Circulaire dijkontwerpen

Afstudeerrapport

Definitief

15 juni 2020

Cheyenne Kraag

16077032

LIEVENSE | WSP

DE HAAGSE HOGESCHOOL

Titelblad

Titel
Circulaire dijkontwerpen

Ondertitel
Afstudeerrapport Definitief

Vak
Afstudeerstage

Datum van voltooiing
14 juni 2020

Auteur
Cheyenne Kraag 16077032 [redacted]

Opleiding
Civiele Techniek
Specialisatie waterbouw

Instelling
Haagse Hogeschool

Schoolbegeleiders
Eerste begeleider R. Weersink [redacted]
Tweede begeleider W. Bharos

Bedrijf
Lievense | WSP

Bedrijfsbegeleiders
L. van den Heuvel Omgevingsmanager en adviseur duurzaamheid [redacted]

A. Weersink Senior adviseur duurzaamheid [redacted]

Voorwoord

Ter afsluiting van de opleiding Civiele Techniek aan De Haagse Hogeschool te Den Haag heb ik dit afstudeerrapport, naar aanleiding van het begrip ‘circulaire dijkontwerpen’, geschreven. In dit onderzoek is vanuit het dreigende grondstoffentekort gezocht naar een manier om circulariteit toe te passen bij dijkontwerpen.

Graag wil ik van de gelegenheid gebruik maken om een aantal mensen te bedanken. Te beginnen met mijn afstudeerbegeleiders vanuit school: De heer Weersink en de heer Bharos, heel erg bedankt voor de begeleiding tijdens mijn afstudeerperiode. Daarnaast wil ik Lucree van den Heuvel, mijn begeleider vanuit Lievense | WSP bedanken voor haar begeleiding. Ook wil ik graag Annemarie Weersink en Tim van Cuyck bedanken voor alle inhoudelijke begeleiding bij mijn afstudeeronderzoek.

Johanna Westerdijkplein 75, Den Haag

14 juni 2020

Samenvatting

Grote veranderingen in het klimaat, de bevolkingsgroei en de economie hebben er toe geleid dat er gewerkt moet worden aan een duurzame toekomst met aandacht voor schaarste aan grondstoffen en een eindige voorraad fossiele energiebronnen. De overheid wil snel resultaat boeken met hun circulaire plannen. Het doel is om in 2050 volledig circulair te zijn. Een tussendoel is om 50% minder primaire grondstoffen te gebruiken in 2030 ten opzichte van 1990. Daarvoor wordt vanaf 2023 een uitvraag van 100% circulair nagestreefd.

Circulariteit gaat uit van een wereld zonder afval. Producten worden gedemonteerd en de grondstoffen hiervan worden opnieuw gebruikt, hierdoor ontstaat een oneindige recycling. In het ideale geval wordt het gehele product hergebruikt. Is dat niet mogelijk, dan onderdelen van het product en tot slot de grondstoffen of materialen die uit een product komen. Circulariteit kan ook toegepast worden bij dijkontwikkeling. Door in de ontwerpfase van een dijk rekening te houden me circulariteit kan er gekozen worden voor materialen die beter circulair inzetbaar zijn. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de circulaire ontwerpprincipes van Rijkswaterstaat.

Om te bepalen wanneer een dijk versterkt moet worden wordt gekeken naar de veiligheidsnorm. Deze norm bestaat uit een signaleringswaarde en een ondergrens. De signaleringswaarde betreft de kans op overstromingen en de ondergrens geeft de maximaal toelaatbare faalkans weer. Wanneer de signaleringswaarde van een dijk bereikt is kunnen de voorbereidingen voor een dijkversterking starten.

Er zijn verschillende oplossingen waaruit gekozen kan worden om een dijk te versterken. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen "dijkversterkingen in de grond" en "constructieve dijkversterkingen". Bij dijkversterkingen in de grond is de versterking gemaakt van grond. Deze grond kan uit eigen gebied komen of aangevoerd worden vanuit een andere locatie. Constructieve dijkversterkingen zijn versterkingen die gemaakt zijn van een ander materiaal dan grond. Hierbij worden elementen of stoffen in de grond gebracht, die krachten en/of momenten kunnen opnemen en/of de grondwaterstromen kunnen beïnvloeden.

Om te bepalen welke dijkversterkingsoplossing het minst milieubelastend is kan onder andere gebruik gemaakt worden van DuboCalc of van het ontworpen MKI bouwstenen model.

DuboCalc is een softwaretool ontwikkeld in opdracht van Rijkswaterstaat om de duurzaamheid en milieukosten van ontwerpvarianten te berekenen en te vergelijken. Het resultaat van de berekening is de de milieukostenindicator (MKI) en wordt uitgedrukt in euro’s. Dit zijn fictieve kosten om de schade aan het milieu te herstellen voor verschillende aspecten, zoals klimaatverandering. DuboCalc is echter een tool die zeer beperkt rekening houdt met circulariteit.

Om deze reden is het MKI bouwstenen model ontworpen. Het model berekent aan de hand van de ingevoerde gegevens de MKI waarde van een dijk, de MKI waarde per strekkende meter dijk, de MKI per bouwsteen, de MKI per bouwsteen per strekkende meter, het percentage MKI bouwstenen ten opzichte van de totale MKI van de dijk en een cumulatief verloop van de MKI waarde over een dijktraject. Wanneer er gegevens over circulariteit beschikbaar zij kan hiervoor in het MKI bouwstenen model een primair circulariteit percentage ingevoerd worden. Dit percentage geeft aan hoe circulair een materiaal is.

Uit toepassing van het MKI bouwstenen model op het dijkversterkingsproject “de Grebbedijk” en “de Sterke Lekdijk (Salmsteke)” blijkt dat met het model snel alternatieve oplossingen met elkaar vergeleken kunnen worden. Ook kan hieruit geconcludeerd worden dat constructieve dijkversterkingen meer milieubelastend zijn dan dijkversterkingen in de grond. Daarnaast is gebleken dat wanneer er gebruik gemaakt wordt van circulaire materialen, de MKI score flink zal dalen.

De kennis die opgedaan is tijdens dit afstudeeronderzoek is op drie manieren overgedragen. Namelijk tijdens twee gastcolleges op De Haagse Hogeschool, een lunchlezing voor Lievense | WSP en ook zal er een artikel gepubliceerd worden in het tijdschrift en op de website van Land+Water.

Inhoudsopgave

Titelblad 1
Voorwoord 2
Samenvatting 3
1. Inleiding 6
1.1 Aanleiding 6
1.2 Afbakening 6
1.3 Doelstelling 6
1.4 Probleemstelling 6
1.5 Onderzoeksvraag 7
1.6 Onderzoeksopzet 7
1.7 Leeswijzer 8
2. Circulariteit 10
2.1 Circulariteit 10
2.2 Circulaire dijkontwikkeling 12
3. Veiligheid van dijken 13
3.1 Veiligheidsnorm 13
3.2 Veiligheidsopgave 14
3.3 Veiligheidsoordeel 15
3.4 Voorbeelden 15
4. Dijkversterkingsoplossingen 17
4.1 Dijkversterking in de grond 17
4.2 Constructieve dijkversterking 19
5. DuboCalc 24
6. Het MKI bouwstenen model 26
6.1 De Intro 26
6.2 De input 26
6.3 Numerieke Output 27
6.4 Samenvatting in grafieken 32
6.5 De MKI gegevens 32
7. Circulariteit in het MKI bouwstenen model 33
8.1 Voorkeursalternatief met waterplas 35
8.2 Voorkeursalternatief zonder waterplas 36
8.3 Kans alternatief 1 38
8.4 Kans alternatief 2 39
8.5 Kans alternatief 3 40
8.6 Vergelijking van de varianten 42
9. Toetsing milieubelasting model – Sterke Lekdijk (Salmsteke) 44
10. Toetsing circulariteit in het milieubelasting model – Grebbedijk 46
11. Kennisoverdracht 47

11.1 Gastcollege op De Haagse Hogeschool 47
11.2 Lunchlezing Lievense 48
11.3 Artikel Lievense 48
12. Conclusies 49
13. Aanbevelingen 51
Bibliografie 53
Bijlage I – Werkplan 56
Bijlage II – Reflectie verslag ..... **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**
II.1 Reflectie competenties ..... **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**
II.2 Persoonlijke ontwikkeling ..... **Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.**
Bijlage III – Veiligheidsnorm in kaart 57
III.1 Signaleringswaarde 57
III.2 Ondergrens 58
Bijlage IV – Veiligheidsopgave Nederland kaart (2020) 59
Bijlage V – Beschrijving alternatieven Grebbedijk 60
Bijlage VI – Beschrijving voorontwerp de Sterke Lekdijk (Salmsteke) 62
Bijlage VII - MKI Bouwstenen model 64
Bijlage VIII – Invoer en resultaten MKI bouwstenen model 65
VIII.1 Grebbedijk 65
VIII.2 De Sterke Lekdijk (Salmsteke) 65
Bijlage IX – Invoer en resultaten MKI bouwstenen model met circulaire grond. 66
Bijlage X – Artikel MKI bouwstenen model 82

1. Inleiding

Dit hoofdstuk is de inleiding, welke bestaat uit de volgende paragrafen: aanleiding, afbakening, doelstelling, probleemstelling, onderzoeksvraag, onderzoeksopzet en de leeswijzer.

1.1 Aanleiding

Duurzaam, duurzaamheid en circulariteit zijn begrippen die we tegenwoordig steeds vaker horen. Grote veranderingen in het klimaat, de bevolkingsgroei en de economie hebben ertoe geleid dat er gewerkt moet worden aan een duurzame toekomst met aandacht voor schaarste aan grondstoffen en een eindige voorraad fossiele energiebronnen. De overheid heeft daarom een Grondstoffenakkoord en een Klimaatakkoord ondertekend waarin afspraken zijn gemaakt om doelstellingen te bereiken.

Zo kijken waterschappen bij dijkversterking nadrukkelijk naar duurzaamheidsprincipes als CO2 reductie en circulariteit. De waterschappen willen hierbij het onderstaande bereiken:

- Geen grondstoffen gebruiken die negatieve effecten hebben op het milieu.
- Geen gebruik maken van schaarse grondstoffen.
- Vergroten van het aanbod van hernieuwbare alternatieven.

De overheid wil snel resultaat boeken met hun circulaire plannen. Het doel is om volledig circulair te zijn in 2050. Een tussendoel is 50% minder primaire grondstoffen te gebruiken in 2030. Daarvoor wordt per 2023 een uitvraag 100% circulair nagestreefd. (Schootstra, 2019)

Het willen nastreven van een zo hoog mogelijk niveau van circulariteit is ook het geval bij de projecten “de Grebbedijk” (een project van Waterschap Vallei & Veluwe) en “de Sterke Lekdijk” (een project van Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden). De Lekdijk vormt samen met de Grebbedijk de waterkering aan de noordoever van de Nederrijn-Lek vanaf Wageningen tot Schoonhoven. Beide dijken voldoen niet aan de nieuwe normen voor waterveiligheid, en zijn daarom opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Om deze redenen zullen beide dijken versterkt dienen te worden. Deze dijkversterkingen bieden de kans om circulaire dijkoplossingen te verkennen. (Lievense, 2018)

1.2 Afbakening

‘Duurzaamheid’ is een erg breed begrip. Dit onderzoek beperkt zich tot het aspect ‘circulariteit’ van materialen. Circulariteit focust zich op de kringlopen van grondstoffen, terwijl duurzaamheid breder betrekking heeft op mensen, de planeet en de economie. Deze onderdelen zullen in dit onderzoek achterwegen gelaten worden. Voor voorbeelden bij dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de projecten “de Grebbedijk” en “de Sterke Lekdijk”.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het verbeteren van de MKI-bouwstenen methode om in een vroegtijdig ontwerpstadium op eenvoudige wijze een goed beeld te kunnen vormen over de circulariteit van ontwerpalternatieven voor dijkversterkingsprojecten.

1.4 Probleemstelling

Circulariteit is een steeds belangrijker wordend onderwerp. De Unie van Waterschappen heeft aangegeven in 2023 volledig circulair te willen aanbesteden. Op dit moment is er nog geen uniforme bepalingsmethode voor circulariteit. Dit vergt een andere ontwerpaanpak met vroegtijdige aandacht voor circulariteit.

Een mogelijke ontwerpaanpak is de MKI-bouwstenen-methode van Lievense. Met de MKI-bouwstenen is op eenvoudige wijze een (milieu)kostenraming te maken voor een dijkontwerp. De huidige methodiek die is gebaseerd op DuboCalc 5.0, houdt nog geen rekening met hergebruik van materialen aan het einde van de levensduur. Circulariteit komt dus onvoldoende tot uitdrukking in deze milieukostenberekening. Ook ecologische en ruimtelijke aspecten zijn geen onderdeel van de methode. (Weersink & Karssemeijer, 2019).

Om deze redenen dient er onderzoek gedaan te worden hoe de huidige MKI-bouwstenenmethode moet worden aangepast om dit ontwerpinstrument optimaal te kunnen inzetten voor (opdrachtgevers), ontwerpers en bouwers om circulaire dijkontwikkeling te stimuleren.

1.5 Onderzoeksvraag

Op basis van de probleemstelling is de onderzoekvraag opgesteld, deze luidt als volgt:

Op welke wijze zijn MKI-bouwstenen optimaal in te zetten voor (opdrachtgevers), ontwerpers en bouwers om circulaire dijkontwikkeling te stimuleren?

1.5.1 Deelvragen

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn een aantal deelvragen opgesteld. Deze deelvragen vormen de leidraad voor het onderzoek.

1. Wat is circulaire dijkontwikkeling?

2. In hoeverre is de MKI-methode (DuboCalc) een geschikte methode om de circulariteit van een dijk te bepalen?

3. Wat zijn MKI-bouwstenen; hoe wordt de MKI daarvan bepaald en uit welke elementen bestaan deze?

4. Welke indeling in typen dijkversterkingen (classificering) is te maken, met het oogpunt op ontwikkeling van referentiedijkprofielen?

5. Welke MKI-bouwstenen zijn er nodig/wenselijk voor referentiedijkprofielen (standaard) en voor circulaire alternatieven?

6. Welke data zijn nodig om de MKI-bouwstenen te bepalen en welke data zijn wel/niet beschikbaar? (wat ontbreekt)

7. Wat is een geschikte methode die - vertaald in een ontwerptool - bruikbaar is voor ontwerpers om snel ontwerpalternatieven voor dijkdoorsneden te genereren en MKI / circulariteits-resultaten te vergelijken?

8. Op welke wijze is het resultaat van deelvraag 7 eenvoudig te modificeren om het te kunnen inzetten als advies/beslissingsinstrument, door daar tevens informatie over LCC / Investeringskosten aan toe te voegen?

1.6 Onderzoeksopzet

De opzet van dit onderzoek bestaat uit drie delen, het theoretisch kader, de onderzoeksmethode en het onderzoeksresultaat. De deelvragen (zie paragraaf 1.5.1) zijn overeenkomstig deze onderzoeksdoelen gerangschikt.

1.6.1 Theoretisch kader

In het theoretisch kader is circulariteit in het algemeen en circulariteit bij dijkontwikkeling bestudeerd. Daarnaast is ook gezocht naar informatie over verschillende veiligheidsklassen en verschillende dijkversterkingsmethodes. Dit is gedaan door middel van literatuuronderzoek, zowel op het internet als in de bibliotheek van De Haagse Hogeschool. En door middel van gesprekken met collega's binnen Lievense.

1.6.2 Methodologie

In het deel Methodologie wordt eerst een toelichting gegeven over het programma DuboCalc wat op het moment het meest gebruikte programma is om de MKI te bepalen in de GWW-sector. Vervolgens wordt het gemaakte MKI bouwstenen model toegelicht. Vervolgens wordt uitgelegd hoe circulariteit aan dit model toegevoegd is en nog verder toegevoegd kan worden.

1.6.3 Onderzoeksresultaat

In het derde deel onderzoeksresultaat wordt het MKI bouwstenen model zoals beschreven in methodologie getoetst aan de hand van het project “de Grebbedijk” en het project “de Sterke Lekdijk (Salmsteke)”. Door het model daadwerkelijk in te vullen, wordt de bruikbaarheid aangetoond.

1.7 Leeswijzer

Dit afstudeerrapport is opgedeeld in 3 delen, het theoretisch kader, de methodologie en het onderzoeksresultaat. Het *eerste hoofdstuk* van dit afstudeerrapport geeft een inleiding op het onderzoek, hierin worden de aanleiding, de probleemstelling, de doelstelling met hoofd- en deelvragen en de onderzoeksopzet beschreven.

Hierna volgt het theoretisch kader, dit deel begint met het *tweede hoofdstuk* en beschrijft circulariteit in het algemeen en circulariteit bij dijkontwikkeling. Het *derde hoofdstuk* beschrijft de veiligheid van dijken en het *vierde hoofdstuk* geeft een overzicht van mogelijke dijkversterkingsoplossingen.

Na het theoretisch kader volgt het deel methodologie. Dit deel begint met het *vijfde hoofdstuk* waarin het bestaande model DuboCalc toegelicht zal worden. Het *zesde hoofdstuk* bestaat uit een beschrijving van het gemaakte MKI bouwstenen model. In het *zevende hoofdstuk* wordt beschreven hoe circulariteit aan het MKI bouwstenen model is en wordt toegevoegd.

Daarna volgt het onderzoeksresultaat. Dit deel begint met *hoofdstuk acht* en geeft een beschrijving van de resultaten van het MKI bouwstenen model voor “de Grebbedijk”. *Hoofdstuk negen* geeft een beschrijving van de resultaten van het MKI bouwstenen model voor “de Sterke Lekdijk (Salmsteke)”. In *hoofdstuk tien* worden de resultaten van circulair grond gebruik in het MKI bouwstenen model toegelicht aan de hand van de Grebbedijk. En worden deze vergeleken met het MKI bouwstenen model zonder circulariteit.

Dit wordt gevolgd door *hoofdstuk 11* waarin de manieren van kennisoverdracht worden beschreven. In *hoofdstuk 12* worden de conclusie en de conclusies voor de deelvragen beschreven. In *hoofdstuk 13* worden aanbevelingen gedaan voor het perfectioneren en uitbreiden van het MKI bouwstenen model. Hierna volgen de bijlages, de bijlages ondersteunen het afstudeerrapport.

Theoretisch Kader

Circulariteit

Veiligheid van dijken

Dijkversterkingsoplossingen

2. Circulariteit

Dit hoofdstuk focust op circulariteit. Ingegaan wordt op het begrip circulariteit en circulaire dijkontwikkeling.

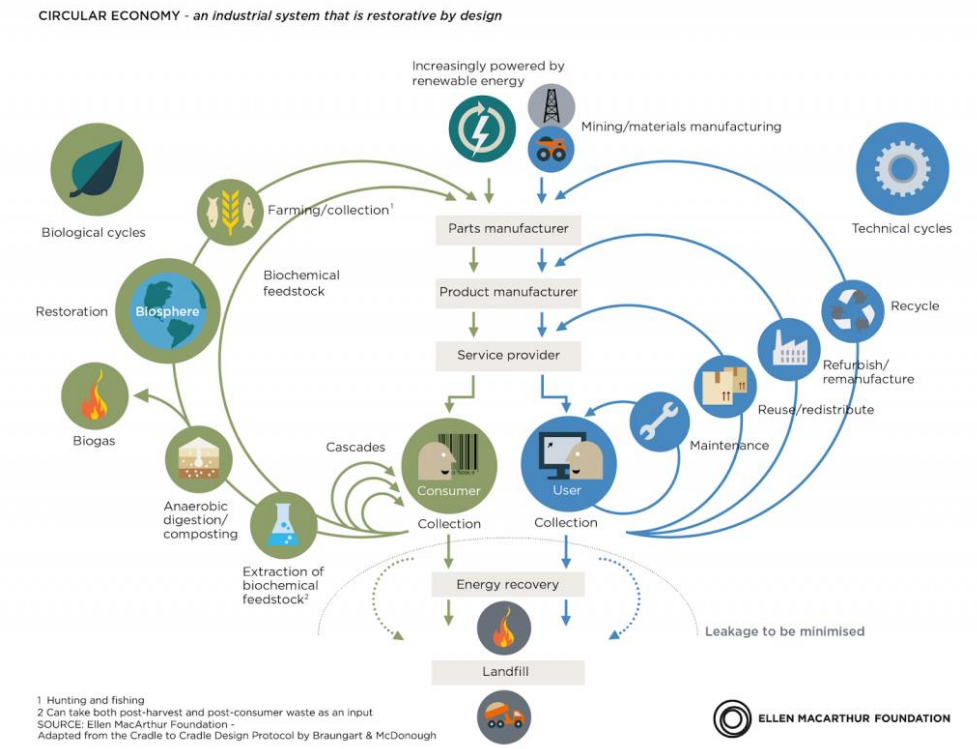
2.1 Circulariteit

Circulariteit is een begrip dat tegenwoordig steeds vaker gebruikt wordt, maar wat is circulariteit nu eigenlijk?

Circulariteit gaat uit van een wereld zonder afval. De producten van nu zijn de grondstoffen van later. Producten worden gedemonteerd en de materialen worden opnieuw gebruikt, hierdoor ontstaat een oneindige recycling. (The Green House, 2020)

Tegenover de circulaire economie staat de (huidige) lineaire economie. Dit is een wegwerp- en vervangcultuur, waarin producten na gebruik, aan het einde van hun levensduur, weggegooid en vervangen worden. De huidige economie is vooral gericht op het hier en nu, terwijl de circulaire economie zich ook richt op de toekomst. Circulariteit draagt bij aan het tegen gaan van de uitputting van grondstoffen en aan het beperken van de klimaatverandering. (GPS, 2019)

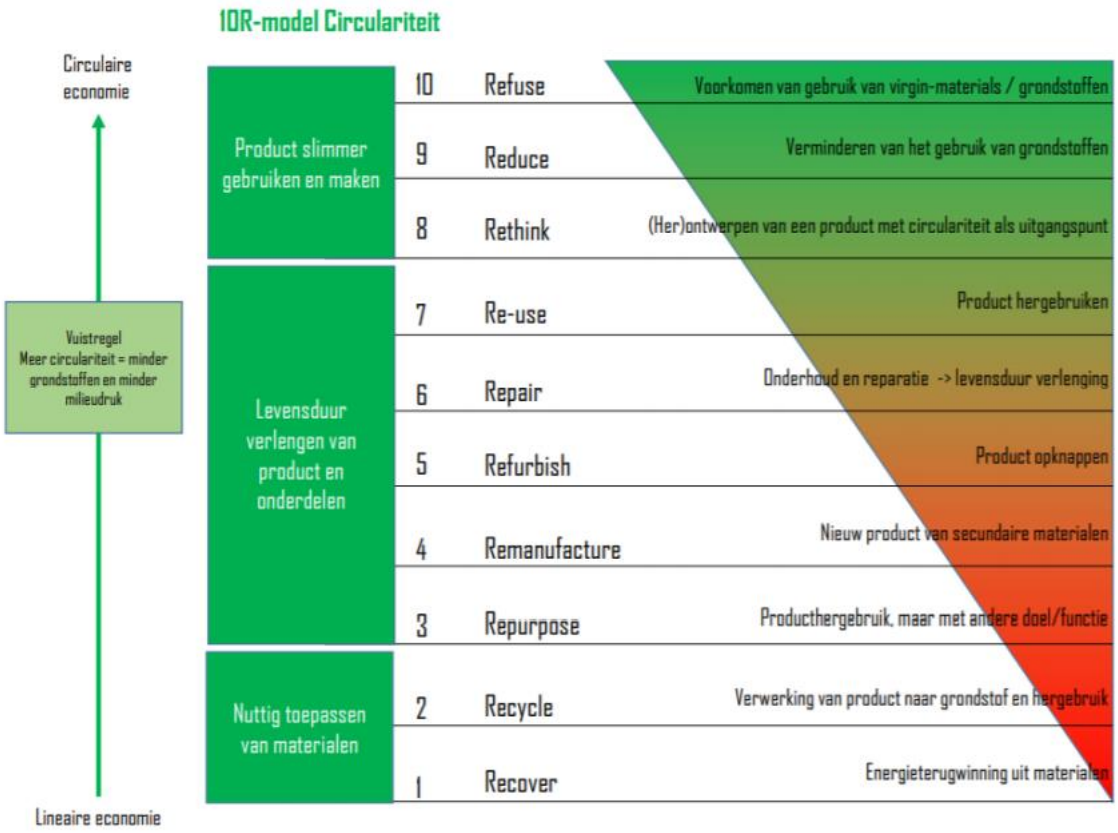
Op Figuur 1 zijn de basisprincipes van circulariteit weergegeven. Hierin is de kringloop van een circulaire economie weergegeven. Het anders ontwerpen van producten kan ervoor zorgen dat de producten makkelijker te hergebruiken of te recyclen zijn. Bijvoorbeeld een mobiele telefoon waarvan de batterij vervangbaar is waardoor de levensduur van de telefoon uitgebreid kan worden, of het gebruikmaken van gebiedseigen grond voor een dijkversterking, of initiatieven zoals Peerby en Snappcar waarbij mensen hun gereedschap of auto uitlenen, zodat bestaande apparaten beter benut worden en er dus minder grondstoffen nodig zijn. Bij dit soort initiatieven dient er wel rekening gehouden te worden met de het transport en het energiegebruik dat komt kijken bij het uitlenen van producten en of recyclen niet beter uitkomt. (De Ingenieur, 2017)



Figuur 1. De basisprincipes van circulariteit. (Kleij, 2019)

In de circulaire economie worden materialen zo veel mogelijk hergebruikt. In het ideale geval wordt het gehele product hergebruikt. Is dat niet mogelijk, dan onderdelen van het product en tot slot de grondstoffen of materialen die uit een product komen. Voor circulariteit is een ‘prioriteitsladder’ ontwikkeld, waarbij 10 het hoogst scoort en 1 het laagst. Deze prioriteitsladder is op Figuur 2 weergegeven.

In een circulaire economie behouden de materialen in een afgedankt product idealiter hun oorspronkelijke kwaliteit, om zo opnieuw in eenzelfde soort product te kunnen worden gebruikt. Er zijn verschillende circulariteitsstrategieën met een prioriteitsvolgorde van hoog naar laag om grondstoffen- en materiaalgebruik en afvalproductie te voorkomen. Als vuistregel betekent meer circulariteit minder grondstoffen en afval, en meer milieuwinst.



Figuur 2. 10 R model circulariteit. (Platform CB'23, 2019)

2.2 Circulaire dijkontwikkeling

Circulariteit kan ook toegepast worden bij dijkontwikkeling. Circulariteit zal in de ontwerpfase al toegepast kunnen worden. Door in de ontwerpfase al rekening te houden met circulariteit kan er gekozen worden voor materialen die beter circulair inzetbaar zijn. Hierbij kan er gekeken worden naar de acht circulaire ontwerpprincipes. Deze ontwerpprincipes zijn ontwikkeld door Rijkswaterstaat met als doel om een denkrichting te geven om circulariteit in MIRT[1] projecten te bevorderen. De principes moeten helpen om het inzicht te vergroten waar kansen voor circulariteit liggen binnen een ontwerpopgave en deze te benutten. De ontwerpprincipes dienen als richtlijn maar zijn geen beoordelingsmethode:

- **Preventie**
  1. Voorkómen of verkleinen van de omvang van projecten.
- **Waardebehoud**
  2. Verleng de levensduur van bestaande objecten.
  3. Maak duurzaam (her)gebruik van bestaande objecten en materialen.
- **Waardecreatie**
  4. Ontwerp voor meerdere levenscycli.
  5. Ontwerp toekomstbestendig: adaptief, mogelijk maken toekomstige ontwikkelingen.
  6. Ontwerp voor optimaal beheer en onderhoud in nauw overleg met de beheerder.
  7. Ontwerp voor duurzaam materiaal gebruik. Verlaging Milieukostenindicator (MKI) waarde bij keuzes, beschouwing hergebruik.
  8. Ontwerp voor minimaal grondstof en energieverbruik in aanleg en gebruiksfase. Verlagen van de CO2 uitstoot.

Figuur 3. De drie circulaire ontwerpprincipes. (Kessel, 2019) (Rijkswaterstaat, 2020)

[1] MIRT staat voor Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport.

3. Veiligheid van dijken

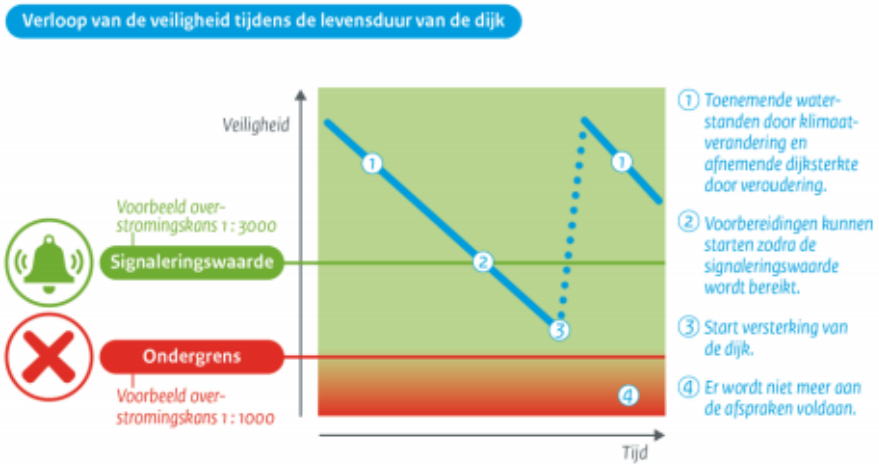
Dit hoofdstuk focust zich op de veiligheid van dijken, welke bestaat uit de paragrafen: Veiligheidsnorm, veiligheidsopgave, veiligheidsoordeel en voorbeelden.

3.1 Veiligheidsnorm

Alle dijktrajecten moeten voldoen aan een veiligheidsnorm. Deze norm bestaat uit een signaleringswaarde en een ondergrens. De signaleringswaarde betreft een overstromingskans. In Figuur 5 zijn de mogelijke signaleringswaardes weergegeven. De ondergrens geeft de maximaal toelaatbare faalkans voor een waterkering weer, die hoort bij de betreffende signaleringswaarde van de kering. Voor de meeste keringen geldt dat de kans van de ondergrens drie maal groter is dan de kans van de signaleringswaarde. In Figuur 4 zijn de mogelijke ondergrens waardes weergegeven. In Bijlage III zijn de kaarten met daarin de Signaleringswaarde per dijken en de ondergrens per dijk in 2020 weergegeven. (Rijkswaterstaat, 2020) Figuur 6 laat het verloop van de levensduur van de dijk met een veiligheidsnorm zien. Hierin is duidelijk weergegeven dat de dijksterkte van een dijk afneemt door veroudering. Wanneer de signaleringswaarde bereikt is kunnen er voorbereidingen voor een dijkversterking starten. Wanneer de dijksterkte onder de signaleringswaarde ligt maar nog boven de ondergrens kan er gestart worden met het versterken van de dijk. Na het versterken van de dijk zal de dijksterkte weer boven de signaleringswaarde liggen. Indien de dijk niet op tijd versterkt wordt en de dijksterkte onder de ondergrens komt te liggen, voldoet de dijk niet langer aan de eisen.

Figuur 4. Mogelijke ondergrens waardes (Rijkswaterstaat, 2020).

Figuur 5. Mogelijke signaleringswaardes. (Rijkswaterstaat, 2020)



Figuur 6. Verloop levensduur van de dijk met de veiligheidsnorm. (ter Horst, Lokin, Duits, van Montfoort, & Delhez, 2018)

Deltaprogramma heeft als doel dat uiterlijk in 2050 alle dijktrajecten in Nederland voldoen aan de veiligheidsnorm. In de periode van 2017 – 2023 worden alle dijktrajecten beoordeeld. Hieruit volgt of een dijktraject of een deel daarvan (dijkvakken) voldoet aan de veiligheidsnorm.

3.2 Veiligheidsopgave

Nederland heeft in totaal 3469 km aan dijken. Van deze dijken is een veiligheidsopgave opgesteld. Hierin zijn de gegevens uit het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) en de gegevens uit de dijktraject beoordelingen gecombineerd.

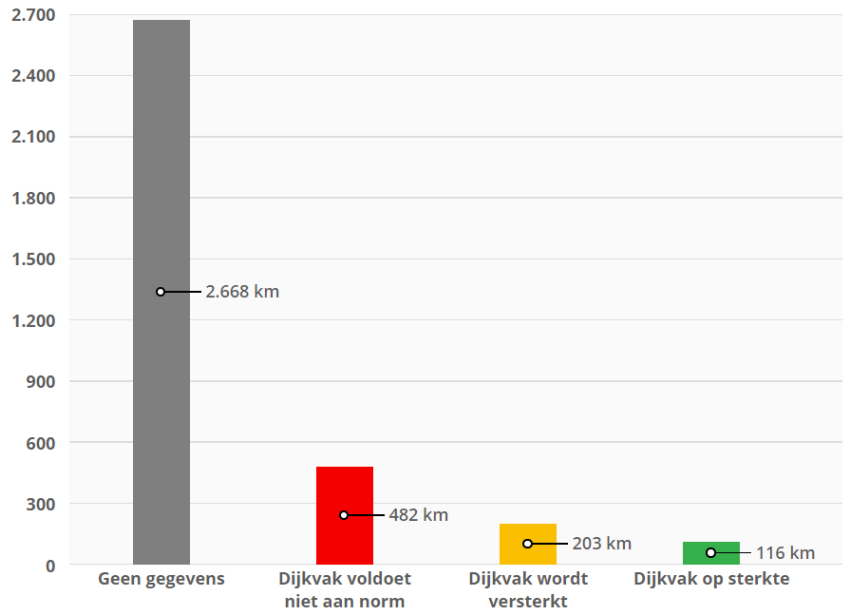
Dijkvak voldoet aan de norm:
Het aantal kilometers dat voldoet aan de norm. Dat is ofwel geconstateerd in de beoordeling ofwel in is de dijk veilig verklaard na een dijkversterking.

Dijkvak wordt versterkt:
Het aantal kilometers dijkvak dat niet voldoet aan de norm maar wel al op het lopende dijkversterkingsprogramma staat.

Dijkvak voldoet niet aan de norm:
Het aantal kilometers dijkvak dat niet voldoet aan de norm en dat nog niet op het lopende dijkversterkingsprogramma staat.

Geen gegevens:
De primaire keringen die nog niet zijn beoordeeld en die niet in het HoogWaterBeschermingsProgramma staan. Deze gegevens worden dagelijks bijgewerkt. Hiervan kunnen al wel projecten zijn aangemeld bij het HoogWaterBeschermingsProgramma. Het doel is om in 2023 alle primaire waterkeringen in Nederland beoordeeld te hebben. (Rijkswaterstaat, 2020)

In onderstaand figuur is de veiligheidsopgave van de dijken in Nederland weergegeven. In Bijlage IV – Veiligheidsopgave Nederland kaart (2020) is de kaart van Nederland weergegeven met daarin de veiligheidsopgave in 2020.



