



STEILE WAND CONSTRUCTIES OP EEN SLAPPE ONDERGROND

Gewapende grondconstructies als alternatieve grondkerende constructies

Auteur: Jasper Borst - 0866897

School: Hogeschool Rotterdam

Opleiding: Civiele techniek

Datum: 14 juni 2016

Versie: 1.0 – Definitief

RPS advies- en ingenieursbureau

Elektronicaweg 2
2628 XG Delft
Nederland
Afdeling waterkeringen

T +31 15 750 16 00
W rps.nl

Document titel: Steile wand constructies op een slappe ondergrond. Steile wand
Beschrijvende titel: constructies op een slappe ondergrond
Gewapende grondconstructies als alternatieve grondkerende constructies.

Datum: 14-6-2016
Plaats: Rotterdam
Versie: 01 - Definitief
Auteur: Jasper Borst - 0866897
School: Hogeschool Rotterdam
Module: CIVAFS40

Geschreven door:
Jasper Borst

Gecontroleerd door:
Datum en
handtekening: Sake Essink

Goedgekeurd door:
Datum en
handtekening: Rolin Rolloos

Voorpaginafoto: Voorbeeld van gebruikt gewapende grond. (Ruiter, 2016)

Dit rapport is vertrouwelijk. Geen enkel deel van dit rapport mag aan derden openbaar worden gemaakt zonder schriftelijke toestemming van RPS advies- en ingenieursbureau bv of van de opdrachtgever.

RPS advies- en ingenieursbureau bv KvK 24161143, btw NL0056.73.112.B.01

Nederland | Engeland | Ierland | Rusland | Verenigde Staten | Canada | Australië | Zuidoost-Azië | Brazilië | Midden-Oosten | Afrika

Voorwoord

Dit verslag is het resultaat van mijn onderzoek in de afstudeerperiode naar gewapende grondconstructie. Ik heb dit onderzoek gedaan als afronding van mijn opleiding civiele techniek aan de Hogeschool Rotterdam. Het onderzoek moet bewijzen dat ik de competenties bezit van een civiele ingenieur die opgesteld zijn door de hogeschool. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van en in samenwerking met RPS advies- en ingenieursbureau bv.

Graag wil ik de heer Essink bedanken voor zijn wekelijkse begeleiding, feedback en ondersteuning tijdens het onderzoek. Ook wil ik de medewerkers van RPS bedanken voor de hulp en uitleg tijdens het afstudeerproject. Verder wil ik de begeleidende docent, de heer Rolloos, van de hogeschool Rotterdam bedanken voor de begeleiding die ik heb ontvangen. Eveneens wil ik de controleurs van het verslag bedanken voor hun tijd en hun advies over het veranderen van mijn orthografie. Tenslotte wil ik allen van de afdeling waterkeringen van RPS bedanken voor de fijne tijd die ik heb gehad en voor de mogelijkheid te werken in een motiverende en professionele omgeving.

Delft, 19-05-2016
Jasper Borst

Samenvatting

Bij het afgestudeerd van de bachelor opleiding civiele techniek aan de hogeschool Rotterdam, dient door studenten van de opleiding te worden aangetoond dat er voldaan wordt aan de competenties van een civiele ingenieur volgens de hogeschool. Dit verslag is geschreven door de student Jasper Borst als invulling van de afstudeerperiode. Deze periode is ingevuld met een algemeen onderzoek over gewapende grondconstructies op een slappe ondergrond. Dit wordt gedaan met de hulp en kennis van het afstudeerbedrijf, RPS advies- en ingenieursbureau bv, en wordt als volgt ingevuld:

Grondkerende constructies zijn in Nederland nodig omdat natuurlijke taluds niet altijd mogelijk zijn vanwege het ruimtegebrek in het land. De oplossingen voor dit ruimteprobleem zijn vaak damwanden en prefab keerwanden, maar deze oplossingen zijn duur. Zeker wanneer zij moeten worden geconstrueerd op zeer slappe ondergrond.

Vanwege deze reden is er een onderzoek gestart naar de mogelijkheden van gewapende grond en het verschil tussen deze soort grondkeringen en de meer traditionele constructies. Deze vergelijking wordt gemaakt door van de constructies de constructieve haalbaarheid te toetsen, financieel waardes te bepalen en ook, gezien er in de huidige tijd steeds meer aandacht wordt geschonken aan milieuvriendelijkere oplossingen, de CO₂ uitstoot waardes te berekenen. De constructies worden ontworpen in een aantal vooraf opgestelde situaties waarvan een uit de praktijk komt, en vergeleken op verschillende criteria.

De gewapende grond constructie haalt volgens de Multi Criteria Analyse (MCA) de meeste punten van de drie gekozen constructies, zeker wanneer de constructies geoptimaliseerd worden en gebruik wordt gemaakt van geotextielen. Hiermee wordt de conclusie getrokken dat bij de doorgerekende varianten, technisch gezien de gewapende grond een goed alternatief is voor de huidige gebruikte grondkerende constructies.

De constructie ondervindt daarin tegen wel grote zakkings als deze wordt gefundeerd op staal. Als de constructie wordt geoptimaliseerd en er gebruik wordt gemaakt van ondergrond verbeteringen zoals ondergrondvervanging of palen onder de constructie, kunnen de zettingen terug worden gebracht maar hierbij stijgen de kosten van de constructie. Als vervanging voor de palen kan er gebruik worden gemaakt van het zogenoemde GEC (Geotextile Encased Columns) grondverbetering. Met deze geotextielen omwikkelde kolommen in de grond kan er een optimale grondkerende constructie worden geconstrueerd.

Als conclusie van het onderzoek wordt er gesteld dat een optimale steile wand constructie niet bestaat omdat niet alleen technische argumenten gelden. Ook de keuzes die de opdrachtgever neemt qua uiterlijk, flexibiliteit, kosten en CO₂ prestatie van de constructie, spelen een rol in de keuze van een optimale constructie voor een situatie. Echter, omdat de gewapende grondconstructies alleen met geotextiel en grond worden gebouwd, blijkt de gewapende grondconstructie geconstrueerd met geogrids zeer voordelig in de kosten en CO₂-uitstoot in vergelijking met de constructies van beton en staal. Hierbij lopen de verschillen in de ontwerpkosten van de L-muur en de gewapende grond constructie op tot 300 euro per strekkende meter. Wanneer de constructie op palen wordt gebouwd kan er qua zakkingsmaatregelen heel wat geld worden bespaard als er gebruik wordt gemaakt van GEC grondverbeteringen, waardoor het gebruik van geotextiel zeer voordelig wordt.

Abstract

When graduating from the bachelor program civil engineering at the Hogeschool Rotterdam, students have to prove that they comply with the competitions of a civil engineer according to the university. This report is written by the student Jasper Borst as a completion of this graduation period. During this period, a study has been conducted on the possibilities, costs and environmental influence of reinforced earth in comparison of the currently used earth retaining structures. This is done with the help and knowledge of the company, RPS advies- en ingenieursbureau bv, and shall be written in the following way:

Earth retaining structures are needed in the Netherlands because natural slopes cannot be constructed due to the lack of space in the country. Solutions for this problem are often sheet piles and prefabricated concrete elements, but these solutions are expensive especially when built on weak subsoil.

For this reason an investigation is started about the possibilities of reinforced earth and the difference between this earth retaining structure and the more traditional constructions. This comparison is made by calculating the structural values, financial values and also, given the growing attention for environmental friendly solutions, the CO₂ emission values of the constructions. The constructions are designed in pre-determined cases, where one will be from actual practice, and compared on different criteria.

The reinforced earth construction has according to the MCA the most points of the three constructions that have been calculated, especially when the constructions are optimised and constructed with geotextiles. Through this information it can be concluded that in the calculated variants, reinforced earth technically a very good alternative is for the presently utilized earth retaining structures.

On the other hand does the construction experience large settlements when it is founded on steel. When this is optimized and foundation piles are used as foundation of the constructions, the settlements can be greatly reduced but costs will increase. As a replacement for these foundation piles, the so-called GEC (Geotextile Encased Columns) ground improvement can be used. With these geotextile columns in the ground, optimal earth retaining structure can be constructed.

As conclusion of this investigation there can be argued that an optimized steep wall construction does not exist because not only the technical arguments are valid. The choices taken by the client in terms of appearance, flexibility, costs and generated CO₂ from the construction plays a big part in the choice of the optimal construction for the situation. However, because the construction only uses geotextile and ground to be built, it appears that reinforced earth constructed with geotextiles is more beneficial in costs and CO₂ emissions when it is compared with the constructions of concrete and steel. When comparing the design costs between the L-wall and the reinforced earth constructions can run up to a difference of 300 euro's per running meter. When the construction is built on piles, use of the GEC ground improvement can decrease the costs for measures against settlement. Through utilisation of these solutions, the use of geotextile can be very advantageous.

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	1
1.1. Aanleiding van het onderzoek	1
1.2. Doelstelling	2
1.3. Kader	2
1.4. Structuurbeschrijving	2
2. PROBLEEM BESCHRIJVING	4
2.1. Situatie beschrijving	4
2.2. Probleemanalyse	4
3. DAMWAND	5
4. KEERMUUR.....	6
5. GEWAPENDE GROND	7
5.1. Inleiding.....	7
5.2. Geschiedenis	7
5.3. Wapening	9
5.4. Theoretische werking.....	9
5.4.1. Ongewapende grond	10
5.4.2. Theorie gewapende grond Vidal.....	10
5.4.3. Anisotrope cohesie theorie	11
6. VOOR EN NADELEN	12
6.1. Damwand.....	12
6.2. L-muur.....	12
6.3. Gewapende grond	12
7. CO₂-UITSTOOT	13
8. BEREKENINGSOPZET	14
8.1. Damwand.....	14
8.2. L-muur.....	14
8.3. Gewapende grond	14
9. OPZET VARIANTEN	15
9.1. 0-Variant, Kerende constructie in volledig zand	15
9.2. Variant 1, Casestudie, Kruispunt van De Strip en de N302	15
9.3. Variant 2, Weg in de polder	16
9.4. Variant 3, Verhoging langs weg.....	17
10. OPZET MULTI CRITERIA ANALYSE	18
10.1. Criteria 1: Eurocode	18
10.2. Criteria 2: Stabiliteit.....	18
10.3. Criteria 3: Ontwerpkosten	18
10.4. Criteria 4: Uitvoeringskosten.....	19
10.5. Criteria 5: Vervormingen ondergrond	19
10.6. Criteria 6: Vervormingen constructie	19
10.7. Criteria 7: CO ₂ -emissie	20
10.8. Belang factoren criteria	20
11. SAMENVATTING RESUTATEN BEREKENING	21
11.1. Damwand.....	21
11.2. L-muur.....	21
11.3. Gewapende grond	22

12. RESULTATEN MULTI CRITERIA ANALYSE.....	23
12.1. Invloed belang factoren op de MCA	23
12.2. Invloed van eventuele optimalisatie op de MCA.....	24
13. OPTIMALISATIE.....	25
13.1. Optimalisatie mogelijkheden:	25
13.2. GEC (Geotextile Encased Columns)	27
14. CONCLUSIE	28
15. AANBEVELINGEN	29
15.1. Invloed van ongelijke zakking van de constructies	29
15.2. Invloed van mogelijke tweede orde momenten	29
15.3. Onderzoek gefundeerde grondkerende constructies	30
15.4. Onderzoek GEC systeem	30
15.5. Toetsing nieuwe CUR	30
16. BIBLIOGRAFIE.....	31

BIJLAGEN:

A.	Plan van aanpak
B.	Vooronderzoek
C.	Duurzaamheid kerende constructies
D.	Opzetten van varianten
E.	Berekeningsverslag Damwand
F.	Berekeningsverslag L-muur
G.	Berekeningsverslag Gewapende grond
H.	MCA
I.	Optimalisatie
J.	HRO bijlages

Lijst van Figuren:

Figuur 1.1: Structuur onderzoek.....	3
Figuur 2.1: L-muur (InfraWiki.nl, 2016).....	4
Figuur 3.1: Voorbeeld gebruik damwanden als grondkering (keermuur, keerwand, grondkering, -).....	5
Figuur 3.2: Niveaus en hellingshoeken bij een damwandberekening (126, 2005)	5
Figuur 4.1: Voorbeeld L-wand (keermuur, keerwand, grondkering, -)	6
Figuur 4.2: Bezwijkingsvormen L-wanden	6
Figuur 5.1: (l) Werking gewapende grond	
(r) Last-verplaatsingsdiagram ongewapende en gewapende grond (naar Jewel, 1980).....	7
Figuur 5.2: (l) 2000 jaar oude gewapende grondkering (Armtec Ltd. , 2013)	
(r) Maken van Adobe blokken. (Kitch, 2015).....	7
Figuur 5.3: (l) Keermuur ontwikkeld door Conye (Boer, 2005)	
(r) Eerst geconstrueerde gewapende grond muur door Henri Vidal in 1960	
(Armtec Ltd. , 2013).....	8
Figuur 5.4: Gebruik van Terre Armee bij A2 Eindhoven (voetsgewapendegrond, 2015)	8
Figuur 5.5: (l) Voorbeeld stalen strip (CBS CUR, 2000)	
(m) Voorbeeld textiel geogrid	
(r) Voorbeeld stalen grid (CBS CUR, 2000).....	9
Figuur 5.6: (l) Werking gewapende grond	
(r) Werking gewapend beton.....	9
Figuur 5.7: Wet van Mohr-Coulomb	10
Figuur 5.8: Gedrag van grond (Boer, 2005)	10
Figuur 5.9: Theorie volgens Vidal.....	10

Figuur 5.10: (l) Door wapening een verbetering van de cohesie (Schlosser & Long) (Kitch, 2015)	
(r) Door wapening een verbetering van de hoek van inwendige wrijving (Hausmann) (Boer, 2005)	11
Figuur 5.11: Gecombineerde cirkel van Mohr voor het breken en slippen van wapening in gewapende grond (Hausmann) (Boer, 2005)	11
Figuur 9.1: Overzicht situatie en ondergrond, 0-Variant	15
Figuur 9.2: Overzicht situatie en ondergrond, Variant 1	16
Figuur 9.3: Overzicht situatie en ondergrond, Variant 2	16
Figuur 9.4: Overzicht situatie en ondergrond, Variant 3	17
Figuur 13.1: GEC grondverbetering (geosynthetica.net, 2016)	27
Figuur 13.2: Plaatsen van een GEC (Guler, Alexiew, Abbaspour, & Koc, 2015)	27
Figuur 15.1: Invloed van ongelijke zakkingen op de constructies	29
Figuur 15.2: Mogelijke invloed van kruip in de wapening	29

Lijst van Tabellen:

Tabel 6.1: Voor- en nadelen damwand	12
Tabel 6.2: Voor- en nadelen L-muur	12
Tabel 6.3: Voor- en nadelen gewapende grond	12
Tabel 7.1: CO ₂ -uitstoot bij creatie	13
Tabel 7.2: Extra voor en nadelen constructies	13
Tabel 9.1: Grondparameters 0-variant	15
Tabel 9.2: Ondergrondparameters variant 1	16
Tabel 9.3: Grondparameters variant 2	17
Tabel 9.4: Ondergrondparameters variant 3	17
Tabel 10.1: Overzicht uitleg scores criteria 1	18
Tabel 10.2: Overzicht uitleg scores criteria 2	18
Tabel 10.3: Overzicht uitleg scores criteria 3	19
Tabel 10.4: Overzicht uitleg scores criteria 4	19
Tabel 10.5: Overzicht uitleg scores criteria 5	19
Tabel 10.6: Overzicht uitleg scores criteria 6	20
Tabel 10.7: Overzicht uitleg scores criteria 7	20
Tabel 10.8: Belang factoren criteria	20
Tabel 11.1: Resultaten damwandconstructie berekening voor MCA	21
Tabel 11.2: Resultaten Eurocode toetsing L-muur	21
Tabel 11.3: Resultaten L-muur berekening voor MCA	21
Tabel 11.4: Resultaten Eurocode toetsing gewapende grond constructie	22
Tabel 11.5: Resultaten gewapende grond constructie berekening voor MCA	22
Tabel 12.1: Uitvoer MCA	23
Tabel 12.2: Totaal score constructies MCA	23
Tabel 12.3: Totaal score constructies MCA met aangepaste belang factoren	23
Tabel 12.4: Totaal score constructies MCA zonder categorie constructie	24
Tabel 12.5: Totaal score constructies MCA zonder "Funderen op staal"	24
Tabel 13.1: Optimalisatie opties	25

GEBRUIKTE AFKORTINGEN:

- MCA: Multi Criteria Analyse
- GEC: Geotextile Encased Columns
- CO₂: Koolstofdioxide
- CUR: Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving
- GWW: Grond, Weg en Waterbouw
- LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

1. INLEIDING

Met deze inleiding wordt de aanleiding, doelstelling, kader en structuur van het onderzoek toegelicht. Hiernaast geeft dit hoofdstuk een overzicht van de indeling van dit rapport.

