latere stadia vanwege het leerproces van coderen.

In het onderzoek naar het parametrisch ontwerpen van duikers komt de essentiële informatie naar voren die nodig is voor dit ontwerpproces. Hierbij ligt de focus op het begrip van rekenmethodes voor grondbelasting, verkeersbelasting en de toetsing van verschillende duikertypen. Het onderzoek benadrukt de cruciale rol van de concentratiefactor bij het bepalen van de belasting en bespreekt diverse toetsmethodes die afhankelijk zijn van het type duiker en de eigenschappen van het gebruikte materiaal.

Vervolgens wordt de aandacht gericht op de ontwikkeling van het script voor optimale duikerontwerpen. De geïdentificeerde rekenmethodes worden omgezet naar parameters via een Excel-sheet, dat fungeert als invulschema. Deze parameters worden vervolgens opgehaald door het Dynamo-script. Het script voert berekeningen uit voor belasting, toetst diameters op debiet en voldoet aan constructieve eisen.

De integratie van kostenanalyse in het script vormt een volgend belangrijk aspect. De kostenanalyse voor optimale ontwerpen vereist evaluatiecriteria zoals de MKI-score en een vergelijking van materiaalkosten. De benodigde data voor deze evaluatiecriteria wordt ingevuld in het Excel-sheet. De duikerontwerpen die aan constructieve eisen voldoen, worden onderling vergeleken op basis van kosten, wat resulteert in de identificatie van het beste ontwerp, waarmee de hoofdvraag beantwoord is.

In de discussie wordt behandeld dat toekomstige publicaties verbeterde rekenmethodes kunnen presenteren, wat ontwerpkeuzes kan beïnvloeden. Ook het leverancierscontact stuitte op moeilijkheden, wat de betrouwbaarheid van het ontwerp kan beïnvloeden. Verder is de complexiteit van kostenanalyse afhankelijk van omgevingsfactoren, waardoor het opstellen van een parametrisch script zonder specifieke casus complex is en praktijkkennis vereist. Het wordt verder aanbevolen om het script uit te breiden door de discussiepunten op te lossen en onderdelen toe te voegen die momenteel zijn uitgesloten door de projectgrenzen

Terminologie

Begrip	Definitie
As-last	As-last is het maximale gewicht dat wordt gedragen door een as met twee wielen.
Belastingshoek	De hoek die de bovenbelasting maakt met de duiker
Concentratie factor	Een factor voor de grondbelasting die rekening houdt met de stijfheidsverschillen tussen de duiker, grondlagen en fundering.
Debiet	Debiet verwijst naar de hoeveelheid water die per tijdseenheid door een duiker stroomt.
Deformatie	Deformatie verwijst naar de mate van vervorming in de vorm van een duiker onder invloed van belastingen.
Duiker	Een duiker is een civiele techniekstructuur die wordt gebruikt om water of verkeer onder een obstakel, zoals een weg, door te leiden.
Dynamo	Dynamo verwijst naar een visual scripting-omgeving die wordt gebruikt voor automatisering en parametrisch ontwerpen, vaak toegepast in architectuur en bouwkunde, met name in combinatie met software zoals Autodesk Revit.
Grenstoestand	Grenstoestand: Specifieke situatie waarin een structuur net voldoet aan acceptatiecriteria, zoals maximale belasting of vervorming.
Liggertoetsing	Een beoordeling waarbij de duiker wordt behandeld als een ligger ondersteund door twee steunpunten.
MKI	MKI staat voor Milieukosten Indicator, een maatstaf die de milieukosten van een bouwproject in geld uitdrukt, waardoor duurzame keuzes op basis van economische en milieucriteria mogelijk zijn.
NMD	NMD: Nationale Milieudatabase, een Nederlandse bron met milieudata voor duurzaamheidsbeoordeling van bouwmaterialen.
Puntlast	Een kracht die wordt toegepast op een specifiek punt op een structuur of constructie, in tegenstelling tot gelijkmatig verdeelde belastingen over een oppervlak.
q-last	Gelijkmatig verdeelde belasting: is een kracht of gewicht dat gelijkmatig over een bepaald oppervlak of lengte is verdeeld, in tegenstelling tot een puntlast.
Rekenmethodes	Specifieke wiskundige methoden of berekeningen die worden toegepast om de technische aspecten van de duikerconstructie te analyseren, zoals verkeersbelasting, geotechniek en mechanische berekeningen.
Ring toetsing	Beoordeling waarbij de duiker wordt geëvalueerd op basis van de dwarsdoorsnede.
Script	Een script is een reeks instructies of opdrachten geschreven in een programmeertaal. Het wordt gebruikt om een computerprogramma te maken of automatische taken uit te voeren binnen software, zoals het Dynamo-script in parametrisch ontwerpen.
Steunhoek	De hoek die de duiker maakt met de grond aan de zijkant en die een ondersteunende functie heeft bij de vervorming van de duiker.
Validatie stap	Een fase in het ontwerpproces waarin de resultaten van het Dynamo-script worden gecontroleerd en gevalideerd in Excel om ervoor te zorgen dat ze overeenkomen met verwachte uitkomsten.
Rekenmethodes	Specifieke wiskundige methoden of berekeningen die worden toegepast om de technische aspecten van de duikerconstructie te analyseren, zoals verkeersbelasting, geotechniek en mechanische berekeningen.

Inhoud

Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
Terminologie	4
Figuren- en tabellenlijst.....	10
1. Inleiding	12
1.1. Aanleiding.....	12
1.2. Probleemstelling.....	12
1.3. Doelstelling.....	13
1.4. Onderzoeksvragen.....	13
2. Projectgrenzen	14
3. Methodologie	16
4. Literatuuronderzoek.....	17
4.1. Duikers.....	17
4.1.1. Algemeen.....	17
4.1.2. Termen	17
4.2. Materiaal Duikers	19
4.2.1. Flexibel of Rigide.....	19
4.2.2. Beton	20
4.2.3. Staal	21
4.2.4. PVC.....	21
4.2.5. HDPE	21
4.3. Debiet berekening	22
4.4. Grondbelasting	23
4.4.2. Concentratiefactor	25
4.4.3. Toepassing	25
4.5. Verkeersbelasting.....	26
4.5.1. Type weg.....	26
4.5.2. Belasting spreiding	27
4.5.3. Concentratie factor	28
4.6. Toetsingen	29
4.6.1. Ringtoetsing.....	29
4.6.2. Liggertoetsing	33
5. Kostenanalyse.....	35
5.1. Criteria.....	35
5.1.1. Weegfactor	35

5.1.2.	Toepassing.....	36
5.2.	MKI	37
5.2.1.	Calculatiemethode	37
5.3.	Constructie kostenvergelijking	39
5.3.1.	Algemeen.....	39
5.3.2.	Materiaalkosten	39
5.3.3.	Uitvoering en Transportkosten	40
5.3.4.	Toepassing.....	41
6.	Optimalisatie	42
6.1.	ontwerpkeuzes	42
6.2.	Optimalisatiestappen	43
7.	Resultaten.....	44
7.1.	Handleiding.....	44
7.1.1.	Stroomschema.....	44
7.1.2.	Stappenplan.....	45
7.2.	Verificatie	50
7.2.1.	Constructieve eisen	50
7.2.2.	Optimale ontwerp	50
7.3.	Praktische toepasbaarheid	51
8.	Conclusie	52
9.	Discussie	53
10.	Aanbeveling	54
11.	Bronnenlijst	55
12.	Bijlage I: Debiet berekening	58
12.1.	Debiet berekening	59
12.1.1.	Chezy	59
12.1.2.	Manning/Strickler.....	60
12.1.3.	Toepassing.....	61
13.	Bijlage II: Grondberekening.....	62
13.1.	Methode 1	63
13.2.	Methode 2	70
13.3.	Methode 3: Installatie type	75
14.	Bijlage III: Verkeersbelasting	78
15.1.	Type weg.....	79
15.1.1.	Voertuigen.....	79
15.2.	Belasting spreiding	81

15.3.	Concentratie factor	83
15.3.1.	Methode 1	83
16.	Bijlage IV: Toetsingen	87
16.1.	Ringtoetsing.....	88
16.1.1.	Stijve duiker	88
16.1.2.	Flexibele duiker	98
16.2.	Liggertoetsing	105
16.2.1.	Liggerbelasting.....	105
16.2.2.	Belastingsfactoren	105
16.2.3.	Belastingen	106
16.2.4.	Wegindeling.....	107
16.2.5.	Betonnen duikers	110
16.2.6.	Flexibele duikers.....	115
17.	Bijlage V: MKI.....	119
17.1.	MKI	120
17.1.1.	milieueffecten	120
17.1.2.	Levenscyclus	121
17.1.3.	Weegfactoren.....	123
17.1.4.	Calculatiemethode	124
17.1.5.	Beton ongewapend	126
17.1.6.	Beton gewapend	130
17.1.7.	Staal	134
17.1.8.	PVC.....	138
17.1.9.	HDPE	142
18.	Bijlage VI: Dynamo-script handleiding	146
18.1.	Dynamo uitleg	147
18.2.	Uitleg handleiding	148
18.3.	Deel 2.....	149
18.3.1.	Debiet berekening	149
18.4.	Deel 3.....	149
18.4.1.	Grondlaag situaties.....	149
18.4.2.	Permanente belasting	149
18.4.3.	Belasting waterstand.....	149
18.4.4.	Verkeersbelasting pv boven	149
18.4.5.	Verkeersbelasting pv onder.....	150
18.5.	Deel 4.....	150

18.5.1.	Berekende gegevens	150
18.5.2.	q grondbelasting.....	150
18.5.3.	q verkeer.....	150
18.6.	q ligger	151
18.7.	Deel 5 Beton ongewapend	151
18.7.1.	Dwarskracht.....	151
18.7.2.	Buiging	151
18.7.3.	Toetsing ongewapend	151
18.8.	Deel 5 Beton gewapend	152
18.8.1.	Dwarskracht.....	152
18.8.2.	Buiging	152
18.8.3.	Toetsing gewapend I	152
18.8.4.	Toetsing gewapend II buigend moment.....	153
18.8.5.	Toetsing gewapend II Dwarskracht	153
18.8.6.	Toetsing gewapend II Radiale trek	154
18.9.	Deel 5 HDPE & PVC.....	154
18.9.1.	Ringdeflectie	154
18.9.2.	Dwarskracht.....	154
18.9.3.	Buiging	154
18.10.	Deel 5 Staal.....	155
18.10.1.	Interne krachten.....	155
18.10.2.	Dwarskracht.....	155
18.10.3.	Buiging	155
18.11.	Deel 6.....	156
18.11.1.	Hoeveelheden kosten.....	156
18.11.2.	Kosten berekenen	156
18.11.3.	Hoeveelheden MKI	156
18.11.4.	MKI berekenen	156
18.11.5.	kostenanalyse lijst opstellen	157
18.11.6.	kostenanalyse optimaal ontwerp filteren	157
19.	Bijlage VII: Reflectie verslag.....	158
19.1.	Competenties	159
19.1.1.	Onderzoeken	159
19.1.2.	Ontwerpen	159
19.1.3.	Realiseren	160
19.2.	Zwakke punten	160

19.3.	Sterke punten	160
19.4.	Wat heb ik geleerd over mijzelf.....	161
20.	Bijlage VIII: Werkplan	162
20.1.	De opdracht.....	163
20.1.1.	Script 1-Rigide of flexibel.....	163
20.1.2.	Script 2-Flexibel duikers	163
20.1.3.	Script 3-Rigide duikers.....	163
20.1.4.	MCA	163
20.2.	Producten tabel	164
20.3.	Competenties	164
20.3.1.	Onderzoeken	164
20.3.2.	Ontwerpen	165
20.3.3.	Realiseren	165
20.4.	Project grens.....	166
20.5.	Haalbaarheid	166
20.6.	Communicatie	166
20.7.	Planning	167
20.7.1.	Planning toelichting.....	168

Figuren- en tabellenlijst

Figurenlijst

Figuur 1: (Hunze en Aa's, 2020).....	0
Figuur 2: Termen Duikerconstructie (Pipe Bedding and Backfill. 1996).....	18
Figuur 3 Flexibele duiker (Wavin. 2017).....	19
Figuur 4 stijve duiker (Wavin. 2017).....	20
Figuur 5 stijfheidsverhoudingen (VPB 1999).....	24
Figuur 6 Horizontale steundruk (Pipe Bedding and Backfill. 1996).....	24
Figuur 7: Maatgevende breedte (Oranjewoud 2012)	27
Figuur 9 Duiker	27
Figuur 8 Tunnel.....	27
Figuur 10 de formule van Boussinesq (VPB 1999)	28
Figuur 11 maatgevende punten (VPB 1999)	29
Figuur 12 aanbevelingen flexibele duikers (Wavin. 2017)	31
Figuur 13 belasting en ondersteuningshoeken (Sigma, 2016)	32
Figuur 14 schematisering puntlast	34
Figuur 15 weegfactoren (NMD 2020).....	38
Figuur 16 stroomschema Dynamo	44
Figuur 17 Dynamo instructie: Run.....	46
Figuur 18 Dynamo instructie: foutmelding	47
Figuur 19 Dynamo instructie: Browse	47
Figuur 20 Dynamo resultaten in Excel.....	49
Figuur 21 situatie methode 1 (VPB, 1999)	63
Figuur 22 indrukking van duiker buis (VPB, 1999)	66
Figuur 23 opleghoek bepalen (VPB, 1999)	66
Figuur 24 grondsituatie (VPB, 1999).....	67
Figuur 25 verhoudingsfactor (VPB, 1999)	67
Figuur 26 krachten werking (VPB, 1999).....	69
Figuur 27 krachtenwerking (ISO 2785, 1986).....	74
Figuur 28 krachten werking (Pipe Bedding and Backfill, 1996).....	77
Figuur 29 verkeersklasse (VPB 1999)	80
Figuur 30 Maatgevende breedte (Oranjewoud 2012)	81
Figuur 31 Tunnel.....	82
Figuur 32 Duiker	82
Figuur 33 formule van Boussinesq (VPB 1999)	82
Figuur 34 situatie methode 1 (VPB, 1999)	83
Figuur 35 krachten wrking (VPB, 1999).....	86
Figuur 36 lijn betekenis (Wavin. 2017).....	98
Figuur 37 aanvulgroep A (Wavin. 2017)	98
Figuur 38 Aanvulgroep B (Wavin. 2017).....	99
Figuur 39 Aanvulgroep C (Wavin. 2017).....	99
Figuur 40 aanbevelingen flexibele duikers (Wavin. 2017)	100
Figuur 41 belasting en ondersteuningshoeken (Sigma, 2016)	102
Figuur 42 wateropervalkte (Oranjewoud 2012).....	107
Figuur 43 tandem-as (Oranjewoud 2012).....	107

Figuur 44 1 puntlast.....	108
Figuur 45 2 puntlasten	108
Figuur 46 3 puntlasten	108
Figuur 47 elasticiteitsmodulus (Beton tabellen. 2014)	112
Figuur 48 Hartsuijker, C. (2010).....	115
Figuur 49 levenscyclus (NMD, 2020)	122
Figuur 50 weegfactoren (NMD 2020).....	123
Figuur 51 stroomschema.....	148
Figuur 52 dynamo handleiding uitleg.....	148

Tabellenlijst

Tabel 1 rekenmethodes.....	25
Tabel 2 verkeersklassen	26
Tabel 3 rekenmethode verkeersbelasting.....	28
Tabel 4 grenstoestand	30
Tabel 6 belastingsgeval	33
Tabel 7 MKI database	38
Tabel 8 Instructies Excel-sheet	45
Tabel 9 coëfficiënt van Manning (km).....	60
Tabel 10 grondsoort groep (VPB, 1999)	64
Tabel 11 grenstoestand.....	64
Tabel 12 grondsoort groep met K2	65
Tabel 13 invloedsgetallen (VPB, 1999)	65
Tabel 14 grondsoort groep met K2	71
Tabel 15 grondsoort groep met inwendige wrijvingshoek	73
Tabel 16 eenheidsverticale factoren	75
Tabel 17 Installatietype (Pipe Bedding and Backfill, 1996).	76
Tabel 18 NEN-EN 1991-2 Verkeersbelasting op bruggen.....	79
Tabel 19 as-last meting Baitali.....	80
Tabel 20 invloedsgetallen (VPB, 1999)	89
Tabel 21 invloedsgetallen (VPB, 1999)	90
Tabel 22 invloedsgetallen (VPB, 1999)	90
Tabel 23 veiligheidsklasse (VPB, 1999).....	91
Tabel 24 belastingsfactor (VPB, 1999).....	91
Tabel 25 scheurwijdte (Beton tabellen. 2014)	93
Tabel 26 belastingsfactor (VPB, 1999).....	94
Tabel 27 grondsoort met constante buisman	101
Tabel 28 coëfficiënten (Sigma, 2016)	103
Tabel 29 coëfficiënten voor opensleuf methode	103
Tabel 30 belastingsfactoren	105
Tabel 31 MKI database	125

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Wateroverlast vormt een aanzienlijk probleem in Suriname, en het effectief aanpakken van dit probleem begint met een doeltreffende afvoer van water. Duikers spelen een essentiële rol bij het reguleren van de aan- en afvoer van water en worden daarom veelvuldig aangelegd in Suriname om watergangen te verbinden. Hoewel het ontwerpen van een duiker op zichzelf relatief eenvoudig is, vereist elke nieuwe situatie dezelfde soort berekeningen, wat resulteert in herhaaldelijk werk dat efficiënter zou kunnen verlopen.

Een mogelijke oplossing voor dit herhaaldelijke werk is het toepassen van parametrisch ontwerpen voor duikers. Parametrisch ontwerpen is een digitaal ontwerpproces waarbij de relaties tussen verschillende onderdelen in het ontwerp worden vastgelegd in een algoritme. Door variaties aan te brengen in de inputwaarden, oftewel de parameters, kunnen op een snelle wijze diverse ontwerpalternatieven worden gegenereerd. Zoals beschreven door Rick Titulaer (2021):

"Parametrisch ontwerpen is een digitaal ontwerpproces waarbij relaties tussen verschillende onderdelen in het ontwerp in een algoritme worden vastgelegd. Door de inputwaardes – de parameters – te variëren, kunnen in razend tempo verschillende ontwerpalternatieven worden gegenereerd."

De implementatie van parametrisch ontwerpen biedt niet alleen de mogelijkheid om ontwerpen snel te genereren, maar maakt ook optimalisatie van de ontwerpen mogelijk door de berekeningen in een iteratief proces uit te voeren. Hoewel parametrisch werken relatief nieuw is, kan het een efficiënte en moderne aanpak vormen, ook voor bedrijven als Baitali Group in Paramaribo, die mogelijk nog niet volledig bekend zijn met deze methodologie. Het introduceren van parametrisch ontwerpen voor duikers zou niet alleen een stap vooruit zijn in het bijblijven met de tijd, maar zou ook dienen als een effectieve oplossing voor het stroomlijnen van herhaaldelijk werk.

1.2. Probleemstelling

Het opstellen van een effectief parametrisch script is een uitdagende taak, gezien de noodzaak om rekening te houden met tal van parameters. Bovendien bestaan er verschillende methoden voor het ontwerpen van duikers. Om het script goed te laten functioneren, vereist dit een uitgebreide verzameling van gegevens, die als basis dienen voor het ontwikkelen van een algoritme dat in staat is een duiker te ontwerpen.

Niettemin volstaat het eenvoudigweg creëren van een duikerontwerp niet. Het ontwerp moet worden geëvalueerd aan de hand van vastgestelde criteria, zodat het meest geschikte en geoptimaliseerde ontwerp naar voren komt. Het kernprobleem in dit onderzoek ligt dus in de transformatie van alle verzamelde data en literatuur naar bruikbare informatie. Hiermee kan vervolgens, via een script in een softwareprogramma, het beste ontwerp worden gegenereerd en geoptimaliseerd.

1.3. Doelstelling

Het doel is om een doeltreffende synthese te bereiken tussen de uitgebreide hoeveelheid beschikbare informatie en het vermogen van het script om een geoptimaliseerd ontwerp voort te brengen.

Om aannemingsmaatschappij Baitali te ondersteunen bij het optimaliseren van het ontwerpproces van duikers door over te stappen op een parametrische ontwerpaanpak. Hierbij worden diverse typen duikers beoordeeld aan de hand van verschillende criteria, wat bijdraagt aan een efficiënter ontwerpproces.

Na zorgvuldig overleg heeft AMB N.V. opdracht gegeven voor de ontwikkeling van een gestandaardiseerde rekenmethode in Microsoft Excel. Vervolgens moet deze rekenmethode worden geïmplementeerd als een Dynamo-tool, waarmee het mogelijk is om een duiker op parametrische wijze te ontwerpen.

1.4. Onderzoeksvragen

Hoofdvraag:

Hoe kan een duiker parametrisch ontworpen worden met optimalisatie via een kostenanalyse?

Deelvragen:

1. Welke informatie is essentieel voor het parametrisch ontwerpen van een duiker?
2. Hoe kan een script worden ontwikkeld dat alle beschikbare data en literatuur over duikers omzet in bruikbare informatie voor een softwareprogramma, met als doel het genereren van het optimale duikerontwerp?
3. Op welke manier kan een kostenanalyse worden geïntegreerd in het script, waardoor diverse typen duikers onderling kunnen worden vergeleken en het ontwerp volgens vooraf bepaalde criteria kan worden geoptimaliseerd

2. Projectgrenzen

In het kader van het parametrisch ontwerpen van een duiker zijn projectgrenzen cruciaal om de scope en de variabelen van het ontwerp af te bakenen. Hier volgt een uitleg van de projectgrenzen voor de specifieke punten:

Debietsberekening:

Bij een debietsberekening in het geval van een duikerconstructie zijn neerslag, groenvoorzieningen en andere watergangen relevante parameters. Neerslag bepaalt bijvoorbeeld de hoeveelheid water die naar het duikerstelsel stroomt, groenvoorzieningen kunnen van invloed zijn op de infiltratie en afvoer, en andere watergangen kunnen het debiet beïnvloeden dat naar de duiker wordt geleid. Het exacte gewicht van elke parameter kan variëren afhankelijk van de specifieke kenmerken en eisen van het waterbeheerprobleem dat wordt aangepakt. Vanwege de specifieke projectkenmerken is het moeilijk om met standaardparameters het debiet nauwkeurig te bepalen. Het debiet moet daarom handmatig worden berekend en als parameter worden ingevuld. Hoewel dit expertise in waterbeheer vereist, heeft deze aanpak geen directe invloed op de praktische toepassing van het parametrische ontwerp.

Wegfunderingsberekening:

Elk wegproject heeft unieke kenmerken en vereisten, waardoor wegfunderingsberekeningen net als het debiet, worden afgestemd op de specifieke omstandigheden van dat project. Het ontwerp en de berekening zijn namelijk afhankelijk van verschillende factoren, zoals het verwachte verkeer, de klimatologische omstandigheden, en de specifieke eisen en normen die gelden voor het betreffende project. De rol die de wegfundering speelt bij het ontwerpen van de duikerconstructie is simpelweg de blijvende belasting. De berekening van de fundering wordt daarom wegens tijdsgebrek afgebakend in dit onderzoek. De belasting die de asfaltering en wegfundering leveren, worden meegenomen door de fundering te beschouwen als een van de grondlagen.

Rijstroken:

Het aantal rijstroken is beperkt tot drie in dit onderzoek. Hoewel het script relatief eenvoudig kan worden uitgebreid, is er bewust gekozen om de grens op drie te leggen, omdat in Suriname vrijwel geen wegen met meer rijstroken voorkomen. In uitzonderlijke gevallen met meer rijstroken kan overwogen worden om de puntlasten bij elkaar op te tellen, om zo een vergelijkbaar moment en dwarskracht te simuleren. Deze aanpak vereist echter specialistische kennis op het gebied van mechanica. Uiteindelijk beïnvloedt de afbakening alleen de momenten en dwarskrachten die worden getoetst, waarbij tot drie rijstroken de mechanische krachten door het script worden berekend.

Aanlegtechniek:

Een ander belangrijke projectgrens betreft de aanlegtechniek, waarbij expliciet wordt gekozen voor de opensleufmethode. Deze methode houdt in dat een sleuf wordt gegraven voor het plaatsen van de duikerconstructie. De opensleufmethode wordt, over het algemeen en ook bij AMB N.V., vaak verkozen bij het ontwerpen van duikerconstructies vanwege de brede bekendheid en toegankelijkheid, kostenefficiëntie, toepasbaarheid in diverse bodemtypen en potentieel snellere bouwplanning en uitvoering in vergelijking met alternatieve methoden.

Afwijken van deze aanlegtechniek kan leiden tot verschillende niveaus van bodemvervorming rondom de duiker. Dit kan van invloed zijn op de grondreacties en -krachten die de duiker tijdens en na de aanlegfase ondervindt, wat belangrijk is voor stabiliteits- en draagkrachtberekeningen. Het script is hier niet voor gemaakt.

Duikerfunderingsberekening:

De fundering van de duikerconstructie wordt niet uitgebreid behandeld in dit onderzoek vanwege tijdsbeperkingen. Niettemin is de fundering van cruciaal belang bij het nemen van ontwerpbeslissingen voor het bepalen van een optimaal ontwerp. Verschillende duikertypes kunnen variëren in funderingsmethodes, wat invloed heeft op de criteria voor het bepalen van de optimale duiker. Vanwege tijdsgebrek wordt de impact van de funderingsberekening meegenomen als invoerparameter. De gevolgen van deze keuze voor de praktische toepasbaarheid van het script worden verder toegelicht in hoofdstuk 7.3.

3. Methodologie

Soort onderzoek:

Dit mixed-methods onderzoek omvat zowel kwantitatieve als kwalitatieve aspecten. De resultaten worden weergegeven in zowel cijfers als woorden via een Dynamo-script, voorzien van een handleiding, en een Excel-sheet die fungeert als validatiestap.

Dataverzameling:

De datacollectiemethoden bestaan voornamelijk uit deskresearch, waarbij onderzoek wordt gedaan naar diverse rekenmethodes en benodigde gegevens voor het Dynamo-script. Daarnaast is er fieldresearch uitgevoerd om inzicht te krijgen in de praktische werkzaamheden en uitvoeringstijd.

Voor het verzamelen van literatuur en data zijn wetenschappelijke artikelen geraadpleegd, afkomstig van ingenieurbureaus, leveranciers en universiteiten. Geen specifieke beperking is gesteld aan het publicatiejaar van de artikelen, hoewel er de voorkeur is gegeven aan recent gepubliceerde werken, rekening houdend met de empirisch bepaalde resultaten uit sommige onderzoeken.

Onderzoeksverloop:

Er is beperkte literatuur beschikbaar over de berekeningen van duikers in de grond, en de gevonden rekenmethodes variëren sterk. Tijdens het onderzoek is veelvuldig overlegd met praktijkervaren ingenieurs om de rekenmethodes en resultaten te valideren. Bovendien wordt de validatie van het script zelf uitgevoerd door middel van verificatie in Excel.

Het proces van het schrijven van het script was leerzaam. De eerste delen van de code zijn wat eenvoudiger dan de latere stukken, aangezien het schrijven van code zelf een leerproces is.

Onderzoeksopzet:

- Literatuur onderzoek: Een analyse van bestaande wetenschappelijke artikelen, rapporten en studies met betrekking tot parametrisch ontwerpen van duikers.
- Rekenmethodes vaststellen: Identificatie en evaluatie van diverse rekenmethodes die relevant zijn voor het ontwerp van duikers, gebaseerd op beschikbare literatuur en deskresearch.
- Parameters definiëren: Het precies vaststellen van de variabelen en factoren die invloed hebben op het ontwerp van de duiker.
- Excel stroomschema/validatie stap opstellen: Ontwikkeling van een stroomschema in Excel als leidraad voor het Dynamo-script en om de uitkomsten te valideren.
- MKI impact vaststellen: Evaluatie van de milieubelasting (MKI) van verschillende ontwerpalternatieven om duurzame keuzes te bevorderen.
- Kosten identificeren: Identificatie en analyse van de kostenfactoren, met nadruk op materiaalkosten en andere relevante uitvoeringskosten.
- Dynamo-script opstellen: Creatie van een parametrisch ontwerpscript in Dynamo, gebaseerd op de vastgestelde parameters en rekenmethodes.
- Resultaten valideren: Verificatie en validatie van de verkregen resultaten via vergelijking met Excel, praktijkervaring en mogelijke aanpassingen in het Dynamo-script.

4. Literatuuronderzoek

In dit hoofdstuk wordt een algemene beschrijving gegeven van de functie van een duiker, samen met relevante termen. Daarna worden de onderzochte rekenmethoden besproken, waaronder debietsberekeningen, belastingsberekeningen van de grondlagen en verkeer, evenals verschillende constructieve toetsingen. Vervolgens wordt de totstandkoming van de Milieu Kosten Indicator (MKI) en kosten uitgelegd.

4.1. Duikers

Deze paragraaf biedt een uiteenzetting van de betekenis en functie van een duiker. Bovendien worden enkele relevante termen met betrekking tot duikerconstructies toegelicht, aangezien deze terminologie later in het rapport zal worden gehanteerd.

4.1.1. Algemeen

Een duiker wordt beschouwd als een civieltechnisch bouwwerk dat gebruikt wordt om waterwegen met elkaar te verbinden. Het heeft de vorm van een buisconstructie en bevindt zich gewoonlijk onder een weg of toegangsdam. Daarnaast kan een duiker worden geïnstalleerd op plaatsen waar een waterloop een andere watergang doorkruist. Een duiker onderbreekt de bodem van de waterloop, wat het onderscheidt van een brug of aquaduct.

Duikers kunnen gemaakt zijn van verschillende materialen, waaronder beton, metaal, kunststof of een combinatie daarvan. De materiaalkeuze hangt af van factoren zoals de verwachte belasting, de omgevingsomstandigheden en de beschikbaarheid van materialen.

Verder kunnen duikers verschillende vormen hebben, zoals ronde, ovale of rechthoekige doorsneden. De afmetingen variëren afhankelijk van de vereiste doorstroomcapaciteit, de breedte van de watergang en andere ontwerpoverwegingen.

Duikers worden gebruikt voor verschillende doeleinden, zoals het onderhouden van een constante waterstroom tussen waterwegen, het reguleren van waterpeilen, het verminderen van overstromingsrisico's en het mogelijk maken van de doorgang van voertuigen of voetgangers over waterwegen.

4.1.2. Termen

Sleuf

De sleuf is de opening of geul in de grond waarin de duiker wordt geplaatst. De sleuf is essentieel voor het creëren van ruimte waarin de duiker op de juiste diepte en positie wordt geplaatst, waardoor het water op een gecontroleerde manier kan passeren. Het graven van de sleuf is een belangrijk onderdeel van het installatieproces om ervoor te zorgen dat de grondlagen erboven op de juiste hoogte aangevuld kunnen worden.

Fundering

De fundering is het onderliggende materiaal waarop de leiding wordt geplaatst. Als de fundering ongeschikt is, moet deze worden verwijderd en vervangen door geschikt materiaal. Dit kan een paal fundering of een fundering op staal zijn.

Bedding

Het materiaal voor de bedding wordt in de sleufbodem geplaatst als ondergrond voor de gelegde leiding. Zowel voor stijve als flexibele leidingen betreft het een niet-verdichte laag van zorgvuldig gekozen materiaal. Deze onverdichte laag van geselecteerd materiaal wordt bovenop de ondergrond of vervangen ondergrond aangebracht. De dikte van deze laag hangt af van de diameter van de leiding.

Insluiting

De insluiting is het materiaal dat wordt aangebracht om de belasting op de leiding te dragen. In het geval van stijve leidingen draagt de insluiting bij aan het gelijkmatig verdelen van de belasting over de fundering. Bij flexibele leidingen biedt de insluiting weerstand tegen doorbuiging als gevolg van de belasting.

Backfill

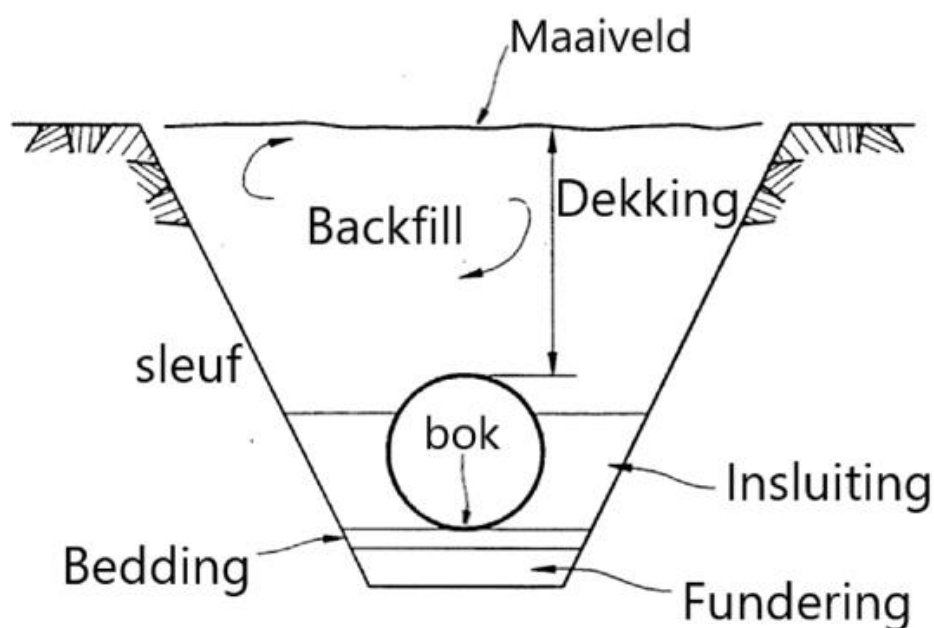
De backfill is het materiaal dat wordt gebruikt om de sleuf opnieuw te vullen nadat de leiding en de insluiting zijn geplaatst.

Dekking

De dekking is de diepte van de backfill over de bovenkant van de leiding tot maaiveld.

Bok

De bok is de inwendige onderkant van de duiker en moet op dezelfde hoogte zitten als de onderkant van de watergang.



Figuur 2: Termen Duikerconstructie (Pipe Bedding and Backfill, 1996)

4.2. Materiaal Duikers

In deze paragraaf wordt het onderscheid tussen flexibele en rigide duikers belicht. Daarnaast worden de diverse materialen die in deze scriptie worden behandeld, geïntroduceerd en worden de eigenschappen van deze materialen toegelicht.

4.2.1. Flexibel of Rigide

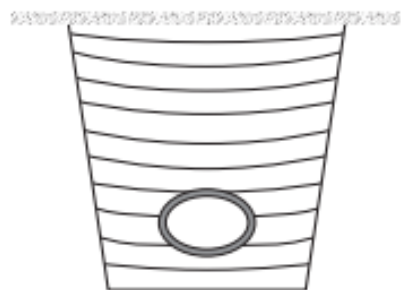
Afhankelijk van het gebruikte materiaal kunnen duikers zowel flexibel als rigide zijn. Beide types hebben hun eigen voor- en nadelen, en vertonen verschillen in zowel uitvoering als constructieve toetsingen. De voor- en nadelen van de materialen worden in de paragrafen hieronder besproken. Dit zijn ook de materialen die door AMB in de praktijk worden toegepast en hierom worden meegenomen in het script

4.2.1.1. Flexibele duikers

Flexibele duikers zijn buisvormige structuren die zijn ontworpen om enige mate van flexibiliteit te bieden, in tegenstelling tot meer rigide duikermaterialen zoals beton en soms staal, of zelfs bepaalde soorten kunststoffen. Flexibele duikers worden vaak gemaakt van materialen zoals High-Density Polyethylene (HDPE), polyvinylchloride (PVC) of andere kunststoffen die inherent flexibel zijn.

Het belangrijkste kenmerk van flexibele duikers is hun vermogen om enigszins te buigen of te vervormen onder druk. Deze flexibiliteit maakt ze geschikt voor toepassingen waar bodemzettingen, aardbevingen, of andere bewegingen kunnen optreden. Flexibele duikers worden vaak gebruikt in gebieden waar de bodemomstandigheden niet stabiel zijn, zoals gebieden met zachte grond of waar sprake is van bodemzettingen. Ze kunnen ook geschikt zijn voor toepassingen waar bepaalde mate van beweging wordt verwacht.

Door hun flexibiliteit kunnen flexibele duikers gemakkelijker worden geïnstalleerd in bochten of onregelmatige terreinen. Dit kan de installatietijd en -kosten verminderen. Afhankelijk van het gebruikte materiaal kunnen flexibele duikers bestand zijn tegen corrosie. Bijvoorbeeld, als ze zijn gemaakt van corrosiebestendige kunststoffen, kunnen ze geschikt zijn voor toepassingen in corrosieve omgevingen. Flexibele duikers vereisen over het algemeen minder onderhoud dan sommige andere duikermaterialen. Ze zijn minder gevoelig voor scheuren of breuken als gevolg van bodembewegingen.



Figuur 3 Flexibele duiker (Wavin. 2017)

4.2.1.2. Rigide duikers

Rigide duikers verschillen van flexibele duikers doordat ze over het algemeen minder buigzaam zijn en vaak vervaardigd zijn van stijvere materialen. Rigide duikers worden meestal gemaakt van materialen zoals beton, staal, of andere harde en sterke materialen. Deze materialen bieden structurele sterkte en stabiliteit. Het belangrijkste kenmerk van rigide duikers is hun stijfheid en weerstand tegen vervorming. Ze behouden hun vorm en structurele integriteit, zelfs onder zware belastingen.

Rigide duikers worden vaak gebruikt in gebieden waar stabiliteit cruciaal is, zoals onder wegen met zwaar verkeer, spoorwegen of gebieden met hoge waterstromen. Ze worden ook ingezet wanneer de bodemomstandigheden minder vatbaar zijn voor zettingen.

Rigide duikers hebben over het algemeen een lange levensduur. Ze zijn bestand tegen slijtage en degradatie. Rigide duikers zijn bestand tegen externe krachten zoals druk van de bodem, verkeersbelastingen en erosie. Dit maakt ze geschikt voor veeleisende omstandigheden.



Figuur 4 stijve duiker (Wavin. 2017)

4.2.2. Beton

Betonnen duikers zijn bestand tegen de belasting van de bodem en waterdruk. Betonnen duikers zijn verkrijgbaar in verschillende vormen en maten, afhankelijk van de specifieke eisen van het project. Ze kunnen bijvoorbeeld rond, ovaal of rechthoekig zijn en kunnen dus ook worden ontworpen met specifieke eigenschappen, zoals verstevigingen of bepaalde vormen, om aan de eisen van een specifiek project te voldoen.

Verder is beton een duurzaam materiaal dat goed bestand is tegen verschillende omstandigheden. Hierdoor hebben betonnen duikers over het algemeen een lange levensduur en vereisen over het algemeen weinig onderhoud, waardoor ze een kosteneffectieve keuze zijn voor waterbeheersystemen.

4.2.3. Staal

Stalen duikers hebben de neiging om meer flexibiliteit te bieden dan betonnen duikers. Deze flexibiliteit kan handig zijn in gebieden waar bodemzettingen of bewegingen te verwachten zijn. Staal kan gevoelig zijn voor corrosie, maar stalen duikers worden vaak behandeld met coatings of materialen die de corrosiebestendigheid verbeteren, waardoor ze geschikt zijn voor gebruik in verschillende omgevingen.

Over het algemeen zijn stalen duikers lichter dan betonnen duikers, wat het transport en de installatie vergemakkelijkt. Stalen duikers worden vaak gebruikt in situaties waar extra sterkte vereist is, zoals in gebieden met zwaar verkeer, hoge waterstromen of extreme weersomstandigheden. Stalen duikers vereisen over het algemeen regelmatig onderhoud om corrosie te voorkomen. Periodieke inspecties en eventuele onderhoudsmaatregelen zijn belangrijk om de levensduur van de stalen duiker te verlengen.

4.2.4. PVC

PVC-duikers zijn gemaakt van polyvinylchloride. Een kunststofmateriaal dat over het algemeen licht van gewicht zijn, wat het transport, de installatie en het onderhoud vergemakkelijkt. PVC is van nature bestand tegen corrosie, wat het geschikt maakt voor gebruik in verschillende omgevingen, inclusief die met agressieve chemicaliën of vocht. PVC-duikers zijn vaak kosteneffectief in vergelijking met andere materialen. Ze zijn geschikt voor projecten met beperkte budgetten.

PVC-duikers vereisen over het algemeen weinig onderhoud. Ze zijn bestand tegen degradatie door weersomstandigheden en hebben geen speciale coatings nodig. PVC-duikers worden vaak gebruikt in situaties waar lage verkeersbelastingen en matige waterstromen worden verwacht. Ze zijn geschikt voor kleinere projecten en locaties met minder veeleisende omgevingsfactoren.

4.2.5. HDPE

HDPE-duikers worden vervaardigd van High-Density Polyethylene, dat bekend staat om zijn hoge sterkte, taaiheid en chemische bestendigheid. HDPE is een zeer flexibel materiaal, wat HDPE-duikers geschikt maakt voor gebieden met bodemzettingen of lichte bewegingen. Ze kunnen enige mate van vervorming verdragen zonder permanente schade.

HDPE is bestand tegen verschillende chemicaliën, waardoor HDPE-duikers geschikt zijn voor gebruik in omgevingen waar blootstelling aan corrosieve stoffen kan voorkomen ook hebben ze hierdoor een lange levensduur hebben zonder speciale beschermende coatings. Verder zijn ze licht van gewicht, waardoor ze gemakkelijk te transporteren en te installeren zijn. Dit maakt ze geschikt voor projecten waarbij mobiliteit belangrijk is. Ook hebben ze over het algemeen weinig onderhoud nodig.

4.3. Debiet berekening

Het debiet, of de doorstroming van water, is een cruciaal aspect bij duikerconstructies en speelt een fundamentele rol in verschillende opzichten. Het debiet is een kernparameter bij het hydraulisch ontwerpen van duikerconstructies. Het verwijst naar de hoeveelheid water die door de duiker moet stromen om te zorgen voor voldoende afvoer en voorkoming van overstromingen.

Het ontwerp moet rekening houden met de verwachte waterstromen onder verschillende omstandigheden, zoals normale weersomstandigheden en extreme weersomstandigheden. De inwendige diameter van de duiker is afhankelijk van het debiet. Het debiet moet daarom zorgvuldig bepaald worden.

Er zijn verschillende manieren om het debiet te berekenen. Een daarvan is met de formule van Chezy. De algemene vorm van de Chezy-formule is:

$$Q = A * C * \sqrt{R * I}$$

Een alternatieve methode voor het berekenen van het debiet is met behulp van de formule van Manning/Strickler. De formule is gebaseerd op de wet van Manning en de Strickler-vergelijking. De toepassing van deze formule wordt als volgt beschreven:

$$Q = A * k_m * R^{\frac{2}{3}} * I^{1/2}$$

Gedetailleerde uitleg voor deze formules zijn te vinden in Bijlage I.

De keuze tussen de Chezy-formule en de Manning/Strickler-formule voor het bepalen van het debiet van een duiker hangt af van verschillende factoren, waaronder de beschikbaarheid van gegevens, de nauwkeurigheid die vereist is en de specifieke kenmerken van het systeem.

Als de duikerbuis een glad oppervlak heeft en er weinig obstakels zijn, kan de Chezy-formule worden overwogen vanwege de eenvoudigere benadering van de ruwheid. Zijn er onregelmatigheden, zoals obstakels of ruwheden, aanwezig zijn in de rioolbuis, kan de Manning/Strickler-formule meer geschikt zijn vanwege de mogelijkheid om deze onregelmatigheden nauwkeuriger te modelleren.