Figuur 7. Veiligheidsopgave van de dijken in Nederland. (Rijkswaterstaat, 2020)

3.3 Veiligheidsoordeel

De dijktrajecten worden aan de hand van het Wettelijk Beoordelingscriterium 2017 (WBI2017) beoordeeld. De waterkeringsbeheerders gaan aan de hand van de WBI2017 de waterstaatkundige toestand van de primaire waterkeringen beoordelen. Het veiligheidsoordeel van een dijktraject wordt uitgedrukt in 5 categorieën gerelateerd aan de afstand tot de norm behorende bij het dijktraject. Deze categorieën zijn in onderstaand figuur beschreven.

Cat.	Aanduiding categorie veiligheidsoordeel	Begrenzing categorie *
A+	Overstromingskans van het dijktraject is veel kleiner dan de signaleringswaarde. *Dijktraject voldoet ruim aan de signaleringswaarde*	$P_{traject} < 1/30 * P_{eis;sig}$
A	Overstromingskans van het dijktraject is kleiner dan de signaleringswaarde. *Dijktraject voldoet aan de signaleringswaarde.*	$1/30 * P_{eis;sig} < P_{traject} < P_{eis;sig}$
B	Overstromingskans van het dijktraject is groter dan de signaleringswaarde, maar kleiner dan ondergrens. *Dijktraject voldoet aan de ondergrens, maar niet aan de signaleringswaarde.*	$P_{eis;sig} < P_{traject} < P_{eis;ond}$
C	Overstromingskans van het dijktraject is groter dan de signaleringswaarde en de ondergrens. *Dijktraject voldoet niet aan de signaleringswaarde en ook niet aan de ondergrens*	$P_{eis;ond} < P_{traject} < 30 * P_{eis;ond}$
D	Overstromingskans het dijktraject is veel groter dan de signaleringswaarde en de ondergrens. *Dijktraject voldoet ruim niet aan de signaleringswaarde en aan de ondergrens.*	$P_{traject} > 30 * P_{eis;ond}$

* $P_{traject}$ Overstromingskans van het dijktraject (1/jaar)
$P_{eis;sig}$ Signaleringswaarde van het dijktraject (1/jaar)
$P_{eis;ond}$ Ondergrens van het dijktraject (1/jaar)

Figuur 8. Categorieën van veiligheidsoordelen conform WBI2017. (Steenbergen, 2017)

De wijze van beoordelen is vastgesteld in de regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. (Minister van Infrastructuur en Millieu, 2017) In deze regeling is aangegeven waar een beoordeling aan moet voldoen, welke stappen er zijn, wat de rekenregels zijn en welke mogelijkheden er zijn om gebruik te maken van algemene filters om de boordeling sneller te doorlopen.

3.4 Voorbeelden

3.4.1 Grebbedijk (traject 45-1)

De Grebbedijk is een 5,35 km lange dijk, die wordt beheerd door het waterschap Vallei en Veluwe. De Grebbedijk beschermt de Gelderse Vallei tegen overstromingen vanuit de Nederrijn en verbindt de hoge gronden van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug. De Grebbedijk ligt deels in stedelijk gebied (Wageningen) en deels in landelijk gebied (Wageningen/Rhenen). In de Waterwet is de veiligheidsnorm van de Grebbedijk vastgesteld, de Grebbedijk heeft een signaleringswaarde van 1:100000 per jaar en een ondergrens van 1:30000 per jaar.

De Grebbedijk heeft aan de hand van de WBI2017 een veiligheidsoordeel D gekregen (zie paragraaf 3.3) Dit betekent dat de overstromingskans van het dijktraject veel groter is dan de signaleringswaarde en de ondergrens. Om deze reden wordt de Grebbedijk dan ook versterkt. In 2019 is er gestart met de verkenningsfase van de versterking van deze dijk. Dit zal in 2020 afgerond worden. In 2021 tot 2023 zal de planstudie van de versterking plaatsvinden en in 2024 tot 2025 zal de realisatiefase plaatsvinden. Naar verwachting zal de dijk in 2025 weer voldoen aan de veiligheidsnorm. (Steenbergen, 2017)

3.4.2. De Sterke Lekdijk (traject 15-1)

De Lekdijk is een 23,03 km lange dijk, die in bezit is van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. De Lekdijk beschermt een groot deel van Centraal Holland tegen overstromingen. In de waterwet is de veiligheidsnorm van de Lekdijk vastgesteld, de Lekdijk heeft een signaleringswaarde van 1:30000 per jaar en een ondergrens van 1:10000 per jaar. (ter Horst, Lokin, Duits, van Montfoort, & Delhez, 2018)

De Lekdijk is aan de hand van WBI2017 beoordeeld, hieruit heeft de Lekdijk veiligheidsoordeel D gekregen. Dit betekent dat de overstromingskans van het dijktraject veel groter is dan de signaleringswaarde en de ondergrens. Om deze reden wordt de Lekdijk dan ook versterkt. Omdat de Lekdijk 23,03 km lang is wordt

het traject voor de versterking onderverdeeld in zes deeltrajecten. Deze deeltrajecten zijn in Figuur 9 weergegeven.

Traject 1: Wijk bij Duurstede – Amerongen
Traject 2: Salmsteke
Traject 3: Culenmborgse Veer – Beatrixsluis
Traject 4: Salmsteke – Schoonhoven
Traject 5: Jaarsveld – Vreeswijk
Traject 6: Irenesluis – Culemborgeveer

Traject 1 en 2 zijn in 2017 gestart met de verkenningsfase en zullen in 2020 starten met de planstudie. De andere trajecten zullen vanaf 2019 volgen. Naar verwachting zal de gehele dijk in 2029 weer voldoen aan de veiligheidsnorm. (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, 2019)

Figuur 9. Deeltrajecten Lekdijk. (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, 2019)

4. Dijkversterkingsoplossingen

Dit hoofdstuk focust zich op verschillende dijkversterkingsoplossingen, welke bestaat uit de paragrafen: dijkversterking in de grond en constructieve dijkversterking.

Wanneer een dijk niet langer aan de veiligheidsnorm voldoet (zie hoofdstuk 3) zal de dijk versterkt moeten worden om zo de veiligheid van de dijk te verhogen. Er zijn veel verschillende oplossingen waar gebruik van gemaakt kan worden en de lijst met oplossingen zal alleen nog maar uitgebreid worden met innovatieve ideeën. In dit hoofdstuk worden dijkversterkingsoplossingen besproken die op dit moment veel toegepast worden bij rivierdijken. Tussen de dijkversterkingsoplossingen is onderscheidt te maken in "*dijkversterking in de grond"* en *"constructieve dijkversterking".*

4.1 Dijkversterking in de grond

Dijkversterking in de grond is een versterking van grond. Deze grond kan uit eigen gebied komen of aangevoerd worden vanuit een andere locatie. Hieronder worden een aantal veel gebruikte voorbeelden van dijkversterkingen in de grond beschreven:

4.1.1 Binnendijkse verzwaring

Hierbij wordt de dijk aan de binnen zijde (landzijde) verzwaard. Dit wordt toegepast indien het buitentalud is voorzien van een goede glooiingsconstructie die behouden dient te blijven. Dit is een erg dure oplossing. (Rijksoverheid, 2018) (Sanders, 2013)

Risico's :
- Buitendijkse huizen ondervinden waterbezwaar.
- Bebouwing en landschap gaan verloren.
- Omliggend terrein, bebouwing, wegen en waterlopen.
Maatregelen:
- Herbouw (maar maakt het erg duur).
- Onteigenen of aankoop van terrein en gebouwen, omlegging van wegen en waterlopen

4.1.2 Buitendijkse verzwaring

Hierbij wordt de dijk aan de buiten zijde (rivierzijde) verzwaard. Dit wordt toegepast als op het buitenbeloop geen, of een onvoldoende sterke bekleding aanwezig is. (Sanders, 2013) (Rijksoverheid, 2018)

Risico's :
- Profielvernauwing leidt tot hogere waterafvoeren.
- Hogewaterstanden bij dijken die direct aan open water liggen.
Maatregelen:
- Een keermuur toepassen om de bestaande bebouwing heen.
- Het 'nieuwe' dijklichaamontwerp optimaliseren in de keuze van kruinhoogte en de helling en verdediging van het buitenbeloop.

4.1.3 Vierkante verzwaring

Bij een vierkante verzwaring worden beide kanten van de dijk verzwaard.
Risico's :
- Extra zetting met gevaar voor de fundering vanwege grondophoging
Maatregelen:
- Monitoren omliggende bebouwing.

4.1.4 Dijkverhoging

Hierbij wordt de dijk opgehoogd met zand. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018) (Ruimtevoorderivier, sd)

Risico's :

- Zetting

- Te slappe ondergrond waardoor de dijk instabiel is.

Maatregelen:

- Zettingsberekeningen uitvoeren en sonderingen maken.

Figuur 10. Verhoging van een dijk. (Ruimte voor de Rivier, 2017)

4.1.5 Dijkverlegging

Dijkverlegging kan zowel buitendijks als binnendijks plaatsvinden. Hierbij wordt de dijk naar binnen (richting land) of naar buiten (richting rivier) verlegt. Door de dijk naar binnen te verleggen ontstaat meer ruimte voor de rivier. (Sanders, 2013) (Ruimtevoorderivier, sd)

Risico's :

- Bij binnendijkse verlegging kan de bebouwing wateroverlast onder vinden.

Maatregelen:

- Monitoren van de omliggende omgeving.

Figuur 11. Een dijkverlegging. (Rijkswaterstaat, 2017)

4.1.6 Grindkoffer

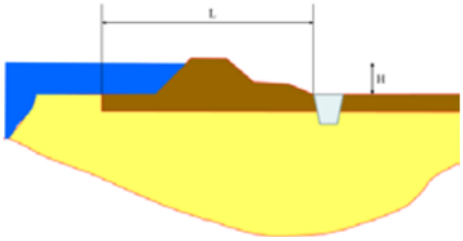
Een grindkoffer is een kuil met worteldoek, gevuld met grind waar regenwater de tijd krijgt om langzaam in de bodem opgenomen te worden, dus zonder dat de bodem dichtslibt. Grindkoffers voorkomen verdroging van de grond. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018) (Vree, Grindkoffer, 2018)

Risico's :

- Klei en veenlagen waardoor het water niet de grond in kan lopen.

Maatregelen:

- Ontgraven en aanvullen met zand.



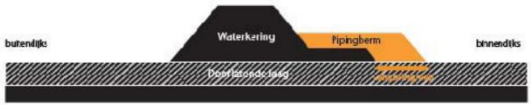
Figuur 12. Een Grindkoffer. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018)

Materialen:

Grindkoffers worden gemaakt van grind en polypropyleen weefsel (worteldoek).

4.1.7 Pipingberm

Een pipingberm voorkomt opdrijven / opbarsten door het vergroten van de kwelweg, en gaat dus piping tegen. Indien de berm van zand gemaakt wordt zal door de filterwerking van de berm uitspoeling van zand voorkomen worden. (Deltares, 2017) (Wikipedia, 2020)



Figuur 13. Een pipingberm. (Waterschap Vallei en Veluwe, 2014)

Risico's :

- Bebouwing of natuurwaarde op de berm locatie.

Maatregelen:

- Indien mogelijk bebouwing en natuur verplaatsen.

4.1.8 Steunberm

Een steunberm wordt aangelegd op het maaiveld van de binnenteen om voldoende tegendruk te geven. De berm wordt gemaakt van waterdoorlatend materiaal (zand) om er voor te zorgen dat eventueel opgesloten water uit de dijk kan stromen. (Deltares, 2012)

Risico's :

- Afschuiven of wegzakken door aanwezigheid slappe lage. (klei en veen)

- Bebouwing of natuurwaarde op de berm locatie.

Maatregelen:

- Geotextiel op het maaiveld aanbrengen.

- Indien mogelijk bebouwing en natuur verplaatsen.

Figuur 14. Een steunberm. (HHNK, 2013)

4.1.9 Taludverflauwing

Het talud van de berm wordt verflauwd door middel van het aanbrengen van grond. Hierdoor komt de teen van de dijk verder het land in te liggen. (Deltares, 2019)

Risico's :

- Bebouwing of natuurwaarde op de berm locatie.

Maatregelen:

- Indien mogelijk bebouwing en natuur verplaatsen.

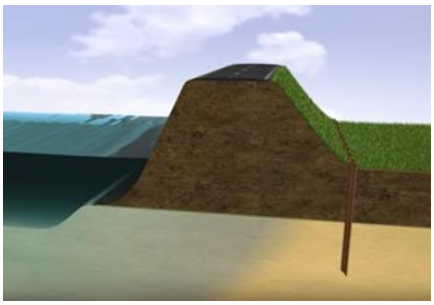
Figuur 15. Taludverflauwing van een dijk. (Adapt, 2019)

4.2 Constructieve dijkversterking

Een constructieve dijkversterking is een versterking met een ander materiaal dan grond. Hierbij worden elementen of stoffen in de grond gebracht, die krachten en/of momenten kunnen opnemen en/of de grondwaterstromen kunnen beïnvloeden. Hieronder worden een aantal veel gebruikte voorbeelden van constructieve dijkversterkingen beschreven.

4.2.1 Damwanden

Een damwand is een grond en/of waterkerende constructie, die bestaat uit een verticaal geplaatste wand. De wand bestaat uit losse elementen die door middel van een gronddichte (en soms waterdichte) messing-en-groefverbinding met elkaar zijn verbonden. Een damwand kan van verschillende materialen gemaakt worden namelijk: hout, staal, beton of kunststof. De keuze hierin is afhankelijk van de functionele, constructieve, esthetische en financiële overwegingen. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018) (Wikipedia, 2019)



Figuur 16. Damwand in een dijk. (Rivierenland, 2015)

Risico's :

- Trillingen door heien of trillen.
- Voldoende werkbreedte nodig onder andere in verband met de tijdelijke sleuf.

Maatregelen:

- Trillingen beperken met een hoogfrequent heiblok met een variabel moment of door damwanden te drukken.

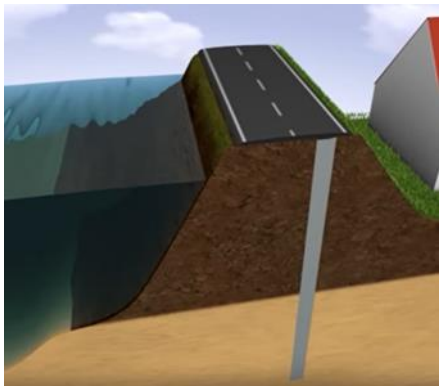
- De omvang van de sleuf kan beperkt worden door toepassing van steile taluds, mits de uitvoeringsstabiliteit wordt gewaarborgd.

Materialen:

Damwanden kunnen gemaakt worden van staal, beton, hout en kunststof.

4.2.2 Diepwanden

Een diepwand is een in de grond gevormde gewapend betonnen dikke wand die uit segmenten (panelen) bestaat. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018) (Vree, Diepwand, 2019)



Figuur 17. Diepwand in een dijk (rivierenland, 2015)

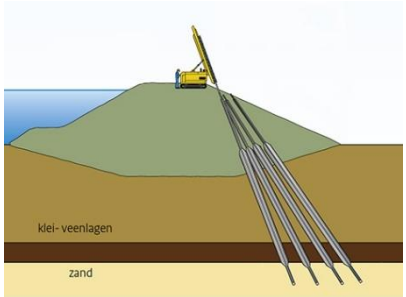
Risico's :
- Geluid- en trillinghinder.
- Verlies van steunvloeistof door zeer doorlatende lagen of via oude leidingen.
- Zakking van nabij gelegen gebouwen die op staal gefundeerd zijn, door geringe grondvervorming.

Maatregelen:
- *Voorbereiden door middel van klic melding en sonderingen.*
- *Controleren van de funderingen van nabij gelegen gebouwen en monitoren van de gebouwen.*

Materialen:
Diepwanden worden gemaakt van in het werk gestort beton, met een wapening van betonstaal.

4.2.3 Dijkdeuvel

Dijkdeuvels zijn zware stalen deuvelstangen (ankerstangen) omhuld met grout die door het afschuifvlak van een dijk gestoken worden tot in de draagkrachtige laag. Vergroot de macrostabiliteit. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018)



Figuur 18. Een dijkheuvel. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018)

Risico's :
- *Grondvervorming door verdringing van de grond en door groutinfiltratie.*

Materialen:
- *Dijkheuvels bestaan uit ankerstangen omhuld met grout.*

4.2.4 Keermuur (Keerwand)

Een keerwand is een muur die de druk van een hoger gelegen bodem of van het water kan weerstaan. Keerwanden zijn dus constructies die het niveau verschil in het maaiveld op vangen. Een keerwand kan bestaan uit een prefab betonnen T of L model of uit een stalen damwand. Een keerwand heeft relatief weinig ruimte nodig. (Sanders, 2013) (Vree, Keermuur, Keerwand, Grondkering, 2019)

Figuur 19. Een L-vormige keermuur (keerwand). (Vree, Keermuur, keerwand, grondkering, 2019)

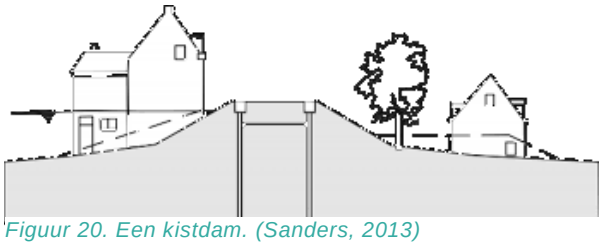
Risico's :
-

Maatregelen:
-

Materialen:
Keermuren (keerwanden) kunnen gemaakt worden van stalen damwanden of van een beton in een T of L profiel.

4.2.5 Kistdam

Een kistdam bestaat uit een tweetal damwanden op een zodanige afstand dat ze elkaar beïnvloeden. Hierbij dient de grond tussen de damwanden voldoende stijf te zijn. De damwanden worden door midden van ankers met elkaar verbonden tot een constructie. (Sanders, 2013) (Rijksoverheid, 2018)

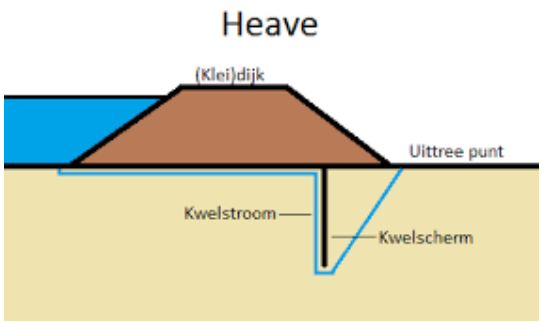


Figuur 20. Een kistdam. (Sanders, 2013)

Risico's :
- Kantelen van de kistdam, dit doet zich voor als de som van de aandrijvende momenten groter is dan de weerstand biedende momenten ten opzichte van een punt onder of in de kistdamvulling.
- Ankerbreuk
Materialen:
Kistdammen bestaan uit twee stalen damwanden die verbonden worden met ankers.

4.2.6 Kwelscherm

Kwelschermen zijn schermen die worden toegepast bij het watertechnisch afdichten van dijken. Een kwelscherm is een ondoorlatende, verticale constructie voor het stoppen of verlengen van de kwelweg. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018) (Rijksoverheid, 2018)



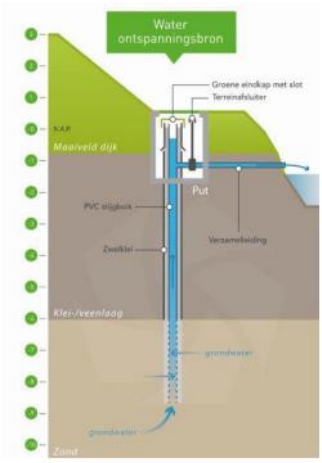
Figuur 21. Een kwelscherm. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018)

Risico's :
- Grondwaterstandsveranderingen
- Zwaar installatie materiaal
Maatregelen:
- Bronbemalingen
- Boven belasting verspreiden over groot oppervlak door bijvoorbeeld draglineschotten.
Materialen:
Een kwelscherm is meestal een stalen damwand maar kan ook van Cement-Betonniet gemaakt worden.

4.2.7 Waterontspanners

Waterontspanners versterken de dijk door verticale buizen in de grond aan de binnenzijde van de dijk. Zij verminderen de waterdruk in de grond en voorkomen daarmee afschuivingen. (Rijkers, 2020) (Feddes/Olthof Landschaparchitecten, 2015)

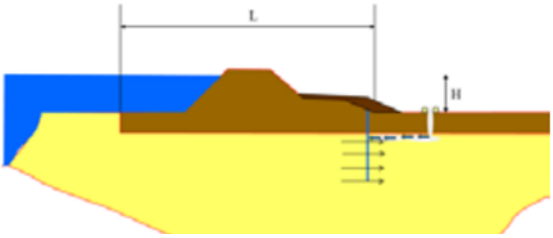
Materialen:
Een waterontspanner bestaat uit een verticale PVC buis met in de onderzijde perforaties en een grindpakket.



Figuur 22. Doorsnede van De waterontspanningsbron. (Movares, Heijmans, de Vries & van de Wiel, 2015)

4.2.8 Zanddicht geotextiel

Zanddicht geotextiel wordt verticaal in de grond geïnstalleerd en wordt gebruikt om piping tegen te gaan. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018)
Risico's :
- Scheuren van geotextiel.
Materialen:
-Zanddicht geotextiel wordt gemaakt van polyethyleen weefsel.



Figuur 23. Verticaal zanddicht geotextiel. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018)

4.2.9 Granulaire kolommen

Granulaire kolommen zijn in de grond gevormde kolommen van grind of zand. Hierdoor neemt het weerstand biedend moment van de glijcirkel toe, waardoor de macrostabiliteit vergroot. (Halter, Groenouwe, & Tonneijck, 2018) (Vree, Zandpaal, 2018)

Risico's :

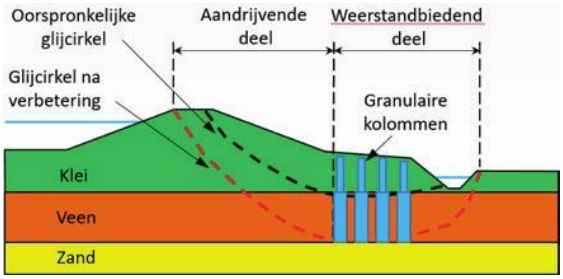
- Kwel

Maatregelen:

- Kolommen ommantelen met geotextiel.

Materialen:

Granulaire kolommen zijn in het werk gestorte betonnen kolommen gevuld met zand of grind.



Figuur 24. Granulaire kolommen van zand of grind. (Koopmans, 2018)

Methodologie

DuboCalc

Het MKI bouwstenen model

Circulariteit in het MKI bouwstenen model

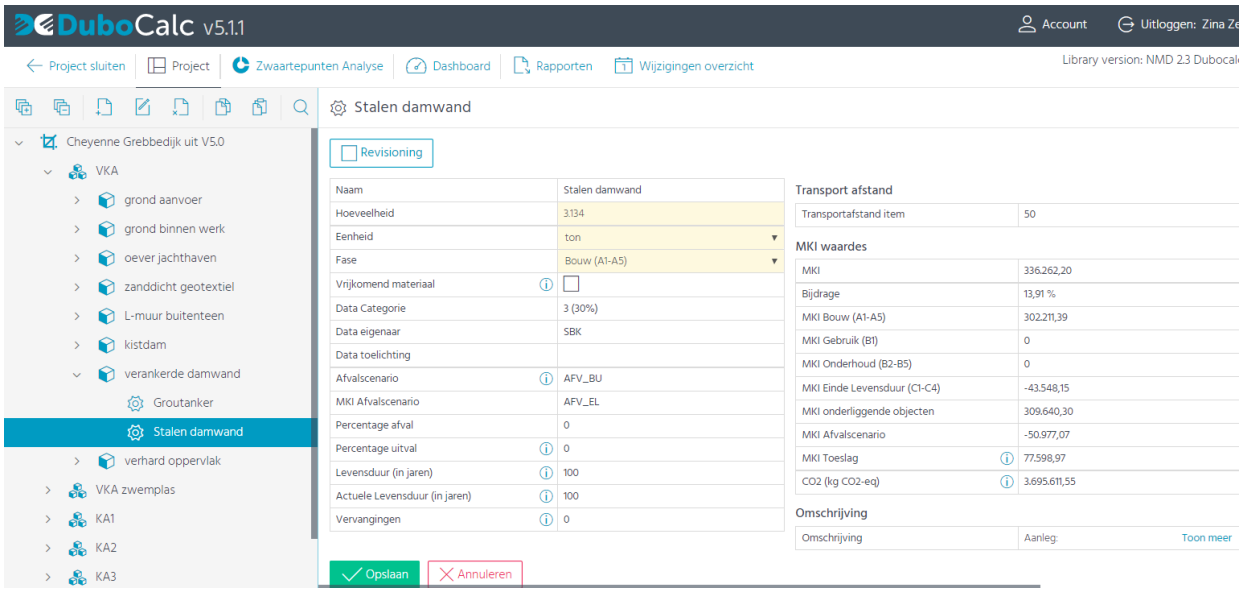
5. DuboCalc

Dit hoofdstuk focust op het programma Dubocalc, in dit hoofdstuk zal dit programma toegelicht worden en zullen de voor en nadelen van dit programma benoemd worden.

DuboCalc staat voor Duurzaam Bouwen Calculator en is een softwaretool ontwikkeld in opdracht van Rijkswaterstaat om de duurzaamheid en milieukosten van ontwerpvarianten te berekenen en te vergelijken. DuboCalc berekent alle effecten van materiaal- en energieverbruik van de winning tot aan de sloop- en hergebruikfase. Het resultaat van de berekening wordt uitgedrukt in euro's, de Milieukostenindicator (MKI). Dit zijn verborgen milieukosten, ofwel fictieve kosten om de schade aan het milieu te herstellen voor verschillende aspecten, zoals klimaatverandering. De methode is gebaseerd op de rekenmethodiek van Levenscyclusanalyse (LCA). (Dubocalc, 2019)

Rijkswaterstaat gebruikt de MKI-waarde als kwaliteitscriterium bij aanbestedingen volgens de methodiek van de Beste Prijs/kwaliteitverhouding. Aanbiedingen met een lage MKI-waarde scoren dan beter. Hoe lager de MKI waarde, hoe duurzamer een ontwerp is. Een lagere MKI-waarde betekent vaak ook een CO_2-reductie. (Rijkswaterstaat, 2019)

Het gebruik van Dubocalc is eenvoudig. Er wordt een project aangemaakt en vervolgens kunnen er in de bibliotheek items geselecteerd worden. De items, bijvoorbeeld "stalen damwand" of "groutanker" zijn gekoppeld aan basisgegevens over de milieueffecten van deze materialen. Deze gegevens worden geïmporteerd uit de Nationale Milieudatabase. Op onderstaande afbeeldingen zijn weergaven van het programma gegeven. In deze afbeeldingen zijn de verschillende varianten van de Grebbedijk berekend. Een uitgebreide beschrijving van de verschillende varianten die ontworpen zijn voor de Grebbedijk is terug te vinden in Bijlage V.



Figuur 25. Overzicht DuboCalc v5.1.1.

	Type	Naam	Hoeveelheid	Eenheid	Fase	MKI	Bijdrage %
		Staal GWW (gemiddeld)	1	ton	Bouw	67,53	68,35
		Heistelling.mob.rups.500-800kN	0,4211	h	Bouw	7,33	7,42
		Aggregaat hydraulisch 200-500 kW	0,4211	h	Bouw	14,55	14,73
		Heiblok tril elektr. (gemiddeld, per vermogen)	0,3759	h	EindeLevensduur	0,02	0,02
		Hydr.heihamer slagen. 50-200 kNm	0,4211	h	Bouw	2,83	2,87
		Kraan hydr.tele. band (gemiddeld)	0,4211	h	Bouw	2,63	2,67
		Dragline	0,3759	h	EindeLevensduur	2,35	2,38
		Transport staal	1	tonkm	Bouw	1,55	1,57

Figuur 26. Materialen en processen bij een stalen damwand.

In Figuur 25 is een overzicht weergegeven van DuboCalc versie 5.1.1. Aan de linkerkant van het figuur zijn de verschillende varianten voor het project weergegeven. Hieronder worden de verschillende dijkversterking toepassingen toegevoegd met hierbij de materialen waar deze uit bestaat. Zo wordt er in het Voorkeursalternatief (VKA) een verankerde damwand geplaatst. Deze verankerde damwand bestaat uit een stalen damwand met groutankers. Aan de rechterkant van het figuur is de MKI berekening van een stalen damwand weergegeven. De gegevens aangegeven in een geel vak dienen ingevoerd te worden. Zo is er voor het voorkeursalternatief van de Grebbedijk 3.134 ton stalen damwand nodig. Daarnaast wordt er ook aangegeven welke materialen en processen er gebruikt worden bij bijvoorbeeld een stalen damwand. Dit is in Figuur 26 weergegeven. Na het invoeren van alle varianten kunnen deze met elkaar vergeleken worden.

Figuur 27. Vergelijking MKI waarde varianten Grebbedijk.

In Figuur 27 is de vergelijking van de verschillende varianten weergegeven. Hierin is duidelijk te zien dat variant kans alternatief 2 (KA2) de laagste MKI-waarde heeft, deze variant is dan ook de meest duurzame variant.

Een nadeel van berekeningen met Dubocalc is dat de berekeningen arbeidsintensief en foutgevoelig zijn door grote hoeveelheden invoer. De totale MKI wordt getoond voor grote materiaal hoeveelheden waardoor maat en schaal moeilijk in te schatten zijn. Daarnaast zijn de mogelijke materialen die toegevoegd kunnen worden beperkt, zo kan het voorkomen dat materialen niet in de bibliotheek van DuboCalc aanwezig zijn. De controle van de ingevoerde hoeveelheden in m^3 of ton zijn ook niet eenvoudig omdat niet te traceren is waar die hoeveelheden op zijn gebaseerd.

6. Het MKI bouwstenen model

Dit hoofdstuk focust op het ontworpen model. In dit hoofdstuk wordt het model beschreven en worden de voordelen ten opzichte van DuboCalc beschreven.

Het ontworpen model voor berekening van de MKI van bouwstenen is een Excel model. De waardes die nodig zijn om de MKI-waarde te berekenen zijn gebaseerd op het programma DuboCalc 5.1 en de onderliggende Nationale milieudatabase. Lievense | WSP hoopt met de ontwikkeling van het MKI bouwstenen model een eenvoudig ontwerphulpmiddel te krijgen voor haar technisch adviseurs. In eerste instantie is het modeld bedoeld voor intern gebruik binnen Lievense | WSP.

Het model is opgebouwd uit 5 onderdelen: de intro, de samenvatting in grafieken, de input, de numerieke output en de MKI gegevens. Daarnaast zijn er in het model 3 verborgen onderdelen die gebruikt worden voor de berekening.

6.1 De Intro

De introductie beschrijft de aanleiding van het MKI bouwstenen model en legt daarbij uit wat de verschillen tussen DuboCalc en het MKI bouwstenen model zijn.

Vervolgens wordt de werkwijze van het model beschreven. Zo wordt voor elk tabblad in het Excel bestand uitgelegd hoe het werkt, wat er weergegeven wordt en welke gegevens ingevuld dienen te worden.

6.2 De input

De input is het tabblad waar ingevuld wordt welke bouwstenen van toepassing zijn en welke hoeveelheden en afmetingen deze bouwstenen hebben. Een bouwsteen is een functioneel samenhangend pakket van materialen en producten. zoals een damwand, asfaltweg of grond voor een dijkversterking. In het model zijn de bouwstenen verdeeld in drie groepen:

1. **Grond oplossingen**
   Deze groep bestaat uit de volgende bouwstenen:
   - Grondoplossingen binnendijks
   - Grondoplossingen buitendijks
   - Grondoplossingen kruin
2. **Verhard oppervlak**
3. **Constructies**
   Deze groep bestaat uit de volgende bouwstenen:
   - Verankerde damwand
   - Kistdam
   - Diepwand
   - Betonnen keermuur
   - Geotextiel
   - Harde verholen bekleding
   - Harde verholen constructie
   - Grindkoffer

Bij elke bouwsteen kan er een keuze gemaakt worden tussen verschillende materialen. Een materiaal wordt geselecteerd door middel van een pull down menu. Na de materiaal selectie volgt er in de naastgelegen cel een materiaalcode. Deze code is gekoppeld aan een materiaal en wordt gebruikt in de berekening.

In het standaard model kunnen bouwstenen voor 15 dijkvakken ingevoerd worden. Dit kan eenvoudig uitgebreid worden naar meer dijkvakken door de kolommen van een dijkvak te kopiëren en deze achter dijkvak 15 te plakken.

In Figuur 28 is een deel van het Input tabblad weergegeven.

Grondoplossingen Kruin														
	Laag 1:	Klei	G.5	Geen	G.7	Geen	G.7	Werk met werk maken: z	G.6	Grond (per schip)	G.2	Landzand (per as)	G.4
	Hoeveelheid (m3)	85		0		0		23		67		14	
	Transport afstand (km)	50	T.5	0	T.7	0	T.7	50	T.6	50	T.2	0,1	T.4
	Laag 2:	Grond (per as)	G.1	Klei	G.5	Klei	G.5	Geen	G.7	Geen	G.7	Geen	G.7
	Hoeveelheid (m3)	10		49		0		0		0		0	
	Transport afstand (km)	0,1	T.1	0,1	T.5	0	T.5	0	T.7	0	T.7	0	T.7
	Laag 3:	Geen	G.7	Landzand (per as)	G.4	Geen	G.7	Geen	G.7	Geen	G.7	Geen	G.7
	Hoeveelheid (m3)	0		13		0		0		0		0	
	Transport afstand (km)	0	T.7	50	T.4	0	T.7	0	T.7	0	T.7	0	T.7
Verhard oppervlak													
	Laag 1:	Asfalt (STAB) 50% recy	VO.1	Asfalt (STAB) 50% recy	VO.1	Asfalt (STAB) 50% recy	VO.1	Asfalt (STAB) 50% recy	VO.1	Geen	VO.6	Asfalt (STAB) 50% recy	VO.1
	Breedte oppervlak (m)	5		5		5		5		5		5	
	Dikte laag (m)	0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2	
	Laag 2:	Menggranulaat 200 mm	G.11	Menggranulaat 200 mm	G.11	Menggranulaat 200 mm	G.11	Menggranulaat 200 mm	G.11	Geen	G.7	Menggranulaat 200 mm	G.11
	Hoeveelheid (m3)	0,3		0,3		0,3		0,3		0		0,3	
	Transport afstand (km)	50		50		50		50		0	T.7	50	
	Laag 3:	Werk met werk maken: z	G.6	Werk met werk maken: z	G.6	Werk met werk maken: z	G.6	Werk met werk maken: z	G.6	Geen	G.7	Werk met werk maken: z	G.6
	Hoeveelheid (m3)	1		1		1		1		0		1	
	Transport afstand (km)	0,1	T.6	0,1	T.6	0,1	T.6	0,1	T.6	0	T.7	0,1	T.6
Constructies													
Verankerde Damwand													
	Foutmarge (%)												
	Damwand type:	Stalen damwand	C.5	Geen	C.10	Geen	C.10	Kunststof Damwand	C.6	Geen	C.10	Stalen damwand	C.5
	Lengte damwand (m)	18		0		0		18		0		18	
	Gewicht (kg/m2)	157,2		0		0		90		0		157,2	
	Anker type:	Groutankers	C.1	Geen	C.2	Geen	C.2	Groutankers	C.1	Geen	C.2	Groutankers	C.1
	h.o.h afstand (m)	2,8		0		0		2,8		0		2,8	
	Gewicht (ton)	1,6		0		0		1,6		0		1,6	
Kistdam													
	Foutmarge (%)												
	Damwand type:	Geen	C.10	Stalen damwand	C.5	Geen	C.10	Geen	C.10	Stalen damwand	C.5	Geen	C.10
	Lengte damwand (m)	0		18		0		0		18		0	
	Gewicht (kg/m2)	0		146,9		0		0		146,9		0	
	Anker type:	Geen	C.2	Groutankers	C.1	Geen	C.2	Geen	C.2	Groutankers	C.1	Geen	C.2
	h.o.h afstand (m)	0		2,8		0		0		2,8		0	
	Gewicht (ton)	0		1,6		0		0		1,6		0	

Figuur 28. Voorbeeld van het Input tabblad uit het MKI bouwstenen model.