1.1. Aanleiding van het onderzoek

Grondkerende constructies zijn oplossingen om hoogteverschillen in het terrein te overbruggen, wanneer er geen ruimte is voor een natuurlijk talud.

Grondkerende constructies die voornamelijk gebruikt worden in projecten, zijn:

- Gewichtsmuur
- Keermuur
- Damwand
- Diepwand

Grondkerende constructie komen voornamelijk voor in de stedelijke omgeving of langs wegen, omdat hier vaak niet genoeg ruimte is voor een natuurlijk talud. Vooral in het westelijk deel van Nederland worden de constructies gebouwd op een ondergrond die voornamelijk bestaat uit slappe klei- en veenlagen. Onder deze slappe lagen bevinden zich draagkrachtige zandlagen. Deze zandlaag wordt vaak gebruikt als fundering van grondkerende constructies door middel van palen of diepe geplaatste damwandplanken. Wanneer er gefundeerd wordt op staal en er geen gebruik wordt gemaakt van diepe funderingen, treden er grote zettingen op in dit soort ondergronden. Om deze reden zijn er vaak hoge bouwkosten verbonden aan het maken van deze grondkerende constructies op een slappe ondergrond.

Duurzaamheid speelt een steeds grotere rol in de bouw. Dit is de reden dat er steeds meer gezocht wordt naar innovatieve oplossingen die een minder grote impact hebben op milieu. De komst van steeds sterkere en goedkopere kunststoffen en geotextielen zijn in toenemende mate een alternatief voor het gebruik van beton en staal.

Deze kunststoffen en geotextielen zijn een goed alternatief materiaal om deze grondkerende constructies milieuvriendelijker te maken, alleen is dit niet altijd goedkoper of structureel beter. Deze gewapende grondconstructies gebruiken de samenwerking tussen grond en materiaal om een steil talud of kerend massief te creëren. Dit gebeurde vroeger vaak met hout of staal, maar er kan nu ook gebruik worden gemaakt van geotextiel.

Deze vorm van grondkeren wordt op dit moment niet vaak toegepast in Nederland gezien er weinig ervaring en bekendheid is van de methode. Verder was de markt van grondkerende constructies in het verleden erg conservatief, maar dankzij de inbreng van DBM-contracten wordt deze vorm van grondkeren steeds meer beschouwd als een sterk alternatief. Dit komt ook door de groei van zeer sterke geogrids op de markt en de groeiende praktijkkennis van aannemers. De ontwerp-kennis voor dit soort constructies is binnen Nederland vrij beperkt gezien er bij projecten kennis wordt gehaald bij een handjevol Nederlandse gespecialiseerde bedrijven of bij de buurlanden zoals Duitsland.

In september 2000 is er door CUR-commissie C 111 een CUR handboek uitgebracht voor het berekenen van deze gewapende grondconstructies vanwege de groeiende toename van gebruik hiervan bij kleine hoogte verschillen in de GWW-sector. Door het veranderen van NEN naar de Eurocode, is er echter nu een nieuwe commissie aan de gang om het handboek te herzien.

In dit onderzoek wordt er onderzocht of gewapende grond gemaakt met geotextielen, een goedkoper en milieuvriendelijker alternatief kan zijn op de huidige gebruikte grondkeringen. Hierbij wordt er gekeken hoe deze constructies functioneren op een zeer slappe ondergrond in vergelijking met de andere constructies. Er wordt hierbij kennis mee opgedaan waarmee in de toekomst dit soort constructies kunnen worden ontworpen binnen Nederland.

1.2. Doelstelling

Hoofdvraag

Wat is de optimale steile wand constructie van gewapende grond op een slappe ondergrond, daarbij lettend op hoogte, ondergrond, belastingen en CO₂-emissies?

Deelvragen

1. Wat zijn de huidige mogelijkheden voor een steile wand constructie die kunnen worden gebruikt op een slappe ondergrond?
2. Aan welke normen en regelgeving moeten gewapende grondconstructies voldoen in de huidige Eurocode en welke bezwijkmechanismes of rekenmodellen zijn er voor grondkerende constructies?
3. Wat is de meest optimale grondkerende constructies in vooraf bepaalde situatie?
4. Kan de gewapende grond constructie verder geoptimaliseerd worden aan de hand van de gevonden waarde?

Werkwijze

Aan de hand van een vooronderzoek kunnen de meeste vragen worden beantwoord over wat gewapende grond is en aan wat voor eisen de constructies moeten voldoen. Er wordt ook gezocht naar de achterliggende gedachte van gewapende grond en de theoretische werking hiervan. Na dit vooronderzoek worden er situaties opgesteld waarin de constructie worden ontworpen aan de hand van ontwerpberekeningen. Er worden drie situaties ontworpen waarbij ervoor wordt gekozen om een van de varianten als casestudie te zoeken in de praktijk. De modellen worden vervolgens doorgerekend op de bezwijkingsmechanismes. De resultaten van de deze berekening worden vertaald in een "Multi Criteria Analyse" of MCA om de vergelijking tussen de verschillende steile wand constructies te maken. Aan de hand van de waardes en informatie die gevonden is, wordt er gekeken of er manieren zijn om de constructie te verbeteren om zo tot een optimaal mogelijke kerende constructie te komen.

1.3. Kader

Dit onderzoek gaat over grondkerende constructie die gebruikt worden in de GWW-sector, met een talud dat steiler is dan 70° graden. Deze vergelijking vindt plaats tussen drie verschillende constructieve elementen: gewapende grond, damwand en L-wand. Dit rapport gaat niet in op grondkerende constructies voor bouwputten met damwanden en diepwanden. De berekeningsmethodieken benodigd voor dit onderwerp is de focus van het onderzoek, gezien er via deze methodieken de vergelijkingen worden gemaakt. Hierbij wordt er ook naar het aspect duurzaamheid gekeken, gezien dit een grote toevoeging kan zijn aan de kwaliteit van het ontwerp van een verticaal keerconstructie. Het onderzoek kijkt voornamelijk naar de resultaten van de constructies op slappe ondergronden, verder wordt er niet gerekend aan gefundeerde oplossingen. Voor gewapende grond wordt er gerekend met geogrid wapeningen, verder wordt soil nailing weggelaten als gewapende grond onderdeel.

1.4. Structuurbeschrijving

Om structuur te brengen in het onderzoek is deze verdeeld in vier fases waarmee het onderzoek kan worden gestuurd. Deze worden als volgt opgezet:

- Voorbereidende fase
- Berekeningsfase
- Vergelijkingsfase
- Optimalisatiefase

Elke bevinding van een fase wordt meegenomen naar de volgende fase en aan de hand van alle fases worden vervolgens de conclusie en aanbevelingen geschreven. De structuur van het onderzoek is gevisualiseerd in Figuur 1.1.



Figuur 1.1: Structuur onderzoek

In het volgende hoofdstuk wordt er het probleem beschreven van het onderzoek. In hoofdstuk 3 en 4 wordt er summier beschreven wat een damwand en L-muur is. In hoofdstuk 5 wordt er gekeken wat gewapende grond is, de geschiedenis hiervan en hoe het werkt. Van alle constructies worden voor en nadelen opgenoemd en samengevat zodat er duidelijk beeld is van de constructies, dit wordt gedaan in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 wordt de uitstoot waardes bepaald die gebruikt worden in de vergelijking tussen de constructies.

Vervolgens wordt er in hoofdstuk 8 de berekeningen bepaald die gebruikt worden in het onderzoek. In hoofdstuk 9 worden vervolgens de situaties doorgelicht die worden berekend en vergeleken in het onderzoek. In hoofdstuk 10 wordt de Multi Criteria Analyse toegelicht en opgezet zodat er een duidelijke onderscheiding is. Hierna wordt er in hoofdstuk 11 een samenvatting gegeven van de berekening die gemaakt zijn in de varianten. Met deze informatie wordt in hoofdstuk 12 de vergelijking tussen de constructies gemaakt aan de hand van de eerder beschreven MCA. Vervolgens wordt er in hoofdstuk 13 naar oplossingen gezocht voor de zwakkere punten als een optimalisatie van de gewapende grond constructie. Hierna worden de conclusies en aanbeveling gedaan aan de hand van de gevonden waarden.

2. PROBLEEM BESCHRIJVING

In dit hoofdstuk wordt er beschreven wat grondkerende constructies zijn en waarvoor deze gebruikt worden. Hierna wordt een toelichting gegeven op de problemen die optreden bij grondkerende constructies en daarmee de aanleiding van en enkele uitsluitingen binnen het onderzoek.

2.1. Situatie beschrijving

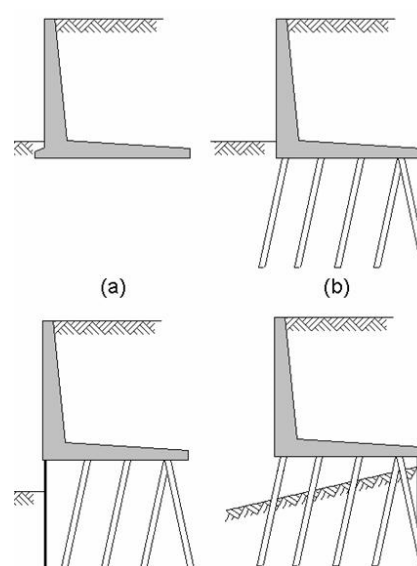
Grondkerende constructies

Hoewel hoogteverschillen in Nederland niet zo extreem zijn, zijn er wel hoogteverschillen nodig voor verhoogde spoor- en autowegen, opritten, kanalen, terpen, waterkeringen en de kruisingen van infrastructuur. Hellingen van vele meters lang zijn nodig om dit hoogte verschil te realiseren. De hellingen nemen vaak veel ruimte in beslag, en dat is iets wat in Nederland niet altijd beschikbaar is. Vooral bij binnenstedelijke projecten of langs de wegen en sloten in de polder is vaak de ruimte voor natuurlijke hellingen niet te vinden. In deze situaties maakt men gebruik van een grondkerende constructie die een oplossing biedt voor de problemen met het natuurlijk talud.

Bekende voorbeelden van grondkerende constructies die vaak worden gebruikt in de GWW-sector om hoogte verschillen boven het maaiveld te overbruggen zijn de L-wanden, Figuur 2.1, damwanden, en gewapende grondconstructies. Dit rapport gaat niet in op grondkerende constructies voor bouwputten met damwanden en diepwanden.

2.2. Probleemanalyse

Het probleem van de Nederlandse slappe ondergrond is dat er bij ophogingen het wel bekende probleem optreedt, zettingen in de ondergrond. Bij grondkerende constructie zijn dit soort zettingen vaak erg groot, gezien het gewicht van de ophoging, de kerende constructie en de meestal nieuwe belastingen van het gebruik van de ophoging waarmee de ondergrond wordt belast. Dit probleem doet zich vooral voor in gebieden waar slappe ondergronden zoals veen en klei tot een diepte van vier meter of zelfs dieper te vinden zijn. Om te voorkomen dat er veel schade ontstaat door het verzakken van de constructies worden zij, in geval van de L-wand en de gewapende grond constructie, gefundeerd op een diepere zandlaag met behulp van palen, zie Figuur 2.1. Dankzij dit soort oplossingen kunnen grote zettingen worden voorkomen, alleen kunnen de bouwkosten van deze funderingen erg hoog oplopen. Ook damwanden zijn prijzig, gezien deze constructies in de vaste zandlaag worden gefundeerd.



Figuur 2.1: L-muur (InfraWiki.nl, 2016)

Vooralsinds er nieuwe contractvormen zoals DBM (Design, Build, Maintain) wordt de vraag naar duurzamere en goedkopere producten steeds groter. In de laatste jaren kan er steeds meer worden gegarandeerd dat kunststof in de vorm van geogrids, langdurig kan worden gebruikt in gewapende grondconstructies. Dit maakt het interessant om de constructie en de constructietechniek te analyseren en te vergelijken met de een paar van de huidige opties.

In dit onderzoek is gekozen voor het vergelijken van de gewapende grond constructie met de damwand en de L-wand, gezien deze het vaakst worden gebruikt. De diepwand is onrealistisch omdat deze vaak wordt gebruikt als kering bij projecten midden in de stad, waarbij er tot grote diepte moet worden afgegraven (bouwputten) en niet bij ophogingen. Dit is niet realistisch gezien dit soort constructies meer voor het verhogen van het maaiveld wordt gebruikt. De gewichtsmuur wordt eigenlijk niet veel meer gebruikt (alleen voor tijdelijke constructies), zeker niet bij grote kerende projecten binnen de GWW-sector. De L-muur is ook bedoeld als verbetering van een gewichtsmuur en dus is het meenemen van deze constructie niet voordelig voor het onderzoek.

3. DAMWAND

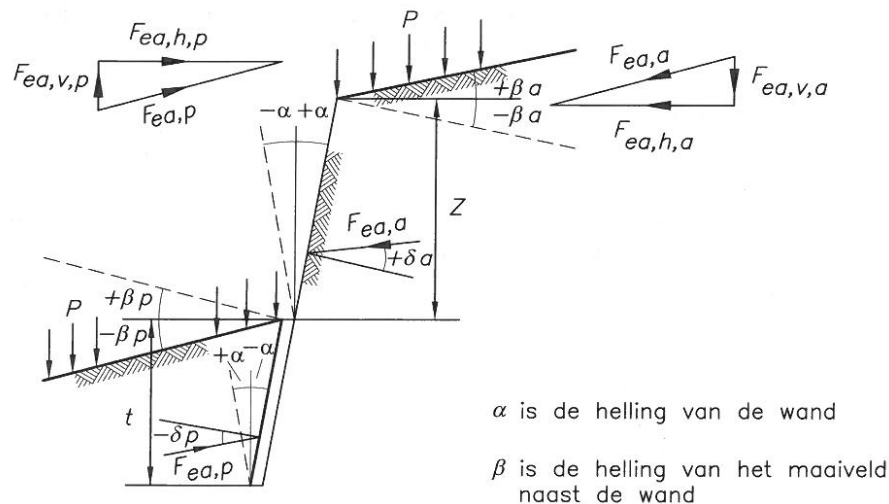
Dit hoofdstuk geeft een summierende omschrijving van de damwandconstructie. Hierin wordt beschreven hoe het werkt, met welke materialen en in wat voor situaties.