Over het algemeen zijn beide methoden geldige benaderingen. Het is raadzaam om de lokale praktijken, normen en specifieke eisen van het project in overweging te nemen bij het selecteren van de meest geschikte methode. Daarom worden beide methoden in dit onderzoek opgenomen, waarbij voor het vaststellen van het debiet de minst gunstige methode wordt toegepast in de berekeningen.

4.4. Grondbelasting

In deze paragraaf wordt toegelicht uit welke grondfactoren de grondbelasting bestaat. Vervolgens worden de diverse methoden voor het berekenen van de grondbelasting uitgelegd, waarbij wordt ingegaan op de totstandkoming ervan. Tot slot wordt toegelicht waarom dit onderzoek ervoor kiest om met een specifieke methode verder te gaan. Voor het vaststellen van de grondbelasting spelen diverse factoren een rol.

4.4.1.1. Grondlagen

In eerste instantie oefenen de grondlagen boven de duiker natuurlijk invloed uit op de belasting. Voor dit doeleinde wordt eenvoudigweg de dikte van de grondlagen vermenigvuldigd met de dichtheid om de belasting te berekenen.

4.4.1.2. Fundering

De fundering van de constructie speelt een grote rol voor het bepalen van de belasting aangezien de fundering bepaalt hoe de duiker de belasting op gaat nemen.

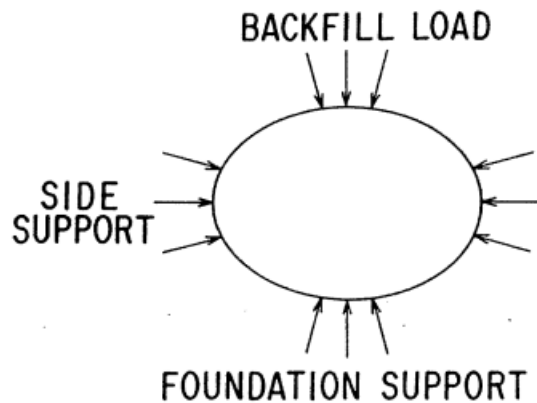
In het geval van een fundering op staal vindt hoofdzakelijk een directe overdracht plaats. Hierbij wordt de belasting binnen een dwarsdoorsnede (ringwerking) van de buis direct overgedragen aan de grond, zonder axiale overdracht van belasting in de buis.

Bij een indirecte overdracht (liggerwerking) verplaatst de belasting zich eerst in axiale richting van de buis naar een dwarsdoorsnede waar de buis wordt ondersteund door de grond, of via jukken door een paalfundering. Waardoor er sprake is van een belasting op een ligger met twee steunpunten

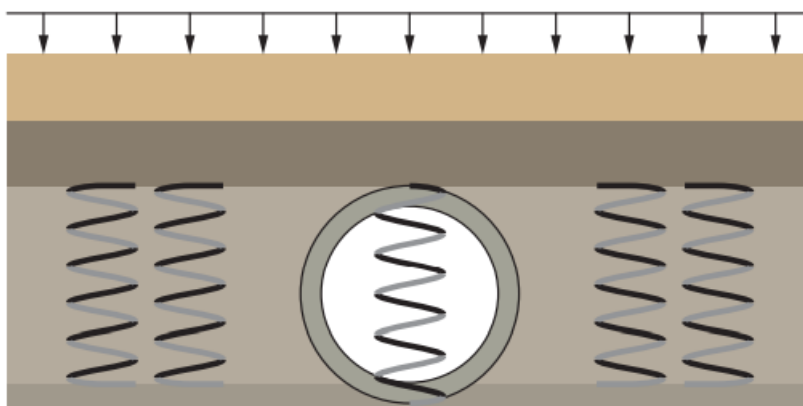
De stijfheid van de fundering heeft bovendien invloed op de wijze waarop de duiker de belasting overdraagt. In geval van een stijve fundering is een rigide duiker vereist, die doormiddel van interne krachten de belasting aan de fundering doorgeeft. Daarentegen, bij een fundering met een lagere stijfheid, is het van belang dat de duiker zich kan aanpassen aan de ondergrond en eventuele bewegingen absorbeert. Hierdoor komt een flexibele duiker meer in aanmerking.

4.4.1.1. stijfheidsverhouding

Niet alleen de stijfheid van de fundering, maar ook de verhouding van stijfheden tussen de backfill, insluiting en bedding met de duiker speelt een cruciale rol in de belastingoverdracht (figuur 5). Bij een beperkte (ring)stijfheid ten opzichte van de stijfheid van de onderliggende grond ontstaat er een steundruk aan de zijkant van de buis (figuur 6). Deze horizontale steundruk wordt gegenereerd door de ovalisatie van de flexibele buis. De benodigde mate van vervorming hangt af van zowel de belasting op de buis als de stijfheid van de grond naast de buis. Bij een buis die stijf is in vergelijking met de omringende grond, wordt er nauwelijks extra steundruk gegenereerd. Een dergelijke buis draagt de bovenbelasting grotendeels zelfstandig. Over het algemeen zal de grondbelasting op relatief stijve buizen hierdoor groter zijn.



Figuur 6 Horizontale steundruk (Pipe Bedding and Backfill. 1996)



Figuur 5 stijfheidsverhoudingen (VPB 1999)

4.4.1.2. Water

Wat verder van invloed is op de grondbelasting, is de waterbelasting. De rol van de waterbelasting varieert afhankelijk van de krachswerking.

In het geval van een liggerwerking van de duiker bepaalt de resultante van de opwaartse- en neerwaartse waterdruk of de waterbelasting gunstig of ongunstig is. Bij een grotere opwaartse kracht is de waterbelasting gunstig wanneer er sprake is van een neerwaartse bovenbelasting van de grondlagen.

Daarentegen, wanneer er gekeken wordt naar de krachswerking over de dwarsdoorsnede bij een ringwerking van de duiker, zorgen de neerwaartse belasting van de grond en de opwaartse belasting van de waterdruk samen juist voor een grotere spanning op de duiker.

4.4.2. Concentratiefactor

Er zijn dus diverse factoren die van invloed zijn op het bepalen van de belasting. Om uiteindelijk tot een grondbelasting te komen, wordt er gebruikgemaakt van een concentratiefactor. Deze factor wordt vermenigvuldigd met de dikte en dichtheid van de grondlagen en is afhankelijk van de interactie tussen de stijfheid van de duiker, de stijfheid van de grondlagen en de fundering. Vanwege de complexiteit van het onderwerp, waarbij het stijfheidsverschil onder de grond driedimensionaal van invloed is, bestaat er geen benadering die het exacte resultaat kan bereiken. Zo zijn er verschillende methoden om de concentratiefactor te berekenen, die allemaal empirisch zijn bepaald. Sommige methoden worden handmatig berekend, terwijl andere methoden de factor bepalen aan de hand van een standaard grondinstallatietype. In de gevonden literatuur wordt vaak verwezen naar drie veelvoorkomende methoden. In dit onderzoek is besloten deze drie methoden uit te werken en met elkaar te vergelijken.

4.4.2.1. Methodes

Tabel 1 rekenmethodes

Methode	Belasting [kN/m ²]	Concentratiefactor	Dichtheid grondlaag [kN/m ³]	Dekkingshoogte [m]
1	q_{vg}	λ_{vg}	γ	H
2	q_{v1}	$m * C$	w	H
3	W_e	VAF	γ_s	H

Gedetailleerde uitleg voor deze formules zijn te vinden in Bijlage II.

De methodes delen dezelfde basis voor het berekenen van de belasting, maar maken gebruik van verschillende terminologieën. Bovendien vertonen ze variatie in de bepaling van de concentratiefactor. Methode 1 en 2 vertonen sterke gelijkenissen; beide worden handmatig berekend en volgen identieke stappen. De eerste stap omvat het berekenen van de concentratiefactor van een oneindig stijve buis. Daarna volgt de berekening van de ringstijfheid van de buis. Vervolgens wordt de concentratiefactor van een oneindig stijve buig gereduceerd aan de hand van de verhouding van de grond met de ringstijfheid van de buis. Hoewel beide methodes dezelfde parameters hanteren, verschillen ze in empirisch bepaalde factoren en, op bepaalde momenten, de opstelling van de formule.

Methode 3 daarentegen presenteert concentratiefactoren gebaseerd op installatietypes en vereist een specifieke uitvoering en grondopbouw. Er zijn vier installatietypes en drie concentratiefactoren. Bij vergelijkingen met de uitkomsten van methode 1 en 2 lijken deze concentratiefactoren bijzonder conservatief. Een conservatieve benadering, die veiligheidsmarges toevoegt, kan waardevol zijn in technische projecten waar gegevensonvolkomenheden en variaties voorkomen.

4.4.3. Toepassing

In dit onderzoek is besloten om methode 1 te hanteren. Methode 3 is uitgesloten vanwege de afhankelijkheid van specifieke installatietypes, wat resulteert in een beperkt aantal opties bij parametrisch ontwerpen. Wat betreft methode 2 is ervoor gekozen deze niet te gebruiken vanwege de verouderde literatuur uit 1986, waarop de methode is gebaseerd. Aangezien methode 1, opgesteld in 1999, sterk lijkt op methode 2 en de berekeningsresultaten slechts minimaal verschillen, is besloten om met methode 1 verder te werken. Methode 1 is gebaseerd op CUR Aanbeveling 122: "Buizen onder de grond". Hoewel CUR 122 niet online beschikbaar is, wordt er in bijna alle literatuur, inclusief de NEN-EN normen, naar verwezen.

4.5. Verkeersbelasting

Dit hoofdstuk behandelt de complexiteit van het berekenen van verkeersbelasting voor duikerconstructies. Het begint met het identificeren van het gebruik van het maaiveld en de belasting door voertuigen, voetgangers, of als berm. De diversiteit in voertuigbelasting, belastingspreiding, en de invloed van de stijfheidsverhouding van de duiker worden grondig onderzocht.

4.5.1. Type weg

Bij het berekenen van de verkeersbelasting is het essentieel om het type weg te identificeren. Waar wordt het maaiveld voor gebruikt? Is het hoofdzakelijk een voetgangersgebied, een berm of worden er voertuigen overheen geleid? Daarnaast is het van belang om te raadplegen wat de literatuur zegt over de specifieke belastingwaarden die van toepassing zijn op dat type weg.

4.5.1.1. Voertuigen

De belastingwaarden van voertuigen variëren onderling, en bovendien kunnen de metingen van aslasten per land verschillen. Desondanks blijkt uit dit onderzoek dat de metingen van de totale aslast van Suriname en Nederland weinig verschillen.

In de Nederlandse literatuur worden voertuigen op basis van hun totale gewicht onderverdeeld in verschillende gewichtsklassen:

Verkeersklasse 30: plattelandswegen en stadsstraten

Verkeersklasse 45: hoofdverkeerswegen

Verkeersklasse 60: hoofdverkeerswegen met mogelijk extreem zwaar verkeer

Tabel 2 verkeersklassen

Klasse	Maximum gewicht [kN]	Maximum aslast [kN]
Verkeersklasse 30	300	100
Verkeersklasse 45	450	150
Verkeersklasse 60	600	200

Hoewel de exacte overeenkomst van aslasten tussen Suriname en Nederland niet beschikbaar is, worden in dit onderzoek toch drie verkeersklassen gehanteerd, waarbij de specifieke aslasten als parameters worden opgenomen. Ook worden de aslasten uit de bovenstaande tabel wel als standaard meegenomen.

4.5.1.2. Voetgangers of Berm

Mogelijk wordt het maaiveld boven de duiker alleen gebruikt door voetgangers en niet door voertuigen. Volgens NEN-EN 1991-2, met betrekking tot verkeersbelasting op bruggen, levert een menigte mensen een q-last op, gelijk aan 5 kN/m². Als het maaiveld niet wordt gebruikt door voetgangers, wordt het beschouwd als een bermstrook zonder bovenbelasting.

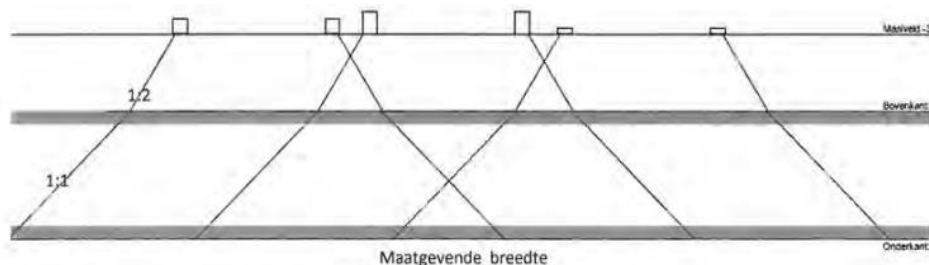
4.5.2. Belasting spreiding

In het geval van een q-last van een mensenmenigte blijft de bovenbelasting ongewijzigd wanneer deze bij de duiker in de grond komt. Echter zal een puntlast zich in de grond verspreiden, waardoor de belasting verandert.

De spreiding van de belasting is afhankelijk van de spreidingshoek van de grondsoorten, de diktes van de lagen en de afstand van de puntlast tot de duiker. In dit onderzoek zijn de volgende twee methodes met elkaar vergeleken.

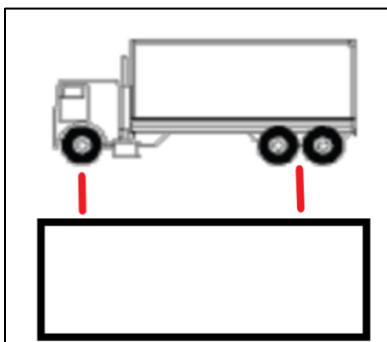
Maatgevende breedte

Bij deze methode wordt er gezocht naar de maatgevende belasting spreiding over de lengte van de duiker. De as-lasten van de voertuigen worden bij elkaar opgeteld en de belasting spreiding over de dwarsdoorsnede van het profiel wordt buiten beschouwing gelaten.

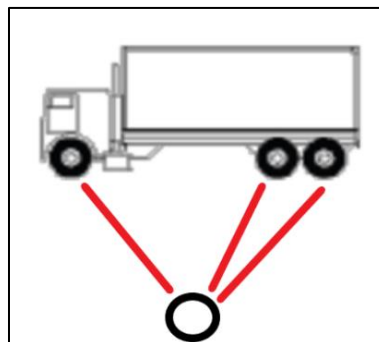


Figuur 7: Maatgevende breedte (Oranjewoud 2012)

Voor het berekenen van de totale spreiding van het voertuig wordt de spreiding verdubbeld en daarbij de as-lengte opgeteld. De maatgevende breedte is de breedte waar de voertuigen van verschillende rijstroken elkaar kruisen. Het voordeel van deze benadering is dat meerdere rijstroken goed in beeld worden gebracht. Echter schiet deze methode tekort doordat de breedte van de duiker buiten beschouwing wordt gelaten. Deze methode is meer geschikt voor tunnels of grote duikers. Bij een tunnel zou je kunnen stellen dat de volledige belasting van het voertuig door de tunnel wordt opgenomen (figuur 8), terwijl dat bij een smallere constructie niet het geval is en er veel belasting via de grond wordt afgedragen (figuur 9).



Figuur 9 Tunnel



Figuur 8 Duiker

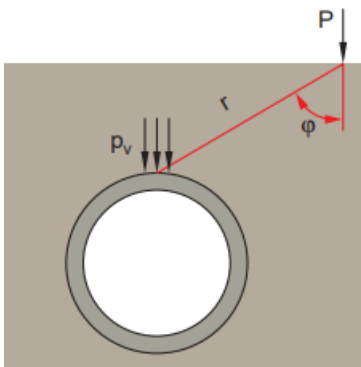
Boussinesq

Gezien de vorige methode niet rekening hield met de belasting spreiding over de dwarsdoorsnede van het duiker profiel, is de formule van Boussinesq onderzocht als een alternatieve benadering:

$$P_v = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \varphi^3$$

Bij beschouwing van de as-lasten als puntlasten kan een as-configuratie worden uitgevoerd. Een "as-configuratie" betekent naar de verschillende opstellingen of plaatsingen kijken van assen (wielen) op een voertuig en bepalen op welke plek de drie puntlasten samen de grootste verticale spanning veroorzaken.

Het nadeel van deze benadering komt naar voren wanneer de duiker wordt beoordeeld op liggerwerking. In het geval van meerdere rijstroken wordt de spreiding in de langsdoorsnede niet volledig nauwkeurig in beschouwing genomen.



Figuur 10 de formule van Boussinesq (VPB 1999)

4.5.3. Concentratie factor

Bij het vaststellen van de verkeersbelasting speelt eveneens de stijfheidsverhouding van de duiker met de omliggende grond een rol. Hoewel er minder literatuur beschikbaar is over dit aspect, gaat de literatuur van methode 1 (zie kopje 3.4.2.1 Methodes), die wordt gebruikt voor het bepalen van de grondbelasting, ook door op het vaststellen van de verkeersbelasting. De stappen vertonen over het algemeen overeenkomsten. Het bepalen van de concentratiefactoren van een oneindige buis wordt gereduceerd aan de hand van de verhouding van de grond tot de ringstijfheid van de buis. Hoewel het reduceren op basis van de verhouding gelijksoortig is, wordt de concentratiefactor van de oneindig stijve buis op een geheel andere manier vastgesteld.

Tabel 3 rekenmethode verkeersbelasting

Methode	Belasting [KN/m2]	Concentratie factor	stoot coëfficiënt	Verkeer grondspanning [KN/m2]
1	q_{vv}	λ_{vv}	s	p

Gedetailleerde uitleg voor de formules van verkeersbelasting zijn te vinden in Bijlage III.

4.6. Toetsingen

Dit hoofdstuk vormt een diepgaande verkenning van de ringtoetsing en liggertoetsing bij zowel stijve als flexibele duikers. In het geval van stijve betonnen duikers, worden zowel ongewapende als gewapende situaties getoetst, met aandacht voor scheurvorming en bezwijken. Voor flexibele kunststof duikers, waar de deformatie complex is, introduceren we een praktische toetsingsmethode, met specifieke aandacht voor SN-klassen. Stalen duikers ondergaan een interne spanningstoetsing volgens de NEN 3650-serie.

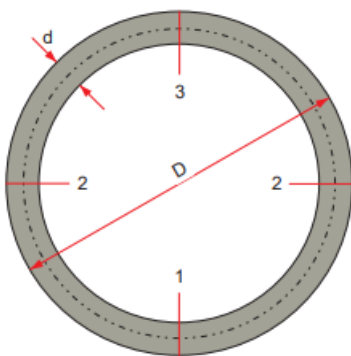
4.6.1. Ringtoetsing

Terugkomend op paragraaf 2.4.1.2 zijn er diverse manieren waarop de duiker krachten aan de grond doorgeeft. Via directe overdracht over de dwarsdoorsnede ontstaat er een ringwerking van de duiker, en via indirecte overdracht treedt er een liggerwerking op. Beide situaties dienen te worden getoetst. In dit hoofdstuk wordt de ringtoetsing van zowel een stijve als een flexibele duiker behandeld.

4.6.1.1. Stijve duiker

Uit de literatuur en de algemene praktijkervaring worden betonnen duikers beschouwd als stijve duikers. Ook bij de berekening van de ringstijfheid in paragraaf 2.4.2.1 blijkt de ringstijfheid van beton aanzienlijk groter te zijn dan die van de andere materialen in dit onderzoek. De betonnen duiker wordt getoetst in zowel een ongewapende als gewapende situatie. Eerst worden echter de interne krachten die zich voordoen berekend.

De interne krachten van de betonnen duiker worden bepaald aan de hand van coëfficiënten. Deze coëfficiënten worden bepaald door hoe de duiker gefundeerd is. De fundering bepaalt namelijk hoe de duiker de krachten op gaat nemen en wat de interne krachten op de maatgevende punten zijn (figuur 11).



Figuur 11 maatgevende punten (VPB 1999)

Wanneer deze krachten zijn bepaald, worden er toetsingen uitgevoerd waarin drie grenstoestanden van de duiker worden beschouwd, met een andere ringstijfheid. Ieder grenstoestand heeft zijn eigen toetsing.

Tabel 4 grenstoestand

Buissoort	Grenstoestand	μ
Ongewapend	Ongescheurd	1
Gewapend	Scheuren	0,5
Gewapend	Bezwijken	0,25

De gedetailleerde uitleg voor deze toetsing is te vinden in Bijlage IV: 15.1.1.

4.6.1.2. Flexibele duiker

Uit de berekening van de ringstijfheid in paragraaf 2.4.2.1 is te zien dat de ringstijfheid van het PVC, HDPE en staal zeer laag is. Wanneer geprobeerd wordt om met deze lage ringstijfheid de interne krachten te berekenen aan de hand van de methode uit paragraaf 2.4.2.1, ontstaan er onrealistische waarden. Het lijkt erop dat, doordat enkele waarden in de formule empirisch zijn bepaald, de uitkomst daardoor niet meer correct is.

Om deze reden is er onderzoek gedaan naar alternatieve beoordelingsmethoden voor flexibele duikers, methoden die, net zoals bij de stijve betonnen duiker, specifiek zijn voor het materiaal.

Deformatie toetsing PVC & HDPE

Er is weinig literatuur beschikbaar over het vaststellen van de deformatie van flexibele duikers. Dit kan worden toegeschreven aan het feit dat de deformatie beïnvloed kan worden door verschillende variabelen, zoals de geometrie van de duiker, de eigenschappen van het materiaal, de belastingen waaraan het wordt blootgesteld, de bodemomstandigheden, enzovoort. Het is mogelijk dat de complexiteit van de interactie tussen deze factoren en de variabiliteit van de omstandigheden op locatie het moeilijk maken om een algemene, handmatige berekeningsmethode te ontwikkelen die breed toepasbaar is.

Bovendien kan het gedrag van flexibele duikers onderhevig zijn aan niet-lineaire effecten, zoals grote vervormingen, materiaalgedrag dat niet perfect elastisch is, en mogelijk niet-lineaire bodemrespons. Het oplossen van dergelijke niet-lineaire problemen kan vereisen dat geavanceerde numerieke methoden worden toegepast, en dit kan de behoefte aan gespecialiseerde software benadrukken.

Het ontwikkelen van gespecialiseerde software voor de berekening van deformaties van flexibele duikers kan een aanzienlijke inspanning en kosten met zich meebrengen. Terwijl het gebruik van praktijkervaring en vuistregels voldoende zijn om acceptabele resultaten te behalen, vooral als de constructies en omstandigheden niet extreem complex zijn. Zo zijn er aanbevelingen opgesteld voor het installeren van flexibele duikers aan de hand van de SN-klasse (Wavin, 2017).

Aanvulgroep Hoogte	Zand, zanderige klei en gemengde grond		
	A	B	C
0,6-1 m	SN 2	SN 4	SN8 IT Ultra-Rib SN8
1-4m	SN 2	SN 2 SN 4	SN 4
>4 m	SN 4 SN 8	SN 4	IT Ultra-Rib SN8

Figuur 12 aanbevelingen flexibele duikers (Wavin. 2017)

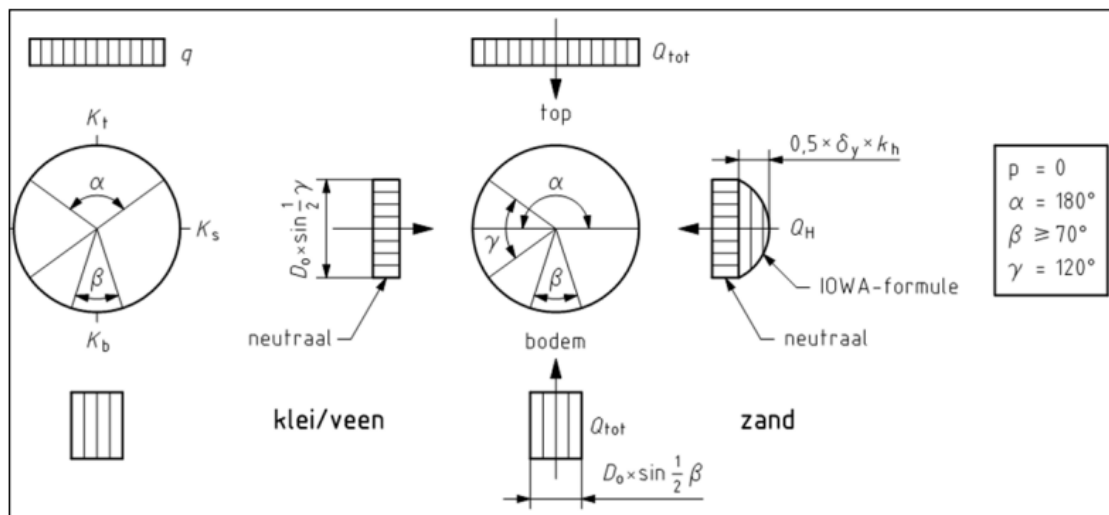
Er is echter een eenvoudige toetsing die in de praktijk wordt toegepast (Bergschenhoek, 2019), waarbij de deformatie van een SN-klasse wordt berekend met de volgende formule:

$$\Delta y = \frac{Dl \cdot (Wc + Wl)k}{EI + 0,0061 * E'}$$

De gedetailleerde uitleg voor deze toetsing is te vinden in Bijlage I: 15.1.2.1

Interne spanning Toetsing: Staal

Wanneer de belasting bekend is, kan de berekening van de interne krachten die dit veroorzaakt worden berekend. De NEN 3650-serie schrijft voor hoe deze spanning berekend moet worden, waarbij men uitgaat van belastinghoeken en ondersteuningshoeken. De grootte van deze hoeken is afhankelijk van de aanlegtechniek, wat aanzienlijk verschilt tussen het ingraven en boren van een leiding. In het ene geval is er sprake van aanleg in een "open sleuf", terwijl in het andere geval gebruik wordt gemaakt van een persinstallatie.



Figuur 13 belasting en ondersteuningshoeken (Sigma, 2016)

De hoek α vertegenwoordigt de belastinghoek op de leiding en varieert tussen 0° en 180° . De hoek β duidt op de ondersteuningshoek en kent ook een variatie van 0° tot 180° . In dit onderzoek is er gekozen voor de aanpak van een opensleufmethode voor de aanleg van duikerconstructie, wat verwijst naar de conventionele methode waarbij een sleuf wordt gegraven voor het plaatsen van rioolbuizen of duikers. Bij de open sleuf methode wordt over het algemeen aangenomen dat de belastinghoek 180° is en de ondersteuningshoek 70° bedraagt (zie figuur 13). Nu deze waarden zijn vastgesteld, kan er met behulp van een gegeven tabel uit NEN 3650 worden bepaald wat de interne spanningen van een stalen buis.

De gedetailleerde uitleg voor deze toetsing is te vinden in Bijlage IV: 15.1.2.2

4.6.2. Liggertoetsing

Na de behandeling van de ringwerking in paragraaf 4.6.1, wordt nu de focus verlegd naar de andere belangrijke dimensie van duikeraanalyse: de liggerwerking. In tegenstelling tot de ringwerking, waarbij krachten direct aan de grond worden doorgegeven over de dwarsdoorsnede, doet de liggerwerking zich voor via een indirecte overdracht. In dit hoofdstuk wordt de liggertoetsing van zowel stijve als flexibele duikers onder de loep genomen, waarbij de focus ligt op het begrijpen van de krachten die via deze mechanismen worden overgedragen. De duikers ondergaan toetsingen op buiging en dwarskracht, omdat deze aspecten als maatgevend worden beschouwd.

4.6.2.1. Liggerbelasting

De wijze waarop de grondbelasting en verkeersbelasting worden opgenomen, verschilt aanzienlijk van de ringwerking. De grondbelasting wordt nog steeds beschouwd als een q-last, maar nu over de gehele lengte van de duiker. Dit resulteert in een constante belasting per strekkende meter.

Verder hebben het eigengewicht en de waterbelasting een andere impact op de duiker. Zoals in paragraaf 2.4.1.1 al is benoemd, kan de opwaartse waterbelasting bij de liggerwerking van de duiker een gunstig effect hebben op de totale belasting. Het eigengewicht en watervulling van de duiker, net als de grondbelasting, zijn gelijkmatig verdeeld en vormen als neerwaartse belasting een ongunstige factor.

Aan de andere kant wordt de verkeersbelasting, door het effect van liggerwerking, nu beschouwd als een puntlast. Dit betekent dat de belasting wordt geconcentreerd op specifieke punten. Het aantal punten is afhankelijk van de hoeveelheid rijstroken. Deze verandering kan een aanzienlijke impact hebben op de structurele reacties en de resulterende spanningen binnen de duiker. Bij dit onderzoek wordt het aantal rijstroken beperkt tot drie. Voor de drie scenario's wordt gezocht naar het maximale moment en de maximale dwarskracht.

4.6.2.2. Belastingsfactoren

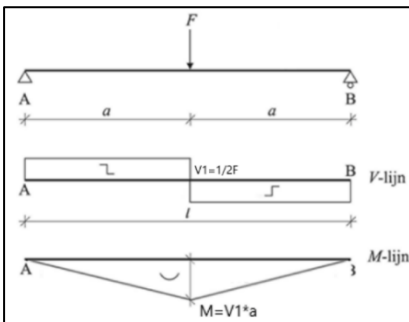
De belastingen worden ingedeeld in drie categorieën: permanent, variabel door voertuigen, en gunstig werkend. Deze categorieën worden gekoppeld aan belastingsfactoren volgens tabel NB 13 van NEN-EN 1990, zoals weergegeven in onderstaande tabel:

Tabel 5 belastingsgeval

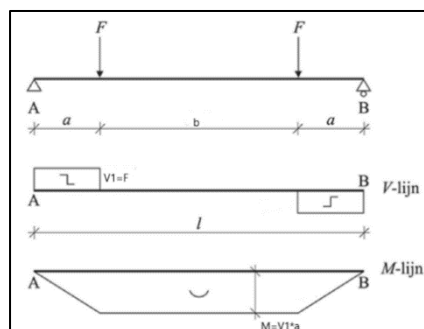
Type	Belastingsgeval	UGT (6,10a)	UGT (6,10b)
Permanent	Grondbelasting + Eigengewicht	1,3	1,2
Veranderlijk door voertuig	Verkeersbelasting	1,35*0,8	1,35
Gunstig werkend	Totale waterbelasting (resultante opwaarts)	0,9	0,9

4.6.2.3. Wegindeling

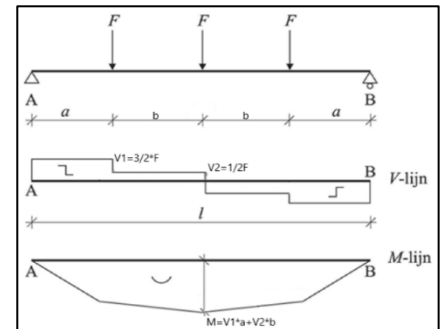
Er zijn verschillende manieren om de weg in te delen. De manier waarop de weg wordt ingedeeld, heeft echter invloed op de plaatsing van de puntlasten in het belastingsmodel. Aangezien de wegingdeling niet altijd hetzelfde is, worden de as-lengte en afstanden tussen rijstroken meegenomen als parameters. In dit onderzoek wordt echter gerekend met een standaard, aan de hand van een voetafdruk van een tandem-as volgens de NEN-EN 1991-2. Een voertuig heeft hier een totale as-lengte van 2,4 m, waar 1 m bij wordt opgeteld als tussenafstand van de rijstroken. Uit deze twee waarden bestaat factor b (figuur 15 en 16) in de belastingsberekening. Factor a (figuur 14, 15 en 16) is dus de waarde die overblijft wanneer de wegbreedte wordt afgetrokken van de totale duikerlengte, waarbij ervan wordt uitgegaan dat de weg in het midden wordt geplaatst, zodat aan beide zijden evenveel speling overblijft.



Figuur 14 schematisering puntlast



Figuur 15 schematisering puntlasten



Figuur 16 schematisering puntlast

4.6.2.4. Betonnen duikers

Voor de berekening van de betonnen duiker is besloten om, bij zowel de ongewapende toetsing op dwarskracht als de gewapende toetsing op zowel dwarskracht als buiging, de ronde duiker te vereenvoudigen tot een vierkant. Er is geen literatuur gevonden voor het toetsen van een ronde betonnen buis met liggerwerking. Echter, literatuur voor het toetsen van een vierkante betonnen koker is wel beschikbaar. Deze vereenvoudiging van de vorm is overlegd met ervaren ingenieurs van AMB N.V. en is goedgekeurd, omdat het een conservatieve benadering betreft. Indien de vierkante duiker voldoet, zou in theorie ook de ronde buis moeten voldoen. De volgende geometrische vereenvoudiging wordt toegepast:

H = uitwendige diameter (D_u)

B = uitwendige diameter (D_u)

d = wanddikte (d)

De gedetailleerde uitleg voor deze toetsing is te vinden in Bijlage IV: 15.2.5

4.6.2.5. Flexibele duikers

De toetsing op buiging en afschuiving van flexibele duikers vertoont grotendeels overeenkomsten. Het verschil ligt in het feit dat staal een duidelijke vloeigrens f_y heeft, wat resulteert in zowel elastische als plastische vervorming. Bij staal wordt de toetsing op buiging uitgevoerd met betrekking tot het elastisch grensmoment $M_{c,Rd}$, bepaald op basis van de elastische sectiemodulus W_{ce} en de vloeigrens f_y . Daarentegen wordt bij PVC en HDPE de toetsing op buigend moment uitgevoerd met betrekking tot de treksterkte f_u van het materiaal.

De gedetailleerde uitleg voor deze toetsing is te vinden in Bijlage IV: 15.2.6

5. Kostenanalyse

Dit hoofdstuk staat in het teken van het vaststellen van het optimale ontwerp voor een duikerconstructie. De kostenanalyse en de keuze van criteria worden uitvoerig besproken, met specifieke aandacht voor het uitsluiten van minder relevante factoren en het selecteren van de belangrijke. Verder wordt de weegfactor geïntroduceerd, die het relatieve belang van elk criterium bepaalt.

5.1. Criteria

Voor het bepalen van het optimale ontwerp zijn, naast de constructieve eisen, ook de criteria waaraan de ontwerpen worden getoetst van groot belang. Het optimale ontwerp is degene dat het beste aan de gekozen criteria voldoet. Het zorgvuldig selecteren van de criteria is essentieel. Er zijn echter een aantal veelgebruikte criteria die snel afvallen. Bijvoorbeeld, brandveiligheid en esthetica zijn irrelevant voor een duiker, aangezien deze zich ondergronds bevindt. Bovendien zijn de risico's bij het plaatsen van een duiker voor verschillende duikertypes hetzelfde.

De criteria die de grootste rol spelen bij het ontwerpen van een duikerconstructie zijn de constructiekosten en de milieueffecten. De constructiekosten bestaan voornamelijk uit de materiaalkosten, wat in hoofdstuk 4.9 verder wordt toegelicht. De milieueffecten worden beoordeeld aan de hand van een Milieukostenindicator (MKI), wat in hoofdstuk 4.8 verder wordt toegelicht. Beide criteria hebben kosten als eenheid. Om deze reden wordt het optimale ontwerp gekozen op basis van een kostenanalyse.

5.1.1. Weegfactor

Wanneer de Materiaalkosten en Milieu Kosten Indicator (MKI) bekend zijn, moet er nog worden afgewogen welke criteria prioriteit krijgt. De keuze tussen het meer laten meewegen van materiaalkosten of MKI in een kostenanalyse kan afhangen van verschillende factoren en de specifieke doelstellingen:

Duurzaamheidsdoelen:

Als duurzaamheid een belangrijk doel is van de analyse, dan is het mogelijk om de voorkeur te geven aan het zwaarder laten wegen van MKI.

Budgettaire overwegingen:

Als kosten een cruciale factor zijn, kan het zwaarder laten wegen van materiaalkosten gerechtvaardigd zijn.

Wet- en regelgeving:

In sommige gevallen kunnen lokale bouwvoorschriften of duurzaamheidsnormen specifieke eisen stellen met betrekking tot de nadruk op bepaalde aspecten, zoals materiaalkeuze of milieuprestaties.

Stakeholdervoorkeuren:

Het betrekken van belanghebbenden, zoals opdrachtgevers, architecten, of milieuorganisaties, kan helpen bij het bepalen van de prioriteiten. Soms hebben stakeholders specifieke voorkeuren of eisen die de keuze kunnen beïnvloeden.

5.1.2. Toepassing

Milieubewustzijn en de prioriteit die aan milieukwesties wordt gegeven, variëren sterk van land tot land en kunnen worden beïnvloed door verschillende factoren, waaronder beleid, economische omstandigheden en culturele overwegingen.

In sommige landen, waaronder Suriname, staan milieukwesties momenteel minder prominent op de agenda dan in andere landen zoals bijvoorbeeld Nederland. Het milieubehoud kan ook afhangen van de specifieke regio's binnen het land en de betrokkenheid van de bevolking, overheid en bedrijven.

De weging van materiaalkosten en MKI wordt daarom als invoerparameter opgenomen. Bij het toepassen van het script met behulp van weegfactoren heeft de gebruiker de mogelijkheid om zelf te bepalen welk criterium prioriteit krijgt.

5.2. MKI

Dit hoofdstuk introduceert een methodologie voor het beoordelen van de duurzaamheid van duikerconstructies aan de hand van de Milieukostenindicator (MKI). Geïnspireerd door de benadering van de Stichting Nationale Milieudatabase (NMD), doorloopt de analyse verschillende levenscyclusfasen, inclusief productie, transport, constructie, gebruik en onderhoud, en het einde van de levensduur.

5.2.1. Calculatiemethode

De berekeningsmethode van de MKI-scores voor duurzaamheid is afgeleid van de methode die wordt toegepast door de Stichting Nationale Milieudatabase (NMD) in de LCA-rapportages van categorie 3-gegevens. Het proces voor het berekenen van de MKI-scores omvat vier stappen:

- Fase analyse
- Materiaal & Processen
- Milieueffecten
- Schaduwkosten

5.2.1.1. Fases

Allereerst worden alle fasen van de levenscyclus van de duiker doorlopen volgens Stichting NMD normen, waarbij de hoeveelheden worden uitgesloten vanwege de parametrische aard van het ontwerp.

Productiefase (A1-A3):

In deze fase wordt het materiaal geproduceerd. De specifieke eigenschappen van het materiaal, zoals samenstelling en productieprocessen, worden geanalyseerd.

Transportfase (A4, C2):

Het materiaal ondergaat transport naar de werklocatie en, indien van toepassing, naar de afvalverwerkingslocatie aan het einde van de levensduur. De afgelegde afstanden en transportmiddelen worden beschouwd.

Constructiefase (A5):

Tijdens de constructiefase wordt het materiaal gebruikt in bouw- en installatieprocessen. Er kunnen reserves worden toegepast op de berekeningen om onvoorziene omstandigheden in deze fase te dekken.

Gebruik en Onderhoudsfase (B1, B2-B5):

Deze fase omvat het gebruik van het materiaal gedurende de levensduur. Eventueel onderhoud wordt beschouwd, inclusief reparaties en vervangingen.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D):

Aan het einde van de levensduur wordt het materiaal verwijderd. Het afvalscenario omvat de verwerking van het materiaal, zoals storting en recycling. Baten en lasten buiten het systeem worden ook in beschouwing genomen.

Levensduur:

De geschatte levensduur van het materiaal wordt vermeld.

5.2.1.2. *Materiaal & Processen met Milieuprofiel*

Er wordt een overzicht gegeven van de benodigde materiaal en processen die er nodig zijn bij de levenscyclus van de duiker. Hieraan wordt vervolgens een Milieuprofiel gekoppeld. De hoeveelheid van het materiaal en de afstand/duur van het proces is afhankelijk van de ingevoerde parameters.

5.2.1.3. *Milieueffecten*

Aan elk milieuprofiel zijn milieueffectfactoren gekoppeld. De geselecteerde milieuprofielen in dit onderzoek zijn allemaal afkomstig uit LCA-rapportages van categorie 3 door de Stichting NMD (zie tabel 22). In deze rapportages worden ook de milieueffectfactoren van de profielen beschreven. De milieueffectfactoren worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden van de materialen & processen. Hierdoor wordt duidelijk welke milieueffecten elk stadium in de levenscyclus met zich meebrengt.

Tabel 6 MKI database

Database/bron	Duiker
Rijkswaterstaat	Beton ongewapend, Beton gewand
NMD leidingwerken	Beton ongewapend, Beton gewapend, Staal, PVC, HDPE
NMD funderingsconstructies	Beton ongewapend, Beton gewapend, Staal, PVC, HDPE
NMD kunstwerken	Beton ongewapend, Staal
H1-8000 Processen	Beton ongewapend, Beton gewapend, Staal, PVC, HDPE

5.2.1.4. *Schaduwkosten*

Tot slot wordt van elk milieueffect het totaal vermenigvuldigd met de bijbehorende schaduwprijs. Wanneer de milieueffecten met de schaduwprijs bij elkaar worden opgeteld, resulteert dit in de MKI-score van de levenscyclus van de duiker.

Figuur 17 weergeeft de weegfactoren voor de Milieukostenindicator (MKI) in de Nederlandse bouwsector zoals die in 2020 werden gebruikt.

Milieueffectcategorie	Equivalent eenheid	Weegfactor [€ / kg equivalent]
Uitputting abiotische grondstoffen (exclusief fossiele energiedragers) – ADP	Sb eq	€ 0,16
Uitputting fossiele energiedragers – ADP	Sb eq ^b	€ 0,16
Klimaatverandering – GWP 100 j.	CO ₂ eq	€ 0,05
Aantasting ozonlaag – ODP	CFK-11 eq	€ 30
Fotochemische oxidantvorming – POCP	C ₂ H ₄ eq	€ 2
Verzuring – AP	SO ₂ eq	€ 4
Vermesting – EP	PO ₄ eq	€ 9
Humane toxiciteit – HTP	1,4-DCB eq	€ 0,09
Zoetwater aquatische ecotoxiciteit – FAETP	1,4-DCB eq	€ 0,03
Mariene aquatische ecotoxiciteit – MAETP	1,4-DCB eq	€ 0,0001
Terrestrische ecotoxiciteit – TETP	1,4-DCB eq	€ 0,06

Figuur 15 weegfactoren (NMD 2020)

De gedetailleerde berekening van de MKI is te vinden in Bijlage V: 15.1.2.

5.3. Constructie kostenvergelijking

Dit hoofdstuk werpt een diepgaande blik op de constructie kosten van een duikerconstructie. Een gedegen kostenanalyse is van essentieel belang om financiële besluitvorming te ondersteunen en de haalbaarheid van een project te beoordelen. De analyse is gestructureerd in drie hoofdcategorieën: materiaalkosten, uitvoeringskosten en transportkosten.

5.3.1. Algemeen

Dit onderzoek hanteert USD\$ als valuta voor kostenvergelijking, waarbij de wisselkoers van Euro naar USD 1:1 is. De kosten voor het aanleggen van een constructie-duiker kunnen worden onderverdeeld in verschillende onderdelen. Hier volgt een algemeen overzicht van wat elk van deze onderdelen omvat:

1. Materiaalkosten:

- Grondlagen: De kosten voor de grondlagen in de sleuf.
- Duikermateriaal: Kosten voor de constructie, inclusief materiaal (bijv. beton, metaal) en extra onderdelen.

2. Uitvoeringskosten:

- Manuren: Kosten voor arbeid, inclusief ontwerp, planning en bouwwerkzaamheden.
- Bouwapparatuur: Kosten voor het huren of gebruiken van bouwapparatuur.