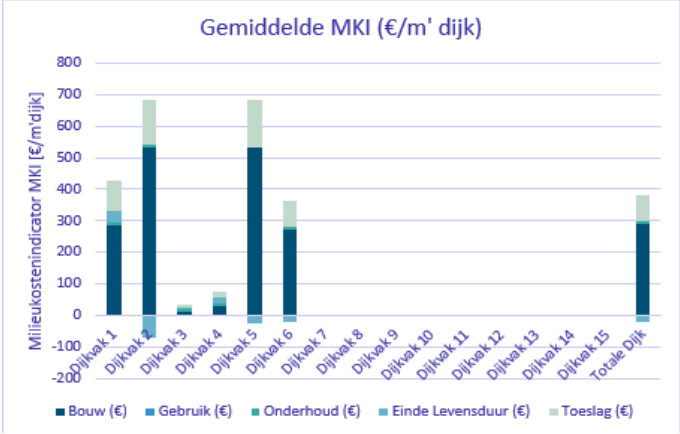
6.3 Numerieke Output

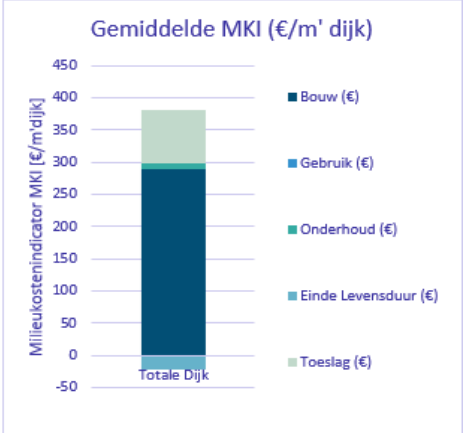
Op het tabblad numerieke output worden de resultaten van het model weergegeven. Op dit tabblad worden de onderstaande resultaten weergegeven, deze resultaten worden weergegeven door middel van getallen en door middel van grafieken.

- Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Welke fase heeft veel invloed op de MKI van een profiel?* Ook geeft deze grafiek inzicht in de effecten van circulaire maatregelen.

Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk

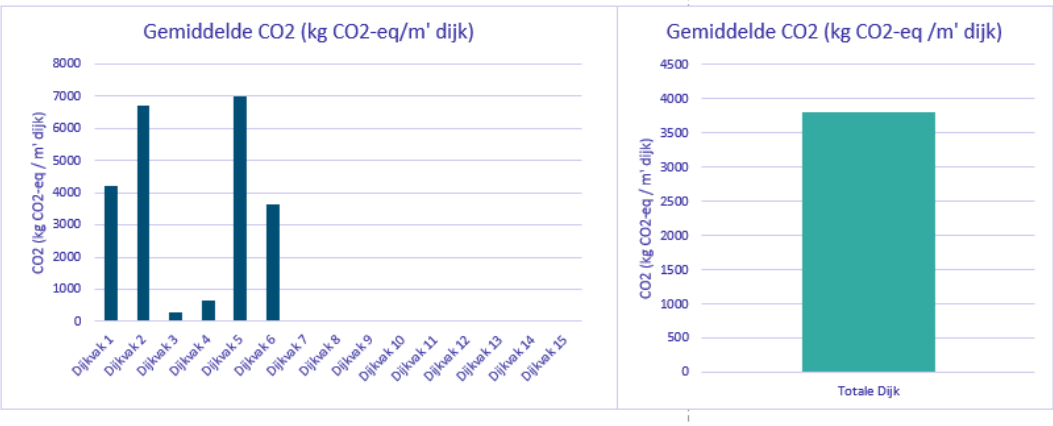
	Bouw (€)	Gebruik (€)	Onderhoud (€)	Einde Levensduur (€)	Toeslag (€)	Totaal (€)	C02 (kg CO2-eq)
Dijkvak 1	285	0	9	35	99	428	4222
Dijkvak 2	532	0	9	-70	141	613	6692
Dijkvak 3	12	0	9	3	7	32	287
Dijkvak 4	29	0	9	19	17	74	670
Dijkvak 5	533	0	0	-26	152	659	7003
Dijkvak 6	273	0	9	-22	78	339	3634
Dijkvak 7	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 8	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 9	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 10	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 11	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 12	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 13	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 14	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 15	0	0	0	0	0	0	0
Totale Dijk	289	0	9	-22	83	358	3812





Figuur 29. Voorbeeld van gemiddelde MKI per m' dijk resultaten.

- Gemiddelde CO2-uitstoot per strekkende meter dijk
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Welk profiel heeft verhoudingsgewijs veel invloed op de CO2 uitstoot?*

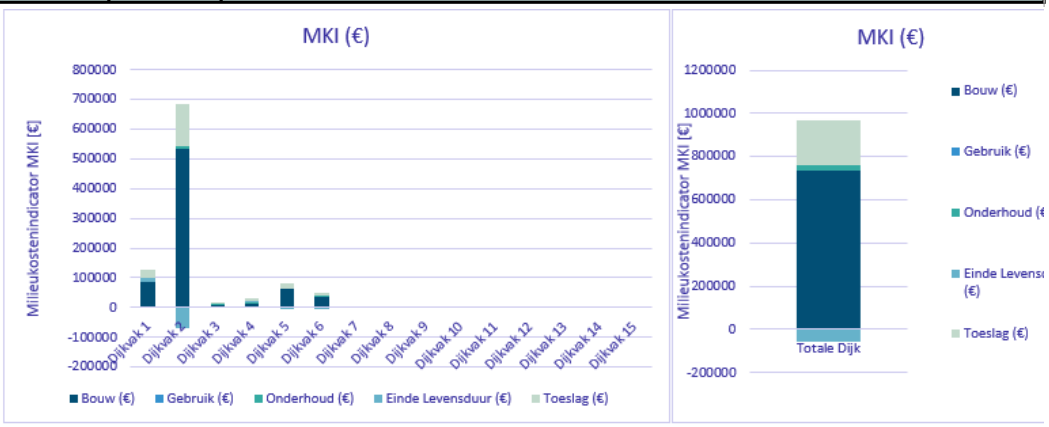


Figuur 30. Voorbeeld van gemiddelde CO2 per m' dijk resultaten.

- MKI per dijkvak per fase
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Welke fase heeft veel invloed op de totale MKI?* Ook geeft deze grafiek inzicht in de effecten van de circulaire maatregelen.

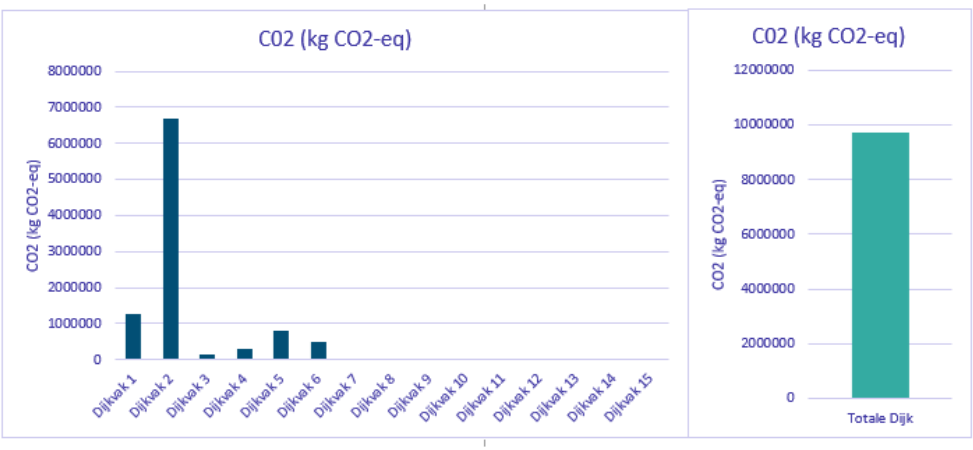
MKI per dijkvak per fase

	Lengte dijkvak (m)	Bouw (€)	Gebruik (€)	Onderhoud (€)	Einde Levensduur (€)	Toeslag (€)	Totaal (€)	CO2 (kg CO2-eq)
Dijkvak 1	300	85393	0	2834	10479	29595	128300	1266668
Dijkvak 2	1000	532305	0	9445	-70219	141461	612992	6691592
Dijkvak 3	573	7001	0	5412	1656	4221	18290	164645
Dijkvak 4	423	12176	0	3995	7910	7175	31256	283555
Dijkvak 5	116	61807	0	0	-2962	17653	76498	812302
Dijkvak 6	138	37713	0	1303	-3057	10799	46759	501466
Dijkvak 7	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 8	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 9	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 10	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 11	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 12	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 13	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 14	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 15	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale Dijk	2550	736397	0	22989	-56193	210904	914097	9720228



Figuur 31. Voorbeeld van MKI per dijkvak per fase.

- CO2 per dijkvak
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Welk profiel heeft veel invloed op de CO2 uitstoot?*



Figuur 32. Voorbeeld van CO2 per dijkvak.

- **MKI per bouwsteen**
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Welke bouwsteen draagt sterk bij aan de totaalscore?*

MKI per bouwsteen (€)

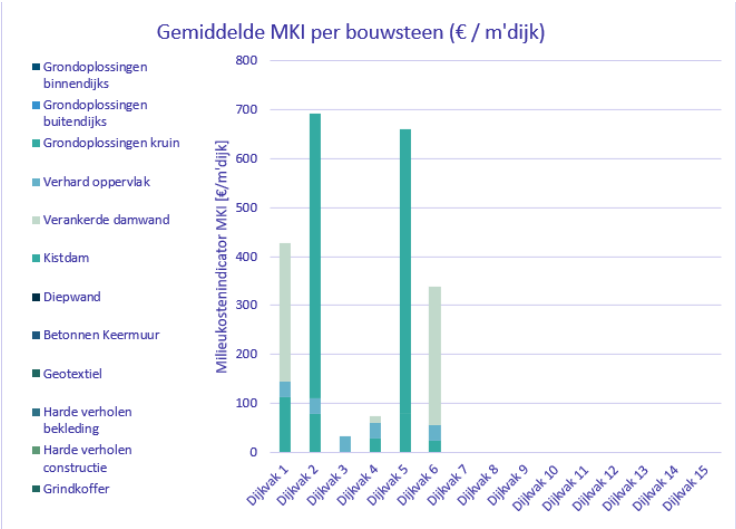
	Grondoplossingen			Verhard oppervlak	Constructies							
	Grondoplossingen binnendijks	Grondoplossingen buitendijks	Grondoplossingen kruin	Verhard oppervlak	Verankerde damwand	Kistdam	Diepwand	Betonnen Keermuur	Geotextiel	Harde verholen bekleding	Harde verholen constructie	Grindkoffer
Dijkvak 1	0	0	33664	9576	85061	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 2	0	0	0	31920	0	581072	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 3	0	0	0	18290	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 4	0	0	11968	13502	5787	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 5	0	0	9094	0	0	67404	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 6	0	0	3226	4405	39128	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale Dijk	0	0	57951	77693	129975	648477	0	0	0	0	0	0

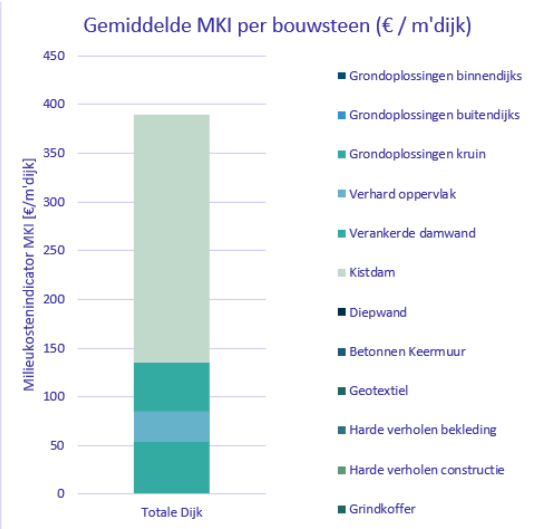
Figuur 33. Voorbeeld van MKI per bouwstenen..

- MKI per bouwsteen per strekkende meter
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Welke bouwsteen scoort verhoudingsgewijs hoog of laag op de MKI?*

Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

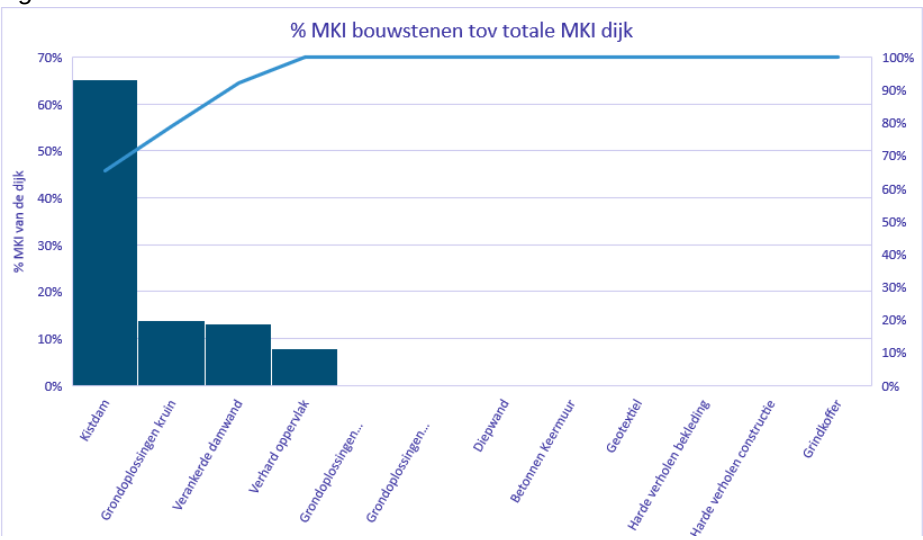
	Grondoplossingen			Verhard oppervlak	Constructies							
	Grondoplossingen binnendijks	Grondoplossingen buitendijks	Grondoplossingen kruin	Verhard oppervlak	Verankerde damwand	Kistdam	Diepwand	Betonnen Keermuur	Geotextiel	Harde verholen bekleding	Harde verholen constructie	Grindkoffer
Dijkvak 1	0	0	112	32	284	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 2	0	0	80	32	0	581	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 3	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 4	0	0	28	32	14	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 5	0	0	78	0	0	581	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 6	0	0	23	32	284	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dijkvak 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale Dijk	0	0	54	30	51	254	0	0	0	0	0	0
MKI % van de dijk	0%	0%	14%	8%	13%	65%	0%	0%	0%	0%	0%	0%





Figuur 34. Voorbeeld van MKI per bouwsteen per strekkende meter.

- Percentage MKI bouwstenen ten opzichte van de totale MKI van de dijk.
  Deze resultaten geven antwoord op de vraag: *Waar leiden verbeteringen / innovaties tot een significant betere MKI score?*

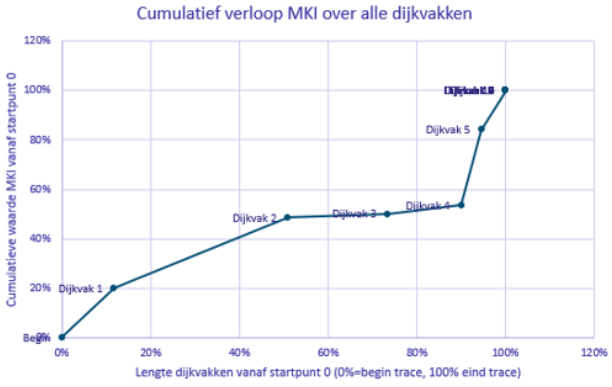


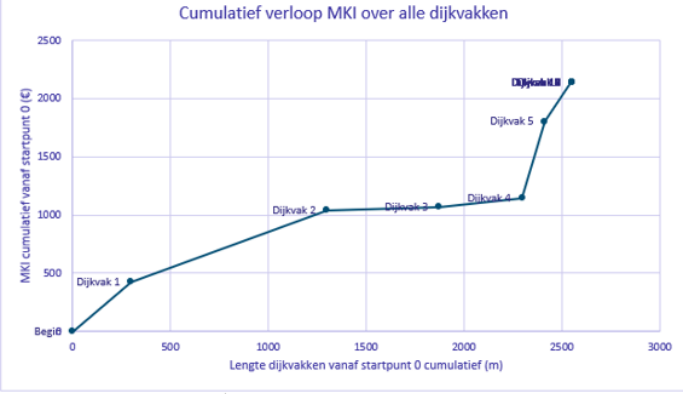
Figuur 35. Voorbeeld van percentage MKI bouwstenen ten opzichte van de totale MKI van de dijk.

- Cumulatief verloop van de MKI over de dijkvakken.

Cumulatief verloop MKI over de dijkvakken

	Lengte dijkvak	Lengte cumulatief	MKI cumulatief	Lengte cumulatief (%)	MKI cumulatief (%)
Begin	0	0	0	0%	0%
Dijkvak 1	300	300	428	12%	20%
Dijkvak 2	1000	1300	1041	51%	49%
Dijkvak 3	573	1873	1073	73%	50%
Dijkvak 4	423	2296	1146	90%	53%
Dijkvak 5	116	2412	1806	95%	84%
Dijkvak 6	138	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 7	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 8	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 9	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 10	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 11	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 12	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 13	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 14	0	2550	2145	100%	100%
Dijkvak 15	0	2550	2145	100%	100%





Figuur 36. Voorbeeld van cumulatief verloop MKI over de dijkvakken.

De resultaten “Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk” en “MKI per dijkvak per fase” worden voor 5 verschillende fases berekend, door de MKI scores van de fases op te tellen wordt de totale MKI van een dijkvak bepaald.

1. Bouwfase
2. Gebruiksfase
3. Onderhoudsfase
4. Einde levensduur fase
5. Toeslag

Deze resultaten kunnen gebruikt worden om de dijkvakken, maar ook om verschillende varianten met elkaar te vergelijken.

6.4 Samenvatting in grafieken

Op het tabblad samenvatting in grafiek worden de grafieken van het tabblad Numerieke output, zoals te zien in paragraaf 6.3 op een overzichtelijke manier weergegeven. De samenvatting geeft een overzicht van de eindresultaten zonder in te veel detail te treden.

Indien het MKI bouwstenen model voor meerder varianten ingevuld wordt kunnen de samenvattingen gebruikt worden om de varianten met elkaar te vergelijken.

Op het samenvatting tabblad wordt beschreven om welk project het gaat, wat de naam van de variant is en wie de berekening gemaakt heeft.

6.5 De MKI gegevens

Op dit tabblad worden de MKI score per eenheid element weergegeven. Deze scores zijn direct afkomstig uit DuboCalc 5.1. Een deel hiervan is weergegeven in Figuur 37. Deze scores worden gebruikt om de MKI van de dijkvakken en de dijk te berekenen.

				Grond						
Element Code	Materiaal	Element eenheid		Bouw (€)	Gebruik (€)	Onderhoud (€)	Einde Levensduur (€)	Toeslag (€)	Totaal (€)	C02 (kg CO2-eq)
G.1	Grond (per as)	1 m3	MKI	0,19	0,00	0,00	0,71	0,29	**1,19**	8,93
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.2	Grond (per schip)	1 m3	MKI	0,19	0,00	0,00	0,71	0,27	**1,17**	8,93
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.3	Landzand (per schip)	1 m3	MKI	0,55	0,00	0,00	0,68	0,37	**1,60**	14,53
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.4	Landzand (per as)	1 m3	MKI	0,6	0,00	0,00	0,68	0,39	**1,67**	15,17
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.5	Klei	1 m3	MKI	0,21	0,00	0,00	0,7	0,27	**1,18**	9,42
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.6	Werk met werk maken: zoet zand (waterbouw)	1 m3	MKI	0,28	0,00	0,00	0,67	0,28	**1,23**	9,34
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.7	Geen	-	MKI	-	-	-	-	-	-	-
			Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.8	Eigen materiaal 1	1 m3	MKI						**0,00**	
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.9	Eigen materiaal 2	1 m3	MKI						**0,00**	
		per 0 km	Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.10	Grind	1 m2	MKI	1,11	0,00	0,74	0	0,55	**2,40**	20,25
			Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
G.11	Menggranulaat 200 mm	1 m2	MKI	0,63	0,00	0,55	0,2	0,42	**1,80**	12,63
			Primair	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Figuur 37. De Dubocalc MKI scores voor de verschillende grond soorten.

Het is ook mogelijk om extra materialen toe te voegen. Deze materialen worden eigen materiaal 1 en 2 genoemd. Dit kan gebruikt worden wanneer er materialen toegepast worden die niet in deze database staan.

7. Circulariteit in het MKI bouwstenen model

Dit hoofdstuk focust zich op het toepassen van circulariteit in het ontworpen model uit hoofdstuk 6.

Met het MKI bouwstenen model zoals deze beschreven is in hoofdstuk 6 kan de MKI-waarde per dijkvak en vervolgens per variant berekend worden. Waarna dit vergeleken kan worden met andere varianten om zo tot de meest duurzame oplossing te komen. In het model zoals beschreven in hoofdstuk 6 is geen rekening gehouden met circulariteit. Dit omdat de waarden uit het ontworpen model gebaseerd zijn op de gegevens uit het programma DuboCalc en de onderliggende Nationale Milieudatabase. Deze bepalingsmethode van DuboCalc gaat er vanuit dat een materiaal een levensduur van 100 jaar heeft en dat deze daarna weggegooid en vervangen wordt. De restwaarde wordt in de MKI in rekening gebracht. Maar van weggooien en vervangen hoeft natuurlijk geen sprake te zijn; de materialen kunnen ook hergebruikt of gerecycled worden.

Om circulariteit aan het model toe toevoegen kan er een primair percentage ingevoerd worden bij de materialen. Dit percentage geeft aan hoe circulair een materiaal is. Indien er een primair percentage van 100% is ingevoerd, betekent dit dat het materiaal niet circulair is. En wanneer een percentage van 0% wordt ingevoerd betekent dit dat een materiaal volledig circulair is en dat na het einde van de levensduur van het product, het product in een nieuw product ingezet kan worden zonder afval. Wanneer een materiaal maar deels hergebruikt kan worden en dus maar deels circulair is kan er een percentage tussen de 0% en de 100% ingevoerd worden. De hoogte van dit percentage is afhankelijk van de hoeveelheid materiaal dat hergebruikt wordt. Wanneer er een ander percentage dan 100% ingevoerd wordt dient hier een onderbouwing voor geleverd te worden.

Het primair circulariteit percentage kan in verschillende fases toegepast worden. Wanneer een materiaal al eerder gebruikt is geweest zal er een percentage ingevoerd worden in de bouwfase. Maar wanneer er een nieuw materiaal toegepast is die na de levensduur van de bouwsteen nog hergebruikt kan worden, wordt er in de einde levensduur fase een percentage ingevoerd.

In hoofdstuk 10 is aan de hand van de gegevens van de Grebbedijk een primair circulariteit percentage ingevoerd voor het hergebruik van grond. Dit percentage is ingevoerd voor zowel de bouwfase als de einde levensduur fase. Dit omdat als de grond schoon is aan het eind van de levensduur van de dijk, het hergebruikpercentage nagenoeg 100% is.

Onderzoeksresultaat

Toetsing MKI bouwstenen model – Grebbedijk

Toetsing MKI bouwstenen model – Sterke Lekdijk (Salmsteke)

Toetsing Circulariteit in het MKI bouwstenen model – Grebbedijk

8. Toetsing milieubelasting model – Grebbedijk

In dit hoofdstuk wordt het milieubelasting model zoals besproken in hoofdstuk 6 getoetst aan het hand van de gegevens van de Grebbedijk.

Voor de versterking van de Grebbedijk zijn 5 varianten ontworpen:

1. Voorkeursalternatief met waterplas
2. Voorkeursalternatief zonder waterplas
3. Kansalternatief 1
4. Kansalternatief 2
5. Kansalternatief 3

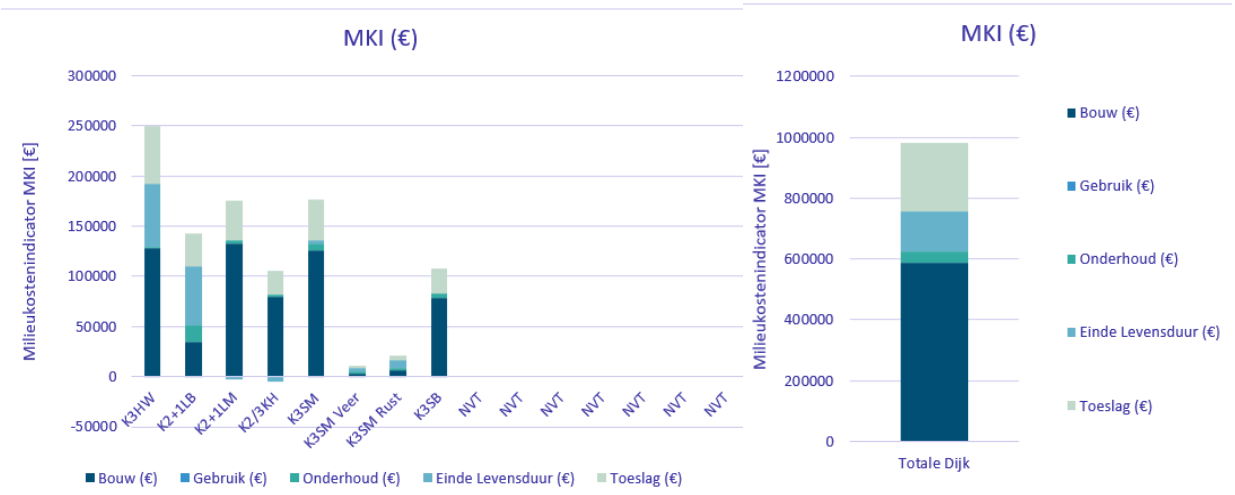
Een uitgebreide beschrijving van deze 5 varianten is weergegeven in Bijlage V.

Het model is voor elk van deze varianten getest. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de varianten besproken. Voor de invoer in het model en een uitgebreide versie van de resultaten van elke variant wordt verwezen naar Bijlage VIII. Voor de samenvatting in grafieken wordt verwezen naar Bijlage IX.

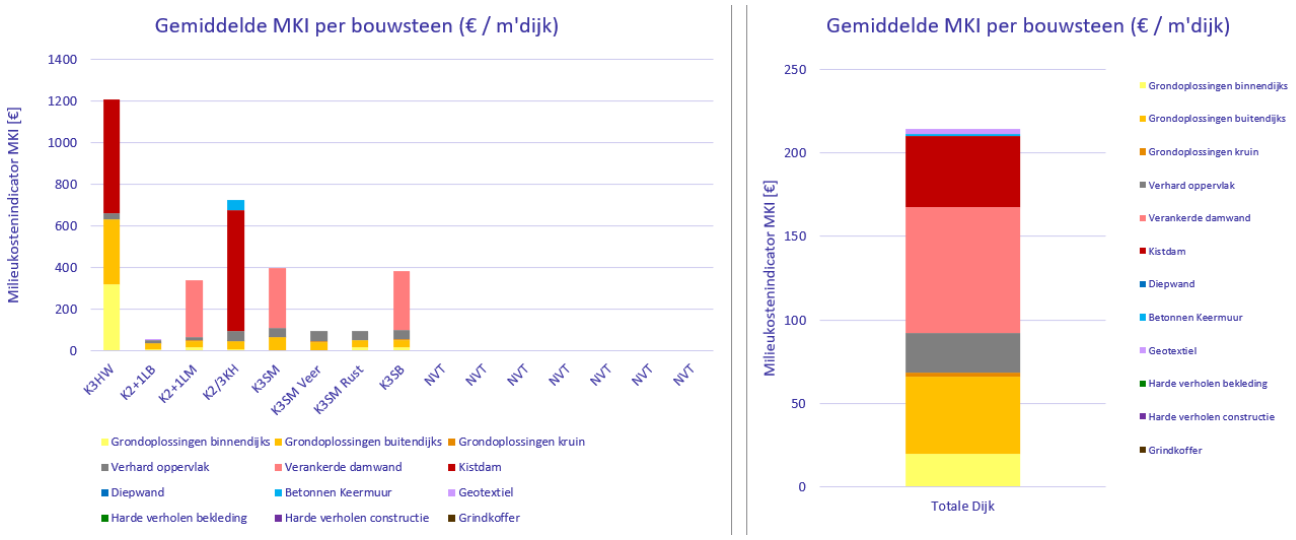
8.1 Voorkeursalternatief met waterplas

Het voorkeursalternatief is een ontwerp dat is samengesteld met profielen uit de Kans alternatieven. Hierin is een combinatie van constructieve oplossingen en oplossingen in grond toegepast. Ook wordt bij deze variant een waterplas ontworpen.

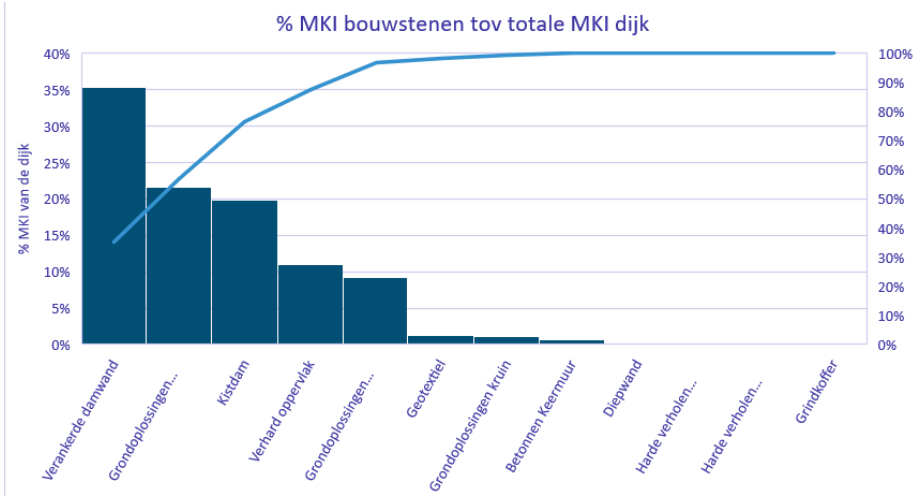
In Figuur 38 is af te lezen dat dijkvak K3HW een extreem hoge MKI-waarde heeft. En dat dijkvak K3SM een lage MKI-waarde heeft. Dit is te verklaren omdat in dijkvak K3HW een kistdam geplaatst zal worden en er veel grond oplossingen toegepast worden, en in dijkvak K3SM wordt een verankerde damwand geplaatst met weinig grondoplossingen. Omdat een kistdam twee stalen damwanden gebruikt en een verankerde damwand maar één stalen damwand gebruikt, heeft een kistdam een veel hogere MKI score, zoals is af te lezen in Figuur 39. In Figuur 40 is af te lezen dat een groot percentage van de totale MKI score bestaat uit verankerde damwanden, hierdoor zullen verbeteringen en innovaties onder verankerde damwanden het meeste effecten hebben op de totale MKI score van de variant.



Figuur 38. Totale MKI per profiel per fase (VKA met wp).



Figuur 39. Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk (VKA met wp).

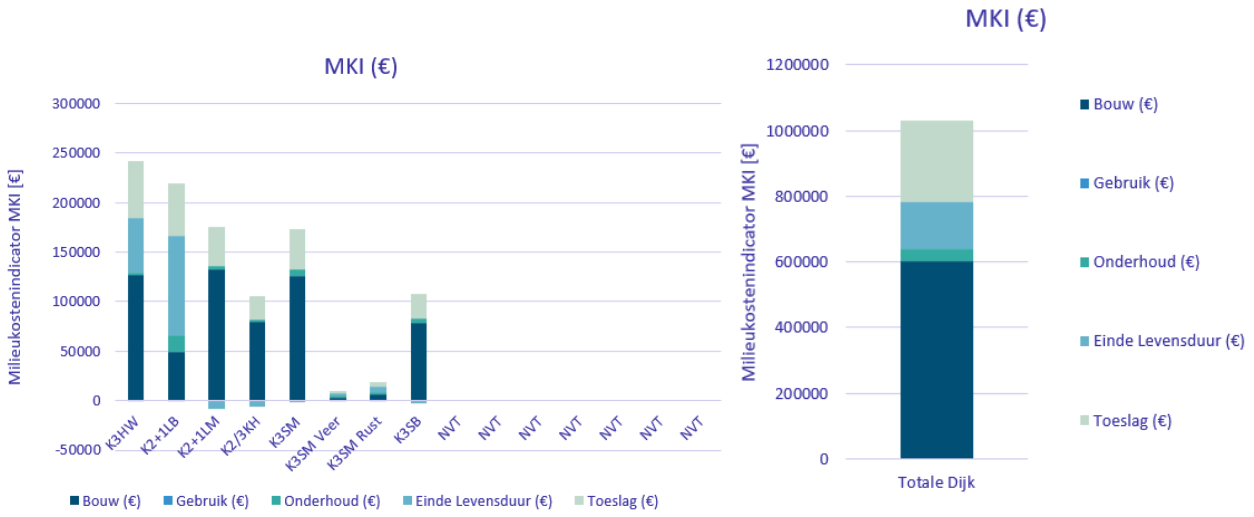


Figuur 40. Percentage MKI bouwstenen tov totale MKI van de dijk (VKA met wp).

