

Master of Science afstudeeronderzoek

De invloed van verhoogde wegen op overstromingen



B.T.W. Bekker

Master of Science afstudeeronderzoek

De invloed van verhoogde wegen op overstromingen

Schrijver:

Tweede - Luitenant B.T.W. Bekker

Nederlandse Defensie Academie, Breda
Universiteit Twente, Enschede

Begeleiders:

Prof. Dr. Ir. Ing. A.E.C. van der Stoep

Universiteit Twente, Enschede
Nederlandse Defensie Academie, Breda

Kapitein Ir. S.A.N. Mevissen

Universiteit Twente, Enschede
Nederlandse Defensie Academie, Breda

Dr. Ir. H.L. ter Huerne

Universiteit Twente, Enschede

Versie:

Definitief

Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van mijn afstudeeronderzoek ter afronding van de master 'civil engineering and management' aan de Universiteit Twente en de Nederlandse Defensie Academie. Na het behalen van de bachelor civiele techniek in 2009, werd de mogelijkheid geboden om aansluitend een master studie te volgen. Deze kans heb ik zonder twijfelen aangegrepen. Na het succesvol afsluiten van de master courses in 2009 en 2010, beschouw ik dit rapport als de finishing touch ter afronding van mijn universitaire loopbaan in Enschede en Breda.

Voor het mogelijk maken van het uitgevoerde afstudeeronderzoek wil ik allereerst mijn dagelijkse begeleider van de Nederlandse Defensie Academie, Kapitein ir. Sjoerd Mevissen, hartelijk bedanken voor zijn hulp, kennis en adviezen. Buiten het feit dat het voorliggende rapport de afronding van mijn studie omvat, hoop ik tevens met de onderzoeksresultaten en conclusies Sjoerd een stap verder te helpen in zijn promotieonderzoek, zodat er op deze wijze een win-win situatie ontstaat.

Tevens bedank ik professor Almer van der Stoel, afdelingshoofd van de sectie civiele techniek aan de Nederlandse Defensie Academie en hoogleraar civieltechnische constructietechnologie aan de Universiteit Twente. Zijn hulp, ondersteuning en kennis in zowel het aanlooptraject naar het afstuderen toe als tijdens de afstudeerperiode heb ik als zeer prettig ervaren. Hierbij mag een dankwoord aan dr. ir. Henny ter Huerne niet ontbreken. Als tweede begeleider vanuit de Universiteit Twente was zijn betrokkenheid beperkter, maar waren zijn adviezen over ongewenste aspecten die er ongemerkt inslopen juist scherper.

Uiteraard kan een dankwoord naar mijn familie, vriendin, vrienden en collega's voor hun ondersteuning tijdens de studieperiode niet uitblijven. Ik ben me ervan bewust dat de ontspanningsmomenten samen ongemerkt hebben bijgedragen aan het tijdelijk loslaten van de studie en het optoppen van mijn motivatie.

Met de toekomst als officier Genie bij de Koninklijke Landmacht in het verschiet wordt mijn rugzak met het afsluiten van mijn studie, in positieve zin, weer een stukje zwaarder. Gelukkig weet ik waar ik terecht ga komen:

Genie: "Het normale ver te boven gaande, scheppende begaafdheid."

(woordenboek.nl, 2010)

Berend Bekker

Breda, juni 2010

Samenvatting

Nederland heeft een rijke en lange geschiedenis in haar strijd tegen het water. Het voorliggende onderzoek draagt hieraan bij door inzicht te verschaffen in de invloed van verhoogde wegen op overstromingen. In de reguliere benadering van het voorkomen van overstromingen en het beperken van de gevolgen ervan, worden hoofdzakelijk primaire en secundaire waterkeringen beschouwd. De invloed van verhoogde wegen op overstromingen, die geen primaire of secundaire waterkerende functie hebben, is echter onderbelicht. Zowel in overstromingsscenario's als in (acute)evacuatieplannen wordt beperkt rekening gehouden met de invloed van verhoogde wegen op een overstroming.

Het hier voorgestelde onderzoek, in het kader van de afronding van de master 'civil engineering and management' aan de Universiteit Twente, draagt bij aan het promotieonderzoek van Dhr. ir. Sjoerd Mevissen. Zijn promotieonderzoek richt zich op de kwetsbaarheid van een wegennetwerk ten behoeve van (acute)evacuatie.

Om een uitspraak te kunnen doen over de invloed van verhoogde wegen op overstromingen en de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen, is het doel van het onderzoek gericht op het verkrijgen van kwalitatief en kwantitatief inzicht in het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Om dit te bereiken is een literatuuranalyse uitgevoerd naar fysieke eigenschappen van zowel waterkeringen als verhoogde wegen, waarmee een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen ten aanzien van waterkerende fysieke eigenschappen is opgesteld. Aan de hand hiervan kunnen in de praktijk wegen worden ingedeeld in een vereenvoudigde categorie op basis van fysieke eigenschappen die een significant onderscheid maken in het waterkerend vermogen. De vereenvoudigde categorisering is getoetst op faalmechanismen voor het bezwijken van grondlichamen onder belasting van water. Hierbij zijn in het onderzoek twee situaties beschouwd; een situatie zonder verkeersbelasting en een situatie met een statische verkeersbelasting. Voor het verkrijgen van inzicht in het waterkerend vermogen is beschouwd welk faalmechanisme maatgevend is, met daarbij de maatgevende waterstand. Deze toetsing is uitgevoerd voor een kruinhoogte tot 1,80m.

Uit het onderzoek blijkt dat het maatgevende faalmechanisme voor verhoogde wegen zonder een statische verkeersbelasting overslag betreft. Hierbij is de maatgevende waterstand afhankelijk van de kruinhoogte en de taludhelling. Het maatgevende faalmechanisme met een statische verkeersbelasting betreft overslag of binnenwaartse macro-instabiliteit. Het maatgevende faalmechanisme en de bijbehorende maatgevende waterstand is afhankelijk van de kruinhoogte, de kruinbreedte, de taludhelling en de natuurlijke ondergrond. Tevens blijkt uit het onderzoek dat een statische verkeersbelasting geen zichtbare invloed heeft op het waterkerend vermogen van verhoogde wegen tot een kruinhoogte van ten minste 1,54m.

De belangrijkste conclusie, op basis van het uitgevoerde onderzoek, is dat verhoogde wegen goed bestand zijn tegen overstromingen tot ten minste een kruinhoogte van 1,80m. Dit is zowel het geval met als zonder een statische verkeersbelasting. Verhoogde wegen kunnen daarom worden beschouwd in overstromingsscenario's en bij het opstellen van (acute)evacuatieplannen. Het beschouwen van verhoogde wegen is aan te bevelen omdat ze van invloed zijn op het overstromingsverloop. Ze kunnen overstromingswater keren, vertragen of sturen waardoor gebieden niet of later zullen overstromen. Tevens kan de invloed van verhoogde wegen op overstromingen extra evacuatie tijd genereren.

Summary

The Netherlands has a rich and long history in its fight against water. The research at hand contributes to this struggle by providing an insight into the influence of heightened roads on floods. In the regular approach to the prevention of floods and the mitigation of their consequences, essentially primary and secondary flood defense structures are considered. The influence of heightened roads, which do not have a primary or secondary flood defense function is, however, rather unclear. Therefore, in both flooding scenarios, as in (acute) evacuation plans, limited attention is paid to the influence of heightened roads on floods.

The proposed research, in the context of the completion of the 'civil engineering and management' master at the University of Twente, contributes to the doctoral study of Mr. ir. Sjoerd Mevissen. His doctoral study focuses on the vulnerability of a road network that might be used for (acute) evacuation.

In order to be able to make a judgement about the influence of heightened roads on floods and the availability of (evacuation) roads, the purpose of this research is to acquire a qualitative and quantitative insight into the ability of heightened roads to resist floodwater. To achieve this, a literature analysis was carried out to get an insight into the physical characteristics of both flood defense structures and heightened roads. With this analysis, a simplified categorisation of heightened roads regarding water resisting physical characteristics was drafted. The simplified categorisation was tested on failure mechanisms for soil structures under impact of water loads. In the research two situations were considered; a situation without a traffic load and a situation with a static traffic load. In order to obtain an insight into the structural performance of heightened roads regarding the impact of water loads, the decisive failure mechanism together with the corresponding maximum water level was determined. These tests were carried out for heightened roads with a crest height up to 1.80m.

The research shows that the decisive failure mechanism for heightened roads without a static traffic load is overtopping. For this failure mechanism, the maximum water level is dependent on the crest height and the incline of the slope of the heightened road. The decisive failure mechanism with a static traffic load is overtopping or macro instability of the inner slope. The decisive failure mechanism and corresponding maximum water level is dependent on the crest height, the crest width, the incline of the slope and the natural subsoil. The research also shows that a static traffic load does not have a noticeable influence on the capacity of heightened roads to resist floodwater up to a crest height of at least 1.54m.