3. Transportkosten:

- Kosten voor het transporteren van materialen van de leverancier naar de bouwplaats.
- Kosten voor het verplaatsen van bouwapparatuur van en naar de locatie.

5.3.2. Materiaalkosten

Het makkelijke bij de materiaalkosten is dat ze niet project specifiek zijn waardoor ze makkelijk als een parameter kunnen worden meegenomen. In de eerste instantie is de prijs van het materiaal een parameter die zelf ingevuld kan worden. Echter worden er bij dit onderzoek ook materiaalkosten berekend.

De duiker materiaalkosten zijn bepaald doormiddel van een kosten vergelijking. In deze kosten vergelijking wordt er per materiaal gekeken naar de prijzen van verschillende leveranciers. De prijzen worden vergeleken door de kosten om te zetten naar dezelfde prijs per eenheid en vervolgens het gemiddelde daarvan mee te nemen als invul parameter. De prijs per eenheid voor de materialen is USD/m³.

De duikermaterialen worden omgerekend naar m³ per strekkende meter zodat het duidelijk is wat de kosten per meter duiker zijn. De prijs van de grondlagen worden overgenomen op basis van de kosten bij een Surinaamse leverancier Vabi, aangezien dat een gebruikelijke leverancier is. Ook de kosten van de grondlagen hebben USD/m³ als eenheid.

Overigens worden alleen de kosten van zand en basecourse meegenomen aangezien het maaiveld hetzelfde is bij elk ontwerp en de fundering wordt bij het onderzoek buiten beschouwing gelaten.

5.3.3. Uitvoering en Transportkosten

De uitvoeringskosten daarentegen zijn wel specifiek voor het project en variëren afhankelijk van factoren zoals terreinomstandigheden, duikerlengte, weeromstandigheden en het ingezette personeel.

5.3.3.1. *Terrein*

Het terrein kan invloed hebben op de uitvoeringskosten bij het plaatsen van een duikerconstructie. Verschillende terreinomstandigheden kunnen de bouwprocessen beïnvloeden en leiden tot variaties in de kosten. Hier zijn enkele aspecten waar rekening mee moet worden gehouden:

- Bodemgesteldheid: Als het terrein complex is of bestaat uit harde rotsen, kan het graven en installeren van de duiker moeilijker en tijdrovender zijn. Dit kan leiden tot extra kosten voor arbeid en apparatuur.
- Waterstanden: Als het werkgebied gevoelig is voor hoge waterstanden, kan dat extra uitdagingen met zich meebrengen. Mogelijk moeten er voorzorgsmaatregelen worden genomen om water af te voeren of het werkgebied droog te houden, wat de kosten kan verhogen.
- Toegankelijkheid: De bereikbaarheid van het terrein kan van invloed zijn op de transportkosten van materialen en apparatuur. Moeilijk bereikbare of verre locaties kunnen extra kosten met zich meebrengen.
- Milieufactoren: Als het projectgebied gevoelig is voor milieuproblemen, zoals beschermde flora en fauna, kan dat extra eisen stellen aan de bouwmethoden en -tijden, wat de kosten kan beïnvloeden.
- Maaiveld: De hellingen en hoogteverschillen in het terrein kunnen de constructie bemoeilijken en extra maatregelen vereisen, zoals versterking of aanpassingen aan de duikerconstructie.

5.3.3.2. *Weeromstandigheden*

De weeromstandigheden kunnen invloed hebben op de uitvoeringskosten bij het plaatsen van een duikerconstructie. Hier zijn enkele manieren waarop weeromstandigheden een rol kunnen spelen:

- Neerslag: Overmatige regenval in bijvoorbeeld het regenseizoen van Suriname kan leiden tot wateroverlast op de bouwplaats, waardoor het graven en installeren van de duiker bemoeilijkt wordt. Het kan extra kosten met zich meebrengen voor het beheersen van waterafvoer en het handhaven van een droge werkplek.
- Extreme temperaturen: Bij extreme hitte in Suriname kan speciale voorzorgsmaatregelen nodig zijn. Hoge temperaturen kunnen bijvoorbeeld de arbeidsomstandigheden beïnvloeden en kan daardoor de manuren beïnvloeden.

5.3.3.3. *Duiker lengte*

De lengte van de duiker kan ook invloed hebben op de uitvoeringskosten. Hier zijn enkele manieren waarop de duikerlengte kosten kan beïnvloeden:

- Grondverzet: De lengte van de duiker kan ook invloed hebben op de hoeveelheid grond die moet worden verplaatst om ruimte te maken voor de duiker. Een langere duiker kan meer

grondverzet vereisen, wat kan leiden tot extra kosten voor grondverplaatsing en mogelijk verwijdering.

- Installatietijd: Het installeren van een langere duiker kan meer tijd in beslag nemen, vooral als er complexe constructietechnieken nodig zijn. Dit kan leiden tot hogere arbeidskosten en mogelijk extra kosten voor het huren van apparatuur.
- Transportkosten: Als de duikeronderdelen geprefabriceerd zijn en naar de bouwplaats moeten worden vervoerd, kunnen de transportkosten toenemen met de lengte van de duiker.

5.3.3.4. Type duiker

Het type duiker heeft eveneens invloed op de uitvoeringskosten. Bijvoorbeeld, een betonnen duiker is aanzienlijk zwaarder, wat resulteert in hogere transportkosten en een langere installatietijd. Bovendien variëren duikers in lengte. HDPE- en PVC-buizen worden vaak aangetroffen in lengtes van 5 tot 6 meter en kunnen eenvoudiger op maat worden gesneden. Daarentegen hebben betonnen duikers doorgaans lengtes van 1,5 tot 2 meter. Dit impliceert dat het plaatsen van een betonnen duiker bij een grotere duikerlengte minder gunstig is, omdat deze in meer delen moet worden geplaatst.

5.3.4. Toepassing

Het terrein, de weeromstandigheden en lengte van de duiker zijn in principe hetzelfde bij elk ontwerp waardoor het niet vergeleken hoeft te worden. Echter heeft het type duiker wel invloed in de mate waarin deze factoren effect hebben op de uitvoeringskosten. In de eerste instantie worden de uitvoeringskosten niet meegenomen omdat ze hetzelfde zijn bij elk ontwerp, maar om dus toch rekening te houden met het feit dat het type duiker wel invloed heeft op de uitvoering, wordt er een factor toegepast als parameter waarmee de materiaalkosten worden vermenigvuldigt. Het bepalen van deze installatiefactoren is lastig omdat de uitvoering project specifiek is. Echter vanuit de praktijk ervaring van de uitvoering worden er in dit onderzoek factoren als standaard gegeven.

Materiaal	Materiaalkosten [USD/m3]	Installatiefactor
Beton	285,00	1,5
Staal	7000,00	1,2
PVC SN4	5900,00	1,0
PVC SN8	5300,00	1,0
HDPE	800,00	1,0
Zand	8,16	1,0
Basecourse	38,4	1,0
Beton staal (wapening)	8300,00	1,0

6. Optimalisatie

Met behulp van het literatuuronderzoek en inzichten uit de praktijk, zijn de ontwerpkeuzes en hun gevolgen beter in kaart gebracht. In dit hoofdstuk wordt toegelicht welke ontwerpkeuzes er zijn, welke invloed ze op elkaar uitoefenen en hoe ze de algehele constructie beïnvloeden. Tot slot wordt besproken hoe deze keuzes zorgvuldig afgewogen moeten worden om tot een geoptimaliseerd ontwerp te komen.

6.1. ontwerpkeuzes

Bij de installatie van een duikerconstructie zijn twee essentiële parameters van belang: het maaiveld en de onderkant van de duiker, oftewel de bok. Elke vorm van optimalisatie binnen de sleuf moet binnen dit gedefinieerde gebied plaatsvinden.

De diameter van de duiker heeft directe invloed op de hoogte ervan en daarmee op het buigend weerstandsmoment, de verdeling van interne krachten en het effectieve dwarskrachtoppervlak van de duiker. Over het algemeen resulteert een grotere hoogte dus in een groter oppervlak en meer materiaal in de doorsnede, wat het structurele vermogen vergroot en daarmee meer weerstand biedt tegen uitgeoefende krachten.

Niettemin heeft de hoogte van de duiker ook invloed op de hoogte van de dekking, binnen het afgebakende gebied. Een hogere duiker betekent automatisch een kleinere dekking. Ondanks dat een hoger profiel meer weerstand biedt, impliceert een kleinere dekking dat er meer krachten moeten worden opgenomen, omdat er minder belasting spreiding over de grond kan plaatsvinden.

Deze afwegingen leiden tot een cruciale ontwerpkeuze, aangezien een hoger profiel resulteert in grotere krachten. In de praktijk blijkt echter dat een grotere dekking, met bijbehorende grotere belasting spreiding, een gunstigere ontwerpkeuze is voor het opnemen van krachten, ondanks de voordelen van een hoger profiel.

Echter, er geldt altijd een minimale diameter voor een duiker die moet voldoen aan het benodigde debiet. Hieruit volgt een minimale hoogte van het duikerprofiel, wat op zijn beurt resulteert in een maximale dekking. Wanneer deze dekking bereikt is en de krachten op de duiker te hoog zijn, kan er nog steeds worden overwogen om de draagkrachtige grondlagen met een grotere spreidingshoek dikker te maken. Door meer gebruik te maken van draagkrachtige grondlagen kan men met dezelfde dekking een grotere belasting spreiding veroorzaken.

Een alternatieve duikermateriaalkeuze kan eveneens een oplossing bieden. Stijve duikers worden vaak toegepast in situaties waar weinig gronddekking is, vanwege hun vermogen om krachten op te nemen en de belasting te verdelen. Aan de andere kant kunnen flexibele duikers goed mee vervormen met de grond, waardoor draagkrachtige grondlagen mogelijk niet nodig zijn.

Niettemin brengen ontwerpkeuzes kosten met zich mee. Een gronddekkingslaag is duur, en draagkrachtige grondlagen zoals basecourse zijn duurder dan grondlagen als zand. Tegelijkertijd zijn een grotere diameter en verschillende duikermaterialen ook kostbaar. Niet alleen materiaalkosten, maar ook uitvoeringskosten spelen een rol bij het ontwerpen van een duikerconstructie.

De optimale ontwerpkeuze wat betreft kosten is afhankelijk van talloze factoren die elkaar beïnvloeden. Het toevoegen van andere criteria aan de vergelijking maakt de zoektocht naar het optimale ontwerp nog complexer. Doordat ontwerpkeuzes elkaar beïnvloeden, leiden vijf verschillende materialen, gecombineerd met vijf diameters en vijf grondpakketten, tot maar liefst 75 verschillende berekeningen bij het vergelijken van mogelijke ontwerpen.

6.2. Optimalisatiestappen

Het handmatig vergelijken van zoveel verschillende ontwerpen is zeer tijdsintensief. Het gebruik van software waar parametrisch ontwerpen mogelijk is, biedt hiervoor een oplossing. Aangezien de ontwerpkeuzes invloed op elkaar uitoefenen, moet echter wel zorgvuldig worden gekozen welke stappen er genomen moeten worden en in welke volgorde, zodat de optimalisatie wordt uitgevoerd.

Allereerst dient aandacht te worden besteed aan de fundering. Hoewel dit onderzoek het onderzoeken van de geschikte fundering buiten beschouwing laat, heeft de definitieve keuze voor een fundering aanzienlijke invloed op het optimale type duiker, zowel stijf als flexibel. Hieruit volgt direct welke materialen met elkaar moeten worden vergeleken.

De tweede stap betreft de diameter. Aan de hand van het debiet wordt eerst bepaald wat de minimale diameter van de duiker moet zijn. Vervolgens bestaat de mogelijkheid om grotere diameters dan het minimum toe te voegen als ontwerpkeuzes.

De laatste overweging betreft de dekking. De dekkingsgrondlagen die in dit onderzoek als standaard worden meegenomen in de optimalisatie bestaan uit basecourse en zand, aangezien deze in de praktijk het meest gangbaar zijn. In eerste instantie hangt de dekking af van de diverse duikerdiameters. Verder worden er verschillende basecourselaagdiktes meegenomen in de optimalisatie. Dit betekent dat het aantal verschillende zandlagen afhankelijk is van het aantal basecourselagen vermenigvuldigd met het aantal diameters.

Na de eerste twee stappen worden een aantal diameters uitgesloten wegens de benodigde debiet. De overgebleven ontwerpkeuzes worden vervolgens gecombineerd met verschillende dekkingspakketten. Hierna ondergaan deze ontwerpkeuzes, in combinatie met de dekkingspakketten, een toetsing op basis van constructieve eisen.

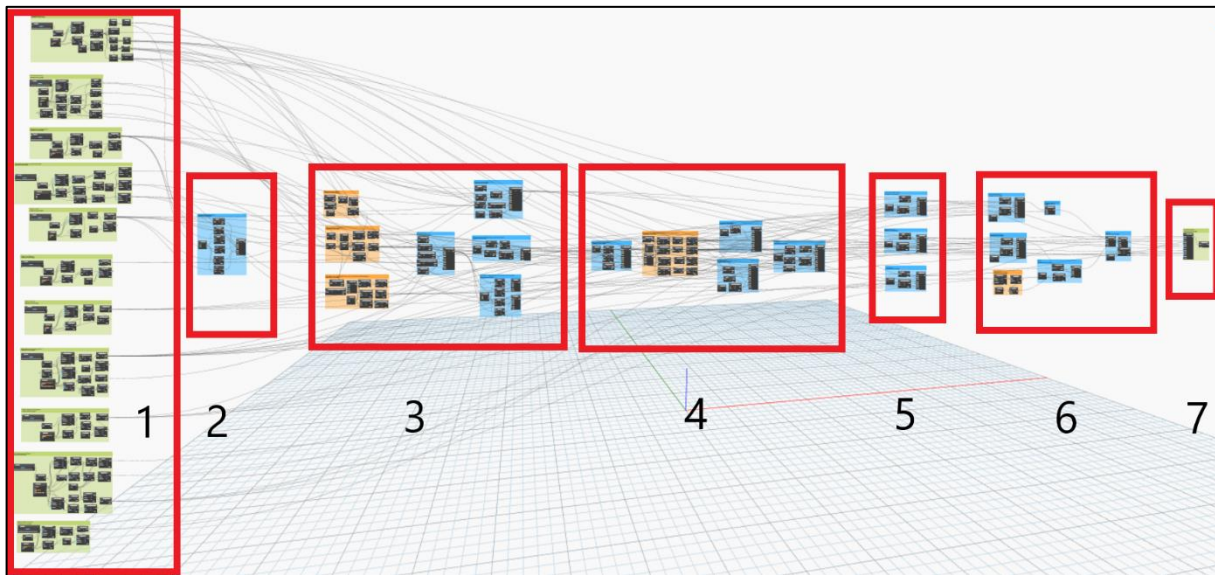
Ten slotte komen de criteria, kosten en MKI-score, aan bod. Bij elk ontwerp wordt gekeken naar de invloed van de verschillende ontwerpkeuzes op de kostenanalyse en de Milieu Kosten Indicator (MKI). Door deze criteria tegen elkaar af te wegen, zal het meest optimale ontwerp naar voren komen.

7. Resultaten

De resultaten van dit onderzoek zijn gepresenteerd in de vorm van een Dynamo-script, voorzien van een handleiding, en een Excel-sheet die fungeert als validatiestap. Zowel het Dynamo-script als de Excel-sheet zijn te vinden in de bijlage. De handleiding wordt in dit hoofdstuk behandeld, die zal bestaan uit een stroomschema en stappenplan van zowel het script als de Excel-sheet.

7.1. Handleiding

7.1.1. Stroomschema



Figuur 16 stroomschema Dynamo

Het Dynamo-script is onderverdeeld in zeven delen (zie figuur 18). Binnen deze delen bevinden zich blokken. De groene blokken duiden op het importeren of exporteren van gegevens naar Excel, de blauwe blokken omvatten berekeningen, en de oranje blokken worden gebruikt voor het verwerken en herhalen van gegevens, zodat er doorgerekend kan worden. Nu volgt een beschrijving van de zeven delen:

1. Gegevens importeren: In dit eerste deel worden alle gegevens uit het Excel-sheet met invulschema gehaald. De gegevens uit het sheet worden verwerkt zodat ze leesbaar zijn voor het Dynamo-script.
2. Debietseis: In het tweede deel worden de ingevulde duikers gecontroleerd op de binnendiameter om te verifiëren of deze groot genoeg is om te voldoen aan het benodigde debiet.
3. Belasting per sleufontwerp: Hier worden de afgevalen diameters gefilterd en verschillende sleufontwerpen opgesteld. Voor elk sleufontwerp worden vervolgens de waterbelasting, grondbelasting en verkeersbelasting berekend.
4. Belasting op duiker: In dit deel worden de concentratiefactoren berekend, gevolgd door de berekening van de belasting op de duiker, zowel voor de ringtoetsing als de liggertoetsing.
5. Toetsingen: Vervolgens worden de duikers getoetst.
6. kostenanalyse: Voor duikers die voldoen aan de constructieve eisen, worden de MKI-score en materiaalkosten bepaald. Daarna wordt berekend welk ontwerp het meest geschikt is.
7. Gegevens exporteren: Het optimale duikerontwerp wordt geïmporteerd naar een Excel-sheet.

7.1.2. Stappenplan

Bij het stappenplan wordt ervan uitgegaan dat de gebruiker toegang heeft tot alle benodigde producten in de bijlage en dit rapport heeft gelezen, waardoor hij kennis heeft over het ontwerpen van een duiker. Verder is dit stappenplan slechts een uitleg over hoe de Excel-sheet en het Dynamo-script moeten worden ingevuld om een optimaal ontwerp te berekenen voor een gegeven casus. Informatie over Dynamo en de gebruikte code in het script is te vinden in Bijlage VI.

7.1.2.1. Stap 1: Excel-sheet invullen

Open het Excel-sheet "invulschema dynamo script" dat te vinden is in de map "Mechanica". Elk blad in dit Excel-sheet vertegenwoordigt een groen blok in het eerste gedeelte van het stroomschema van het Dynamo-script. Uit deze bladen worden de parameters geïmporteerd. De vakjes die in Excel moeten worden ingevuld, zijn aangegeven met kleur (zie tabel 7).

Tabel 7 Instructies Excel-sheet

Instructies:	Kleur
Zelf invullen: Hetzelfde als de Excel-sheet parameters. Afhankelijk van zelfgekozen casus	
Zelf invullen: Te achterhalen met behulp van de gekoppelde literatuur of eigen literatuur.	
Niet invullen: Het is al ingevuld of staat vast	

Parameters:

Het blad "Parameters" is het eerste invulblad. Hierop staan de parameters die afhankelijk zijn van de gegeven casus van het project. Hier kan ook worden ingevuld hoeveel verschillende basiscourse-lagen moeten worden vergeleken en wat de maximale dikte van die basiscourse-laag is. Bijvoorbeeld, als er 4 lagen moeten worden vergeleken met een maximale dikte van 1000 mm, zal Dynamo zoeken naar een optimalisatie tussen de diktes van de basiscourselagen; 250, 500, 750 en 1000 mm.

Wegopbouw:

Op dit blad kan worden aangegeven hoe, in het geval van een weg, de weg is opgebouwd. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit asfalt met daaronder een basecourse laag, of er kan mogelijk een betonplaat onder liggen. In theorie is het ook mogelijk om in deze sheet grondlagen in te vullen tot aan de duiker. Echter moet opgemerkt worden dat de optimalisatie van de grondopbouw dan buiten beschouwing gelaten moet worden.

Sleufontwerp:

Op dit blad kunnen de ontwerpkeuzes van de sleuf worden ingevuld. Dit omvat de breedte van de sleuf, de opleghoek en de grondsoortgroep van de sleuf. Verder kunnen de elasticiteitsmodulus van de grond rondom de sleuf worden ingevuld. Hierbij zijn E4 2ak van belang aangezien de elasticiteitsmodulus en de opleghoek afhankelijk is van het type fundering. Denk hierbij aan een stevige zandbodem of een paalfundering met een betonplaat. Het bepalen van deze parameter valt echter buiten de scope van dit project.

Grondopbouw optimalisatie:

Op dit blad kan worden bepaald welke lagen geoptimaliseerd moeten worden. Hoewel dit verslag rekent met basecourse en zand, kunnen materiaaleigenschappen in principe worden aangepast naar andere materialen. De verschillende diktes van de bovenste grondlaag (basecourse) in de tabel zijn vastgesteld in het blad "Parameters", terwijl de onderste grondlaag (zand) wordt aangevuld tot aan de onderkant van de duiker.

Klasse:

Op dit blad kan worden aangegeven met welke sterkteklasse van duikermaterialen wordt gerekend. De daadwerkelijke materiaaleigenschappen bevinden zich verder in het script en zijn al ingevuld.

Materialen:

In de Excel-bladen die genoemd zijn naar de verschillende materialen, kunnen de afmetingen van de duikers worden ingevuld. Deze afmetingen kunnen worden aangepast aan de duikers die beschikbaar zijn bij lokale leveranciers. Er is geen beperking op het aantal verschillende duikers dat kan worden ingevuld, dus de tabel kan naar wens worden uitgebreid.

kostenanalyse:

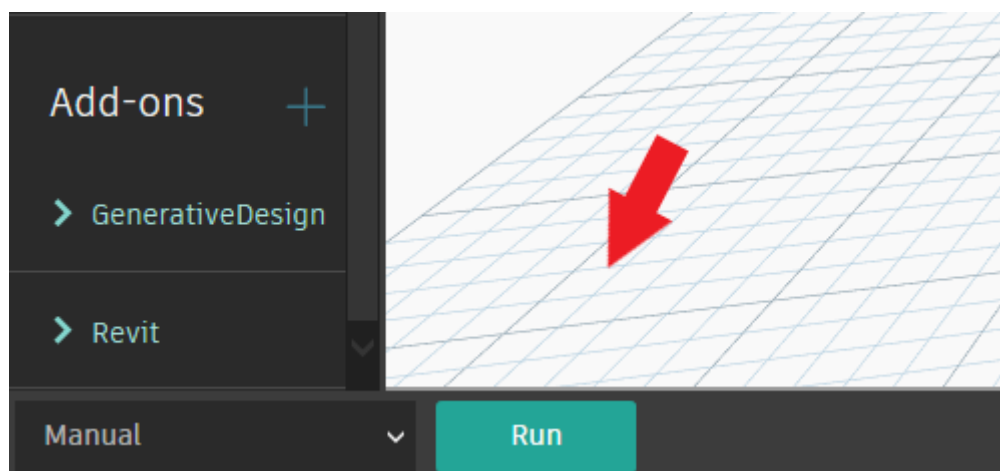
Een aantal Excel-bladen verder komt het kostenanalyse-gedeelte met het blad "Materiaalkosten", waar de materiaalkosten kunnen worden ingevuld. Deze kosten kunnen uiteraard variëren over tijd. Daarnaast kunnen bij de bladen "MKI Gegevens (materiaal)" de verwachte hoeveelheden van de uitvoeringsprocessen worden ingevuld. De hoeveelheden van de gebruikte materialen worden automatisch doorerekend in Dynamo.

Overige Excel-bladen:

Uit de overige Excel-bladen worden ook gegevens geïmporteerd. Deze zijn echter afhankelijk van de mechanische rekenmethodes zelf en hoeven dus niet aangepast te worden, tenzij bepaalde waarden in de loop der tijd veranderen. Het aanpassen vereist echter kennis van de onderliggende theorie.

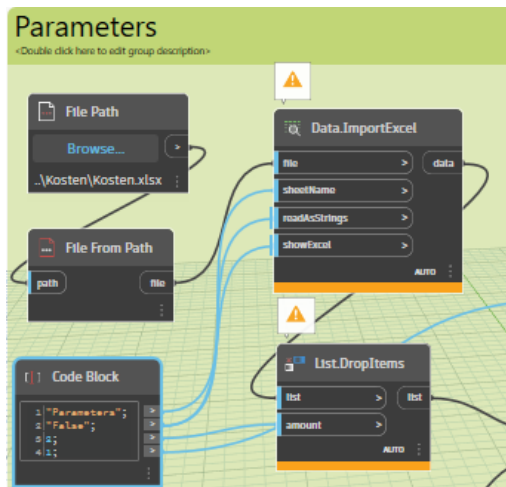
7.1.2.2. Stap 2: Dynamo runnen

Open een van de dynamo scripts. In principe om het script te laten runnen hoeft er alleen geklikt te worden op de knop "Run" links onderin (zie figuur 19) en dynamo begint alle scenario's te berekenen met een Runtime van max 30 sec.



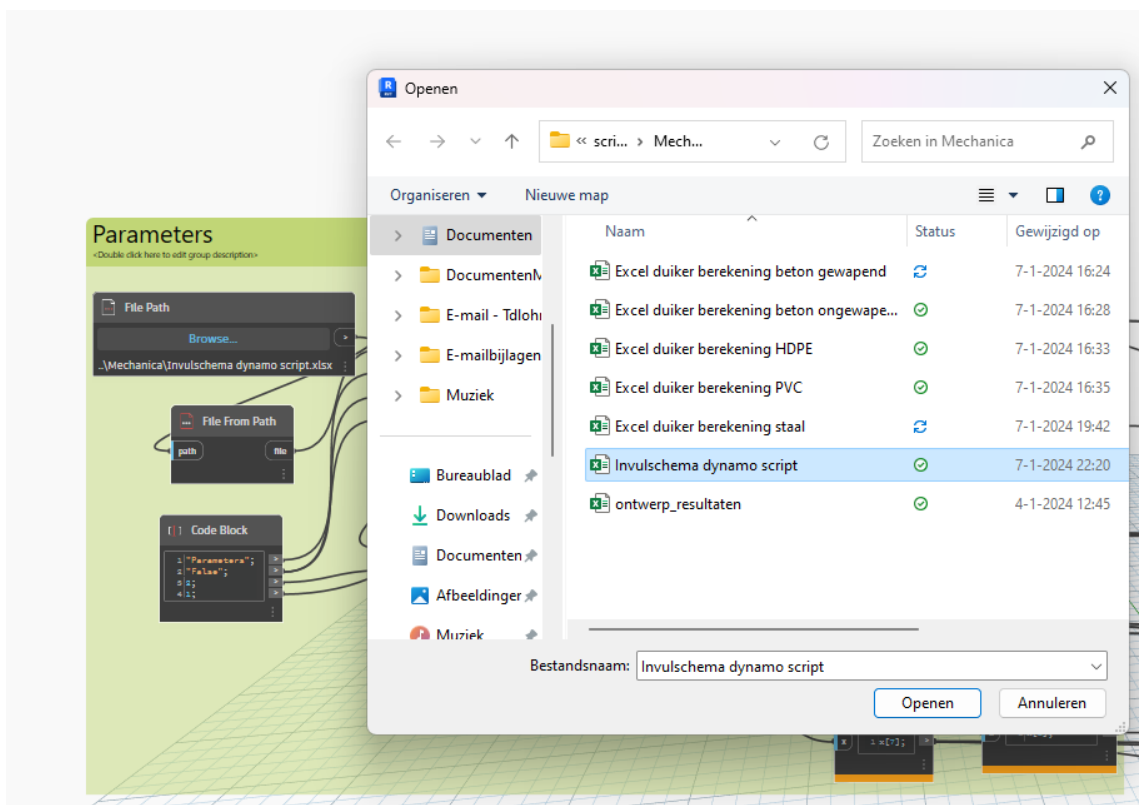
Figuur 17 Dynamo instructie: Run

Echter, bij de eerste keer zal er een foutmelding verschijnen (zie figuur 20) omdat de bestandslocatie van het Excel-sheet "invulschema dynamo script" niet juist is.



Figuur 18 Dynamo instructie: foutmelding

Dit kan eenvoudig worden aangepast door te klikken op "Browse" in het zwarte blok van "File Path" en vervolgens in de verkenner de juiste locatie van het Excel-bestand te selecteren (zie figuur 21).



Figuur 19 Dynamo instructie: Browse

7.1.2.3. Stap 3: Validatie

Nadat Dynamo correct is uitgevoerd, wordt er een Excel-bestand geopend met de resultaten van het Dynamo-script (figuur 22). Deze resultaten kunnen worden gevalideerd met het bijbehorende Excel-bestand "Excel duiker berekening (materiaal)". Dit Excel-bestand wordt op een vergelijkbare manier ingevuld als het invulschema van het Dynamo-script. Het gebruik van kleuren geeft aan wanneer iets moet worden ingevuld, en dezelfde secties, namelijk parameters, wegopbouw, sleufontwerp en sterkteklasse, komen overeen. Deze secties moeten exact hetzelfde worden ingevuld als in het invulschema.

	A	B	C	D
1	Ontwerp	Hoeveelheid	Eenheid	
2	Di	1100	mm	
3	d	15	mm	
4	optimalisatie laag	100	mm	
5	opvulmateriaal	1520	mm	
6	as-confugiratie stappen	7		
7	Ring: Interne krachten	0,557075321	u.c	
8	Ligger: dwarskracht	0,977770529	u.c	
9	Ligger: buiging	0,967877611	u.c	
10				

Figuur 22 resultaten dynamo

	A	B	C	D
1	Verificatie			
2	onderdeel	input	eenheid	
3	Di	1100	mm	
4	d	15	mm	
5	basecourse laagdikte	100	mm	
6	as-confugiratie stappen	7		
7				
8				
9	Controle			
10	Toetsing	Hoeveelheid	eenheid	
11	Ring: Interne krachten	0,557073288	u.c	
12	Ligger: dwarskracht	0,977770442	u.c	
13	Ligger: buiging	0,967877567	u.c	
14				
15				

Figuur 23 resultaten excel

Als dat goed is gegaan, kan het Excel-blad "Verificatie" worden ingevuld. De blauwe vakken geven aan welke ontwerpkeuzes moeten worden ingevuld om het Dynamo-script te valideren met de resultaten van het optimale ontwerp. Wanneer dit is gedaan, moeten de uitkomsten van de toetsingen overeenkomen.

Het kan echter ook voorkomen dat alle duikers niet voldoen aan de constructieve toetsingen. In dat geval zullen de resultaten van het Dynamo-script in het Excel-sheet aangeven welke toetsing niet voldoet (zie figuur 24). Bij deze situatie kan er in het validatie-Excel-bestand worden gekeken naar de reden waarom een of meerdere toetsingen niet voldoen. Na het Excel-blad "Verificatie" volgt namelijk de volledige berekeningen. Met enige mechanische kennis kan er, na het bekijken van de toetsing, worden besloten welke parameters er aangepast moet worden om wel aan de toetsingen te voldoen.

	A	B	C	D
1	Ontwerp	Hoeveelheid	Eenheid	
2	Di	Fout	mm	
3	d	Fout	mm	
4	optimalisatie laag	Fout	mm	
5	opvulmateriaal	Fout	mm	
6	as-confugiratie stappen	Fout		
7	Ligger: dwarskracht	voldoet niet	N/mm2	
8	Ligger: buiging	voldoet niet	u.c	
9	Ring: buigstrekke	voldoet	N/mm2	
10				

Figuur 20 Dynamo resultaten in Excel

7.2. Verificatie

De resultaten van het script dienen te worden gecontroleerd om vast te stellen of het script correct functioneert. Het doel van het script is om het optimale ontwerp als output te genereren. Hierbij zijn twee cruciale aspecten met betrekking tot het ontwerp als output van belang. Punt één: zijn de constructieve eisen daadwerkelijk vervuld? En punt twee: is het resulterende ontwerp ook daadwerkelijk het optimale ontwerp?

7.2.1. Constructieve eisen

De resultaten van het script zijn gevalideerd met behulp van een Excel-sheet. De totstandkoming van het Excel-sheet had oorspronkelijk tot doel om het te gebruiken als een hulpmiddel bij het opstellen van het Dynamo-script. Het Excel-sheet is doorgenomen in samenwerking met ingenieurs van AMB N.V.. Hierbij zijn verschillende parameters ingevuld voor verschillende types duikers, en zijn de resultaten gecontroleerd of ze wel realistisch zijn op basis van praktijkervaring. Het Excel-sheet is dus niet beperkt tot een specifiek scenario, zoals bij handberekeningen, maar kan worden uitgevoerd door dezelfde parameters in te vullen als die worden gebruikt in het Dynamo-script. Zoals te zien is in figuren 21 en 20, vertonen de resultaten van zowel het Dynamo-script als het Excel-sheet vrijwel exacte overeenkomsten. De constructieve berekeningen uitgevoerd door Dynamo zijn consistent, zowel bij deze set parameters als bij andere varianten.

7.2.2. Optimale ontwerp

Bij de berekening van een duikerconstructie spelen drie cruciale ontwerpkeuzes een rol, namelijk het selecteren van het meest geschikte type duiker, het bepalen van de benodigde diameter voor het debiet, en vervolgens het opstellen van een grondsamenstelling. Pas nadat deze keuzes zijn gemaakt, kan worden berekend of de duiker aan de constructieve eisen voldoet. De materiaalkosten en de MKI-score zijn grotendeels afhankelijk van deze drie ontwerpkeuzes. Bij een handberekening kan de voorkeur worden gegeven aan duurzame en economische ontwerpkeuzes, zoals bijvoorbeeld het kiezen van de minimale diameter met een zo beperkt mogelijke basecourse. Echter, indien de constructieve eisen niet worden gehaald, is het moeilijk om de ontwerpkeuzes eenvoudig aan te passen, omdat dan de volledige berekening opnieuw moet worden uitgevoerd.

Bij het ontwikkelen van het script is er bewust voor gekozen om Dynamo elke mogelijke combinatie van ontwerpkeuzes te laten berekenen, en pas achteraf te bepalen welk ontwerp in de kostenanalyse als het optimale ontwerp naar voren komt. Het optimale ontwerp dat door Dynamo wordt voorgesteld, is eenvoudigweg het eerste ontwerp dat met minimale kosten voldoet aan de constructieve eisen.

Doordat alle denkbare combinaties van ontwerpkeuzes met elkaar worden vergeleken op basis van materiaalkosten en de MKI-score, en aangezien de constructieve eisen consistent zijn met de uitkomsten van het Excel-sheet, zijn de resultaten van het script op deze wijze geverifieerd.

7.3. Praktische toepasbaarheid

De opgeleverde producten aan AMB N.V. kunnen worden onderverdeeld in Excel-sheets en Dynamo-scripts. De Excel-sheets zijn direct toepasbaar in de praktijk. Na grondig literatuuronderzoek is een gestandaardiseerde rekenmethode ontwikkeld voor het berekenen van verschillende typen duikers. Met behulp van de Excel-sheets is het mogelijk om, vergelijkbaar met handmatige berekeningen, een specifieke situatie te selecteren. Vervolgens rekent de Excel-sheet automatisch alle benodigde parameters door, om te bepalen of de duiker voldoet aan de constructieve eisen op basis van de gemaakte ontwerpkeuzes. Wanneer meerdere situaties gelijktijdig worden berekend, moet het Dynamo-script ingezet worden.

Het doel van het script is om het optimale ontwerp als output te geven. Dit optimale ontwerp wordt berekend aan de hand van de ingevulde parameters. Wat betreft de praktische toepasbaarheid van het script zijn de elasticiteitsmodulus van de grondbodem, aangeduid als E_4 , en de opleghoek (2α) belangrijke parameters. Deze parameters zijn namelijk afhankelijk van het type fundering, terwijl de fundering buiten de scope van dit onderzoek valt. Het is daarom belangrijk om toe te lichten wat dit inhoudt voor de praktische toepasbaarheid van het script.

In situaties waar sprake is van een onstabiele bodemgesteldheid en funderingsmaatregelen nodig zijn, kunnen de maatregelen verschillen per type duiker. Flexibele duikers zijn bijvoorbeeld geschikter voor een onstabiele bodemgesteldheid, waardoor betonnen duikers over het algemeen meer grondverbetering vereisen dan flexibele duikers. In geval van een paalfundering kan het voorkomen dat grondverbetering bij een betonnen duiker noodzakelijk is, terwijl dit bij een flexibele duiker voldoende is.

Wanneer funderingsmaatregelen verschillen, moet het script handmatig meerdere keren worden uitgevoerd met de elasticiteitsmodulus en opleghoek van verschillende funderingsmethoden. De optimal designs die uit het script resulteren, moeten vervolgens met elkaar worden vergeleken door de kostenevaluatie uit het script te combineren met een handmatige kostenanalyse van de diverse funderingsmethoden. In het geval van een paalfundering moet er worden overwogen of er een extra criterium toegevoegd moet worden, namelijk de risico's. Aangezien een paalfundering andere risico's met zich meebrengt tijdens de uitvoering. Uit de gecombineerde analyse kan pas duidelijk worden welk ontwerp optimaal is. Bij gebruik van het script op deze wijze kan het in de praktijk worden toegepast.

Echter, in gevallen van een stabiele bodemgesteldheid zonder funderingsmaatregelen, is het script gelijk praktisch toepasbaar. Dit komt doordat de uitkomsten van de kostenanalyse, wegens het ontbreken van funderingsmaatregelen, direct de juiste kosten weergeven. In dit geval hoeft het script slechts één keer te worden uitgevoerd met de juiste elasticiteitsmodulus en opleghoek van de grondbodem.

Verder is het script praktisch toepasbaar wanneer enkel het optimale ontwerp van één van de type duikers wordt berekend. Als bij een type duiker de grondopbouw en diameter moeten worden bepaald, vereist dit ook slechts één uitvoering van het script met de juiste elasticiteitsmodulus en opleghoek van de grondbodem, waarbij de kostenanalyse correct is omdat de funderingsmaatregelen voor dat type duiker hetzelfde zijn.

8. Conclusie

In dit onderzoek wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag: "Hoe kan een duiker parametrisch ontworpen worden met optimalisatie via een kostenanalyse?" Om deze vraag te beantwoorden, zijn drie deelvragen geformuleerd, namelijk:

1. Welke informatie is essentieel voor het parametrisch ontwerpen van een duiker?
2. Hoe kan een script worden ontwikkeld dat alle beschikbare data en literatuur over duikers omzet in bruikbare informatie voor een softwareprogramma, met als doel het genereren van het optimale duikerontwerp?
3. Op welke manier kan een kostenanalyse worden geïntegreerd in het script, waardoor diverse typen duikers onderling kunnen worden vergeleken en het ontwerp volgens vooraf bepaalde criteria kan worden geoptimaliseerd?

Voor de beantwoording van de eerste deelvraag is onderzoek gedaan naar verschillende rekenmethodes voor het bepalen van de grondbelasting, verkeersbelasting en het toetsen van verschillende typen duikers. Hieruit is gebleken dat het bepalen van de concentratiefactor een cruciale rol speelt in het vaststellen van de belasting die de duiker opneemt vanuit de grond en het verkeer, vanwege stijfheidsverschillen in de sleuf. Verschillende methodes voor het toetsen van duikers zijn besproken, waarbij de ligger- en ringwerking afhankelijk zijn van het type duiker en de stijve of flexibele aard van het duikermateriaal.

Nadat de rekenmethodes zijn vastgesteld, zijn de parameters gedefinieerd via een Excel-sheet, waarbij dit fungeert als invulschema met een bijbehorende handleiding. Dynamo haalt deze parameters op en verwerkt ze in het script, waarin de rekenmethodes zijn opgenomen. Het Dynamo-script berekent de belasting en toetst de verschillende diameters met bijbehorende grondlagen op het benodigde debiet en constructieve eisen. Hiermee wordt de tweede deelvraag bijna volledig beantwoord.

Om het optimale ontwerp te genereren, is echter nog een kostenanalyse nodig, waar de derde deelvraag antwoord op geeft. De criteria omvatten een MKI-score en een constructieve kostenvergelijking. De kostenvergelijking houdt alleen rekening met materiaalkosten vanwege de complexiteit van de uitvoeringskosten. De MKI-score is gebaseerd op de rekenmethode van de Nationale Milieu Database. De benodigde data voor het berekenen van de kosten en het bepalen van de MKI-score wordt eveneens ingevuld in het Excel-sheet.

Tot slot worden duikerontwerpen die voldoen aan de constructieve eisen met elkaar vergeleken op basis van de kostenanalyse, waarbij het beste ontwerp als uitkomst wordt gegenereerd in het Dynamo-script. Hiermee is de hoofdvraag, "Hoe kan een duiker parametrisch ontworpen worden met optimalisatie via een kostenanalyse?", beantwoord.

9. Discussie

Het onderzoek naar diverse rekenmethodes en literatuur heeft een robuuste basis gelegd voor het parametrisch ontwerpen van duikers. Het heeft inzicht verschaft in verschillende factoren die van invloed zijn op ontwerpalternatieven. Hoewel de methoden onderling zijn vergeleken en beoordeeld door ingenieurs, is het mogelijk dat toekomstige publicaties verbeterde, nauwkeurigere rekenmethodes presenteren, wat kan leiden tot andere ontwerpkeuzes.

Verder blijkt de relevantie van de constructieve kosten sterk afhankelijk te zijn van specifieke omgevingsfactoren. Het opstellen van een parametrisch script zonder een specifieke casus blijkt een complexe taak te zijn en vergt bijna een opzichzelfstaand onderzoek. In deze studie worden uitvoeringsfactoren toegevoegd, maar het bepalen van deze factoren vereist aanzienlijke praktische kennis.

Het contact met leveranciers stuitte op enige moeilijkheden, wat de nauwkeurigheid van de ingevulde maatvoering en materiaaleigenschappen heeft beïnvloed. Deze uitdagingen kunnen een aanzienlijke impact hebben op de betrouwbaarheid van het ontwerp. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om iteratief te zoeken naar de optimale diameter in plaats van te werken met standaardmaten, wat een interessant aspect kan toevoegen aan het ontwerpproces. Niettemin moeten de potentieel hogere kosten van op maat gemaakte duikers zorgvuldig worden afgewogen tegen de optimalisatie van het ontwerp.

De rol van de funderingsmethode blijkt een dynamische factor te zijn die kan leiden tot verschillende uitkomsten, en een iteratieve benadering van de berekeningen is vereist. Het niet meenemen van de funderingsmethode in het parametrische ontwerp kan leiden tot onzekerheid over de optimaliteit van de uitkomsten. Tenzij het script handmatig wordt uitgevoerd met verschillende funderingsmethoden en de resultaten onderling worden vergeleken.

Tot slot kan ervoor worden gekozen om alle Dynamo-scripts samen te voegen. In dit onderzoek zijn ze echter gescheiden vanwege de rekenkracht die nodig is om alles in één keer te berekenen. Dit is handig bij het opstellen en testen van een script. Bovendien is het niet altijd nodig om elk duikermateriaal met elkaar te vergelijken, en is er misschien alleen berekening nodig voor een betonnen duiker. Dit is al helemaal het geval wanneer er in de praktijk sprake is van meerdere funderingsmethodes. In dat geval kan een samengevoegd script, wanneer het meerdere keren moet runnen, onprettig zijn vanwege de langere opstarttijd en berekening.

10. Aanbeveling

In de zoektocht naar optimalisatie van het parametrisch ontwerpen van duikers, worden in dit hoofdstuk enkele cruciale aanbevelingen voorgesteld. Deze verbeteringen zijn ontstaan uit de behoefte om het onderzoek te verdiepen en een meer gedetailleerd begrip te creëren van verschillende onderdelen van het ontwerpproces. Hierbij wordt gekeken naar de implementatie van een script met funderingsberekeningen, aanvullingen bij het Excel-sheet en integratie van validatieprocedures. Deze aanpassingen hebben als doel de nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en informatiewaarde van het gehele ontwerpproces te versterken. Verder worden er specifieke mogelijkheden van het script toegelicht, die helpen met het verkrijgen van een beter inzicht in het nemen van ontwerpbeslissingen die uiteindelijk leiden tot een geoptimaliseerd en doeltreffend ontwerp.