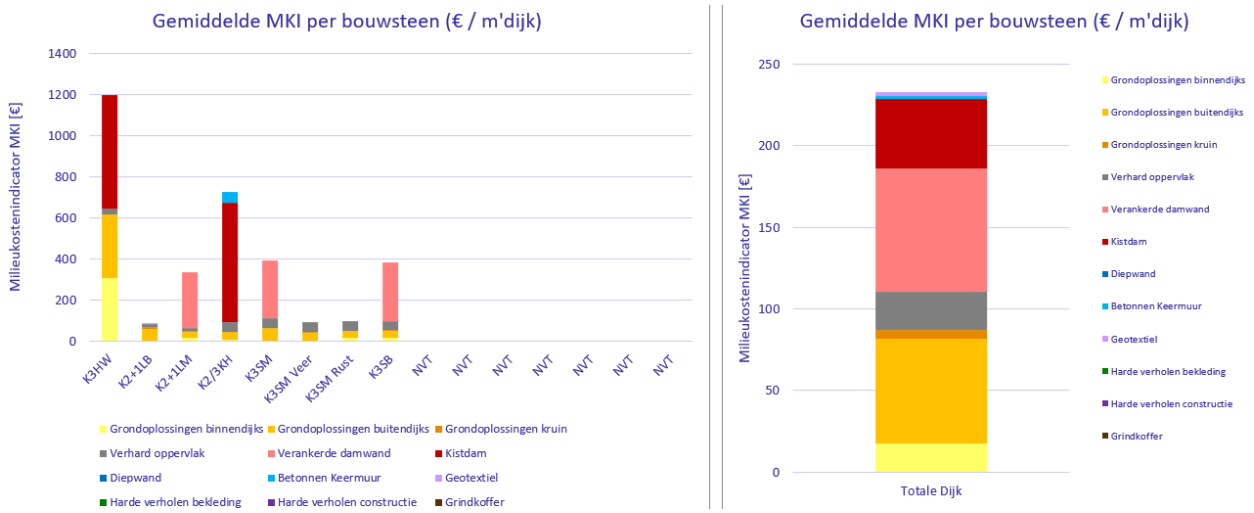
8.2 Voorkeursalternatief zonder waterplas

Het voorkeursalternatief is een ontwerp dat is samengesteld met profielen uit de Kans alternatieven. Hierin is een combinatie van constructieve oplossingen en oplossingen in grond toegepast.

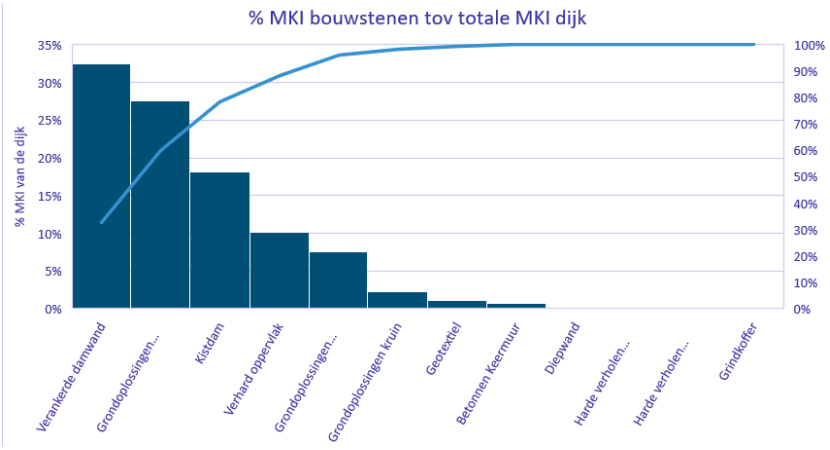
In Figuur 41 is af te lezen dat dijkvak K3HW een extreem hoge MKI-waarde heeft. En dat dijkvakken K3SM en K3SM rust een lage MKI-waarde hebben. Dit is te verklaren omdat in dijkvak K3HW een kistdam geplaatst zal worden en in profielen K3SM veer en K3SM rust wordt alleen gebruik gemaakt van dijkversterking in de grond, zoals is af te lezen in Figuur 42. In Figuur 43 is af te lezen dat een groot percentage van de totale MKI score bestaat uit verankerde damwanden, hierdoor zullen verbeteringen en innovaties onder verankerde damwanden het meeste effecten hebben op de totale MKI score van de variant.



Figuur 41. Totale MKI per profiel per fase (VKA).



Figuur 42. Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk (VKA).

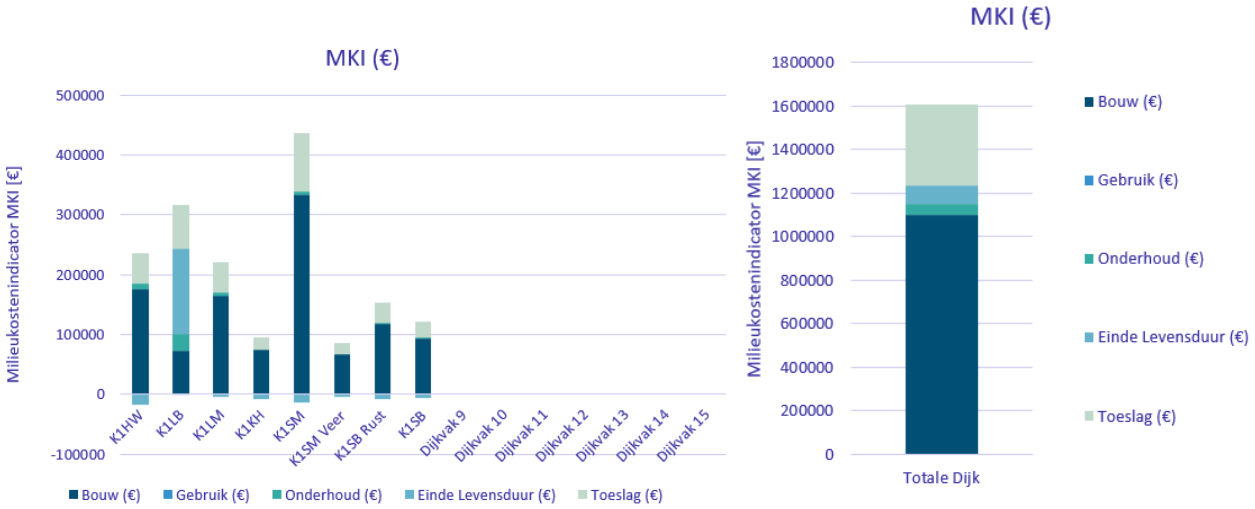


Figuur 43. Percentage MKI bouwstenen tov totale MKI van de dijk (VKA).

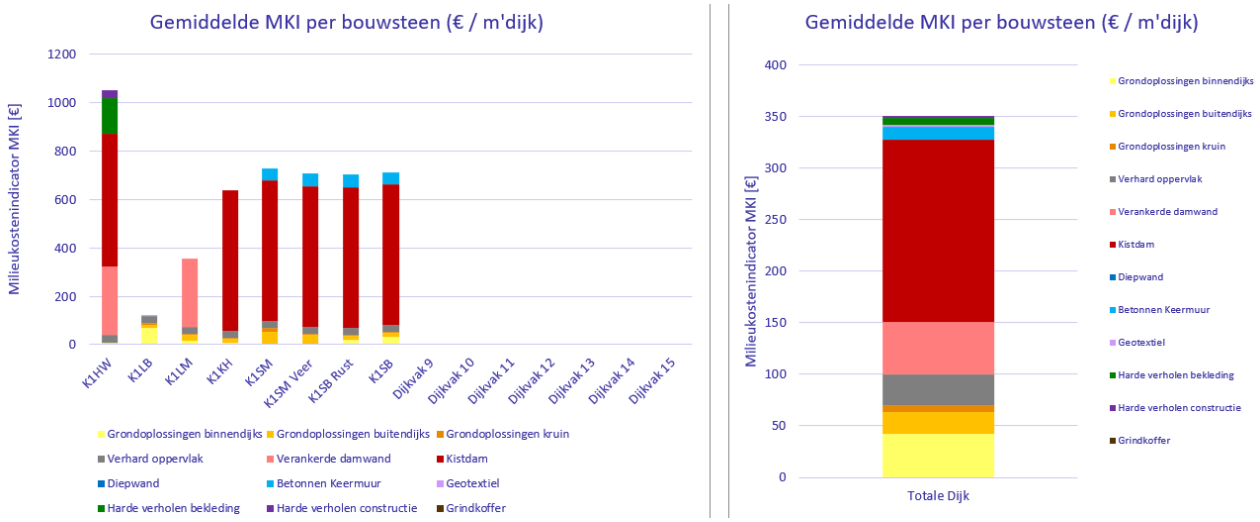
8.3 Kans alternatief 1

Kans alternatief 1 is een variant die veel gebruik maakt van constructieve oplossingen. Hierdoor kan een smalle dijk gerealiseerd worden.

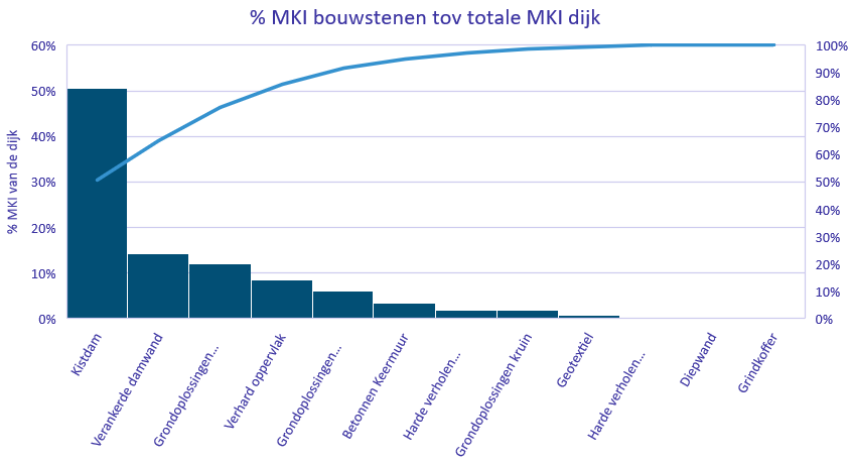
In Figuur 44 is af te lezen dat profiel K1HW een extreem hoge MKI-waarde heeft. En dat profiel K1LB een lage MKI-waarde heeft. Dit is te verklaren omdat in profiel K1HW een kistdam geplaatst zal worden en in profiel K1LB wordt alleen gebruik gemaakt van dijkversterking in de grond, zoals is af te lezen in Figuur 45. In Figuur 46 is af te lezen dat een groot percentage van de totale MKI score bestaat uit kistdammen, hierdoor zullen verbeteringen en innovaties bij kistdammen het meeste effecten hebben op de totale MKI score van de variant.



Figuur 44. Totale MKI per profiel per fase (KA 1).



Figuur 45. Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk (KA 1).

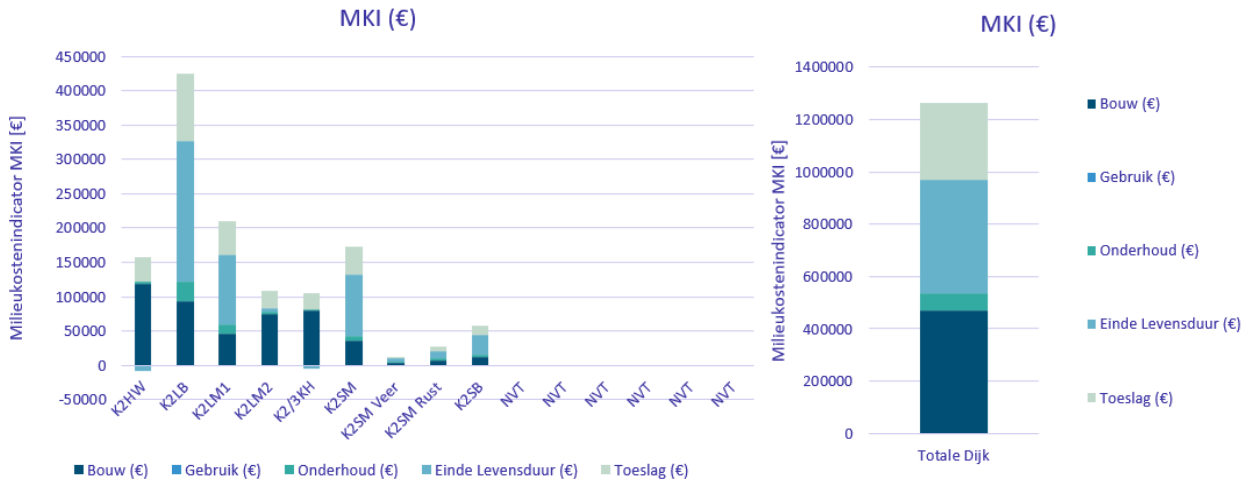


Figuur 46. Percentage MKI bouwstenen tov totale MKI van de dijk (KA 1).

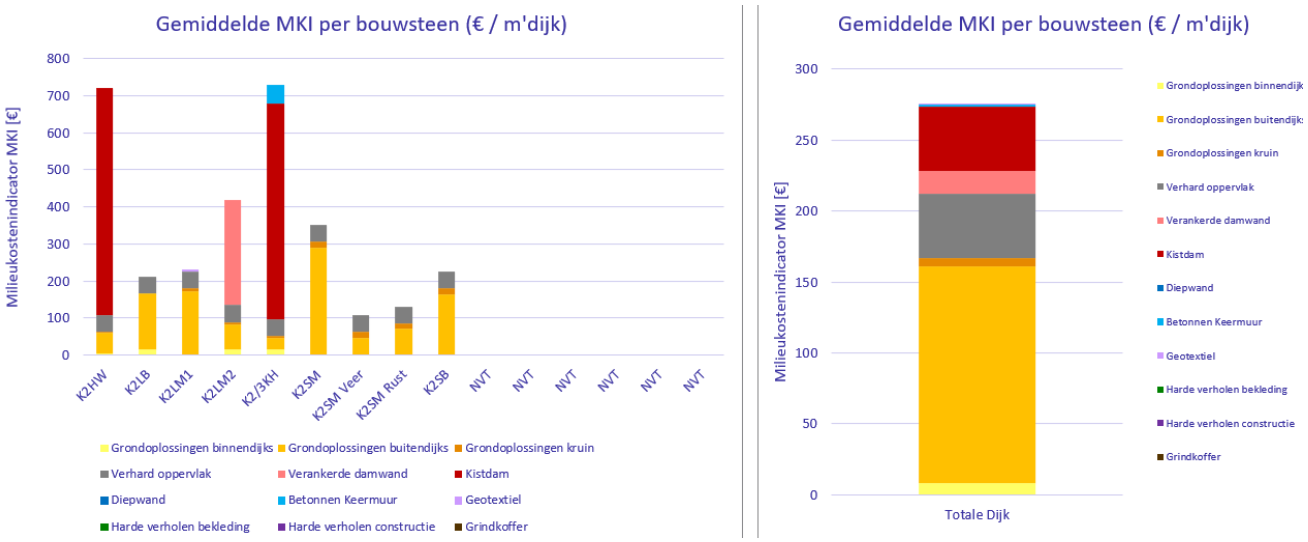
8.4 Kans alternatief 2

Kans alternatief 2 is een variant die voornamelijk gebruik maakt van oplossingen in de grond. Hierdoor wordt een brede dijk gerealiseerd.

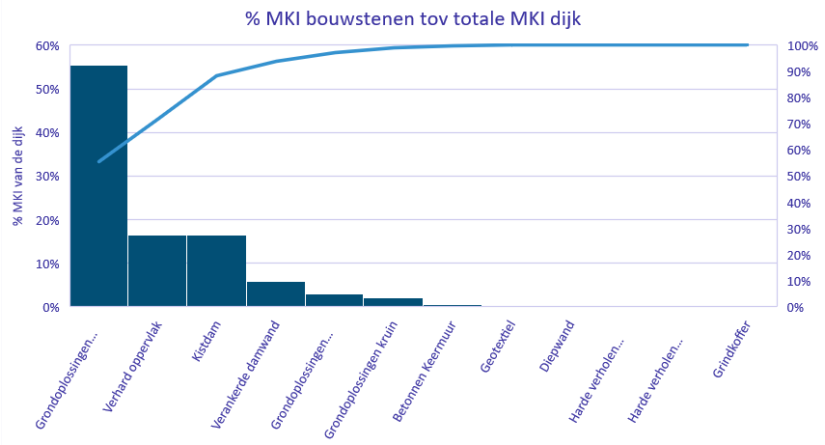
In Figuur 47 is af te lezen dat profiel K2HW een extreem hoge MKI-waarde heeft. En dat profiel K2SM een lage MKI-waarde heeft. Dit is te verklaren omdat in profiel K2HW een kistdam geplaatst zal worden en in profiel K2SM wordt alleen gebruik gemaakt van dijkversterking in de grond, zoals is af te lezen in Figuur 48. In Figuur 49 is af te lezen dat een groot percentage van de totale MKI score bestaat uit grondoplossingen buitendijks, hierdoor zullen verbeteringen en innovaties voor grondoplossingen buitendijks het meeste effecten hebben op de totale MKI score van de variant.



Figuur 47. Totale MKI per profiel per fase (KA 2).



Figuur 48. Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk (KA 2).

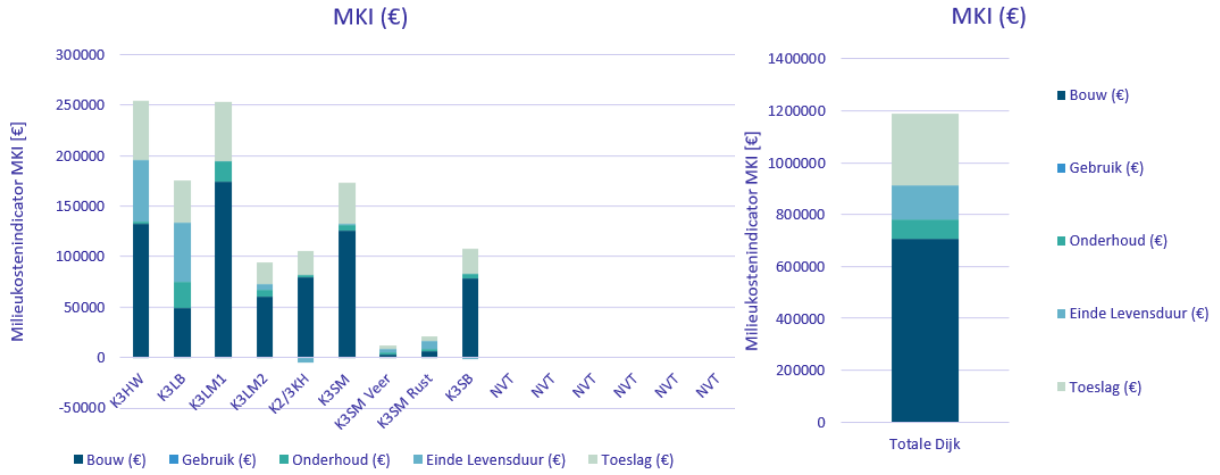


Figuur 49. Percentage MKI bouwstenen tov totale MKI van de dijk (KA 2).

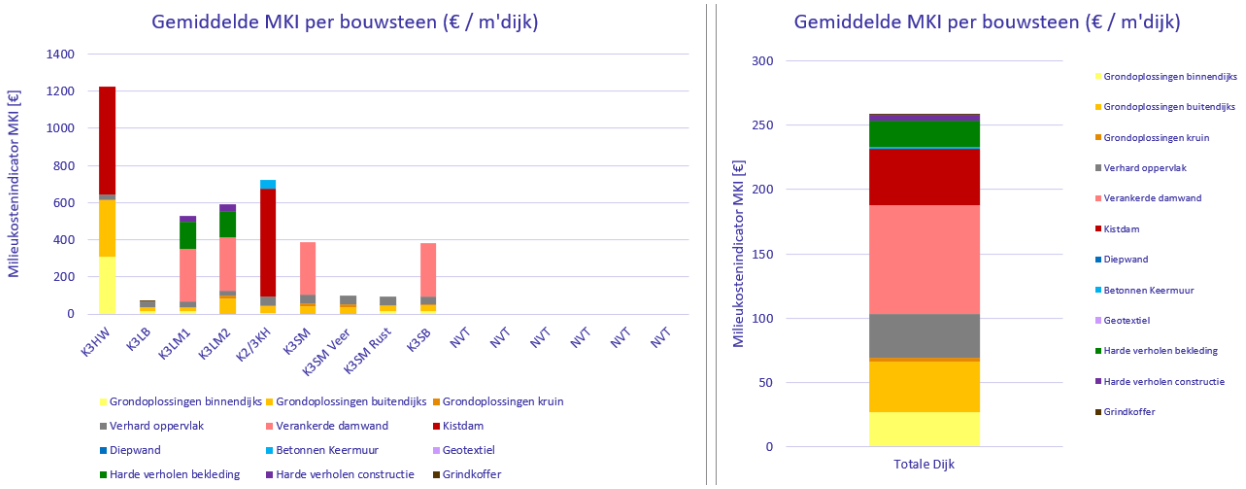
8.5 Kans alternatief 3

Kans alternatief 3 is een variant die waarbij een combinatie van constructieve oplossingen en oplossingen in grond worden toegepast.

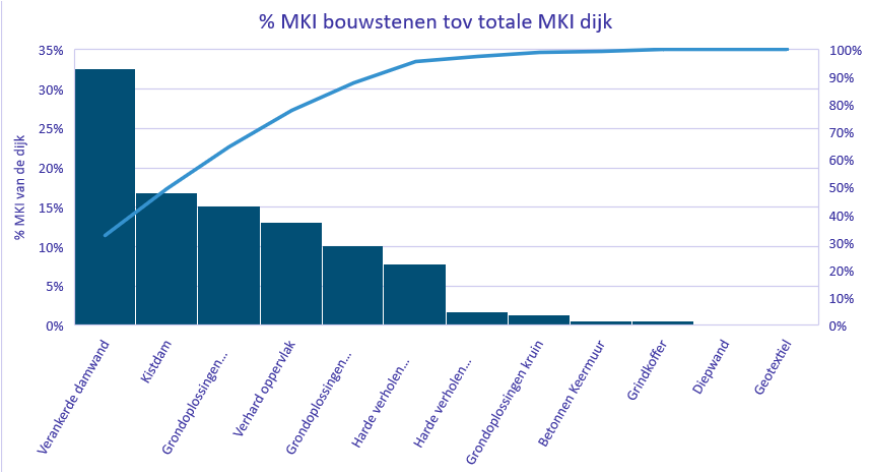
In Figuur 50 is af te lezen dat profiel K2HW een extreem hoge MKI-waarde heeft. En dat profiel K2SM een lage MKI-waarde heeft. Dit is te verklaren omdat in profiel K2HW een kistdam geplaatst zal worden en in profiel K2SM wordt alleen gebruik gemaakt van dijkversterking in de grond, zoals is af te lezen in Figuur 51. In Figuur 52 is af te lezen dat een groot percentage van de totale MKI score bestaat uit verankerde damwanden, hierdoor zullen verbeteringen en innovaties onder verankerde damwanden het meeste effecten hebben op de totale MKI score van de variant.



Figuur 50. Totale MKI per profiel per fase (KA 3).



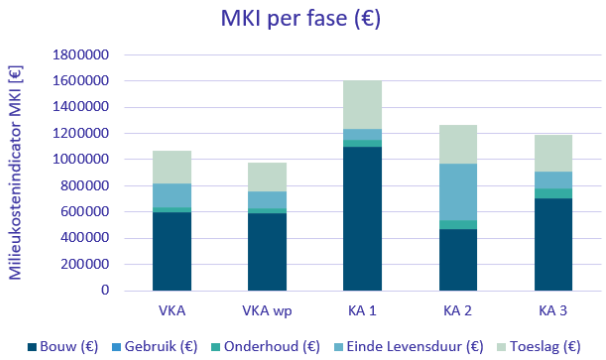
Figuur 51. Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk (KA 3).



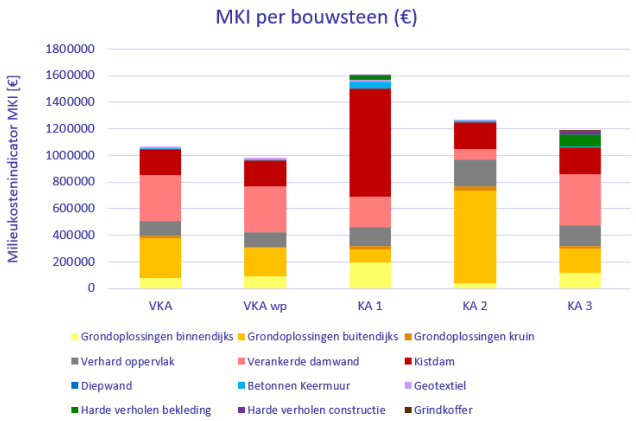
Figuur 52. Percentage MKI bouwstenen tov totale MKI van de dijk (KA 3).

8.6 Vergelijking van de varianten

Door de resultaten van de totale dijk van de 5 varianten in 1 grafiek samen te voegen kunnen de varianten met elkaar vergeleken worden. In Figuur 53 zijn de resultaten van de varianten per fase weergegeven en in Figuur 54 zijn de resultaten van de varianten per bouwstenen weergegeven. Uit deze grafieken blijkt dat kans alternatief 1 de hoogste MKI score heeft. Dit komt door het toepassen van relatief veel kistdammen. Het voorkeursalternatief met waterplas heeft de laagste MKI score. Dit komt doordat er een goede verhouding is tussen constructieve dijkversterkingsoplossingen en oplossingen in de grond. Ook kan er bij het voorkeursalternatief met waterplas gebruikt gemaakt worden van gebiedseigen grond die vrijkomt uit de waterplas.



Figuur 53. Varianten vergelijking MKI score per fase.



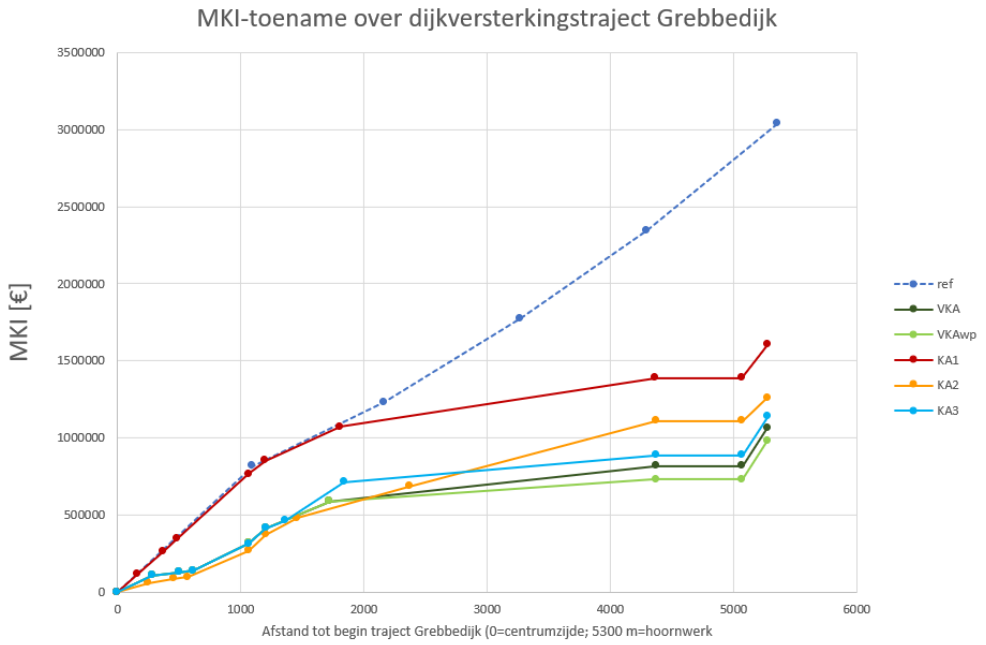
Figuur 54. Varianten vergelijking MKI score per bouwstenen.

Naast de 5 varianten is er ook een referentiedijk gemaakt. De referentiedijk is gebaseerd op de berekeningen uit de KOSWAT-analyse[2] en wordt in bijlage IIII verder toegelicht.

Door de grafiek van de cumulatieve MKI-waarde van alle varianten in één grafiek samen te voegen kan de MKI toename over het dijktraject van de varianten vergeleken worden. Om de grafieken van de varianten overeen te laten komen met de referentie dijk zijn de profielen met het Hoornwerk erin aan het einde van het dijktraject geplaatst.

In Figuur 55 zijn de cumulatieve MKI-waarde van de 5 varianten en van de referentiedijk weergegeven. Hierin is duidelijk de MKI toename over het dijktraject te zien. Ook uit deze grafiek blijkt dat kans alternatief 1 het meest milieubelastend is en dat het voorkeursalternatief met waterplas het minst milieubelastend is. Ook blijkt dat het voorkeursalternatief zonder waterplas ook een lage milieubelasting heeft. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het toepassen van constructieve oplossingen zorgen voor een hoge MKI score en dat oplossingen is de grond zorgen voor een lagere MKI score. Ook blijkt hieruit dat het gebruikt van gebiedseigen grond de MKI score verminderd maar dat dit geen significante vermindering is.

[2] Een KOSWAT-analyse is een kostencalculatie aan het begin van het project, waarbij becijferd wordt welke maatregelen ze inschatten en wat deze gaan kosten



Figuur 55. Vergelijking van de varianten van de Grebbedijk.

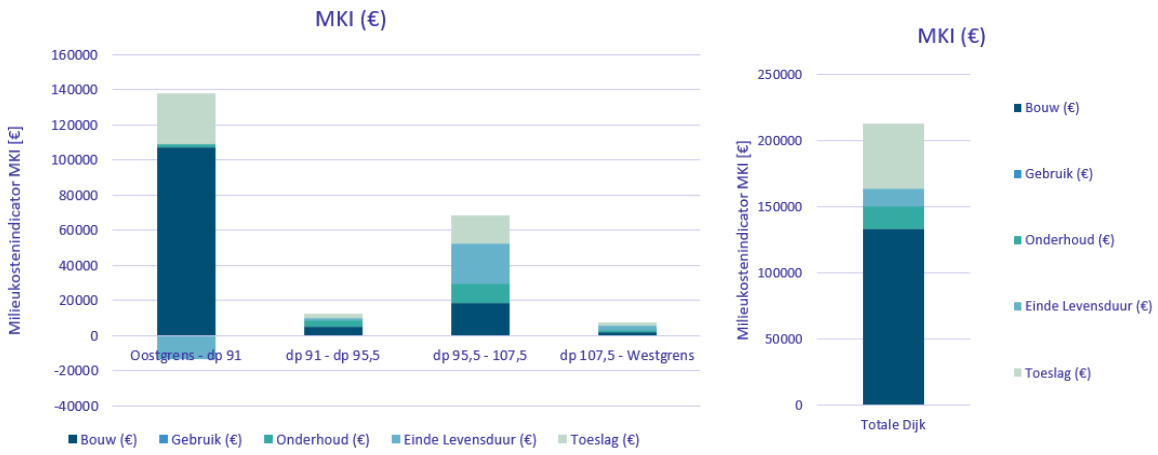
9. Toetsing milieubelasting model – Sterke Lekdijk (Salmsteke)

In dit hoofdstuk wordt het milieubelasting model zoals besproken in hoofdstuk 6 getoetst aan het hand van de gegevens van de Sterke Lekdijk (Salmsteke).

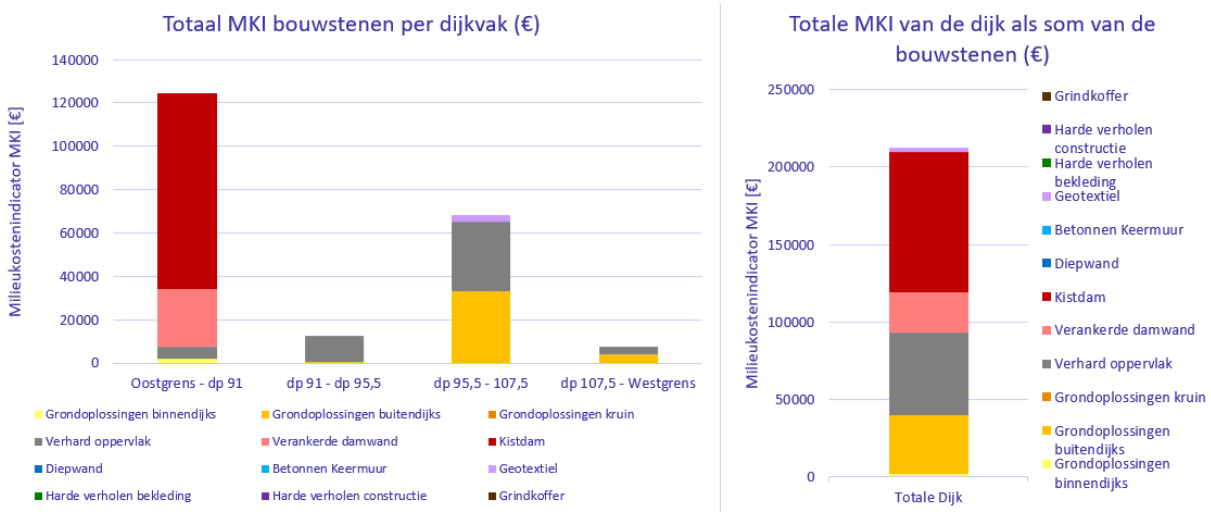
De resultaten zoals hieronder weergeven zijn gebaseerd op het voorontwerp van het project de Sterke Lekdijk (Salmsteke). Het voorontwerp zou in de toekomst nog van aanpassingen voorzien kunnen worden. Een uitgebreide beschrijving van het voorontwerp in Bijlage VI beschreven.

Het voorontwerp bestaat uit twee onderdelen, een dijkversterking en een nieuwe inrichting voor de uiterwaard. In het MKI bouwstenen model is alleen het ontwerp voor de dijkversterking getoetst. Voor de invoer in het model en een uitgebreide versie van de resultaten wordt verwezen naar Bijlage VIII. Voor de samenvatting in grafieken wordt verwezen naar Bijlage X.