The main conclusion, based on the executed research, is that heightened roads can well withstand floods up to a crest height of at least 1.80m. This is both the case with and without a static traffic load. Therefore, heightened roads should be considered in flood scenarios and in (acute) evacuation plans. This is recommended because heightened roads can influence the direction of floods. They can block, slow down or steer floodwater which prevents or slows down the flooding of certain areas. Furthermore, heightened roads can generate additional evacuation time.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Samenvatting.....	III
Summary	IV
1.Inleiding.....	1
1.1 Probleemkader	1
1.1.1 Algemeen	1
1.1.2 Acute evacuatie.....	1
1.1.3 Lijnelementen in het landschap	2
1.1.4 Onderzoeksvraagstuk.....	3
1.2 Doelstelling van het onderzoek	4
1.3 Onderzoeksmodel	4
1.4 Vraagstelling.....	5
1.5 Afbakening.....	5
1.6 Belang van het onderzoek	6
1.7 Structuur van het rapport.....	7
2.Literatuuranalyse naar de fysieke eigenschappen van belang voor het waterkerend vermogen	8
2.1 Analyse van de voorschriften voor waterkeringen.....	8
2.1.1 Overlopen en overslag	9
2.1.2 Piping / heave.....	10
2.1.3 Macrostabiliteit binnenwaarts.....	11
2.1.4 Macrostabiliteit buitenwaarts.....	13
2.1.5 Microstabiliteit	13
2.1.6 Instabiliteit van de taludbekleding.....	14
2.1.7 Niet waterkerende objecten	15
2.1.8 Overzicht fysieke eigenschappen en uitgangspunten waterkeringen	15
2.2 Analyse van de voorschriften voor wegontwerp.....	16
2.2.1 Type wegen en bijbehorende breedtes	17
2.2.2 Taludhellingen.....	18
2.2.3 Natuurlijke ondergrond.....	20
2.2.4 Typen opbouw van het weglichaam	21
2.2.5 Drainage	23
2.2.6 Minimale drooglegging	24
2.2.7 Berm- en taludbekleding.....	24
2.2.8 Overzicht fysieke eigenschappen en uitgangspunten wegen	25
2.3 Confrontatie fysieke eigenschappen	26
2.4 Conclusies literatuuranalyse.....	30

3. Kwantitatieve analyse van de fysieke eigenschappen van invloed op het waterkerend vermogen	32
3.1 Toetsingmethodes voor de faalmechanismen	32
3.1.1 Overloop en overslag	32
3.1.2 Piping / heave	34
3.1.3 Macrostabieliteit binnenwaarts	36
3.1.4 Microstabieliteit	40
3.1.5 Instabiliteit van de taludbekleding	41
3.2 Toetsingsresultaten van de faalmechanismen	44
3.2.1 Overslag	45
3.2.2 Microstabieliteit	47
3.2.3 Binnenwaartse macrostabieliteit	48
3.2.4 Instabiliteit van de buitentalud bekleding	51
3.3 Conclusies kwantitatieve analyse	52
3.3.1 Maatgevend faalmechanisme en maatgevende fysieke eigenschappen	52
3.3.2 Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen	53
4. Kwantitatieve analyse bij een statische verkeersbelasting	55
4.1 Beschouwing van de faalmechanismen onder invloed van een statische verkeersbelasting	55
4.1.1 Beschrijving van de faalmechanismen	55
4.1.2 Faalmechanismen van toepassing op verhoogde wegen met een verkeersbelasting	58
4.2 Toetsingsresultaten op binnenwaartse macrostabieliteit bij een statische verkeersbelasting	59
4.2.1 Overzicht van de toetsingresultaten op binnenwaartse macrostabieliteit	62
4.3 Conclusies kwantitatieve analyse bij een statische verkeersbelasting	63
4.3.1 Maatgevende faalmechanismen en maatgevende fysieke eigenschappen	63
4.3.2 Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting	67
5. Conclusies en aanbevelingen	70
5.1 Conclusies van het onderzoek	70
5.2 Aanbevelingen voor het beschouwen van verhoogde wegen tijdens overstromingen	72
5.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	72
Bibliografie	74
Appendices	76
Appendix A Lijst met afkortingen en symbolen	77
Appendix B Verklarende woordenlijst	79
Appendix C Dijkkringgebieden in Nederland	80
Appendix D Opbouwconstructies voor grondlichamen van wegen	81
Appendix E Toelichting toegestaan overslagdebiet	82
Appendix F Rekenregels faalmechanisme overslag	85
Appendix G Potentiële windsnelheid in Nederland	87
Appendix H Rekenregels faalmechanisme micro-instabiliteit	88
Appendix I Invloedsfactoren voor de toetsing op binnenwaartse macro-instabiliteit met MStab	91
Appendix J Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen	93

1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de inleiding van het uitgevoerde onderzoek beschreven. Allereerst wordt ingegaan op het probleemkader, waarin tevens het onderzoeksvraagstuk wordt gepresenteerd. In de tweede paragraaf wordt de doelstelling van het onderzoek behandeld, gevolgd door het onderzoeksmodel in paragraaf 3. De onderzoeksvragen en deelvragen worden verwoord in paragraaf 4. In paragraaf 5 wordt het onderzoek vervolgens afgebakend, waarna in paragraaf 6 het belang van het onderzoek in een breder perspectief wordt beschreven. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een leeswijzer voor het rapport, waarin de structuur en hoofdstukindeling wordt verwoord.

1.1 Probleemkader

1.1.1 Algemeen

Nederland heeft een rijke en lange geschiedenis in haar strijd tegen het water. Midden jaren negentig van de vorige eeuw werd Nederland wederom opgeschrikt door een aantal hoogwater calamiteiten. Hoewel een ramp als in 1953 ons bespaard bleef, heeft het hoge waterpeil in de rivieren veel overlast en schade veroorzaakt. In 1995 was de situatie langs de rivieren zo nijpend dat voor de evacuatie van de bevolking is gekozen; de grootste evacuatie die in Nederland is uitgevoerd in de afgelopen decennia (Steketee, 1997). Grote rampen in het buitenland zoals de tsunami in Azië in 2004 en de orkaan Katrina in New Orleans in 2005 hebben de aandacht voor hoogwaterbescherming bij de autoriteiten en bevolking verhoogd. Naast de klassieke preventieve hoogwaterbescherming zoals het versterken en verhogen van de primaire keringen, is er een duidelijke verschuiving van de aandacht richting repressieve maatregelen waarneembaar. Vele (overheid) projecten en programma's van de afgelopen jaren richten zich ook op het verkleinen van de gevolgen van een overstroming. Ondanks dat preventie de hoogste prioriteit blijft houden, wordt de noodzaak gezien om te denken aan een "wat als" scenario. Hier zijn enkele redenen voor aan te wijzen. Ten eerste wordt door sommigen een grens gezien aan een blijvende dijkverhoging (Schreuder, 2008). Dit kan zowel een financiële, een technische of een ruimtelijke grens zijn. Daarnaast is er een toenemende bevolkings- en kapitaal groei in met name de lager gelegen delen van Nederland zoals het merendeel van de Randstad. Hierdoor nemen de economische en maatschappelijke gevolgen van een mogelijke dijkdoorbraak toe. De noodzaak tot gevolgbeperkende maatregelen neemt dan ook toe. Bovengenoemde punten worden versterkt door de verwachte klimaatveranderingen.

1.1.2 Acute evacuatie

Uit de vorige paragraaf komt naar voren dat de noodzaak tot gevolgebepurende maatregelen van overstromingen toeneemt. Twee effect bestrijdende maatregelen voor een mogelijke dijkdoorbraak zijn de compartimentering van overstromingsgevoelige gebieden en het evacueren van mensen uit het potentieel gevaarlijke gebied. Hoewel beide maatregelen zijn gericht op het verkleinen van de gevolgen van een overstroming is de eerste maatregel gericht op de overstroming zelf, door het verkleinen van het overstroomde gebied. Evacuatie is echter gericht op het anticiperen op de overstroming zonder iets aan de overstroming zelf te willen veranderen. Beide maatregelen zijn zeer met elkaar verweven, zeker in het geval van een acute evacuatie. Bij een acute evacuatie wordt er geëvacueerd ten tijde van de overstroming. Voor iedere vorm van evacuatie is een betrouwbaar en robuust netwerk van wegen van groot belang, maar in geval van een acute evacuatie geldt dit nog meer. Door de overstroming raken wegen ondergelopen en zijn niet meer bruikbaar voor de evacuatie. Het wegennetwerk zal in de loop van de tijd verder verslechteren en een

(acute) evacuatie langzaam onmogelijk maken. De mogelijke positieve invloed van compartimenteringdijken en andere lijnelementen op een overstroming en het evacuatieproces, zoals verhoogde weg- en spoorlichamen, wordt door verschillende onderzoeken en instanties ingezien. Zo verwoordt Rijkswaterstaat (2010) op haar website dat lijnelementen het overstromingsverloop in een gebied zullen beïnvloeden. Dergelijke lijnelementen kunnen de overstroming keren, vertragen of sturen zodat een mogelijke evacuatie (langer) kan doorgaan, onder andere door de beschikbaarheid van het wegennetwerk.

1.1.3 Lijnelementen in het landschap

De exacte invloed van lijnelementen op een overstroming en het evacuatieproces, zoals in de vorige paragraaf aangegeven, is echter niet bekend. Onder lijnelementen worden in dit onderzoek ophogingen in het landschap verstaan, zoals (spoor) weglichamen of geluidswallen, die niet ontworpen zijn om water te keren, bijvoorbeeld een verhoogde weg. Lijnelementen zijn in alle dijkkringgebieden in Nederland aanwezig, een overzicht van de dijkkringgebieden in Nederland is opgenomen in appendix C. De aanwezigheid van lijnelementen in het landschap wordt in verschillende projecten en onderzoeken betrokken in overstromingssimulaties, om zodoende inzicht te krijgen in de invloed van de lijnelementen op het overstromingsverloop. Het in acht nemen van lijnelementen in deze projecten gebeurt voornamelijk door middel van grenssituaties. Zo hanteert bijvoorbeeld het project 'Veiligheid Nederland in Kaart' (VNK)¹ twee situaties. In de ene situatie wordt ervan uitgegaan dat de lijnelementen in een dijkkringgebied allemaal direct bezwijken bij belasting met water, terwijl er in de andere situatie vanuit wordt gegaan dat ze in stand blijven tot ze overlopen. Deze twee grenssituaties creëren een mogelijke overschatting of onderschatting van het overstroomde gebied. In het rapport 'VNK – Inschatting van het aantal slachtoffers ten gevolge van overstroming' wordt nader beschouwd wat het gevolg is van beide grenssituaties. In dit rapport wordt verwoord dat lijnelementen de omvang van overstroomde gebieden kunnen beperken, waardoor in veel gevallen het aantal getroffen en slachtoffers wordt verkleind (Rijkswaterstaat, 2006, p. 28). In andere gevallen lopen economisch belangrijke gebieden echter sneller onder wanneer wordt aangenomen dat de lijnelementen in het gebied het water kunnen keren. In dit geval hebben de lijnelementen een negatieve invloed op het overstromingsscenario. Doordat er onzekerheid bestaat over de standzekerheid en het gedrag van lijnelementen bij belasting door een overstroming, worden in het VNK project voor elk afzonderlijk gebied beide grenssituaties beschouwd (Rijkswaterstaat, 2006, p. 29). Inzicht in de invloed van elk individueel lijnelement op de overstroming ontbreekt voor de dijkkringgebieden. Afhankelijk van de resultaten van beide grenssituaties wordt er een uitspraak gedaan over de veiligheid in het betreffende gebied en worden er vervolgacties ondernomen om de mogelijke schade tijdens een overstroming in het gebied te beperken.