Uitbreiding Onderzoek:

Het onderzoek kan aanzienlijk worden verrijkt door de implementatie van een script dat specifiek de funderingsberekening omvat. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om de impact van diverse funderingsmethoden op het ontwerp van duikers grondig te onderzoeken. In dit geval is het noodzakelijk dat de verschillende scripts van de type duikers worden samengevoegd. Dit resulteert in een iteratief proces waarbij de funderings- en duikerontwerpen samen convergeren naar een optimaal ontwerp.

Verder biedt het Excel-sheet potentieel voor verbetering door gedetailleerde informatie toe te voegen over de maatvoering van duikers die daadwerkelijk geleverd kunnen worden, met specifieke aandacht voor materiaaleigenschappen, vooral bij kunststof materialen. Deze aanvulling geeft een nauwkeuriger beeld van de beschikbare opties en versterkt daarmee de informatieve waarde van het gehele ontwerpproces.

Een andere aanbeveling betreft de integratie van validatieprocedures voor MKI en materiaalkosten binnen het Excel-sheet. Deze stap vergroot de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de resultaten door een gestructureerde validatiestap op te nemen.

Om de kostenberekeningen verder te verfijnen, zou het zinvol zijn om uitvoeringsmaatregelen op te nemen in de overwegingen. Het toevoegen van deze dimensie biedt een diepgaander inzicht in de totale kostenstructuur van het ontwerp, wat van cruciaal belang is bij het nemen van weloverwogen beslissingen.

Mogelijkheden met het Script:

Het script opent de mogelijkheid om diverse situaties te bekijken door Dynamo verschillende combinaties van duikertypen, grondopbouw en funderingsmethoden te laten berekenen. Hierdoor ontstaat een gedetailleerder begrip van de meest geschikte toepassingen in verschillende situaties, wat bijdraagt aan het verder verfijnen van de ontwerpaanpak.

Een bijkomende mogelijkheid die het script biedt, is de uitvoering van een diepgaand onderzoek naar de kostenverschillen tussen op maat gemaakte duikers met een optimale diameter en standaardduikers met minder optimale ontwerpen. Dit onderzoek werpt licht op de financiële implicaties van optimalisatie in het ontwerpproces, waardoor ontwerpers beter geïnformeerde beslissingen kunnen nemen en optimalisatiekeuzes in een breder kader kunnen plaatsen.

11. Bronnenlijst

Buitenriolering. (2016). *Frelu*.

Constructieberekening profielen - buis. (z.d.-a). <https://www.mile17.nl/buis.php>

Deflection of buried pipes. (2022). *Journal AWWA*, 114(1), 68–75.

<https://doi.org/10.1002/awwa.1847>

Handleiding wegenbouw. (1988). *Rijkswaterstaat*.

[[:NL]]Betonnen rioolbuis Rechthoek[:EN]]Box culvert[:] -. (2021, 2 augustus).

<https://www.vabi.sr/producten/bestrating-en-wegenbouw/rioolbuizen-putringen/betonnen-rioolbuis-rechthoek/>

PVC - polyvinylchloride | *Eigenschappen, bewerking & soorten*. (z.d.). Vink Kunststoffen.

<https://www.vinkkunststoffen.nl/kunststofsoorten/pvc-polyvinylchloride>

Riolering | *Kuldipsingh*. (z.d.). <https://webshop.kuldipsingh.net/nl/riolering>

Ronde Buis | *Designerdata*. (z.d.).

<https://designerdata.nl/nl/calculatoren/weerstandsmoment/ronde-buis>

Technische eigenschappen van kunststof - *PerlaPlast Kunststofshop*. (z.d.). Perlaplast

Kunststofshop. <https://perlaplast-kunststofshop.nl/technische-eigenschappen-kunststoffen>

Berekening Duikers Nieuwekoop. (2012). *Oranjewoud*. [https://repository.officiële-](https://repository.officiële-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2014-5291/1/pdf/exb-2014-5291.pdf)

[overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2014-5291/1/pdf/exb-2014-5291.pdf](https://repository.officiële-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2014-5291/1/pdf/exb-2014-5291.pdf)

Betonnen buizen in de grond. (1999). *VPB*. [https://docplayer.nl/10023533-Betonnen-buizen-](https://docplayer.nl/10023533-Betonnen-buizen-in-de-grond.html)

[in-de-grond.html](https://docplayer.nl/10023533-Betonnen-buizen-in-de-grond.html)

Computerprogramma om leidingen conform de NEN 3650:2012 te berekenen. (2012). *Sigma*.

<https://schrijvers.nl/wp-content/uploads/2016/10/Sigma-Cursus-Boek.pdf>

Directives for selection of asbestos-cement pipes subject to external loads with or without internal pressure. (1986). *ISO 2785*.

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/7771/6c02e91ddc8b4f68be17051fc5ca6b84/ISO-2785-1986.pdf>

Gronddruk en bovenbelasting bij watertransportleidingen. (1972). *edepot*.

<https://edepot.wur.nl/404076>

- Onderzoek aardbevingsbelasting op ondergrondse leidingsystemen. (2016). Avans.
https://www.cob.nl/wp-content/uploads/2018/01/Aardbevingsbelasting-ondergrondse-leidingen_Walta-2016.pdf
- Ontwikkeling schaalproeven voor rioleringsbuizen onder de grond experimenteel onderzoek. (2015). TU Eindhoven. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46914178/801717-1.pdf>
- PLASTICITEITSLEER. (2021). TU Delft.
 Vergeet-mij-nietjes. (z.d.). TU Delft. Geraadpleegd op 24 september 2023, van
https://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT3109/collegestof/invloedslijnen/files/VGN.pdf
- Wikipedia-bijdragers. (2019, 9 september). *Poisson-factor*. Wikipedia.
<https://nl.wikipedia.org/wiki/Poisson-factor>
- Eigenschappen Constructiekunststoffen. (2000). VINK.
PVC - polyvinylchloride | Eigenschappen, bewerking & soorten. (z.d.). Vink Kunststoffen.
<https://www.vinkkunststoffen.nl/kunststofsoorten/pvc-polyvinylchloride>
- Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren. (2002). TAW. <https://edepot.wur.nl/366745>
- Stichting Nationale Milieudatabase. (z.d.). *Categorie 3 data*. NMD.
<https://milieudatabase.nl/nl/milieudata-lca/categorie-3-data/>
- Bridge design. (z.d.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
 Geraadpleegd op 3 november 2023, van
<https://drive.google.com/file/d/1BQGDQUFBkdzumxQobDXpmUh2-W4b31Sm/view>
- Constructieve berekeningen van betonnen buizen en putten. (1999). VPB. Geraadpleegd op 5 oktober 2023, van
<https://drive.google.com/file/d/1ADy4vifN64mjGHOaItY2Yg1ep72lKSyp/view>
- Pipe Bedding and Backfill. (1996). United States Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Geotechnical Services Denver, Colorado.
https://drive.google.com/file/d/1Cd9uFX07OzSNs6RrIqUH_q8HbpbDhOhX/view?usp=sharing

Design Methodology. (1998). American Association of State Highway and Transportation

Officials. <https://drive.google.com/file/d/1DYSVhDe3c6SXL7HEk->

[HMpAs_ZUljAKP/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1DYSVhDe3c6SXL7HEk-HMpAs_ZUljAKP/view?usp=sharing)

Straatriolering ontwerp en aanleg van vrij verval kunststof rioolssystemen. (2017). Wavin.

Geraadpleegd op 5 oktober 2023, van

https://drive.google.com/file/d/1Z2ExbZ4o6_7T14cBvOzY7x9cdz5vuhcI/view?usp=s

[haring](https://drive.google.com/file/d/1Z2ExbZ4o6_7T14cBvOzY7x9cdz5vuhcI/view?usp=sharing)

Beton tabellen. (2014). NEN Connect.

<https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=3625916&RNR=3625916&token=9b>

[55beae-aef2-4685-b215-9fb6d9c8db12&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=3625916&RNR=3625916&token=9b55beae-aef2-4685-b215-9fb6d9c8db12&type=pdf#pagemode=bookmarks)

12. Bijlage I: Debiet berekening

12.1. Debiet berekening

Het debiet, of de doorstroming van water, is een cruciaal aspect bij duikerconstructies en speelt een fundamentele rol in verschillende opzichten. Het debiet is een kernparameter bij het hydraulisch ontwerpen van duikerconstructies. Het verwijst naar de hoeveelheid water die door de duiker moet stromen om te zorgen voor voldoende afvoer en voorkoming van overstromingen.

Het ontwerp moet rekening houden met de verwachte waterstromen onder verschillende omstandigheden, zoals normale weersomstandigheden en extreme weersomstandigheden. De inwendige diameter van de duiker is afhankelijk van het debiet. Het debiet moet daarom zorgvuldig bepaald worden.

12.1.1. Chezy

Er zijn verschillende manieren om het debiet te berekenen. Een daarvan is met de formule van Chezy. De algemene vorm van de Chezy-formule is:

$$Q = A * C * \sqrt{R * I}$$

Waarin:

Q = Debiet [m³/s]

A = Oppervlakte [m²]

C = Chezy-coëfficiënt

R = Hydraulische straal [m]

I = Verhang [m/m]

De Chezy-coëfficiënt is een empirische bepaalde constante afhankelijk van de ruwheid van de duiker, en wordt bepaald volgens de volgende formule:

$$C = 18 \log \frac{12R}{k}$$

Waarin:

R = Hydraulische straal [m]

k = wandruwheid [m]

De wandruwheid van een duiker varieert afhankelijk van het gebruikte materiaal. Bij betonnen duikers wordt doorgaans een wandruwheid van 1,5 mm gehanteerd. Voor gladde kunststof materialen ligt de wandruwheid over het algemeen rond 1 mm. Hoewel de literatuur over de wandruwheid van staal niet eenduidig is, wordt doorgaans aangenomen dat deze vergelijkbaar is met die van gladde materialen, en wordt daarom een wandruwheid van 1 mm aangenomen bij staal, aangezien staal vaak wordt beschouwd als een materiaal met een glad oppervlak.

Bij het bepalen van de hydraulica wordt er aangenomen dat de duiker volledig gevuld is met water. In deze situatie kan de hydraulische straal als volgt worden berekend:

$$R = \frac{A}{P}$$

Waarin:

A = Oppervlakte [m²]

P = Natte omtrek [m]

12.1.2. Manning/Strickler

Een alternatieve methode voor het berekenen van het debiet is met behulp van de formule van Manning/Strickler. De formule is gebaseerd op de wet van Manning en de Strickler-vergelijking. De toepassing van deze formule wordt als volgt beschreven:

$$Q = A * k_m * R^{\frac{2}{3}} * I^{1/2}$$

Waarin:

Q = Debiet [m³/s]

A = Oppervlakte [m²]

km = Coëfficiënt van Manning [m^{1/3}/s]

R = Hydraulische straal [m]

I = Verhang [m/m]

De coëfficiënt van Manning (km) wordt hier beschouwd als een empirisch bepaalde constante die de ruwheid van de duiker weerspiegelt en afhankelijk is van het gebruikte materiaal. In de onderstaande tabel worden de coëfficiënten per materiaal weergegeven:

Tabel 8 coëfficiënt van Manning (km)

Materiaal	coëfficiënt van Manning (km)
Glas, glad metaal	0,010
Beton	0,014
Gladde aarde	0,020

In deze context worden de kunststof materialen beschouwd als gelijkwaardig aan glad metaal.

12.1.3. Toepassing

De keuze tussen de Chezy-formule en de Manning/Strickler-formule voor het bepalen van het debiet van een duiker hangt af van verschillende factoren, waaronder de beschikbaarheid van gegevens, de nauwkeurigheid die vereist is en de specifieke kenmerken van het systeem.

Over het algemeen zijn beide methoden geldige benaderingen. Het is raadzaam om de lokale praktijken, normen en specifieke eisen van het project in overweging te nemen bij het selecteren van de meest geschikte methode. Daarom worden beide methoden in dit onderzoek opgenomen, waarbij voor het vaststellen van het debiet de minst gunstige methode wordt toegepast in de berekeningen.

13. Bijlage II: Grondberekening

13.1. Methode 1

$$q_{VG} = \lambda_{vg} \cdot (x \cdot \gamma \cdot H + \text{waterbelasting})$$

Waarin:

q_{VG} = grondbelasting [KN/m²]

λ_{VG} = Verticale grond concentratie factor

γ = dichtheid grond boven duiker [KN/m³]

H = dikte grondlaag [m]

Oneindig stijfheid

Om de werkelijke concentratiefactor te bepalen, wordt eerst berekend wat de concentratiefactor zou zijn in het geval van een oneindig stijve buis.

$$\lambda_{VGmax} = 1 + \frac{a^1 \cdot \frac{H}{D_u}}{4,0 + 2,4 \cdot \frac{E_1}{E_4} + \left(0,55 + 1,88 \cdot \frac{E_1}{E_4}\right) \cdot \frac{H}{D_u}}$$

Waarin:

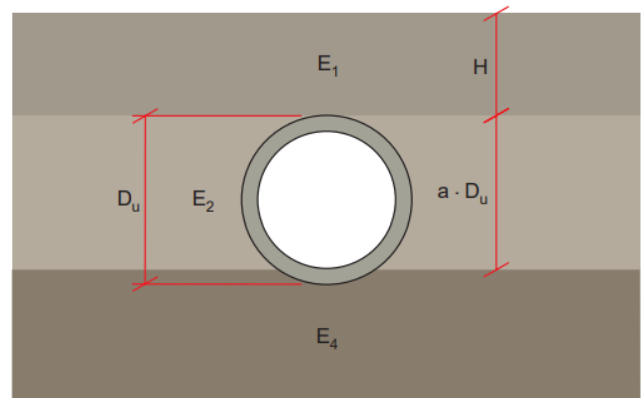
$$a_1 = a \cdot E_2 \cdot E_4$$

D_u = uitwendige diameter duiker [m]

H = gronddekking [m]

a = factor voor duiker diepte in bedding grondlaag

E_1, E_2, E_4 = rekenwaarde Elasticiteitsmodulus [N/mm²]



Figuur 21 situatie methode 1 (VPB, 1999)

Het bepalen van de rekenwaarde van de Elasticiteitsmodulus is afhankelijk van de grondsoort groep nummer. Waarbij de rekenwaarde bepaald wordt door de elasticiteitsmodulus te vermenigvuldigen met de juiste factor:

- $E_1 \cdot a_1$
- $E_2 \cdot a_2$
- $E_3 \cdot a_3$
- $E_4 \cdot a_4$

grondsoort groep nummer	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
-1				
verdicht	1,1	0,9	0,9	1,1
geroerd	1,1	0,9	0,8	1,3
-2				
verdicht	1,1	0,9	0,8	1,2
geroerd	1,2	0,8	0,7	1,4
-3				
verdicht	1,1	0,9	0,8	1,3
geroerd	1,2	0,8	0,7	1,3
waarbij:				
groep	grondsoort			
1	niet of weinig samenhangende grond;			
2	samenhangende menggrond;			
3	samenhangende grond.			

Tabel 9 grondsoort groep (VPB, 1999)

Ringstijfheid

Vervolgens wordt met de onderstaande formule de ringstijfheid van de duiker bepaald:

$$S_r = \mu * E * \frac{I}{r^3} = \mu * 0,67 * E * d^3 / D^3$$

Waarin:

S_r = ringstijfheid [N/mm²]

E = Elasticiteitsmodulus duikermateriaal [N/mm²]

d = wanddikte [mm]

D = gemiddelde diameter [mm]

μ = grenstoestand factor

De ringstijfheid varieert bij betonnen buizen, afhankelijk van de beschouwde grenstoestand.

Tabel 10 grenstoestand

Buissoort	Grenstoestand	μ
Ongewapend	Ongescheurd	1
Gewapend	Scheuren	0,5
Gewapend	Bezwijken	0,25

Stijfheidsverhouding

Indien de flexibiliteit van de duiker in overweging wordt genomen, kan de concentratiefactor worden bepaald met behulp van de volgende formule:

$$\lambda_V = \frac{\lambda_{Vmax} * V_s + \frac{V_{sl}}{1 - \lambda_0} * \lambda_0 (\lambda_{Vmax} - 1)}{V_s + \frac{V_{sl}}{1 - \lambda_0} * (\lambda_{Vmax} - 1)}$$

Waarin:

$$V_s = \frac{S_r * a}{c_v^* * E_2}$$

$$\lambda_0 = \frac{4 * K_2}{3 + K_2}$$

$$V_{sl} = \frac{1 - K_2}{\frac{1 - 1}{4 * a^1}}$$

$$a^1 = a * E_1 / E_2$$

$$V_{RB} = \frac{S_R}{0,6 * \xi * E_2}$$

$$K^* = \frac{c_{H1}}{V_{RB} - c_{H2}}$$

$$c_v^* = c_{v1} + c_{v2} * K^*$$

Voor het invullen van de formule zijn nog niet alle waarden bekend. Eén van deze waarden is K2, die afhankelijk is van verschillende groepen grondsoorten. In de onderstaande tabel zijn de juiste waarden te vinden:

Tabel 11 grondsoort groep met K2

Grondsoort groep nr.	K2
1	0,4
2	0,2
3	0,1

Daarnaast zijn er invloedsgetallen waarmee de vervorming van de duiker wordt meegenomen. De invloedsgetallen zijn afhankelijk van de karakteristieke opleghoek $2\alpha_k$ en kunnen worden afgelezen in de onderstaande tabel:

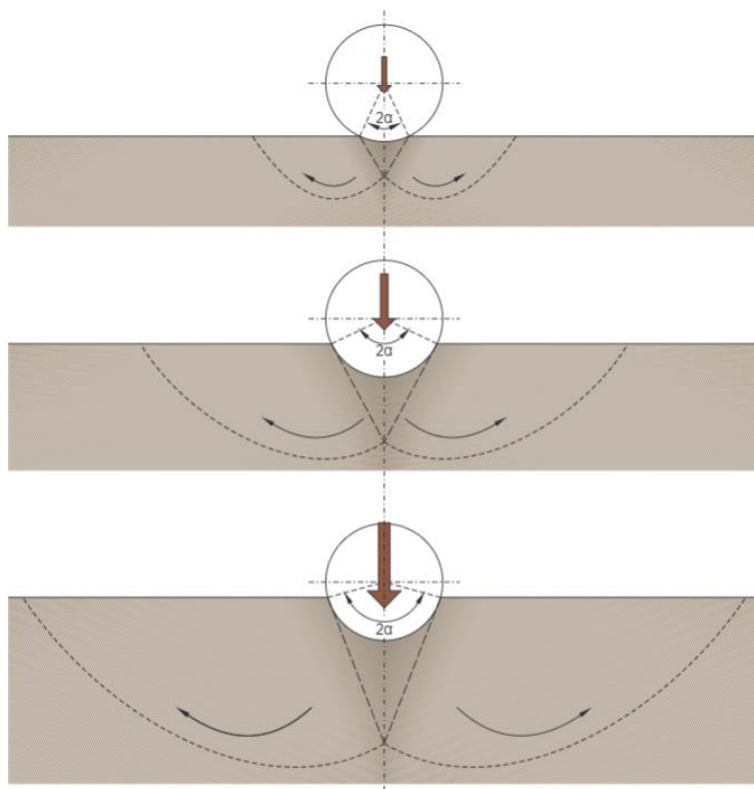
Tabel 12 invloedsgetallen (VPB, 1999)

$2\alpha_k$	c_{v1}	c_{v2}	c_{H1}	c_{H2}
0	-0,116	0,064	0,110	-0,0658
30	-0,113	0,064	0,109	-0,0658
60	-0,105	0,064	0,103	-0,0658
90	-0,096	0,064	0,096	-0,0658
120	-0,089	0,064	0,089	-0,0658
180	-0,083	0,064	0,083	-0,0658

In deze rekenmethode wordt de opleghoek gebruikt als een variabele waarmee de indrukking van de duiker in de grond wordt aangegeven. De indrukking van een ronde buis in de grond ontstaat door zowel de samendrukking van de grondlagen onder de buis als een soort insnijdingsproces.

Dit proces houdt in feite continu bezwijken van de grond in naarmate de breedte van het belaste oppervlak toeneemt tot de diameter van de buis. In het geval van een buis met een vlakke voet is het insnijdingsproces niet aanwezig, en bepaalt alleen de samendrukking van de grondlagen onder de buis de beddingsconstante.

Een hoge waarde van de beddingsconstante, zoals bij basecourse, resulteert in een beperkte indrukking van de buis onder een bepaalde belasting. Bij dezelfde belasting zal een lage beddingsconstante, zoals bij klei, juist een aanzienlijke indrukking veroorzaken.



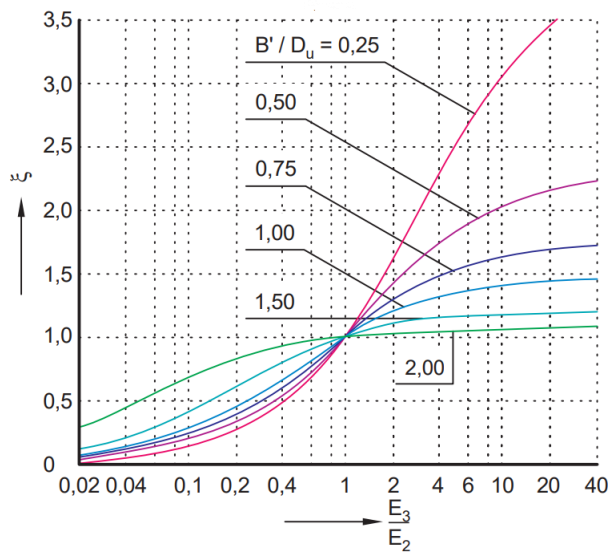
Figuur 22 indrukking van duiker buis (VPB, 1999)

Het vaststellen van de opleghoek is een uitdagende taak. Desondanks is er een tabel opgesteld op basis van empirische berekeningen, die in dit onderzoek wordt geraadpleegd om de opleghoek te bepalen.

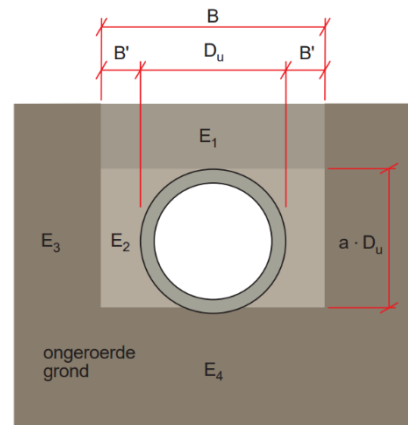
Grondsoort	D in mm		
	$D_i \leq 400$	$400 < D_i < 700$	$D_i \geq 700$
niet of weinig samenhangende grond	35	30	30
samenhangende menggrond	50	40	35
samenhangende grond	60	50	45

Figuur 23 opleghoek bepalen (VPB, 1999)

De laatste onbekende factor is ξ . Deze waarde is afhankelijk van de verhouding tussen de grondparameters E_2 en E_3 , evenals de verhouding tussen de breedte van de buis en de breedte van de sleuf. Op basis van empirische tests is er een grafiek opgesteld om de juiste waarde af te lezen:



Figuur 25 verhoudingsfactor (VPB, 1999)



Figuur 24 grondsituatie (VPB, 1999)

Reductie concentratiefactor

Er vindt een vermindering plaats van de concentratiefactor wanneer de buis zich in een sleuf bevindt en $B/D_u < 4$ wordt nageleefd:

$$\lambda_{VG} = \frac{\lambda_{VG}-1}{3} * \frac{B}{D_u} + \frac{4-\lambda_{VG}}{3}$$

Waarin:

B = breedte sleuf [m]

D_u = uitwendige diameter duiker [m]

λ_{VG} = Verticale grond concentratie factor

Concentratiefactor steundruk

Nu de waarde van λ_{VG} is bepaald, kan er ook berekend worden wat de horizontale grondconcentratiefactor is (λ_{HG}). Met deze factor kan uiteindelijk de horizontale steundruk worden berekend:

$$\lambda_{HG} = \frac{4-\lambda_{VG}}{3} * K_2$$

Waarin:

λ_{VG} = Verticale grond concentratie factor

K_2 = grondfactor (zie tabel 3)

Waterbelasting

De opwaartse waterbelasting oefent nog extra druk uit dat moet worden meegenomen in de berekening:

$$opwaartse = (gws - (bok - d)) * g$$

Waarin:

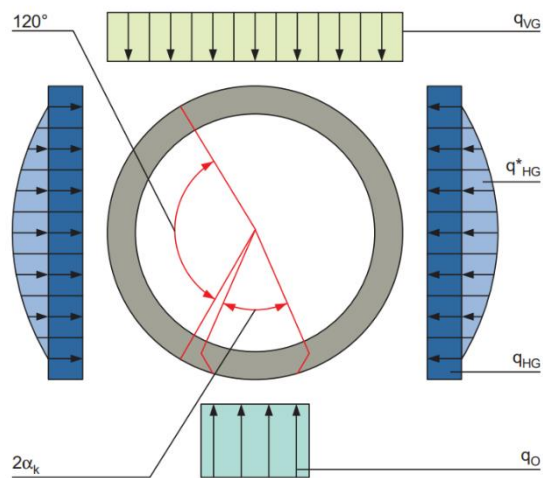
gws = grondwaterstand [m NSP]

bok = inwendige onderkant duiker [m NSP]

d = wanddikte [m]

g = dichtheid water [kN/m³]

Schematisering van grondbelasting



Figuur 26 krachten werking (VPB, 1999)

Bovenbelasting met een belastingshoek van 180°:

$$q_{VG} = \lambda_{vg} \cdot (x \cdot \gamma \cdot H + \text{waterbelasting})$$

Steundruk met een steunhoek van 180°:

$$q_{HG} = \lambda_{HG} \cdot \gamma \cdot H$$

Extra steundruk met een steunhoek van 120° door ovalisatie van de duiker:

$$q^*_{HG} = K^* \cdot (q_{VG} \cdot q_{HG})$$

13.2. Methode 2

De tweede methode om de concentratiefactor te bepalen vertoont sterke gelijkenissen met de eerdere methoden uit paragraaf 12.1 en verschilt bijna uitsluitend in de waarden van bepaalde factoren, terwijl de stappen vrijwel identiek zijn.

$$q_{V1} = m * C * w * H$$

Waarin:

q_{V1} = grondbelasting [KN/m²]

m = concentratiefactor

C = grondbelasting coëfficiënt

w = dichtheid grond boven duiker [KN/m³]

H = dikte grondlaag [m]

Oneindig stijfheid

Ook bij deze methode is het noodzakelijk om, voor het vaststellen van de werkelijke concentratiefactor, eerst te berekenen wat de concentratiefactor zou zijn in het geval van een oneindig stijve buis. Alleen is de formule anders opgesteld:

$$m_m = 1 + \frac{H}{D} * \frac{1}{\frac{3,5}{p_j} + 2,2 * \frac{E_1}{E_4} * \frac{1}{(p_j - 0,25)} + \frac{H}{D} * [\frac{0,62}{p_j} + 1,6 * \frac{E_1}{E_4} * \frac{1}{(p_j - 0,25)}]}$$

Waarin:

Du = uitwendige diameter duiker [m]

H = gronddekking [m]

p_j = factor voor duiker diepte in bedding grondlaag

E₁, E₂, E₄ = rekenwaarde Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

Ringstijfheid

Vervolgens wordt met de onderstaande formule de ringstijfheid van de duiker bepaald:

$$S_r = \frac{E_p}{12} * \left(\frac{s}{r}\right)^3$$

Waarin:

S_r = ringstijfheid [N/mm²]

E = Elasticiteitsmodulus duikermateriaal [N/mm²]

d = wanddikte [mm]

r = gemiddelde straal [mm]

Stijfheidsverhouding

Indien de flexibiliteit van de duiker in overweging wordt genomen, kan de concentratiefactor bepaald worden met behulp van de volgende formule:

$$m_1 = \frac{m_m * V_s + (m_m - 1) * m_0 * \frac{V_{s1}}{1 - m_0}}{V_s + (m_m - 1) * \frac{V_{s1}}{1 - m_0}}$$

Waarin:

$$V_s = \frac{S_p}{C_v * S_{sv}}$$

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} * \delta$$

$$\delta = \frac{C_{H1}}{V_{ps} - C_{H3}}$$

$$V_{ps} = \frac{S_p}{S_{sh}}$$

$$S_{sh} = 0,6 * \xi * E_2$$

$$S_{sv} = \frac{E_2}{p_j}$$

$$m_0 = \frac{4 * K_2}{3 + K_2}$$

$$V_{sl} = \frac{1 - K_2}{1 - \left(\frac{0,25}{p_j}\right)}$$

Voor de invloedsgetallen wordt dezelfde tabel gebruikt (zie tabel 4). K2 wordt opnieuw bepaald met behulp van een tabel, waarbij deze tabel verschilt van methode 1 wegens een extra type grondlaag.

Tabel 13 grondsoort groep met K2

Grondsoort groep nr.	Type grondlaag	K2
1	Niet samenhangende	0,4
2	Weinig samenhangende	0,3
3	Samenhangende menggrond	0,2
4	Samenhangende	0,1

Tot slot moet de factor ξ worden bepaald. Deze waarde is afhankelijk van de verhouding tussen de grondparameters E_2 en E_3 , evenals de verhouding tussen de breedte van de buis en de breedte van de sleuf. In tegenstelling tot methode 1, waarbij een grafiek was opgesteld op basis van empirische tests, wordt de factor nu bepaald met een formule:

$$\xi = \frac{1,662 + 0,639 * \left(\frac{B}{Du} - 1\right)}{\left(\frac{B}{Du} - 1\right) + \left[1,662 + 0,631 * \left(\frac{B}{Du} - 1\right)\right] * \frac{E_2}{E_3}}$$

Waarin:

B = breedte sleuf [m]

Du = uitwendige diameter duiker [m]

E_2, E_3 = rekenwaarde Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

Reductie concentratiefactor

Er vindt een vermindering van de concentratiefactor plaats wanneer de buis zich in een sleuf bevindt en $B/Du < 4$ wordt nageleefd:

$$m = \frac{m_1 - 1}{3} * \frac{B}{Du} + \frac{4 - m_1}{3}$$

Waarin:

B = breedte sleuf [m]

Du = uitwendige diameter duiker [m]

λ_{VG} = Verticale grond concentratie factor

Grondbelastingscoëfficiënt

In tegenstelling tot methode 1 omvat deze benadering een grondbelastingscoëfficiënt die rekening houdt met de wanden die de sleuf vormen. In eerste instantie wordt aangenomen dat de sleufwanden een hoek van 90 graden maken met de bodem. Hieruit volgt de volgende formule:

$$C_{90} = \frac{1 - e^{-2 * \left(\frac{H}{B}\right) * K_1 * \tan \varphi'}}{2 * \left(\frac{H}{B}\right) * K_1 * \tan \varphi'}$$

Waarin:

H = dikte grondlaag [m]

B = breedte sleuf [m]

K_1 = grondfactor

φ = wrijvingshoek

K_1 is de coëfficiënt van gronddruk boven het niveau van de top van de duiker, en heeft een waarde van 0,5 en ϱ is de wrijvingshoek tussen de opvulgrond en de wand van de sleuf, afhankelijk van de inwendige wrijvingshoek van de type grond. In de onderstaande tabel zijn de juiste waarden te vinden:

Tabel 14 grondsoort groep met inwendige wrijvingshoek

Grondsoort groep nr.	ϱ In graden
1	35
2	30
3	25
4	20

Verder wordt grondbelastingscoëfficiënt nog anders aan de hand van de daadwerkelijke hoek van de sleuf (β):

Voor $0 < \beta < \varrho$: $C = 1$

Voor $\varrho < \beta < 90^\circ$: $C = 1 - \frac{\beta}{90} (1 - C_{90})$

Concentratiefactor steundruk

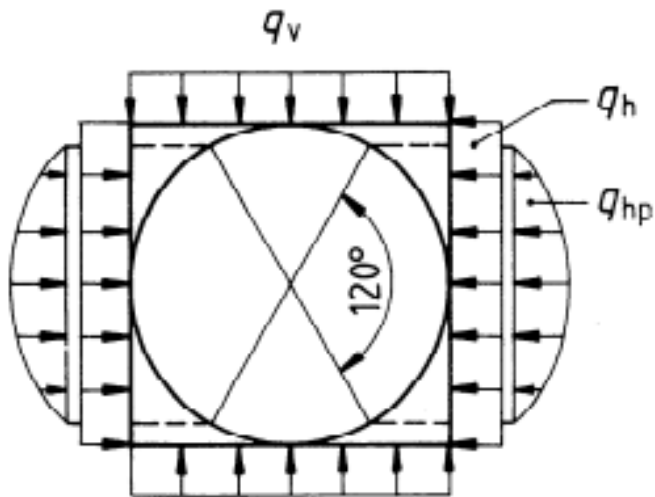
Nu de waarde van m is bepaald, kan er ook berekend worden wat de horizontale grondconcentratiefactor (n) is. Met deze factor kan uiteindelijk de horizontale steundruk worden berekend:

$$n = \frac{4-m_1}{3}$$

Waarin:

m_1 = Verticale grond concentratie factor

Schematisering van grondbelasting



Figuur 27 krachtenwerking (ISO 2785, 1986)

Bovenbelasting met een belastingshoek van 180°:

$$q_{v1} = m * C * w * H$$

Steundruk met een steunhoek van 180°:

$$q_{h1} = n * K_2 * C * w * H$$

Extra steundruk met een steunhoek van 120° door ovalisatie van de duiker:

$$q_{hp1}^* = K^* * (q_{v1} * q_{h1})$$

13.3. Methode 3: Installatie type

De laatste methode om de concentratie factor voor de gronddruk te berekenen is doormiddel van factoren die gekoppeld zijn aan een bepaalde grond installatie type (tabel 8).

$$W_e = g * F_e * \gamma_s * B_c * H * 10^{-9}$$

Waarin:

W_e = grondbelasting [N/mm]

F_e = concentratiefactor

B_c = uitwendige diameter [m]

g = versnelling door zwaartekracht [m/sec²]

H = dikte grondlaag [m]

γ_s = dichtheid grondlaag [kg/m³]

Om de methodes goed tegen elkaar af te stemmen wordt de formule wordt aangepast naar:

$$W_e = F_e * \gamma_s * H$$

Waarin:

W_e = grondbelasting [KN/m²]

F_e = concentratiefactor

H = dikte grondlaag [m]

γ_s = dichtheid grondlaag [KN/m³]

F_e houdt rekening met de overdracht van een deel van de overbelaste grond boven de gebieden aan de zijkanten van de leiding. Voor een eenheidsverticale belasting volgt de Heger-drukverdeling de verdeling van de gronddruk en laterale gronddruk. VAF en HAF dienen als respectievelijk de verticale en horizontale boogingsfactoren, die de niet-dimensionale totale verticale en horizontale aardbelastingen op de leiding vertegenwoordigen. De gestandaardiseerde drukverdeling en HAF-waarden zijn verkregen voor elk standaard installatietype uit de resultaten van analyses van bodem-structuurinteractie met behulp van SPIDA, samen met de minimale bodemeigenschappen voor de gespecificeerde grondsoorten en verdichtingsniveaus voor de installaties.

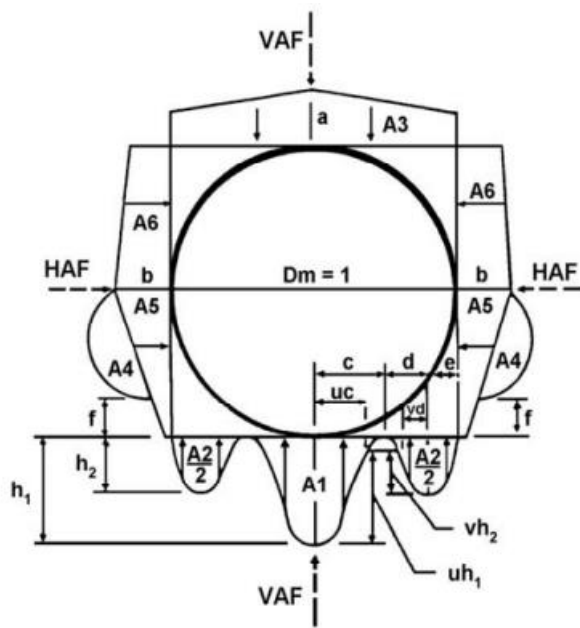
	Installation Type			
	1	2	3	4
<i>VAF</i>	1.35	1.40	1.40	1.45
<i>HAF</i>	0.45	0.40	0.37	0.30

Tabel 15 eenheidsverticale factoren

Tabel 16 Installatietype (Pipe Bedding and Backfill, 1996).

Installatietype	Bedding dikte	Wang en Buitenste Bedding	Onderzijde
Type 1	Voor een bodemfundering, gebruik Bc/600 mm als minimum, niet minder dan 75 mm. Voor een rots fundering, gebruik Bc /300 mm als minimum, niet minder dan 150 mm.	95% SW	90% SW, 95% ML, of 100% CL, of natuurlijke gronden met een gelijke stevigheid
Type 2 - Installaties zijn beschikbaar voor horizontale elliptische, verticale elliptische en boogbuizen	Voor een bodemfundering, gebruik Bc /600 mm als minimum, niet minder dan 75 mm. Voor een rots fundering, gebruik Bc /300 mm als minimum, niet minder dan 150 mm.	90% SW of 95% ML	85% SW, 90% ML, 95% CL, of natuurlijke gronden met een gelijke stevigheid
Type 3 - Installaties zijn beschikbaar voor horizontale elliptische, verticale elliptische en boogbuizen	Voor een bodemfundering, gebruik Bc /600 mm als minimum, niet minder dan 75 mm. Voor een rots fundering, gebruik Bc /300 mm als minimum, niet minder dan 150 mm.	85% SW, 90% ML of 95% CL	85% SW, 90% ML, 95% CL, of natuurlijke gronden met een gelijke stevigheid
Type 4	Voor een bodemfundering is geen bedding vereist. Voor een rots fundering, gebruik Bc /300 mm als minimum, niet minder dan 150 mm.	Geen verdichting vereist, behalve als CL, gebruik 85% CL	85% SW, 90% ML, 95% CL, of natuurlijke grond met een gelijke stevigheid

Schematisering van grondbelasting



Figuur 28 krachten werking (Pipe Bedding and Backfill, 1996)

Bovenbelasting met een belastingshoek van 180° :

$$W_e = VAF * \gamma_s * H$$

Steundruk met een steunhoek van 180° :

$$W_e = HAF * \gamma_s * H$$

13.3.1.1. Toegepaste methode

In dit onderzoek is besloten om methode 1 te hanteren. Methode 3 werd aanvankelijk uitgesloten vanwege de afhankelijkheid van specifieke installatietypes, wat resulteert in een beperkt aantal opties bij parametrisch ontwerpen. Wat betreft methode 2 is ervoor gekozen deze niet te gebruiken vanwege de verouderde literatuur uit 1986, waarop de methode is gebaseerd. Aangezien methode 1, opgesteld in 1999, sterk lijkt op methode 2 en de berekeningsresultaten slechts minimaal verschillen, is besloten om met methode 1 verder te werken. Methode 1 is gebaseerd op CUR Aanbeveling 122: "Buizen onder de grond". Hoewel CUR 122 niet online beschikbaar is, wordt er in bijna alle literatuur, inclusief de NEN-EN normen, naar verwezen.

14. Bijlage III: Verkeersbelasting

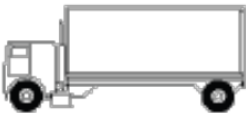
15.1. Type weg

Bij het berekenen van de verkeersbelasting is het essentieel om het type weg te identificeren. Waar wordt het maaiveld voor gebruikt? Is het hoofdzakelijk een voetgangersgebied, een berm of worden er voertuigen overheen geleid? Daarnaast is het van belang om te raadplegen wat de literatuur zegt over de specifieke belastingwaarden die van toepassing zijn op dat type weg.

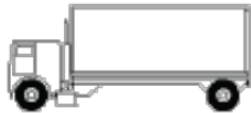
15.1.1. Voertuigen

De belastingwaarden van voertuigen verschillen onder elkaar. Daarnaast verschillen de aslast metingen per land. In de onderstaande tabellen zijn de metingen van Suriname en Nederland te zien.

Tabel 17 NEN-EN 1991-2 Verkeersbelasting op bruggen

Nederland			
Afbeelding	Afstand tussen assen [m]	Frequente waarde van aslast [kN]	As
	4,5	90 190	1 2
	4,2 1,3	80 140 140	1 2 3
	3,2 5,2 1,3 1,3	90 180 120 120 120	
	3,4 6 1,8	90 190 140 140	1 2 3 4
	4,8 3,6 4,4 1,3	90 180 120 110 110	

Tabel 18 as-last meting Baitali

Suriname			
Afbeelding	Afstand tussen assen [m]	Frequente waarde van aslast [KN]	As
	onbekend	101 182	1 2
	onbekend	91 163 164	1 2 3
	onbekend	95 131 167 149	1 2 3 4

In de Surinaamse literatuur zijn slechts drie voertuigtypen te vinden, die overigens wel overeenkomen met Nederlandse voertuigtypen. Hoewel de as-afstanden in de Surinaamse literatuur onbekend zijn, vertonen de totale aslasten bij benadering weinig verschillen.

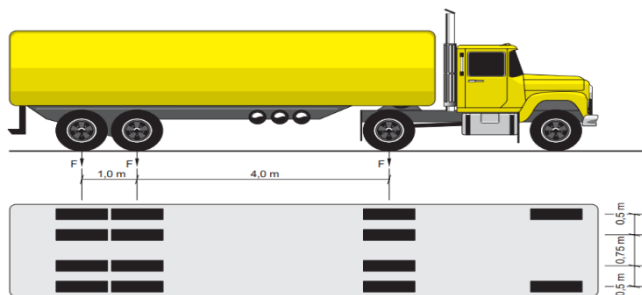
In de Nederlandse literatuur worden voertuigen op basis van hun totale gewicht onderverdeeld in verschillende gewichtsklassen:

Verkeersklasse 30: plattelandswegen en stadsstraten

Verkeersklasse 45: hoofdverkeerswegen

Verkeersklasse 60: Hoofdverkeerswegen met mogelijk extreem zwaar verkeer

Klasse	Maximum gewicht [KN]	Maximum aslast [KN]
Verkeersklasse 30	300	100
Verkeersklasse 45	450	150
Verkeersklasse 60	600	200



Figuur 29 verkeersklasse (VPB 1999)

Hoewel de exacte overeenkomst van aslasten ontbreekt, worden in dit onderzoek toch de drie Nederlandse verkeersklassen gehanteerd. De specifieke aslasten zelf worden als parameters opgenomen.

Voetgangers en berm

Mogelijk wordt het maaiveld boven de duiker alleen gebruikt door voetgangers en niet door voertuigen. Volgens NEN-EN 1991-2, met betrekking tot verkeersbelasting op bruggen, levert een menigte mensen een q-last op, gelijk aan 5 kN/m². Als het maaiveld niet wordt gebruikt door voetgangers, wordt het beschouwd als een bermstrook zonder bovenbelasting.