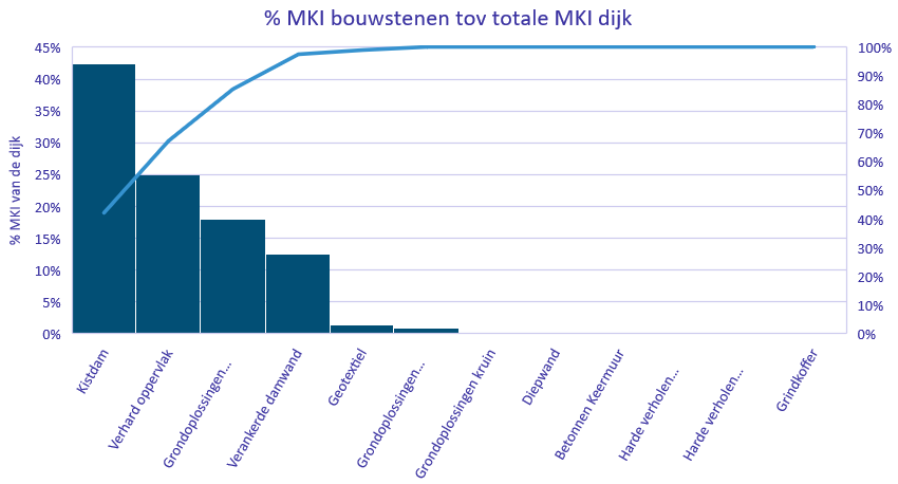
Uit Figuur 56 blijkt dat het dijktraject tussen dijkpaal 91 en de westgrens een lage MKI score hebben. Dit omdat hier alleen geotextiel, grondoplossingen en verhard oppervlak toegepast worden, wat allemaal oplossingen zijn met een relatief lage MKI score, zoals is af te lezen in Figuur 57. Het dijktraject tussen de Oostgrens en dijkpaal 91 heeft naar verhouding een hele hoge MKI score. Dit omdat in hier zowel een Kistdam als een verankerde damwand geplaatst wordt, waardoor de MKI score flink stijgt. Uit Figuur 58 blijkt dat als de MKI score van het voorontwerp verlaagt moet worden er het best gekeken kan worden naar verbeteringen of innovaties voor de Kistdam die geplaatst wordt, dit zal het meest effect hebben op de totale MKI score van het ontwerp.



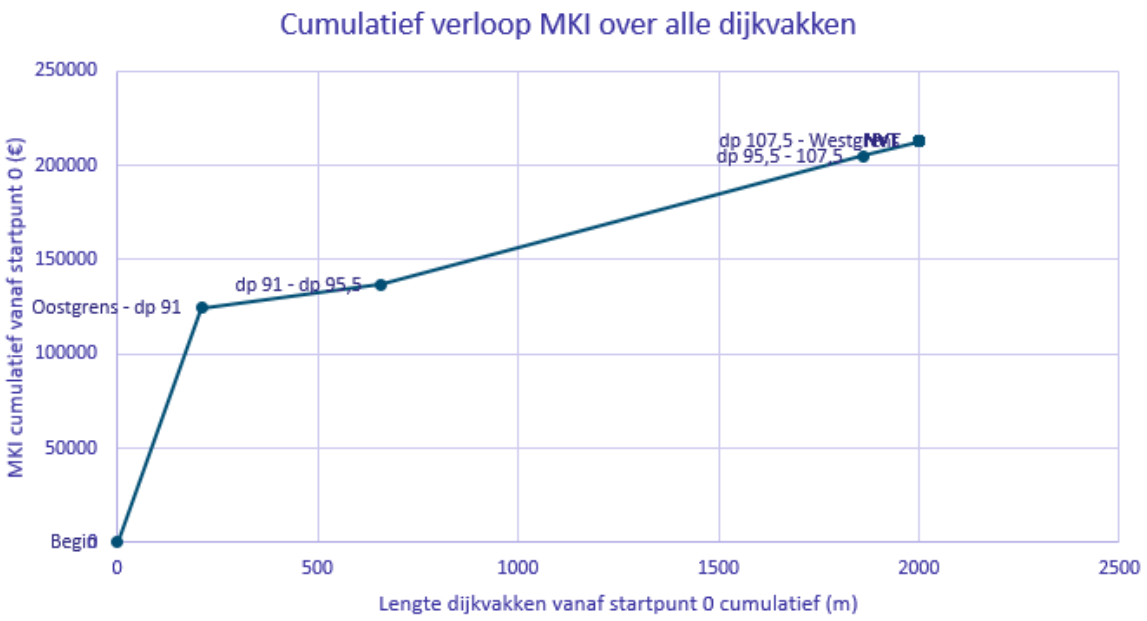
Figuur 56. Totale MKI per profiel per fase (Salmsteke).



Figuur 57. Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk (Salmsteke).



Figuur 58. Percentage MKI bouwstenen tov totale MKI van de dijk (Salmsteke).



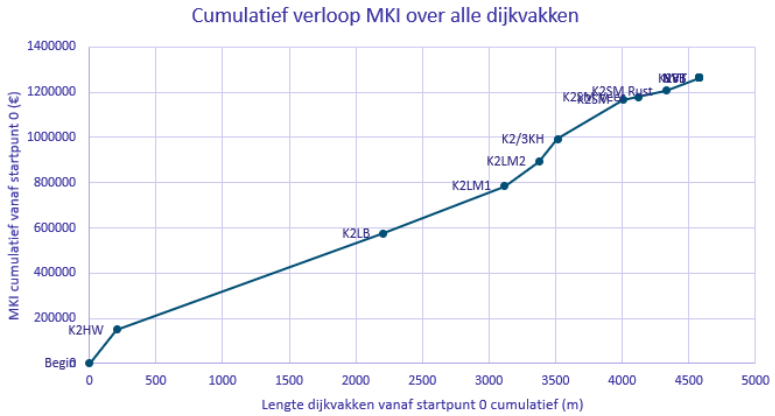
Figuur 59. Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk (Salmsteke).

10. Toetsing circulariteit in het milieubelasting model – Grebbedijk

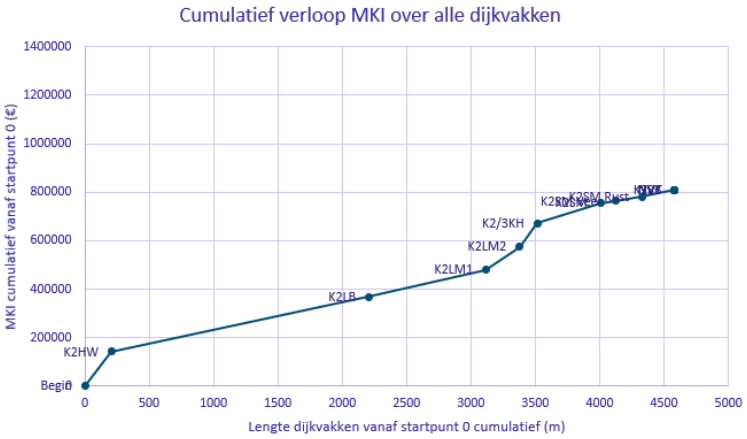
In dit hoofdstuk wordt de toevoeging van circulariteit aan het milieubelasting model getoetst aan de hand van de gegevens van de Grebbedijk.

Zoals in hoofdstuk 7 uitgelegd is kan er in het MKI bouwstenen model een primair circulariteit percentage ingevoerd worden. Dit geeft een reductie op de MKI van hergebruikte materialen. Om dit te demonsteren is er voor variant Kans alternatief 2 een versie gemaakt waarbij grond volledig hergebruikt wordt. Hiervoor is in de bouwfase en in de einde levensduur fase een primair circulariteit percentage ingevoerd van 0%. Dit betekend dat het volledig circulair is.

In Figuur 60 en Figuur 61 61 zijn de cumulatieve MKI-waardes van variant Kans alternatief 2 weergegeven. Hierin is in Figuur 60 de cumulatieve MKI-score van de oorspronkelijke MKI berekening weergegeven en is in Figuur 61 de MKI-score met een primair circulariteit percentage van 0%, voor hergebruikte grond weergegeven. Voor de invoer en de resultaten van het MKI bouwstenen model met circulaire grond van variant Kans alternatief 2 wordt verwezen naar Bijlage XI. Voor de samenvatting in grafieken van kans alternatief 2 met circulaire grond wordt verwezen naar bijlage XII.



Figuur 60. Oorspronkelijke MKI berekening kans alternatief 2.



Figuur 61. MKI berekening kans alternatief 2 met toepassing van circulaire grond.

In bovenstaande figuren is een duidelijke daling zichtbaar wanneer er gebruikt gemaakt wordt van hergebruikte grond waarbij als uitgangspunt wordt aangenomen dar aan het einde van de levensduur alle grond volledig te hergebruiken is. Zo heeft de originele MKI berekening een MKI van € 1263360 en de circulaire MKI berekening een MKI van € 809575. Door het gebruik van circulaire grond is de MKI score van kans alternatief 2 met 35% gedaald. Dit demonstreert dat het toepassen van circulaire materialen zorgt voor een daling in de MKI score en dus zeer voordelig is voor de milieubelasting van een ontwerp.

11. Kennisoverdracht

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de kennis, die opgedaan is tijdens dit afstudeeronderzoek, wordt overgedragen. De kennis is op drie manieren overgedragen: Een gastcollege, een lunchlezing en een artikel.

11.1 Gastcollege op De Haagse Hogeschool

Op 5 juni is er een gastcolleges gehouden op De Haagse Hogeschool te Den Haag. Dit gastcollege was voor derde jaar studenten die het vak rivierwaterbouwkunde volgen. Het gastcollege beperkte zich tot Dubocalc en circulariteit. Het MKI bouwstenen model is niet toegelicht.

Tijdens het gastcollege werd er een presentatie gehouden over de volgende onderwerpen:

- Circulariteit (zie paragraaf 2.1)
- Circulaire ontwerpprincipes (zie paragraaf 2.2)
- Korte toelichting over de Grebbedijk (zie Bijlage V – Beschrijving alternatieven Grebbedijk)
- DuboCalc (zie hoofdstuk 5)

Vervolgens werd de werking van het programma DuboCalc gedemonstreerd aan de hand van een voorbeeld. Dit voorbeeld is het voorkeursalternatief zonder waterplas van de Grebbedijk.

Vervolgens hebben de studenten hun kennis getest aan de hand van twee opdrachten. De DuboCalc opdracht en een circulariteit opdracht.

11.1.1 DuboCalc opdracht

De studenten gaan zelf een DuboCalc berekening uitvoeren. Elke projectgroep krijgt een variant van de Grebbedijk toegewezen die zij in Dubocalc dienen te berekenen. Hierbij krijgen de studenten een Excel bestand met daarin alle bouwstenen met bijbehorende hoeveelheden die bij hun variant van toepassing zijn. De indeling van de varianten is als volgt:

- Projectgroep 1 – Voorkeursalternatief met waterplas
- Projectgroep 2 – Kans alternatief 1
- Projectgroep 3 – Kans alternatief 2
- Projectgroep 3 – Kans alternatief 3

Nadat de studenten hun variant in DuboCalc berekent hebben kunnen zij de MKI resultaten in het Excel bestand invoeren. Door deze resultaten in een grafiek te zetten kunnen de varianten makkelijk vergeleken worden. Vervolgens dienen de studenten een verklaring te geven voor de verschillen in MKI tussen de varianten.

11.1.2 Circulariteit opdracht

De standaard levensduur van een dijk in DuboCalc is 100 jaar. Maar de materialen die nodig zijn voor de bouwstenen hebben een langere of minder lange levensduur. DuboCalc gaat er vanuit dat wanneer een materiaal een levensduur heeft van bijvoorbeeld 60 jaar, dat deze na 60 jaar volledig vervangen wordt om zo te voldoen aan de levensduur van de dijk. DuboCalc gaat er vanuit dat na 100 jaar alle materialen weggegooid worden. Dit hoeft natuurlijk niet het geval te zijn. Grond heeft bijvoorbeeld (volgens DuboCalc) een levensduur van 900 jaar. Wanneer er voor gekozen wordt dit materiaal na 100 jaar niet weg te gooien maar het te gebruiken kan er een circulariteit reductie toegepast worden. Deze reductie zal toegepast worden in de Einde levensduur fase.

Aan de studenten de opdracht om de levensduur van de materialen te achterhalen in DuboCalc en om vervolgens te bepalen hoeveel “lifecycle” een materiaal nog over heeft na 100 jaar. Dit kunnen de studenten invoeren in het Excel bestand. Op basis van hoeveel “lifecycle” een materiaal nog over heeft wordt er een circulariteit reductie gegeven op de einde levensduur fase. Vervolgens kunnen de studenten dit vergelijken met de oorspronkelijke DuboCalc berekeningen en met de andere varianten.

11.2 Lunchlezing Lievense

Bij Lievense | WSP is er op 11 juni een lunchlezing gegeven over het MKI bouwstenen model. Deze lunchlezing is gericht op de volgende onderwerpen:

- Circulariteit (zie paragraaf 2.1)
- Circulaire ontwerpprincipes (zie paragraaf 2.2)
- MKI bouwstenen model
- Korte toelichting over de Grebbedijk (zie Bijlage V – Beschrijving alternatieven Grebbedijk)
- Resultaten van de grebbedijk in het MKI bouwstenen model
- Verschillen tussen DuboCalc en MKI bouwstenen model

De lunchlezing is zeer positief ontvangen door de aanwezigen. Na afloop van de lunchlezing is aangegeven door verschillende medewerkers dat zij het model op korte termijn voor projecten willen gaan inzetten.

11.3 Artikel Lievense

Vanuit Lievense is er een artikel geschreven waarin ook het MKI-bouwstenen model besproken wordt. Ik ben co-auteur van het artikel dat gepubliceerd zal worden op de website van Lievense|WSP en ook in het magazine en op de website Land + Water. Het concept artikel is weergegeven in Bijlage XIII.

12. Conclusies

De centrale vraag van dit onderzoek luidt als volgt**: *"Op welke wijze zijn MKI-bouwstenen optimaal in te zetten voor (opdrachtgevers), ontwerpers en bouwers om circulaire dijkontwikkeling te stimuleren?"***

Om tot het antwoord op de centrale vraag te komen zijn 8 deelvragen bedacht die leiden tot het antwoord op de hoofdvraag. Per deelvraag zijn onderstaand de belangrijkste conclusies vermeld.

Deelvraag 1: *Wat is circulaire dijkontwikkeling?*

Circulariteit gaat uit van een wereld zonder afval. Producten worden gedemonteerd en de grondstoffen hiervan worden opnieuw gebruikt, hierdoor ontstaat een oneindige recycling. Circulariteit kan ook toegepast worden bij dijkontwikkeling. Door in de ontwerpfase van een dijk rekening te houden met circulariteit kan er gekozen worden voor ontwerpen waarbij minder materiaal inzet nodig is en technieken met een lagere milieu impact, inzet van hergebruikt materiaal of materialen die aan het eind van de levensduur uit elkaar te halen zijn en weer voor andere doelen inzetbaar zijn. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de acht circulaire ontwerpprincipes van Rijkswaterstaat en het 10-R model van Cramer.

Deelvraag 2: *In hoeverre is de MKI-methode (DuboCalc) een geschikte methode om de circulariteit van een dijk te bepalen?*

DuboCalc is een softwaretool ontwikkeld om de duurzaamheid en milieukosten van ontwerpvarianten te berekenen en te vergelijken. De huidige versie van DuboCalc (versie 5.1) houdt beperkt rekening met circulariteit. DuboCalc 5.1 gaat er vanuit dat een materiaal een levensduur heeft van maximaal 100 jaar en dat deze daarna weggegooid en vervangen wordt. De afvalverwerking van een materiaal wordt in rekening gebracht in MKI in de fase einde levensduur. Maar van weggooien en vervangen hoeft geen sprake te zijn, de materialen zouden hergebruikt of gerecycled kunnen worden. Het hergebruiken en recyclen van materialen is in DuboCalc 5.1 niet mogelijk, tenzij hier bij het productieproces al rekening is gehouden in de Nationale Milieudatabase.

Deelvraag 3: *Wat zijn MKI-bouwstenen; hoe wordt de MKI daarvan bepaald en uit welke elementen bestaan deze?*

Een bouwsteen is een functioneel samenhangend pakket van materialen en producten die samen een element vormen, denk bijvoorbeeld aan een damwand, asfaltweg of grond voor een dijkverzwaring. Om de milieubelasting van de bouwstenen te bepalen wordt de gemiddelde MKI-waarde per strekkende meter dijk van een bouwsteen berekend. De MKI-waarde kan bepaald worden aan de hand van het gemaakte MKI bouwstenen model. Door de berekende totale MKI waarde te delen door de bijbehorende lengte van de dijk wordt de gemiddelde MKI-waarde per strekkende meter dijk verkregen.

Deelvraag 4: *Welke indeling in typen dijkversterkingen (classificering) is te maken, met het oogpunt op ontwikkeling van referentiedijkprofielen?*

Wanneer een dijk niet langer aan de veiligheidsnorm voldoet zal de dijk versterkt moeten worden om zo de veiligheid van de dijk te verhogen. Bij dijkversterkingsoplossingen kan onderscheid gemaakt worden tussen "dijkversterkingen in de grond" en "constructieve dijkversterkingen". Bij dijkversterkingen in de grond is de versterking gemaakt van grond. Deze grond kan uit eigen gebied komen of aangevoerd worden vanuit een andere locatie. Constructieve dijkversterkingen zijn versterkingen die gemaakt zijn van een ander materiaal dan grond. Hierbij worden elementen of stoffen in de grond gebracht, die krachten en/of momenten kunnen opnemen en/of de grondwaterstromen kunnen beïnvloeden.

Uit het MKI bouwstenen model is gebleken dat constructieve dijkversterkingen meer milieubelastend zijn dan dijkversterkingen in grond. De hoogte van de milieubelasting van constructieve dijkversterkingen is afhankelijk van het soort materiaal en de benodigde hoeveelheid. Zo is een kistdam meer milieubelastend dan een damwand omdat voor een kistdam veel meer materiaal nodig is. De hoogte van de milieubelasting van dijkversterkingen in grond is afhankelijk van de hoeveelheden en van de transport afstand. Zo is uit het model gebleken dat grond die van een andere locatie aangevoerd moet worden veel meer milieubelastend is dan gebiedseigen grond. Dit omdat er voor gebiedseigen grond bijna geen transport nodig is.

Deelvraag 5: *Welke MKI-bouwstenen zijn er nodig/wenselijk voor referentiedijkprofielen (standaard) en voor circulaire alternatieven?*

De bouwstenen die wenselijk zijn voor referentieprofielen zijn de bouwstenen die binnen Lievense het vaakst

toegepast worden. Dit zijn onderstaande bouwstenen. Deze bouwstenen zijn dan ook in het MKI bouwstenen model opgenomen.

- Grondoplossingen binnendijks
- Grondoplossingen buitendijks
- Grondoplossingen kruin
- Verhard oppervlak
- Verankerde damwand
- Kistdam
- Diepwand
- Betonnen keermuur
- Geotextiel
- Harde verholen bekleding
- Harde verholen constructie
- Grindkoffer

Deelvraag 6: ***Welke data zijn nodig om de MKI-bouwstenen te bepalen en welke data zijn wel/niet beschikbaar? (wat ontbreekt)***

Om de MKI score van een bouwsteen te bepalen zijn er een aantal gegevens nodig. De hoeveelheden en afmetingen van een bouwsteen en de MKI scores van de materialen waaruit een bouwsteen bestaat. Deze MKI scores zijn door de nationale milieudatabase bepaald door middel van de rekenmethodiek van Levenscyclusanalyse (LCA).

Deelvraag 7: ***Wat is een geschikte methode die - vertaald in een ontwerptool - bruikbaar is voor ontwerpers om snel ontwerpalternatieven voor dijkdoorsneden te genereren en MKI / circulariteits-resultaten te vergelijken?***

Het gemaakte MKI bouwstenen model biedt de mogelijkheid om de MKI-waarde van verschillende dijkvakken voor verschillende ontwerpalternatieven te berekenen en om deze alternatieven vervolgens met elkaar te vergelijken. Daarnaast biedt het model ook de mogelijkheid om de MKI score per bouwsteen te berekenen hierdoor kan gekeken worden welke bouwsteen het minst milieubelastend is. Waardoor gestreefd kan worden naar een duurzaam ontwerp. Door een primair circulariteit percentage in te voeren kan er een reductie op de MKI score toegepast worden voor het gebruik van hergebruikte materialen, hierdoor wordt circulariteit aan het model toegevoegd.

Deelvraag 8: ***Op welke wijze is het resultaat van deelvraag 7 eenvoudig te modificeren om het te kunnen inzetten als advies/beslissingsinstrument, door daar tevens informatie over LCC / Investeringskosten aan toe te voegen?***

Het MKI bouwstenen model kan ingezet worden om te zoeken naar het meest duurzame dijkversterkingsontwerp. Dit wordt gedaan door verschillende dijkversterkingsoplossingen met elkaar te vergelijken en vervolgens de minst milieubelastende oplossing toe te passen. Het MKI bouwstenen model kan voor ontwerpers dus dienen als advies/beslissingsinstrument.

Door LCC / Investeringskosten toe te voegen aan het model kan gezocht worden naar een ontwerp wat in het budget past maar ook duurzaam is.

Het antwoord op de centrale vraag*: **"Op welke wijze zijn MKI-bouwstenen optimaal in te zetten voor (opdrachtgevers), ontwerpers en bouwers om circulaire dijkontwikkeling te stimuleren?"*** luidt als volgt.

Aan de hand van het beantwoorden van de deelvragen is het MKI bouwstenen model ontworpen. Door gebruik te maken van het MKI bouwstenen model worden ontwerpers gestimuleerd om de meest duurzame dijkversterkingsoplossingen toe te passen in hun ontwerp. Aan de hand van het model kan berekend worden wat de MKI score van een ontwerp is. Vervolgens kan gekeken worden welke fase en welke bouwstenen bijdragen aan de totale MKI score van een variant en waar verbeteringen en innovaties in de bouwstenen leiden tot een significant betere MKI score.

Door in dit model ook circulariteit op te nemen worden ontwerpers gestimuleerd om na te denken over de mogelijkheden van circulariteit en de voordelen hiervan. Hierdoor zullen ontwerpers vaker voor een duurzame en circulaire oplossing kiezen. Het gebruik van circulaire materialen leidt niet alleen tot een lagere MKI score voor het ontwerp maar ook tot een toekomst waarbij geen schaarste in grondstoffen meer zijn.

13. Aanbevelingen

Het MKI bouwstenen model zoals beschreven in dit afstudeerrapport is een eerste versie en zal door middel van testen en eventuele uitbreidingen nog verbeterd kunnen worden. Hieronder worden een aantal aanbevelingen voor het model beschreven.

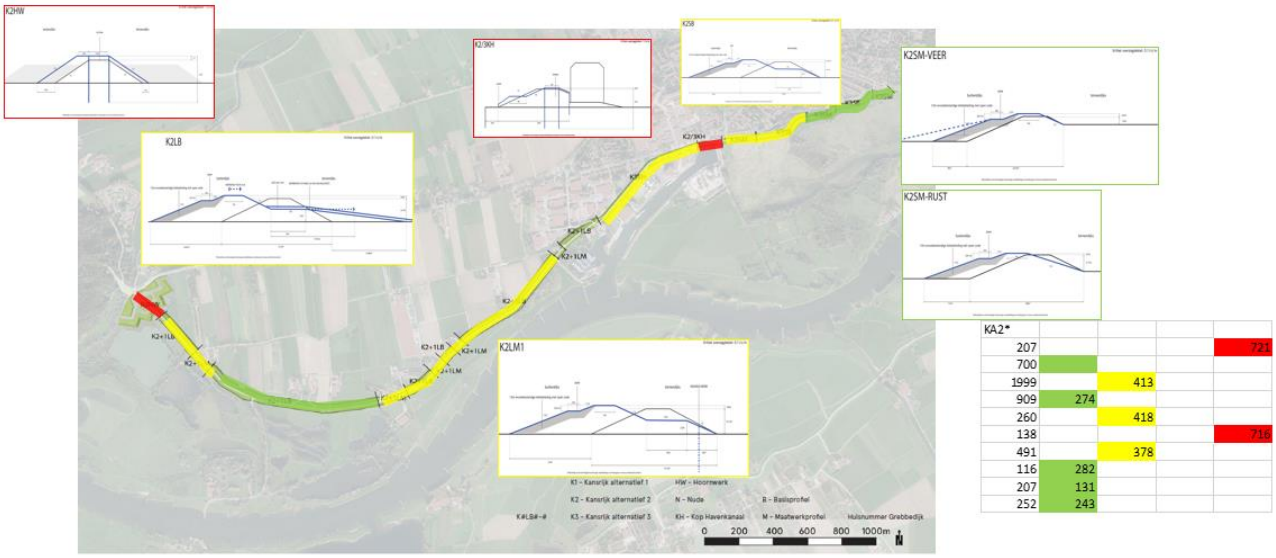
Door het MKI bouwstenen model te gebruiken is gebleken dat het model met de huidige database aan materialen en bouwstenen allen te gebruiken is voor dijken. Door het model uit te breiden met meer materialen en bouwstenen kan het model gebruikt worden voor andere waterbouwkundige kunstwerken zoals bruggen. Ook zou door het uitbreiden van de database het model gebruikt kunnen worden om de gebiedsontwikkeling, die vaak plaats vind bij een dijkversterking, te berekenen. Dit zou bijvoorbeeld toegepast kunnen worden om ook de uiterwaard die bij de Sterke Lekdijk (Salmsteke) in het ontwerp zit te kunnen berekenen in het MKI bouwstenen model in plaats van alleen de dijkversterking. Hierdoor zullen de resultaten meer overeenkomstig zijn met de werkelijkheid.

Verder wordt aangeraden het MKI bouwstenen model verder te testen, aan de hand van andere projecten dan “de Grebbedijk” en “de Sterke Lekdijk (Salmsteke)”. Dit kan gedaan worden door Lievense zelf maar ook door bijvoorbeeld waterschappen. Een mogelijk project van Lievense waarbij gebruik gemaakt kan worden van het MKI bouwstenen model is het project de Sterke Lekdijk (Jaarsveld). Dit project is onderdeel van het project de Sterke Lekdijk zoals beschreven in paragraaf 3.4.2. Aan de hand van verder testen wordt gekeken of alle gewenste output in grafieken wordt weergegeven of dat er nieuwe grafieken toegevoegd moeten worden voor analyses of rapportages. Ook wordt gekeken of er voldoende materialen aanwezig zijn in het model en of er voldoende opties zijn on nieuwe materialen toe te voegen in het model. Daarnaast wordt gekeken of er voldoende standaard bouwstenen aanwezig zijn in het model.

Het bouwstenenmodel is eenvoudig als ontwerpinstrument te gebruiken. Aangeraden wordt om duurzaamheidsadviseurs en technisch medewerkers die zich bezig houden met dijkontwerpen en kostenberekeningen voor dijken met dit instrument te laten werken in de praktijk vanuit het perspectief van ontwerpen en toetsen. Dit zorgt dat het aspect circulariteit beter wordt ingezet in ontwerpprocessen en een integraal onderdeel wordt van dijkontwerpen.

Het model zou ook verder uitgebreid kunnen worden met LCC / Investeringskosten. Wanneer deze kosten aan het model toegevoegd worden kunnen ontwerpers makkelijk de goedkoopste en meest duurzame oplossing vinden. Dit kan gedaan worden door de SSK raming (standaard systematiek voor kosten raming) aan het MKI bouwstenen model te koppelen.

Een andere aanbeveling voor het MKI bouwstenen model is het gebruik van het programma GIS (Geografisch InformatieSysteem). Door gebruik te maken van de programma GIS kunnen de resultaten uit het model verder gevisualiseerd worden. In Figuur 62 is een eerste indruk weergegeven over hoe zo een visualisatie er in GIS uit zou kunnen zien. Hierin hebben de dijkvakken verschillende kleuren gekregen die aangeven of dat dijkvak een hoge (rood) of lage (groen) MKI score heeft. Door vervolgens op een dijkvak te klikken kunnen de MKI scores van dat dijkvak bekeken worden. Ook zouden afbeeldingen van de doorsnedes van een dijkvak hier aan gekoppeld kunnen worden.



KA2*				
207				721
700				
1999		413		
909	274			
260		418		
138				716
491		378		
116	282			
207	131			
252	243			

Figuur 62. Mogelijke visualisatie in GIS.

Bibliografie

Adapt. (2019). *Taludverflauwing*. Opgehaald van Adaptalkmaar: https://adaptalkmaar.nl/portfolio-item/dijken-schermer-versterken/taludverflauwing/

Care4Circulair. (2019, Juni 6). *Ketens sluiten met circulaire producten*. Opgehaald van Modulocare4circulair: https://www.modulocare4circulair.nl/sluitende-keten-met-circulaire-producten/

De Ingenieur. (2017, November 13). *Circulariteit is meer dan hergebruik afval*. Opgehaald van De ingenieur: https://www.deingenieur.nl/artikel/circulariteit-is-meer-dan-hergebruik-afval

Deltares. (2012). *Stabilisatie binnentalud met steunberm*. Opgehaald van Deltares: https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Stabilisatie_binnentalud_met_steunberm

Deltares. (2017). *Aanleg pipingberm*. Opgehaald van Deltares: https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Aanleg_pipingberm

Deltares. (2019). *Verflauwen van het binnentalud*. Opgehaald van Deltares: https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Verflauwen_van_het_binnentalud

Dubocalc. (2019). *Wat is dubocalc*. Opgehaald van Dubocalc: https://www.dubocalc.nl/wat-is-dubocalc/

Feddes/Olthof Landschaparchitecten. (2015). *Dijkenkansenkaart.* Utrecht: Feddes/Olthof Landschaparchitecten.

GPS. (2019). *Wat is circulair bouwen?* Opgehaald van GPR: https://www.gprsoftware.nl/circulair-bouwen/

Halter, W., Groenouwe, I., & Tonneijck, M. (2018). *Handboek Dijkenbouw.* Utrecht: Hoogwaterbeschermingsprogramma.

HHNK, W. (Regisseur). (2013). *Steunberm* [Film].

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. (2019, November 13). *Sterke Lekdijk*. Opgehaald van HDSR: https://www.hdsr.nl/beleid-plannen/sterke-lekdijk/

Kessel, N. G. (2019, December 19). *Vijf aanbevelingen voor duurzame dijken*. Opgehaald van Royal Haskoning DHV: https://www.royalhaskoningdhv.com/nl-nl/blog/water/vijf-aanbevelingen-voor-duurzame-dijken/10433

Kleij, F. v. (2019). *Idealen*. Opgehaald van Studio florisvanderkleij: https://florisvanderkleij.nl/idealen/

Koopmans, R. (2018). *POVM Grondverbeteringen.* POV.

Lievense | WSP. (2020). *Integraal Ontwerp Salmsteke.* Nieuwegein: Lievense | WSP.

Minister van Infrastructuur en Millieu. (2017, januari 1). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017*. Opgehaald van Overheid Wettenbank: https://wetten.overheid.nl/BWBR0039040/2017-01-01

Movares, Heijmans, de Vries & van de Wiel. (2015, November 10). *Hoe werkt de waterontspanner*. Opgehaald van Waterontspanner: https://waterontspanner.nl/

Platform CB'23. (2019). *Framework Circulair Bouwen.* Platform CB'23 .

Rijkers, R. (2020). *De waterontspanner*. Opgehaald van Movares: https://movares.nl/projecten/de-waterontspanner/

Rijksoverheid. (2018, juni 29). *Binnendijkse verzwaring - Optimalisatie van het dwarsprofiel*. Opgehaald van Helpdesk Water: https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192693/binnendijkse/

Rijksoverheid. (2018, juni 2018). *Buitendijkse verzwaring - Optimalisatie van het dwarsprofiel*. Opgehaald van Helpdesk Water: https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192706/buitendijkse/

Rijksoverheid. (2018, juni 29). *Kistdammen - Constructieve elementen*. Opgehaald van Helpdesk Water: https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192880/kistdammen-constructieve-elementen/

Rijksoverheid. (2018, juni 29). *Kwelschermen - Beinvloeding stijghoogte en stroming van grondwater*. Opgehaald van Helpdesk Water: https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192893/kwelschermen/

Rijkswaterstaat. (2017). *Dijkverlegging*. Opgehaald van Rijkswaterstaat: https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/ruimte-voor-de-rivieren/index.aspxmeasure/dijkverlegging/

Rijkswaterstaat. (2019). *DuboCalc*. Opgehaald van Rijkswaterstaat: https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/zakendoen-met-rijkswaterstaat/inkoopbeleid/duurzaam-inkopen/dubocalc/index.aspx

Rijkswaterstaat. (2020, Januari). *Circulaire dijken.* Opgehaald van Rijkswaterstaat: file:///C:/Users/kraac/Downloads/2020-01_circulaire_dijken_def.pdf

Rijkswaterstaat. (2020, februari 27). *Landelijk Veiligheidsbeeld - Normering*. Opgehaald van Waterveilighiedsportaal: https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm

Rijkswaterstaat. (2020, februari 27). *Landelijke Veiligheidsbeeld - Voortgangsindicatoren*. Opgehaald van Waterveiligheidsportaal: https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/progress-indicators

Rivierenland, W. (Regisseur). (2015). *Waterschap Damwanden* [Film].

rivierenland, W. (Regisseur). (2015). *Waterschap diepwanden* [Film].

Ruimte voor de Rivier. (2017). *Dijkverhoging*. Opgehaald van Ruimte voor de rivier: https://ruimtevoorderivier.jouwweb.nl/project/technisch/dijkverhoging

Ruimtevoorderivier. (sd). *Dijkverlegging*. Opgehaald van Ruimtevoorderivier: https://www.ruimtevoorderivier.nl/measure/dijkverlegging/

Ruimtevoorderivier. (sd). *Kunnen de dijken niet gewoon worden verhoogd?* Opgehaald van Ruimtevoorderivier: https://www.ruimtevoorderivier.nl/faq/kunnen-de-dijken-niet-gewoon-worden-verhoogd/

Sanders, P. i. (2013). *Inleiding Civiele Techniek.* Delft: TU Delft.

Steenbergen, E. (2017). *Veiligheidsoordeel Grebbedijk dijktraject 45-1.* Apeldoorn: Waterschap Vallei en Veluwe.

ter Horst, W., Lokin, L., Duits, M., van Montfoort, M., & Delhez, R. (2018). *Veiligheidsoordeel normtraject 15-1.* Leiden: Hoogheemraadschap De stichtse Rijnlanden.

The Green House. (2020, Januari 15). *Circulariteit is booming, maar wat is het?* Opgehaald van The green house: https://www.thegreenhouserestaurant.nl/circulariteit-is-booming-maar-wat-is-het/

Vree, J. d. (2018). *Grindkoffer*. Opgehaald van Joostdevree: https://www.joostdevree.nl/shtmls/grindkoffer.shtml

Vree, J. d. (2018). *Zandpaal*. Opgehaald van Joostdevree: https://www.joostdevree.nl/shtmls/zandpaal.shtml

Vree, J. d. (2019). *Diepwand*. Opgehaald van Joostdevree: https://www.joostdevree.nl/shtmls/diepwand.shtml

Vree, J. d. (2019). *Keermuur, keerwand, grondkering*. Opgehaald van JoostdeVree: https://www.joostdevree.nl/shtmls/keerwand.shtml

Vree, J. d. (2019). *Keermuur, Keerwand, Grondkering*. Opgehaald van Joostdevree: https://www.joostdevree.nl/shtmls/keerwand.shtml

Waterschap Vallei en Veluwe. (2014). *Grebbedijk - Deltadijk?* Wageningen: Waterschap Vallei en Veluwe.