Dit gebrek aan inzicht in de invloed van lijnelementen op overstromingen heeft tevens betrekking op (acute) evacuaties. De extra compartimentering die door lijnelementen verkregen kan worden in dijkkringgebieden, kan van grote invloed zijn op de beschikbaarheid van het wegennet (Theunissen, 2006). De mogelijkheid om lijnelementen in te zetten om het wegennet te beschermen en zo evacuatie mogelijk te maken is echter nog geen onderwerp van diepgaand onderzoek geweest. Door Knoeff (2001) is een eenvoudige beoordelingssystematiek opgesteld om de waterkerende werking van onder andere lijnelementen te kunnen beoordelen. Deze systematiek leidt tot een kwalitatieve beoordeling, waarbij het gedrag van de kering voldoende, onzeker of slecht kan zijn. Een concrete, kwantitatieve beoordeling wordt hiermee niet verkregen. Tevens wordt er door Knoeff niet ingegaan op de bruikbaarheid van de lijnelementen door verkeer tijdens een overstroming.

¹ Een onderzoeksproject naar overstromingsrisico's en overstromingsgevolgen, geïnitieerd door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Esselink (2009) heeft op basis van Knoeff een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de categorisering van lijnelementen en het gerelateerde waterkerend vermogen. Door Esselink zijn verschillende lijnelementen onderzocht, zoals geluidswallen en verhoogde spoordijken en wegen. Uit zijn onderzoek volgen echter geen duidelijke uitspraken over het waterkerende vermogen van de lijnelementen. Wel geeft Esselink een eerste aanzet tot een categorisering van de verschillende lijnelementen en de faalmechanismen die hierbij mogelijk kunnen optreden. De relatie tussen lijnelementen en overstromingen op zichzelf zijn in internationaal verband wel veelvuldig onderzocht. Hierbij wordt echter niet de invloed van lijnelementen op overstromingen beschouwd, maar de invloed van overstromingen op lijnelementen, bijvoorbeeld weglichamen. De nadruk ligt op het beter construeren van de lijnelementen zodat ze bestand zijn tegen overstromingen (Dhakal, 2007). Deze onderzoeken vinden plaats in landen waar de infrastructuur veelvuldig wordt aangetast door overstromingen, zoals Vietnam en Bangladesh (Alam & Zakaria, 2002). Aan de hand van dit probleemkader wordt geconcludeerd dat diepgaand onderzoek naar de invloed van lijnelementen op overstromingen ontbreekt, terwijl wel wordt erkend dat lijnelementen hierop een mogelijk positieve invloed kunnen hebben.

1.1.4 Onderzoeksvraagstuk

Het probleem waar dit onderzoek zich op richt is dat er nog niet voldoende inzicht is in de invloed van lijnelementen op overstromingen en de mogelijke (positieve) gevolgen die hierdoor kunnen optreden voor (acute) evacuatie. Lijnelementen zijn in te delen in verschillende categorieën (Esselink, 2009, p. 16). Van deze categorieën komen verhoogde weglichamen het meest voor in Nederland en zullen daarom de grootste invloed op overstromingen hebben. Op grond hiervan en in het kader van de vastgestelde onderzoekstijd, beperkt dit onderzoek zich tot het lijnelement ‘verhoogde wegen’. Er is geen inzicht in de rangschikking van verhoogde wegen met betrekking tot het waterkerend vermogen. Onduidelijk is welke fysieke eigenschappen van verhoogde wegen van invloed zijn op de mate waarin het weglichaam water kan keren en daarmee wat de invloed van de verhoogde wegen is op overstromingen en de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen. Deze fysieke eigenschappen kunnen bijvoorbeeld de taludhelling of de opbouw van de natuurlijke ondergrond zijn. Om gericht een uitspraak te kunnen doen over de invloed van verschillende verhoogde wegen op een overstroming, is er een categorisering nodig naar dimensies, opbouw en het optreden van faalmechanismen bij het belasten met water. Hierin is tevens het betrekken van een statische verkeersbelasting van belang, wat zich in de praktijk voordoet door filevorming tijdens een evacuatie. Door deze categorisering te vereenvoudigen tot fysieke eigenschappen die een significant onderscheid maken in het waterkerend gedrag, is het mogelijk om zonder gedetailleerde informatie over verhoogde wegen snel en eenduidig een uitspraak te kunnen doen over de invloed op een overstroming. Bondig verwoord leidt dit tot het volgende onderzoeksvraagstuk:

Er bestaat geen inzicht in een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met betrekking tot het waterkerend vermogen en daarbij behorende faalmechanisme, waarmee in kaart kan worden gebracht wat de invloed van verhoogde wegen is op overstromingen en de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen.

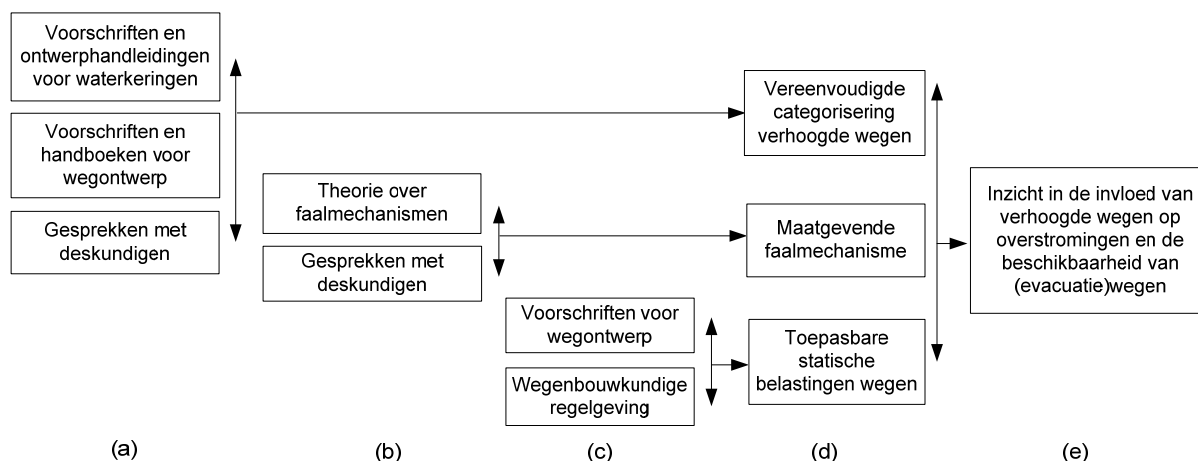
1.2 Doelstelling van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van kwalitatief en kwantitatief inzicht in het waterkerend vermogen van verhoogde wegen, door middel van het vereenvoudigd categoriseren van verhoogde wegen ten aanzien van waterkerende fysieke eigenschappen en het bepalen van de bijbehorende maatgevende faalmechanismen, teneinde inzicht te verschaffen in de invloed van verhoogde wegen op overstromingen en de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen.

Deze doelstelling beoogt bij te dragen aan het promotieonderzoek van kapitein ir. Sjoerd Mevissen, die onderzoek doet naar de kwetsbaarheid van een weg ten behoeve van (acute) evacuatie.

1.3 Onderzoeksmodel

In deze paragraaf wordt het onderzoeksmodel dat gebruikt is om tot de bovenstaande doelstelling te komen gepresenteerd. Het onderzoeksmodel is een schematische weergave van het doel van het onderzoek en de globale stappen die gezet moeten worden om dit doel te bereiken (Doorewaard & Verschuren, 2005). Het onderzoeksmodel is gevisualiseerd in Figuur 1.



Figuur 1 - Onderzoeksmodel

Toelichting van het onderzoeksmodel:

(a) Een bestudering van voorschriften en ontwerphandleidingen voor zowel waterkeringen als verkeerswegen en gesprekken met deskundigen op beide vakgebieden, leidt tot een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met betrekking tot waterkerende fysieke eigenschappen. (b) Aan de hand van theorie over faalmechanismen voor waterkerende elementen, samen met gesprekken met deskundigen wordt tot een overzicht van maatgevende faalmechanismen gekomen voor het toetsen van de categorisering van verhoogde wegen. (c) Door bestudering van voorschriften voor wegontwerp samen met regelgeving voor wegenbouw, wordt tot toepasbare statische verkeersbelastingen voor de wegen als toetsingscriteria gekomen. (d) Vervolgens wordt de categorisering van wegen getoetst aan de hand van de maatgevende faalmechanismen en tevens (apart) getoetst bij belasting met een statische verkeerslast. Deze analyses resulteert in (e) inzicht in de invloed van verhoogde wegen op overstromingen en de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen tijdens een overstroming.

1.4 Vraagstelling

Naar aanleiding van de geformuleerde doelstelling weergegeven in paragraaf 1.2, kunnen er drie onderzoeksvragen worden afgeleid. Onderzoeksvragen, zoals beschreven door Verschuren en Doorewaard (2005), moeten tezamen voldoende toereikend zijn om de doelstelling te bereiken, en niet meer dan dat. Voor het afleiden van de onderzoeksvragen beschrijven Verschuren en Doorewaard drie methodes, waarvan in dit onderzoek het splitsen van het onderzoeksmodel wordt geselecteerd. Dit houdt in dat het onderzoeksmodel wordt opgesplitst in herkenbare onderdelen. De eerste onderzoeksvraag sluit dan ook aan bij het in kaart brengen van de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen (a). De tweede onderzoeksvraag legt de koppeling tussen de gecategoriseerde wegen en het waterkerend vermogen, door middel van de faalmechanismen (b en d), waarna in de derde onderzoeksvraag de invloed van een statische verkeersbelasting op wegen wordt beschouwd (c en d). De resultaten van deze drie onderzoeksvragen zullen de doelstelling van het onderzoek doen bereiken.

Een overzicht van de onderzoeksvragen nader uitgewerkt:

Onderzoeksvraag 1: Welke fysieke eigenschappen dienen als criteria om uit verhoogde wegen een vereenvoudigde categorisering naar het waterkerend vermogen te genereren?