De damwand is een van de meest gebruikte grond- en waterkerende constructies van Nederland. Damwanden bestaan uit planken die uit hout, staal, gewapend beton en kunststof kunnen bestaan. Deze worden naast elkaar de grond ingeheid zodat een doorlopende wand ontstaat. Hout wordt al lang gebruikt als damwand voor de aanleg van slootjes en kanaaltjes, dit gebeurt nu nog steeds. De stalen damwand werd als waterdicht alternatief ontwikkeld in de 19^{de} eeuw en betonnen en kunststof damwanden zijn meer van de laatste tijd. De verschillende planken zijn vaak verbonden met een waterdicht slot, wat al bij het fabriceren van de stalen damwanden wordt vervaardigd. De planken worden in speciale vormen gemaakt om de krachten van de grond beter te kunnen keren.



Figuur 3.1: Voorbeeld gebruik damwanden als grondkering (keermuur, keerwand, grondkering, -)

De damwand werkt door het inklemmen van de onderkant van damwand in de bodem en draagkrachtige laag. Door de gronddruk van de onderste helft van de damwand wordt de gronddruk van de te keren grond tegen gegaan. Vaak wordt de damwand nog gesteund door een gording die wordt verankerd in de achterliggende grond. Door de gronddrukken ontstaan er grote buigende momenten in de damwand. De constructie moet zo worden ontworpen zodat deze buigende momenten kunnen worden opgenomen.



Figuur 3.2: Niveaus en hellingshoeken bij een damwandberekening (126, 2005)

4. KEERMUUR

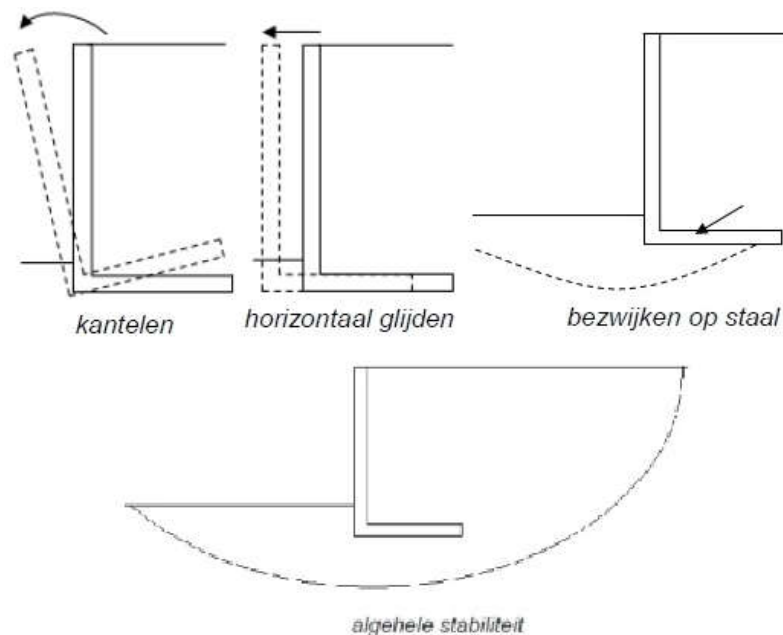
Dit hoofdstuk geeft een summierende omschrijving van de keermuurconstructie. Hierin wordt beschreven hoe het werkt, met welke materialen en in wat voor situaties.

De meest gebruikte vorm van prefab keermuren is de L-muur. Deze L-muren bestaan uit verschillende L-elementen die naast elkaar worden geplaatst om de muur te vormen. Deze keermuren kunnen ook als waterkering dienen, wanneer zij waterdicht worden afgewerkt. Echter is er bij het gebruik van deze keermuren, zeer grote hoeveelheden aan beton en wapening nodig. De elementen worden door specialistische bedrijven geproduceerd en ontworpen.



Figuur 4.1: Voorbeeld L-wand (keermuur, keerwand, grondkering, -)

De elementen gebruiken het neerwaartse gewicht van de grond om de horizontale gronddruk van de grond te keren. De muren worden ook verankerd toegepast om eventuele extra horizontale lasten op te kunnen vangen. De toepassing van keermuren wordt meestal op staal gefundeerd, wanneer er echter sprake is van een slappe ondergrond wordt er een paalfundering of voorbelasting aangebracht. Op staal gefundeerde keermuren zijn er meerdere bezwijkingsvormen die kunnen optreden, zie Figuur 4.2.



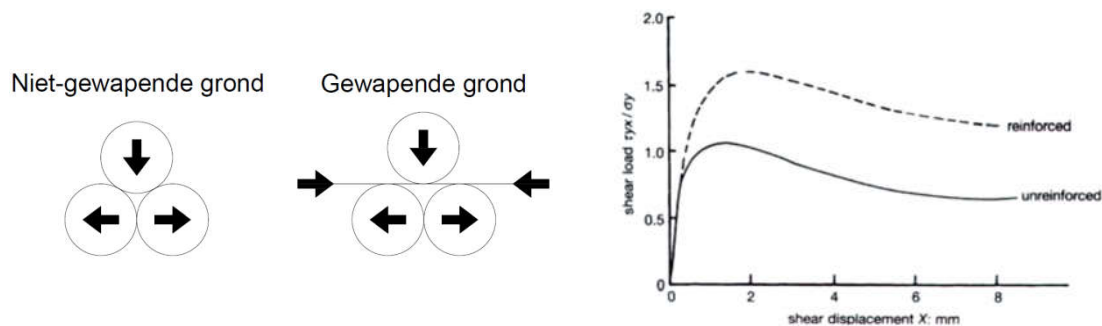
Figuur 4.2: Bezwijkingsvormen L-wanden

5. GEWAPENDE GROND

In dit hoofdstuk wordt de gewapende grond constructie toegelicht. Er wordt ingegaan op de geschiedenis van de ontwikkeling die de constructies hebben ondergaan en de wat voor materiaal er kan worden gebruikt om gewapende grond te maken. Verder worden de modellen besproken die de werking van gewapende grond in beeld proberen te brengen.

5.1. Inleiding

Bouwen met grond wordt veelvuldig gedaan en kan op veel verschillende plekken in een constructie worden gebruikt. Maar grond heeft de beperking dat de korrels waaruit het bestaat onder een bepaalde hoek van elkaar afschuiven. Deze hoek van inwendige wrijving zorgt ervoor dat grond niet gebruikt kan worden in constructies die groter zijn dan hun inwendige hoek en daarmee de vorming van een natuurlijk talud. Er werd echter ontdekt dat door het inbrengen van andere materialen, de zogenoemde wapening, de afschuifweerstand en de stijfheid van grond toenemen. De wapening in de grond voorkomt dat de grond afschuift wanneer deze boven zijn hoek van inwendige wrijving komt.



Figuur 5.1: (l) Werking gewapende grond

(r) Last-verplaatsingsdiagram ongewapende en gewapende grond (naar Jewel, 1980)

Wanneer de grond wordt belast, door het overschrijden van zijn natuurlijke hoek van inwendige wrijving, ontstaat er in horizontale en verticale richtingen vervorming. Door de druk op de bovenste korrel begint de onderste korrels een zijwaartse beweging te maken. Wanneer tussen de bewegende korrels een wapeningsprofiel wordt toegepast, wordt ten gevolgen van wrijving tussen element en korrel de vervorming verhinderd worden, zie Figuur 5.1.

5.2. Geschiedenis

Gewapende grond bestaat al ontzettend lang, er werden vroeger namelijk al modderhutten gebouwd die takjes gebruikte om adobe bakstenen te maken. Met deze stenen konden er sterkere en grotere hutten gebouwd worden. In Figuur 5.2 wordt een muur getoond die tweeduizend jaar geleden is gebouwd op een helling voor het vormen van een plat vlak. De grond wordt verankerd met behulp van houten boomstammen en grote stenen wat voorkomt dat er vervorming optreedt.

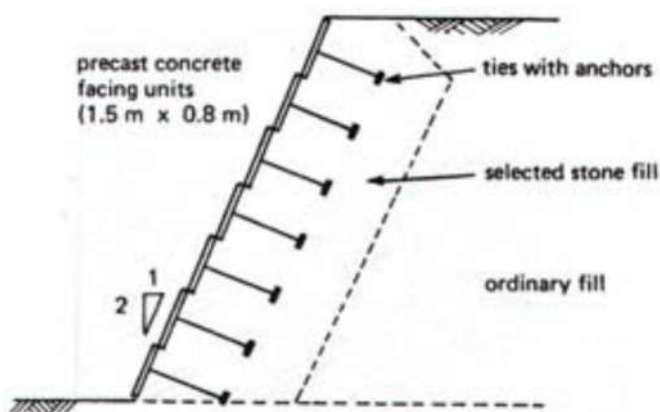


Figuur 5.2: (l) 2000 jaar oude gewapende grondkering (Armtec Ltd. , 2013)

(r) Maken van Adobe blokken. (Kitch, 2015)

In de Bijbel staan ook al basisprincipes beschreven van het wapen van grond. Er is bekend dat er zelfs al constructies bestonden in 4000 voor Christus die gemaakt zijn door gebruik te maken van deze techniek. De oudst bewaarde constructies ter wereld bevinden zich in Agar-Quf, nabij Baghdad. Deze constructie is opgebouwd uit stenen van klei die verankerd zijn door middel van geweven matten of riet. Een andere plaats waar een voorbeeld van gewapende grond kan worden gevonden, is de Chinese Muur waar het principe nog steeds op sommige plaatsen te zien is als funderingselement.

In 1925 tot 1945 zijn er grote stappen gemaakt in vaststellen van de werking van de techniek, dit is gedaan door de heren Munster en Coyne. Munster creëerde gewapende constructies door gebruik te maken van hout, zie Figuur 5.3, en Coyne gebruikte modernere materialen zoals staal en beton om een keermuur te creëren. Hierbij werd de facing verankeren door middel van ankerplaten die achter in het massief waren geplaatst.



Figuur 5.3: (l) Keermuur ontwikkeld door Coyne (Boer, 2005)

(r) Eerst geconstrueerde gewapende grond muur door Henri Vidal in 1960 (Armtex Ltd., 2013)

De Franse ingenieur Henri Vidal ontwikkelde echter in 1960 de moderne manier van het wapenen van grond. Vidal en zijn nieuw opgerichte bedrijf 'Terre Armée' bouwde de eerste toepassing van gewapende grond met behulp strips die via wrijvingsweerstand er voor zorgde dat de constructie verankerd bleef. In 1983 zijn de eerste landhoofden in Nederland opgetrokken en sinds dien is het concept af en toe toegepast in projecten.

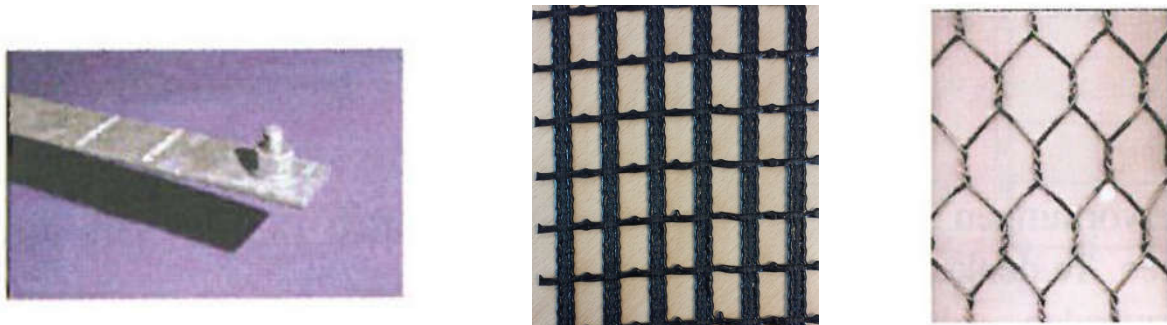


Figuur 5.4: Gebruik van Terre Armée bij A2 Eindhoven (voetsgewapendegrond, 2015)

5.3. Wapening

De moderne wapening die wordt gebruikt in gewapende grond, bestaat voornamelijk uit staal en kunststof. Deze materialen worden toegepast als strip, grid of ladder gevormde wapening. Deze vormen zorgen voor verschillende interacties met grond, maar over het algemeen wordt de grid of ladder vorm het sterkst bevonden. Dit komt door het zogenaamde “Interlocking” effect, hierbij wekt het zand wat zich in de vakjes bevindt een passieve gronddruk op waardoor de wapening meer spanning kan leveren.

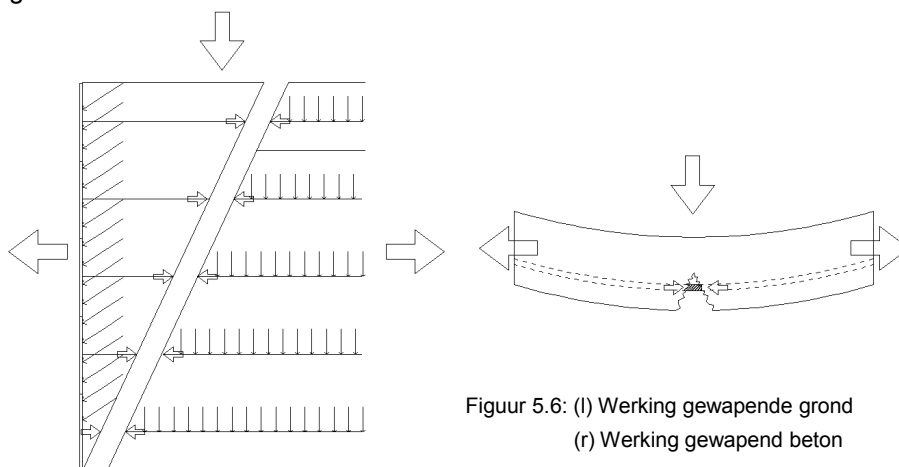
Wanneer men gebruik wil maken van textiel of kunststof als wapening, wordt voornamelijk het geogrid gebruikt maar dit kan ook in kunststof strips. Deze hebben een grid vorm en worden op verschillende manieren geproduceerd die allemaal verschillende voor- en nadelen hebben.



Figuur 5.5: (l) Voorbeeld stalen strip (CBS CUR, 2000)
(m) Voorbeeld textiel geogrid
(r) Voorbeeld stalen grid (CBS CUR, 2000)

5.4. Theoretische werking

De ervaringen vanuit de geschiedenis laat blijken dat het toevoegen van materiaal als wapening werkt bij het verstevigen van grond. Het principe zou kunnen worden vergeleken met gewapend beton waarbij het staal de trekspanningen die optreden in het beton overneemt wanneer het beton scheurt. Het overnemen van trekkracht is ook wat de wapening in gewapende grond doet. Alleen staat er op de wapening in grond een constante drukkracht en is het niet direct te vergelijken. Er zijn veel theorieën en theoretische modellen, maar er bestaat nog geen algemeen theoretisch toepasbaar model voor gewapende grond.

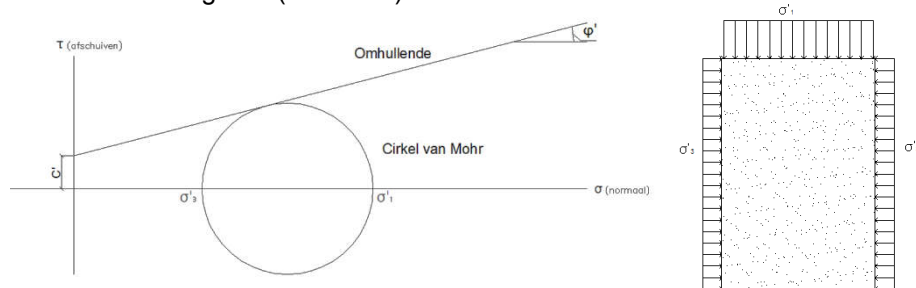


Figuur 5.6: (l) Werking gewapende grond
(r) Werking gewapend beton

Hoewel de theoretische benadering van gewapende grond tekortkomingen heeft, is het verstandig om in hoofdlijnen de ontwikkelde concepten nader te bekijken. Deze verschaffen, zij het beperkt, inzicht in de werking van gewapende grond. Deze theorieën zijn bepaald aan de hand van triaxiaalproeven waarbij gebruik is gemaakt van asymmetrische belastingen en continue wapening. In de praktijk wordt dit echter niet zo vaak zo gevonden.