Weersink, A., & Karssemeijer, P. (2019, oktober 10). *Bouwstenen voor een duurzame dijk*. Opgehaald van Lievense: https://lievense.com/wp-content/uploads/Land-en-Water_duurzamedijk_oktober2019.pdf

Wikipedia. (2019, juni 1). *Damwand*. Opgehaald van Wikipedia: https://nl.wikipedia.org/wiki/Damwand

Wikipedia. (2020). *Piping*. Opgehaald van Wikipedia: https://nl.wikipedia.org/wiki/Piping

Bijlage I – Werkplan

In onderstaan PDF bestand is het werkplan toegevoegd. Dit werkplan is aan het begin van de afstudeerstage geschreven en door de begeleiders goedgekeurd.

Werkplan – Cheyenne Kraag

Bijlage III – Veiligheidsnorm in kaart

III.1 Signaleringswaarde

III.2 Ondergrens

Bijlage IV – Veiligheidsopgave Nederland kaart (2020)

Bijlage V – Beschrijving alternatieven Grebbedijk

De Grebbedijk maakt onderdeel uit van dijkring 45 – Gelderse Vallei en beschermt de Gelderse Vallei tegen hoog water vanuit de Nederrijn. De dijk loopt van de hoge gronden bij Wageningen (Veluwe) naar de hoge gronden bij Rhenen (Utrechtse Heuvelrug) en vormt in zijn geheel het normtraject 45-1. De Grebbedijk is 5,5 kilometer lang. De Grebbedijk beschermt de gehele Gelderse Vallei tegen hoogwater vanuit de Neder-Rijn.

Kansrijke alternatieven

In kansrijk alternatief 1 wordt gekozen voor een dijk die alle landgebruiken doorsnijdt, daarbij zo compact mogelijk blijft en aansluit op het huidige profiel. De dijk blijft qua ruimtelijke verschijning zo dicht mogelijk bij het huidige beeld: een compact en steile dijk. Het ruimtebeslag wordt geminimaliseerd door de toepassing van compacte verstevigingsmethoden. De interactie tussen dijk en landschap is gericht op natuurontwikkeling. In de Plasserwaard wordt door het verdichten en uitbreiden van het bestaande ooibos en het herbestemmen van landbouwgrond voor natuur invulling gegeven aan de natuurdoelstellingen. Door ook in de Driehoek het hooilandbeheer te extensiveren kan hier het leefgebied van de kwartelkoning worden vergroot.

In kansrijk alternatief 2 heeft de dijk een breder profiel die zich naar zijn omliggende omgeving voegt door zijn ligging aan te passen. In dit alternatief reageert de dijk op zijn omgeving en zal zowel de ligging als het profiel van de dijk sterk wijzigen ten opzichte van de huidige situatie. De Grebbedijk wordt vooral in grond verstevigd en zal waar nodig worden verlegd en verbreed. De ruimteclaim van de dijk is relatief groot waardoor er uitwisseling is met landgebruiken op en rondom de dijk. De binnendijkse kruinverleggingen ter hoogte van de Plasserwaard creëert ruimte om op andere delen van de dijk te kiezen voor buitendijkse oplossingen. De verlegging biedt mogelijkheden voor seizoensgebonden recreatief medegebruik binnen het N2000 gebied ter hoogte van de Plasserwaard.

In kansrijk alternatief 3 anticipeert de dijk op een uniforme manier op de aangrenzende gebiedsambities en zorgt hierbij voor een hoge verblijfskwaliteit op de dijk. De kwaliteiten en potenties van zowel het landschappelijke – als stedelijke traject zijn uitgangspunt in dit alternatief. Er wordt voor beide trajecten een zo eenduidig mogelijk profiel nagestreefd en een inrichting die de gebruikswaarde en verblijfskwaliteit vergroot. De dijk anticipeert op ambities in het gebied en is daarmee te zien als een katalysator voor gebiedsontwikkeling.

Voorkeursalternatief

Het voorlopige voorkeursalternatief voor de Grebbedijk is een relatief compacte dijk die de Gelderse Vallei beschermt tegen overstromingen en die met het getrapte dijkprofiel de recreatieve route tussen de stuwwallen versterkt. De uiterwaarden tussen Rhenen en Wageningen zijn onderdeel van een groter uiterwaarden-landschap met hoge actuele natuurwaarden. Met het voorkeursalternatief worden deze gebieden aaneengesloten tot één groot natuurgebied, met een afwisselend recreatief medegebruik voor wandelaars, hardlopers, natuurliefhebbers en waterrecreanten. Bij Wageningen vormen de dijk en de uiterwaarden een uitloopgebied vanuit de stad en er zijn routes vanuit de stad naar de dijk en de uiterwaarden. Bij de Rhenense kant heeft de Blauwe kamer met een grote aantrekkende werking en wordt aan de voet van de grebbeberg worden de oude verdedigingslinies (het hoornwerk) hersteld. In de driehoek is een kleine waterplas voorzien met zwemmogelijkheden aan de noordoever en een natuurlijk ingerichte zuidoever (vanuit kansrijk alternatief 2). In de zuidkant van de driehoek is ruimte voor natuurontwikkeling (patroonnatuur) en meer overstromingsmomenten door ingrepen in de zomerkade.

Referentiedijk

Aan de hand van de KOSWAT-berekening is een referentiedijk opgesteld. Deze referentiedijk is opgedeeld in verschillende dijkvakken, deze zijn gebaseerd op de VKN-vakken. Voor de Grebbedijk betreft dit de volgende vakken:

Dijkvakcode	Lengte [km]
25-45-20-D	1,054
25-45-21-D	1,095
25-45-22-D	1,071
25-45-23-D	1,105
25-45-24-D	1,029
Totaal	**5,354**

Figuur 63. Dijkvakken Grebbedijk.

In de KOSWAT-berekening wordt onderscheid gemaakt naar 4 typen versterkingen:

1. Maatregel 1: Maatregel in grond
2. Maatregel 2: Kwelscherm
3. Maatregel 3: Stabiliteitswand
4. Maatregel 4: Kistdam

Binnen een dijkvak wordt één van de 4 typen versterkingen toegepast.

Bijlage VI – Beschrijving voorontwerp de Sterke Lekdijk (Salmsteke)

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden werkt aan versterking van de Lekdijk tussen Amerongen en Schoonhoven om te zorgen dat deze dijk in de toekomst voldoende veilig en sterk is. Het dijkversterkingstraject Salmsteke is 2 km lang en loopt vanaf de Rolafweg Zuid tot aan Jaarsveld. Deze dijkversterking wordt gekoppeld aan een bredere gebiedsontwikkeling. De ontwikkeling betreft dus niet alleen versterking van het dijklichaam maar ook nevenliggende uiterwaard met recreatie en natuurontwikkeling. Het idee is om het gebied in één keer op te pakken om overlast voor bewoners te beperken.

Figuur 64. Plankaart voor gebiedsontwikkeling Salmsteke. (Lievense | WSP, 2020)

Voor de dijkversterking diende een zo compact mogelijke dijk met zo min mogelijk impact op de omgeving ontworpen te worden. Hierbij is de ambitie om innovatieve, duurzame maatregelen toe te passen om de impact op de omgeving te minimaliseren. Hieronder zijn de maatregelen die voor het dijktraject toegepast worden beschreven:

- Langs het gehele dijktraject wordt het buitendijkse talud hersteld met een taludhelling van 1:3 en voorzien van nieuwe grasbekleding.
- Tussen de oostgrens van het plangebied en dijkpaal 91 is een opgave voor stabiliteit aan de binnenkant van de dijk aanwezig. Als maatregel wordt hier het talud hersteld naar 1:3 met daaronder een berm onder een helling van 1:20.
- Om de dijk bij het Veerhuis voldoende veilig te kunnen maken met behoud van het Veerhuis is vanwege het ruimtegebrek een constructieve oplossing benodigd. Hier is een Kistdam voor opgenomen.
- Voor het dijktraject tussen dijkpaal 95,5 en dijkpaal 107,5 is een pipingopgave aanwezig. Als maatregel voor de pipingopgave is gekozen voor een innovatieve, verticale pipingmaatregel aan de binnenzijde van de dijk. Hiervoor is een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) toegepast.

Voor de nieuwe inrichting van de uiterwaard zal en getijdengeul toegepast worden. Het uiteinde van één van de twee armen van de geul is door een drempel van de rest afgescheiden zodat zwemmen mogelijk wordt. Ook worden er natuurlijke graslanden op de brede oeverwal en dynamische geul- en rivieroevers toegepast. Het recreatiegedeelte wordt heringericht en krijgt een pleisterplaatsfunctie voor recreatie, parkeren en enkele evenementen. Daarbij genoeg ruimte voor een horecapaviljoen bij het nieuwe strand, de Polsstokvereniging Jaarsveld, het voetveer op de huidige locatie en het terugbrengen van een boothelling op een nieuwe locatie. Er is extra parkeerruimte op het recreatieterrein en bij een evenement of topdrukte, mits vooraf afgestemd met Staatsbosbeheer, ook op een deel van het natuurlijke grasland grenzend aan de dijk.

Bijlage VII - MKI Bouwstenen model

In deze bijlage is het MKI bouwstenen model bestand ingevoegd.

Lievense Het MKI bouwstenen model D

Bijlage VIII – Invoer en resultaten MKI bouwstenen model

In deze bijlage zijn de bestanden met de invoer en resultaten van het MKI bouwstenen model toegevoegd. Voor de Grebbedijk bestaat dit bestaat uit 6 bestanden, voor De Sterke Lekdijk (Salmsteke) bestaat dit uit 1 bestand.

VIII.1 Grebbedijk

1. Invoer en resultaten Voorkeursalternatief met waterplas

Lievense Het MKI bouwstenen model D

2. Invoer en resultaten Voorkeursalternatief zonder waterplas

Lievense Het MKI bouwstenen model D

3. Invoer en resultaten Kans alternatief 1

Lievense Het MKI bouwstenen model D

4. Invoer en resultaten Kans alternatief 2

Lievense Het MKI bouwstenen model D

5. Invoer en resultaten Kans alternatief 3

Lievense Het MKI bouwstenen model D

6. Vergelijking van de verschillende varianten

Vergelijking Alternatieven Grebbe

VIII.2 De Sterke Lekdijk (Salmsteke)

Lievense Het MKI bouwstenen model D

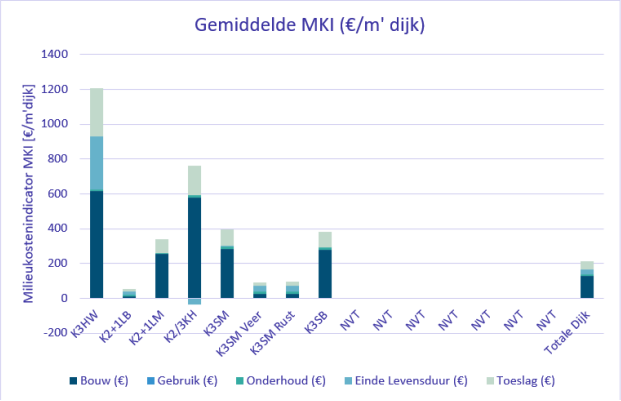
Bijlage IX – Samenvatting in grafieken – Grebbedijk

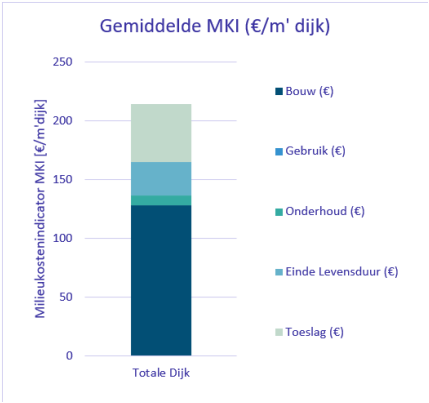
IX.1 Voorkeursalternatief met waterplas

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

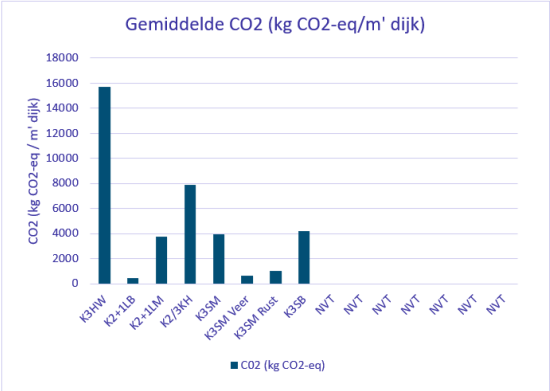
Projectnaam:	Grebbedijk	Kengetallen dijk		*geen onderbouwing circulariteitspercentage vereist*
Plaats:	Wageningen	Lengte dijk (m)	4578	
Variant:	Voorkeursalternatief met waterplas	MKI [€/m']	214	
		MKI dijk [€]	980976	
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag	CO2 gem [kg/m']	2330	
Datum:	10-6-2020	CO2 dijk [kg]	10666585	

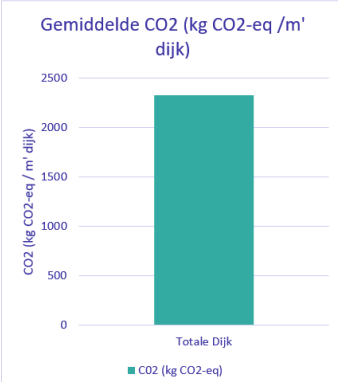
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



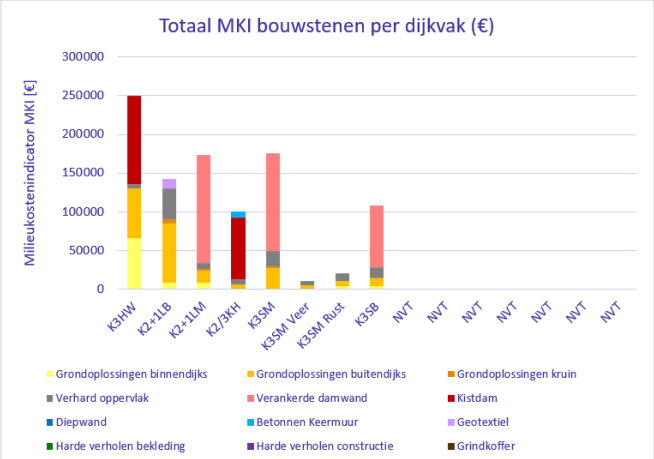


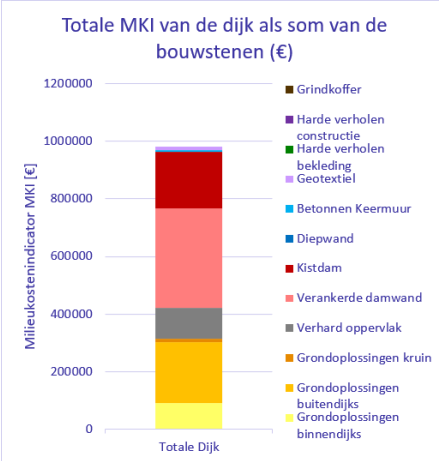
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



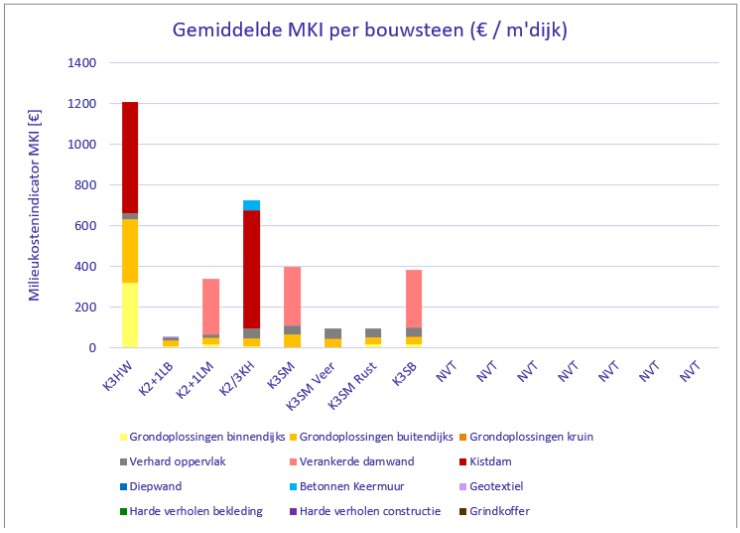


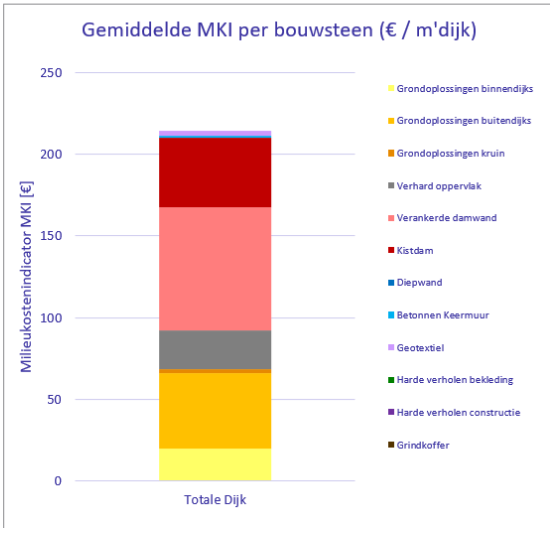
MKI per bouwsteen (€)



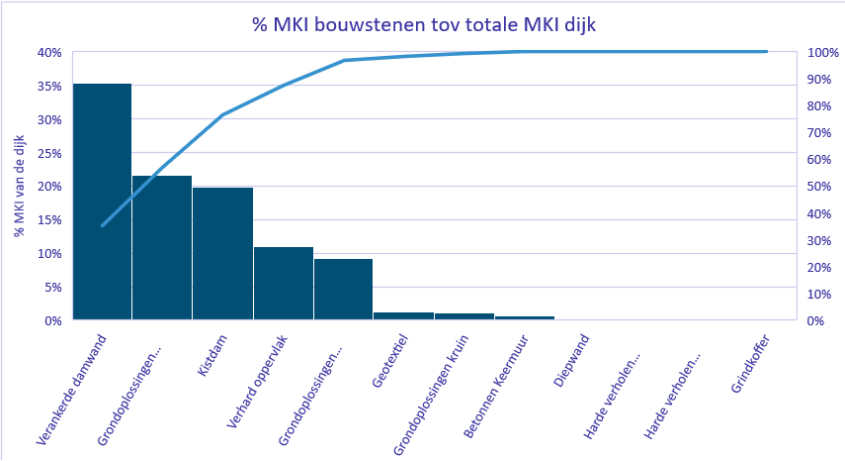


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

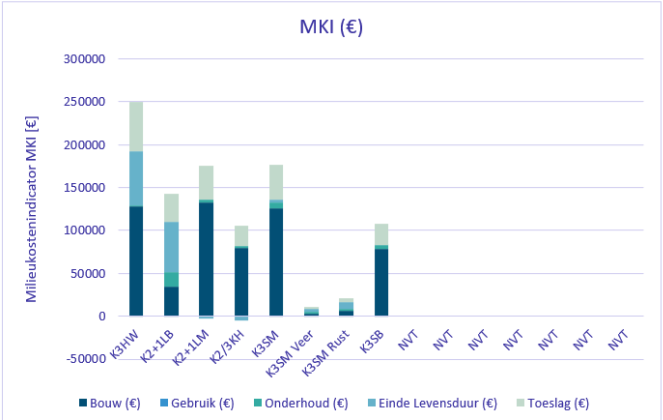


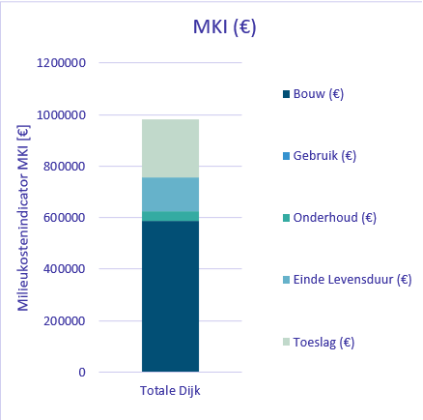


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

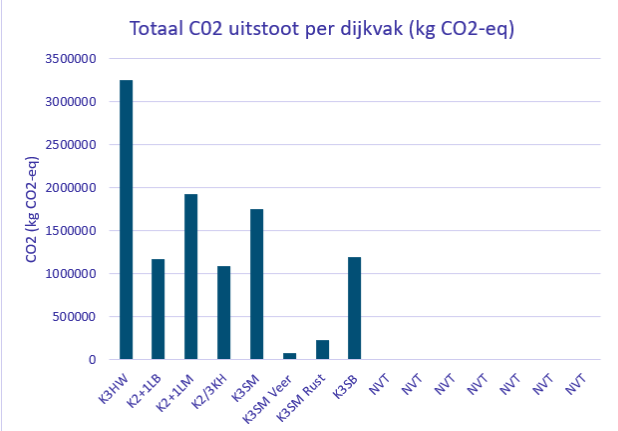


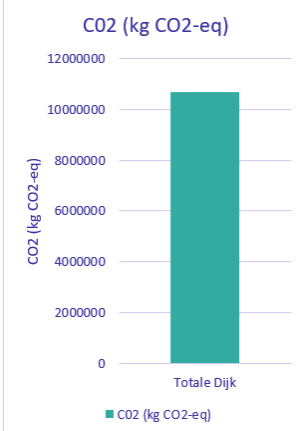
Mileukostenindicator (€)



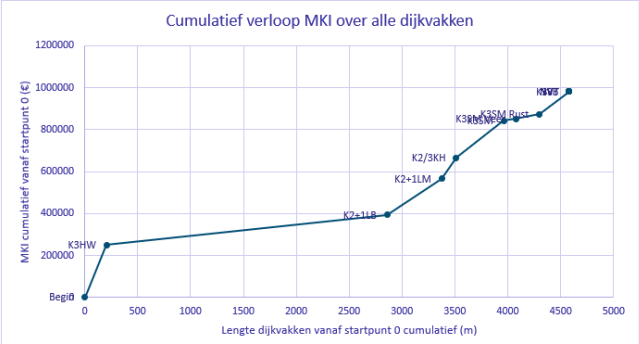


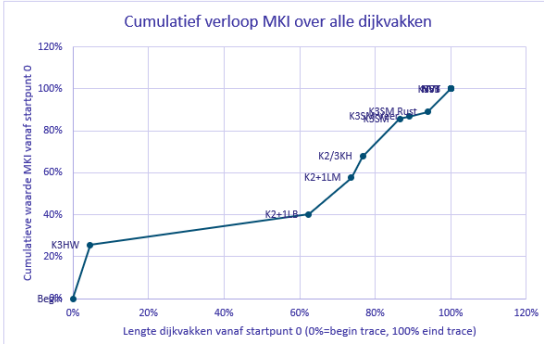
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk



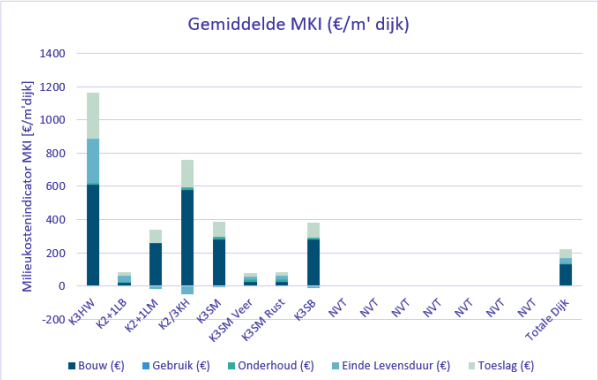


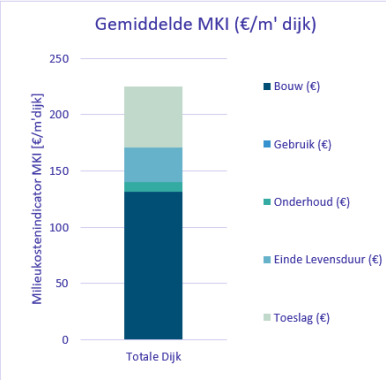
IX.2 Voorkeursalternatief zonder waterplas

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

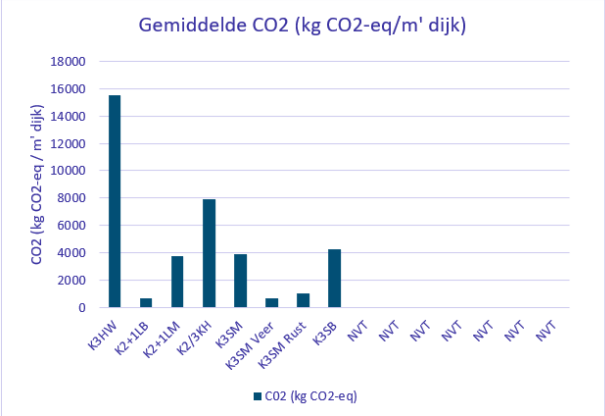
Projectnaam:	Grebbedijk	Kengetallen dijk		*onderbouwing circulariteitspercentage vereist*
Plaats:	Wageningen	Lengte dijk (m)	4578	
Variant:	Voorkeursalternatief zonder waterplas	MKI [€/m']	233	
		MKI dijk [€]	1065978	
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag	CO2 gem [kg/m']	2447	
Datum:	10-6-2020	CO2 dijk [kg]	11201350	

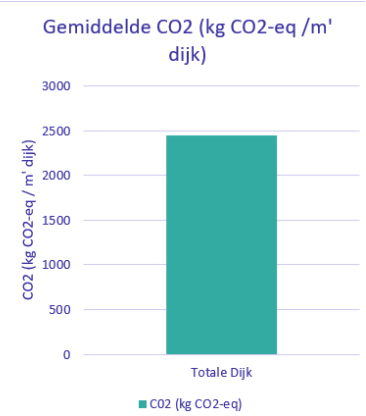
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



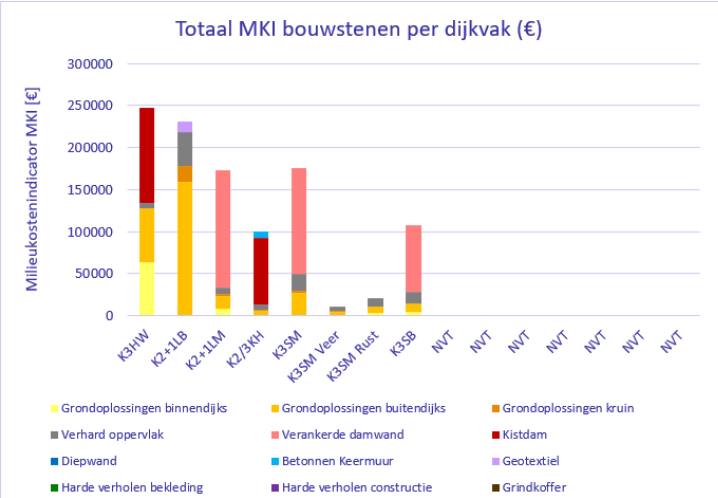


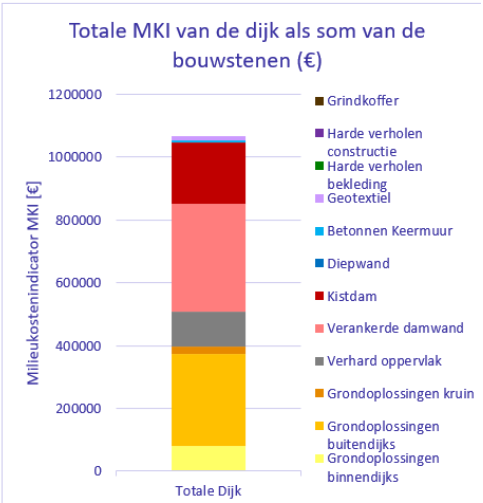
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



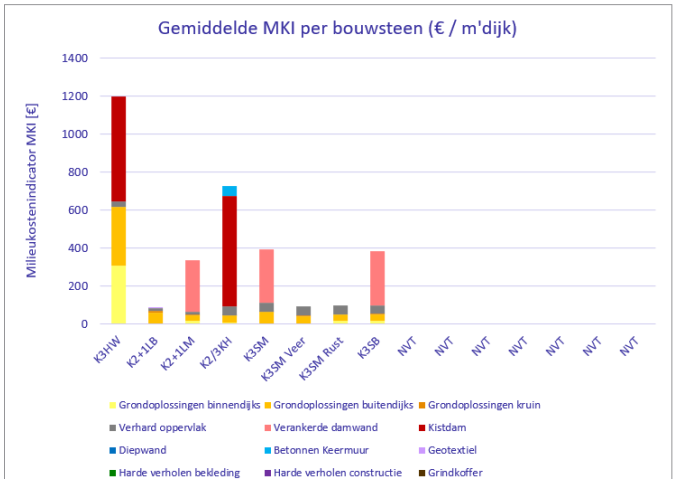


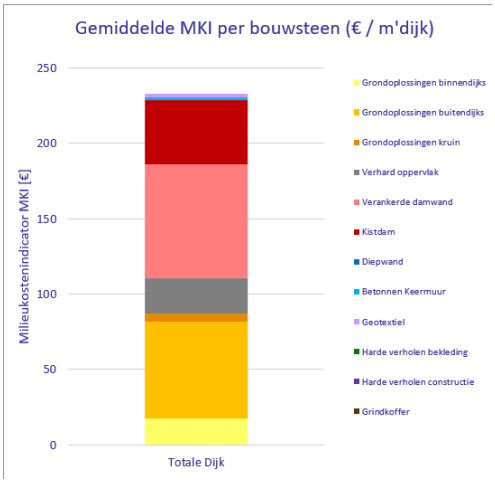
MKI per bouwsteen (€)



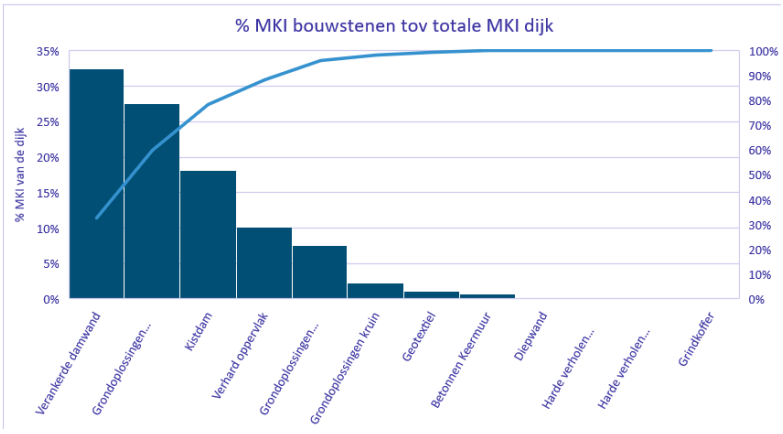


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

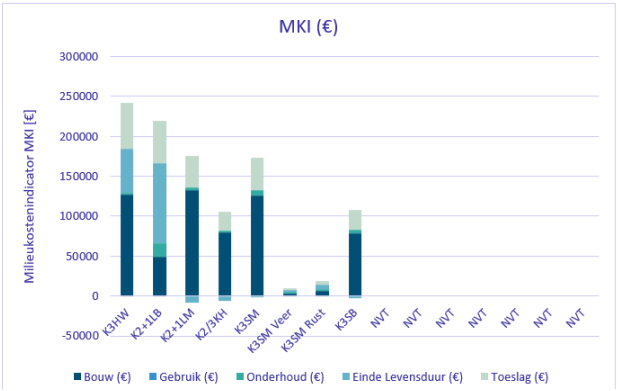


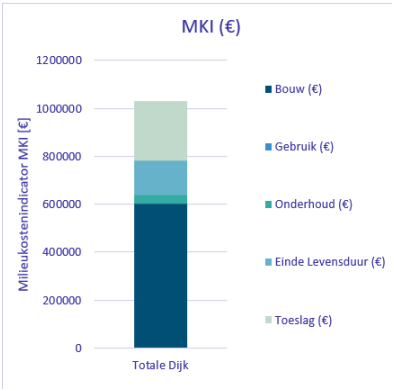


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

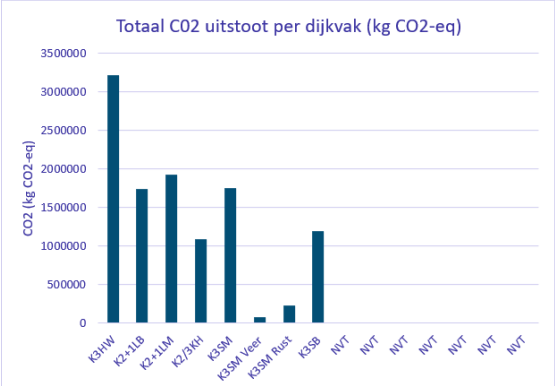


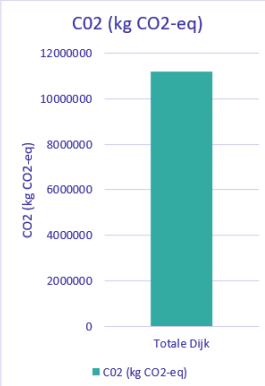
Mileukostenindicator (€)



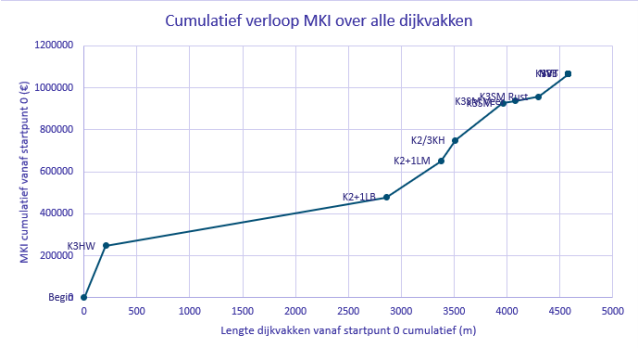


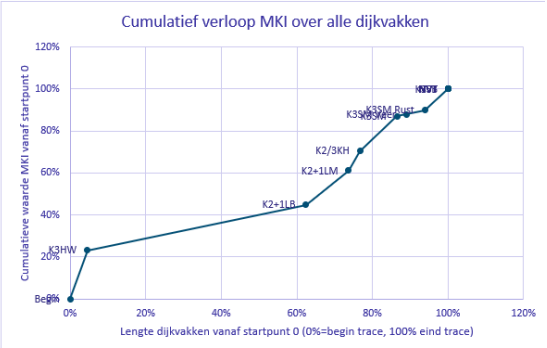
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk





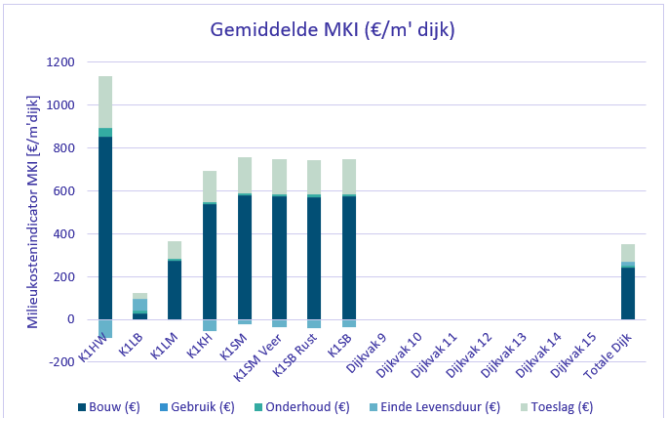
IX.3 Kans alternatief 1

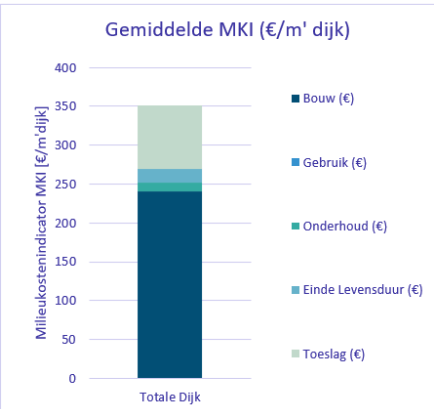
LIEVENSE | WSP

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

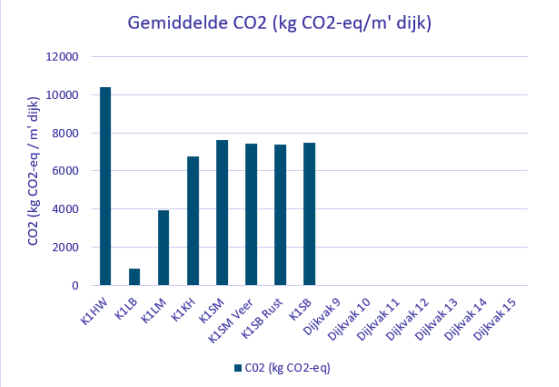
Projectnaam:	Grebbedijk	Kengetallen dijk		
Plaats:	Wageningen	Lengte dijk (m)	4577	*geen onderbouwing circulariteitspercentage vereist*
Variant:	Kans alternatief 1	MKI [€/m']	351	
		MKI dijk [€]	1604544	
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag	CO2 gem [kg/m']	3419	
Datum:	10-6-2020	CO2 dijk [kg]	15650202	

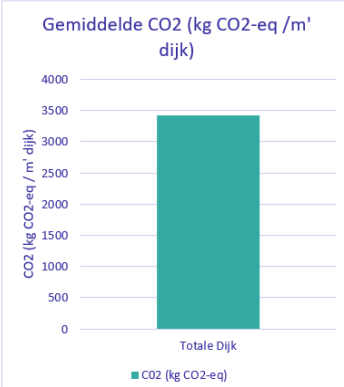
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



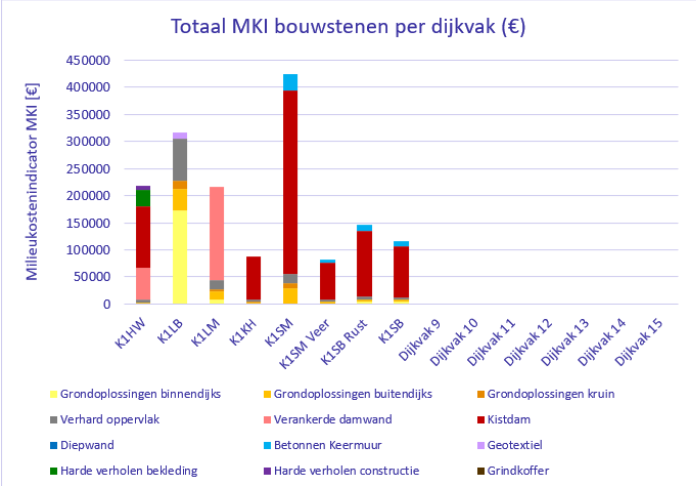


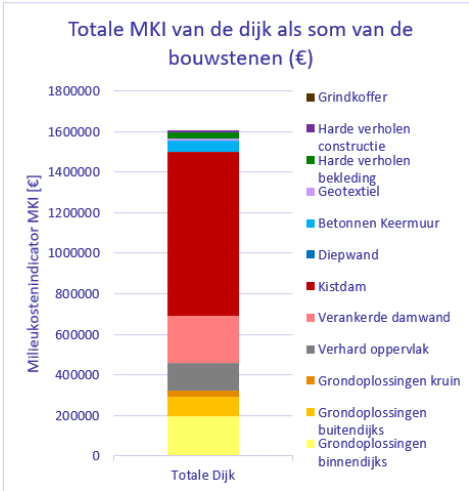
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



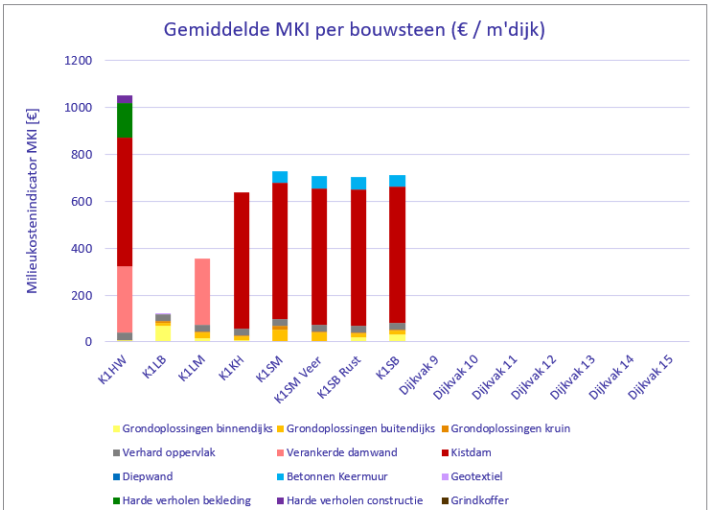


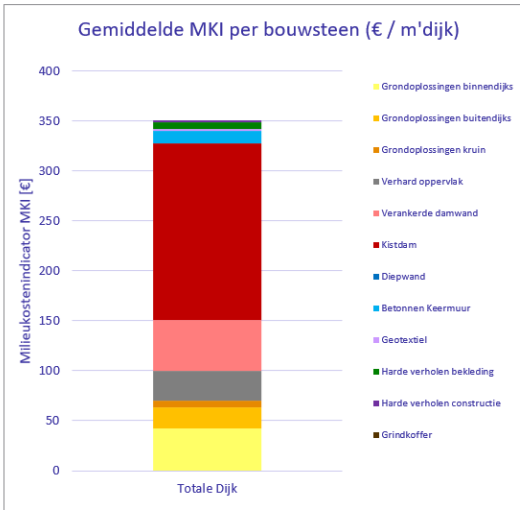
MKI per bouwsteen (€)



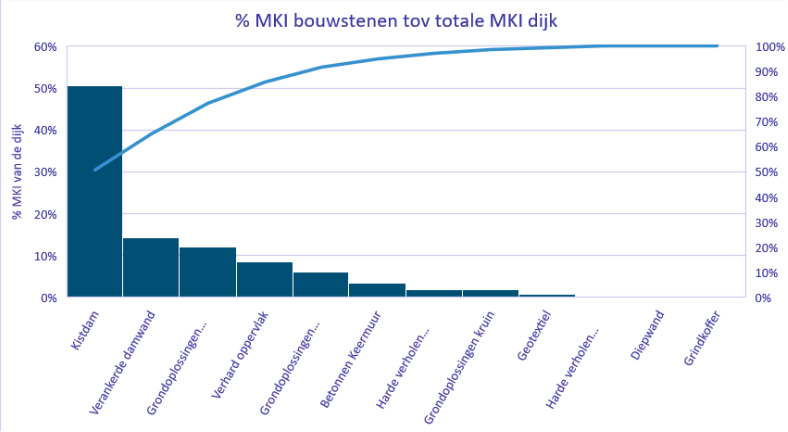


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

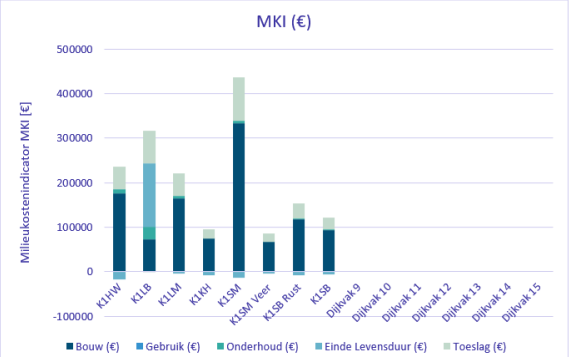


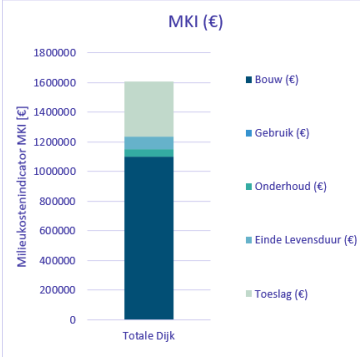


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

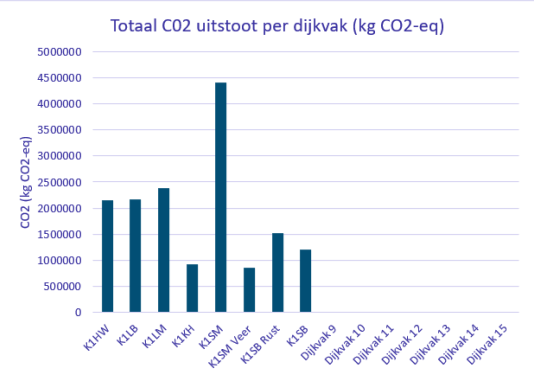


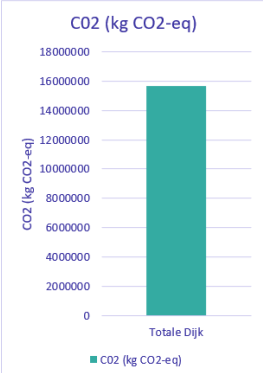
Mileukostenindicator (€)



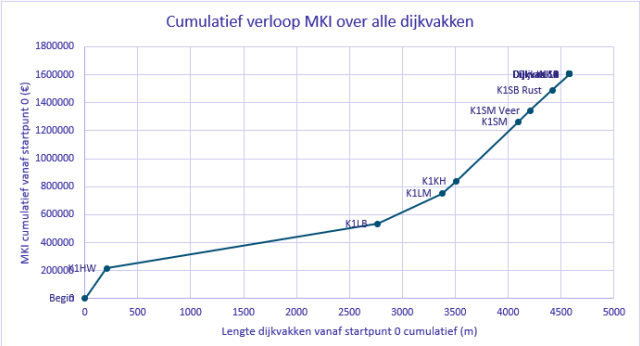


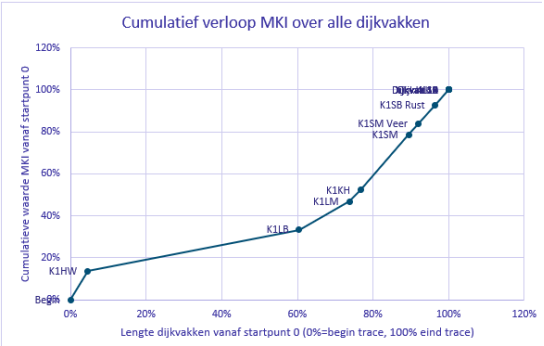
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk



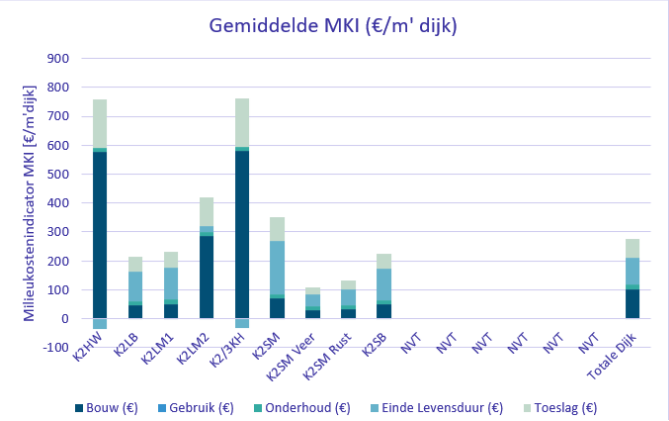


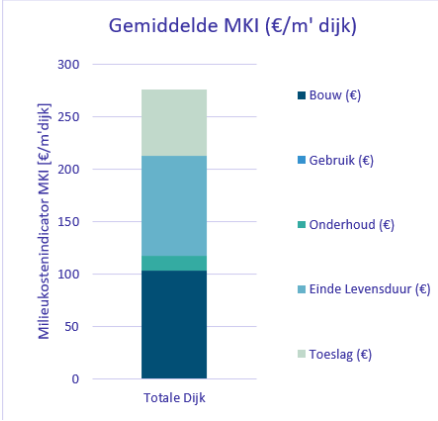
IX.4 Kans alternatief 2

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

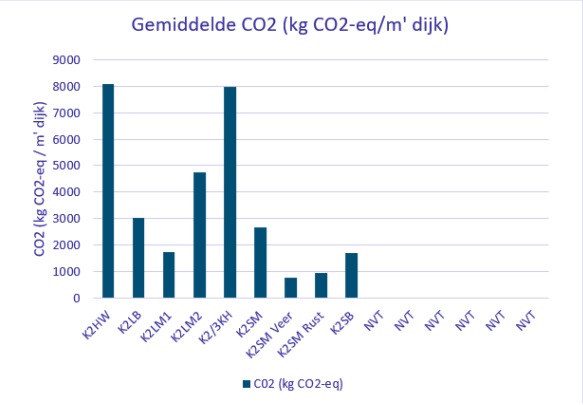
Projectnaam:	Grebbedijk	Kengetallen dijk			
Plaats:	Wageningen	Lengte dijk (m)	4579		*geen onderbouwing circulariteitspercentage vereist*
Variant:	Kans alternatief 2	MKI [€/m']	276		
		MKI dijk [€]	1263360		
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag	CO2 gem [kg/m']	2977		
Datum:	10-6-2020	CO2 dijk [kg]	13631605		

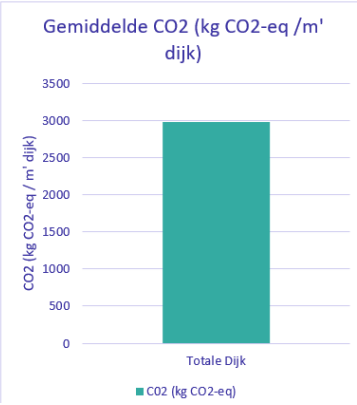
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



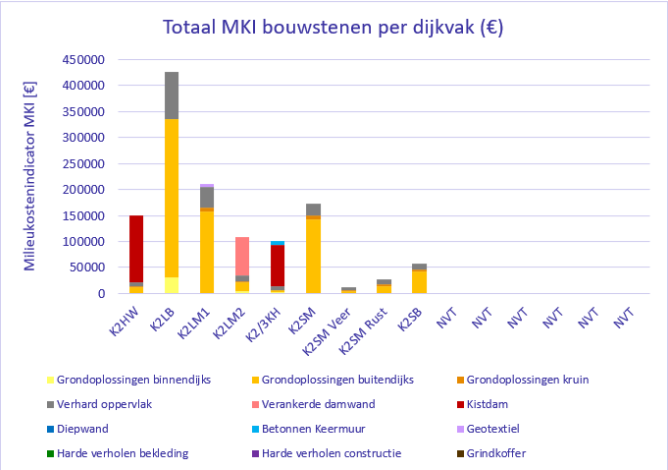


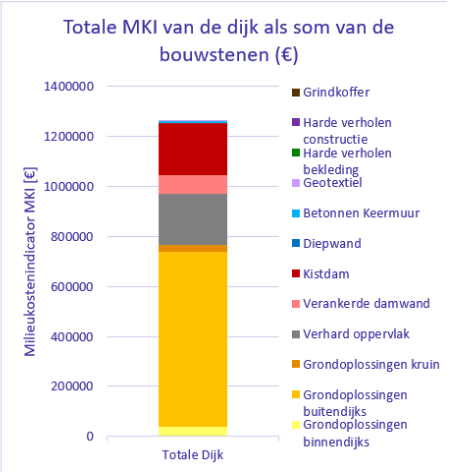
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



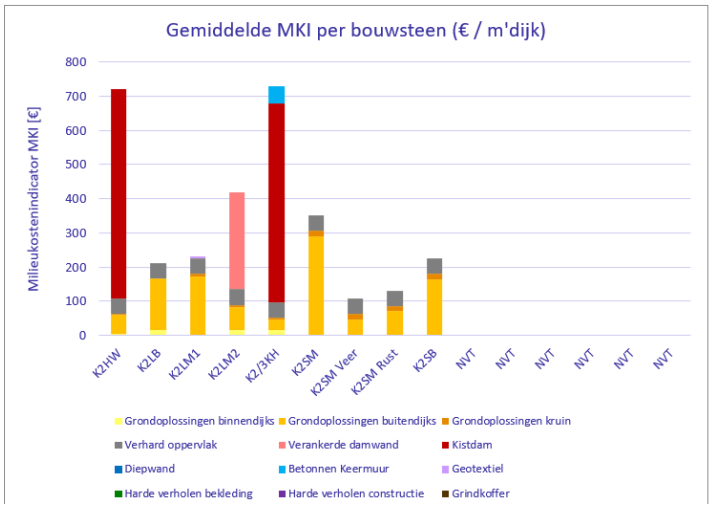


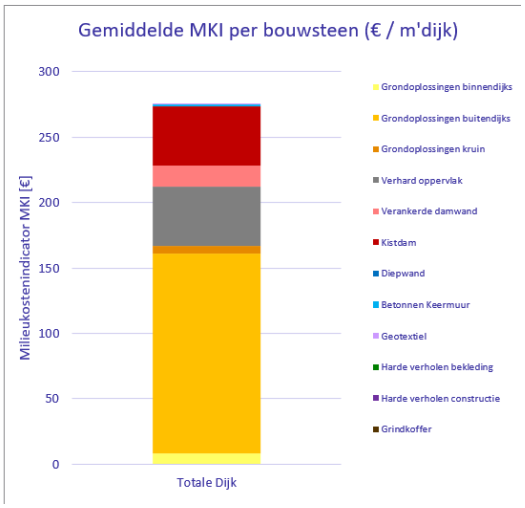
MKI per bouwsteen (€)



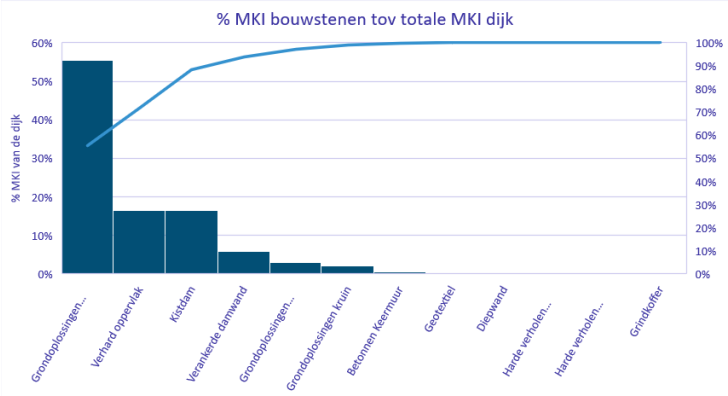


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

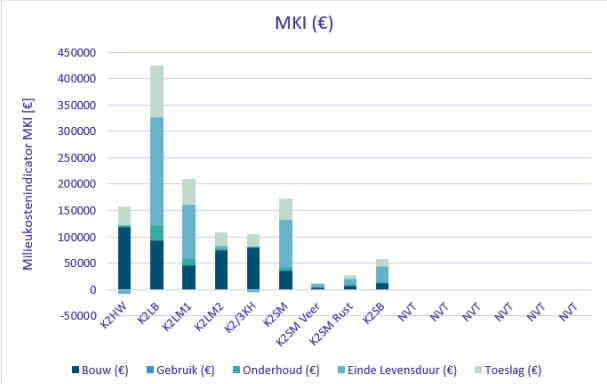


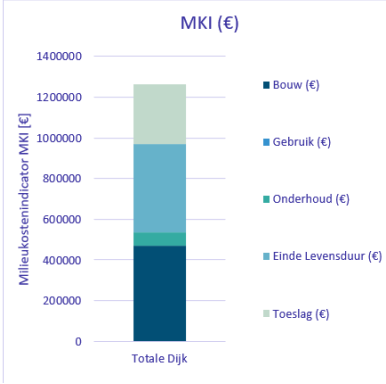


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

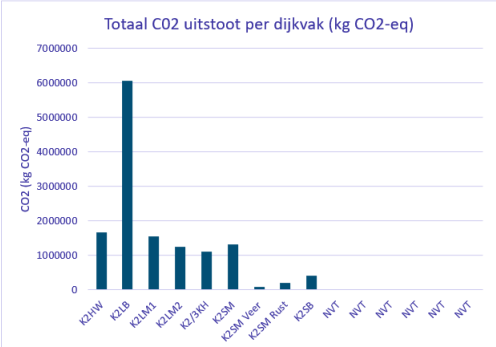


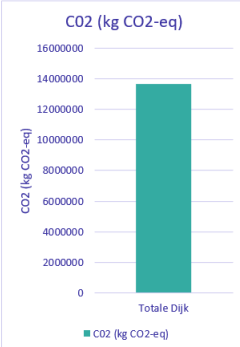
Mileukostenindicator (€)



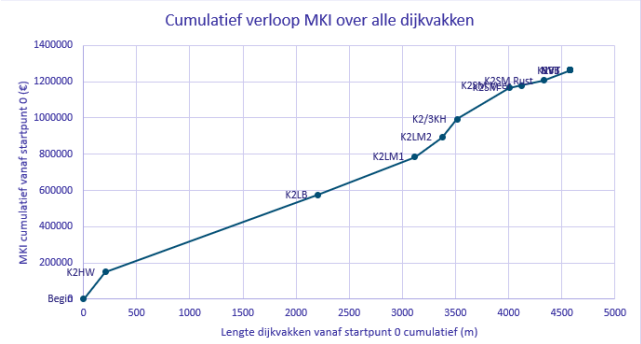


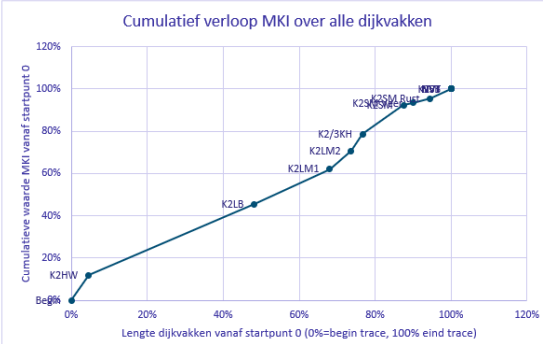
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk



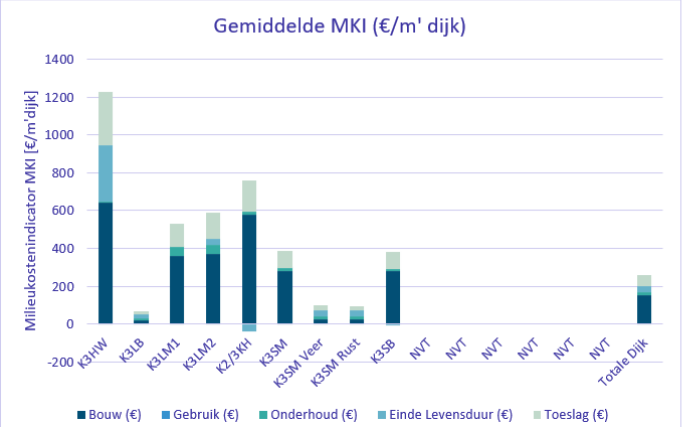


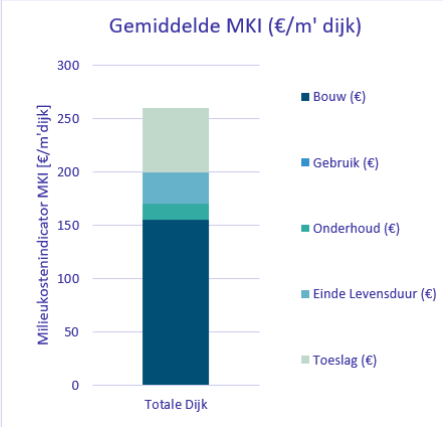
IX.5 Kans alternatief 3

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

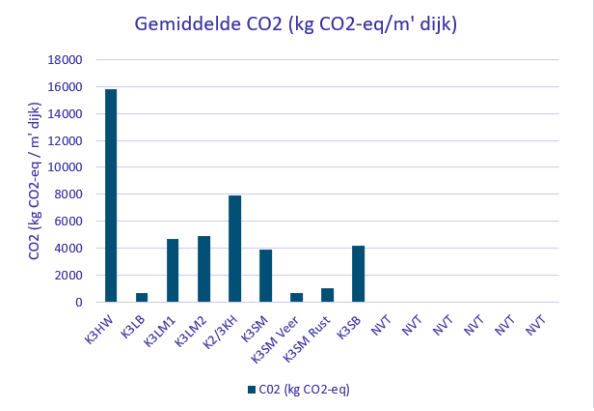
Projectnaam:	Grebbedijk	Kengetallen dijk		*geen onderbouwing circulariteitspercentage vereist*
Plaats:	Wageningen	Lengte dijk (m)	4580	
Variant:	Kans alternatief 3	MKI [€/m']	259	
		MKI dijk [€]	1187836	
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag	CO2 gem [kg/m']	2676	
Datum:	10-6-2020	CO2 dijk [kg]	12257580	

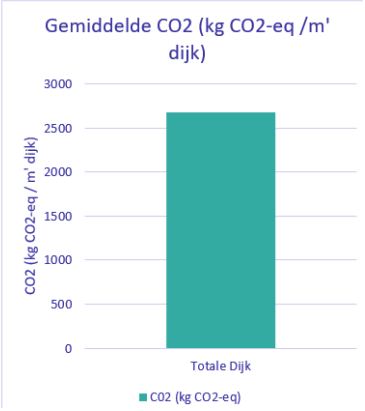
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



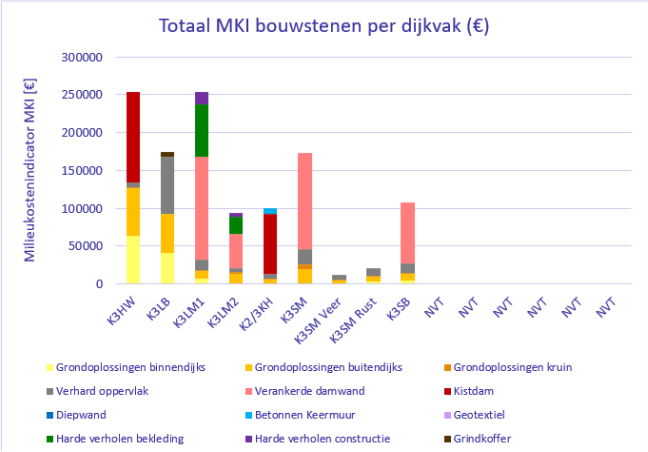


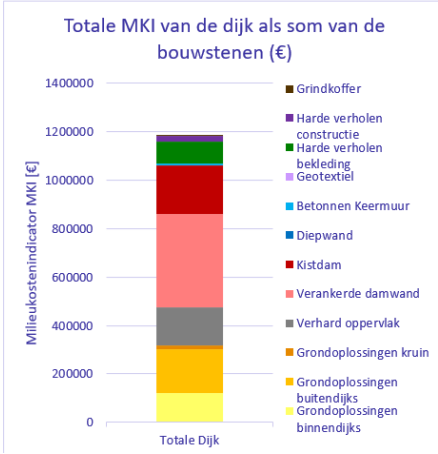
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



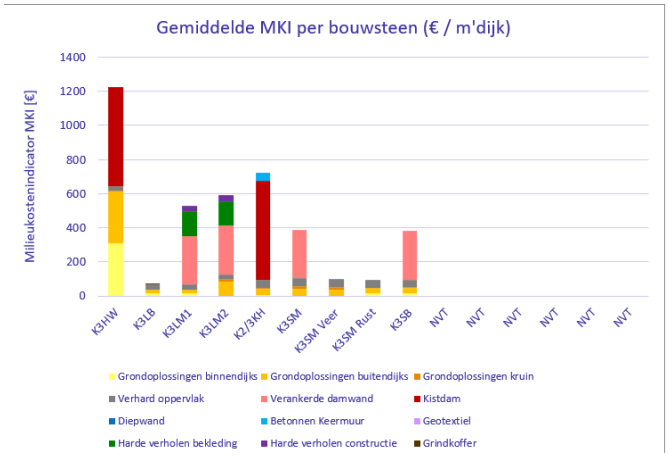


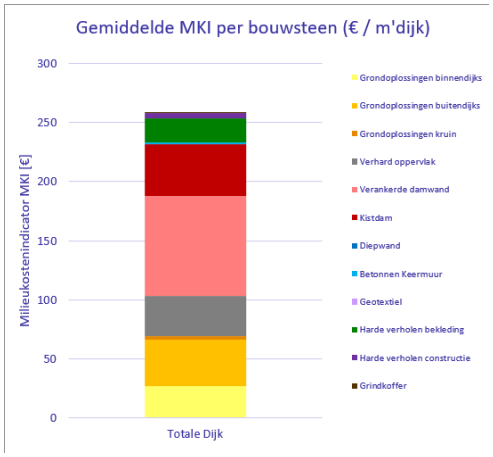
MKI per bouwsteen (€)



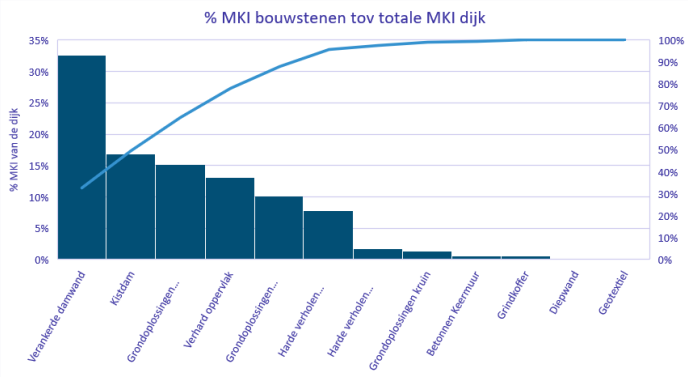


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

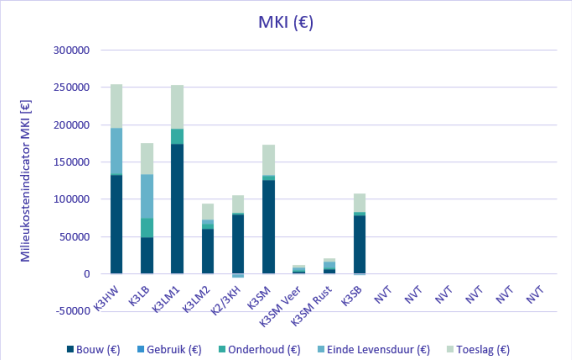


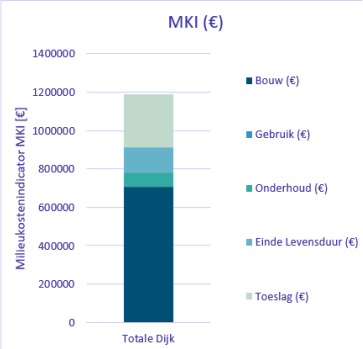


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

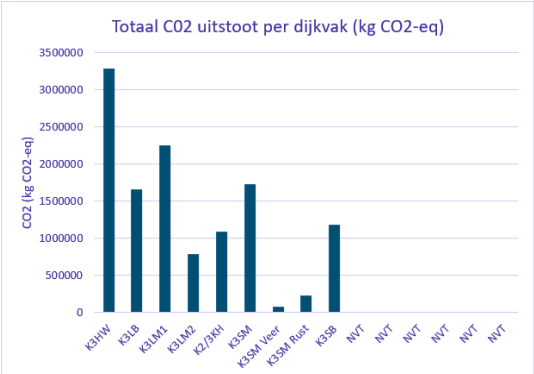


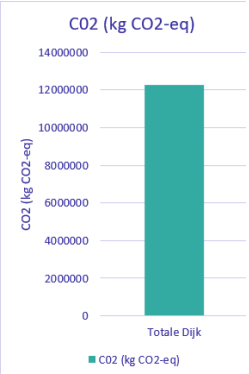
Mileukostenindicator (€)



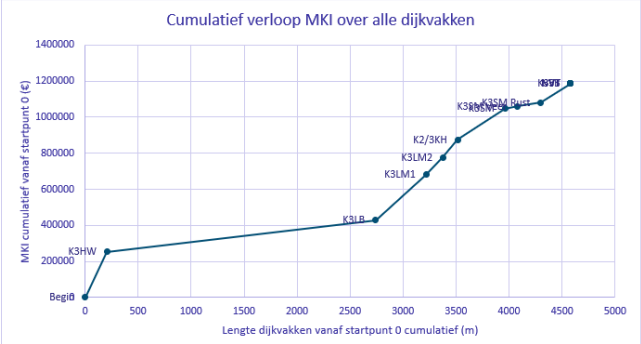


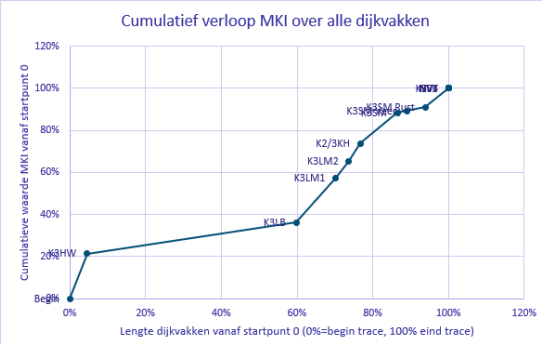
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk



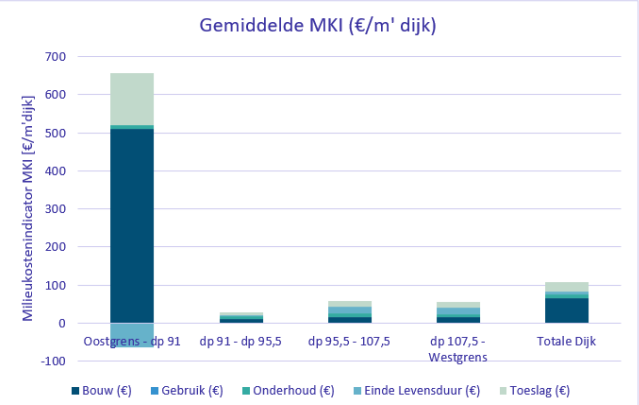


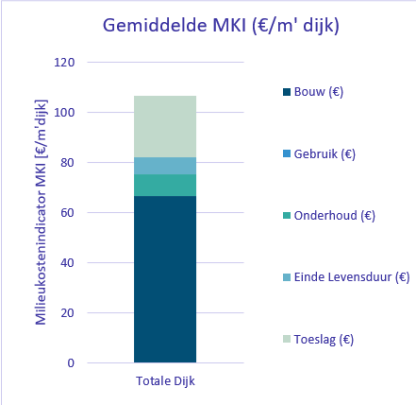
Bijlage X – Samenvatting in grafieken – Sterke Lekdijk (Salmsteke)