Deelvraag 1.1: Welke fysieke eigenschappen en vuistregels kunnen ontleend worden aan bestaande ontwerpeisen voor waterkeringen?

Deelvraag 1.2: Welke fysieke eigenschappen van wegen kunnen ontleend worden uit voorschriften voor wegontwerp om een categorisering in het waterkerend vermogen te schetsen?

Onderzoeksvraag 2: Hoe groot is het waterkerend vermogen van verhoogde wegen?

Deelvraag 2.1: Welke faalmechanismen zijn van toepassing op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen?

Deelvraag 2.2: Wat zijn de maatgevende waterstanden of belastingstijden waarbij de categorieën bezwijken?

Onderzoeksvraag 3: Hoe groot is de invloed van statische verkeersbelastingen met betrekking tot het waterkerend vermogen van verhoogde wegen?

Deelvraag 3.1: Welke faalmechanismen zijn, onder invloed van de maximale statische verkeersbelasting, van toepassing op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen?

Deelvraag 3.2: Wat zijn de maatgevende waterstanden of belastingstijden waarbij de maximaal belaste categorieën bezwijken?

Deelvraag 3.3: Welke statische verkeersbelastingen zijn maximaal toelaatbaar op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen wanneer de maatgevende waterstanden zonder verkeersbelasting worden gehanteerd?

1.5 Afbakening

Het onderzoek is afgebakend per onderzoeksvraag.

Afbakening onderzoeksvraag 1: Onder een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen wordt een rangschikking van wegen verstaan op basis van verschillen in fysieke eigenschappen. Dit onderscheid in fysieke eigenschappen is gerelateerd aan de invloed die de eigenschappen hebben op het waterkerend vermogen van

de verhoogde wegen. Het gaat hierbij om fysieke eigenschappen, zoals de taludhelling of de opbouw van het weglichaam, die voor een daadwerkelijk verschil in het waterkerend gedrag van het weglichaam zorgen.

Afbakening onderzoeksvraag 2: Het waterkerend vermogen van de vereenvoudigde categorisering heeft betrekking op een statische waterlast, waarbij geen stromingskrachten worden inbegrepen. Tevens wordt er geen verkeersbelasting op het wegdek meegenomen in deze onderzoeksvraag. Golfslag wordt wel beschouwd in het onderzoek.

Afbakening onderzoeksvraag 3: Voor de afbakening van de derde onderzoeksvraag wordt de afbakening van de tweede onderzoeksvraag uitgebreid met het beschouwen van een statische verkeersbelasting op het wegdek. Hierbij worden twee situaties beschouwd, enerzijds wordt berekend wat de maatgevende waterstanden tegen het weglichaam zijn, bij een maximale statische belasting, zoals een file. Anderzijds worden de maatgevende waterstanden zonder verkeersbelasting gehanteerd en wordt berekend wat de maximaal toelaatbare statische verkeersbelasting is bij deze waterstanden. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 – Toetsingsituaties voor de statische verkeersbelasting

1.6 Belang van het onderzoek

In een waterland zoals Nederland is meer kennis en inzicht in het beperken van schade door en de impact van water op de bevolking en het grondgebied erg belangrijk. Op dit gebied is al veel kennis beschikbaar, zoals de compartimentering van risicogebieden. Deze kennis is echter doorgaans gerelateerd aan primaire waterkeringen, terwijl er ook verschillende verhogingen en taluds in het landschap aanwezig zijn, zoals weglichamen, die ook op enige wijze invloed uitoefenen op overstromingen. Tevens moeten deze wegen tijdens overstromingen vaak nog toegankelijk zijn om mensen het gebied uit te evacueren. Door inzicht te verschaffen in de invloed van verhoogde wegen op het gedrag van water tijdens overstromingen en het effect ervan op de beschikbaarheid van wegen, kunnen er betere evacuatieplannen worden opgesteld.

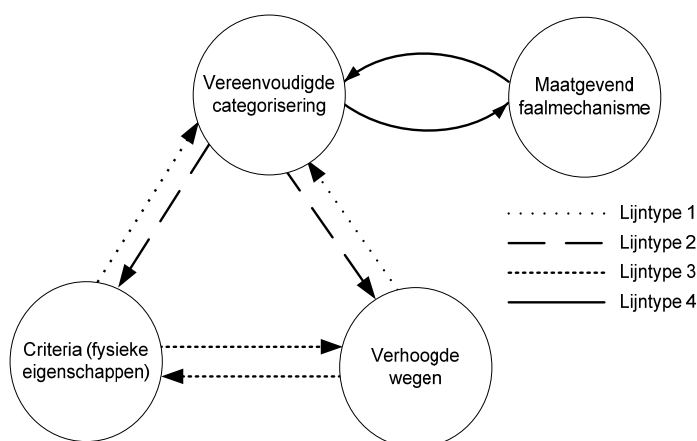
Dit onderzoek genereert inzicht in de invloed van verhoogde wegen op overstromingen en de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen. Verhoogde wegen kunnen de overstroming keren, vertragen of sturen zodat een mogelijke evacuatie (langer) kan doorgaan. Bijvoorbeeld doordat het water vertraagd een gebied instroomt en daardoor de beschikbaarheid van een belangrijke weg vergroot wordt. Door het genereren van een vereenvoudigde categorisering en hieraan het waterkerend vermogen te koppelen, wordt het eenvoudiger om verschillende gebieden snel te beoordelen op de mogelijke invloed die de aanwezige weglichamen hebben. Het inzicht in het maatgevende faalmechanisme van de verhoogde wegen, de bijbehorende maatgevende waterstand en de invloed van een statische verkeersbelasting levert begrip van de beschikbaarheid van wegen en het kerende, vertragende of sturende vermogen tijdens een overstroming.

De verwachte winst van het onderzoek voor de praktijk is om op basis van de vereenvoudigde categorisering snel een uitspraak te kunnen doen over de invloed van wegen in een gebied op een overstroming. Vervolgens kan hiermee nauwkeuriger worden ingeschat hoe de overstroming in het gebied zal verlopen en welke gevolgen dit heeft voor de bevolking en voor een (acute) evacuatie. Aan de hand hiervan kunnen gerichte acties worden ondernomen voor ruimtelijke of infrastructurele aanpassingen in een dijkkringgebied met als

doel het beperken van de overstromingsschade en het creëren van een robuust wegennet ten behoeve van evacuatie. Hierbij kan gedacht worden aan het versterken van wegen die tijdens een evacuatie van groot belang zijn en uit het onderzoek snel blijken te bezwijken. Uiteindelijk tracht het onderzoek bij te dragen aan een veiligere situatie in Nederland als het aankomt op overstromingen.

1.7 Structuur van het rapport

De structuur van het rapport en het uitgevoerde onderzoeksproces komen niet geheel met elkaar overeen. In het onderzoek is gebruik gemaakt van een iteratief onderzoeksproces. In dit iteratieve onderzoeksproces, weergegeven in Figuur 3, zijn de stappen uit het onderzoeksmodel (paragraaf 1.3) op een iteratieve wijze beschouwd. Er is rekening gehouden met de invloed die de verschillende stappen op elkaar hebben. Als voorbeeld wordt een fysieke eigenschap in het licht van de verhoogde wegen geplaatst (lijntype 3), deze fysieke eigenschap wordt opgenomen in de vereenvoudigde categorisering (lijntype 1) en wordt getoetst op de faalmechanismen (lijntype 4). Na toetsing blijkt dat de fysieke eigenschap niet van belang is voor de faalmechanismen, dan wordt dit verwerkt in de vereenvoudigde categorisering en worden de criteria en verhoogde wegen opnieuw beschouwd (lijntype 2).



Figuur 3 - Iteratief onderzoeksproces

In dit rapport zijn de iteratieve stappen uit het onderzoek niet opgenomen. Het rapport presenteert enkel de uiteindelijke analyses en resultaten. In hoofdstuk 2 wordt daarvoor de theoretische basis gelegd voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen. Dit is gedaan aan de hand van het uitwerken van onderzoeksvraag 1. Hieruit volgen de fysieke eigenschappen die als criteria dienen voor de vereenvoudigde categorisering. Deze categorisering wordt vervolgens in hoofdstuk 3 getoetst op faalmechanismen. Dit resulteert in een weergave van de vereenvoudigde categorisering met de bijbehorende maatgevende faalmechanismen en waterstanden (onderzoeksvraag 2). In hoofdstuk 4 wordt de statische verkeersbelasting betrokken in de toetsing van de fysieke eigenschappen op de faalmechanismen (onderzoeksvraag 3). Hierbij wordt beschouwd wat de invloed van de statische verkeersbelasting is en wat voor een gevolgen dit heeft voor de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen. In hoofdstuk 5 wordt het rapport afgesloten met de conclusies die worden getrokken uit het onderzoek en de aanbevelingen die hieruit volgen.

2. Literatuuranalyse naar de fysieke eigenschappen van belang voor het waterkerend vermogen

Dit onderzoek richt zich op het verkrijgen van inzicht in het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Voordat hierover een kwantitatieve uitspraak gedaan kan worden, is er eerst een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen nodig, zodat niet elke weg in Nederland doorgerekend hoeft te worden. De vereenvoudigde categorisering wordt gebaseerd op fysieke eigenschappen van wegen die van invloed zijn op het waterkerend vermogen van het weglichaam, bijvoorbeeld de taludhelling of de kruinbreedte. Daarvoor wordt in dit hoofdstuk de uitgevoerde literatuuranalyse naar de fysieke eigenschappen van verhoogde wegen en waterkeringen beschreven. Aan de hand van de literatuuranalyse is een overzicht opgesteld met fysieke eigenschappen van wegen die invloed hebben op het waterkerend vermogen van een weglichaam.

In paragraaf 2.1 wordt ingegaan op fysieke eigenschappen die voortkomen uit voorschriften voor waterkeringen. Dit wordt gevolgd door een analyse van voorschriften en ontwerphandleidingen voor de verkeerswegenbouw in paragraaf 2.2, waarin fysieke eigenschappen van wegen worden opgesteld. Deze fysieke eigenschappen worden in paragraaf 2.3 tegenover elkaar gezet, zodat enkel de fysieke eigenschappen van wegen overblijven die van invloed zijn op het waterkerend vermogen van een weglichaam. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een weergave van de conclusies van de literatuuranalyse. Hierin wordt een overzicht van de fysieke eigenschappen, belangrijk voor verhoogde wegen als waterkering, gepresenteerd. Dit hoofdstuk omvat de verantwoording voor de analyse van de literatuur en de gemaakte keuzes voor de verschillende fysieke eigenschappen van verhoogde wegen.