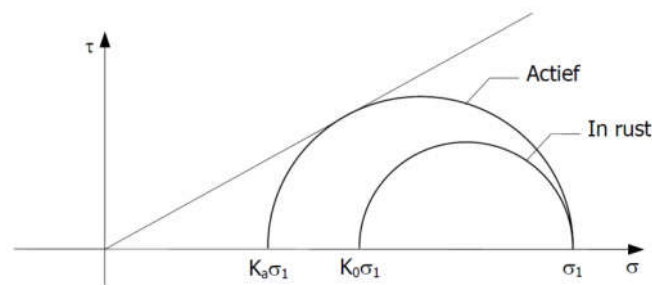
5.4.1. Ongewapende grond

Grond volgt het bezwijkcriterium van Mohr-Coulomb. De theorie stelt dat wanneer de cirkel van Mohr buiten de omhullende komt, de grond bezwijkt door het overschrijden van de schuifweerstand. De omhullende is een lijn met een hoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving ϕ , bij cohesieloze grond gaat de omhullende door de oorsprong. Bij grond met cohesie schuift de lijn omhoog aan de hand van de cohesieve waarde c' van grond (translatie).



Figuur 5.7: Wet van Mohr-Coulomb

Wanneer cohesieloze grond in rust beschouwd wordt, is er sprake van neutrale gronddruk. De verticale spanning die optreedt bij de Mohr cirkel is dan gelijk aan het soortelijke gewicht van de grond op de beschouwde diepte en de horizontale spanning is gelijk aan de $K_0 \sigma_1$. Wanneer de grond ontspant, dan neemt de horizontale gronddruk af tot de actieve waarde en komt deze overeen met $K_a \sigma_1$. In dit geval raakt de Mohr cirkel de omhullende en bezwijkt de grond nog net niet.

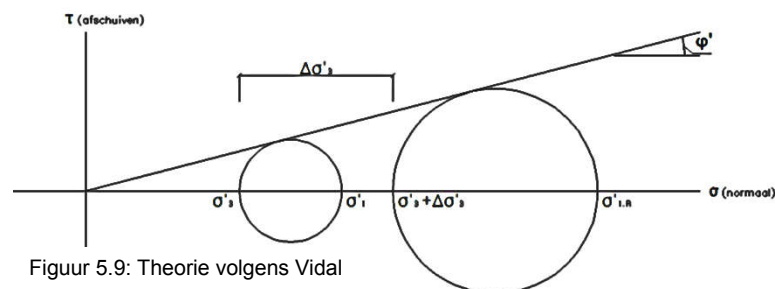


Figuur 5.8: Gedrag van grond (Boer, 2005)

5.4.2. Theorie gewapende grond Vidal

De theorie die Henri Vidal in 1966 ontwikkelde gaat ervan uit dat door de toevoeging van wapening een verandering in de horizontale kracht oplevert, σ_3 . Wapening wil het zijlings uitzetten van grond verhinderen door de interactie of wrijving tussen wapening en grond. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de hechting tussen grond en wapening en de stijfheid van de wapening. In deze theorie wordt het toevoegen van wapening gezien als het verhinderen van verplaatsing van de grond in de horizontale richting. De horizontale kracht neemt dankzij de wapening toe met σ_3 . Wanneer de aanname van de een ideale wapening wordt gedaan, dus geen rek, slip of breuk, kan de verticale spanning elke waarde aannemen zolang de wapening niet bezwijkt. In werkelijkheid is de grootte van de verticale belasting afhankelijk van de sterkte van de wapening. Wanneer de wapening breekt, wordt er na de proef Figuur 5.9 gevonden.

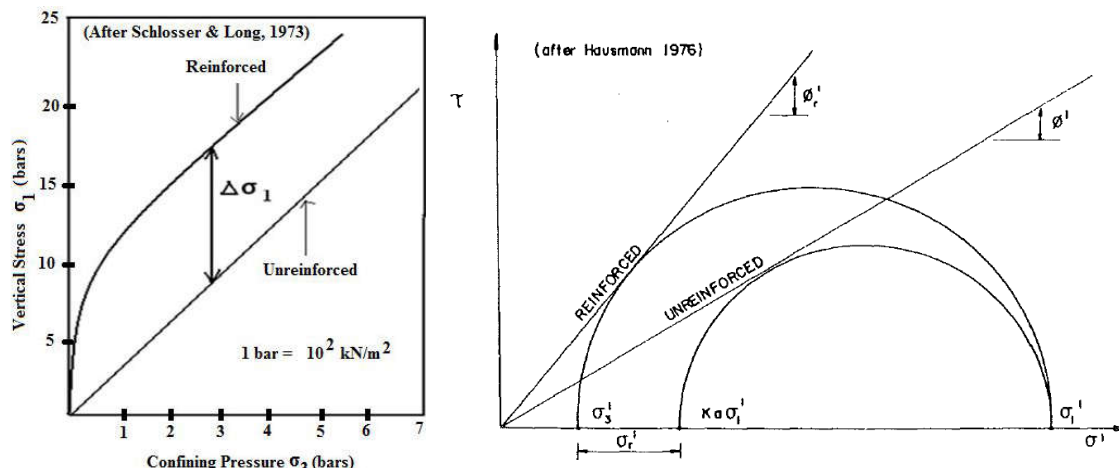
In 1972 verkreeg Vidal andere inzichten en stapte over op de anisotrope cohesie theorie, ontwikkeld aan het 'Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)' door de heren Schlosser & Long.



Figuur 5.9: Theorie volgens Vidal

5.4.3. Anisotrope cohesie theorie

Deze theorie is ontwikkeld door het observeren van triaxiaalproeven met wapeningsplaatjes in een grondmonster door de eerder genoemde heren Schlosser & Long (LCPC). Later is dit experiment met ongeveer dezelfde resultaten herhaald door de heer Hausmann aan de New South Wales (NSW) Institute of Technology. De resultaten van de proeven wezen erop dat de verticale spanning invloed heeft op het bezwijkingsmechanisme, dat in werking treedt bij het bezwijken van het monster. Bij een hoge verticale spanning bezweek de wapening op sterkte zoals eerder geconstateerd door Vidal. Alleen werd er bij deze proeven ook geconstateerd dat de wapening bezweek bij een lage spanningstoestand. Dit kwam doordat er niet genoeg wrijving was tussen grond en wapening, waardoor de wapening slipt ten opzichte van het grondmonster.



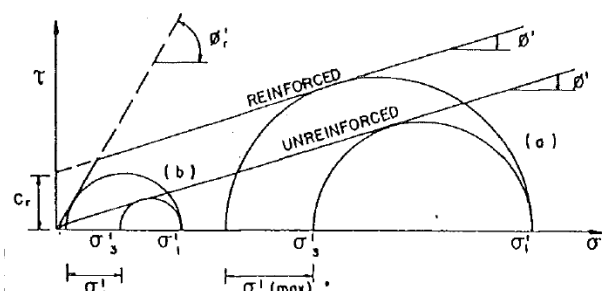
Figuur 5.10: (l) Door wapening een verbetering van de cohesie (Schlosser & Long) (Kitch, 2015)

(r) Door wapening een verbetering van de hoek van inwendige wrijving (Hausmann) (Boer, 2005)

Door Schlosser & Long werd ontdekt dat boven een bepaalde waarde van de horizontale spanning de grootte van het verschil in verticale spanning bij bezwijken σ_1 tussen gewapende grond en ongewapende grond constant blijft, zie Figuur 5.10. Als de hoek van inwendige wrijving van gewapende en ongewapende grond gelijk blijft dan kan er gezegd worden dat de waarde σ_1 , een cohesie waarde is die opgewekt wordt door de wapening. Hierdoor bezwijkt het grondmonster op een veel hogere verticale spanning omdat de wapening bezwijkt. Het bezwijken door het slippen van de wapening kan worden uitgelegd aan de hand van het Figuur 5.10 van Hausman, waarin de spanning van de wapening en de verticale spanning rechtevenredig zijn aan elkaar en zorgt voor een vergroting van de hoek van inwendige wrijving. Als hier vanuit wordt gegaan en de verticale spanning blijkt te laag te zijn ($\phi_r > \phi'$), kan de wapening onvoldoende spanning leveren. Dit betekent dat de interactie tussen grond en wapening te klein is om genoeg spanning op te wekken. Dit komt omdat de benodigde hoek van inwendige wrijving niet aanwezig is. Wanneer dit optreedt, begint de wapening met slippen en wordt er een andere bezwijkingsvorm gevonden.

In Figuur 5.11 zijn de twee bezwijkingsmechanismes gecombineerd in een model te zien. Hierbij geeft de linker cirkel de lage spanningstoestand ten gevolge van het slippen van de wapening weer en de rechter cirkel de hoge spanningstoestand ten gevolge van het breken van de wapening.

(after Hausmann 1976)



Figuur 5.11: Gecombineerde cirkel van Mohr voor het breken en slippen van wapening in gewapende grond (Hausmann) (Boer, 2005)

6. VOOR EN NADELEN

De keuze voor een oplossing is vaak afhankelijk van de situatie waarin de grondkerende constructies kan worden geplaatst. Aan de constructies hangen verschillende voor en nadelen waardoor de ene grondkering beter werkt in een situatie dan een andere.

6.1. Damwand

Tabel 6.1: Voor- en nadelen damwand

Voordelen	Nadelen
Te gebruiken bij elke ondergrond, behalve in bodems met grof grind of grote obstakels.	Bij snelle productie, veel trillingsoverlast. Bij weinig overlast, geringde productie.
Kan van meerdere materialen worden gemaakt.	Veel materiaal gebruik.
Meerdere soorten vormen beschikbaar, ook in combinatie met buisprofielen en H-profielen.	Geen controle op optredende vervormingen en schade aan de onderkant van de damwand.
Kan gerealiseerd worden bij grote kerende hoogtes.	Kerende hoogte is maar een gedeelte van de hoogte.
Kan vrij snel gerealiseerd worden.	Weinig ruimte nodig bij uitvoering.
Hoge stabiliteit.	Zware machines nodig bij uitvoering.

6.2. L-muur

Tabel 6.2: Voor- en nadelen L-muur

Voordelen	Nadelen
Wordt geprefabriceerd, dus minder risico op fouten en snelle (massa) productie.	Moet gespecialiseerd worden ontworpen door fabrikant.
Kan vrij snel worden uitgevoerd wanneer alle elementen aanwezig zijn.	Kan niet of heel slecht op zeer slappe ondergrond worden gebouwd.
Kan gecontroleerd worden uitgevoerd.	Nemen veel ruimte in beslag bij het opslaan op de bouwplaats.
Bij beschadigingen kan een element vrij gemakkelijk worden gerepareerd.	Elementen kunnen moeilijk worden vervangen.
	Wordt alleen gemaakt van beton.

6.3. Gewapende grond

Tabel 6.3: Voor- en nadelen gewapende grond

Voordelen	Nadelen
Weinig ruimte nog op de bouwplaats, gebruikt kleine elementen.	Langdurige uitvoering door het steeds opnieuw aanbrengen van lagen.
Weinig materiaal nodig bij realiseren.	Verdichting van lagen nodige.
Bekleding kan vrij gemakkelijk gerepareerd of vervangen worden.	Twee verschillende grondsoorten nodig die gescheiden moeten blijven (drainage koffer).
Kan zeer gecontroleerd worden aangebracht.	Beschadigen van wapening vrij gemakkelijk, vooral bij geogrids.
Kunnen veel verschillende soorten materialen gebruikt worden bij zowel bekleding als wapening.	Beschadigen van bekleding na oplevering door uitwendige invloeden is zeer sterk aanwezig.
Gebruik van de constructie is zeer flexibel en kan in veel verschillende vormen worden toegepast.	Reparatie van wapening wordt moeilijker hoe dieper deze ligt.
	Kan niet of heel slecht op zeer slappe ondergrond worden gebouwd.
	Geogrid wapening ondervinden grote reducerende factoren hierdoor er maar 25% van de treksterkte wordt gebruikt.
	Constructie kan grote vervormingen ondervinden.

7. CO₂-UITSTOOT

Omdat er wordt gezocht naar een duurzame steile wand constructie moet er bepaald worden wat de CO₂-uitstoot is van de constructies. Er wordt in Bijlage C. gekeken naar de levenscyclus van deze elementen. Met deze analyse wordt er in vier fases bepaald hoe duurzaam een constructie is. Omdat er binnen deze vier fases alleen bij fase 1 duidelijk is hoeveel CO₂-uitstoot er wordt geproduceerd, wordt alleen met deze uitstoot gewerkt. Hiermee wordt de uitstoot van de productie van de elementen en het transport ervan bedoeld. De andere vier fases kunnen worden gebruikt als extra voor en nadelen voor het kiezen van een constructie.

Hieronder zijn de resultaten te zien van de CO₂-uitstoot, die geproduceerd wordt bij de creatie fase. In Bijlage C. worden deze waarde vastgesteld. Deze kunnen echter onderhevig aan verandering zijn wanneer er andere materialen worden gebruikt of als de waarde verandert door nieuw onderzoek en worden binnen dit verslag alleen gebruikt als vergelijkingswaarde die worden gevonden aan de hand van de bronnen.

Tabel 7.1: CO₂-uitstoot bij creatie

Constructie	CO ₂ -uitstoot
Damwand	283,10 kg CO ₂ per m ² te produceren damwand. 10,90 kg CO ₂ per m ² voor het transport voor de damwand. 294,00 kg CO ₂ per m ² damwand.
L-muur	250,00 kg CO ₂ per m ³ gewapend beton, productie + transport.
Gewapende grond	0,32 kg CO ₂ per m ² geogrid (Miragrid GX 20/20). 0,77 kg CO ₂ per m ² bekleding (Rock PEC 55/55). 0,19 kg CO ₂ per m ² bekleding (Polyfelt Green). 0,75 kg CO ₂ per m ² drainage koffer + transport (Lime stone/Grind). 0,82 kg CO ₂ per m ² transport geogrids naar site. 0,37 kg CO ₂ per m ² transport bekleding naar site. 3,23 kg CO ₂ per m ² gewapende grondconstructie.

De waarde van de gewapende grondconstructie worden bij het berekenen van de constructies omgerekend om op de juiste waarde te komen. Hierbij moeten de waarde naar de juiste afmetingen worden geschaald, dit is echter te veel om hier weer te geven. In bijlage H. staan de juist waardes voor de constructies per strekkende meter. Hieronder is een opsomming te zien van nieuwe voor en nadelen van de constructies die gevonden zijn in fases 2, 3, 4.

Tabel 7.2: Extra voor en nadelen constructies

Damwand	L-muur	Gewapende grond
80% van het staal van de damwand kan worden hergebruikt, dit is echter pas na 120 jaar.	Het materiaal kan worden gedemonteerd, gebroken en worden gezeefd om te worden hergebruikt in verschillende functies, als voorbeeld kan puinfunderingen worden genoemd.	Wapening kan worden hergebruikt, bij geogrids kan het materiaal echter alleen worden gedowncycled en verliest dus zijn kwaliteit en keert dus niet terug als dezelfde wapening.
Na tijdelijk gebruik kan de damwand gemakkelijk worden hergebruikt op een nieuwe locatie (na controle schade).	Bij nieuwe constructies mag 30% van de constructie bestaan uit hergebruikt beton (echter vermindering van de sterkte).	Bij sloop kunnen geogrids ernstig beschadigen en kunnen niet direct weer worden hergebruikt.
Veel energie nodig om de damwand planken om te smelten voor de nieuwe functie.	Veel energie nodig om beton te slopen, en van wapeningsstaal te scheiden.	Veel energie nodig om de geogrids te smelten voor de nieuwe functie.
	Scheiding nodig tussen beton en staal.	Schoonmaken van geogrids nodig voor het omsmelten omsmelting.