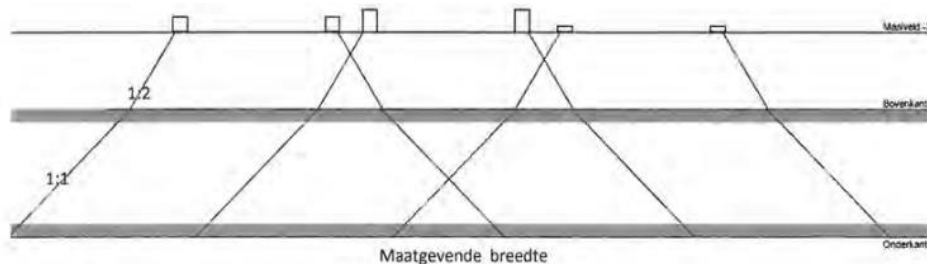
15.2. Belasting spreiding

In het geval van een q-last van een mensenmenigte blijft de bovenbelasting ongewijzigd wanneer deze bij de duiker in de grond komt. Echter zal een puntlast zich in de grond verspreiden, waardoor de belasting verandert.

De spreiding van de belasting is afhankelijk van de spreidingshoek van de grondsoorten, de diktes van de lagen en de afstand van de puntlast tot de duiker. In dit onderzoek zijn twee methodes met elkaar vergeleken.

Maatgevende breedte

Bij deze methode wordt er gezocht naar de maatgevende belasting spreiding over de lengte van de duiker. De as-lasten van de voertuigen worden bij elkaar opgeteld en de belasting spreiding over de dwarsdoorsnede van het profiel wordt buiten beschouwing gelaten.



Figuur 30 Maatgevende breedte (Oranjewoud 2012)

De belasting spreiding wordt berekend met de volgende formule:

$$b_{spr} = h \cdot \theta_{spr} (\cdot 2 + as\ lengte)$$

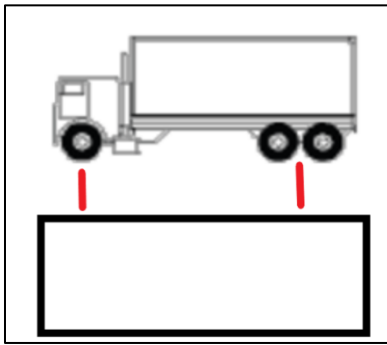
Waarin:

b = belasting spreiding [m]

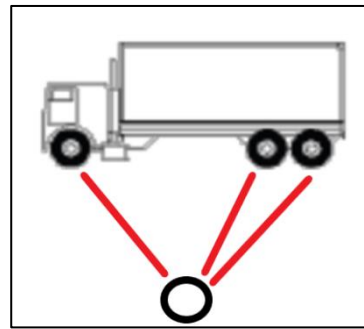
h = dikte grondlaag [m]

θ_{spr} = spreidingshoek grondlaag

Voor het berekenen van de totale spreiding van het voertuig wordt de spreiding verdubbeld en daarbij de as-lengte opgeteld. De maatgevende breedte is de breedte waar de voertuigen van verschillende rijstroken elkaar kruisen. Het voordeel van deze benadering is dat meerdere rijstroken goed in beeld worden gebracht. Echter schiet deze methode tekort doordat de breedte van de duiker buiten beschouwing wordt gelaten. Deze methode is meer geschikt voor tunnels of grote duikers. Bij een tunnel zou je kunnen stellen dat de volledige belasting van het voertuig door de tunnel wordt opgenomen (figuur 31), terwijl dat bij een smallere constructie niet het geval is en er veel belasting via de grond wordt afgedragen (figuur 32).



Figuur 31 Tunnel



Figuur 32 Duiker

Boussinesq

Gezien de vorige methode niet rekening hield met de belasting spreiding over de dwarsdoorsnede van het duiker profiel, is de formule van Boussinesq onderzocht als een alternatieve benadering:

$$P_v = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \varphi^3$$

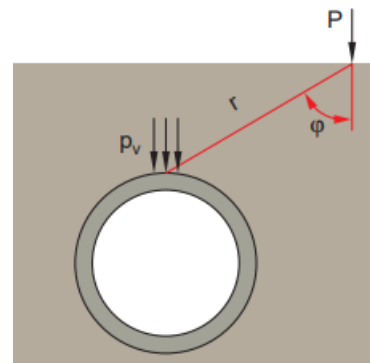
Waarin:

p_v = verticale spanning [KN/m²]

P = puntlast [KN]

θ_{spr} = spreidingshoek grondlaag

R = afstand tussen duiker en puntlast [m]



Figuur 33 formule van Boussinesq (VPB 1999)

Bij beschouwing van de as-lasten als puntlasten kan een as configuratie worden uitgevoerd om te bepalen op welke plek de drie puntlasten samen de grootste verticale spanning veroorzaken.

Het nadeel van deze benadering komt naar voren wanneer de duiker wordt beoordeeld op liggerwerking. In het geval van meerdere rijstroken wordt de spreiding in de langsdoorsnede niet volledig nauwkeurig in beschouwing genomen.

15.3. Concentratie factor

Bij het vaststellen van de verkeersbelasting speelt eveneens de stijfheidsverhouding van de duiker met de omliggende grond een rol. Hoewel er minder literatuur beschikbaar is over dit aspect, gaat de literatuur van methode 1, die wordt gebruikt voor het bepalen van de grondbelasting, ook door op het vaststellen van de verkeersbelasting. Om die reden wordt de concentratiefactor van de verkeersbelasting, met dezelfde bron als methode 1 berekend. De stappen vertonen over het algemeen gelijkenissen, echter zijn de formules net iets anders.

15.3.1. Methode 1

$$q_{VV} = s * \lambda_{VV} * p$$

Waarin:

q_{VV} = verkeersbelasting [KN/m²]

λ_{VV} = Verticale verkeersconcentratie factor

p = gemiddelde verticale spanning [KN/m²]

Oneindig stijfheid

Om de werkelijke concentratiefactor te bepalen, wordt eerst berekend wat de concentratiefactor zou zijn in het geval van een oneindig stijve buis.

$$\lambda_{VVmax} = 1 + \frac{\left(\frac{2 * a^{11}}{1 + v}\right)^{1/2} * \left(1 - \frac{f_o}{m * a^{11}}\right) * \sqrt{\frac{H}{Du}}}{1,0 + \left(\frac{1}{f_1 * a^{11}}\right)^{1/2} * coth\left(\sqrt{\frac{f_1 + (1 + v)}{2 * \frac{H}{Du}}}\right) + \frac{2 * f_o}{m} * \sqrt{\frac{H}{2 * a^{11} * (1 + v)}}}$$

Waarin:

$$m = E_4 / E_1$$

$$a^{11} = a^{1+1,5m}$$

$$a^1 = a * E_2 * E_4$$

a = factor voor duiker diepte in bedding grondlaag

E_1, E_2, E_4 = rekenwaarde Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

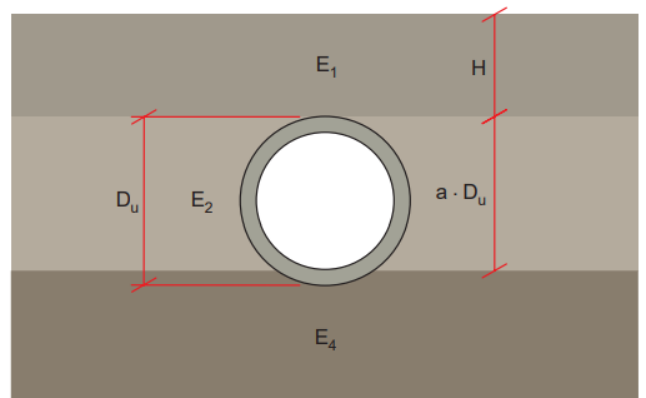
D_u = uitwendige diameter duiker [m]

H = gronddekking [m]

$$f_o = 1,5$$

$$v = 0,3$$

$$f_1 = 4$$



Figuur 34 situatie methode 1 (VPB, 1999)

Ringstijfheid

Vervolgens wordt met de onderstaande formule de ringstijfheid van de duiker bepaald:

$$S_r = E * \frac{I}{r^3} = 0,67 * E * d^3 / D^3$$

Waarin:

S_r = ringstijfheid [N/mm²]

E = Elasticiteitsmodulus duikermateriaal [N/mm²]

d = wanddikte [mm]

D = gemiddelde diameter [mm]

Stijfheidsverhouding

Indien de flexibiliteit van de duiker in overweging wordt genomen, kan de concentratiefactor bepaald worden met behulp van de volgende formule:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_{vmax} * V_s + \frac{V_{sl}}{1 - \lambda_0} * \lambda_0 (\lambda_{vmax} - 1)}{V_s + \frac{V_{sl}}{1 - \lambda_0} * (\lambda_{vmax} - 1)}$$

Waarin:

$$V_s = \frac{S_r * a}{c_v^* * E_2}$$

$$\lambda_0 = \frac{4 * K_2}{3 + K_2}$$

$$V_{sl} = \frac{1 - K_2}{\frac{1 - 1}{4 * a^1}}$$

$$a^1 = a * E_1 / E_2$$

$$V_{RB} = \frac{S_R}{0,6 * \xi * E_2}$$

$$K^* = \frac{c_{H1}}{V_{RB} - c_{H2}}$$

$$c_v^* = c_{v1} + c_{v2} * K^*$$

Voor het invullen van de formule zijn nog niet alle waarden bekend:

- K_2 (zie tabel 12)
- Invloedsgetallen (zie tabel 13)
- ξ (zie figuur 25)

Gemiddelde verticale spanning

In de context van de Boussinesq-formule varieert de verkeersspanning naarmate de afstand toeneemt, wat resulteert in verschillende spanningen aan de onderkant van de buis. Voor het berekenen van de verkeersbelasting is de gemiddelde verticale spanning vereist, en deze wordt als volgt vastgesteld:

$$p = \frac{(n * pv)_{boven} + (n * pv)_{onder}}{2}$$

Waarin:

pv (boven/onder) = verticale spanning [KN/m²]

$$n = 0,92 + 0,07 * H - 0,17 * D * (1 - 0,8 * H) \rightarrow 0,6 < H < 1,250$$

$$n = 1 \rightarrow 1,25 \leq H$$

H = gronddekking [m]

D = gemiddelde duiker diameter [m]

Concentratiefactor steundruk

Nu de waarde van λ_{VV} is bepaald, kan er ook berekend worden wat de horizontale grondconcentratiefactor is (λ_{HV}). Met deze factor kan uiteindelijk de horizontale steundruk worden berekend:

$$\lambda_{HV} = \left(\frac{4 - \lambda_{VV}}{3} - \alpha \right) * K_2$$

Waarin:

λ_{VV} = Verticale verkeer concentratiefactor

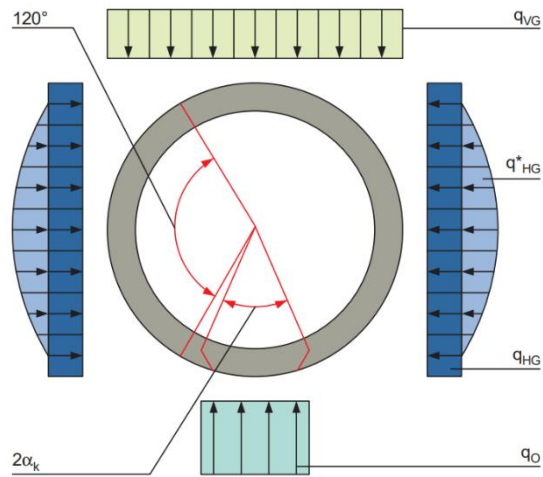
K₂ = grondfactor (zie tabel 3)

$$\alpha = 1 - \frac{\left[\left(\frac{H}{Du} + 0,5 \right)^2 - 0,25 \right]^{5/2}}{\left(\frac{H}{Du} + 0,5 \right)^5}$$

H = gronddekking [m]

D = uitwendige duiker diameter [m]

Schematisering van grondbelasting



Figuur 35 krachten wrking (VPB, 1999)

Bovenbelasting met een belastingshoek van 180°:

$$q_{VV} = s * \lambda_{VV} * p$$

Steundruk met een steunhoek van 180°:

$$q_{HV} = s * \lambda_{HV} * p$$

Extra steundruk met een steunhoek van 120° door ovalisatie van de duiker:

$$q^*_{HV} = K^* * (q_{VV} - q_{HV})$$

16. Bijlage IV: Toetsingen

16.1. Ringtoetsing

Terugkomend op paragraaf 2.4.1.2 zijn er diverse manieren waarop de duiker krachten aan de grond doorgeeft. Via directe overdracht over de dwarsdoorsnede ontstaat er een ringwerking van de duiker, en via indirecte overdracht treedt er een liggerwerking op. Beide situaties dienen te worden getoetst. In dit hoofdstuk wordt de ringtoetsing van zowel een stijve als een flexibele duiker behandeld.

16.1.1. Stijve duiker

Uit de literatuur en de algemene praktijkervaring worden betonnen duikers beschouwd als stijve duikers. Ook bij de berekening van de ringstijfheid in paragraaf 2.4.2.1 blijkt de ringstijfheid van beton aanzienlijk groter te zijn dan die van de andere materialen in dit onderzoek. De betonnen duiker wordt getoetst in zowel een ongewapende als gewapende situatie. Eerst worden echter de interne krachten die zich voordoen berekend.

16.1.1.1. Interne krachten

Er zijn verschillende manieren hoe de duiker wordt belast. Aangezien de belastingen verschillende veiligheidsfactoren kennen, moet elke belasting afzonderlijk worden omgezet naar een interne kracht.

Grond- en verkeersbelasting

De interne krachten van de grond- en verkeersbelasting worden op dezelfde manier omgezet:

$$M_i = c_i * (q_V - q_H) * D^2 + c_{Hi}^* * q_H^* * D$$

$$N_i = n_i * (q_V - q_H) * D - 0,5 * q_H * D + n_{Hi}^* * q_H^* * D$$

$$(M_1 + M_2) = c_u * (q_V - q_H) * D^2 + 0,097 * q_H^* * D^2$$

Waarin:

M_i = Moment (grond/verkeer) [KNm/m]

N_i = Normaalkracht (grond/verkeer) [KNm/m]

q_V = Verticale belasting (grond/verkeer) [KN/m²]

q_H = Horizontale belasting (grond/verkeer) KN/m²

D = Gemiddelde diameter [m]

c_i , c_{Hi}^* , q_H^* , n_i , n_{Hi}^* , c_u = coëfficiënten (tabel 12)

Eigengewicht van de duiker

$$M_i = c_{ieg} * Q_{ieg} * D$$

$$M_i = n_{ieg} * Q_{ieg}$$

$$(M_1 + M_2) = c_{ieg} * Q_{ieg} * D$$

Waarin:

M_i = Moment (eigengewicht) [KNm/m]

$$Q_{eg} = \pi * D * d * \gamma_b \text{ [KN/m}^2\text{]}$$

D = gemiddelde diameter [m]

d = wanddikte duiker [m]

γ_b = dichtheid beton [KN/m³]

c_i eg, n_i eg, c_{eg} = coëfficiënten (tabel 13)

Vulling van de duiker

$$M_i = c_{i\,vl} * \gamma_{vl} * D^2 * D_i$$

$$M_i = n_{i\,vl} * \gamma_{vl} * D * D_i$$

$$(M_1 + M_2) = c_{vl} * \gamma_{vl} * D^2 * D_i$$

Waarin:

M_i = Moment vulling [KNm/m]

D = gemiddelde diameter [m]

γ_{vl} = dichtheid water [KN/m³]

c_i vl, n_i vl, c_{vl} = coëfficiënten (tabel 14)

Coëfficiënten interne krachten

De coëfficiënten die de interne krachten van de duiker bepalen, zijn evenals de invloedsgetallen, afhankelijk van de karakteristieke opleghoek 2α en kunnen worden afgelezen in de onderstaande tabellen:

Tabel 19 invloedsgetallen (VPB, 1999)

q_V	2α	c_1	c_2	c_3	n_1	n_2	n_3	c_u
	0	0,147	-0,077	0,075	-0,053	-0,500	0,053	0,195
	30	0,117	-0,074	0,074	-0,049	-0,500	0,049	0,176
	45	0,106	-0,073	0,073	-0,045	-0,500	0,045	0,167
	60	0,094	-0,072	0,072	-0,040	-0,500	0,040	0,158
	90	0,078	-0,070	0,068	-0,027	-0,500	0,027	0,144
	120	0,069	-0,067	0,066	-0,014	-0,500	0,014	0,135
	150	0,064	-0,064	0,063	-0,004	-0,500	0,004	0,128
	180	0,063	-0,063	0,063	0	-0,500	0	0,126
q_H	c_{H1}	c_{H2}	c_{H3}	n_{H1}	n_{H2}	n_{H3}		
	-0,063	0,063	-0,063	-0,500	0,0	-0,500		
q_{*H}	c_{*H1}	c_{*H2}	c_{*H3}	n_{*H1}	n_{*H2}	n_{*H3}		
	-0,045	0,052	-0,045	-0,289	0,0	-0,289		

Tabel 20 invloedsgetallen (VPB, 1999)

$2\alpha_k$	c_{1eg}	c_{2eg}	c_{3eg}	n_{1eg}	n_{2eg}	n_{3eg}	c_{eg}
0	0,119	-0,045	0,040	-0,080	-0,250	0,080	0,125
30	0,089	-0,044	0,040	-0,076	-0,250	0,076	0,109
45	0,077	-0,043	0,038	-0,072	-0,250	0,072	0,101
60	0,066	-0,041	0,036	-0,067	-0,250	0,067	0,092
90	0,051	-0,038	0,034	-0,053	-0,250	0,053	0,081
120	0,041	-0,035	0,030	-0,040	-0,250	0,040	0,071
150	0,036	-0,032	0,028	-0,030	-0,250	0,030	0,064
180	0,032	-0,030	0,027	-0,027	-0,250	0,027	0,060

Tabel 21 invloedsgetallen (VPB, 1999)

$2\alpha_k$	c_{1v1}	c_{2v1}	c_{3v1}	n_{1v1}	n_{2v1}	n_{3v1}	c_{v1}
0	0,094	-0,036	0,031	0,313	0,054	0,188	0,099
30	0,070	-0,035	0,031	0,315	0,054	0,185	0,086
45	0,062	-0,034	0,030	0,318	0,054	0,182	0,080
60	0,053	-0,033	0,029	0,323	0,054	0,177	0,074
90	0,040	-0,030	0,026	0,331	0,054	0,167	0,063
120	0,033	-0,028	0,024	0,344	0,054	0,156	0,057
150	0,029	-0,025	0,022	0,352	0,054	0,149	0,051
180	0,028	-0,025	0,022	0,354	0,054	0,146	0,050

16.1.1.2. Ongewapend

Buigsterkte

De ongewapende duiker wordt enkel beoordeeld op buigsterkte, waarbij de toetsing plaatsvindt in een situatie waar zowel de normaalkracht als het moment een rol spelen. Er zijn twee formules om dit te berekenen.

Volgens elasticiteitsleer:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$$

Volgens CUR 122

$$\sigma_j = \left(\frac{6 * M_{1j}}{d^2} + \eta * \frac{N_{1j}}{d} \right) * 10^{-3}$$

Waarin:

σ_j = spanning (grond, verkeer, eigengewicht, vulling) [N/mm²]

M_{1j} = Moment 1 (belastingsgevallen) [KNm/m]

N_{1j} = Normaalkracht 1 (belastingsgevallen) [KN/m]

d = wanddikte [m]

Dit zijn twee vergelijkbare formules waarin in beide gevallen de spanning als gevolg van de normaalkracht en het moment afzonderlijk wordt berekend. Het onderscheid tussen de twee formules ligt in de factor η , die volgens de cur122 ervoor zorgt dat de spanningen die worden veroorzaakt door een normaalkracht (pure trek) en die als gevolg van een moment (buigspanningen) op dezelfde noemer worden gebracht. Met de tweede formule wordt de optredende spanning berekend.

De optredende spanning moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare spanning. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{\nu_d * \sigma^*}{\gamma_m} - \sum (\gamma_j * \sigma_j) \geq 0$$

Waarin:

$\nu_d * \sigma^*$ = opneembare spanning: 6 [N/mm²]

γ_m = 1,3 ; correctie coëfficiënt met betrekking tot de karakteristieke sterkte voor de verschillende veiligheidsklasse (tabel 15)

γ_j = belastingsfactor (tabel 16)

σ_j = spanning (belastingsgevallen) [N/mm²]

De optredende spanningen voor elk belastingsgeval moeten worden vermenigvuldigd met de bijbehorende belastingsfactor en vervolgens bij elkaar worden opgeteld. De ongewapende duiker voldoet wanneer de maximaal opneembare spanning groter is.

Tabel 22 veiligheidsklasse (VPB, 1999)

veiligheidsklasse	γ_m
1	1,10
2	1,30
3	1,60

Tabel 23 belastingsfactor (VPB, 1999)

belasting	rangorde		
	1 ^e	2 ^e	3 ^e t/m 6 ^e
grond, verkeer, eigen gewicht van de buis, vulling	1,25	1,10	1,05

16.1.1.3. Gewapend I

Scheurwijdte

De hieronder weergegeven formule is afgeleid uit kruinbelastingsproeven, wat in CUR 122 als de voorkeursmethode wordt beschouwd voor het berekenen van de scheurwijdte.

$$w^* = \frac{0,6 * d}{0,56 + 0,30 * \frac{D_i}{D_{io}}} * \frac{\pi * D}{3 * E * I} * \frac{\left(k * M^*1 + \frac{1}{3} * M^*3\right) * 10^6}{k^2 - \frac{1}{9}} \leq wk$$

Met

$$k = 1 + \frac{0,5 * d * 0,9 * h * A_s}{0,8 * \left(2 * c + \frac{2,5 * \phi_k}{\omega_o}\right)} * \frac{\pi * D}{3 * E_b * I} * 10^5$$

$$\omega_o = \frac{A_s * d}{h * D}$$

$$A_s = aantal * \pi * \left(\frac{ks}{2}\right)^2$$

$$h = d - c - 0,5 * ks$$

$$I = \frac{Dd^3}{12}$$

$$D_{io} = Du + d$$

Waarin:

D = gemiddelde diameter [mm]

Du = uitwendige diameter [mm]

d = wanddikte duiker [mm]

ks = wapeningsdiameter [mm]

c = dekking [mm]

Eb = Elasticiteitsmodulus beton [N/mm²]

M*1 = opsomming belasting gevallen karakteristieke moment 1 [KNm/m]

M*3 = opsomming belasting gevallen karakteristieke moment 3 [KNm/m]

wk = maximale scheurwijdte (tabel 17)

De optredende momenten moeten voor elk belastingsgeval met de bijbehorende belastingsfactor worden vermenigvuldigd en vervolgens bij elkaar worden opgeteld.

$$M^*i = \sum M_{ij} \cdot \gamma$$

Waarin

M^*i = opsomming karakteristieke moment (1/3) [kNm/m]

M_{ij} = Moment (1/3), (belastingsgevallen) [kNm/m]

γ = belastingsfactor

Voor alle belastingen geldt $\gamma = 1$. Echter, voor verkeersbelasting geldt:

$$\gamma_{verkeer} = 1 - 0,3 \cdot \left(\frac{M^*_{verk}}{M^*_{tot}} \right)$$

Tabel 24 scheurwijdte (Beton tabellen. 2014)

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.			

16.1.1.4. Gewapend

Buigend moment

Het bezwijken van de duiker door het buigend moment wordt met de volgende formule berekend:

$$\frac{M_{1u}^* + M_{2u}^*}{\gamma_m} - \sum \gamma_j * (M_1 + M_2)_j^* \geq 0$$

Met

$$f'_b = 0,8 * f'_{ck}$$

$$N_a = A_s * f_s$$

$$x_u = \frac{N_a}{0,643 * f'_b * 1000}$$

$$z = h - 0,355 * x_u$$

$$M_{iu}^* = N_a * z * 10^{-6}$$

Waarin:

f_{ck} = karakteristieke cilinderdruksterkte van beton [N/mm²]

f_s = treksterkte van staal [N/mm²]

A_s = wapeningsoppervlakte [mm] (zie 2.6.1.3)

h = nuttige hoogte [mm] (zie 2.6.1.3)

$\gamma_m = 1,3$ (tabel 15)

$(M_1 + M_2)_j^*$ = Moment 1+2 (belastingsgevallen) [KNm/m]

γ_j = belastingsfactor (tabel 18)

Ook hier moeten de optredende momenten voor elk belastingsgeval met de bijbehorende belastingsfactor worden vermenigvuldigd en vervolgens bij elkaar worden opgeteld.

Tabel 25 belastingsfactor (VPB, 1999)

belasting	rangorde	
	1 ^e	2 ^e t/m 6 ^e
grond, verkeer, eigen gewicht van de buis, vulling	1,25	1,15

Dwarskracht

De dwarskracht wordt als volgt bepaalt:

$$T(\alpha_k) \approx q_o^* * r * \sin \alpha_k * \cos \alpha_k + N_d * \sin \alpha_k - \frac{Q_{eg}}{2 * \pi * r} * r * \sin \alpha_k * \cos \alpha_k - \frac{\gamma_{vl} * D_i^2}{2} * \sin \alpha_k$$

Met

$$q_o^* = \frac{q_V - q_v}{\sin \alpha_k} + \frac{Q_{eg}}{2 * r * \sin \alpha_k} + \frac{\gamma_{vl} * \frac{\pi}{4} * D_i^2}{2 * r * \sin \alpha_k}$$

Waarin:

r = straal duiker [m]

D_i = inwendige diameter duiker [m]

α_k = karakteristieke opleghoek/2

N_d = opsomming belasting gevallen karakteristieke Normaalkracht 1 [KN/m]

Q_{eg} = eigengewicht [KN/m] (zie 2.6.1.1)

γ_{vl} = dichtheid water [KN/m³]

q_V = Verticale belasting (grond/verkeer) [KN/m²]

q_H = Horizontale belasting (grond/verkeer) KN/m²

De optredende dwarskracht moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare dwarskracht. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$f_c * f_N * \frac{T_d}{h} \leq \frac{0,074 * (4,4 + 2,5 * \omega_o) * f_d * \sqrt{f'_{ck}}}{\left(\frac{M_d}{T_d * h} + 1\right) * \gamma_m}$$

Met

$$\frac{M_d}{T_d * h} \max = 3$$

$$f_N = 0,5 + \frac{N_d}{6 * T_d} + \sqrt{0,25 + \left(\frac{N_d}{6 * T_d}\right)^2}$$

$$f_c = 1 + \frac{h}{D}$$

$$f_d = 0,8 + \frac{40,6}{h}$$

Waarin:

M_d = opsomming belasting gevallen karakteristieke Moment 1 [KNm/m]

N_d = opsomming belasting gevallen karakteristieke Normaalkracht 1 [KN/m]

T_d = optredende dwarskracht [KN/m]

h = nuttige hoogte [mm] (zie 2.6.1.3) [mm]

ω_o = wapeningspercentage (zie 2.6.1.3)

D = gemiddelde diameter duiker [mm]

f_{ck} = karakteristieke cilinderdruksterkte van beton [N/mm²]

$\gamma_m = 1,3$ (tabel 15)

De optredende momenten moeten voor elk belastingsgeval met de bijbehorende belastingsfactor worden vermenigvuldigd en vervolgens bij elkaar worden opgeteld.

$$M_d = \sum M_{1j} \cdot \gamma$$

Waarin

M_d = opsomming belasting gevallen karakteristieke moment 1 [KNm/m]

M_{1j} = Moment (1), (belastingsgevallen) [KNm/m]

γ = belastingsfactor (tabel 18)

Hetzelfde geldt voor N_d

Radiale trek

De toetsing op radiale trek gaat als volgt:

$$\frac{M_d * 10^3 + 0,45 * N_d * h}{h * r_s} \leq \frac{1,2 * 0,074 * \sqrt{f'_{ck}}}{\gamma_m}$$

Met

$$r_s = 0,5 * (D_i + 2 * c)$$

Waarin:

M_d = opsomming belasting gevallen karakteristieke Moment 1 [KNm/m]

N_d = opsomming belasting gevallen karakteristieke Normaalkracht 1 [KN/m]

h = nuttige hoogte [mm] (zie 2.6.1.3) [mm]

r = straal duiker [m]

f_{ck} = karakteristieke cilinderdruksterkte van beton [N/mm²]

D_i = inwendige diameter duiker [m]

c = dekking [mm]

$\gamma_m = 1,3$ (tabel 15)

16.1.2. Flexibele duiker

Uit de berekening van de ringstijfheid in paragraaf 12.1 is te zien dat de ringstijfheid van het PVC, HDPE en staal zeer laag is. Wanneer geprobeerd wordt om met deze lage ringstijfheid de interne krachten te berekenen aan de hand van de methode uit paragraaf 12.1, ontstaan er onrealistische waarden. Het lijkt erop dat, doordat enkele waarden in de formule empirisch zijn bepaald, de uitkomst daardoor niet meer correct is.

Om deze reden is er onderzoek gedaan naar alternatieve beoordelingsmethoden voor flexibele duikers, methoden die, net zoals bij de stijve betonnen duiker, specifiek zijn voor het materiaal.

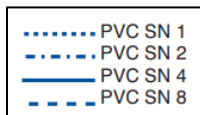
16.1.2.1. Ringdeflectie: PVC, HDPE

Op basis van uitgebreide vervormingsmetingen aan operationele flexibele riolen blijkt dat, ondanks aanzienlijke variaties in omstandigheden, de gemiddelde vervorming van buizen van klasse SN 4 en SN 8 onder de 8% ligt, terwijl de maximale vervorming minder dan 12% bedraagt. Het risico op functieverlies doet zich voor bij een vervorming van 30 à 35%.

Deformatie heeft doorgaans weinig tot geen invloed op de afvoercapaciteit van de buisleiding. Bij een vervorming van 6% treedt echter een verlies van 0,82% in de afvoercapaciteit op.

Praktijkervaring wijst uit dat na 2 jaar, als de buisleiding zorgvuldig is aangelegd, er doorgaans geen noemenswaardige vervorming optreedt. Er ontstaat dan een evenwichtssituatie met de omringende grond.

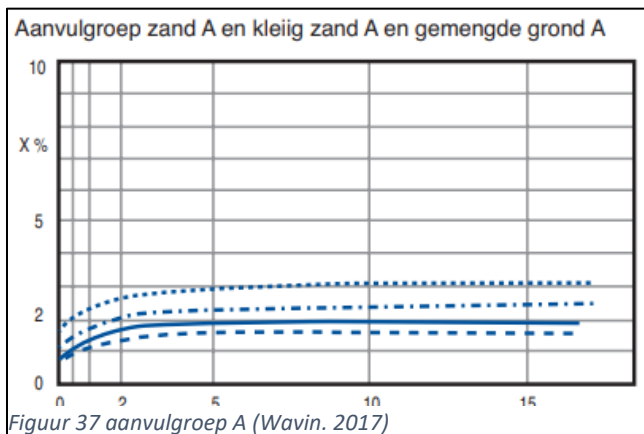
Aan de hand van metingen (Wavin, 2017) zijn grafieken opgesteld die het vervormingsverloop van PVC-riolerings laten zien in verschillende grondinstallaties:



Figuur 36 lijn betekenis (Wavin. 2017)

Deformatie aanvulgroep zand en kleiig zand A:

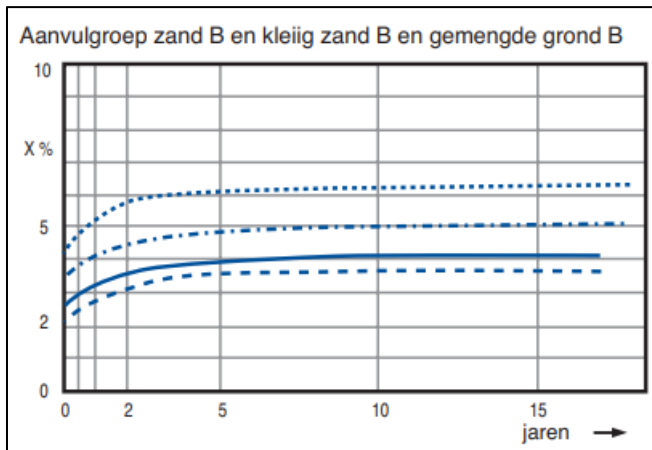
- Sleufbodem is vlak en ter plaatse van de buis over geringe diepte losgemaakt.
- Reguliere buisoplegging, vermijding van lijn- en puntbelastingen.
- Goede aanvulling onder de buis, afhankelijk van de diameter in één of twee lagen, mechanisch verdicht.
- Beperkte inklinking van de grond over de hoogte van de buis door grondeigenschappen.
- Verdere sleufaanvulling is niet van invloed op vervorming maar wordt wel zorgvuldig uitgevoerd.



Figuur 37 aanvulgroep A (Wavin. 2017)

Deformatie aanvulgroep zand en kleiig zand B:

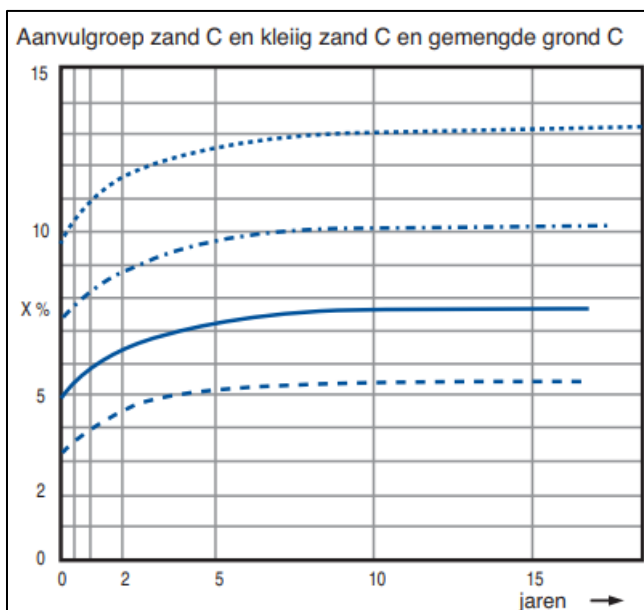
- Sleufbodem is redelijk vlak en niet bewust losgemaakt.
- Onregelmatige ondersteuning van de buis, lokale lijn- en puntbelastingen.
- Onzorgvuldige aanvulling onder de buis, niet gericht verdicht, mogelijk onregelmatige inklinking.
- Rest van de sleufaanvulling wordt soms met enige zorg aangebracht.



Figuur 38 Aanvulgroep B (Wavin. 2017)

Deformatie aanvulgroep zand en kleiig zand C:

- Sleufbodem is niet vlak en niet losgemaakt.
- Zeer onregelmatige buisoplegging, frequente lijn- en puntbelastingen.
- Plaatselijke bevestiging van de buis met grond.
- Ruwe aanvulling naast de buis, weinig tot geen verdichting, matige tot slechte dichtheid van de grond.
- Aanzienlijke inklinking mogelijk.
- Rest van de sleufaanvulling wordt in één keer onzorgvuldig aangebracht.



Figuur 39 Aanvulgroep C (Wavin. 2017)

Deformatie berekening literatuur

Er is weinig literatuur beschikbaar over het vaststellen van de deformatie van flexibele duikers. Dit kan worden toegeschreven aan het feit dat de deformatie beïnvloed kan worden door verschillende variabelen, zoals de geometrie van de duiker, de eigenschappen van het materiaal, de belastingen waaraan het wordt blootgesteld, de bodemomstandigheden, enzovoort. Het is mogelijk dat de complexiteit van de interactie tussen deze factoren en de variabiliteit van de omstandigheden op locatie het moeilijk maken om een algemene, handmatige berekeningsmethode te ontwikkelen die breed toepasbaar is.

Bovendien kan het gedrag van flexibele duikers onderhevig zijn aan niet-lineaire effecten, zoals grote vervormingen, materiaalgedrag dat niet perfect elastisch is, en mogelijk niet-lineaire bodemrespons. Het oplossen van dergelijke niet-lineaire problemen kan vereisen dat geavanceerde numerieke methoden worden toegepast, en dit kan de behoefte aan gespecialiseerde software benadrukken.

Het ontwikkelen van gespecialiseerde software voor de berekening van deformaties van flexibele duikers kan een aanzienlijke inspanning en kosten met zich meebrengen. Terwijl het gebruik van praktijkervaring en vuistregels voldoende zijn om acceptabele resultaten te behalen, vooral als de constructies en omstandigheden niet extreem complex zijn. Zo zijn er aanbevelingen opgesteld voor het installeren van flexibele duikers aan de hand van de SN-klasse (Wavin, 2017).

Aanvulgroep Hoogte	Zand, zanderige klei en gemengde grond		
	A	B	C
0,6-1 m	SN 2	SN 4	SN8 IT Ultra-Rib SN8
1-4m	SN 2	SN 2 SN 4	SN 4
>4 m	SN 4 SN 8	SN 4	IT Ultra-Rib SN8

Figuur 40 aanbevelingen flexibele duikers (Wavin, 2017)

Toetsing

Er is echter een eenvoudige toetsing die in de praktijk wordt toegepast (Bergschenhoek, 2019), waarbij de deformatie van een SN-klasse wordt berekend met de volgende formule:

$$\Delta y = \frac{Dl \cdot (Wc + Wl)k}{EI + 0,0061 * E'}$$

Met

$$E' = C\gamma H$$

$$Wi = qvi * Du$$

Waarin:

Δy = Deflectie van de buis in percentage

DI = Rekenwaarde van de kruip

W_c = grondbelasting [kN/m]

W_l = verkeersbelasting [kN/m]

q_{vg} = grondbelasting [kN/m²]

q_{vv} = verkeersbelasting [kN/m²]

D_u = uitwendige diameter duiker [m]

k = Buigconstante van de grond

EI = Ringstijfheid SN [N/mm²]

E' = Elasticiteitsmodulus van grond [N/mm²]

H = dikte grondlaag [m]

γ = dichtheid grondlaag [kg/m³]

C = de constante van Buisman (zie tabel 19)

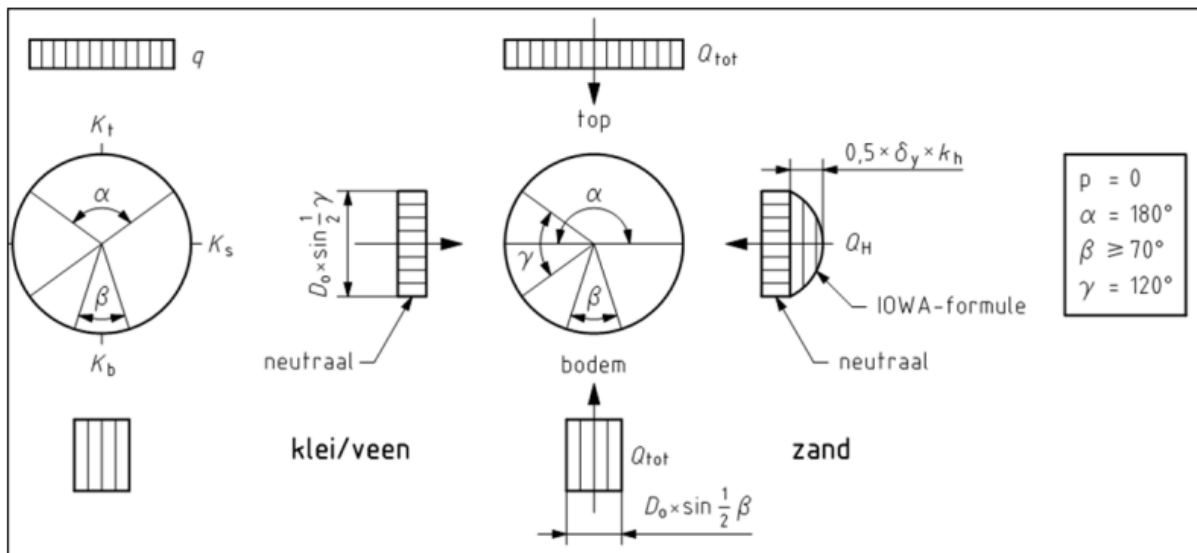
De parametrische berekening zal gebruikmaken van deze formule, maar het wordt aanbevolen om de resultaten te controleren aan de hand van vuistregels.

Tabel 26 grondsoort met constante buisman

Grondsoort	C
Slappe veengrond	20
Stevige kleigrond	30
Los en kleihoudend zand	40
Zand	50-200

16.1.2.2. Interne krachten: Staal

Wanneer de belasting bekend is, kan de berekening van de interne krachten die dit veroorzaakt worden berekend. De NEN 3650-serie schrijft voor hoe deze spanning berekend moet worden, waarbij men uitgaat van belastinghoeken en ondersteuningshoeken. De grootte van deze hoeken is afhankelijk van de aanlegtechniek, wat aanzienlijk verschilt tussen het ingraven en boren van een leiding. In het ene geval is er sprake van aanleg in een "open sleuf", terwijl in het andere geval gebruik wordt gemaakt van een persinstallatie.



Figuur 41 belasting en ondersteuningshoeken (Sigma, 2016)

De hoek α vertegenwoordigt de belastinghoek op de leiding en varieert tussen 0° en 180° . De hoek β duidt op de ondersteuningshoek en kent ook een variatie van 0° tot 180° . In deze studie nemen we er gekozen voor de aanpak van een opensleufmethode voor de aanleg van rioolinstallaties, wat verwijst naar de conventionele methode waarbij een sleuf wordt gegraven voor het plaatsen van rioolbuizen. Bij de open sleuf methode wordt over het algemeen aangenomen dat de belastinghoek 180° is en de ondersteuningshoek 70° bedraagt. Nu deze waarden zijn vastgesteld, kan de onderstaande tabel worden geraadpleegd om de interne krachten te berekenen.

α graden	β graden	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y verticaal	α graden	β graden	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y verticaal
0	0	0,318	0,318	-0,182	0,149	90	0	0,306	0,182	-0,168	0,129
	30	0,259	0,317	-0,180	0,146		30	0,246	0,180	-0,166	0,127
	60	0,213	0,312	-0,175	0,138		60	0,201	0,175	-0,161	0,118
	90	0,182	0,305	-0,168	0,129		90	0,169	0,169	-0,154	0,110
	120	0,162	0,299	-0,161	0,122		120	0,150	0,163	-0,147	0,103
	150	0,153	0,295	-0,156	0,117		150	0,140	0,158	-0,142	0,098
	180	0,150	0,294	-0,153	0,116		180	0,137	0,157	-0,140	0,096
30	0	0,317	0,259	-0,180	0,146	120	0	0,299	0,162	-0,161	0,122
	30	0,257	0,257	-0,178	0,143		30	0,240	0,160	-0,159	0,119
	60	0,211	0,252	-0,173	0,135		60	0,194	0,156	-0,154	0,111
	90	0,180	0,246	-0,166	0,127		90	0,163	0,150	-0,147	0,103
	120	0,160	0,240	-0,159	0,119		120	0,143	0,143	-0,143	0,096
	150	0,151	0,236	-0,154	0,115		150	0,139	0,139	-0,135	0,091
	180	0,148	0,235	-0,152	0,113		180	0,138	0,138	-0,133	0,089
60	0	0,312	0,213	-0,175	0,138	150	0	0,295	0,153	-0,156	0,117
	30	0,252	0,211	-0,173	0,135		30	0,236	0,151	-0,154	0,115
	60	0,207	0,207	-0,168	0,122		60	0,190	0,146	-0,149	0,107
	90	0,175	0,201	-0,161	0,118		90	0,158	0,140	-0,142	0,098
	120	0,156	0,194	-0,154	0,111		120	0,139	0,134	-0,135	0,091
	150	0,146	0,190	-0,149	0,107		150	0,129	0,129	-0,129	0,086
	180	0,143	0,189	-0,147	0,105		180	0,126	0,128	-0,128	0,085
	0					180	0	0,294	0,150	-0,153	0,116
	30						30	0,235	0,148	-0,152	0,113
	60						60	0,189	0,143	-0,147	0,105
	90						90	0,157	0,137	-0,140	0,096
	120						120	0,138	0,131	-0,133	0,089
	150						150	0,128	0,126	-0,127	0,085
	180						180	0,125	0,125	-0,126	0,083

Tabel 27 coëfficiënten (Sigma, 2016)

Dit zijn moment coëfficiënten voor direct overgedragen gronddrukken. Aan de hand van deze tabel kan er een aangepaste versie opgesteld worden die specifiek is voor de omstandigheden die in dit onderzoek worden behandeld.