2.1 Analyse van de voorschriften voor waterkeringen

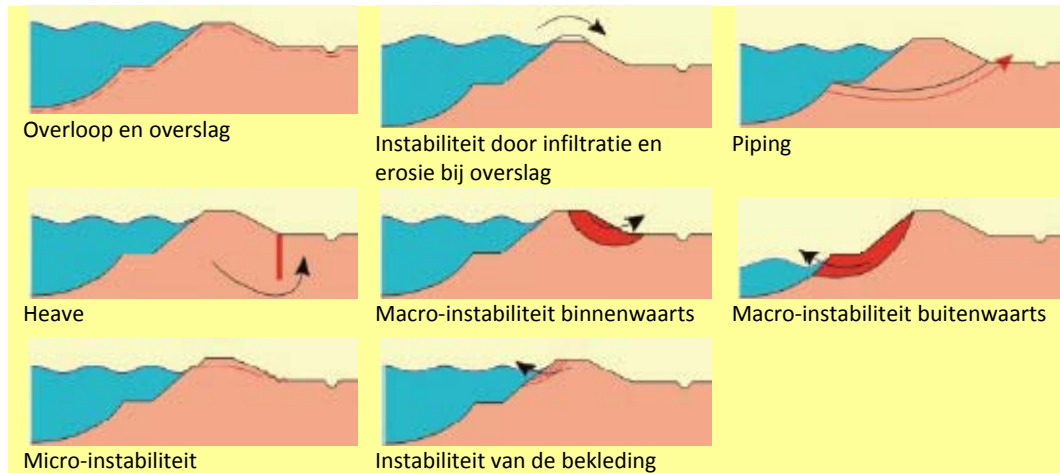
In deze paragraaf worden verschillende voorschriften voor het ontwerpen, onderhouden en toetsen van waterkeringen geanalyseerd. Bij deze analyse is constant in gedachten gehouden dat de fysieke eigenschappen van de waterkeringen gebruikt worden voor het opstellen van een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen die uiteindelijk getoetst worden op hun waterkerende vermogen. Fysieke eigenschappen die hierop geen betrekking hebben worden dan ook niet aangehaald.

Bij het bestuderen van de literatuur is specifiek gelet op de verschillende faalmechanismen en toetsingsmethodes voor faalmechanismen van waterkeringen. Doordat de vereenvoudigde categorisering getoetst zal worden op faalmechanismen, zijn vooral fysieke eigenschappen van het grondlichaam van belang die invloed hebben op het optreden van de verschillende faalmechanismen. Het afleiden van de fysieke eigenschappen is voornamelijk uitgevoerd gebruik makend van het 'Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen' (VTV) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007) waarbij tevens gebruik is gemaakt van de 'Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen' (STOWA, 2007). In het VTV worden drie niveaus van toetsing aangehaald; eenvoudige toetsing, gedetailleerde toetsing en de geavanceerde toetsing. Voor deze paragraaf is de eenvoudige toetsing gebruikt als referentie voor het bepalen van fysieke eigenschappen. De eenvoudige toetsing richt zich namelijk op de primaire fysieke eigenschappen van waterkeringen voor het keren van water.

In de volgende subparagrafen worden achtereenvolgens de volgende faalmechanismen beschreven met de daarvan afgeleide fysieke eigenschappen (zie Figuur 4).

- Overlopen en overslag
- Piping / heave
- Macrostabieliteit binnenwaarts
- Macrostabieliteit buitenwaarts
- Microstabieliteit
- Instabiliteit van de taludbekleding

Tevens wordt de invloed van niet waterkerende objecten (NWO) beschreven.



Figuur 4 - Overzicht van faalmechanismen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 110)

2.1.1 Overlopen en overslag

Voor de veiligheid van dijken en dammen tegen de faalmechanismen overloop en overslag zijn voornamelijk twee parameters van belang: de kruinhoogtemarge en het overslagdebiet. De kruinhoogtemarge is het verschil tussen de kruinhoogte en de waterstand. Wanneer de kruinhoogtemarge groot is, wordt het gevaar overslag en overlopen verkleind. Het overslagdebiet is het aantal liter water per seconde per meter dijk dat overslaat. Een hoog overslagdebiet heeft als gevaar dat de taludbekleding instabiel wordt door infiltratie en erosie.

De mate van overslag is gerelateerd aan de volgende zes parameters (STOWA, 2007, p. 33):

1. Het overslagdebiet
2. De maatgevende windsnelheid
3. De waterdiepte
4. De breedte van het water
5. De helling van het buitentalud
6. De kruinhoogte

Bij bijvoorbeeld een hoge windsnelheid en een grote strijklengte (lengte waarover de wind over het wateroppervlakte strijkt) kan de golfbelasting en golfoverslag aanzienlijk groter zijn dan wanneer het windstil is.

Van deze zes parameters zijn de eerste vier parameters afhankelijk van invloeden die buiten de vormgeving of fysieke eigenschappen van de verhoogde weg liggen. De helling van het buitentalud en de kruinhoogte kunnen wel als fysieke eigenschap worden aangemerkt. Een flauwere helling van het talud zorgt ervoor dat de golven breken op het talud. Door de 'Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken' (TAW, 1985, p. 50) wordt aangegeven dat een taludhelling flauwer dan 1:3 vrijwel alle golven breekt. Knoeff (2001, pag. 11) geeft in zijn onderzoek aan dat voor dijken in het bovenrivierengebied het buitentalud flauwer moet zijn dan 1:2,5. Uit deze parameters voor de mate van golfoverslag volgt de eerste fysieke eigenschap.

Fysieke eigenschap 1 waterkeringen: De helling van het talud;

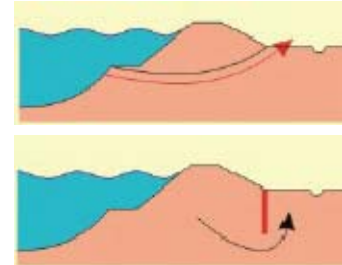
** Met als referentie een buiten taludhelling van 1:2,5*

Buiten golfoverslag wordt er door zowel de 'Handreiking Ontwerpen & Verbeteren Waterkeringen langs regionale rivieren' en het VTV gewezen op de kruinhoogtemarge. De kruinhoogtemarge zorgt ervoor dat in het geval van een verwachte maximale waterstand en golfbelasting de mate van golfoverslag geen kritische

invloed heeft op de sterkte van de bekleding van de kruin en het binnentalud. De waarde van de benodigde kruinhoogtemarge is afhankelijk van het overslagdebiet, hieruit kunnen geen fysieke eigenschappen worden afgeleid. In hoofdstuk 3 wordt teruggekomen op berekening van de benodigde kruinhoogtemarge.

2.1.2 Piping / heave

De faalmechanismen piping en heave zijn het optreden van stabiliteitsverlies in het dijklichaam, wat ontstaat wanneer gronddeeltjes uit de onderliggende grondlagen worden meegevoerd door een kwelstroom bij (langdurige) hoge waterstanden (Figuur 5). Het optreden van deze interne erosie van het taludlichaam is aan de binnenzijde van het talud zichtbaar, doordat in sloten of op het maaiveld met het opwellende kwelwater zand wordt meegevoerd. Een voorwaarde voor het kunnen optreden van piping en heave is dat er binnendijs van de waterkering sprake is van een deklaag met een zekere dikte, en dat deze deklaag opbarst. Is de veiligheid tegen opbarsten voldoende, dan is ook de weerstand tegen piping en heave voldoende en hoeft daarop niet gecontroleerd te worden (STOWA, 2007, p. 34). Opbarsten treedt op indien het gewicht van het afdekkende pakket gelijk aan, of kleiner is dan de opwaartse waterdruk tegen de onderkant van het afdekkende pakket.



Figuur 5 - Piping en heave

In het VTV worden vier typen grondlichamen onderscheiden die verschillen in de globale opbouw van het grondlichaam en ondergrond. Deze vier typen worden gebruikt voor de eenvoudige toetsing op piping en heave (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 135).

- Type 1A; (dijk)lichaam bestaande uit klei op een slecht doorlatende ondergrond (klei- en veenlagen)
- Type 2A; (dijk)lichaam bestaande uit zand op een slecht doorlatende ondergrond (klei- en veenlagen)
- Type 1B; (dijk)lichaam bestaande uit klei op een goed doorlatende ondergrond, waarbij er direct onder de zool van het (dijk)lichaam geen afdekkend slecht doorlatende lagen aanwezig zijn
- Type 2B; (dijk)lichaam bestaande uit zand op een goed doorlatende ondergrond, waarbij er direct onder de zool van het (dijk)lichaam geen afdekkend slecht doorlatende lagen aanwezig zijn

Uit deze typering volgt een duidelijk inzicht in de fysieke eigenschappen die een onderscheid maken voor wat betreft de weerstand tegen het faalmechanisme piping en heave en het waterkerend vermogen van de dijken. Hieruit volgen de tweede en derde fysieke eigenschap voor waterkeringen.