8. BEREKENINGSOPZET

In dit hoofdstuk wordt een opzet gegeven voor de berekeningen die gedaan worden om de ontwerpen te kunnen vergelijken. Deze worden volledig beschreven in de berekeningsrapporten van de constructies, deze kunnen worden gevonden in Bijlage E, F en G

8.1. Damwand

Bij de berekening wordt er het volgende stappenplan doorlopen. De berekening wordt voornamelijk gedaan in D-sheet:

1. Bepalen krachten op damwand;
2. Bepalen grondspanningen;
3. Berekenen diepte waarop passieve en actieve waarde gelijk zin;
4. Berekenen momenten op de damwand en inheidiepte;
5. Bepalen van het damwandprofiel;
6. Controle D-sheet pilling;
 - a. Stabiliteit;
 - b. Zettingen;

8.2. L-muur

De ontwerpberoeeningen aan L-muren worden gedaan door gespecialiseerde bedrijven die, conform beton specificaties, op maat geproduceerde producten aanleveren. Gezien het rekenen aan een L-muur buiten dit onderzoek valt, worden er maten van leveranciers gebruikt en waar nodig is geïnterpoleerd. De berekening gaat voornamelijk over funderen op staal berekeningen, dit wordt conform NEN-EN 1997-1 en NEN-EN 9997-1 berekend.

De berekening wordt volgens het volgende stappenplan doorlopen:

1. Toetsing verticaal draagvermogen:
 - a. Bepaling belasting en effectieve afmetingen funderingsvlak;
 - b. Bepaling invloedsdiepte;
 - c. Toets verticale draagkracht in ongedraineerde toestand (indien van toepassing);
 - d. Toets verticale draag kracht in gedraineerde toestand;
 - e. Toets op doorponzen (indien van toepassing);
 - f. Toets op zijdelings wegpersen (indien van toepassing);
2. Toetsing weerstand tegen horizontaal glijden:
 - a. Bepaling belasting en effectieve afmetingen funderingsvlak;
 - b. Toets horizontale draagkracht in ongedraineerde toestand (indien van toepassing);
 - c. Toets horizontale draagkracht in gedraineerde toestand
3. Toetsing algehele stabiliteit
4. Toetsing kantelstabiliteit
5. Toetsing zakkings en zakkingverschillen:
 - a. Bepaling belastingen en effectieve afmetingen funderingsvlak;
 - b. Berekening spanningsspreiding in de diepte;
 - c. Berekening zakking;

8.3. Gewapende grond

Gewapende grond wordt getoetst op dezelfde Eurocode normen als de L-muur, gezien het feit dat deze ook op staal wordt gefundeerd. Verder worden hierbij de berekening volgens de CUR 198 gedaan, hiermee wordt het volgende schema aangehouden als aanvulling op het stappenschema uit de NEN-EN 1997-1:

6. Toetsing van inwendige stabiliteit;

Bij deze berekening wordt er uitgegaan van omgeslagen geogrids als wapening;

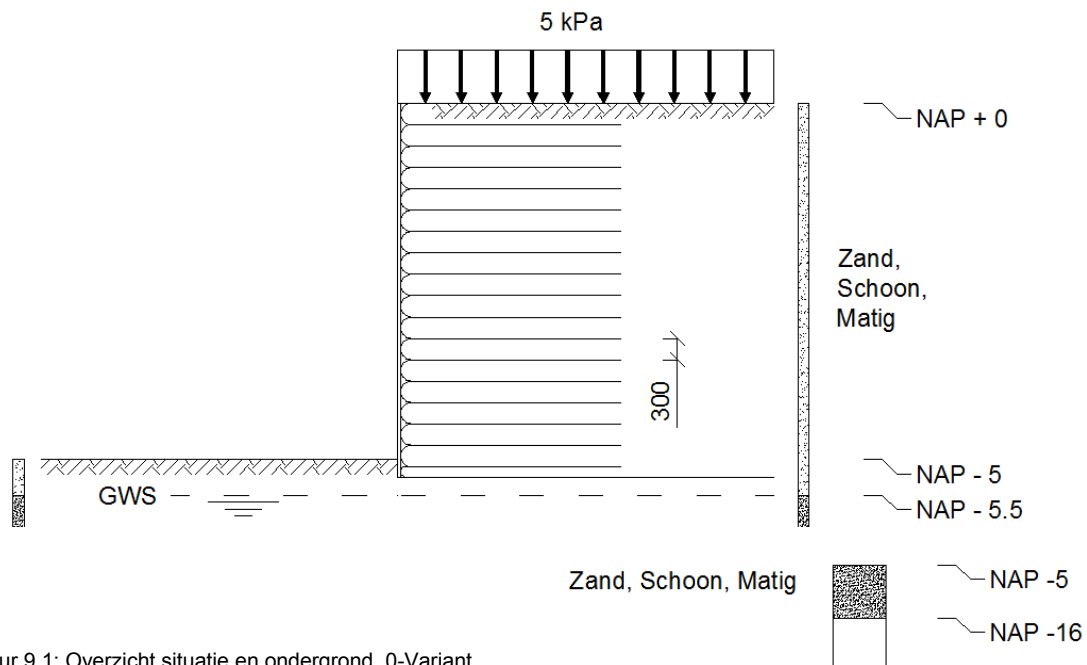
 - a. Toetsing treksterkte wapening;
 - b. Toetsing aanhechting tussen wapening en grond;
 - c. Toetsing falen van de bekleding (omgeslagen geogrid);

9. OPZET VARIANTEN

Er zijn varianten opgesteld waarin de ontwerp en stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd. Dit is nodig voor de vergelijking tussen de verschillende constructies. Met de berekeningen wordt er een dwarsdoorsnede ontworpen en technisch gecontroleerd. Daarnaast wordt er voor elke doorsneden, de kosten en CO₂ waarde berekend. Deze varianten zijn onderverdeeld in een praktijkvoorbeeld en twee gesimuleerde situaties. Daarnaast is er een berekening opgezet in een zogenaamde 0-situatie. Deze 0-situatie is bedoeld als nulmeting van de berekening en als kalibratie voor het opzetten van de berekening. De constructies zijn in de bijhorende figuren te zien en zijn verder beschreven in Bijlage D.

9.1. 0-Variant, Kerende constructie in volledig zand

De 0-Variant wordt als basis van de berekening en als 0-meting gebruikt binnen het onderzoek, dit betekent dat de variant in een zo neutraal mogelijke situatie is geplaatst om de berekeningsmethode te testen. Daarom is voor deze variant een fictieve situatie opgezet waarin de constructie niet het gevaar loopt om te bezwijken. Hier is voor een situatie gekozen waarin alleen zand voorkomt, ook in de ondergrond (sterke grondlagen). Met deze 0-situatie wordt er aangetoond dat de constructies kunnen worden gebruikt als grondkerende constructie in een veilig situatie.



Figuur 9.1: Overzicht situatie en ondergrond, 0-Variant

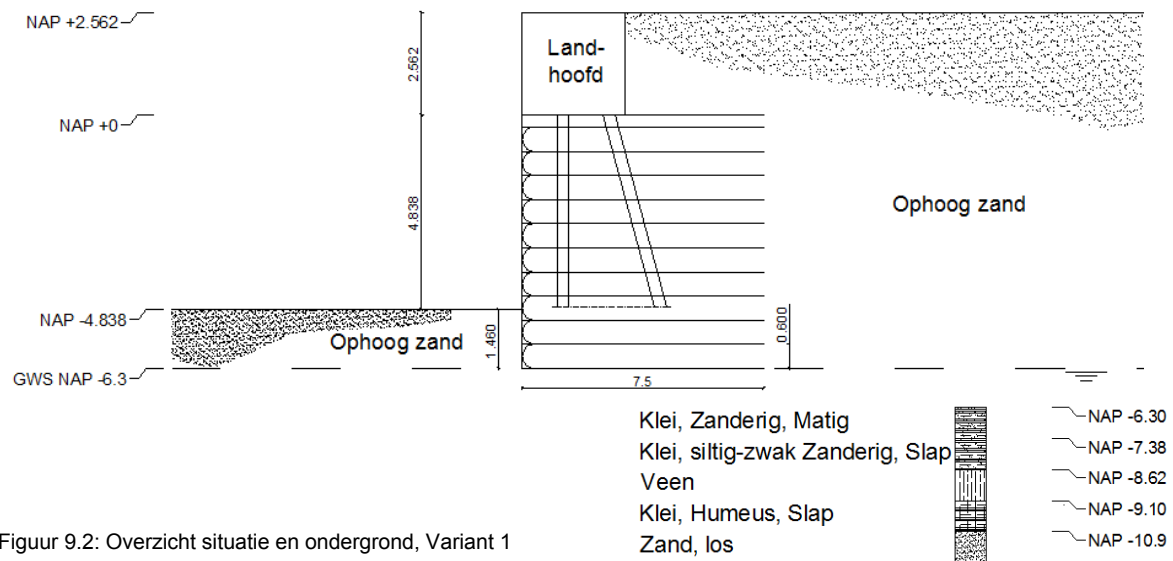
In deze situatie wordt een zandsoort gebruikt om de 0-situatie zo veilig mogelijk te maken, dit wordt gedaan met de parameters in Tabel 9.1.

Tabel 9.1: Grondparameters 0-variant

Grondsoorten	γ kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	ϕ' Graden	c' kPa	c_u kPa
Zand, Schoon, Matig	18	20	32,5	0	0

9.2. Variant 1, Casestudie, Kruispunt van De Strip en de N302

Deze casestudie of praktijkvoorbeeld gaat over een constructie die nu wordt aangelegd in Noord-Holland in de buurt van Hoorn. Deze constructie wordt in gewapende grond uitgevoerd en dient als ondersteuning van een landhoofd voor een viaduct. Aan beide kanten van de weg wordt er voor een hoogte van ongeveer zeven en een halve meter een gewapende grond constructie gemaakt. Het landhoofd wordt op palen gefundeerd, deze worden door het massief heen geheid om op de draagkrachtige laag te komen, gezien de ondergrond zeer slap is. Hierdoor worden de krachten die de brug afdraagt op het landhoofd niet afgedragen op de gewapende grond constructie. Het verhoogde zandpakket wordt als oprit gebruikt naar het landhoofd, waardoor deze belast wordt met de belastingen van een autoweg.



Figuur 9.2: Overzicht situatie en ondergrond, Variant 1

De hierbij gebruikte grondparameters zijn verkregen bij het locatie bezoek van de casestudie. Deze zijn in laboratorium bepaald en worden gebruikt volgens Tabel 9.2.

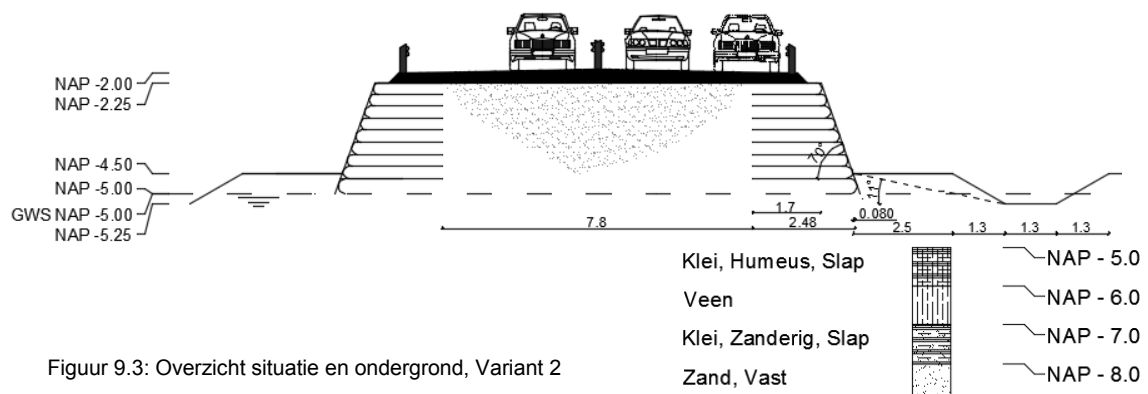
Tabel 9.2: Ondergrondparameters variant 1

Ondergrondgegevens		ϕ [°]	c' [kPa]	γ [kN/m ³]	B.k. laag [N.A.P.]	O.k. laag [N.A.P.]	Dikte laag [m]
Laag 1	Klei, Zwak zandig, Vast 1	32,5	0,0	20,0	-6,30	-7,38	1,08
Laag 2	Klei, Zwak zandig, Slap	25,2	5,2	16,0	-7,38	-8,62	1,24
Laag 3	Veen, Matig voorbelast, Matig 1	25,7	2,8	15,2	-8,62	-9,10	0,48
Laag 4	Klei, Organisch, Matig 1	22,1	1,1	13,5	-9,10	-10,90	1,8
Laag 5	Zand, Schoon, Matig	32,5	0,0	20,0	-10,90	∞	∞

Deze variant is ontworpen aan de hand van het interview met de uitvoerder van de aannemer (Jong, 2016) die ter plaatsen was ten tijden van het bezoek.

9.3. Variant 2, Weg in de polder

Met deze variant wordt een situatie doorgerekend waarbij een N weg in een polder wordt aangenomen. Deze verhoging en lasten van de weg zorgt voor een grote krachten op de zeer slappe ondergrond van de polder. De hoogteverschillen en grondwaterstand zijn gebaseerd op de A4 bij Leidschendam, hierbij ligt de weg op een hoogte van NAP -2.0 meter. Met deze gegevens is er een ontwerp gemaakt van een tweebaansweg op een ondergrond die wordt gevonden in de buurt van Leidschendam, namelijk klei en veen. Aan de voet van de constructie worden sloten geplaatst, deze hebben een grote invloed op de stabiliteit van de gehele verhoging.



Figuur 9.3: Overzicht situatie en ondergrond, Variant 2

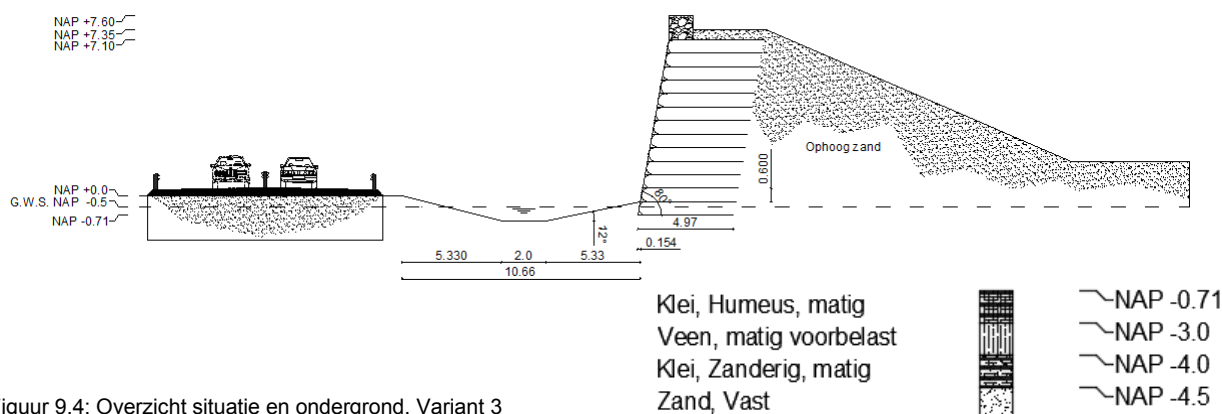
Bij dit ontwerp wordt de ondergrond in het gebied van Leidschendam, dat voornamelijk uit klei en veen bestaat, nagebootst. Voor de situatie worden de ondergrond parameters van Tabel 9.3 gebruikt.