Tabel 28 coëfficiënten voor opensleuf methode

Factor	$\alpha = 180 ; \beta = 70$
kb	0,178
kt	0,141
ks	-0,145

Nu kan de volgende formule worden ingevuld om de spanning te berekenen:

$$\sigma_i = \frac{M_i}{W_w}$$

Met

$$M_i = k_i * Q_n * r_g$$

$$W_w = \frac{1}{6} * d^2$$

$$Q_n = (qvg + qvv) \cdot D$$

Waarin:

σ_i = Interne spanning (bodem, top, zijden) [N/mm²]

M_i = Moment (bodem, top, zijden) [Nmm/mm¹]

W_w = het wandweerstandsmoment van de leiding in [mm³/mm¹]

Q_n = belasting grond en verkeer [N/mm]

r_s = straal van duiker [mm]

k_i = moment coëfficiënten (bodem, top, zijden)

d = wanddikte duiker [mm]

q_{vg} = grondbelasting [kN/m²]

q_{vv} = verkeersbelasting [kN/m²]

D_u = uitwendige diameter duiker [m]

Nu de interne spanning bekend is kan dat worden getoetst met een eenvoudige spanningstoetsing

$$\frac{\sigma_i}{f_y} \leq 1$$

Waarin

σ_i = Interne spanning (bodem, top, zijden) [N/mm²]

f_y = vloeigrens [N/mm²]

16.2. Liggertoetsing

Na de behandeling van de ringwerking in paragraaf, wordt nu de focus verlegd naar de andere belangrijke dimensie van duikeraanalyse: de liggerwerking. In tegenstelling tot de ringwerking, waarbij krachten direct aan de grond worden doorgegeven over de dwarsdoorsnede, doet de liggerwerking zich voor via een indirecte overdracht. In dit hoofdstuk wordt de liggertoetsing van zowel stijve als flexibele duikers onder de loep genomen, waarbij de focus ligt op het begrijpen van de krachten die via deze mechanismen worden overgedragen.

16.2.1. Liggerbelasting

De wijze waarop de grondbelasting en verkeersbelasting worden opgenomen, verschilt aanzienlijk van de ringwerking. De grondbelasting wordt nog steeds beschouwd als een q-last, maar nu over de gehele lengte van de duiker. Dit resulteert in een constante belasting per strekkende meter.

Verder hebben het eigengewicht en de waterbelasting een wel andere impact op de duiker. Zoals in paragraaf 2.4.1.1 al is benoemd, kan de opwaartse waterbelasting bij de liggerwerking van de duiker een gunstig effect hebben op de totale belasting. Het eigengewicht en watervulling van de duiker, net als de grondbelasting, zijn gelijkmatig verdeeld en vormen als neerwaartse belasting een ongunstige factor.

Aan de andere kant wordt de verkeersbelasting, door het effect van liggerwerking, nu beschouwd als een puntlast. Dit betekent dat de belasting wordt geconcentreerd op specifieke punten. Het aantal punten is afhankelijk van de hoeveelheid rijstroken. Deze verandering kan een aanzienlijke impact hebben op de structurele reacties en de resulterende spanningen binnen de duiker. Bij dit onderzoek wordt het aantal rijstroken beperkt tot drie. Voor de drie scenario's wordt gezocht naar het maximale moment en de maximale dwarskracht.

16.2.2. Belastingsfactoren

De belastingen worden ingedeeld in drie categorieën: permanent, variabel door voertuigen, en gunstig werkend. Deze categorieën worden gekoppeld aan belastingsfactoren volgens tabel NB 13 van NEN-EN 1990, zoals weergegeven in onderstaande tabel:

Tabel 29 belastingsfactoren

Type	Belastingsgeval	UGT (6,10a)	UGT (6,10b)
Permanent	Grondbelasting + Eigengewicht	1,3	1,2
Veranderlijk door voertuig	Verkeersbelasting	1,35*0,8	1,35
Gunstig werkend	Totale waterbelasting (resultante opwaarts)	0,9	0,9

16.2.3. Belastingen

Eerste worden alle belastingsgevallen los van elkaar berekend:

Eigengewicht

$$Eigengewicht = (\pi(r + 2 \cdot d)^2 - \pi r^2) \cdot g$$

Waarin:

r = inwendige straal [m]

d = wanddikte [m]

g = dichtheid materiaal [KN/m³]

Grondbelasting + eigengewicht

De grondbelasting wordt opnieuw bepaalt zonder waterbelasting

$$q_{perm} = (\lambda_{vg} \cdot H \cdot \gamma) \cdot Du + eg$$

Waarin:

q_{perm} = permanente belasting [KN/m¹]

λ_{vg} = Verticale grond concentratie factor

γ = dichtheid grond boven duiker [KN/m³]

H = dikte grondlaag [m]

Du = uitwendige diameter [m]

eg = eigengewicht [KN/m¹]

Verkeersbelasting

De verkeersbelasting wordt alleen vermenigvuldigt met de diameter om met de juiste eenheid te rekenen:

$$F_{ver} = q_{vv} \cdot Du$$

Waarin:

q_{ver} = veranderlijke belasting door voertuig [KN/m]

q_{vv} = verkeersbelasting [KN/m²]

Du = uitwendige diameter [m]

Totale waterbelasting

$$q_{ver, water} = neerwaartse + opwaartse$$

$$neerwaartse = A * g$$

$$opwaartse = (gws - (bok - d)) * Du * g$$

Met

$$h = Di - (gws - bok) \geq \min = 0$$

$$\theta = 2 \arccos\left(\frac{r - h}{r}\right)$$

$$A = \pi r^2 - \frac{r^2(\theta - \sin \theta)}{2}$$

Waarin:

Di = inwendige diameter [m]

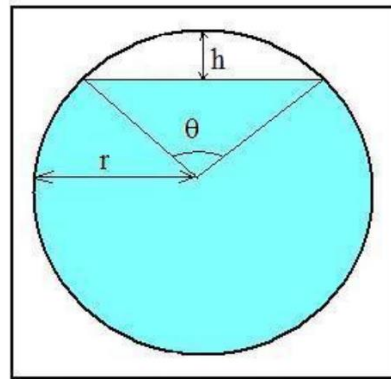
Du = uitwendige diameter [m]

gws = grondwaterstand [m NSP]

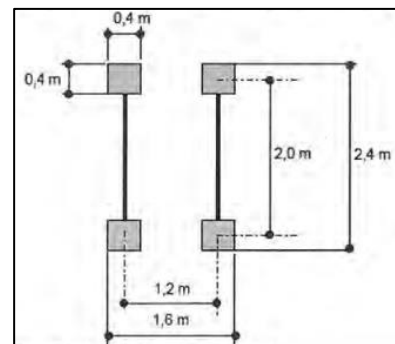
bok = inwendige onderkant duiker [m NSP]

d = wanddikte [m]

g = dichtheid water [KN/m³]



Figuur 42 wateropervalkte (Oranjewoud 2012)



Figuur 43 tandem-as (Oranjewoud 2012)

factoren toegepast

Deze belastingen worden voorzien van factoren UGT 6.10a en 6.10b. Pas bij het berekenen van Med en Ved wordt duidelijk welke situatie bepalend is. Voorlopig wordt doorgerekend met een q-last, samengesteld uit gelijkmatig verdeelde belastingen, en een puntlast van de verkeersbelasting:

$$q = q_{perm} * \gamma_1 + q_{ver, water} (* \gamma_2 \text{ bij gunstig}) \text{ [KN/m]}$$

$$F = F_{ver} * \gamma_3 \text{ [KN]belastingsh}$$

16.2.4. Wegindeling

Er zijn verschillende manieren om de weg in te delen. De manier waarop de weg wordt ingedeeld, heeft echter invloed op de plaatsing van de puntlasten in het belastingsmodel. Aangezien de wegingdeling niet altijd hetzelfde is, worden de as-lengte en afstanden tussen rijstroken meegenomen als parameters. In dit onderzoek wordt echter gerekend met een standaard, aan de hand van een voetafdruk van een tandem-as volgens de NEN-EN 1991-2 (figuur 43). Een voertuig heeft hier een totale as-lengte van 2,4 m, waar 1 m bij wordt opgeteld als tussenafstand van de rijstroken. Uit deze twee waarden bestaat factor b in de belastingsberekening. Factor a is dus de waarde die overblijft wanneer de wegbreedte wordt afgetrokken van de totale duikerlengte, waarbij ervan wordt uitgegaan dat de weg in het midden wordt geplaatst, zodat aan beide zijden evenveel speling overblijft.

Rijstrook 1

$$M_{ver} = V1 * a$$

$$V_{ver} = V1$$

Met

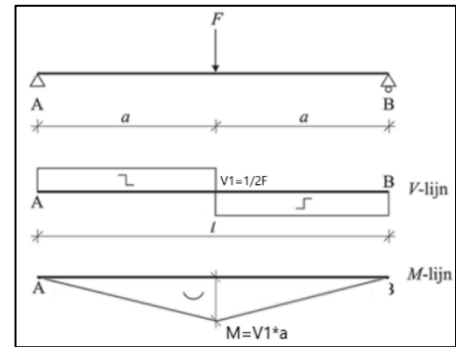
$$V1 = \frac{1}{2} * F$$

$$a = \frac{1}{2} * L$$

Waarin:

F = karakteristieke verkeersbelasting (6.10a of 6.10b) [KN]

L = lengte duiker [m]



Figuur 44 1 puntlast

Rijstrook 2

$$M_{ver} = V1 * a$$

$$V_{ver} = V1$$

Met

$$V1 = F$$

$$a = \frac{1}{2} * (L - b)$$

b = aslengte + tussen afstand rijstroken

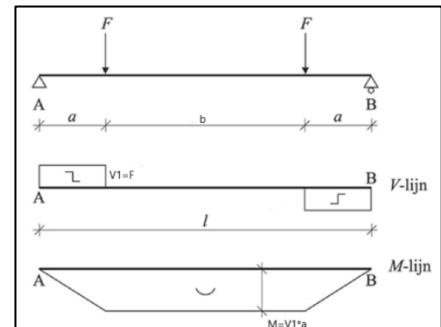
Waarin:

F = karakteristieke verkeersbelasting (6.10a of 6.10b) [KN]

L = lengte duiker [m]

As lengte = as lengte (zie paragraaf 15.2.4) [m]

Tussen afstand rijstroken = tussen afstand rijstroken (zie paragraaf 15.2.4) [m]



Figuur 45 2 puntlasten

Rijstrook 3

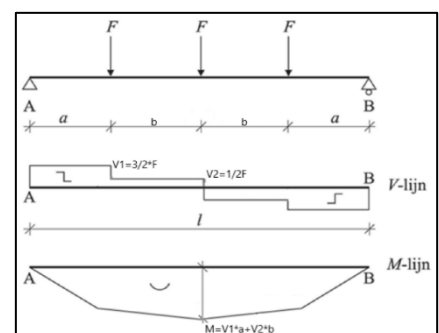
$$M_{ver} = V1 * a + V2 * b$$

$$V_{ver} = V1 + V2$$

Met

$$V1 = \frac{3}{2} * F$$

$$V2 = \frac{1}{2} * F$$



Figuur 46 3 puntlasten

$$a = \frac{1}{2} * (L - 2 * b)$$

$b = \text{as lengte} + \text{tussen afstand rijstroken}$

Waarin:

$F = \text{karakteristieke verkeersbelasting (6.10a of 6.10b) [kN]}$

$L = \text{lengte duiker [m]}$

$\text{As lengte} = \text{as lengte (zie paragraaf 15.2.4) [m]}$

$\text{Tussen afstand rijstroken} = \text{tussen afstand rijstroken volgens (zie paragraaf 15.2.4) [m]}$

Moment en dwarskracht

Het uiteindelijke moment en dwarskracht wordt dus als volgt berekend:

$$M_{ed} = \frac{1}{8} * ql^2 + M_{ver}$$

$$V_{ed} = \frac{1}{2} ql + V_{ver}$$

Vanaf dit punt zijn M_{ed} en V_{ed} bekend, en kan worden vastgesteld welk belastingsgeval bepalend is voor het moment en de dwarskracht.

16.2.5. Betonnen duikers

Voor de berekening van de betonnen duiker is besloten om, bij zowel de ongewapende toetsing op dwarskracht als de gewapende toetsing op zowel dwarskracht als buiging, de ronde duiker te vereenvoudigen tot een vierkant. Er is geen literatuur gevonden voor het toetsen van een ronde betonnen buis met liggerwerking. Echter, literatuur voor het toetsen van een vierkante duiker is wel beschikbaar. Deze vereenvoudiging van de vorm is overlegd met ervaren ingenieurs van AMB N.V. en is goedgekeurd, omdat het een conservatieve benadering betreft. Indien de vierkante duiker voldoet, zou in theorie ook de ronde buis moeten voldoen. De volgende geometrische vereenvoudiging wordt toegepast:

H/B = uitwendige diameter (D_u)

d = wanddikte (d)

16.2.5.1. Buiging

Ongewapend

Bij deze toetsing wordt de duiker echter nog steeds behandeld als een ronde constructie, en de weerstandsmoment wordt berekend op basis van deze geometrie

$$W_c = \frac{\pi(D_u^4 - D_i^4)}{32D_u}$$

Waarin:

D_u = uitwendige diameter duiker [mm]

D_i = inwendige diameter duiker [mm]

Als je het weerstandsmoment W_c van een doorsnede vermenigvuldigt met de gemiddelde treksterkte van beton f_{ctm} , krijg je een waarde die gerelateerd is aan de weerstand tegen buiging van het betonnen element. Deze vermenigvuldiging geeft de maximale buigende momentcapaciteit M_{cr} van het betonnen element:

$$M_{cr} = W_c \cdot f_{ctm,fl}$$

Waarin:

W_c = weerstandsmoment

$f_{ctm,fl}$ = gemiddelde treksterkte van beton

De optredende moment moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare moment. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Gewapend

Wanneer de duiker begint te scheuren onder invloed van buigend moment, kan dit leiden tot verlies van functionaliteit. Daarom wordt de duiker beoordeeld op het scheurmoment, dat wordt berekend met de volgende formule:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_0}{z_{onder}}$$

Waarin

$f_{ctm,fl}$ = gemiddelde treksterkte van beton

I_0 = kwadratisch oppervlakte moment

z_{onder} = hoogte van oppervlakte onder het zwaartepunt.

Om de hoogte van de oppervlakte onder het zwaartepunt te bepalen, moet natuurlijk eerst het zwaartepunt worden berekend. Dit wordt gevonden met behulp van de volgende formule:

$$x = \frac{A_c \cdot x_c + A_{s,\alpha e} \cdot x_s}{A_c + A_{s,\alpha e}}$$

Waarin:

A_c = oppervlakte beton [mm²]

x_c = zwaartepunt beton, oftewel de helft van de hoogte [mm]

$A_{s,\alpha e}$ = Vergrootte wapeningsdoorsnede [mm²]

x_s = nuttige hoogte (d) [mm]

De nuttige hoogte wordt bepaald met de onderstaande formule:

$$d = h - c + (-\phi bgl) - \frac{\phi k}{2}$$

Omdat de elasticiteitsmodulus van staal groter is dan die van beton, heeft dit een aanzienlijke invloed op het bepalen van het zwaartepunt. Om het juiste zwaartepunt te vinden, moet staal worden vermenigvuldigd met een factor die evenredig is aan het verschil in elasticiteitsmodulus. De vergrotingsfactor wordt berekend met de volgende formule:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$$

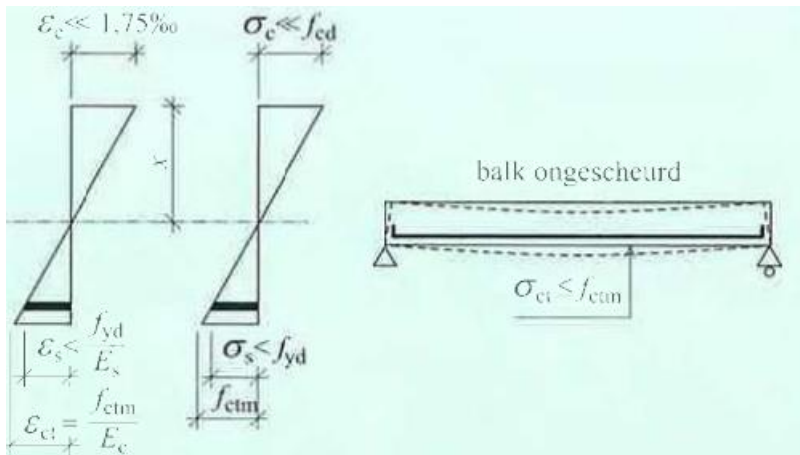
Waarin:

E_s = Elasticiteitsmodulus Staal [N/mm²]

E_c = Elasticiteitsmodulus Beton [N/mm²]

De elasticiteitsmodulus van beton is afhankelijk van ε , het punt waarop het scheurmoment wordt bereikt. Het vervormings- en spanningsdiagram zijn weergegeven in figuur 47. Bij het scheurmoment is de drukspanning $\varepsilon \ll 1,75\text{‰}$. Daarom kan de elasticiteitsmodulus als volgt worden bepaald

$$E_c = \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{ct}}$$



Figuur 47 elasticiteitsmodulus (Beton tabellen. 2014)

Nadat het zwaartepunt is bepaald, is ook de hoogte van het oppervlak onder het zwaartepunt bekend, waardoor het kwadratisch oppervlaktemoment kan worden berekend met behulp van de stelling van Steiner:

$$z_{onder} = h - x$$

En

$$I_0 = \sum (I_{eigen} + I_{steiner})$$

Waarin:

$$I_{eigen} = \frac{1}{12} * b * h^3$$

$$I_{steiner,beton} = A_c \cdot (x - x_c)^2$$

$$I_{steiner,staal} = A_{s,\alpha e} \cdot (x - x_s)^2$$

16.2.5.2. Afschuiving

Het nauwkeurig berekenen van het afschuifdraagvermogen van een gewapend-betonconstructie is complex en vereist het gebruik van empirische formules. NEN-EN 1992-1-1 biedt een praktische en eenvoudige toetsingsmethode waarbij de gemiddelde schuifspanning wordt toegepast. Deze gemiddelde schuifspanning wordt als volgt gedefinieerd:

$$v_{ed} = \frac{V_{ed}}{bd}$$

Waarin:

V_{ed} = karakteristieke dwarskracht [N]

$$d = h - c + (-\phi b g l) - \frac{\phi k}{2} \text{ [mm]}$$

b = twee keer de wanddikte [mm]

Ongewapend

NEN-EN 1992-1-1 stelt een veilige ondergrens vast waarbij de betondoorsnede zonder dwarskrachtwapening een schuifspanning kan opnemen. Deze kan worden berekend met behulp van de volgende formule:

$$v_{rdc} = v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

Met

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$$

Waarin:

f_{ck} = karakteristieke cilinderdruksterkte van beton [N/mm²]

d = wanddikte duiker [mm]

De resulterende schuifspanning moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare schuifspanning. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{v_{ed}}{v_{rdc}} \leq 1$$

Gewapend

Wanneer er wapening wordt toegepast, kan met behulp van de volgende formule worden bepaald hoeveel wapening nodig is om de optredende schuifspanning op te kunnen nemen:

$$A_{sw} = \frac{v_{ed} \cdot b \cdot s}{0,9 \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta}$$

Voor dit onderzoek is het echter raadzaam de gebruikte dwarskrachtwapening als invoerparameter mee te nemen. Hierdoor is het handiger om de formule om te bouwen naar:

$$v_{rdc} = \frac{A_{sw} \cdot 0,9 \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta}{b \cdot s}$$

Waarin:

A_{sw} = dwarswapeningsdoorsnede [mm²]

f_{yd} = karakteristieke waarde van de treksterkte

b = twee keer de wanddikte [mm]

s = beugelafstand [mm]

In dit geval moet de resulterende schuifspanning ook kleiner zijn dan de maximaal opneembare schuifspanning. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{v_{ed}}{v_{rdc}} \leq 1$$

16.2.6. Flexibele duikers

De toetsing op buiging en afschuiving van flexibele duikers vertoont grotendeels overeenkomsten. Het verschil ligt in het feit dat staal een duidelijke vloeigrens f_y heeft, wat resulteert in zowel elastische als plastische vervorming. Bij staal wordt de toetsing op buiging uitgevoerd met betrekking tot het elastisch grensmoment $M_{c,Rd}$, bepaald op basis van de elastische sectiemodulus W_{ce} en de vloeigrens f_y . Daarentegen wordt bij PVC en HDPE de toetsing op buigend moment uitgevoerd met betrekking tot de treksterkte f_u van het materiaal.

16.2.6.1. Stalen duiker

Buiging

De controle op buiging wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{i(y/z)l} * f_y}{\gamma_M}$$

Waarin:

f_y = vloeigrens staal [N/mm²]

γ_M = veiligheidsfactor

$W_{i(y/z)l}$ = Elastisch of plastisch weerstandsmoment [mm³]

Volgens NEN-EN 1990 is de veiligheidsfactor 1. Voor het bepalen van het weerstandsmoment wordt het volgende gedaan:

$$W_{ce} = \frac{\pi(Du^4 - Di^4)}{32Du}$$

En

$$W_{cp} = \frac{\pi(Du^4 - Di^4)}{32Du} \cdot a$$

Waarin:

Di = inwendige diameter [m]

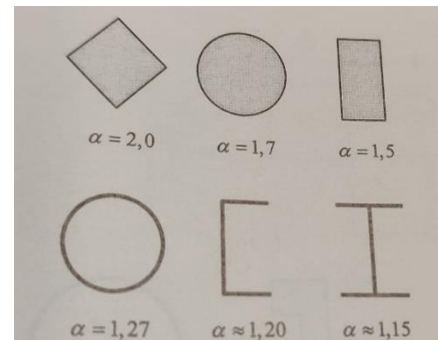
Du = uitwendige diameter [m]

a = vormfactor

Voor het bepalen van het plastische weerstandsmoment moet er een vormfactor gebruikt worden (Hartsuijker, 2010). Het plastische weerstandsmoment wordt verkregen door het elastische weerstandsmoment te vermenigvuldigen met de overeenkomstige vormfactor 1,27 (zie figuur 48).

De optredende moment moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare moment. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$



Figuur 48 Hartsuijker, C. (2010).

Afschuiving

De controle op afschuiving wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_w * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M}$$

Waarin:

A_w = effectieve dwarsdoorsnedeoppervlakte [mm²]

f_y = vloeigrens staal [N/mm²]

γ_M = veiligheidsfactor

A_w vertegenwoordigt de effectieve dwarsdoorsnedeoppervlakte van het gebied dat de schuifspanning zal opnemen. De berekening van dit oppervlak wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$A_w = 2A/\pi$$

Met

$$A = \frac{\pi(Du^2 - Di^2)}{4}$$

Waarin:

Di = inwendige diameter [m]

Du = uitwendige diameter [m]

De optredende dwarskracht moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare dwarskracht. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

Buiging

De controle op buiging wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{(y/z)l} * f_u}{\gamma_M}$$

Waarin:

f_u = maximale treksterkte [N/mm²]

γ_M = veiligheidsfactor

$W_{(y/z)l}$ = Weerstandsmoment [mm³]

Volgens NEN-EN 1990 is de veiligheidsfactor 1. Voor het bepalen van het weerstandsmoment wordt het volgende gedaan:

$$W_c = \frac{\pi(Du^4 - Di^4)}{32Du}$$

Waarin:

Di = inwendige diameter [m]

Du = uitwendige diameter [m]

De optredende moment moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare moment. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Afschuiving

De controle op afschuiving wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_w * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_M}$$

Waarin:

A_w = effectieve dwarsdoorsnedeoppervlakte [mm²]

f_u = maximale treksterkte [N/mm²]

γ_M = veiligheidsfactor

A_w vertegenwoordigt de effectieve dwarsdoorsnedeoppervlakte van het gebied dat de schuifspanning zal opnemen. De berekening van dit oppervlak wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$A_w = 2A/\pi$$

Met

$$A = \frac{\pi(Du^2 - Di^2)}{4}$$

Waarin:

Di = inwendige diameter [m]

Du = uitwendige diameter [m]

De optredende dwarskracht moet vervolgens kleiner zijn dan de maximaal opneembare dwarskracht. Deze toetsing wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

17. Bijlage V: MKI

17.1. MKI

17.1.1. milieueffecten

De 11 bouwstenen van de Milieukostenindicator (MKI) voor de bouwsector kunnen variëren afhankelijk van de specifieke methodologie en regelgeving die in de regio of land wordt gebruikt. In Nederland wordt de MKI-methodologie vaak geïmplementeerd volgens de Nationaal Milieubeheerprogramma (NMP)-methode. Het combineert verschillende milieu-effectcategorieën om een geheel beeld te geven van de milieu-impact. Hier zijn de uitleg en betekenis van enkele veelvoorkomende milieu-effectcategorieën:

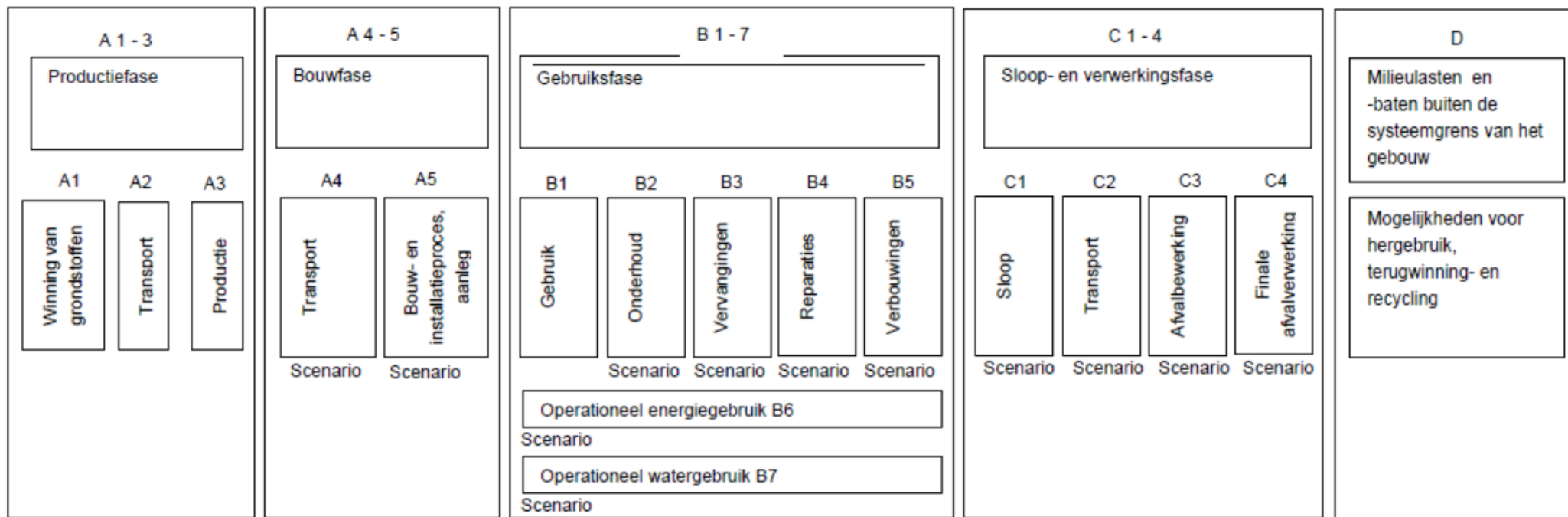
1. Uitputting abiotische grondstoffen: Beoordeelt de impact van het putten van niet-hernieuwbare natuurlijke hulpbronnen, zoals metalen en mineralen.
2. Uitputting fossiele energiedragers: Meet de uitputting van fossiele brandstoffen, zoals steenkool, aardolie en aardgas.
3. Klimaatverandering: Beoordeelt de emissies van broeikasgassen, zoals kooldioxide (CO₂), methaan (CH₄) en lachgas (N₂O), die bijdragen aan het broeikaseffect.
4. Aantasting ozonlaag: Meet de uitstoot van stoffen die de ozonlaag aantasten, zoals chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's).
5. Fotochemische oxidantvorming: Beoordeelt de emissies van stoffen die bijdragen aan de vorming van fotochemische oxidanten, zoals ozon aan de grondniveau (smog).
6. Verzuuring: Beoordeelt de emissies van stoffen die verzuuring van bodem en water veroorzaken, zoals zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxiden (NO_x).
7. Vermesting: Beoordeelt de impact van de overmatige aanwezigheid van voedingsstoffen, vooral stikstof en fosfor, in ecosystemen.
8. Humane Toxiciteit: Meet de toxiciteit van stoffen voor menselijke gezondheid, zoals chemische stoffen die kanker kunnen veroorzaken.
9. Zoetwater aquatische ecotoxiciteit: Beoordeelt de impact van verontreiniging op zoetwater ecosystemen, met inbegrip van de toxiciteit van stoffen voor aquatische organismen.
10. Mariene aquatische ecotoxiciteit: Meet de impact van verontreiniging op mariene ecosystemen, met inbegrip van de toxiciteit van stoffen voor zeedieren en planten.
11. Terrestrische ecotoxiciteit: Beoordeelt de impact van verontreiniging op landecosystemen, met inbegrip van de toxiciteit van stoffen voor terrestrische organismen.

17.1.2. Levenscyclus

De Milieukostenindicator (MKI) is een maatstaf die de totale milieu-impact van een product, dienst, of project gedurende de hele levenscyclus beoordeelt. Deze levenscyclus wordt doorgaans onderverdeeld in vier belangrijke fasen, waarbij elke fase een specifieke rol speelt in het begrijpen van de milieu-impact:

1. Productie (Inclusief Grondstoffenwinning): In deze fase worden grondstoffen gewonnen en omgezet in bouwmaterialen of producten. Het omvat mijnbouw, fabricage, transport van grondstoffen en productie. De milieu-impact hangt af van de hoeveelheid energie en hulpbronnen die nodig zijn en eventuele emissies.
2. Bouw en Constructie: Hier worden bouwmaterialen en producten gebruikt om een gebouw of project te realiseren. De milieu-impact omvat directe effecten van de constructie, zoals energieverbruik, en indirecte effecten zoals transport en bouwafval
3. Gebruik en Onderhoud: Tijdens de gebruiksfase wordt gekeken naar het energieverbruik en operationele impact gedurende de levensduur. Onderhoud en reparaties zijn ook van belang, omdat ze de milieu-impact kunnen beïnvloeden.
4. Einde Levensduur en Recyclage (of Verwijdering): Aan het einde van de levensduur moet worden beslist over verwijdering of recycling. Keuzes in deze fase hebben invloed op de totale milieu-impact. Recycling richt zich op hergebruik van materialen om nieuwe grondstoffen te besparen.

Het evalueren van de milieu-impact gedurende de hele levenscyclus helpt bij het identificeren van kritieke punten waar duurzame praktijken kunnen worden toegepast om de impact te verminderen. Deze benadering maakt het mogelijk om te beoordelen welke fase de grootste bijdrage levert aan de totale MKI-score, en helpt bij het nemen van beslissingen om de milieu-impact te verminderen. Het uiteindelijke doel is om producten en projecten te ontwikkelen die duurzamer zijn en minder schadelijk zijn voor het milieu gedurende hun hele levenscyclus.



Figuur 49 levenscyclus (NMD, 2020)

17.1.3. Weegfactoren

Weegfactoren zijn cijfers die worden gebruikt om de impact van verschillende milieuaspecten te wegen. Deze factoren helpen bij het combineren van verschillende milieu-impactcategorieën in een gestandaardiseerde eenheid, waardoor een meer alomvattend beeld ontstaat van de totale milieubelasting van een product gedurende de gehele levenscyclus.

Schaduwkosten vormen een benadering binnen het brede spectrum van weegfactoren.

Schaduwkosten zijn een manier om de maatschappelijke kosten van milieuschade te kwantificeren.

Deze kosten proberen de externe kosten van milieuvervuiling in monetair termen uit te drukken.

Door schaduwkosten toe te passen, kan men proberen de economische waarde van milieueffecten in besluitvormingsprocessen te integreren, waardoor duurzamere keuzes kunnen worden bevorderd.

In wezen helpen weegfactoren, waaronder schaduwkosten, bij het vertalen van complexe milieueffecten naar begrijpelijke en vergelijkbare eenheden, waardoor betere besluitvorming mogelijk is bij het evalueren van de duurzaamheid van producten, materialen of processen. Het is echter belangrijk op te merken dat de keuze van weegfactoren en schaduwkosten afhankelijk is van de gehanteerde methodologie en dat er geen universele standaard is voor deze waarden.

Het onderstaande figuur weergeeft de weegfactoren voor de Milieukostenindicator (MKI) in de Nederlandse bouwsector zoals die in 2020 werden gebruikt.

Milieueffectcategorie	Equivalent eenheid	Weegfactor [€ / kg equivalent]
Uitputting abiotische grondstoffen (exclusief fossiele energiedragers) – ADP	Sb eq	€ 0,16
Uitputting fossiele energiedragers – ADP	Sb eq ^b	€ 0,16
Klimaatsverandering – GWP 100 j.	CO ₂ eq	€ 0,05
Aantasting ozonlaag – ODP	CFK-11 eq	€ 30
Fotochemische oxidantvorming – POCP	C ₂ H ₄ eq	€ 2
Verzuring – AP	SO ₂ eq	€ 4
Vermesting – EP	PO ₄ eq	€ 9
Humane toxiciteit – HTP	1,4-DCB eq	€ 0,09
Zoetwater aquatische ecotoxiciteit – FAETP	1,4-DCB eq	€ 0,03
Mariene aquatische ecotoxiciteit - MAETP	1,4-DCB eq	€ 0,0001
Terrestrische ecotoxiciteit – TETP	1,4-DCB eq	€ 0,06

Figuur 50 weegfactoren (NMD 2020)

17.1.4. Calculatiemethode

De berekeningsmethode van de MKI-scores voor duurzaamheid is afgeleid van de methode die wordt toegepast door de Stichting Nationale Milieudatabase (NMD) in de LCA-rapportages van categorie 3-gegevens. Het proces voor het berekenen van de MKI-scores omvat vier stappen:

- Fase analyse
- Materiaal & Processen
- Milieueffecten
- Schaduwkosten

17.1.4.1. Fases

Allereerst worden alle fasen van de levenscyclus van de duiker doorlopen volgens Stichting NMD normen, waarbij de hoeveelheden worden uitgesloten vanwege de parametrische aard van het ontwerp.

Productiefase (A1-A3):

In deze fase wordt het materiaal geproduceerd. De specifieke eigenschappen van het materiaal, zoals samenstelling en productieprocessen, worden geanalyseerd.

Transportfase (A4, C2):

Het materiaal ondergaat transport naar de werklocatie en, indien van toepassing, naar de afvalverwerkingslocatie aan het einde van de levensduur. De afgelegde afstanden en transportmiddelen worden beschouwd.

Constructiefase (A5):

Tijdens de constructiefase wordt het materiaal gebruikt in bouw- en installatieprocessen. Er kunnen reserves worden toegepast op de berekeningen om onvoorziene omstandigheden in deze fase te dekken.

Gebruik en Onderhoudsfase (B1, B2-B5):

Deze fase omvat het gebruik van het materiaal gedurende de levensduur. Eventueel onderhoud wordt beschouwd, inclusief reparaties en vervangingen.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D):

Aan het einde van de levensduur wordt het materiaal verwijderd. Het afvalscenario omvat de verwerking van het materiaal, zoals storting en recycling. Baten en lasten buiten het systeem worden ook in beschouwing genomen.

Levensduur:

De geschatte levensduur van het materiaal wordt vermeld.

17.1.4.2. Materiaal & Processen met Milieuprofiel

Daarna wordt er een overzicht gegeven van de benodigde materiaal en processen die er nodig zijn bij de levenscyclus van de duiker. Hieraan wordt vervolgens een Milieuprofiel aan gekoppeld. De hoeveelheid van het materiaal en de afstand/duur van het proces is afhankelijk van de ingevoerde parameters.

17.1.4.3. Milieueffecten

Aan elk milieuprofiel zijn milieueffectfactoren gekoppeld. De geselecteerde milieuprofielen in dit onderzoek zijn allemaal afkomstig uit LCA-rapportages van categorie 3 door de Stichting NMD (zie tabel 22). In deze rapportages worden ook de milieueffectfactoren van de profielen beschreven. De milieueffectfactoren worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden van de materialen & processen. Hierdoor wordt duidelijk welke milieueffecten elk stadium in de levenscyclus met zich meebrengt

Tabel 30 MKI database

Database/bron	Duiker
Rijkswaterstaat	Beton ongewapend, Beton gewand
NMD leidingwerken	Beton ongewapend, Beton gewapend, Staal, PVC, HDPE
NMD funderingsconstructies	Beton ongewapend, Beton gewapend, Staal, PVC, HDPE
NMD kunstwerken	Beton ongewapend, Staal
H1-8000 Processen	Beton ongewapend, Beton gewapend, Staal, PVC, HDPE

17.1.4.4. Schaduwkosten

Tot slot wordt van elk milieueffect het totaal vermenigvuldigd met de bijbehorende schaduwprijs. Wanneer de milieueffecten met de schaduwprijs bij elkaar worden opgeteld, resulteert dit in de MKI-score van de levenscyclus van de duiker.

17.1.5. Beton ongewapend

Deze paragraaf bevat de MKI-berekening van de levenscyclus van een ongewapende betonnen duiker.

17.1.5.1. Fases

Productiefase (A1-A3)

Het betreft een ongewapende betonbuis, met een soortelijk gewicht van 2340 kg/m³ uitgewerkt per m¹.

Transportfase (A4, C2)

De forfaitaire transport afstanden zijn volgens de bepalingmethode toegepast. De transport wordt berekend in ton/km (tkm). Het transport omvat:

- tkm transport naar werk
- tkm transport naar sorteercentrum voor recycling
- tkm totaal naar stort

Constructiefase (A5)

De gewapende betonbuis wordt geplaatst met graafmachine, tractor en een wiellaadschop. In de constructiefase wordt, conform de bepalingmethode 3% gerekend voor in-situ geproduceerde constructies. Dit houdt in dat in deze fase 5% extra A1-A4, C2-C4 en D wordt gerekend. Dit dekt o.a. verkeerde bestellingen, stukgaan en fabricage fouten.

Gebruik en Onderhoudsfase (B1, B2-B5)

Geen onderhoud.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D)

De betonbuis wordt verwijderd met behulp van een graafmachine. Voor afvalverwerking wordt het forfaitaire scenario van beton (1% stort en 99% recycling) aangenomen. Er is aangenomen dat de rubber afdichting volledig wordt verbrand.

Levensduur: 100 jaar

17.1.5.2. Materiaal & Processen met Milieuprofiel

Materiaal&Proces	Fase	Milieuprofiel
Beton	A1-A3	fab&Betonmortel, prefab rioleering, 2340 kg/m3
Grondstoffen afdichtring	A1-A3	0014-fab&EPDM, rubber, chloropreen, neoprene, styrene butadiene rubber - SBR (o.b.v. Synthetic rubber {GLO}) market for Cut-off, U)
Productie zand	A1-A3	0168-fab&Zand, industriezand, ophoogzand, betonzand, drainagezand (o.b.v. Sand {GLO}) market for Cut-off, U)
Productie menggranulaat	A1-A3	0191-fab&Menggranulaat, wegenbouw, 0/31,5 (= 0-waarden want 'vrij van milieulast')
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Graafmachine	A5	Verplaatsen, Graafmachine, 50kW, categorie IIIB, diesel
Wiellaadschop	A5	Verplaatsen, Wiellaadschop, diesel
Aantrillen grond, kraan met trilblok	A5	0125-pro&Hydraulisch trilblok, per vermogen, per uur (o.b.v. 2,2 kWh Diesel, burned in building machine {GLO}) market for Cut-off, U)
Wals	A5	Bewerken, Wals, diesel
Constructieverlies	A5	A1-A4, C2-D
Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, hydraulisch (diesel)	C1	Slopen, Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, diesel
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Breken/recyclen	C3	0270-reC&Breken, per kg steenachtig (o.b.v. SBK Breken steenachtig MRPI)
Afvalbewerking	C3	0260-avC&Verbranden rubber/EPDM (27,2 MJ/kg) (o.b.v. Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland}) treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, U)
Stort	C4	0240-sto&Stort beton, cellenbeton (o.b.v. Waste concrete {Europe without Switzerland}) treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U)
Stort Zand	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Stort Menggranulaat	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Baten buiten de systeemgrenzen	D	0280-reD&Module D, zand (o.b.v. Sand {RoW}) gravel and quarry operation Cut-off, U)
Baten buiten de systeemgrenzen Menggranulaat	D	0271-reD&Module D, grind, per kg NETTO geleverd granulaat/grind (vermeden: Gravel, round {RoW}) gravel and sand quarry operation Cut-off, U)

17.1.5.3. Milieueffecten

Beton ongewapend		A1-A3			A4			A5			
Effectcategorie	Eenheid	Rubber	Zand	Menggranulaat	Transport	Transport	Transport	Graafmachine	Wiellaadschop	Aantrillen	Wals
		per kg	kg	kg	per tkm	per tkm	per tkm	per uur	per uur	per uur	per uur
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	8,85E-05	4,353E-08	0,000E+00	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	2,180E-05	3,140E-05	2,420E-06	1,610E-05
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	5,50E-02	8,382E-05	0,000E+00	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	3,130E-01	4,580E-01	3,520E-02	2,350E-01
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	5,50E+00	1,176E-02	0,000E+00	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	4,660E+01	6,710E+01	5,160E+00	3,440E+01
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	9,40E-07	1,691E-09	0,000E+00	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,110E-06	1,170E-05	8,990E-07	5,990E-06
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	5,00E-03	8,603E-06	0,000E+00	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	1,530E-02	2,210E-02	1,700E-03	1,130E-02
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,08E-02	7,213E-05	0,000E+00	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	1,370E-01	1,970E-01	1,510E-02	1,010E-01
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	5,55E-03	1,199E-05	0,000E+00	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	2,610E-02	3,760E-02	2,900E-03	1,930E-02
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	1,78E+00	4,860E-03	0,000E+00	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,150E+01	1,660E+01	1,280E+00	8,520E+00
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	4,10E-02	1,022E-04	0,000E+00	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	2,280E-01	3,290E-01	2,530E-02	1,690E-01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1,45E+02	3,919E-01	0,000E+00	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	7,460E+02	1,100E+03	8,460E+01	5,640E+02
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	7,25E-03	2,132E-05	0,000E+00	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,100E-02	5,910E-02	4,540E-03	3,030E-02
PERT	MJ	3,17E+01	5,654E-03	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	5,180E+00	7,460E+00	5,740E-01	3,830E+00
PENRT	MJ	3,07E+02	1,794E-01	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	7,100E+02	1,020E+03	7,870E+01	5,250E+02
Water consumption (FW)	m3	4,42E+02	1,434E-03	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	7,150E+02	1,030E+03	7,930E+01	5,280E+02
Hazardous waste (HWD)	kg	4,17E+00	6,088E-07	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	6,710E-02	9,660E-02	7,430E-03	4,960E-02
Non hazardous waste (NHWD)	kg	1,75E+00	5,478E-03	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	1,190E+00	1,720E+00	1,320E-01	8,800E-01
Radioactive waste (RWD)	kg	1,25E+01	1,000E-06	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	4,900E-03	7,060E-03	5,430E-04	3,620E-03

Beton ongewapend		C1	C2			C3		C4			D	
Effectcategorie	Eenheid	Graafmachine	Transport	Transport	Transport	Breken/recyclen	Afvalbewerking	stort beton	stort zand	stort menggranulaat	Baten beton	Baten Menggranulaat
		per uur	per tkm	per tkm	per tkm	per kg	per kg	per kg	per kg	per kg	per kg	per kg
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	5,040E-05	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	1,030E-09	6,68E-07	5,950E-09	5,949E-09	5,949E-09	-2,330E-08	-2,328E-08
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	7,360E-01	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	1,160E-05	2,34E-03	7,730E-05	7,721E-05	7,718E-05	-2,880E-05	-2,872E-05
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	1,080E+02	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	1,620E-03	3,45E+00	5,280E-03	5,279E-03	5,282E-03	-4,200E-03	-4,205E-03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,880E-05	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	1,880E-10	5,15E-08	1,910E-09	1,904E-09	1,905E-09	-3,760E-10	-3,769E-10
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,550E-02	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	9,290E-07	3,05E-04	5,750E-06	5,750E-06	5,744E-06	-3,040E-06	-3,051E-06
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,160E-01	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	8,080E-06	2,40E-03	3,980E-05	3,985E-05	3,974E-05	-2,400E-05	-2,405E-05
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	6,040E-02	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	1,820E-06	1,07E-03	7,530E-06	7,500E-06	7,538E-06	-4,190E-06	-4,179E-06
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	2,670E+01	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	3,700E-04	3,30E-01	2,300E-03	2,294E-03	2,297E-03	-1,880E-03	-1,877E-03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	5,280E-01	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	6,340E-06	3,53E-03	5,560E-05	5,566E-05	5,564E-05	-2,690E-05	-2,692E-05
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1,770E+03	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	2,340E-02	8,53E+00	1,950E-01	1,949E-01	1,949E-01	-1,170E-01	-1,172E-01
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	9,480E-02	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,690E-06	9,80E-04	5,730E-06	5,735E-06	5,744E-06	-9,760E-06	-9,795E-06
PERT	MJ	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	1,300E-03	1,04E-01	1,330E-03	1,331E-03	1,328E-03	3,540E-03	-3,538E-03
PENRT	MJ	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	2,430E-02	5,18E+00	1,730E-01	1,721E-01	1,723E-01	-5,800E-02	-5,795E-02
Water consumption (FW)	m3	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,070E-05	1,48E+01	1,690E-04	1,691E-04	1,695E-04	-1,410E-03	-1,413E-03
Hazardous waste (HWD)	kg	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	3,710E-08	8,18E-03	1,090E-07	1,088E-07	1,085E-07	-7,740E-08	-7,744E-08
Non hazardous waste (NHWD)	kg	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	3,040E-03	-8,60E-01	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	-5,480E-04	-5,487E-04
Radioactive waste (RWD)	kg	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	1,100E-07	4,85E-05	1,070E-06	1,074E-06	1,074E-06	-2,440E-07	-2,444E-07

17.1.6. Beton gewapend

Deze paragraaf bevat de MKI-berekening van de levenscyclus van een gewapende betonnen duiker.