Fysieke eigenschap 2 waterkeringen: De opbouw van het grondlichaam, met een onderscheid tussen;

** Zandlichaam (kern)*

** Kleilichaam (kern)*

Fysieke eigenschap 3 waterkeringen: De opbouw van de ondergrond, met een onderscheid tussen;

** Slecht doorlatende ondergrond (klei)*

** Goed doorlatende ondergrond (zand)*

Na analyse van de toetsingscriteria voor piping en heave vermeldt in het VTV, ontstaat er door de toetsingsregels een verdere uitbreiding van de fysieke eigenschappen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, pp. 136 - 138). Voor het toetsen van de vier typen worden type 1A en 2A samengenomen. Voor de eenvoudige toetsing van type 1A en 2A geldt dat aan één van de volgende toetscriteria voldaan moet worden (zie Figuur 6):

$$\text{opdrukveiligheid: } \frac{\sigma_g}{\sigma_w} \geq 1,0 \quad (1) \quad \text{Of} \quad \frac{L}{18} \geq \Delta H - 0,3 * d \quad (2)$$

Waarbij:

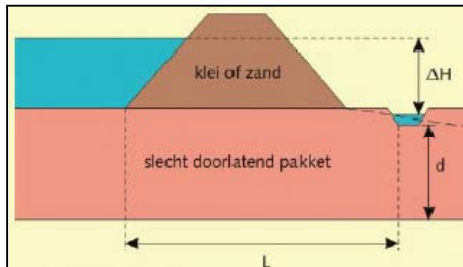
L = kwelweglengte [m]

σ_g = gronddruk onderzijde afdekkend pakket [kN/m^2]

σ_w = opwaartse waterdruk onder afdekkend pakket [kN/m^2]

ΔH = hoogteverschil tussen waterstand voor de kering en erachter of het maaiveld [m]

d = dikte van het afdekkend pakket slecht doorlatend nabij het uittredepunt [m]



Figuur 6 – Toetsingsparameters piping / heave type 1A en 2A (STOWA, 2007)

De toetscriteria voor opdrukveiligheid (formule 1) richt zich op het opbarsten van het slecht doorlatend pakket. Aangezien hiervoor situatiespecifieke informatie benodigd is, zoals plaatselijke gronddrukken, waterstromen en waterdrukken, wordt deze toetsing niet gebruikt voor het opstellen van fysieke eigenschappen. De tweede toetscriteria (formule 2), levert twee fysieke eigenschappen, namelijk de kwelweglengte (L) en de dikte van het slecht doorlatende pakket van de ondergrond (d). Dit leidt tot een aanvulling op de derde fysieke eigenschap en een vierde fysieke eigenschap.

Fysieke eigenschap 3 waterkeringen: De opbouw van de ondergrond, met een onderscheid tussen;

- * Slecht doorlatende ondergrond (klei) en de dikte ervan
- * Goed doorlatende ondergrond (zand)

Fysieke eigenschap 4 waterkeringen: De kruinbreedte van het grondlichaam

Voor de toetsingcriteria van type 1B, waarbij het taludlichaam bestaat uit klei op een goed doorlatende ondergrond, wordt formule (3) gebruikt:

$$\frac{L}{18} \geq \Delta H \quad (3)$$

Waarbij:

L = kwelweglengte [m]

ΔH = hoogteverschil tussen waterstand voor de kering en erachter of het maaiveld [m]

Dit is dezelfde formule als formule (2), wanneer wordt aangenomen dat $d = 0,0\text{m}$. In dit geval is er geen sprake van een slecht doorlatend pakket in de natuurlijke ondergrond.

De toetsing van type 2B, waarbij het taludlichaam bestaat uit zand op een goed doorlatende ondergrond, is niet van toepassing voor piping en heave. In deze situatie stort het taludlichaam simpelweg in, er is eerder sprake van micro-instabiliteit (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 138).

2.1.3 Macrostabieliteit binnenwaarts

Met macro-instabiliteit binnenwaarts wordt het afschuiven van grote delen van een grondlichaam aan de binnenzijde van het taludlichaam bedoeld (Figuur 7). Dit afschuiven treedt op langs rechte of gebogen glijvlakken, waarin door overbelasting geen krachterevenwicht meer aanwezig is (STOWA, 2007, pp. 36 - 39).

De eenvoudige toetsing op binnenwaartse macrostabieliteit in het VTV maakt onderscheid tussen twee type dijklichamen:



Figuur 7 - Macro-instabiliteit binnenwaarts

- Type 1; een dijklichaam met een kern van klei
- Type 2; een dijklichaam met een kern van zand

Voor beide typen is de opbouw van de ondergrond afhankelijk van de dikte van het slecht doorlatend pakket. Het slecht doorlatend pakket (klei- en veenlaag) heeft dan een dikte (d) met daaronder zand. Indien alleen zand aanwezig is dan geldt $d = 0,0\text{m}$. De bovenstaande typering maakt hetzelfde fysieke onderscheid in het dijklichaam als fysieke eigenschap twee.

Voor de eenvoudige toetsing wordt uitgegaan van de situatie waarbij er geen opdrijven van klei of veen houdende lagen in het binnenland optreedt. De toetsingsregels die hierbij horen zijn (zie Figuur 8):

- Type 1: zeker veilig met $n \geq 4$ en

$$A \geq f_a * h \quad (4)$$

of met $n < 4$ en

$$b_{kr} - k \geq f_k * h \quad (5)$$

en

$$A \geq f_a * h$$

- Type 2: zeker veilig met $n \geq 5$ en

$$A \geq f_a * h \quad (4)$$

of met $n < 5$ en

$$b_{kr} - k \geq f_k * h \quad (5)$$

en

$$A \geq f_a * h$$

Waarbij:

n = cotangens van de taludhelling binnenwaarts

A = lengte waarover een vlak maaiveld aanwezig moet zijn [m]

d = dikte slecht doorlatend pakket [m]

h = kruinhoogte [m]

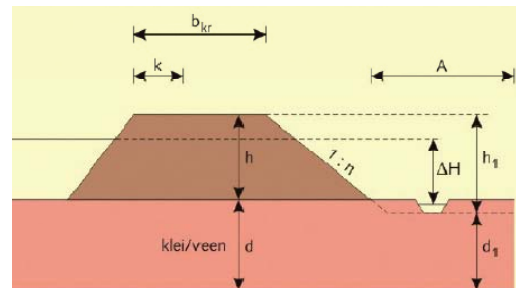
f_a = factor afhankelijk van d/h [-]

b_{kr} = kruinbreedte [m]

k = minimaal vereiste kruinbreedte [m] (3m voor rivierdijken, 2m voor zee- en meerdijken)

f_k = factor afhankelijk van d/h [-]

d_1 en h_1 bij aanwezigheid sloot



Figuur 8 - Toetsingparameters macrostabiliteit binnenwaarts (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 146)

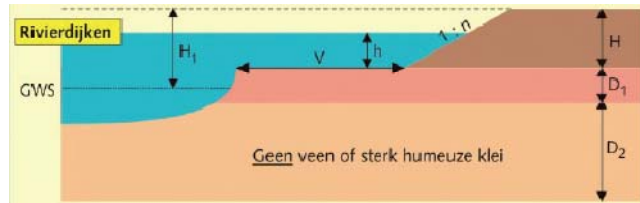
Uit deze toetsingsregels komen verschillende fysieke eigenschappen naar voren die van belang zijn voor de weerstand van het dijklichaam tegen binnenwaartse macro-instabiliteit. Allereerst is de dikte van het slecht doorlatende pakket (d) van belang, deze eigenschap is al opgenomen in fysieke eigenschap drie. Ten tweede is de hoogte van het grondlichaam (h) van belang, in samenhang met het waterstandverschil aan de binnen en buitenzijde van de dijk (ΔH). Verder zijn de factor A , de lengte waarover een vlak maaiveld aanwezig moet zijn, en de kruinbreedte van het talud twee fysieke eigenschappen van het grondlichaam voor macro-instabiliteit binnenwaarts. De kruinbreedte is reeds aangehaald als fysieke eigenschap maar de aanwezigheid van een vlak maaiveld naast het taludlichaam nog niet, dit leidt tot een nieuwe fysieke eigenschap. Zoals eerder vermeldt, wordt als uitgangspunt genomen dat er geen sprake is van opdrijven. Deze keuze wordt gemaakt omdat het gevaar voor opdrijven voornamelijk relevant is indien er sprake is van zeer hoge waterstanden (TAW, 1994, p. 26). Zeer hoge waterstanden zijn tegen verhoogde wegen niet te verwachten, omdat de kruinhoogte van wegen doorgaans beperkt is. Daarbij komt dat wanneer er achter een primaire kering geen opdrijving optreedt, het zeer onwaarschijnlijk is dat dit wel optreedt achter een weglichaam tijdens een overstroming. De overstromingswaterstand zal lager zijn dan de oorspronkelijke waterstand in de rivier, waardoor het waterdrukverschil lager is tijdens een overstroming. Deze beschrijving leidt tot het eerste uitgangspunt en de volgende fysieke eigenschap.

Fysieke eigenschap 5 waterkeringen: Aanwezigheid van een vlak maaiveld naast het taludlichaam

Uitgangspunt 1 waterkeringen: Het optreden van opdrijving van het binnenland is op verhoogde wegen niet van toepassing

2.1.4 Macrostabieliteit buitenwaarts

Het faalmechanisme buitenwaartse macro-instabiliteit omvat het optreden van stabiliteitsverlies van het voorland door afschuiving of zettingsvloeiing in de directie omgeving van het dijklichaam. Deze instabiliteit kan ontstaan door een snelle val van de buitenwaterstand waarbij er een relatief hoog freatisch vlak in het taludlichaam aanwezig blijft (TAW, 2001, pp. 101 - 104). Een zeer snelle val van de buitenwaterstand is voor verhoogde wegen buiten het kustgebied niet waarschijnlijk, aangezien niet verwacht wordt dat overstromingswater in korte tijd uit het overstroomde gebied verdwijnt (STOWA, 2007, p. 106). In samenhang hiermee zal er ook geen hoog freatisch vlak aanwezig zijn terwijl de waterstand laag is. Tevens richt het faalmechanisme macrostabieliteit buitenwaarts zich in het VTV op een situatie waarbij er aan de buitenzijde van het grondlichaam een geul aanwezig is, zoals weergegeven in Figuur 9. Bij verhoogde wegen is de kans op de aanwezigheid van een geul in het voorland klein. Op basis van de bovenstaande beschrijving wordt het onwaarschijnlijk geacht dat het faalmechanisme macrostabieliteit buitenwaarts zal optreden bij verhoogde wegen. Dit leidt tot het volgende uitgangspunt.