Tabel 9.3: Grondparameters variant 2

Ondergrondgegevens		ϕ [°]	c' [kPa]	γ [kN/m ³]	B.k. laag [N.A.P.]	O.k. laag [N.A.P.]	Dikte laag [m]
Laag 1	Klei, Organisch, Slap	15,0	1,0	13,0	-2,75	-3,75	1,00
Laag 2	Veen, Matig voorbelast, Matig 1	15,0	2,5	12,0	-3,75	-4,75	1,00
Laag 3	Klei, Zwak zandig, Slap	22,5	0,0	15,0	-4,75	-5,75	1,00
Laag 4	Zand, Schoon, Vast 1	35,0	0,0	21,0	-5,75	-15,75	10,00

9.4. Variant 3, Verhoging langs weg

In deze situatie wordt de constructie gebruikt als natuurlijke barrière tegen geluid en visuele overlast van de weg voor bijvoorbeeld een wijk. Deze geluidwal kan vrij hoog worden, dit afhankelijk van de reductie-invloed die de geluidswal moet hebben op het geluid. Wanneer de geluidswal een hoogte van 7.5 meter bereikt, is het de vraag of de constructie en de slappe ondergrond nog blijft functioneren. Wanneer dit langs een brede sloot wordt gedaan, is het goed mogelijk dat de constructie horizontaal afschuift of bezwijkt op de algehele stabiliteit van de constructie.



Figuur 9.4: Overzicht situatie en ondergrond, Variant 3

Bij dit ontwerp worden iets sterkere grondparameters gebruikt, alleen de laag opbouw wordt anders beschouwd. Deze worden weergegeven in Tabel 9.4.

Tabel 9.4: Ondergrondparameters variant 3

Ondergrondgegevens		ϕ [°]	c' [kPa]	γ [kN/m ³]	B.k. laag [N.A.P.]	O.k. laag [N.A.P.]	Dikte laag [m]
Laag 1	Klei, Organisch, Matig 1	15,0	0,0	15,0	-7,81	-10,10	2,29
Laag 2	Veen, Matig voorbelast, Matig 1	15,0	2,5	12,0	-10,10	-11,10	1
Laag 3	Klei, Zwak zandig, Matig	22,5	5,0	18,0	-11,10	-11,60	0,5
Laag 4	Zand, Schoon, Matig	32,5	0,0	20,0	-11,60	-21,60	10

10. OPZET MULTI CRITERIA ANALYSE

De Multi Criteria Analyse wordt gebruikt om de vergelijking te maken tussen de verschillende constructies die ontworpen worden in de eerder genoemde situaties. De gegevens van de constructie die aan de hand van de berekening worden gevonden, worden beoordeeld aan de hand van vooraf gestelde criteria. In de MCA worden er scores gebruikt van 1 tot 5, zodat er een duidelijk onderscheid kan worden gemaakt tussen de verschillende constructies. Hieronder worden de criteria toegelicht, in Bijlage H. kan de volledige beschrijving en berekeningen van de waarde worden gevonden.

10.1. Criteria 1: Eurocode

Het grootste deel van de berekening bestaat uit het toetsen van de constructie op de eisen van uit de Eurocode (Nederlands Normalisatie-instituut, 2012). De constructies worden ontworpen om te voldoen aan de eisen, alleen is dit niet altijd mogelijk. Omdat de constructie altijd moet voldoen aan de eisen van Eurocode, wordt deze criteria beoordeeld met een 1 of een 0 voor het wel of niet voldoen aan de Eurocode. Omdat deze score vrij belangrijk is wordt er een belang factor van 5 gegeven aan de criteria. In Tabel 10.1 wordt een overzicht gegeven van de scores van deze criteria.

Tabel 10.1: Overzicht uitleg scores criteria 1

Score	Criteria
1	Wordt voldaan aan alle toetsingen.
0	Er wordt niet voldaan aan enkele toetsingen.

10.2. Criteria 2: Stabiliteit

De stabiliteit van de constructie is ook een eis van de Eurocode en gaat over de bepaling van het kritieke glijvlak van de constructie. De constructie wordt vanwege deze reden doorgerekend met behulp van het D-Geo stability programma en is daarom een aparte criteria. In dit rekenprogramma wordt de stabiliteit van een constructie weergegeven met een zogenaamde safety factor, wanneer deze onder de waarde van 1 valt, faalt de constructie en bij een waarde van 1.5 wordt de constructie als zeer veilig beschouwd. De scores zijn dan ook verdeeld over de resultaten tussen de 1 en de 1.5, waarbij een 0 wordt toegewezen bij alle waardes die onder de safety factor van 1 vallen, zie Tabel 10.2.

Tabel 10.2: Overzicht uitleg scores criteria 2

Score	Criteria
5	Safety factor > 1.4
4	$1.5 \geq \text{Safety factor} > 1.3$
3	$1.3 \geq \text{Safety factor} > 1.2$
2	$1.2 \geq \text{Safety factor} \geq 1.1$
1	$1.1 > \text{Safety factor} \geq 1.0$
0	$1.0 > \text{Safety factor}$

10.3. Criteria 3: Ontwerpkosten

Door de afmetingen van de dwarsdoorsnede, worden de kosten per strekkende meter berekend om de constructie te vergelijken. Deze kosten worden bepaald door een interview met een leverancier van geotextielen (Ruiter, 2016) en met GWW kosten (GWW kosten, -). De kosten van de constructies zijn echter onderhevig aan verandering wanneer er andere materialen worden gebruikt of als de prijzen veranderen en worden binnen dit verslag alleen gebruikt als vergelijkingswaarde die worden gevonden aan de hand van de bronnen. De scores die aan de kosten worden toegewezen, worden weergegeven in Tabel 10.3. Hierbij worden de kosten van grond niet meegerekend gezien deze voor elke constructie hetzelfde is.

Tabel 10.3: Overzicht uitleg scores criteria 3

Score	Criteria
5	Ontwerpkosten < 200,- € per m ¹
4	200,- € per m ¹ ≤ Ontwerpkosten < 600,- € per m ¹
3	600,- € per m ¹ ≤ Ontwerpkosten ≤ 1000,- € per m ¹
2	1000,- € per m ¹ < Ontwerpkosten ≤ 1400,- € per m ¹
1	Ontwerpkosten > 1400,- € per m ¹

10.4. Criteria 4: Uitvoeringskosten

Net als de ontwerpkosten worden ook de kosten voor de uitvoering per strekkende meter berekend en vergeleken voor de constructies. De kosten worden bepaald door gebruik te maken van GWW kosten (GWW kosten, -) en informatie ingewonnen bij het praktijk bezoek. Deze kosten kunnen variëren per aannemer en per project en worden binnen dit verslag alleen gebruikt als vergelijkingswaarde die worden gevonden aan de hand van de bronnen. De scores die aan de kosten worden toegewezen, worden weergegeven in Tabel 10.4. Hierbij worden de kosten van het transport van de grond niet meegerekend gezien deze voor elke constructie hetzelfde is.

Tabel 10.4: Overzicht uitleg scores criteria 4

Score	Criteria
5	Uitvoeringskosten < 200,- € per m ¹
4	200,- € per m ¹ ≤ Uitvoeringskosten < 300,- € per m ¹
3	300,- € per m ¹ ≤ Uitvoeringskosten ≤ 400,- € per m ¹
2	400,- € per m ¹ < Uitvoeringskosten ≤ 500,- € per m ¹
1	Uitvoeringskosten > 500,- € per m ¹

10.5. Criteria 5: Vervormingen ondergrond

De zettingen in de ondergrond worden berekend via de methode van Keverling Buisman en secundaire zettingen volgens de methode Koppejan. De vervormingen worden vergeleken op het aantal millimeter dat de constructie zakt, hoe groter de zakking hoe slechter de score. In Tabel 10.5 worden de scores verder toegelicht.

Tabel 10.5: Overzicht uitleg scores criteria 5

Score	Criteria
5	Zettingen < 0.4 meter
4	0.4 meter ≤ Zettingen ≤ 0.8 meter
3	0.8 meter ≤ Zettingen ≤ 1.2 meter
2	1.2 meter ≤ Zettingen ≤ 1.6 meter
1	Zettingen > 1.6 meter

10.6. Criteria 6: Vervormingen constructie

Vervormen van de constructie in horizontale richting kan lijden tot schade aan het maaiveld en het esthetische karakter van de constructie. Deze vervormingen worden vergeleken op hoeveel millimeter de constructie verplaatst. De scores worden rond een vervorming van 50 millimeter verdeeld en worden verder toegelicht in Tabel 10.6.

Tabel 10.6: Overzicht uitleg scores criteria 6

Score	Criteria
5	20 millimeter $\geq$ Vervorming
4	40 millimeter $\geq$ Vervorming $>$ 20 millimeter
3	60 millimeter $\geq$ Vervorming $>$ 40 millimeter
2	80 millimeter $\geq$ Vervorming $>$ 60 millimeter
1	Vervorming $>$ 80 millimeter

10.7. Criteria 7: CO₂-emissie

Met behulp van vooraf bepaalde waarden uit Bijlage C. kunnen de CO₂-emissie waarde van de constructies worden berekend. Dit wordt gedaan over het materiaal van de doorsnede en dus zonder emissies die kunnen ontstaan bij de uitvoering, gezien het afhankelijk is van de aannemer van het project. Er worden betere scores toegewezen aan lagere waarden, zoals weergegeven in Tabel 10.7. Er wordt gezocht naar een duurzamere manier van grondkeren en dus wordt er bij deze criteria een belang factor van 2 gebruikt.

Tabel 10.7: Overzicht uitleg scores criteria 7

Score	Criteria
5	500 kg/m ¹ $>$ CO ₂ -emissie $>$ 0 kg/m ¹
4	1000 kg/m ¹ $>$ CO ₂ -emissie $\geq$ 500 kg/m ¹
3	1500 kg/m ¹ $\geq$ CO ₂ -emissie $\geq$ 1000 kg/m ¹
2	2000 kg/m ¹ $\geq$ CO ₂ -emissie $>$ 1500 kg/m ¹
1	CO ₂ -emissie $>$ 2000 kg/m ¹

10.8. Belang factoren criteria

De hierboven beschreven criteria zijn niet allemaal gelijk, gezien sommige criteria belangrijker worden geacht dan andere. Vanwege deze reden worden er belang factoren gebruikt om sommige scores zwaarder te laten meetellen dan andere.

De Eurocode wordt zwaarder meegeteld, omdat alle constructies hier aan moeten voldoen. Om deze wel of niet score gelijk te trekken met de andere wordt er een belang factor van 5 gebruikt. Dit geldt niet voor de criteria Stabiliteit omdat deze criteria niet wordt beoordeeld van nul tot één maar van nul tot vijf. Dit betekent dat het dezelfde invloed heeft als de andere Eurocodes en dus heeft de stabiliteit geen belang factor (hoogste score van 5 en laagste score van 0).

Er wordt gezocht naar een duurzamere en goedkopere oplossing voor grondkerende constructies op een slappe ondergrond, om deze reden worden de criteria van ontwerpkosten, ondergrondzettingen en CO₂-emissie verhoogd met een belang factor van 2. Er wordt een samenvatting van de belang factoren gegeven in Tabel 10.8.

Tabel 10.8: Belang factoren criteria

Criteria		Belang factor
Constructie	Eurocode	5
	Stabiliteit	1
Kosten	Ontwerp	2
	Uitvoering	1
Optredende vervormingen	Ondergrond	2
	Constructie	1
Duurzaamheid	CO ₂ -emissie	2

11. SAMENVATTING RESULTATEN BEREKENING

In dit hoofdstuk wordt een kleine samenvatting weergegeven van de resultaten van de berekeningen van de constructies. De volledige berekeningen zijn te vinden in Bijlage E. F. G. en H.

11.1. Damwand

De damwand heeft geen handmatige Eurocode toetsingen, gezien deze met behulp van D-sheet pilling is berekend. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in Bijlage E.

De resultaten van de damwandconstructie berekening voor de MCA worden in Tabel 11.1 samengevat.

Tabel 11.1: Resultaten damwandconstructie berekening voor MCA

	Toetsing Eurocode	Veiligheid	Ontwerp kosten	Uitvoering kosten	Zettingen	Horizontale vervormingen	CO2-emissie
0-variant, damwand	Voldoet	2,27	€ 1.628,28	€ 336,03	500,00 mm	18,00 mm	2940,00 kg
Variant 1, Casestudie - damwand	Voldoet	1,49	€ 2.099,48	€ 473,38	600,00 mm	46,30 mm	4280,64 kg
Variant 2, weg in de polder - damwand	Voldoet	1,40	€ 1.499,19	€ 263,56	180,00 mm	58,50 mm	2572,50 kg
Variant 3, verhoging lang een weg - damwand	Voldoet	2,73	€ 2.620,28	€ 625,19	620,00 mm	146,70 mm	5762,40 kg

11.2. L-muur

Wanneer de L-muur wordt berekend, worden er de volgende waarde voor de Eurocode toetsingen gevonden, "N.v.t." staat hierbij gelijk aan "Voldoet". De resultaten van de berekeningen voor de Eurocode worden in Tabel 11.2 samengevat.

Tabel 11.2: Resultaten Eurocode toetsing L-muur

Toetsing Eurocode	Verticale draagkracht	Doorponsing	Squeezing	Horizontaal glijden	Kantel stabiliteit
0-variant, L-muur	Voldoet	Voldoet	N.v.t.	Voldoet	Voldoet
Variant 1, Casestudie - L-muur	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet
Variant 2, weg in de polder - L-muur	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet niet	N.v.t.
Variant 3, verhoging lang een weg - L-muur	Voldoet	Voldoet	Voldoet niet	Voldoet niet	Voldoet

De resultaten van de damwandconstructie berekening voor de MCA worden in Tabel 11.3 samengevat.

Tabel 11.3: Resultaten L-muur berekening voor MCA

	Toetsing Eurocode	Veiligheid	Ontwerp kosten	Uitvoering kosten	Zettingen	Horizontale vervormingen	CO2-emissie
0-variant, L-muur	5x Voldoet	1,11	€ 458,29	€ 184,03	4,48 mm	1,03 mm	421,56 kg
Variant 1, Casestudie - L-muur	0x Voldoet	0,80	€ 656,11	€ 223,39	2636,11 mm	5,44 mm	634,38 kg
Variant 2, weg in de polder - L-muur	1x Voldoet	0,46	€ 715,28	€ 95,04	1347,55 mm	0,38 mm	152,87 kg
Variant 3, verhoging lang een weg - L-muur	1x Voldoet	0,46	€ 723,87	€ 275,42	1485,96 mm	1,91 mm	710,58 kg

11.3. Gewapende grond

Wanneer de gewapende grond constructie wordt berekend, worden er de volgende waarde voor de Eurocode toetsingen gevonden, “N.v.t.” staat hierbij gelijk aan “Voldoet”. De resultaten van de berekeningen voor de Eurocode worden in Tabel 11.4 samengevat.

Tabel 11.4: Resultaten Eurocode toetsing gewapende grond constructie

Toetsing Eurocode	Verticale draagkracht	Doorponsing	Squeezing	Horizontaal glijden	Kantel stabiliteit
0-variant, Gewapende grond	Voldoet	Voldoet	N.v.t.	Voldoet	N.v.t.
Variant 1, Casestudie - Gewapende grond	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	N.v.t.
Variant 2, weg in de polder - gewapende grond	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	N.v.t.
Variant 3, verhoging lang een weg - gewapende grond	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	N.v.t.