17.1.6.1. Fases

Productiefase (A1-A3)

Het betreft een gewapende betonbuis met een soortelijk gewicht van 2340 kg/m³ en wapeningstaal met een soortelijk gewicht van 8000 kg/m³, uitgewerkt per strekkende meter.

Transportfase (A4, C2)

De forfaitaire transportafstanden zijn toegepast volgens de bepalingmethode. Het transport wordt berekend in ton/km (tkm). Het transport omvat:

- tkm transport naar werk
- tkm transport naar sorteercentrum voor recycling
- tkm totaal naar stort

Constructiefase (A5)

De gewapende betonbuis wordt geplaatst met graafmachine, tractor en een wiellaadschop. In de constructiefase wordt, conform de bepalingmethode 3% gerekend voor prefab constructie. Dit houdt in dat in deze fase 3% extra A1-A4, C2-C4 en D wordt gerekend. Dit dekt o.a. verkeerde bestellingen, stukgaan en fabricage fouten. De grondverbeteraar wordt geplaatst met een wiellader met productienorm van 100 m³ /uur. Het zand wordt aangetrild en op weerstand gebracht (naar een dikte van 0,25 m) middels een kraan met trilblok/trilplaat. De productienorm voor dit proces bedraagt 18 m² /uur. Aan het einde van de levensduur kan het materiaal worden hergebruikt. Hiervoor hoeft het funderingsmateriaal niet gebroken te worden. Om enige verliezen te ondervangen is 1% stort van grof keramisch afval meegenomen. Als gevolg van het verlies van secundair materiaal zijn lasten toegerekend, waarbij grind als grondstoffen equivalent is aangenomen.

Gebruik en Onderhoudsfase (B1, B2-B5)

Geen onderhoud.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D)

De gewapende betonbuis wordt verwijderd met behulp van een graafmachine. Voor afvalverwerking wordt het forfaitaire scenario van beton (1% stort en 99% recycling) en wapeningsstaal gehanteerd (5% stort en 95% recycling).

Levensduur: 100 jaar

17.1.6.1. Materiaal & Processen met Milieuprofiel

Materiaal&Proces	Fase	Milieuprofiel
Betonmortel C20/25 CEM III	A1-A3	fab&Betonmortel, prefab rioleering, 2340 kg/m3
Staal	A1-A3	0167-fab&Staal, wapening (betonstaal, wapeningsnet, vezels, voorspanstaal) (o.b.v. Reinforcing steel {GLO}) market for Cut-off, U; 84% primair, 16% secundair)
Productie zand	A1-A3	0168-fab&Zand, industriezand, ophoogzand, betonzand, drainagezand (o.b.v. Sand {GLO}) market for Cut-off, U)
Productie menggranulaat	A1-A3	0191-fab&Menggranulaat, wegenbouw, 0/31,5 (= 0-waarden want 'vrij van milieulast')
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Graafmachine	A5	Verplaatsen, Graafmachine, 50kW, categorie IIIB, diesel
Wiellaadschop	A5	Verplaatsen, Wiellaadschop, diesel
Aantrillen grond, kraan met trilblok	A5	0125-pro&Hydraulisch trilblok, per vermogen, per uur (o.b.v. 2,2 kWh Diesel, burned in building machine {GLO}) market for Cut-off, U)
Wals	A5	Bewerken, Wals, diesel
Constructieverlies	A5	A1-A4, C2-D
Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, hydraulisch (diesel)	C1	Slopen, Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, diesel
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Breken/recyclen	C3	0270-reC&Breken, per kg steenachtig (o.b.v. SBK Breken steenachtig MRPI)
Stort Beton	C4	0240-sto&Stort beton, cellenbeton (o.b.v. Waste concrete {Europe without Switzerland}) treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U)
Stort Staal	C4	0253-sto&Stort staal (o.b.v. Scrap steel {Europe without Switzerland}) treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, U)
Stort Zand	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Stort Menggranulaat	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Baten buiten de systeemgrenzen Beton	D	0280-reD&Module D, zand (o.b.v. Sand {RoW}) gravel and quarry operation Cut-off, U)
Baten buiten de systeemgrenzen Staal	D	0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW}) steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW}) steel production, converter, unalloyed Cut-off, U)
Baten buiten de systeemgrenzen Menggranulaat	D	0271-reD&Module D, grind, per kg NETTO geleverd granulaat/grind (vermeden: Gravel, round {RoW}) gravel and sand quarry operation Cut-off, U)

17.1.6.2. Milieueffecten

Beton gewapend		A1-A3			A4			A5			
Effectcategorie	Eenheid	Staal	Zand	Menggranulaat	Transport	Transport	Transport	Graafmachine	Wiellaadschop	Aantrillen	Wals
		kg	kg	kg	per tkm	per tkm	per tkm	per uur	per uur	per uur	per uur
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	1,194E-05	4,353E-08	0,000E+00	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	2,180E-05	3,140E-05	2,420E-06	1,610E-05
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	1,630E-02	8,382E-05	0,000E+00	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	3,130E-01	4,580E-01	3,520E-02	2,350E-01
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	2,265E+00	1,176E-02	0,000E+00	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	4,660E+01	6,710E+01	5,160E+00	3,440E+01
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,614E-07	1,691E-09	0,000E+00	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,110E-06	1,170E-05	8,990E-07	5,990E-06
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,145E-03	8,603E-06	0,000E+00	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	1,530E-02	2,210E-02	1,700E-03	1,130E-02
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	9,870E-03	7,213E-05	0,000E+00	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	1,370E-01	1,970E-01	1,510E-02	1,010E-01
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	1,676E-03	1,199E-05	0,000E+00	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	2,610E-02	3,760E-02	2,900E-03	1,930E-02
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	3,168E+00	4,860E-03	0,000E+00	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,150E+01	1,660E+01	1,280E+00	8,520E+00
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	2,012E-02	1,022E-04	0,000E+00	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	2,280E-01	3,290E-01	2,530E-02	1,690E-01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5,761E+01	3,919E-01	0,000E+00	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	7,460E+02	1,100E+03	8,460E+01	5,640E+02
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	1,561E-02	2,132E-05	0,000E+00	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,100E-02	5,910E-02	4,540E-03	3,030E-02
PERT	MJ	1,362E+00	5,654E-03	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	5,180E+00	7,460E+00	5,740E-01	3,830E+00
PENRT	MJ	2,877E+01	1,794E-01	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	7,100E+02	1,020E+03	7,870E+01	5,250E+02
Water consumption (FW)	m3	2,242E-02	1,434E-03	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	7,150E+02	1,030E+03	7,930E+01	5,280E+02
Hazardous waste (HWD)	kg	1,569E-04	6,088E-07	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	6,710E-02	9,660E-02	7,430E-03	4,960E-02
Non hazardous waste (NHWD)	kg	5,386E-01	5,478E-03	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	1,190E+00	1,720E+00	1,320E-01	8,800E-01
Radioactive waste (RWD)	kg	7,070E-05	1,000E-06	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	4,900E-03	7,060E-03	5,430E-04	3,620E-03

Beton gewapend		C1	C2				C3	C4				D		
Effectcategorie	Eenheid	Graafmachine per uur	Transport per tkm	Transport per tkm	Transport per tkm	Transport per tkm	Breken/recyclen per kg	stort beton per kg	stort staal per kg	stort zand per kg	stort menggranulaat per kg	Baten beton per kg	Baten staal per kg	Baten Menggranulaat per kg
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	5,040E-05	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	1,030E-09	5,950E-09	5,950E-09	5,949E-09	5,949E-09	-2,330E-08	-5,030E-07	-2,328E-08
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	7,360E-01	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	1,160E-05	7,730E-05	7,730E-05	7,721E-05	7,718E-05	-2,880E-05	-1,230E-02	-2,872E-05
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	1,080E+02	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	1,620E-03	5,280E-03	5,280E-03	5,279E-03	5,282E-03	-4,200E-03	1,720E+00	-4,205E-03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC- 11 eq	1,880E-05	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	1,880E-10	1,910E-09	1,910E-09	1,904E-09	1,905E-09	-3,760E-10	-9,230E-08	-3,769E-10
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,550E-02	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	9,290E-07	5,750E-06	5,750E-06	5,750E-06	5,744E-06	-3,040E-06	-3,110E-03	-3,051E-06
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,160E-01	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	8,080E-06	3,980E-05	3,980E-05	3,985E-05	3,974E-05	-2,400E-05	-7,150E-03	-2,405E-05
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	6,040E-02	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	1,820E-06	7,530E-06	7,530E-06	7,500E-06	7,538E-06	-4,190E-06	-8,620E-04	-4,179E-06
9 human toxicity (HT)	kg 1,4- DB eq	2,670E+01	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	3,700E-04	2,300E-03	2,300E-03	2,294E-03	2,297E-03	-1,880E-03	1,220E+00	-1,877E-03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4- DB eq	5,280E-01	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	6,340E-06	5,560E-05	5,560E-05	5,566E-05	5,564E-05	-2,690E-05	-7,040E-03	-2,692E-05
12 Ecotoxcity, marine water (MAETP)	kg 1,4- DB eq	1,770E+03	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	2,340E-02	1,950E-01	1,950E-01	1,949E-01	1,949E-01	-1,170E-01	2,270E+01	-1,172E-01
14 Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	kg 1,4- DB eq	9,480E-02	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,690E-06	5,730E-06	5,730E-06	5,735E-06	5,744E-06	-9,760E-06	-2,990E-03	-9,795E-06
PERT	MJ	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	1,300E-03	1,330E-03	1,330E-03	1,331E-03	1,328E-03	3,540E-03	-4,200E-01	-3,538E-03
PENRT	MJ	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	2,430E-02	1,730E-01	1,730E-01	1,721E-01	1,723E-01	-5,800E-02	1,920E+01	-5,795E-02
Water consumption (FW)	m3	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,070E-05	1,690E-04	1,690E-04	1,691E-04	1,695E-04	-1,410E-03	-4,300E-03	-1,413E-03
Hazardous waste (HWD)	kg	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	3,710E-08	1,090E-07	1,090E-07	1,088E-07	1,085E-07	-7,740E-08	-1,850E-04	-7,744E-08
Non hazardous waste (NHWD)	kg	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	3,040E-03	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	-5,480E-04	-7,560E-02	-5,487E-04
Radioactive waste (RWD)	kg	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	1,100E-07	1,070E-06	1,070E-06	1,074E-06	1,074E-06	-2,440E-07	-2,270E-05	-2,444E-07

17.1.7. Staal

Deze paragraaf bevat de MKI-berekening van de levenscyclus van een stalen duiker.

17.1.7.1. Fases

Duikers kunnen zowel in droge als natte toepassing worden gebruikt. Om de stalen duiker te beschermen tegen afroesten is deze verzinkt en gecoat. Het afroesten is, mede doordat de stalen duiker is gecoat, buiten beschouwing gelaten.

Productiefase (A1-A3)

Stalen duikers worden gemaakt van plaatstaal. De stalen-buis heeft een gewicht van 7850 kg/m³ uitgewerkt per m¹.

Transport (A4)

Er is uitgegaan van een transportafstand van 150 km naar het werk per vrachtwagen. Het transport omvat:

- tkm transport naar werk
- tkm transport naar sorteercentrum voor recycling
- tkm totaal naar stort

Constructiefase (A5)

Middels een graafmachine wordt een gat gegraven, waarna duiker geplaatst kan worden met behulp van dezelfde graafmachine. De duiker wordt gedekt door de ontgraven grond met een wiellaadschop. In de constructiefase wordt, conform de SBK bepalingmethode 3% verlies gerekend voor geprefabriceerde producten. Dit houdt in dat in deze fase 3% extra A1-A4 en C2-D wordt gerekend. Dit dekt o.a. verkeerde bestellingen, stukgaan en fabricage fouten. De grondverbeteraar wordt geplaatst met een wiellader met productienorm van 100 m³ /uur. Het zand wordt aangetrild en op weerstand gebracht (naar een dikte van 0,25 m) middels een kraan met trilblok/trilplaat. De productienorm voor dit proces bedraagt 18 m² /uur. Aan het einde van de levensduur kan het materiaal worden hergebruikt. Hiervoor hoeft het funderingsmateriaal niet gebroken te worden. Om enige verliezen te ondervangen is 1% stort van grof keramisch afval meegenomen. Als gevolg van het verlies van secundair materiaal zijn lasten toegerekend, waarbij grind als grondstoffen equivalent is aangenomen.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D)

Tijdens de sloop wordt de duiker ontgraven met eenzelfde graafmachine waarmee in constructiefase is ingegraven. De stalen duiker gaat uit van 99% recycling, 1% stort. Terugwinning van zink bij de recycling van verzinkt staalschroot vindt plaats door het stof dat vrijkomt in de elektrische boogoven/vlamboogoven (EAFdust/stof) af te vangen en op te werken d.m.v. het zogenoemde Waelz-proces. Bij dit proces wordt het EAF-stof opgewerkt tot Waelz-oxiden, waarvan zink een groot bestandsdeel beslaat, evenals in mindere mate lood-oxiden. De Waelz-oxiden zijn vergelijkbaar met een zink concentraat, welke weer het product is van zink mijnen. Daarom is in module D als grondstof-equivalent voor de teruggewonnen Waelz-oxiden gekozen voor een profiel van zink concentraat gewonnen in zink-lood mijnen. De gemiddelde efficiency van het terugwinnen van zink concentraat uit het EAF-stof is 68% [8]. Het overgebleven EAF-stof wordt gestort.

De technische levensduur van een stalen duiker is 50 jaar.

Materiaal&Proces	Fase	Milieuprofiel
Staal	A1-A3	0317-fab&Staal, warmgewalst, plaat- en bandstaal {GLO} 82,7% primair, 17,3% secundair
Staal	A1-A3	0317-fab&Staal, warmgewalst, plaat- en bandstaal {GLO} 82,7% primair, 17,3% secundair
Productie zand	A1-A3	0168-fab&Zand, industriezand, ophoogzand, betonzand, drainagezand (o.b.v. Sand {GLO}) market for Cut-off, U)
Productie menggranulaat	A1-A3	0191-fab&Menggranulaat, wegenbouw, 0/31,5 (= 0-waarden want 'vrij van milieulast')
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Graafmachine	A5	Verplaatsen, Graafmachine, 50kW, categorie IIIB, diesel
Wiellaadschop	A5	Verplaatsen, Wiellaadschop, diesel
Aantrillen grond, kraan met trilblok	A5	0125-pro&Hydraulisch trilblok, per vermogen, per uur (o.b.v. 2,2 kWh Diesel, burned in building machine {GLO}) market for Cut-off, U)
Wals	A5	Bewerken, Wals, diesel
Constructieverlies	A5	A1-A4, C2-D
Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, hydraulisch (diesel)	C1	Slopen, Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, diesel
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Recycling/sorteer proces	C3	0315-reC&Sorteren en persen oud ijzer (o.b.v. Iron scrap, sorted, pressed {RER}) sorting and pressing of iron scrap Cut-off, U)
Verbranden verflaag	C3	0266-avC&Verbranden verf (10,14 MJ/kg) (o.b.v. Waste paint {Europe without Switzerland}) treatment of waste paint, municipal incineration Cut-off, U)
Stort staal	C4	0253-sto&Stort staal (o.b.v. Scrap steel {Europe without Switzerland}) treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, U)
Stort zink	C4	0248-sto&Stort koper, lood, verzinkt staal, zink (o.b.v. Scrap tin sheet {CH}) treatment of, sanitary landfill Cut-off, U, bij gebrek aan passender proces)
Stort Zand	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Stort Menggranulaat	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW}) treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Baten buiten de systeemgrenzen staal	D	0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW}) steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW}) steel production, converter, unalloyed Cut-off, U)
Baten buiten de systeemgrenzen zink	D	0478-reD&Module D, Zink uit EAF-stof, per kg NETTO geleverd zink in EAF-stof (door recycling van verzinkt staal in EAF) (vermeden: Zinc concentrate {GLO}) market for Cut-off, U en 68% efficiëntie)
Baten buiten de systeemgrenzen poedercoating	D	0267-avD&Vermeden energieproductie AVI, o.b.v. FOSSIELE grondstoffen, 18% elektrisch en 31% thermisch (per MJ LHV)
Baten buiten de systeemgrenzen Menggranulaat	D	0271-reD&Module D, grind, per kg NETTO geleverd granulaat/grind (vermeden: Gravel, round {RoW}) gravel and sand quarry operation Cut-off, U)

17.1.7.3. Milieueffecten

Staal		A1-A3			A4			A5			
Effectcategorie	Eenheid	Staal	Zand	Menggranulaat	Transport	Transport	Transport	Graafmachine	Wiellaadschop	Aantrillen	Wals
		kg	kg	kg	per tkm	per tkm	per tkm	per uur	per uur	per uur	per uur
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	6,19E-04	4,353E-08	0,000E+00	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	2,180E-05	3,140E-05	2,420E-06	1,610E-05
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,25E-02	8,382E-05	0,000E+00	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	3,130E-01	4,580E-01	3,520E-02	2,350E-01
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	3,23E+00	1,176E-02	0,000E+00	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	4,660E+01	6,710E+01	5,160E+00	3,440E+01
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,30E-07	1,691E-09	0,000E+00	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,110E-06	1,170E-05	8,990E-07	5,990E-06
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,96E-03	8,603E-06	0,000E+00	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	1,530E-02	2,210E-02	1,700E-03	1,130E-02
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,83E-02	7,213E-05	0,000E+00	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	1,370E-01	1,970E-01	1,510E-02	1,010E-01
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	7,19E-03	1,199E-05	0,000E+00	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	2,610E-02	3,760E-02	2,900E-03	1,930E-02
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	1,65E+00	4,860E-03	0,000E+00	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,150E+01	1,660E+01	1,280E+00	8,520E+00
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	3,77E-02	1,022E-04	0,000E+00	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	2,280E-01	3,290E-01	2,530E-02	1,690E-01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	9,34E+01	3,919E-01	0,000E+00	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	7,460E+02	1,100E+03	8,460E+01	5,640E+02
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	1,62E-02	2,132E-05	0,000E+00	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,100E-02	5,910E-02	4,540E-03	3,030E-02
PERT	MJ	1,91E+00	5,654E-03	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	5,180E+00	7,460E+00	5,740E-01	3,830E+00
PENRT	MJ	4,04E+01	1,794E-01	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	7,100E+02	1,020E+03	7,870E+01	5,250E+02
Water consumption (FW)	m3	3,19E-02	1,434E-03	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	7,150E+02	1,030E+03	7,930E+01	5,280E+02
Hazardous waste (HWD)	kg	4,72E-04	6,088E-07	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	6,710E-02	9,660E-02	7,430E-03	4,960E-02
Non hazardous waste (NHWD)	kg	4,15E+03	5,478E-03	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	1,190E+00	1,720E+00	1,320E-01	8,800E-01
Radioactive waste (RWD)	kg	7,19E-05	1,000E-06	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	4,900E-03	7,060E-03	5,430E-04	3,620E-03

Staal		C1	C2			C3		C4				D			
Effectcategorie	Eenheid	Graafmachine	Transport	Transport	Transport	Recycling/sorteer	Verbranden verflaag	stort staal	stort zink	stort zand	stort menggranulaat	Baten staal	Baten zink	Baten coating	Baten Menggranulaat
		per uur	per tkm	per tkm	per tkm	per kg		per kg	per kg	per kg	per kg	per kg	per kg	per MJ	per kg
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	5,040E-05	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	4,69E-07	3,63E-06	5,95E-09	1,36E-08	5,95E-09	5,95E-09	8,29E-07	-2,73E-03	-2,67E-09	-2,33E-08
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	7,360E-01	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	1,64E-04	1,32E-03	7,73E-05	1,20E-04	7,72E-05	7,72E-05	-7,56E-03	2,25E-03	-3,77E-04	-2,87E-05
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	1,080E+02	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	2,45E-02	2,58E+00	5,28E-03	9,55E-03	5,28E-03	5,28E-03	1,24E+00	2,85E-01	-4,13E-02	-4,21E-03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,880E-05	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	3,11E-09	2,60E-08	1,91E-09	2,98E-09	1,90E-09	1,91E-09	-5,68E-08	4,35E-08	-4,78E-09	-3,77E-10
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,550E-02	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	2,03E-05	1,67E-04	5,75E-06	9,59E-06	5,75E-06	5,74E-06	-2,91E-03	-1,50E-04	-5,82E-06	-3,05E-06
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,160E-01	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	2,21E-04	1,78E-03	3,98E-05	6,53E-05	3,99E-05	3,97E-05	-4,66E-03	-1,39E-03	-2,70E-05	-2,41E-05
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	6,040E-02	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	4,96E-05	4,49E-04	7,53E-06	1,37E-05	7,50E-06	7,54E-06	-4,71E-04	-2,18E-03	-3,98E-06	-4,18E-06
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	2,670E+01	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	2,37E-02	2,66E-01	2,30E-03	7,84E-03	2,29E-03	2,30E-03	-8,00E-01	1,58E-01	-2,15E-03	-1,88E-03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	5,280E-01	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	3,51E-04	9,82E-03	5,56E-05	2,46E-03	5,57E-05	5,56E-05	1,03E-02	2,61E-03	-2,17E-05	-2,69E-05
12 Ecotoxcity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1,770E+03	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	1,72E+00	4,14E+01	1,95E-01	6,57E-01	1,95E-01	1,95E-01	1,11E+01	1,35E+01	-9,75E-02	-1,17E-01
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	9,480E-02	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	7,88E-05	1,25E-03	5,73E-06	1,93E-05	5,74E-06	5,74E-06	6,97E-02	2,61E-03	-6,69E-06	-9,79E-06
PERT	MJ	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	5,20E-02	3,98E-01	1,33E-03	1,43E-02	1,33E-03	1,33E-03	1,20E-01	5,30E-01	-1,43E-03	-3,54E-03
PENRT	MJ	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	3,73E-01	3,09E+00	1,73E-01	2,96E-01	1,72E-01	1,72E-01	1,01E+01	1,10E+01	-7,75E-01	-5,79E-02
Water consumption (FW)	m3	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,76E-04	1,48E-03	1,69E-04	3,32E-04	1,69E-04	1,69E-04	-4,56E-03	-1,31E-03	-3,66E-05	-1,41E-03
Hazardous waste (HWD)	kg	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	7,18E-07	8,74E-06	1,09E-07	1,37E-07	1,09E-07	1,08E-07	-1,70E-04	2,37E-05	-8,83E-07	-7,74E-08
Non hazardous waste (NHWD)	kg	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	9,70E-03	1,14E-01	1,00E+00	1,11E+00	1,00E+00	1,00E+00	-7,43E-02	1,01E-02	-2,20E-04	-5,49E-04
Radioactive waste (RWD)	kg	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	2,13E-06	1,74E-05	1,07E-06	1,94E-06	1,07E-06	1,07E-06	-2,67E-06	2,11E-05	-3,37E-07	-2,44E-07

17.1.8. PVC

Deze paragraaf bevat de MKI-berekening van de levenscyclus van een PVC duiker.

17.1.8.1. Fases

Productiefase (A1-A3)

Het uitgangspunt voor de LCA zijn PVC buizen volgens DIN 8062 – 11/1988. De Pvc-buis heeft een gewicht van 76 kg/m³ uitgewerkt per m¹.

Transportfase (A4, C2)

De forfaitaire transportafstanden zijn toegepast volgens de bepalingmethode. Het transport wordt berekend in ton/km (tkm). Het transport omvat:

- tkm transport naar werk
- tkm transport naar sorteercentrum voor recycling
- tkm totaal naar stort
- tkm totaal naar AVI

Constructiefase (A5)

De buizen worden aangelegd met behulp van een graafmachine. Bij kleinere formaten wordt gebruik gemaakt van een kleinere graafmachine. Bij de grote formaten komt ook een wiellader te pas. De productienormen zijn opgenomen in de bovenstaande matentabel. In de constructiefase wordt, conform de bepalingmethode 3% verlies gerekend voor geprefabriceerde producten. Dit houdt in dat in deze fase 3% extra A1-A4, C2-C4 en D wordt gerekend. Dit dekt o.a. verkeerde bestellingen, stukgaan en fabricage fouten. De grondverbeteraar wordt geplaatst met een wiellader met productienorm van 100 m³ /uur. Het zand wordt aangetrild en op weerstand gebracht (naar een dikte van 0,25 m) middels een kraan met trilblok/trilplaat. De productienorm voor dit proces bedraagt 18 m² /uur. Aan het einde van de levensduur kan het materiaal worden hergebruikt. Hiervoor hoeft het funderingsmateriaal niet gebroken te worden. Om enige verliezen te ondervangen is 1% stort van grof keramisch afval meegenomen. Als gevolg van het verlies van secundair materiaal zijn lasten toegerekend, waarbij grind als grondstoffen equivalent is aangenomen.

Gebruik- en onderhoudsfase (B1, B2-B5) Niet bekend.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D)

De PVC buis wordt verwijderd met behulp van een graafmachine. Voor afvalverwerking wordt het forfaitaire scenario van Polyolefinen (10% stort, 85% AVI en 5% recycling) aangehouden

Levensduur 50 jaar

17.1.8.2. Materiaal & Processen met Milieuprofiel

Materiaal&Proces	Fase	Milieuprofiel
PVC	A1-A3	0199-fab&PVC, geëxtrudeerd (o.b.v. Polyvinylchloride, suspension polymerized {GLO} market for Cut-off, U + Extrusion, plastic pipes {GLO} market for Cut-off, U)
Productie zand	A1-A3	0168-fab&Zand, industriezand, ophoogzand, betonzand, drainagezand (o.b.v. Sand {GLO} market for Cut-off, U)
Productie menggranulaat	A1-A3	0191-fab&Menggranulaat, wegenbouw, 0/31,5 (= 0-waarden want 'vrij van milieulast')
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Graafmachine	A5	Verplaatsen, Graafmachine, 50kW, categorie IIIB, diesel
Wiellaadschop	A5	Verplaatsen, Wiellaadschop, diesel
Aantrillen grond, kraan met trilblok	A5	0125-pro&Hydraulisch trilblok, per vermogen, per uur (o.b.v. 2,2 kWh Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U)
Wals	A5	Bewerken, Wals, diesel
Constructieverlies	A5	A1-A4, C2-D
Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, hydraulisch (diesel)	C1	Slopen, Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, diesel
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Afvalberwerking - Verbranden	C3	0264-avC&Verbranden kunststoffen (28,67 MJ/kg) (o.b.v. o.b.v. mix 21% PE, 21% PP, 20% PVC, 17% PS en 21% mixture)
Afvalverwerking - Stort	C4	0249-sto&Stort kunststoffen (o.b.v. mix 21% PE, 21% PP, 17% PVC, 21% PS en 20% mixture)
Stort Zand	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Stort Menggranulaat	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Recycling PVC	D	0279-reD&Module D, PVC, per kg NETTO geleverd (o.b.v. vermeden Polyvinylchloride, suspension polymerised {RER} polyvinylchloride production, suspension polymerisation Cut-off, U en kwaliteitsfactor 0,67)
Baten en lasten buiten systeemgrenzen – verbranden	D	0267-avD&Vermeden energieproductie AVI, o.b.v. FOSSIELE grondstoffen, 18% elektrisch en 31% thermisch (per MJ LHV)
Baten buiten de systeemgrenzen Menggranulaat	D	0271-reD&Module D, grind, per kg NETTO geleverd granulaat/grind (vermeden: Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation Cut-off, U)

17.1.8.3. Milieueffecten

PVC		A1-A3			A4			A5			
Effectcategorie	Eenheid	PVC	Zand	Menggranulaat	Transport	Transport	Transport	Graafmachine	Wiellaadschop	Aantrillen	Wals
		per m3	kg	kg	per tkm	per tkm	per tkm	per uur	per uur	per uur	per uur
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	9,11E-07	4,353E-08	0,000E+00	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	2,180E-05	3,140E-05	2,420E-06	1,610E-05
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,63E-02	8,382E-05	0,000E+00	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	3,130E-01	4,580E-01	3,520E-02	2,350E-01
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	2,46E+00	1,176E-02	0,000E+00	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	4,660E+01	6,710E+01	5,160E+00	3,440E+01
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	3,68E-08	1,691E-09	0,000E+00	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,110E-06	1,170E-05	8,990E-07	5,990E-06
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	2,85E-03	8,603E-06	0,000E+00	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	1,530E-02	2,210E-02	1,700E-03	1,130E-02
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	7,77E-03	7,213E-05	0,000E+00	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	1,370E-01	1,970E-01	1,510E-02	1,010E-01
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	9,59E-04	1,199E-05	0,000E+00	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	2,610E-02	3,760E-02	2,900E-03	1,930E-02
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	4,63E-01	4,860E-03	0,000E+00	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,150E+01	1,660E+01	1,280E+00	8,520E+00
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1,13E-02	1,022E-04	0,000E+00	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	2,280E-01	3,290E-01	2,530E-02	1,690E-01
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	3,38E+01	3,919E-01	0,000E+00	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	7,460E+02	1,100E+03	8,460E+01	5,640E+02
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	7,59E-03	2,132E-05	0,000E+00	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,100E-02	5,910E-02	4,540E-03	3,030E-02
PERT	MJ	2,26E+00	5,654E-03	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	5,180E+00	7,460E+00	5,740E-01	3,830E+00
PENRT	MJ	6,62E+01	1,794E-01	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	7,100E+02	1,020E+03	7,870E+01	5,250E+02
Water consumption (FW)	m3	1,89E-01	1,434E-03	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	7,150E+02	1,030E+03	7,930E+01	5,280E+02
Hazardous waste (HWD)	kg	9,02E-06	6,088E-07	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	6,710E-02	9,660E-02	7,430E-03	4,960E-02
Non hazardous waste (NHWD)	kg	1,33E-01	5,478E-03	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	1,190E+00	1,720E+00	1,320E-01	8,800E-01
Radioactive waste (RWD)	kg	2,98E-05	1,000E-06	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	4,900E-03	7,060E-03	5,430E-04	3,620E-03

PVC		C1	C2			C3	C4			D		
Effectcategorie	Eenheid	Graafmachine	Transport	Transport	Transport	Verbranden Kunststof	Stort PVC	stort zand	stort menggranulaat	Recyclen PVC	Baten AVI	Baten Menggranulaat
		per uur	per tkm	per tkm	per tkm	per kg	per kg	per kg	per kg	per kg	per MJ	per kg
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	5,040E-05	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	6,59E-07	1,40E-08	5,95E-09	5,95E-09	-1,96E-08	-2,67E-09	-2,33E-08
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	7,360E-01	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	1,06E-03	1,32E-04	7,72E-05	7,72E-05	-1,51E-02	-3,77E-04	-2,87E-05
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	1,080E+02	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	3,01E+00	1,10E-01	5,28E-03	5,28E-03	-1,29E+00	-4,13E-02	-4,21E-03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,880E-05	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,19E-08	2,88E-09	1,90E-09	1,91E-09	-6,02E-10	-4,78E-09	-3,77E-10
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,550E-02	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	8,65E-05	2,63E-05	5,75E-06	5,74E-06	-1,78E-03	-5,82E-06	-3,05E-06
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,160E-01	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	9,54E-04	7,44E-05	3,99E-05	3,97E-05	-3,38E-03	-2,70E-05	-2,41E-05
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	6,040E-02	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	1,74E-04	3,68E-05	7,50E-06	7,54E-06	-4,13E-04	-3,98E-06	-4,18E-06
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	2,670E+01	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,70E-01	8,22E-03	2,29E-03	2,30E-03	-1,17E-01	-2,15E-03	-1,88E-03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	5,280E-01	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	9,71E-03	5,22E-03	5,57E-05	5,56E-05	-4,49E-03	-2,17E-05	-2,69E-05
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1,770E+03	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	2,83E+01	5,44E+00	1,95E-01	1,95E-01	-1,18E+01	-9,75E-02	-1,17E-01
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	9,480E-02	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,41E-04	2,07E-05	5,74E-06	5,74E-06	-4,26E-03	-6,69E-06	-9,79E-06
PERT	MJ	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	1,91E-01	4,61E-03	1,33E-03	1,33E-03	-6,11E-01	-1,43E-03	-3,54E-03
PENRT	MJ	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	2,10E+00	2,90E-01	1,72E-01	1,72E-01	-3,93E+01	-7,75E-01	-5,79E-02
Water consumption (FW)	m3	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	4,36E-03	2,80E-04	1,69E-04	1,69E-04	-1,20E-01	-3,66E-05	-1,41E-03
Hazardous waste (HWD)	kg	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	5,27E-06	2,14E-07	1,09E-07	1,08E-07	-6,44E-08	-8,83E-07	-7,74E-08
Non hazardous waste (NHWD)	kg	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	4,58E-02	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	-2,75E-02	-2,20E-04	-5,49E-04
Radioactive waste (RWD)	kg	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	7,28E-06	1,64E-06	1,07E-06	1,07E-06	-2,31E-07	-3,37E-07	-2,44E-07

17.1.9. HDPE

Deze paragraaf bevat de MKI-berekening van de levenscyclus van een HDPE duiker.

17.1.9.1. Fases

Productiefase (A1-A3)

Het betreft een PE buis met een gewicht van 41 kg/m³ uitgewerkt per m1.

Transportfase (A4, C2)

De forfaitaire transportafstanden zijn toegepast volgens de bepalingmethode. Het transport wordt berekend in ton/km (tkm). Het transport omvat:

- tkm transport naar werk
- tkm transport voor einde-leven naar sorteer/recyclelocatie
- tkm transport totaal naar stort
- tkm transport totaal naar AVI

Constructiefase (A5)

De PE buis wordt geplaatst met graafmachine, tractor en een wiellaadschop. In de constructiefase wordt, conform de bepalingmethode 3% gerekend voor prefab constructie. Dit houdt in dat in deze fase 3% extra A1-A4, C2-C4 en D wordt gerekend. Dit dekt o.a. verkeerde bestellingen, stukgaan en fabricage fouten. ontgraven grond met een wiellaadschop. In de constructiefase wordt, conform de SBK bepalingmethode 3% verlies gerekend voor geprefabriceerde producten. Dit houdt in dat in deze fase 3% extra A1-A4 en C2-D wordt gerekend. Dit dekt o.a. verkeerde bestellingen, stukgaan en fabricage fouten. De grondverbeteraar wordt geplaatst met een wiellader met productienorm van 100 m³ /uur. Het zand wordt aangetrild en op weerstand gebracht (naar een dikte van 0,25 m) middels een kraan met trilblok/trilplaat. De productienorm voor dit proces bedraagt 18 m² /uur. Aan het einde van de levensduur kan het materiaal worden hergebruikt. Hiervoor hoeft het funderingsmateriaal niet gebroken te worden. Om enige verliezen te ondervangen is 1% stort van grof keramisch afval meegenomen. Als gevolg van het verlies van secundair materiaal zijn lasten toegerekend, waarbij grind als grondstoffen equivalent is aangenomen.

Gebruik en Onderhoudsfase (B1, B2-B5)

Geen onderhoud.

Einde levensduur, afvalscenario en baten en lasten buiten systeemgrenzen (C1, C3, C4 en D)

De PE buis wordt verwijderd met behulp van een graafmachine. Voor afvalverwerking wordt het forfaitaire scenario van Polyolefinen (10% stort, 85% AVI en 5% recycling) aangehouden.