Figuur 9 - Toetsing parameters macrostabieliteit buitenwaarts (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 157)

Uitgangspunt 2 waterkeringen: Het optreden van buitenwaartse macro-instabiliteit is op verhoogde wegen niet van toepassing

2.1.5 Microstabieliteit

Onder het faalmechanisme microstabieliteit wordt het uitspoelen van zand uit het binnentalud door uittredend water verstaan (Figuur 10). De bedreiging voor stabiliteit komt van binnenuit, wat wordt veroorzaakt door een hoog freatisch vlak in het grondlichaam. Het gaat hierbij om zeer plaatselijke instabiliteit, wat echter ook aanleiding kan zijn tot bezwijken van het gehele talud. Waterstromingen in het grondlichaam kunnen verschillende vormen van micro-instabiliteit veroorzaken, deze vormen geven inzicht in fysieke eigenschappen van waterkeringen (STOWA, 2007, p. 41):



Figuur 10 – Micro-instabiliteit

- Afdrukken van de binnentalud bekleding, bij een minder doorlatende toplaag op een doorlatende kern. Bijvoorbeeld een toplaag van klei en een kern van zand.
- Afschuiven van de binnentalud bekleding, bij een uniforme opbouw van het grondlichaam, bijvoorbeeld een zandkern met een zandige toplaag of een minder doorlatende toplaag op een doorlatende kern.
- Uitspoelen van gronddeeltjes uit het binnentalud, bij een toplaag van vrijwel dezelfde doorlatendheid als de kern van het dijklichaam. Bijvoorbeeld een zandkern met een zandige toplaag.

Voor waterkeringen die een kleikern hebben speelt micro-instabiliteit geen rol.

De fysieke eigenschappen die hieruit resulteren leiden tot een aanvulling op fysieke eigenschap twee.

Fysieke eigenschap 2 waterkeringen: De opbouw van het grondlichaam, met een onderscheid tussen;

- * Zandlichaam (kern)*
- * Kleilichaam (kern)*
- * Slecht doorlatende top laag (bijvoorbeeld klei)*
- * Goed doorlatende top laag (bijvoorbeeld zandig)*

Voor de eenvoudige toetsing van microstabiliteit, beschreven in het VTV, krijgt een dijklichaam een toetsingscore 'goed' indien het voldoet aan één van de volgende voorwaarden (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 159):

- De binnenteen van de dijk wordt in voldoende mate gedraineerd
- De dijk heeft een slecht doorlatende kleikern waarvan de hoogte gelijk is aan of hoger is dan de overstromingswaterstand en de basis aansluit op een slecht doorlatende ondergrond
- Het gehele dijklichaam binnenwaarts van de kruin bestaat volledig uit slecht doorlatend materiaal
- De dijk is zandig en heeft een zandig binnentalud met een helling flauwer dan 1:5. Een kleibekleding ontbreekt in dit geval.

De eerste voorwaarde leidt tot een nieuwe fysieke eigenschap. De fysieke eigenschappen uit de tweede en derde voorwaarde zijn reeds opgenomen in eerder genoemde fysieke eigenschappen. De vierde voorwaarde zorgt voor een aanvulling op fysieke eigenschap één.

Fysieke eigenschap 1 waterkeringen: De helling van het talud;

- * Met als referentie een buiten taludhelling van 1:2,5*
- * Bij een zandige dijk en zandig binnentalud, binnentalud flauwer dan 1:5*

Fysieke eigenschap 6 waterkeringen: De aanwezigheid of afwezigheid van drainage

2.1.6 Instabiliteit van de taludbekleding

De bekleding van het buitentalud, de kruin en het binnentalud biedt bescherming tegen erosie van het dijklichaam. De bekleding is voornamelijk van belang als er een golfbelasting op het talud wordt verwacht. Het gaat daarbij zowel om de belasting van het buitentalud, direct door golven, als om belasting van de kruin en het binnentalud door golfoverslag. In het VTV wordt een onderscheid gemaakt tussen zes bekledingsclusters (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 262):

- | | |
|--------------------------|--|
| ▪ Gras | ▪ Gezette bekledingen en blokkenmatten |
| ▪ Losgestorte materialen | ▪ Betonbekledingen |
| ▪ Verpakte bekledingen | ▪ Asfaltbekledingen |

Elk bekledingscluster heeft een eigen uitgebreide toetsingsprocedure. De bekledingsclusters zouden als fysieke criteria kunnen fungeren, hier wordt echter niet voor gekozen, omdat verhoogde wegen vrijwel altijd een grasbekleding hebben (STOWA, 2007, p. 108).

De toetsing van de grasbekleding van het buitentalud is afhankelijk van zeer veel variabelen, zoals stroomsnelheid, windsnelheid, golfhoogte, golfkracht en golfbelasting. Dit zijn externe invloeden waarmee geen fysieke eigenschappen kunnen worden opgesteld. De eenvoudige toetsing van de grasbekleding begint dan ook met de toetsing op 'bewezen sterkte'. Dit kan echter niet worden toegepast op verhoogde wegen. Vervolgens wordt getoetst op de ondergrens van de golfbelasting, welke afhankelijk is van de helling van het talud en de golfhoogte. De golfhoogte betreft een externe invloed (strijklengte, windsnelheid, waterdiepte) en

de helling van het talud is reeds opgenomen in fysieke eigenschap één. De derde toetsingstap in het VTV richt zich op het zandgehalte van de klei in de graszode (de bovenste laag van de bekleding/toplaag). Indien het zandgehalte maximaal 50% bedraagt, krijgt de bekleding een score 'goed'. Wanneer het zandgehalte hoger is, is de kwaliteit van de graszode van belang. Hierbij worden bijvoorbeeld de dikte van de graszode, het uitgevoerde onderhoud en kale plekken in de graszode beschouwd (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, pp. 346 - 347). Hieruit volgt de volgende fysieke eigenschap.

Fysieke eigenschap 7 waterkeringen: De bekleding van de verhoogde weg, met als aandachtspunten

** Het zandgehalte van de klei in de graszode, omslagpunt bij 50%*

** De kwaliteit van de grasbekleding*

2.1.7 Niet waterkerende objecten

Onder niet waterkerende objecten (NWO) worden alle objecten verstaan die geen functioneel deel uitmaken van de waterkering. NWO worden in het VTV als volgt gecategoriseerd (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 399):

- | | |
|-------------------------------------|--|
| ▪ Begroeiing (bomenrijen, struiken) | ▪ Pijpleidingen en kabels |
| ▪ Bebouwing (vaak lintbebouwing) | ▪ Overige constructies (landhoofden, steigers) |

Deze NWO kunnen een invloed hebben op de stabiliteit van waterkeringen en verhoogde wegen tijdens overstromingen, doordat bijvoorbeeld plaatselijk taludbekleding is verwijderd voor het aanbrengen van kabels. In feite wordt getoetst of de aanwezigheid van niet-waterkerende objecten er toe leidt dat de score voor een waterkering 'onvoldoende' wordt. De toetsing op de invloed van NWO gebeurt dan ook nadat getoetst is op de overige faalmechanismen.

De essentie van de toetsing op de invloed van NWO in de nabijheid van grondlichamen is om te bepalen of het object in het beoordelingsprofiel van de kering staat. Dit betekent dat het object van invloed is op de weerstand tegen de faalmechanismen waarop getoetst wordt, of dat bijvoorbeeld een boom tijdens een overstroming kan bezwijken en zodoende op het grondlichaam valt. Omdat deze toetsing zeer situatie specifiek is en daardoor moeilijk geplaatst kan worden in een vereenvoudigde categorisering, wordt ervoor gekozen om de niet waterkerende objecten als fysieke eigenschap niet in acht te nemen. Dit resulteert in het volgende uitgangspunt.

Uitgangspunt 3 waterkeringen: Niet-waterkerende objecten worden niet beschouwd in het onderzoek

2.1.8 Overzicht fysieke eigenschappen en uitgangspunten waterkeringen

In deze paragraaf worden de fysieke eigenschappen en uitgangspunten, die in de bovenstaande subparagrafen naar voren zijn gekomen, nog eens samengevat. Dit overzicht van eigenschappen geeft inzicht in verschillende fysieke kenmerken van grondlichamen die van invloed zijn op het waterkerend gedrag van het grondlichaam. Wanneer een grondlichaam bepaalde fysieke eigenschappen wel of niet heeft, zal het waterkerend vermogen anders zijn. Aan de hand van het opgestelde overzicht kunnen de fysieke eigenschappen van wegen, die in de volgende paragraaf worden opgesteld, worden toegespitst op eigenschappen die daadwerkelijk van invloed zijn op het waterkerend vermogen van de weglichamen. Met de uitgevoerde analyse in deze paragraaf wordt een antwoord gegeven op deelvraag 1.1.

Deelvraag 1.1: Welke fysieke eigenschappen en vuistregels kunnen ontleend worden aan bestaande ontwerpeisen voor waterkeringen?

1. De helling van het talud;
 - * Met als referentie een buiten taludhelling van 1:2,5
 - * Bij een zandige dijk en zandig binnentalud, binnentalud flauwer dan 1:5
2. De opbouw van het grondlichaam, met een onderscheid tussen;
 - * Zandlichaam (kern)
 - * Kleilichaam (kern)
 - * Slecht doorlatende toplaag (bijvoorbeeld klei)
 - * Goed doorlatende toplaag (bijvoorbeeld zandig)
3. De opbouw van de ondergrond, met een onderscheid tussen;
 - * Slecht doorlatende ondergrond (klei) en de dikte ervan
 - * Goed doorlatende ondergrond (zand)
4. De kruinbreedte van het grondlichaam
5. Aanwezigheid van een vlak maaiveld naast het taludlichaam
6. De aanwezigheid of afwezigheid van drainage
7. De bekleding van de verhoogde weg, met als aandachtspunten;
 - * Het zandgehalte van de klei in de graszode, omslagpunt bij 50%
 - * De kwaliteit van de grasbekleding

Bij deze fysieke eigenschappen worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. Het optreden van opdrijving van het binnenland is op verhoogde wegen niet van toepassing
2. Het optreden van buitenwaartse macro-instabiliteit is op verhoogde wegen niet van toepassing
3. Niet-waterkerende objecten worden niet beschouwd in het onderzoek

2.2 Analyse van de voorschriften voor wegontwerp

Nadat in de vorige paragraaf voorschriften voor waterkeringen zijn geanalyseerd, worden in deze paragraaf voorschriften en handleidingen voor het ontwerpen van verkeerswegen geanalyseerd. Aan de hand van deze analyse worden verschillende fysieke eigenschappen van wegen opgesteld. Tevens is hiervoor een interview gehouden met een deskundige op het vakgebied wegenbouw, ir. L.J.M. Houben, verbonden aan de Technische Universiteit Delft (12 maart 2010). Wederom is constant in gedachten gehouden dat de fysieke eigenschappen van de wegen gebruikt worden voor het opstellen van een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen, die getoetst wordt op faalmechanismen. De informatie verkregen uit het interview scherpt de data uit de geanalyseerde literatuur verder aan. Vermeld moet worden dat deze paragraaf is geschreven met een zekere voorkennis en bias doordat eerst de fysieke eigenschappen van waterkeringen zijn opgesteld.