De resultaten van de damwandconstructie berekening voor de MCA worden in Tabel 11.5 samengevat.

Tabel 11.5: Resultaten gewapende grond constructie berekening voor MCA

	Toetsing Eurocode	Veiligheid	Ontwerp kosten	Uitvoering kosten	Zettingen	Horizontale vervormingen	CO2-emissie
0-variant, Gewapende grond	5x Voldoet	1,16	€ 399,80	€ 274,92	19,50 mm	32,50 mm	129,89 kg
Variant 1, Casestudie - Gewapende grond	5x Voldoet	1,00	€ 722,48	€ 250,93	1237,80 mm	75,00 mm	427,11 kg
Variant 2, weg in de polder - Gewapende grond	5x Voldoet	1,02	€ 325,08	€ 109,57	1079,20 mm	25,81 mm	50,34 kg
Variant 3, verhoging lang een weg - Gewapende grond	5x Voldoet	1,05	€ 825,29	€ 311,17	1341,00 mm	42,97 mm	307,39 kg

12. RESULTATEN MULTI CRITERIA ANALYSE

Wanneer er aan de resultaten van de berekening scores worden gegeven en worden ingevuld in de MCA. De uitvoer van de MCA wordt in Tabel 12.1 weergegeven.

Tabel 12.1: Uitvoer MCA

Levensduur = 120 Jaar		Constructie		Kosten		Optredende vervormingen		Duurzaamheid	Totale score
		Eurocode	Stabiliteit	Ontwerp	Uitvoering	Ondergrond	Constructie	CO2-emissie	
0-Variant	Damwand	5	5	2	3	8	5	2	30
	L-muur	5	2	4	5	10	5	10	41
	Gewapende grond	5	2	8	4	10	4	10	43
Variant 1	Damwand	5	4	2	2	8	3	2	26
	L-muur	0	0	6	4	2	5	8	25
	Gewapende grond	5	1	6	4	4	2	8	30
Variant 2	Damwand	5	4	2	4	10	1	2	28
	L-muur	0	0	8	5	6	5	10	34
	Gewapende grond	5	1	8	5	6	4	10	39
Variant 3	Damwand	5	5	2	1	8	1	2	24
	L-muur	0	0	6	4	4	5	8	27
	Gewapende grond	5	1	6	3	4	3	10	32
Belang factor		5	1	2	1	2	1	2	

Aan de hand van deze gegevens kan er tussen de drie constructies over alle situaties, de volgende verdeling worden gemaakt. Deze is te zien in Tabel 12.2.

Tabel 12.2: Totaal score constructies MCA

	Totale score
Damwand	108
L-muur	127
Gewapende grond	144

Zoals er kan worden gezien komt de gewapende grond constructie hier het beste uit de vergelijking.

12.1. Invloed belang factoren op de MCA

Als er wordt gekeken naar de scores in de MCA, wordt er opgemerkt dat de gewapende grond constructie het meeste voordeel heeft uit de belang factoren. Vanwege deze reden wordt er gekeken naar de resultaten van de MCA wanneer sommige belang factoren worden weggelaten:

Tabel 12.3: Totaal score constructies MCA met aangepaste belang factoren

		Score zonder belangfactor eurocode	Score zonder belangfactor ontwerpkosten	Score zonder belangfactor zettingen	Score zonder belangfactor CO2-emissie	Score zonder alle belangfactoren
Totale score	Damwand	92	104	91	104	67
	L-muur	123	115	116	109	82
	Gewapende grond	128	130	132	125	83

Hiermee wordt aangetoond dat de gewapende grondconstructie ook de meeste punten haalt zonder dat de belang factoren mee worden gerekend.

Als er echter wordt gekeken naar de MCA kan er beargumenteerd worden dat de gewapende grond constructie, maar ook de L-muur, last heeft van grote zakkingen. Deze kunnen voorkomen worden door de ondergrond voor te belasten of er kunnen bepaalde oplossingen worden bedacht voor het deels verbeteren van de fundering en stabiliteit van de constructies.

12.2. Invloed van eventuele optimalisatie op de MCA

Wanneer palen wordt toegepast wordt de MCA veranderd gezien de criteria categorie constructie wegvalt wanneer de fundering van de constructie verbeterd wordt. Er wordt hierbij aangenomen dat de fundering zo wordt verbeterd dat alle twee de criteria in de categorie constructie, zo hoog mogelijke scores halen. Daarom wordt er gekeken naar wat de scores van de constructies zijn wanneer deze categorie wordt weggelaten uit de MCA:

Tabel 12.4: Totaal score constructies MCA zonder categorie constructie

		Score zonder eurocode en stabiliteit	Score zonder eurocode en stabiliteit & zonder belangfactoren	Score zonder stabiliteit	Score zonder Eurocode
Totale score	Damwand	70	45	90	88
	L-muur	120	79	125	122
	Gewapende grond	119	74	139	124

Hierin kan de invloed worden gezien die het eventueel verwijderen van de Eurocode en stabiliteit scores van de constructies. Er wordt geobserveerd dat de L-muur hierbij net een punt meer behaalt dan de gewapende grond constructie.

Wanneer de constructie op palen wordt geplaatst wordt deze categorie ook weggenomen omdat de berekeningsmethode van funderen op staal dan niet meer gebruikt wordt. Als extra kunnen de zettingen in de ondergrond van de constructie ook worden genegeerd gezien de ondergrond ontlast wordt. Bij het plaatsen van palen kunnen wel zettingen optreden, alleen is deze vele malen kleiner dan het funderen op staal. Er wordt dus gekeken naar wat de invloed is als zowel vervorming als constructie geen rol spelen bij de MCA:

Tabel 12.5: Totaal score constructies MCA zonder "Funderen op staal"

	Totale score zonder eurocode, stabiliteit en ondergrond zakking	Totale score zonder eurocode, stabiliteit en constructie vervormingen
Damwand	36	60
L-muur	98	100
Gewapende grond	95	106

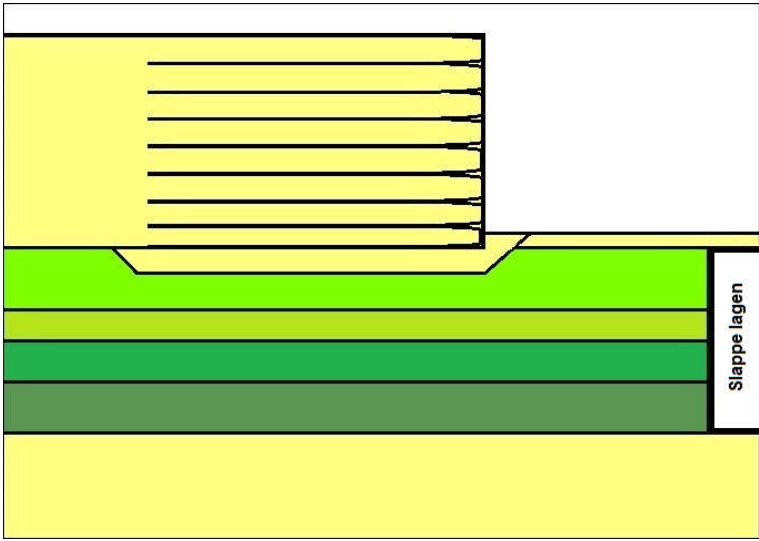
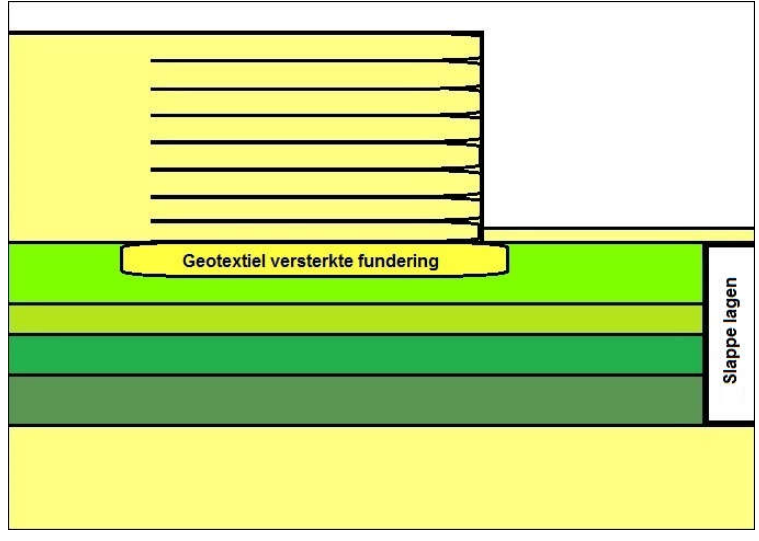
Wanneer de zakkingen in de ondergrond niet worden meegenomen wordt er geobserveerd dat de L-muur de meeste punten behaalt. Dit komt doordat het grote zetting ondergaat vanwege het klein effectieve oppervlakte die het gebruikt en de krachten daarop. Hier kan dus worden bepaald dat de L-muur beter is wanneer hij op palen wordt geplaatst. Dit is alleen het geval wanneer er rekening wordt gehouden met horizontale verplaatsing. Wanneer dit een minder grote rol speelt, wordt er meer punten gescoord door de gewapende grondconstructie.

13. OPTIMALISATIE

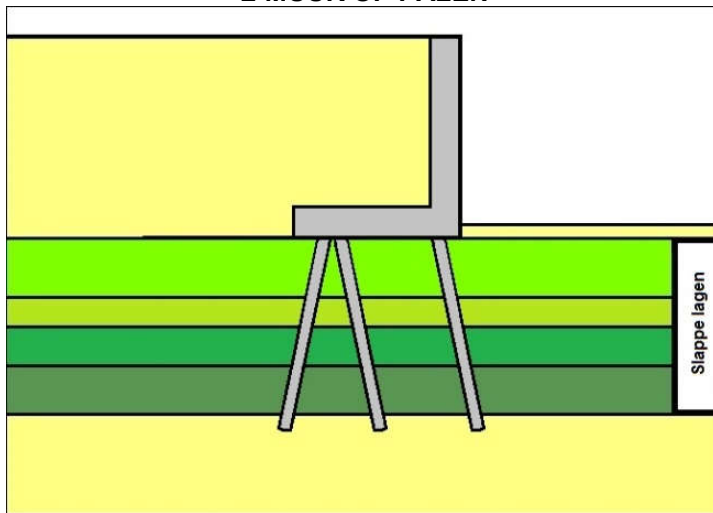
Er kan in de MCA worden waargenomen dat de constructies kunnen worden geoptimaliseerd, voornamelijk de zakkingen of zettingen van de ondergrond. Hierbij wordt er gekeken naar mogelijkheden die er bestaan om funderingen op staal te verbeteren wanneer het gaat om een slappere ondergrond. Ook hierbij kan de invloed van geotextiel een grote invloed hebben op de verspreiding van de verticale spanningen en zorgt dus voor een vermindering van de zakkingen.

13.1. Optimalisatie mogelijkheden:

Tabel 13.1: Optimalisatie opties

Optimalisatie	Uitleg
GRONDVERBETERING 	Door een deel van de top laag van de ondergrond weg te graven en deze te vervangen met een grond met sterkere eigenschappen. Deze manier van ondergrond verbetering wordt vaak toegepast bij grondkerende constructies, vanwege deze problemen. Deze vorm van versterken van het draagvlak dient als een vergelijkingsvoorbeeld.
GRONDVERBETERING IN COMBINATIE MET GEOTEXTIEL 	Het toevoegen van een textiel in de funderende draagvlak kan ervoor zorgen dat de constructie zo gefundeerd is, dat er een groter oppervlakte ontstaat waarin de spanning voor het zetten van de grond in worden opgenomen. Ook zorgt het geotextiel voor een verplaatsing van de glijcirkels in verticale richting. Dit laatste punt is een verbetering op het vorige model gezien de fundering ook zorgt voor een stabilisering van de constructie. Het toevoegen van de geogrid fundering neemt ook het toevoegen van een gewoven geogrid (Geolon) overbodig, gezien dit wordt vervangen door de fundering.

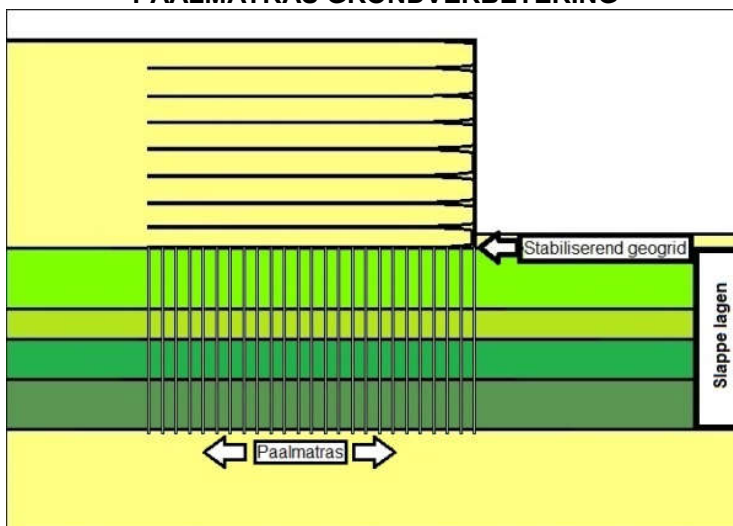
L-MUUR OP PALEN



De meest bekende oplossing voor het probleem van het zakken van constructies, is het plaatsten van palen. Het toevoegen van palen zorgt er alleen voor dat het geheel niet meer als 'op staal gefundeerd' mag worden berekend. Het veranderen van de berekening wordt niet meegenomen in dit onderzoek, maar deze manier van funderen wordt wel genoemd als mogelijke optie.

Er worden palen onder de fundering geheid tot aan de draagkrachtige laag, deze oplossing is echt meer geschikt voor de L-muur als kerend element.

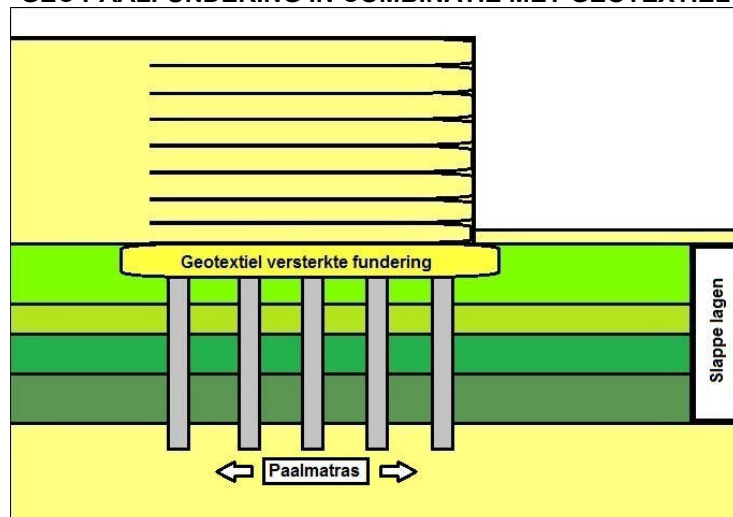
PAALMATRAS GRONDVERBETERING



Bij gewapende grond zijn deze grote betonnen palen te hard om goed te functioneren als funderings oplossing bij gewapende grond. Als alternatief kan er gebruik worden gemaakt van een paalmatras. Een paalmatras is een grond verbeteringstechniek waarbij er veel paaltjes in de grond worden gebracht om de grond steviger te maken. Deze kleinere palen kunnen ook naar de funderende laag worden geslagen om te dienen als paalfundering.

In vergelijking met de vorige opties, is deze oplossing voordeliger omdat het voor veel minder zakkings zorgt. Het nadeel van deze manier is, zoals eerder gezegd, veel duurder is dan de "op staal gefundeerde optie" vanwege de kosten die de palen met zich meebrengen.