Levensduur: 100 jaar

17.1.9.2. Materiaal & Processen met Milieuprofiel

Materiaal&Proces	Fase	Milieuprofiel
Betonmortel	A1-A3	0185-fab&Polyetheen, HDPE, geëxtrudeerd (o.b.v. Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for Cut-off, U & Extrusion, plastic pipes {GLO} market for Cut-off, U)
Productie zand	A1-A3	0168-fab&Zand, industriezand, ophoogzand, betonzand, drainagezand (o.b.v. Sand {GLO} market for Cut-off, U)
Productie menggranulaat	A1-A3	0191-fab&Menggranulaat, wegenbouw, 0/31,5 (= 0-waarden want 'vrij van milieulast')
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Transport naar werk	A4	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Graafmachine	A5	Verplaatsen, Graafmachine, 50kW, categorie IIIB, diesel
Wiellaadschop	A5	Verplaatsen, Wiellaadschop, diesel
Aantrillen grond, kraan met trilblok	A5	0125-pro&Hydraulisch trilblok, per vermogen, per uur (o.b.v. 2,2 kWh Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U)
Wals	A5	Bewerken, Wals, diesel
Constructieverlies	A5	A1-A4, C2-D
Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, hydraulisch (diesel)	C1	Slopen, Graafmachine met sloophamer/knijper/grijper, diesel
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Trans naar afvalverwerking	C2	0320-tra&Transport, vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per tkm (o.b.v. Vrachtwagen (>32 ton), euro 5, diesel, per liter, c2)
Afvalberwerking - Verbranden	C3	0264-avC&Verbranden kunststoffen (28,67 MJ/kg) (o.b.v. o.b.v. mix 21% PE, 21% PP, 20% PVC, 17% PS en 21% mixture)
Afvalverwerking - Stort	C4	0249-sto&Stort kunststoffen (o.b.v. mix 21% PE, 21% PP, 17% PVC, 21% PS en 20% mixture)
Stort Zand	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Stort Menggranulaat	C4	0247-sto&Stort inert afval (o.b.v. Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U) fijn-/grofkeramisch, grind, kalkzandsteen, schelpen, zand
Recycling HDPE	D	0278-reD&Module D, PE, per kg NETTO geleverd (o.b.v. vermeden Polyethylene, high density, granulate {RER} production Cut-off, U en kwaliteitsfactor 0,67)
Baten en lasten buiten systeemgrenzen – verbranden	D	0267-avD&Vermeden energieproductie AVI, o.b.v. FOSSIELE grondstoffen, 18% elektrisch en 31% thermisch (per MJ LHV)
Baten buiten de systeemgrenzen Menggranulaat	D	0271-reD&Module D, grind, per kg NETTO geleverd granulaat/grind (vermeden: Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation Cut-off, U)

17.1.9.3. Milieueffecten

HDPE		A1-A3			A4			A5			
Effectcategorie	Eenheid	HDPE	Zand	Menggranulaat	Transport	Transport	Transport	Graafmachine	Wiellaadschop	Aantrillen	Wals
		per m3	kg	kg	per tkm	per tkm	per tkm	per uur	per uur	per uur	per uur
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	9,11E-07	4,353E-08	0,000E+00	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	2,180E-05	3,140E-05	2,420E-06	1,610E-05
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	2,63E-02	8,382E-05	0,000E+00	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	3,130E-01	4,580E-01	3,520E-02	2,350E-01
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	2,46E+00	1,176E-02	0,000E+00	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	4,660E+01	6,710E+01	5,160E+00	3,440E+01
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	3,68E-08	1,691E-09	0,000E+00	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,110E-06	1,170E-05	8,990E-07	5,990E-06
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	2,85E-03	8,603E-06	0,000E+00	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	1,530E-02	2,210E-02	1,700E-03	1,130E-02
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	7,77E-03	7,213E-05	0,000E+00	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	1,370E-01	1,970E-01	1,510E-02	1,010E-01
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	9,59E-04	1,199E-05	0,000E+00	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	2,610E-02	3,760E-02	2,900E-03	1,930E-02
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	4,63E-01	4,860E-03	0,000E+00	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,150E+01	1,660E+01	1,280E+00	8,520E+00
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	1,13E-02	1,022E-04	0,000E+00	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	2,280E-01	3,290E-01	2,530E-02	1,690E-01
12 Ecotoxcity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	3,38E+01	3,919E-01	0,000E+00	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	7,460E+02	1,100E+03	8,460E+01	5,640E+02
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	7,59E-03	2,132E-05	0,000E+00	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,100E-02	5,910E-02	4,540E-03	3,030E-02
PERT	MJ	2,26E+00	5,654E-03	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	5,180E+00	7,460E+00	5,740E-01	3,830E+00
PENRT	MJ	6,62E+01	1,794E-01	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	7,100E+02	1,020E+03	7,870E+01	5,250E+02
Water consumption (FW)	m3	1,89E-01	1,434E-03	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	7,150E+02	1,030E+03	7,930E+01	5,280E+02
Hazardous waste (HWD)	kg	9,02E-06	6,088E-07	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	6,710E-02	9,660E-02	7,430E-03	4,960E-02
Non hazardous waste (NHWD)	kg	1,33E-01	5,478E-03	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	1,190E+00	1,720E+00	1,320E-01	8,800E-01
Radioactive waste (RWD)	kg	2,98E-05	1,000E-06	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	4,900E-03	7,060E-03	5,430E-04	3,620E-03

HDPE		C1	C2			C3	C4			D		
Effectcategorie	Eenheid	Graafmachine	Transport	Transport	Transport	Verbranden Kunststof	Stort PVC	stort zand	stort menggranulaat	Recycling HDPE	Baten AVI	Baten Menggranulaat
		per uur	per tkm	per tkm	per tkm	per kg	per kg	per kg	per kg	per kg	per MJ	per kg
1 abiotic depletion, non fuel (AD)	kg Sb eq	5,040E-05	1,640E-07	1,640E-07	1,640E-07	6,59E-07	1,40E-08	5,95E-09	5,95E-09	-8,20E-08	-2,67E-09	-2,33E-08
2 abiotic depletion, fuel (AD)	kg Sb eq	7,360E-01	6,460E-04	6,460E-04	6,460E-04	1,06E-03	1,32E-04	7,72E-05	7,72E-05	-3,12E-02	-3,77E-04	-2,87E-05
4 global warming (GWP)	kg CO2 eq	1,080E+02	8,540E-02	8,540E-02	8,540E-02	3,01E+00	1,10E-01	5,28E-03	5,28E-03	-2,23E+00	-4,13E-02	-4,21E-03
5 ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,880E-05	1,700E-08	1,700E-08	1,700E-08	8,19E-08	2,88E-09	1,90E-09	1,91E-09	-1,05E-07	-4,78E-09	-3,77E-10
6 photochemical oxidation (POCP)	kg C2H4	3,550E-02	5,390E-05	5,390E-05	5,390E-05	8,65E-05	2,63E-05	5,75E-06	5,74E-06	-2,00E-03	-5,82E-06	-3,05E-06
7 acidification (AP)	kg SO2 eq	3,160E-01	3,110E-04	3,110E-04	3,110E-04	9,54E-04	7,44E-05	3,99E-05	3,97E-05	-5,02E-03	-2,70E-05	-2,41E-05
8 eutrophication (EP)	kg PO4 eq	6,040E-02	6,340E-05	6,340E-05	6,340E-05	1,74E-04	3,68E-05	7,50E-06	7,54E-06	-3,80E-04	-3,98E-06	-4,18E-06
9 human toxicity (HT)	kg 1,4-DB eq	2,670E+01	3,010E-02	3,010E-02	3,010E-02	1,70E-01	8,22E-03	2,29E-03	2,30E-03	-7,22E-02	-2,15E-03	-1,88E-03
10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	kg 1,4-DB eq	5,280E-01	1,940E-03	1,940E-03	1,940E-03	9,71E-03	5,22E-03	5,57E-05	5,56E-05	-2,48E-03	-2,17E-05	-2,69E-05
12 Ecotoxicity, marine water (MAETP)	kg 1,4-DB eq	1,770E+03	5,080E+00	5,080E+00	5,080E+00	2,83E+01	5,44E+00	1,95E-01	1,95E-01	-5,71E+00	-9,75E-02	-1,17E-01
14 Ecotoxicity, terrestic (TETP)	kg 1,4-DB eq	9,480E-02	1,780E-04	1,780E-04	1,780E-04	4,41E-04	2,07E-05	5,74E-06	5,74E-06	-1,95E-04	-6,69E-06	-9,79E-06
PERT	MJ	0,000E+00	2,310E-02	2,310E-02	2,310E-02	1,91E-01	4,61E-03	1,33E-03	1,33E-03	-6,54E-01	-1,43E-03	-3,54E-03
PENRT	MJ	0,000E+00	1,480E+00	1,480E+00	1,480E+00	2,10E+00	2,90E-01	1,72E-01	1,72E-01	-6,98E+01	-7,75E-01	-5,79E-02
Water consumption (FW)	m3	0,000E+00	1,500E+00	1,500E+00	1,500E+00	4,36E-03	2,80E-04	1,69E-04	1,69E-04	-1,02E-02	-3,66E-05	-1,41E-03
Hazardous waste (HWD)	kg	0,000E+00	3,000E-04	3,000E-04	3,000E-04	5,27E-06	2,14E-07	1,09E-07	1,08E-07	-2,11E-05	-8,83E-07	-7,74E-08
Non hazardous waste (NHWD)	kg	0,000E+00	1,220E-01	1,220E-01	1,220E-01	4,58E-02	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	-2,07E-02	-2,20E-04	-5,49E-04
Radioactive waste (RWD)	kg	0,000E+00	1,050E-05	1,050E-05	1,050E-05	7,28E-06	1,64E-06	1,07E-06	1,07E-06	-8,39E-06	-3,37E-07	-2,44E-07

18. Bijlage VI: Dynamo-script handleiding

18.1. Dynamo uitleg

Dynamo is een visuele programmeeromgeving die wordt gebruikt voor het creëren, analyseren en manipuleren van ontwerpgegevens in diverse toepassingen. Hier zijn enkele belangrijke punten:

Beschikbaarheid:

Dynamo is beschikbaar als een open-source visuele programmeerextensie voor ontwerpprogramma's zoals Autodesk Revit en andere Building Information Modeling (BIM)-software.

Gebruikers:

Het wordt veel gebruikt door architecten, ingenieurs, ontwerpers en andere professionals in de bouw- en ontwerpwereld om complexe algoritmische taken uit te voeren en ontwerpen te automatiseren.

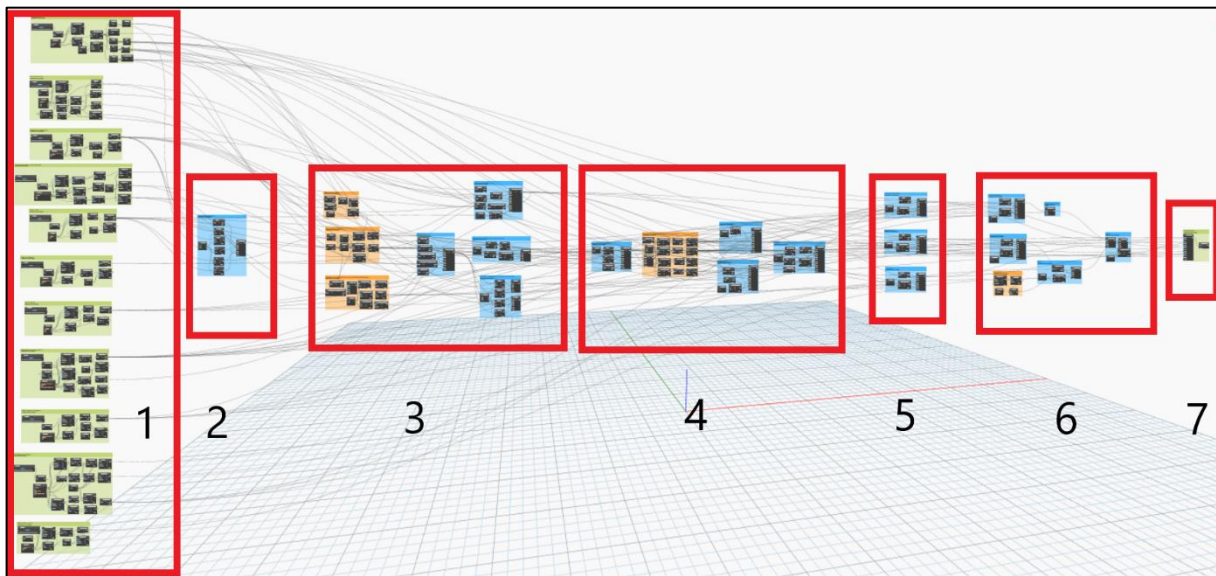
Toepassingen:

Dynamo wordt gebruikt voor diverse toepassingen, zoals het creëren van parametrische ontwerpen, het automatiseren van repetitieve taken, het genereren van complexe geometrie en het beheren van ontwerpgegevens in BIM-projecten.

IronPython:

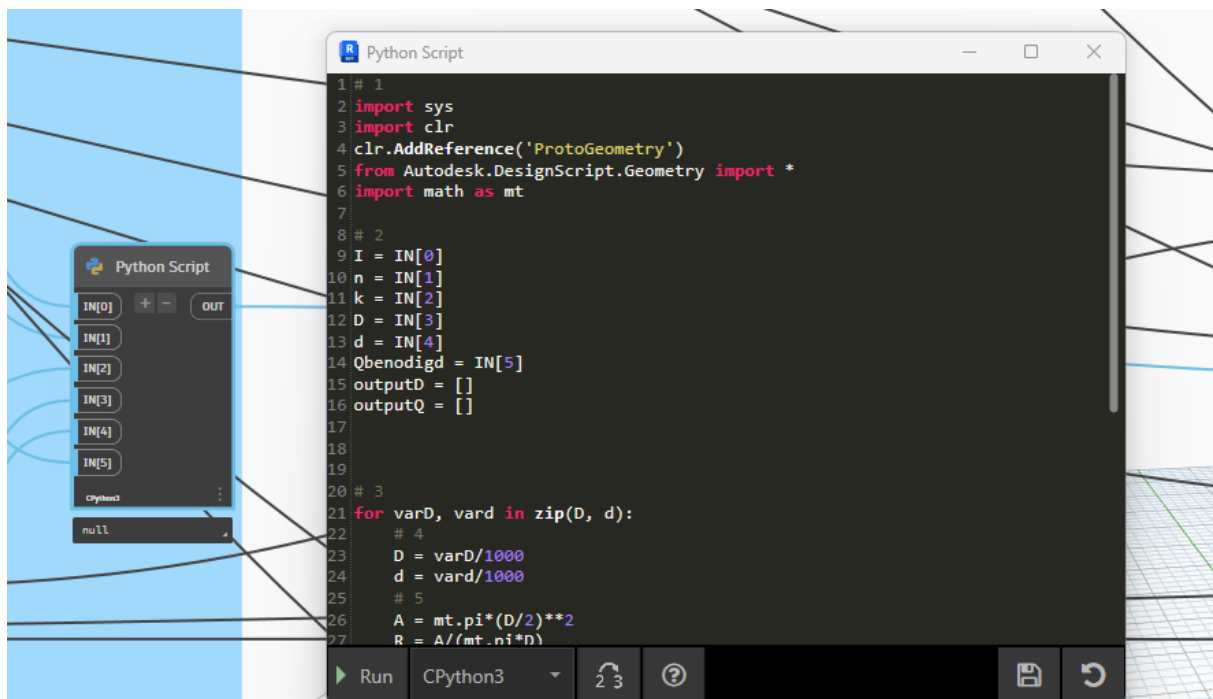
Dynamo maakt gebruik van visuele 'nodes' die functies vertegenwoordigen. Bovendien is het mogelijk IronPython-code te integreren voor geavanceerde scriptingmogelijkheden. Deze eigenschap maakt Dynamo flexibel en krachtig, geschikt voor zowel beginners als ervaren programmeurs.

18.2. Uitleg handleiding



Figuur 51 stroomschema

In deze handleiding voor de dynamo wordt de Python-code in de blauwe blokken toegelicht. Om het overzicht te vergroten, is de handleiding opgedeeld in secties volgens het stroomschema (zie figuur 51). Door dubbel te klikken op een van de Python-nodes wordt het bijbehorende script geopend. In het script zijn de code-regels voorzien van nummering (#1), waarmee wordt aangegeven welke notities uit de handleiding eraan gerelateerd zijn (zie figuur 52).



Figuur 52 dynamo handleiding uitleg

18.3. Deel 2

18.3.1. Debiet berekening

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer de invoerparameters
3. Loop door elk paar D en d in de invoerlijsten
4. Zet D en d om van millimeters naar meters
5. Bereken de dwarsdoorsnedeoppervlakte A, hydraulische straal R en coefficient C
6. Bereken vereiste stromen volgens Manning's en Chezy's vergelijkingen
7. Vergelijk de stromen en voeg toe aan uitvoerlijsten
8. Geef de resultaten terug

18.4. Deel 3

18.4.1. Grondlaag situaties

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer lijsten naar numpy-arrays
4. Bereken producten en sommen
5. Bereken E1, spr_boven, spr_onder, H, en H_onder
6. Geef de resultaten terug

18.4.2. Permanente belasting

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Bereken eigengewicht
4. Bereken sommen en verschillen
5. Loop door elke combinatie van D en d
6. Loop door elke grondlagen en bijbehorend dekking
7. Geef de resultaten terug

18.4.3. Belasting waterstand

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer dikte naar een numpy-array
4. Bereken waterbelasting
5. Geef de resultaten terug

18.4.4. Verkeersbelasting pv boven

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Haal belastingsgegevens op
4. Bereken belastingen voor verschillende typen wegen met een as-configuratie
5. Bereken belasting voor type 60-weg
6. Bereken belasting voor type 45-weg
7. Bereken belasting voor type 30-weg
8. Groepeer de belastingen
9. Zoek maximale belastingen
10. Bepaal het resultaat op basis van het weg-type
11. Geef het resultaat terug

18.4.5. Verkeersbelasting pv onder

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Haal belastingsgegevens op
4. Bereken belastingen voor verschillende typen wegen en hoeken
5. Bereken belasting voor type 60-weg
6. Bereken belasting voor type 45-weg
7. Bereken belasting voor type 30-weg
8. Groepeer de belastingen
9. Bepaal het resultaat op basis van het wegtype en de index
10. Geef het resultaat terug

18.5. Deel 4

18.5.1. Berekende gegevens

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Bereken de Sr-waarden
4. Bereken diverse parameters
5. Bereken de Vs-waarden
6. Geef de resultaten terug

18.5.2. q grondbelasting

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer lijsten naar numpy-arrays
4. Bereken VG_{max}
5. Bereken VG_{__}
6. Bereken VG op basis van B/D-verhouding
7. Bereken HG
8. Bereken qVG, qHG en qstrHG
9. Geef de resultaten terug

18.5.3. q verkeer

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer lijsten naar numpy-arrays
4. Bereken x
5. Bereken VV_{max}
6. Bereken VV
7. Bereken a
8. Bereken HV
9. Bereken n_{boven} op basis van H en Du
10. Bereken n_{onder} op basis van H_{onder} en Du
11. Bereken p als gemiddelde van n_{boven} en n_{onder}
12. Bereken qVV, qHV en qstrHV
13. Geef de resultaten terug

18.6. q ligger

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Bereken h
4. Bereken hoek
5. Bereken A natte oppervlak
6. Bereken waterbelasting
7. Bereken eigengewicht
8. Bereken q-last en puntlast met belastingsfactoren
9. Bereken Ved en Med op basis van aantal rijstroken
10. Maximale verticale belasting per belastingsfactor
11. Maximale momentbelasting per belastingsfactor
12. Geef de resultaten terug

18.7. Deel 5 Beton ongewapend

18.7.1. Dwarskracht

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer de klasse naar een integer
4. Bepaal de fck waarde op basis van de klasse
5. Converteer de invoerparameters naar arrays
6. Bereken de waarde van k
7. Bereken de waarde van ved
8. Bereken de vrdc waarde
9. Controleer of de berekende waarde voldoet aan de ontwerpcriteria
10. Resultaten teruggeven

18.7.2. Buiging

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer de klasse naar een integer
4. Haal de momentbelasting (Med) uit de invoer
5. Converteer de invoerparameters naar arrays
6. Bepaal de f_{ctm} waarde op basis van de klasse
7. Bereken het weerstandsmoment (Wc) voor elke sectie
8. Controleer of de berekende waarde voldoet aan de ontwerpcriteria
9. Resultaten teruggeven

18.7.3. Toetsing ongewapend

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Grondbelastingen
5. Verkeersbelastingen
6. Variabelen uit gvnsI
7. Variabelen uit gvnsII
8. Berekeningen voor grondbelastingen
9. Berekeningen voor verkeersbelastingen

10. Berekeningen voor eigen gewicht
11. Berekeningen voor vulling belasting
12. Drukspanningen berekenen
13. Drukspanning en vdsP berekenen
14. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
15. Resultaten teruggeven

18.8. Deel 5 Beton gewapend

18.8.1. Dwarskracht

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer de klasse naar een integer
4. Bereken effectieve belasting (Ved) in kN
5. Haal relevante parameters uit gvnsI
6. Converteer invoerparameters naar arrays
7. Berekeningen
8. Bereken de benodigde parameters voor controle
9. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
10. Resultaten teruggeven

18.8.2. Buiging

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Momenten uit de belastingen halen
4. Elastische modulus en andere parameters ophalen uit gvnsI
5. Berekeningen voor Moment
6. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
7. Resultaten teruggeven

18.8.3. Toetsing gewapend I

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Grondbelastingen
5. Verkeersbelastingen
6. Variabelen uit gvnsI
7. Variabelen uit gvnsII
8. Berekeningen voor grondbelastingen
9. Berekeningen voor verkeersbelastingen
10. Berekeningen voor eigen gewicht
11. Berekeningen voor vulling belasting
12. Berekeningen voor de wapeningsdoorsnede en materiaaleigenschappen
13. Berekeningen voor de k
14. Berekeningen voor Mstr1 en Mstr3
15. Berekeningen voor scheurvorming
16. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
17. Resultaten teruggeven

18.8.4. Toetsing gewapend II buigend moment

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Grondbelastingen
5. Verkeersbelastingen
6. Variabelen uit gvnsI
7. Variabelen uit gvnsII
8. Berekeningen voor grondbelastingen
9. Berekeningen voor verkeersbelastingen
10. Berekeningen voor eigen gewicht
11. Berekeningen voor vulling belasting
12. Berekeningen voor de momenten in de duiker
13. Berekening van het opneembare moment door wapening
14. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
15. Resultaten teruggeven

18.8.5. Toetsing gewapend II Dwarskracht

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Grondbelastingen
5. Verkeersbelastingen
6. Variabelen uit gvnsI
7. Variabelen uit gvnsII
8. Berekeningen voor grondbelastingen
9. Berekeningen voor verkeersbelastingen
10. Berekeningen voor eigen gewicht
11. Berekeningen voor vulling belasting
12. Berekening van rekenwaarde Moment
13. Berekening van rekenwaarde Normaalkracht
14. Berekening van rekenwaarde verticale en horizontale q-last
15. Berekening van oplegdruk $q \cdot o$
16. Berekening van dwarskracht Tak
17. Berekeningen voor wapeningsdoorsnede en materiaaleigenschappen
18. Aanpassing van fd-waarden volgens de voorwaarde
19. Aanpassing van MTh-waarden volgens de voorwaarde
20. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
21. Resultaten teruggeven

18.8.6. Toetsing gewapend II Radiale trek

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Grondbelastingen
5. Verkeersbelastingen
6. Variabelen uit gvnsI
7. Variabelen uit gvnsII
8. Berekeningen voor grondbelastingen
9. Berekeningen voor verkeersbelastingen
10. Berekeningen voor eigen gewicht
11. Berekeningen voor vulling belasting
12. Berekening van rekenwaarde Moment
13. Berekeningen voor wapeningsdoorsnede en materiaaleigenschappen
14. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
15. Resultaten teruggeven

18.9. Deel 5 HDPE & PVC

18.9.1. Ringdeflectie

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Berekeningen voor de maximale doorbuiging in percentage
5. Berekeningen voor de werkelijke doorbuiging
6. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
7. Resultaten teruggeven

18.9.2. Dwarskracht

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer klasse naar een integer
4. Dwarskracht uit de belastingen halen
5. Converteer invoerparameters naar arrays
6. Schuifoppervlakte berekenen
7. Schuifspanning berekenen
8. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
9. Resultaten teruggeven

18.9.3. Buiging

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer de klasse naar een integer
4. Haal de momentbelasting (Med) uit de invoer
5. Converteer de invoerparameters naar arrays
6. Bepaal de fyd waarde op basis van de klasse
7. Berekening van Weerstandsmoment
8. Berekening van Moment
9. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
10. Resultaten teruggeven

18.10. Deel 5 Staal

18.10.1. Interne krachten

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer klasse naar een integer
4. Extraheren van benodigde parameters uit gvnsl
5. Converteer invoerparameters naar arrays
6. q-last omrekenen
7. Bepaal de fyd waarde op basis van de klasse
8. Interne momenten berekenen
9. Maximale moment berekenen
10. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
11. Resultaten teruggeven

18.10.2. Dwarskracht

10. Importeer de nodige bibliotheken
11. Definieer invoerparameters
12. Converteer klasse naar een integer
13. Dwarskracht uit de belastingen halen
14. Converteer invoerparameters naar arrays
15. Schuifoppervlakte berekenen
16. Schuifspanning berekenen
17. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
18. Resultaten teruggeven

18.10.3. Buiging

11. Importeer de nodige bibliotheken
12. Definieer invoerparameters
13. Converteer de klasse naar een integer
14. Haal de momentbelasting (Med) uit de invoer
15. Converteer de invoerparameters naar arrays
16. Bepaal de fyd waarde op basis van de klasse
17. Berekening van Weerstandsmoment
18. Berekening van Moment
19. Controle of berekende waarde voldoet aan ontwerpcriteria
20. Resultaten teruggeven

18.11. Deel 6

18.11.1. Hoeveelheden kosten

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Berekeningen voor het eigenvolume
5. Converteer opti- en opvullagen naar arrays
6. Berekeningen voor de lengte van de lagen
7. Resultaten teruggeven

18.11.2. Kosten berekenen

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Haal prijzen op voor elk materiaal
4. Bereken de kosten voor elk materiaal
5. Bereken totale kosten
6. Resultaten teruggeven

18.11.3. Hoeveelheden MKI

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoerparameters naar arrays
4. Duikermateriaal MKI hoeveelheden berekenen
5. Converteer optimalisatie en opvullagen naar arrays
6. MKI hoeveelheden optimalisatie laag berekenen
7. MKI hoeveelheden opvul laag berekenen
8. Constructiefase verwijderen uit lijst
9. Lijst herhalen op leesbare manier door transpose
10. Hoeveelhedenlijst opstellen
11. Transpose lijst
12. Resultaat teruggeven

18.11.4. MKI berekenen

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoergegevens naar arrays voor verdere verwerking
4. Initialisatie van uitvoerlijsten
5. Loop over hoeveelheden
6. Bereken product emissies met hoeveelheden
7. Haal constructiefase uit de lijst
8. Bereken de Som van de overige fases
9. Converteer uitvoerlijsten naar arrays voor verdere verwerking
10. Bereken totaal MKI-emissies
11. Groepeer de resultaten voor verdere verwerking
12. Bereken de MKI-kosten met weegfactoren
13. Definieer de berekende MKI-emissies als het uiteindelijke resultaat
14. Resultaten teruggeven

18.11.5. kostenanalyse lijst opstellen

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerlijsten
3. Combineer de lijsten tot een gezamenlijke lijst
4. Transponeer de gezamenlijke lijst
5. Itereer over de getransponeerde lijst
6. Controleer of elk element van de lijst een getal (int of float) is
7. Filter alleen de numerieke waarden
8. Controleer of het aantal numerieke waarden overeenkomt met de lengte van de oorspronkelijke lijst
9. Resultaten teruggeven

18.11.6. kostenanalyse optimaal ontwerp filteren

1. Importeer de nodige bibliotheken
2. Definieer invoerparameters
3. Converteer invoergegevens naar arrays voor verdere verwerking
4. Bereken de totale kosten door de Materiaalkosten en MKI op te tellen
5. Controleer of de lengte van de totale kosten overeenkomt met de lengte van de Toetsing
6. Controleer of er True-waarden zijn in Toetsing
7. Resultaten teruggeven

19. Bijlage VII: Reflectie verslag

19.1. Competenties

Competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
III	• Complex • Ongestructureerd • Hanteert methoden bij nieuwe situaties	• Onbekend • Complex • Multidisciplinair • In de praktijk	• Zelfstandig • Begeleiding indien nodig

19.1.1. Onderzoeken

Toelichting: Je formuleert en valideert een onderzoeksvraag op basis van een voor de maatschappij en/of het beroep relevante opgave. Je kiest een of meer methoden, verzamelt gegevens en analyseert deze om zo een onderbouwd antwoord te geven op de vraag. Je doet van het geheel aan activiteiten, gegevens en bevindingen zodanig verslag dat deze reproduceerbaar zijn.

De competentie “onderzoeken” is behaald op niveau III, dit heb ik aangetoond met het literatuur onderzoek naar het ontwerpen van een duiker. Hierin zijn meerdere rekenmethodes onderzocht en met elkaar vergeleken. Het resultaat is een gestandaardiseerde rekenmethode die het bedrijf kan gebruiken om duikers te berekenen. Verder heb ik de rekenmethode omgezet naar een parametrisch reken proces. Hiervoor moest ik veel gegevens verzamelen die gebruikt zijn in de berekening. De gegevens zijn toegevoegd in het Excel-sheet dat functioneert als invulschema. Het onderzoek naar rekenmethode en gegevens heb ik zelfstandig uitgevoerd. De gestandaardiseerde rekenmethode is uitgewerkt in Excel. Het Excel-sheet is verder nagekeken door bedrijfsbegeleiders en naderhand samen verbeterd waar nodig was.

19.1.2. Ontwerpen

Toelichting: Je ontwikkelt een toekomstbestendige oplossing op basis van diverse invalshoeken en een projectdefinitie, een proces, kaders, richtlijnen en/of eisen. Je verantwoordt jouw aanpak, weegt alternatieven af en onderbouwt keuzes. Je houdt daarbij steeds rekening met de wensen van de stakeholder(s), de maatschappelijke ontwikkelingen en de gevolgen tijdens de realisatie, het gebruik, het beheer en de sloop.

Deze competentie is behaald met het ontwerpen van Dynamo-scripts. Het script vergelijkt verschillende duikerontwerpen aan de hand van opgestelde criteria, met als resultaat het optimale ontwerp. Het opstellen van het script heb ik volledig zelfstandig uitgevoerd zonder enige begeleiding. Het Dynamo-script bestaat vooral uit python code. Ik heb het aanvankelijk redelijk simpel gecodeerd, maar tijdens stage verloop werd het script steeds geavanceerder. Hierdoor zijn mijn skills in parametrisch ontwerpen gegroeid. Naast het Dynamo-script zijn de Excel-sheets ook producten die de competentie “ontwerpen” vervult.

19.1.3. Realiseren

Toelichting: Je treft de benodigde voorbereidingen voor de uitvoering van de beoogde oplossing. Je voert alle voor de realisatie benodigde handelingen uit en zorgt ervoor dat het resultaat aantoonbaar aan de specificatie voldoet.

In het oorspronkelijke werkplan zou ik deze competentie behalen door het maken van een MCA. Uiteindelijk is dit veranderd naar een kostenanalyse, waarin het milieu impact als MKI en de constructie kosten gebruikt worden als criteria. De constructie kosten zijn wat minder ver uitgewerkt, ook had ik daar wat meer begeleiding bij nodig. De MKI criteria is echter volledig zelfstandig opgesteld. In Suriname staan milieukwesties momenteel minder prominent op de agenda dan in andere landen zoals bijvoorbeeld Nederland. Mijn bedrijf was nog niet bezig met MKI berekeningen daarom heb ik dit onderdeel zelfstandig uit moeten voeren. Producten die het behalen van de competentie aantonen zijn onderdelen in het Dynamo script die kostenanalyse uitvoeren, en Excel-sheets waarmee je een MKI score van een duikerontwerp kan berekenen.

19.2. Zwakke punten

Een van mijn negatieve eigenschappen is dat ik vaak de neiging heb om liever alleen te werken. Hoewel ik samenwerken waardeer, realiseer ik me dat ik effectiever werk wanneer ik alleen ben. Tijdens mijn studie was dit geen probleem maar dit is wel iets waar ik beter mee moet omgaan.

Een ander aspect waar ik aan werk, is mijn sterke voorkeur om taken op mijn eigen manier uit te voeren. Terwijl ik weet dat verschillende perspectieven en benaderingen vaak leiden tot betere resultaten, dus ik moet meer open te staan voor verschillende werkwijzen.

Ik merk dat ik soms terughoudend ben om hulp te vragen als ik ergens vastloop. Dit is iets waar ik aan wil werken, omdat ik besef dat het vragen om hulp een teken van kracht is en bijdraagt aan mijn persoonlijke en professionele groei.

Soms heb ik gemerkt dat mijn werk niet altijd netjes georganiseerd is. Ik begrijp het belang van een georganiseerde aanpak en ben van plan mijn organisatorische vaardigheden te verbeteren. Want vooral op het einde van mijn stageperiode tijdens het opstellen van mijn rapport verliep alles toch wat chaotischer dan ik had gedacht.

Een ander aspect dat mijn aandacht verdient, is de moeite die ik heb met het volgen van een strikte planning. Ik realiseer me dat dit mijn efficiëntie kan beïnvloeden, en ik ben vastbesloten om betere planningsvaardigheden te ontwikkelen.

19.3. Sterke punten

Verder is mij opgevallen dat, ondanks ik het lastig vind om hulp te vragen, ben ik goed in het opvangen van kritiek. Ik beschouw feedback als een waardevol instrument voor mijn groei en ontwikkeling en ben bereid om continu te leren en verbeteren.

Verder is één van mijn sterke punten mijn vermogen om zeer productief te werken. Ik ben in staat om mijn taken op een efficiënte manier af te ronden en streef altijd naar het behalen van gestelde doelen. Soms zorgt dit ervoor dat het een tijdje kan duren voordat ik mijn werk uitvoer, maar dat komt omdat ik zeker wil weten dat het een productieve activiteit is.

Als ik iets niet begrijp, blijf ik volhouden en proberen tot ik het onder de knie krijg. Mijn doorzettingsvermogen stelt me in staat om obstakels te overwinnen en nieuwe vaardigheden te verwerven.

Ik ben in staat om me goed te concentreren op taken, zelfs bij uitdagende taken of in veeleisende omgevingen. Dit helpt me om mijn werk met aandacht en precisie uit te voeren. Het duurt altijd wel even voordat ik ben begonnen, maar als ik eenmaal aan het werken ben kan ik uren door blijven werken waardoor ik soms de lunch pauze vergeet.

19.4. Wat heb ik geleerd over mijzelf

Tijdens mijn stageperiode heb ik enkele waardevolle inzichten opgedaan die mijn kijk op werk en mijn eigen capaciteiten hebben beïnvloed. Een van de meest opvallende lessen was dat ik nog niet helemaal klaar ben om fulltime te werken. Het dagelijkse ritme van 7:00 tot 16:30 uur was intensiever dan ik had verwacht. De strakke schema's en verantwoordelijkheden op de werkvloer lieten me beseffen dat een geleidelijke overgang naar een fulltime werkrooster voor mij momenteel een verstandige keuze zou zijn.

Terwijl ik mijn stageperiode overdenk, valt het me op dat de dagen voorbij vliegen wanneer je intensief bezig bent. De weekenden dienden als mijn welverdiende pauze en vormden een welkome afwisseling van de werkweek. Dit benadrukte het belang van een gezonde balans tussen werk en ontspanning, waarbij ik besepte hoe cruciaal het is om tijd te nemen voor zelfzorg en herstel.

Een interessante ontdekking was mijn voorkeur voor het werken bij een klein bedrijf boven een groot bedrijf. De nauwere samenwerking en het directe contact met collega's gaven me een gevoel van verbondenheid en betrokkenheid bij het werk. Ik waardeer de dynamiek van een kleiner team, waar iedereen elkaars bijdrage waardeert en er ruimte is voor persoonlijke interactie.

Een ander inzicht betreft mijn samenwerkingsvoorkeuren. Ik heb geleerd dat samenwerken soepeler verloopt als ik buiten het werk goed kan opschieten met mijn collega's. Het delen van interesses en vriendschappelijke relaties buiten de professionele sfeer draagt bij aan een positieve werkomgeving. Het maakt samenwerken niet alleen efficiënter, maar ook plezieriger.

Deze leerervaringen hebben mijn bewustzijn vergroot en zullen zeker mijn toekomstige loopbaankeuzes en werkstijl beïnvloeden. Door te erkennen waar mijn krachten en voorkeuren liggen, ben ik beter uitgerust om weloverwogen beslissingen te nemen en mijn professionele groei te bevorderen.

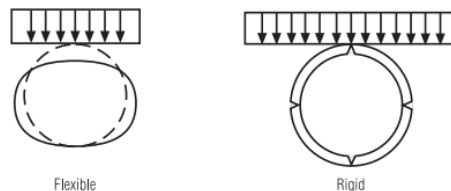
20. Bijlage VIII: Werkplan

20.1. De opdracht

Het doel van de opdracht is om met behulp van scripts in Dynamo een duiker te ontwerpen die parametrisch berekend kan worden. Er zijn verschillende manieren om een duiker te maken. Welk type uiteindelijk gerealiseerd wordt is afhankelijk van ondergrond, diepte, belasting, etc. Er moeten dus een scripts worden geschreven waarmee er in elke situatie kan worden doorgerekend met de best passende duiker. Dit proces gaat bestaan uit drie onderdelen en daarom ook drie losse scripts. Daarna worden de verschillende type duikers met elkaar vergeleken met een MCA.

20.1.1. Script 1-Rigide of flexibel

Duikers worden verdeeld in twee soorten namelijk rigide en flexibele duikers. Een flexibele buis profiteert van zijn vermogen om onder druk af te buigen zonder schade. De belasting wordt afgedragen en gedragen door de ondergrond. Een rigide buis kan niet buigen zonder structurele schade. De belasting wordt via de buis afgedragen naar de fundering en is daarom niet afhankelijk van het opvulmateriaal eromheen. In het script moet worden berekend welke soort duiker het beste kan worden toegepast, aan de hand van de omgeving in combinatie met de sterke en zwakke punten van de duikers.



20.1.2. Script 2-Flexibel duikers

De flexibele duikers verschillen in materiaal. De materialen waar in dit onderzoek naar wordt gekeken zijn Staal, Aluminium en polyvinylchloride (PVC). Bij het invullen van willekeurige parameters zal er in dynamo voor alle drie type duikers een ontwerp worden berekend.

20.1.3. Script 3-Rigide duikers

De rigide duikers verschillen ook in materiaal namelijk beton en staal. Echter komen betonnen duikers nog voor in verschillende vormen. In Dynamo script wordt er gerekend met vierkante en ronde duikers. Verder wordt ervan uitgegaan dat het beton altijd gewapend is. Bij de rigide duikers wordt er in dynamo dus ook voor drie type duikers een ontwerp berekend. Verder worden de betonnen duikers, in tegenstelling tot de andere type duikers, via dynamo gevisualiseerd in Revit zodat er met behulp van Revit automatisch wapeningstekening gemaakt worden.

20.1.4. MCA

Nadat de ontwerpen van drie type van de flexibele en rigide duikers berekend zijn worden ze met elkaar vergeleken met behulp van een MCA. Hierin worden criteria opgesteld die betrekking hebben op de kosten, MKI en de uitvoering van een flexibele of rigide duiker. Als het eerste scrip goed is geschreven moet de uitkomst van het MCA ook overeenkomen met de uitkomsten van het script waarin er dus wordt gekozen voor het soort duiker. Het MCA kan met behulp van dynamo automatisch worden ingevuld.

20.2. Producten tabel

Deelvragen	Producten	Benodigde informatie	Competenties	Tijdsbesteding
Welke informatie is er nodig om een duiker parametrisch te kunnen ontwerpen	Literatuuronderzoek over het parametrisch ontwerpen van duikers	Literatuur over het berekenen van duikers	Onderzoeken	6 weken en 3 weken op de achtergrond
Hoe maak je een script waarmee je een duiker parametrisch kan ontwerpen	Dynamo script voor het parametrisch ontwerpen van een duiker	Dynamo en Python kennis	Ontwerpen	6 weken en 3 weken op de achtergrond
Hoe maak je een kostenanalyse waarmee je alle typen duikers met elkaar kan vergelijken	Een Kostenanalyse	Literatuur over de MKI-scores en constructie kosten van duikers	Realiseren	3 weken en 3 weken op de achtergrond

20.3. Competenties

Competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
III	• Complex • Ongestructureerd • Hanteert methoden bij nieuwe situaties	• Onbekend • Complex • Multidisciplinair • In de praktijk	• Zelfstandig • Begeleiding indien nodig

20.3.1. Onderzoeken

Toelichting: Je formuleert en valideert een onderzoeksvraag op basis van een voor de maatschappij en/of het beroep relevante opgave. Je kiest een of meer methoden, verzamelt gegevens en analyseert deze om zo een onderbouwd antwoord te geven op de vraag. Je doet van het geheel aan activiteiten, gegevens en bevindingen zodanig verslag dat deze reproduceerbaar zijn.

Aan deze competentie wordt voldaan bij het beantwoorden van deelvraag 1 waar er literatuuronderzoek wordt gedaan. De literatuur wordt verkregen met behulp van de bedrijfsbegeleider, maar het onderzoek zelf wordt zelfstandig uitgevoerd.

20.3.2. Ontwerpen

Toelichting: Je ontwikkelt een toekomstbestendige oplossing op basis van diverse invalshoeken en een projectdefinitie, een proces, kaders, richtlijnen en/of eisen. Je verantwoordt jouw aanpak, weegt alternatieven af en onderbouwt keuzes. Je houdt daarbij steeds rekening met de wensen van de stakeholder(s), de maatschappelijke ontwikkelingen en de gevolgen tijdens de realisatie, het gebruik, het beheer en de sloop.

Deze competentie wordt behaald tijdens het beantwoorden van deelvraag twee. Als het script eenmaal geschreven is kunnen er meerder ontwerpen van duikers automatisch worden berekend. Het schrijven van het script wordt zelfstandig gedaan, met hier en daar steun van de schoolbegeleiders als er een tekort aan kennis is met het werken met de software.

20.3.3. Realiseren

Toelichting: Je treft de benodigde voorbereidingen voor de uitvoering van de beoogde oplossing. Je voert alle voor de realisatie benodigde handelingen uit en zorgt ervoor dat het resultaat aantoonbaar aan de specificatie voldoet.

Bij het maken van een MCA wordt er onderzoek gedaan naar de uitvoering, kosten en MKI-scores van de verschillende duiker varianten waardoor er aan deze competentie wordt voldaan. Ook hier wordt de literatuur verkregen met behulp van de bedrijfsbegeleider, maar het onderzoek zelf wordt zelfstandig uitgevoerd.

20.4. Project grens

Er wordt in dit onderzoek niet gekeken naar een specifieke locatie. Er wordt dus bijvoorbeeld geen onderzoek gedaan naar hoeveel water er door een duiker vervoert moet worden of hoe groot de belasting is die op de duiker komt te staan. De omgevingsfactoren zelf worden dus niet onderzocht maar er wordt wel onderzocht welke omgevingsfactoren er invloed kunnen hebben op het ontwerp.

Verder is een duiker relatief simpele constructie en wordt daarom in detail niveau uitgewerkt. Voor het opstellen van het MCA wordt er onderzoek gedaan naar de kosten, uitvoering en MKI. Voor de uitvoering wordt er alleen gekeken naar de uitvoering voor het soort duiker. Dus voor een rigide duiker en een flexibele duiker, aangezien het verschil in materiaal en vorm weinig tot geen verschil gaat maken in de uitvoering. Bij de kosten wordt er gekeken naar de materiaalkosten en uitvoeringskosten.

20.5. Haalbaarheid

De grootste risico's bij dit onderzoek liggen bij het verzamelen van informatie en het werken met Dynamo i.v.m. tijd. De benodigde literatuur is te bemachtigen via de bedrijfsbegeleider, maar is er genoeg tijd om alle literatuur door te nemen tot het punt dat ik genoeg kennis heb om de berekeningen duidelijk op kaart te brengen zodat deze stap voor stap geparametriseerd kan worden. Ook bij het werken met Dynamo is tijd van belang. Er ligt een groot risico bij het vastlopen van een onderdeel waardoor er niet verder kan worden gegaan met de rest van het script. De beste manier om dit risico te vermijden is om tijdens de zomervakantie in de voorbereiding te oefenen met dynamo en al aan het literatuuronderzoek te beginnen. Mocht dit echter niet voldoende zijn zal ik bij het vastlopen hulp moeten zoeken bij mijn begeleiders. Mijn bedrijfsbegeleider voor steun bij de duikerberekening en voor hulp met Dynamo en Python kan ik hulp krijgen van mijn begeleiders via school.

20.6. Communicatie

Vanuit het bedrijf heb ik twee begeleiders waarvan er een constructeur is die begeleidt met de opdracht en de andere begeleider regelt voor mij de plek binnen het bedrijf. Ik zal dagelijks werken op kantoor in Suriname en nauw in contact blijven met beide begeleiders.

Verder heb zal ik met twee begeleiders vanuit school contact moeten houden via teams. Eens in de twee weken zal ik een gesprek in willen plannen met één van de begeleiders mijn onderzoek te bespreken. Met in week 8 een tussenpeiling.

20.7. Planning

week	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Voorbereiding																						
Dynamo en Python oefenen																						
Litratuur verzamelen																						
Stage overeenkomst																						
Het werkplan																						
Suriname																						
Verblijf																						
Deelopdracht 1																						
Litratuur onderzoek																						
Data verzamelen																						
Flowchart van berekening maken																						
Deelopdracht 2																						
script rigide of flexibel schrijven																						
script rigide duikers schrijven																						
Wapenigstekening in Revit via Dynamo																						
script flexibele duikers schrijven																						
Deelopdracht 3																						
Onderzoek kosten																						
onderzoek uitvoering																						
Onderzoek MKI																						
MCA samenstellen																						
Rapportage																						
Bijlage																						
Bronvermelding																						
Adviesrapport Schrijven																						
Scriptie evalueren																						
Presentatie																						

toelichting	kleur
Start	
mee bezig	
op de achtergrond	
deadline	

20.7.1. Planning toelichting

In week 1 (11-17 sep) ligt alle focus op deelopdracht 1 wat eigenlijk het voorwerk is voor de rest van het onderzoek. Alle data en literatuur, wat later nodig zal zijn, wordt verzameld en drie weken onderzocht. Het is de bedoeling dat het na die drie weken duidelijk is hoe alle type duikers worden berekend. De volgende stap is namelijk om de berekening te parametriseren. Verder wordt een flowchart gemaakt om de stappen van de berekening op kaart te brengen. Deze stappen zullen namelijk terugkomen in het script

In week 4 begint het schrijven van de scripts in Dynamo. Het schrijven van het script is onderdeel van deelopdracht 2. Er wordt hier in totaal 12 weken voor ruimte gemaakt. Het is voor nu lastig te zeggen welk script meer tijd nodig zal hebben, daarom wordt er in het begin tegelijk aan de scripts gewerkt totdat het duidelijk is wat de beste tijdsverdeling is.

Tijdens het afronden van het script wordt er tegelijkertijd in week 13 gestart aan het opstellen van een MCA. Het opstellen van het MCA is onderdeel van deelopdracht 3 en hiervoor wordt in drie weken vrij gemaakt. De criteria worden onderzocht een samengesteld tot een MCA en gekoppeld aan het Dynamo script zodat het MCA automatisch wordt ingevuld.

Zodra dit klaar is wordt er gestart aan het schrijven van een Advies rapport. Hiervan is de bijlage en bronvermelding al deels af aangezien deze twee vanaf week 1 wordt bijgehouden zodat de hele onderzoek overzichtelijk verloopt. Na drie weken schrijven van het advies rapport wordt deze in week 17 samen met een begeleider doorgenomen en geëvalueerd. In week 18 kan het nog worden aangepast en daarna worden ingeleverd.