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

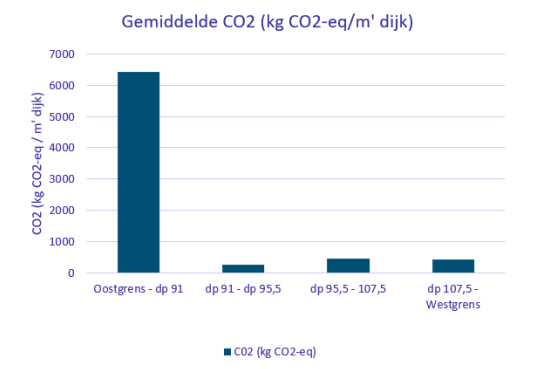
Projectnaam:	Sterke Ledijk (Salmsteke)	Kengetallen dijk		
Plaats:	Lopik	Lengte dijk (m)	2000	*geen onderbouwing circulariteitspercentage vereist*
Variant:	--	MKI [€/m']	106	
		MKI dijk [€]	212854	
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag	CO2 gem [kg/m']	1030	
Datum:	10-6-2020	CO2 dijk [kg]	2059424	

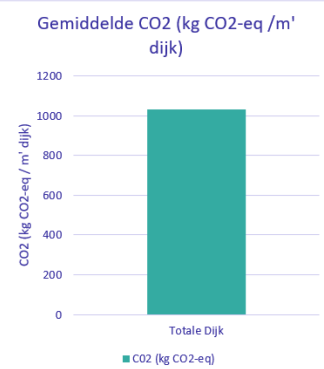
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



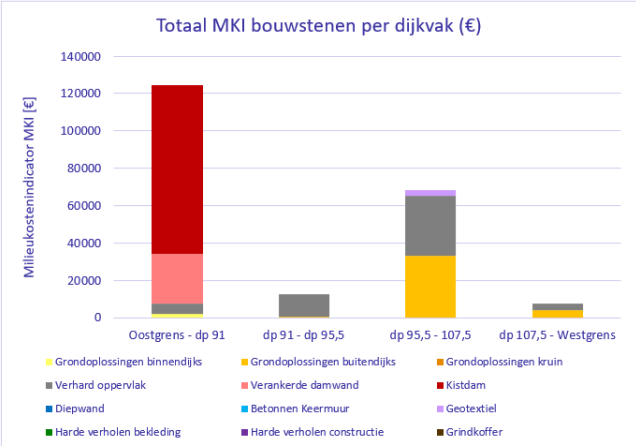


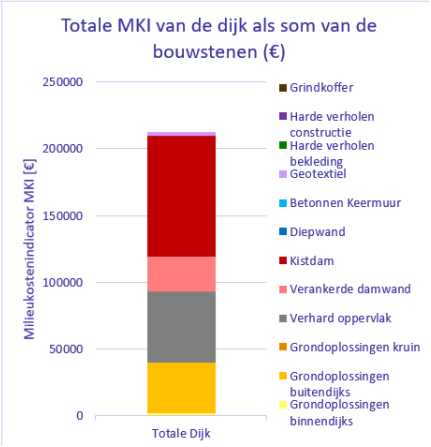
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



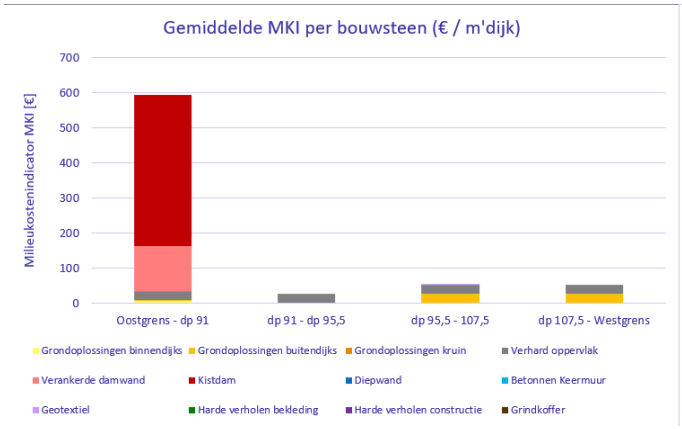


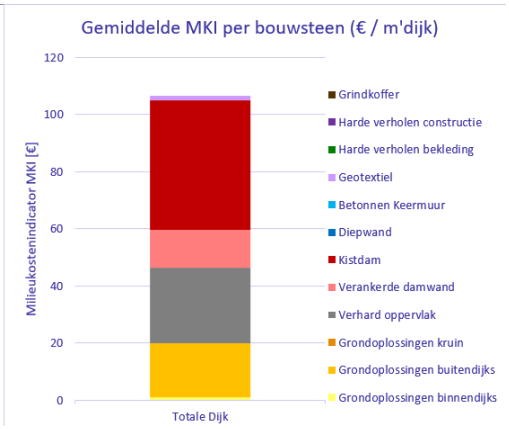
MKI per bouwsteen (€)



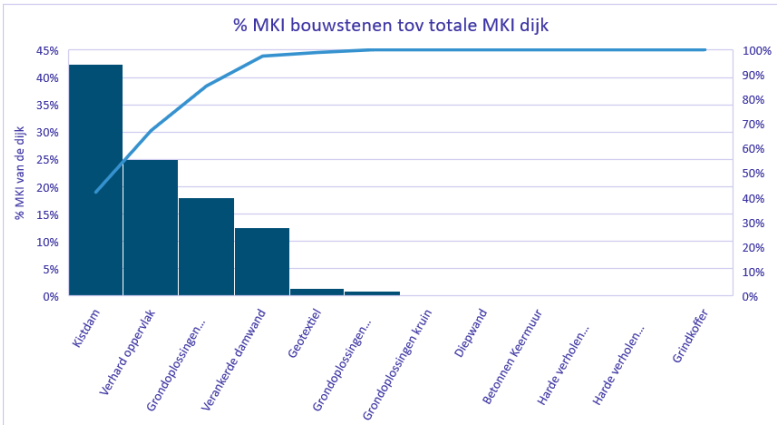


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

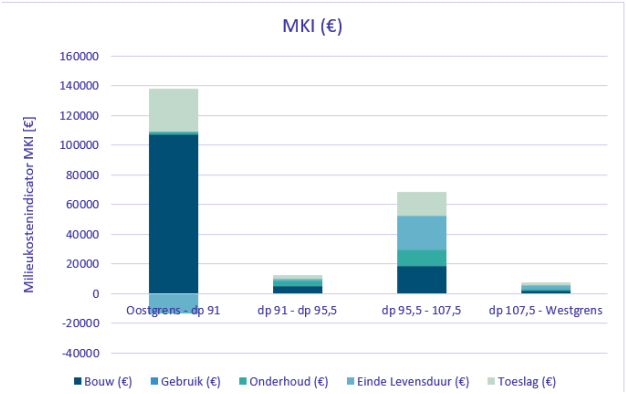


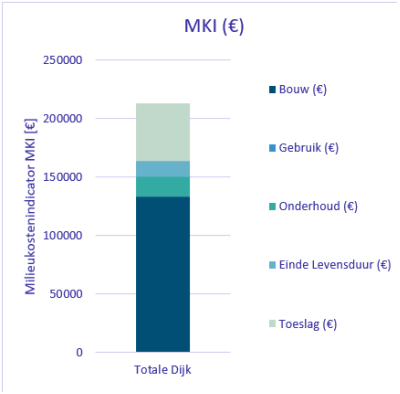


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

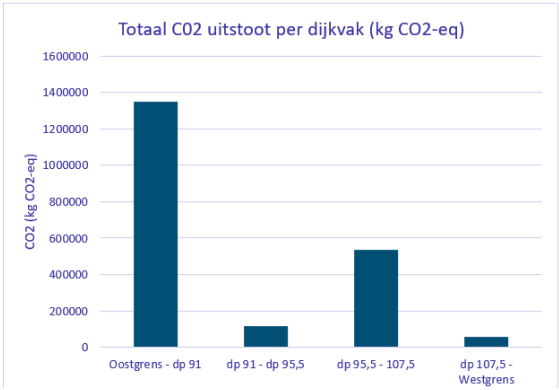


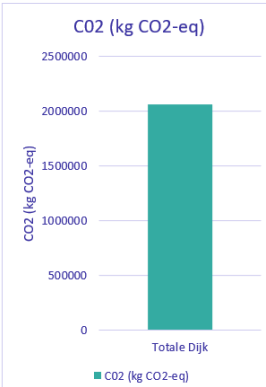
Mileukostenindicator (€)



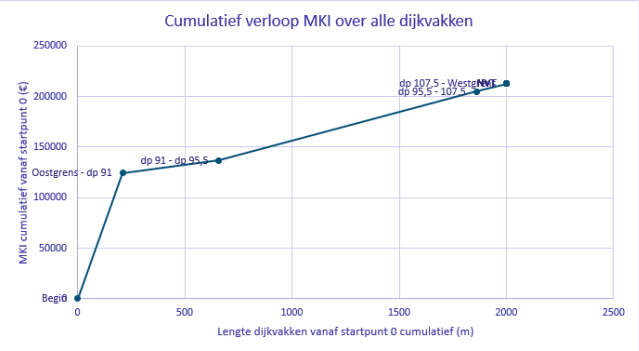


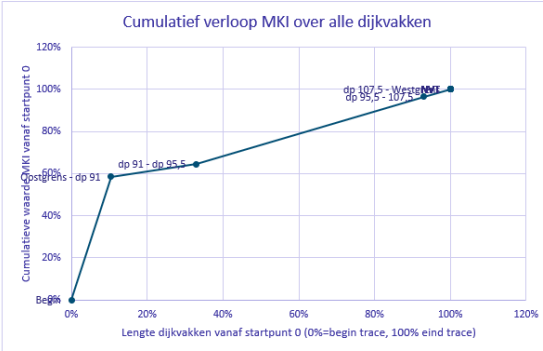
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk





Bijlage XI – Invoer en resultaten MKI bouwstenen model met circulaire grond.

In deze bijlage het bestand met de invoer en resultaten van variant kans alternatief 2 in het MKI bouwstenen model met het gebruik van circulaire grond toegevoegd.

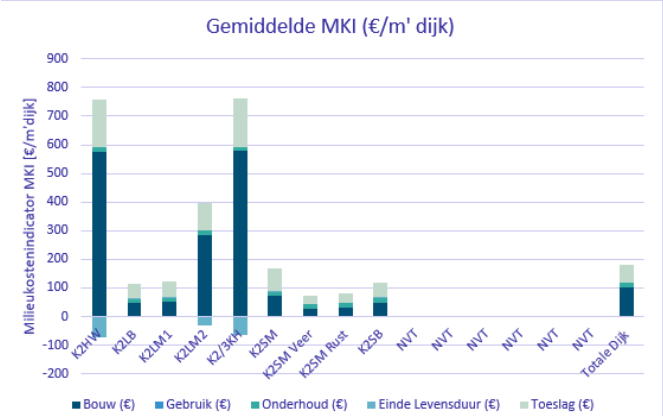
Lievense Het MKI bouwstenen model D

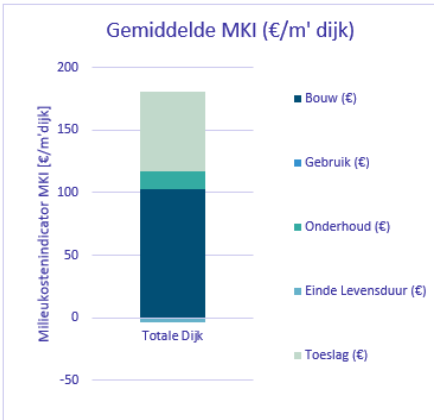
Bijlage XII – Samenvatting in grafieken met circulaire grond

Het MKI bouwstenen model voor dijkversterkingsopgaven Berekening van de milieubelasting op basis van dijkversterkingselementen	Versie: V2.0

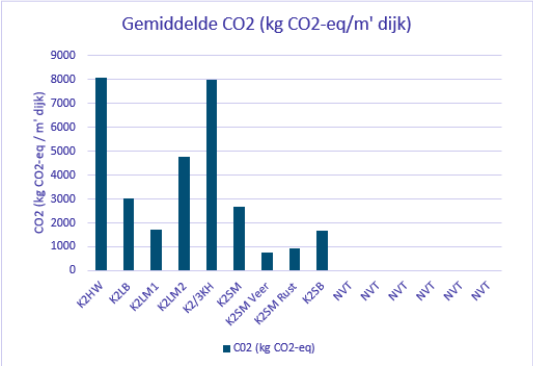
Projectnaam:	Grebbedijk		Kengetallen dijk		
Plaats:	Wageningen		Lengte dijk (m)	4579	
Variant:	Kans alternatief 2		MKI [€/m']	276	*onderbouwing*
			MKI dijk [€]	1263360	*circulariteitspercentage vereist*
Berekening uitgevoerd door:	Cheyenne Kraag		CO2 gem [kg/m']	2977	
Datum:	10-6-2020		CO2 dijk [kg]	13631605	

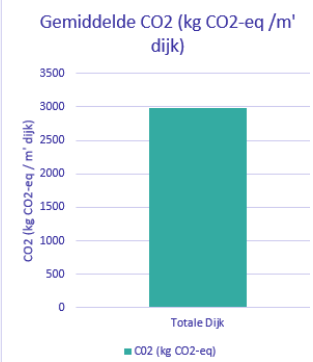
Gemiddelde MKI per strekkende meter dijk



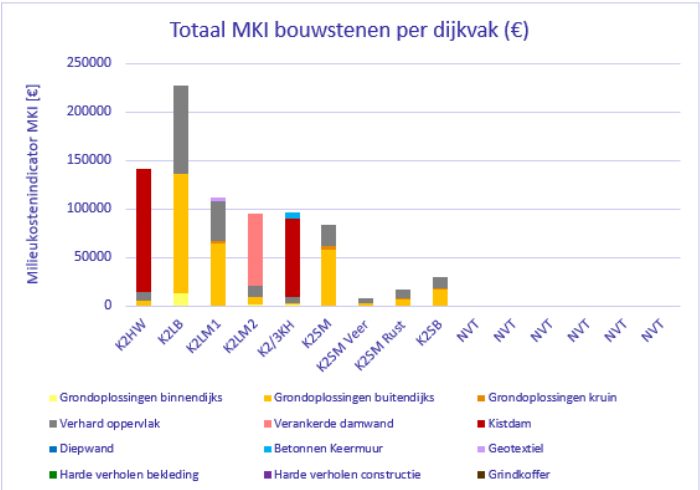


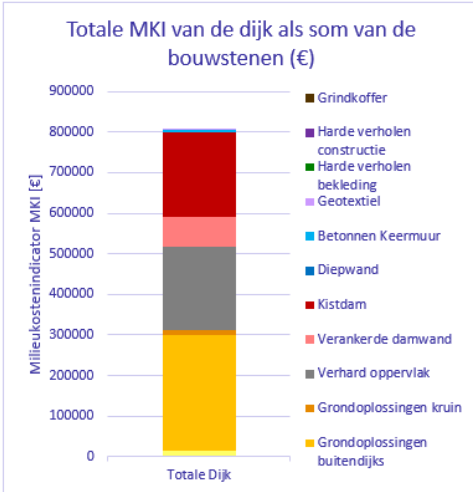
Gemiddelde CO2 per strekkende meter dijk



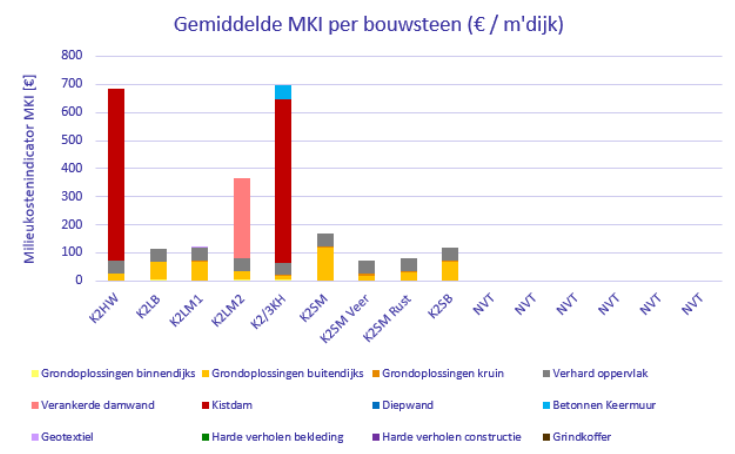


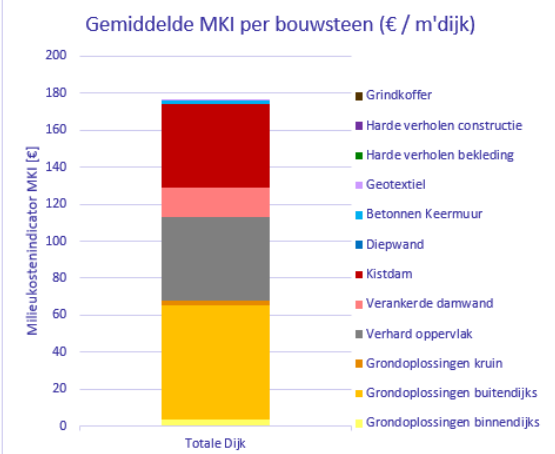
MKI per bouwsteen (€)



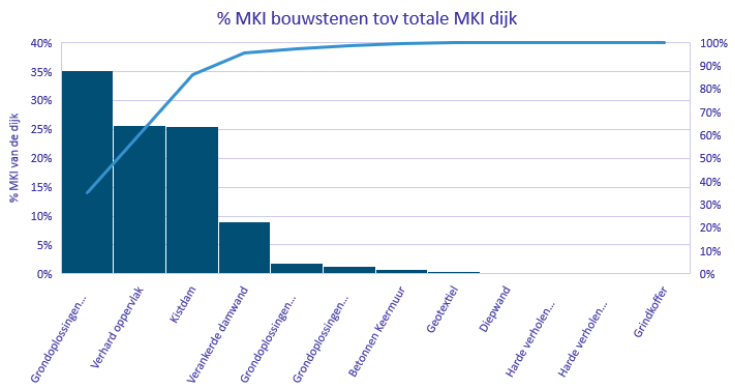


Gemiddelde MKI per bouwsteen per strekkende meter dijk

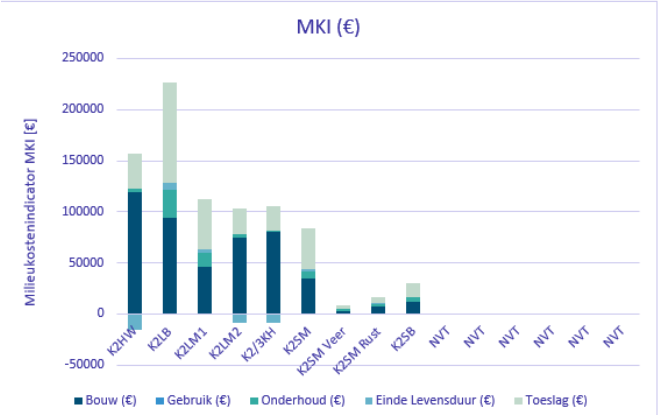


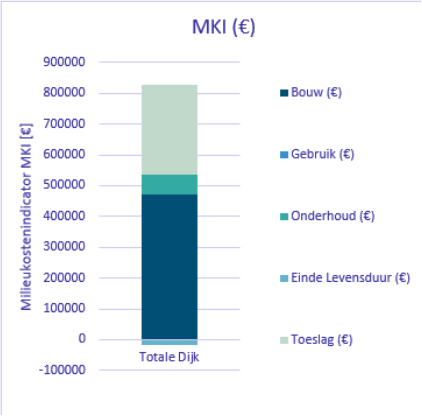


Percentage MKI bouwsteen tov totale MKI dijk

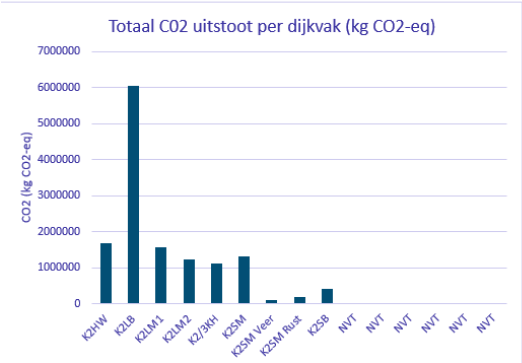


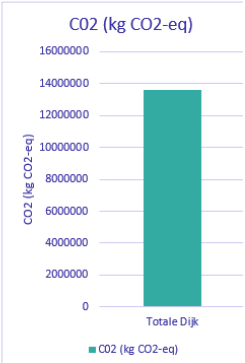
Mileukostenindicator (€)



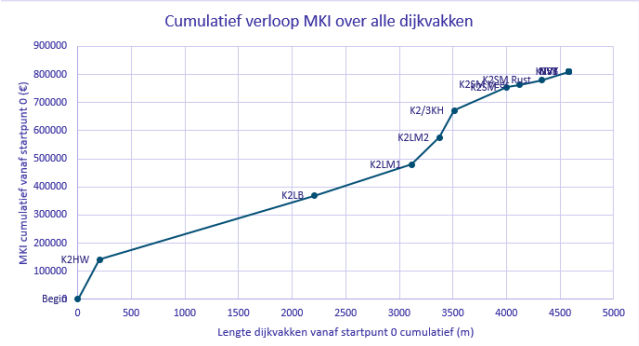


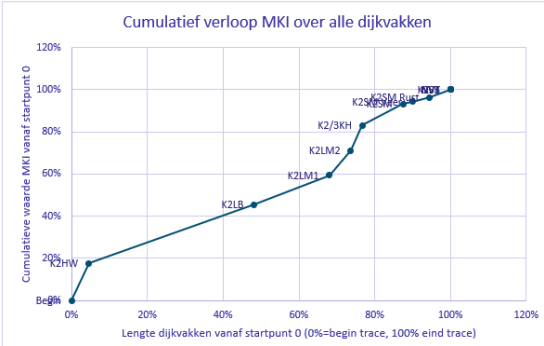
CO2 (kg CO2-eq)





Cumulatief verloop MKI over alle dijkvakken van de dijk





Bijlage XIII – Artikel MKI bouwstenen model

Beoordelingskader voor circulaire dijken

Luchtfoto Grebbedijk

T.v. Cuyck - Lievense|WSP

M. Hoeksema - Waterschap Vallei&Veluwe

C. Kraag - Haagse Hogeschool

A. Weersink - Lievense|WSP

Het bereiken van circulaire doelstellingen van de overheid betekent streven naar zo min mogelijk inzet van primaire grondstoffen. Waterschap Vallei & Veluwe streeft naar circulaire dijkontwikkeling. Praktijkervaring bij de Grebbedijk leert dat het noodzakelijk is om in de initiatieffase van een project heldere circulariteitsdoelstellingen te formuleren en het onderwerp circulariteit in te bedden in reguliere werkprocessen. Eenvoudige tools om de circulariteit van alternatieven te beoordelen en te monitoren, zoals de Circulaire Peiler en MKI-bouwstenen, helpen zowel ontwerpende partijen als ook opdrachtgevers.

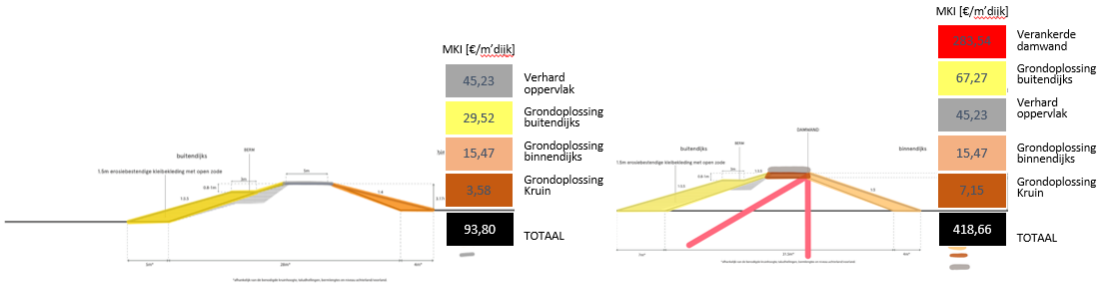
Meeste winst in het begin van het ontwerpproces

Het Waterschap Vallei & Veluwe heeft als ambitie om in 2020 volledig energieneutraal te zijn en in 2050 volledig circulair en zet zich daarnaast in voor klimaatadaptatie om te zorgen voor een gezonde leefomgeving die bestand is tegen klimaatverandering. Dijkversterkingsprojecten dienen daaraan bij te dragen. Aandacht voor die onderwerpen vanaf het begin van die projecten is essentieel. Dàn worden de belangrijkste ontwerpbeslissingen genomen die de meeste circulariteitswinst kunnen opleveren tegen de laagste kosten. De eerste winst wordt geboekt met nadenken over reductie van de omvang van de opgave. Inzet van verbeterde rekentechnieken, nieuwe inzichten en innovaties leverden bijvoorbeeld bij project Grebbedijk 20% reductie op.

Quick-scan MKI-kwaliteit

De 5,2 km lange dijkversterkingsopgave Grebbedijk bestaat uit negen verschillende secties. De milieu impact van materialen wordt berekend met de milieukostenindicator (MKI-DuboCalc). Elke dijksectie heeft een andere doorsnede en verschillende materiaalhoeveelheden. Een methode om beter inzicht te krijgen in duurzame oplossingen, is het vergelijken van MKI-kengetallen (MKI in € per m') van 'bouwstenen voor dijkelementen' (zie figuur 1). Sommatie over alle bouwstenen in een specifieke dijkdoorsnede levert de €MKI/m'dijk. Dit nieuwe kengetal vereenvoudigt op haar beurt het beoordelen van de milieu impact van verschillende dijksecties.

Dergelijke kengetallen leveren dijkontwerpers inzicht in de meer of minder milieuvriendelijke materialen en stimuleert het denken over milieuvriendelijkere alternatieven. Bij de Grebbedijk scoren varianten die gebruik maken van veel gebiedseigen grond het best; profielen met een damwand en zeker kistdammen scoren vele malen slechter (zie figuur 1). De milieukosten voor een grondoplossing in het landelijke gebied scoort € 94/m dijk en met een damwand in het stedelijke gebied is dit € 420/m. Toch zijn deze laatste alternatieven soms onvermijdelijk vanwege de beperkt beschikbare ruimte.



Figuur 1: Vergelijking milieukosten (MKI) van twee dijkdoorsnedes.

Links: MKI=€94/m'dijk met grondoplossing, Rechts: MKI=€420/m'dijk met damwand

Leerervaringen uit de Grebbedijk om de milieu impact te beperken

Beschouw bij nieuwe ontwikkelopgaven eerst kritisch of reductie van de omvang van de opgave mogelijk is. Weeg kritisch alternatieven af die leiden tot een slankere dimensionering en inzet van materialen die minder milieubelastend zijn. Als denkmodel voor prioritering van in te zetten grondstoffen is het 10R-model van Cramer een handig hulpmiddel. Hergebruik materiaal waar mogelijk, maak werk met werk, gebruik van materiaal met een hoog recyclepercentage en pas zo mogelijk biobased materialen toe. Belangrijk blijft om ontwikkelde (milieu)alternatieven continu af te wegen naast alle andere opgaven. Niet altijd is de oplossing met de laagste MKI score de duurzaamste.

Circulariteitswinst breed beoordelen

Ook op andere vlakken dan materialen is circulariteitswinst geboekt. De 5,2 km lange Grebbedijk is oorspronkelijk een onderdeel van de Grebbelinie, met het inmiddels sterk vervallen Hoornwerk aan de rand van het projectgebied als een belangrijke verdedigende schakel. Door het buitenste deel twee meter op te hogen wordt het erfgoed weer goed zichtbaar in het landschap en dient deze laatste 200 meter van dijkversterkingsopgave voor waterveiligheid. De dijkversterking moet 250.000 bewoners in de Gelderse Vallei van Wageningen tot aan Amersfoort blijven beschermen tegen water uit de Nederrijn. Naast waterveiligheidsdoelstellingen zijn er hogere ambities voor natuur, (water)recreatie en duurzaamheid (klimaatadaptatie). Het openhouden van ruimte en graven van water dragen bij aan biodiversiteit en natuurversterking en gaat goed samen met het meer genot van mooie natuur en landschap.

Totale levenscyclus beschouwen

In de verkenningsfase heeft Lievense de beheer- en onderhoudskosten in beeld gebracht voor verschillende ontwerpalternatieven. Dijkversterkingsoplossingen met flauwe taluds bleken een economische gunstige oplossing te zijn vanwege lage beheerskosten in de exploitatiefase. De minderkosten van eenvoudig beheer bleken ruim op te wegen tegen het extra te onderhouden oppervlak. Verder bleek de milieu impact van varianten met steunbermen van gebiedseigen grond veruit het gunstigst te zijn. Vanuit het oogpunt van circulariteit zijn grondoplossingen gunstig omdat grond aan het einde van de levensduur volledig herbruikbaar is.

Integratie circulariteit in bestaande werkprocessen

Om te kunnen beoordelen hoe circulair een voorgestane ontwikkeling is, is een beoordelingskader nodig. Bij aanvang van het dijkversterkingsproject Grebbedijk was er geen bruikbaar beoordelingskader voor circulariteit. De provincie Gelderland, de provincie Utrecht, gemeente Wageningen, gemeente Rhenen, waterschap Vallei en Veluwe, Rijkswaterstaat, Staatsbosbeheer en Lievense hebben daarom als onderdeel van de duurzaamheidsambities voor de gebiedsontwikkeling Grebbedijk een beoordelingskader circulariteit opgesteld. Het waterschap ontving een innovatiesubsidie vanuit het Hoogwaterbeschermingsprogramma om dit verder uit te werken naar een algemeen beoordelingskader. Het resultaat is de Circulaire Peiler. Hiermee kan worden getoetst en gemonitord in hoeverre een ontwerp bijdraagt aan gestelde circulariteitsdoelen. Zowel voor beleidsmakers, opdrachtgevers als voor ontwerpers is dit instrument bruikbaar.

Circulaire Peiler integraal beoordelingsinstrument

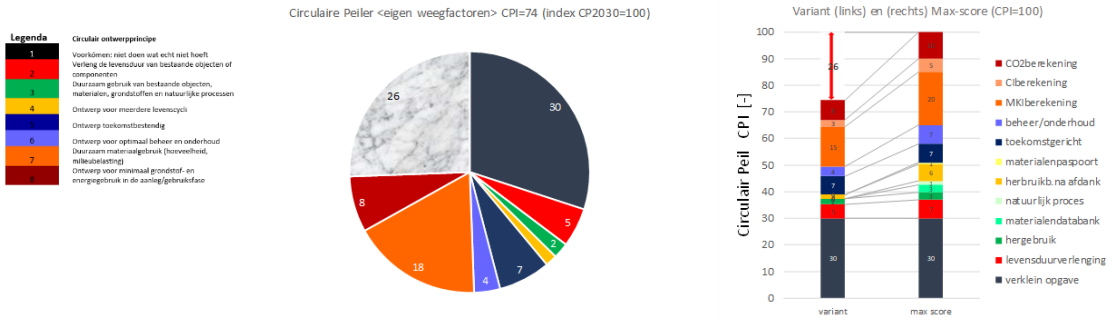
De door Rijkswaterstaat opgestelde acht ontwerpprincipes voor MIRT projecten vormden de basis van de Circulaire Peiler. Deze principes zijn vertaald naar concrete doelstellingen en prestaties. Nadat voor een project de behaalde prestaties zijn ingevoerd volgt de CPI (index circulaire peil) als uitkomst van een multicriteria analyse. De CPI bedraagt maximaal 100. Hoe hoger de CPI, hoe beter de circulariteitsscore. De bovengrenswaarde sluit aan bij de landelijke doelstellingen om in 2030 vijftig procent minder grondstoffen te gebruiken ten opzichte van 1990. Als onderdeel van de CPI worden de milieuprestatie (MKI) en de inzet van primaire grondstoffen vergeleken met die van een referentie(dijk).

CPI=74 voor de Voorkeursvariant Grebbedijk

Voor de voorkeursvariant uit de verkenningsfase van het dijkversterkingsproject Grebbedijk is de circulariteitsscore (index CPI) bepaald met de Circulaire Peiler. De CPI van het project is 74/100. Het voorkeursalternatief Grebbedijk scoort daarmee een ruim voldoende.

Het gebruik van een voorloper van de Circulaire Peiler heeft eraan bijgedragen dat in de Verkenningsfase van dijkverzwaringsproject Grebbedijk bewuster met circulariteit is omgegaan. Gebleken is dat regulier monitoren van prestaties tijdens het ontwikkelingsproces belangrijk is. Onderlinge vergelijking van alternatieven werd sterk vereenvoudigd door prestaties van de alternatieven zowel kwalitatief als kwantitatief te scoren.

In beginsel is de Circulaire Peiler opgezet voor beoordeling van dijkversterkingsopgaven. De commissie m.e.r. heeft zich positief uitgesproken over de Circulaire Peiler als beoordelingskader voor circulariteit bij dijkversterkingen. Aangezien de Circulaire Peiler generiek van opzet is, is de verwachting dat deze ook geschikt is om toe te passen bij andere infrastructurele projecten. Verder gebruik van de Peiler zal dit moeten uitwijzen.



Figuur 2: Circulaire Peiler als nieuw beoordelingsinstrument voor circulariteit
Eindscore CPI = 74/100 (CPI-berekening (Index Circulaire Peil)) voor de voorkeursvariant uit de verkenningsfase van de dijkversterkingsopgave Grebbedijk (bron: Lievense|WSP)

Conclusie

Om optimaal invulling te kunnen geven aan circulariteit in projecten is inbedding daarvan in bestaande processen en werkwijzen nodig om tijdig te kunnen bijsturen om beoogde milieudoelen te realiseren. Eenvoudige ontwerp- en monitoringstrumenten zoals de Circulaire Peiler en MKI-bouwstenen kunnen ontwerpers en opdrachtgevers daarbij van dienst zijn.

Na de eerste positieve ervaringen bij de Grebbedijk willen het Waterschap Vallei & Veluwe en het HWBP onderzoeken of de Circulaire Peiler breder kan worden ingezet in de grond-, weg- en waterbouw (GWW-sector) vanaf initiatieffase t/m uitvoeringsfase