GEC PAALFUNDERING IN COMBINATIE MET GEOTEXTIEL



Deze optimalisatie is een combinatie van de eerder genoemde opties en zorgt voor een van de stabielere opties omdat de spreiding van de versterkte funderingselement zorgt voor een goede kracht overdracht aan de palen.

Als alternatieve voor de palen kan er vervolgens gebruikt gemaakt worden van de zogenaamde GEC (Geotextile Encased Columns) om de constructie te ondersteunen. Het werkt grond verdringend als paalmatras en ondersteunend als palen onder een constructie/paalmatras. GEC wordt in hoofdstuk 11.2 verder toegelicht.

13.2. GEC (Geotextile Encased Columns)

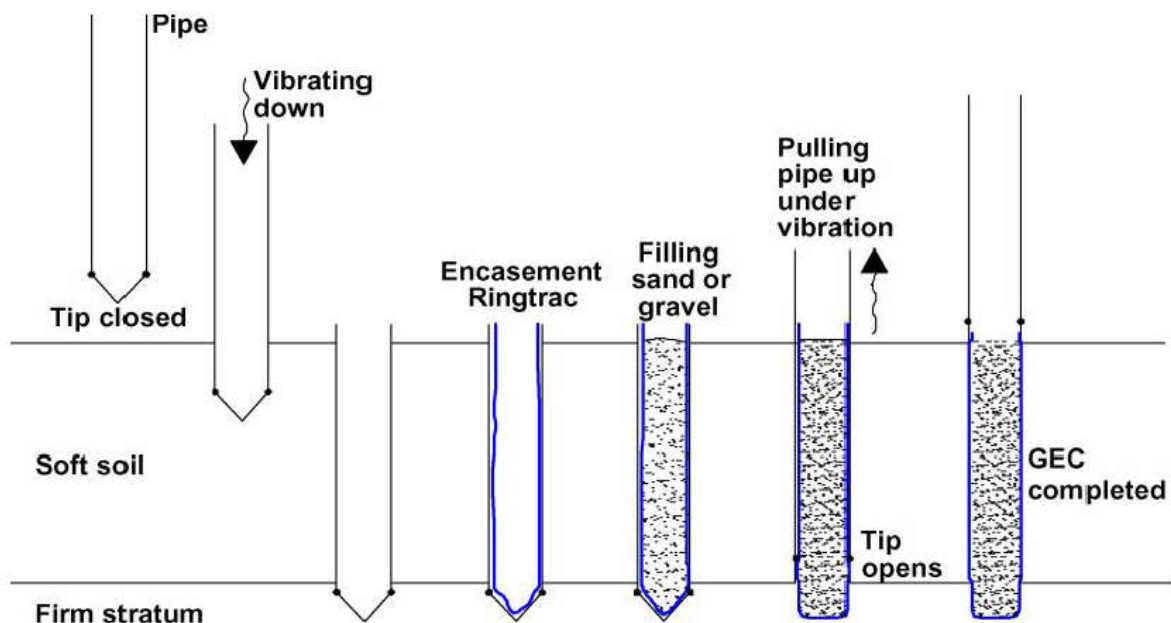
Gezien het gebruik van betonnen en stalen palen zeer prijzig kan zijn, is er gezocht naar een optimalere manier van paalfunderingen. Voor gewapende grond wordt geotextiel gebruikt in plaats van beton of staal, dus is er gezocht naar een oplossing die hetzelfde doet voor een paalfundering. Deze oplossing is gevonden in Geotextile Encased Columns of GEC, wat kolommen zijn van zand of grind en zijn omwikkeld met geotextiel.



Figuur 13.1: GEC grondverbetering (geosynthetica.net, 2016)

Deze techniek werkt ongeveer hetzelfde als gewapende grond en er kunnen grote sterktes mee worden behaald. Dit is afhankelijk van de sterkte van het geotextiel en de spreiding van de grondsoort in de kolom en rondom de kolom. De kolom heeft in vergelijking met een betonnen kolom iets meer optredende zettingen, maar over het algemeen wordt deze als zeer klein gevonden.

Het plaatsen van een GEC gaat op de volgende manier:



Figuur 13.2: Plaatsen van een GEC (Guler, Alexiew, Abbaspour, & Koc, 2015)

14. CONCLUSIE

Een steile wand constructie kan worden gemaakt door gebruik te maken van grondkerende constructies. Hierbij kan er een keuze worden gemaakt uit een paar optie namelijk: de damwand, de L-muur en de gewapende grondconstructie. Met deze constructie kan er binnen het kader van het onderzoek een steile wand constructie worden gebouwd op een slappe ondergrond. Voor een keuze van een constructie zijn meerdere voor en nadelen te noemen.

De normen die gebruikt worden voor het controleren van de constructies verschillen, maar zijn terug te vinden in Eurocode 7. Het bezwijkingsmechanismes voor de damwand staan hierin beschreven maar in CUR 126 wordt hier nog wat verder beschreven. Ook wordt in de Eurocode het funderen op staal principe weer gegeven waarop de L-muur en gewapende grondconstructies worden getoetst. Gewapende grondconstructie worden vervolgens nog getoetst op de CUR 198 die verder bouwt op het toetsen van de inwendige stabiliteit van de constructie. Voor het berekenen kunnen vervolgens situatie worden opgesteld en met de resultaten kan er vervolgens een vergelijking wordt gemaakt.

De constructie die het meest punten scoort in de Multi Criteria Analyse is de gewapende grond constructie. Dit komt voornamelijk doordat bij de L-muren de stabiliteit en Eurocode berekeningen, niet voldeden in de situaties. De damwand blijft behoorlijk achter bij de twee constructies vanwege het dure ontwerp en uitvoeringskosten, maar ook door de grote CO₂-emissie waarde waar de damwand nooit een goede score op haalt.

Het plaatsen van een constructie op palen heeft niet veel invloed op het aantal punten dat gescoord wordt door een bepaalde constructie. Die zorgt alleen voor manieren om verbeteringen aan te brengen in de zakkings in de constructie, gezien de GEC palen een reductie in de kosten van funderingen op palen kunnen realiseren.

De hoofdvraag van dit onderzoek was:

Wat is de optimale steile wand constructie in gewapende grond op een slappe ondergrond per situatie, daarbij lettend op hoogte, ondergrond, belastingen en CO₂-emissies?

Bij de doorgerekende varianten is technisch gezien de gewapende grond de ideale steile wand constructie. Maar er spelen niet alleen technische argumenten bij de definitieve keuze van steile wand constructie.

Een optimale steile wand constructie bestaat eigenlijk niet, gezien deze erg afhankelijk zijn van de keuzes die de opdrachtgever neemt qua uiterlijk en de flexibiliteit van de constructie.

Wanneer er naar de ontwerpkosten van de L-muur en de gewapende grond constructie wordt gekeken, kan er een verschil tot 300 euro per strekkende meter worden gevonden. Wanneer de constructie op palen wordt gebouwd kan er qua zakkingsmaatregelen heel wat geld worden bespaard als er gebruik wordt gemaakt van GEC grondverbeteringen, waardoor het gebruik van geotextiel zeer voordelig wordt.

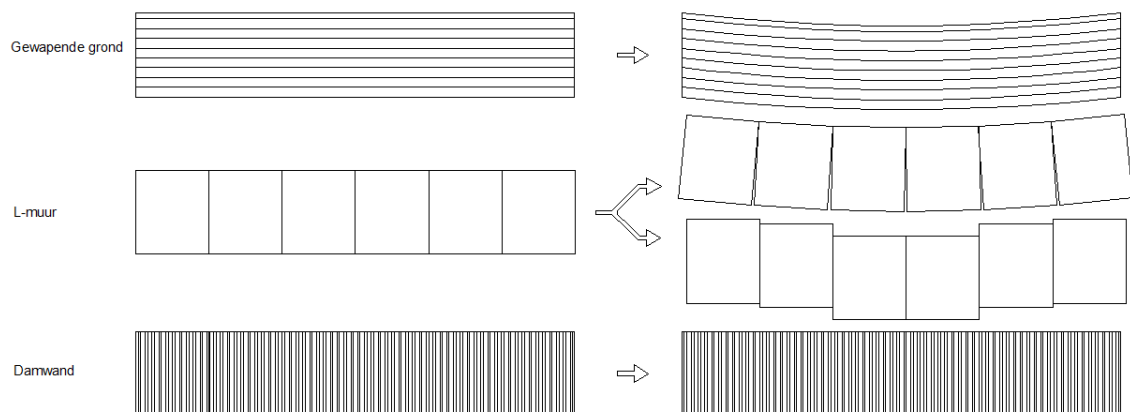
15. AANBEVELINGEN

De aanbeveling van dit onderzoek is om gewapende grond constructie meer gebruiken vanwege kosten besparingen en verbetering van de CO₂ uitstoot.

Echter zijn er een paar aspecten van het onderzoek die verder zouden moeten worden onderzocht wilt men gebruik maken van gewapende grondconstructies. Er moet gecontroleerd worden hoeveel de invloed de onderwerpen hebben die niet meegenomen zijn in dit onderzoek. Verder zou het onderwerp verder kunnen worden geoptimaliseerd en ge(her)gecalculeerd. Het is ook interessant om een vervolg onderzoek te starten naar de mogelijkheden van de genoemde optimalisaties en hun invloed op de keuze van de constructies. Hieronder worden de aanbevelingen per onderwerp opgenoemd:

15.1. Invloed van ongelijke zakking van de constructies

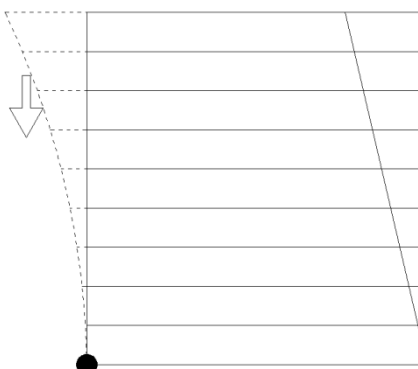
Tijdens de berekeningen is er opgemerkt dat de constructie zo kan zakken dat er een boog effect kan optreden in de constructies die op staal worden gefundeerd. Dit kan zorgen voor problemen met de kerende functie van de constructie en zorgt voor een minder fraaie constructie. Daarom is het belangrijk om te onderzoeken of deze zakking invloed hebben op het ontwerp van de constructie en daarbij ook de keuze van de optimale constructie.



Figuur 15.1: Invloed van ongelijke zakkingen op de constructies

15.2. Invloed van mogelijke tweede orde momenten

Hierbij wordt gedoeld op het eventueel optreden van een tweede orde moment door de optredende kruip van de geogrids en de invloed van windbelasting op de constructie. Hierdoor kan een deel van de gewapende grondconstructie over het kantelpunt leunen. Dit overhangende deel zorgt dan vervolgens voor een groter kantelmoment en een minder groot stabiliserend moment vanwege het verlies van eigen gewicht. De invloed van deze factor viel buiten het kader van dit onderzoek gevallen en kan de conclusie misschien beïnvloeden.



Figuur 15.2: Mogelijke invloed van kruip in de wapening

15.3. Onderzoek gefundeerde grondkerende constructies

Een vergelijking van grondkerende constructies die gefundeerd zijn of waarbij de ondergrond zo verbeterd is dat zakkingen niet tot nauwelijks voorkomen is ook een interessant onderzoek. Dit is zeker interessant gezien de damwand dan meer in de buurt komt van de andere twee constructies, omdat deze eigenlijk al gefundeerde optie is omdat hij in de draagkrachtige lagen wordt geslagen. Verder wordt er dan duidelijk of de gewapende grondconstructie op palen in deze vergelijking ook meer punten haalt dan de L-wand op palen.

15.4. Onderzoek GEC systeem

Het GEC grondverbeteringssysteem is een interessant onderwerp om verder te onderzoeken, gezien het een interessante vervanging kan zijn voor een de betonnen palen in een paalmatras of als funderingspalen van een gewapende grondconstructie. De kosten en CO₂ reductie die theoretisch kan worden behaald door dit systeem kan behoorlijk oplopen wanneer er met veel palen moeten worden gebouwd. Hierbij kan er worden onderzocht wat de sterkte van een GEC paal kan is en of deze kan worden gewaarborgd en wat de zettingen zijn die in de paal, maar ook rond de paal, voorkomen.

15.5. Toetsing nieuwe CUR

Binnen dit onderzoek is voor het berekenen van gewapende grond gebruik gemaakt van de CUR 198 en de Eurocode 7 voor het controleren van de constructies. De CUR 198 is gebaseerd op de NEN normen en is sinds de uitgave van de Eurocode, voldoet deze dus niet meer aan de huidige norm. Om er voor te zorgen dat er een CUR komt die wel voldoet aan de nieuwe Eurocode is er in september 2000 een nieuwe CUR commissie gestart met het herschrijven van deze CUR. Ten tijde van dit onderzoek is er gebruik gemaakt van de huidige CUR en dit betekent dat de berekeningen die gedaan zijn qua interne stabiliteit en wapening niet zullen kloppen aan de hand van de nieuwe CUR norm. Dit betekent dat wanneer de nieuwe CUR wordt gepubliceerd, er gecontroleerd moet worden of de bevindingen van dit onderzoek nog voldoet aan de hand van deze nieuwe CUR norm.

16. BIBLIOGRAFIE

- Backhausen, d., & Stoel, p. v. (2013). *READER GEOTECHNIEK VOOR HET HBO*. Den Haag: KIVI-NIRIA.
- 126, C.-c. C. (2005). *Damwandconstructies*. Gouda: Stichting CUR.
- Armtec Ltd. . (2013, Januari 15). *MSE Retaining Walls: Design, Usage and Specifications Part 1 - Armtec Ltd.* . Opgeroepen op Februari 11, 11, van Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=28SEDUhattg>
- Boer, B. d. (2005). *VEILIG VERNAGELLEN*. Woerden: VWS Geotechniek.
- CBS CUR. (2000). *198 Kerende constructies in gewapende grond, Taludhelling steiler dan 70 graden*. Gouda.
- geosynthetica.net. (2016, 02 18). *Geotextile Encased Column Webinar*. Opgehaald van geosynthetica.net: <http://www.geosynthetica.net/event/geotextile-encased-column-webinar-february2016/>
- Guler, E., Alexiew, D., Abbaspour, A., & Koc, M. (2015). *Seismic Performance of Geosynthetic-Encased Stone Columns* . -: TRB.
- GWW kosten. (-, - -). *kosten*. Opgehaald van GWW kosten: <http://www.gwwkosten.nl/>
- InfraWiki.nl. (2016, 05 10). *L-muur**. Opgehaald van InfraWiki.nl: <http://www.infrawiki.nl/index.php/begrippenlijst/632-l-muur>
- Jong, K. d. (2016, 04 05). Casestudie Hoorn. (J. Borst, Interviewer)
- keermuur, keerwand, grondkering*. (-, - -). Opgeroepen op 02 15, 2016, van joostdevree.nl: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/keermuur.shtml>
- Kitch, W. A. (2015, februari 6). CE 540 Module 6.1 Reinforce Soil Theory. Pomona, California, USA.
- Nederlands Normalisatie-instituut. (2012). *NEN 9997-1+C1 (nl), Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1: Algemene regels*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- Nederlands Normalisatie-instituut. (2012). *NEN-EN 1997-1+C1 - Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp - Deel 1: Algemene regels*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- Ruiter, J. (2016, 05 02). *kosten geogrids*. (J. Borst, Interviewer)
- voetsgewapendegrond. (2015, 05 24). *Terre Armee Eindhoven*. Opgehaald van Voets gewapende grondconstructies: <http://www.voetsgewapendegrond.nl/terre-armee-eindhoven>