De literatuur voor verkeerswegen behandelt een breed scala van aandachtspunten voor het ontwerpen en bouwen van verkeerswegen. Dit varieert van de minimale bochtstraal voor autosnelwegen tot de toegestane verkeersintensiteit van verschillende wegtypen. Om de nadruk te leggen op fysieke eigenschappen van wegen die van invloed zijn op het waterkerend vermogen, wordt in deze paragraaf de analyse beschreven in subparagrafen aan de hand van de volgende onderverdeling:

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| ▪ Type wegen en bijbehorende breedtes | ▪ Drainage |
| ▪ Taludhellingen | ▪ Minimale drooglegging |
| ▪ Natuurlijke ondergrond | ▪ Berm- en talud bekleding |
| ▪ Opbouw van het weglichaam | |

2.2.1 Type wegen en bijbehorende breedtes

De typering van wegen in de bestudeerde literatuur wordt vooral gebaseerd op een onderscheid in de maximaal toegestane snelheid en de functie, zoals zorgen voor doorstroming of het bieden van bereikbaarheid tot woningen en bedrijven. Dit onderscheid in verschillende wegtypen resulteert ontwerptechnisch voornamelijk in hogere of afwijkende veiligheidseisen. In de onderstaande tabellen zijn de type wegen en bijbehorende minimale breedte dimensies weergegeven. De dimensies zijn gebaseerd op zowel de oude 'Richtlijnen voor het Ontwerp van (Niet) Autosnelwegen' (ROA en RONA hfst. I en III) (Tabel 1) en de huidige 'Nieuwe Ontwerprichtlijnen Autosnelwegen' (NOA) en de vier delen van het 'Handboek wegontwerp' (HW) (Tabel 2).

Tabel 1 – Typering en dimensies van wegen aan de hand van de oude voorschriften (ROA en RONA)

Categorie	Benaming	Minimale verhardingsbreedte [m]	Minimale wegberm [m]	Kantstrook [m]	Minimale totale kruin breedte [m]
I	Autosnelweg (2x2 met middenberm 6,00m)	11,50	3,00	1,25	32,50
III	Autoweg (1x2)	7,50	3,00	0,45	12,60
V	Weg met een geheel of gedeeltelijke gesloten verklaring	7,20	3,00	0,45	12,30
VI		6,00	3,00	0,2	11,60
VII	Weg voor alle verkeer	4,50	2,00	-	8,50
VIII		3,00	1,50	-	6,00

Toelichting bij Tabel 1: Bij wegcategorie I begint de wegberm waar de vluchtstrook ophoudt. De totale kruinbreedte wordt berekend door (zie Figuur 11):

Categorie I: $2 * \text{verhardingsbreedte} - 2 * \text{kantstrook} + 2 * \text{wegberm} + \text{middenberm} = \text{totale kruinbreedte}$

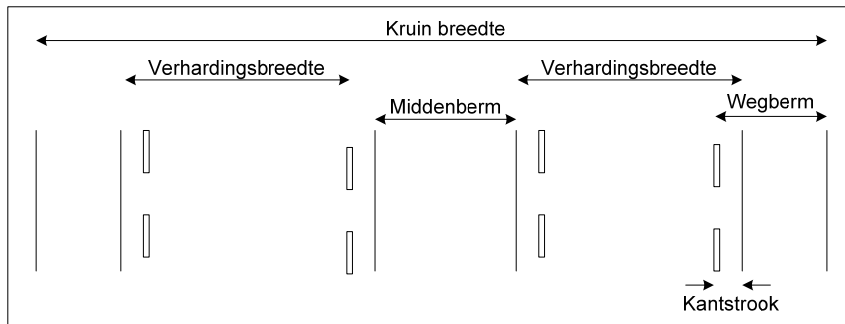
Categorie III t/m VIII: $\text{verhardingsbreedte} - 2 * \text{kantstrook} + 2 * \text{wegberm} = \text{totale kruinbreedte}$

Tabel 2 – Typering en dimensies van wegen aan de hand van de nieuwe voorschriften (NOA en HW)

Wegcategorie	Minimale verhardingsbreedte [m]	Minimale wegberm [m]	Kantstrook [m]	Minimale totale kruin breedte [m]
Nationale stroomwegen (2x3 met middenberm 6,00m)	11,00 (incl. vluchtstrook)	2,50	0,80	33,00
Regionale stroomwegen (2x1 met middenberm 3,80m)	4,60	3,50	0,80	16,80
Gebiedsontsluitingsweg type I (2x2 met middenberm 3,90m)	7,25	3,50	0,45	23,60
Gebiedsontsluitingsweg type II (2x1 geen middenberm)	7,00	3,50	0,45	13,10
Erftoegangsweg type I	6,00	2,50	-	11,00
Erftoegangsweg type II	3,50	2,50	-	8,50

Toelichting bij Tabel 2: Bij de nationale stroomwegen begint de vluchtruimte waar de verharding ophoudt, hierdoor wordt de kantstrook niet meegenomen in de breedte berekening. De totale kruinbreedte van regionale stroomwegen en gebiedsontsluitingsweg type I wordt berekend door (zie Figuur 11): $2 * \text{verhardingsbreedte} + \text{middenberm} + 2 * \text{wegberm} - 4 * \text{kantstrook} = \text{totale kruinbreedte}$

De kruinbreedte van de overige wegcategorieën wordt berekend door: $\text{Verhardingsbreedte} + 2 * \text{wegberm} - 2 * \text{kantstrook} = \text{totale kruinbreedte}$



Figuur 11 – Bovenaanzicht van een schematische verkeersweg

In de tabellen zijn enkel wegen buiten de bebouwde kom opgenomen. Hiervoor is gekozen omdat voornamelijk verhoogde wegen buiten de bebouwde kom een rol spelen tijdens overstromingen. Dit leidt tot het eerste uitgangspunt voor verhoogde wegen.

Uitgangspunt 1 wegen: In het onderzoek worden enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd

Uit de bovenstaande dimensies van de oude en nieuwe voorschriften voor wegontwerp blijkt dat de NOA en de vier delen van het HW een grotere kruinbreedte voorschrijven dan de ROA en de RONA. De ROA en RONA dateren vanaf 1986 tot 1994 terwijl het handboek wegontwerp (HW) en de NOA dateren uit 2002 en 2007. Het kanteljaar van de oude en nieuwe voorschriften ligt ongeveer 14 jaar uit elkaar. De nieuwe voorschriften zijn relatief jong waardoor ervan uit wordt gegaan dat het overgrote deel van de Nederlandse wegen gebouwd zijn aan de hand van de oude voorschriften. Daarom wordt er voor gekozen om de wegtypen te categoriseren (en bijbehorende kruinbreedtes) volgens de oude dimensies van de ROA en de RONA. Dit resulteert in de eerste fysieke eigenschap voor wegen.

Fysieke eigenschap 1 wegen: De breedte dimensies van wegen conform de ROA en RONA (zoals weergegeven in Tabel 1)

2.2.2 Taludhellingen

In zowel de oude als de nieuwe voorschriften voor wegontwerp worden taludhellingen aangegeven die, vanuit verkeersveiligheid- en onderhoudsaspect, aanbevolen worden. Voor de oude en de nieuwe richtlijnen is hiervan een overzicht weergegeven in Tabel 3 en Tabel 4.

Tabel 3 - Dimensies voor taludhellingen aan de hand van de oude voorschriften (ROA en RONA)

Categorie	Hoogte talud [m]	Afronding straal [m]	Aanbevolen taludhelling	Obstakelvrije zone [m]
I	-	≥ 9,00	1:5 of flauwer, dan valt de helling in de obstakelvrije zone	≥ 10,00
	-	≥ 9,00	1:3 – 1:5 dan de som van; breedte obstakelvrije zone op kruin + breedte onderberm ≥ 10,00m	
III en V	≤ 2,00	≥ 6,00	1:5 of flauwer, dan valt de helling in de obstakelvrije zone	Cat. III: ≥ 6,00
	≤ 2,00	≥ 6,00	1:3 – 1:5, dan moet voldaan worden aan de obstakelvrije zone voordat de helling begint	Cat V: ≥ 4,50
	> 2,00	≥ 6,00	1:3 of flauwer voor de eerste 2,00m, overige hoogte 1:2 of flauwer. Er moet voldaan worden aan de obstakelvrije zone voordat de helling begint.	
VI, VII en VIII	≤ 2,00	-	1:3 of flauwer dan obstakelvrije zone gelijk aan wegbermbreedte	Cat VI: ≥ 3,00
	> 2,00	-	1:3 of flauwer voor de eerste 2,00m, overige hoogte 1:2 of flauwer. Dan obstakelvrije zone gelijk aan wegbermbreedte	Cat VII: ≥ 2,00 Cat VIII: ≥ 1,50

Tabel 4 - Dimensies voor taludhellingen aan de hand van de nieuwe voorschriften (NOA en HW)

Wegcategorie	Aanbevolen afrondingstraal [m]	Aanbevolen taludhelling	Obstakelvrije zone [m]
Nationale en regionale stroomwegen, gebiedsontsluitingsweg type I en type II en erftoegangsweg type I en type II	< 9,00	1:6 of flauwer dan geen obstakel	120 km/h : $\geq 13,00$ 100 km/h : $\geq 10,00$
	$\geq 9,00$	1:3 of flauwer dan geen obstakel	80 km/h : $\geq 6,00$ 60 km/h : $\geq 4,50$

Toelichting bij Tabel 3 en Tabel 4: Voor elke wegcategorie geldt dat wanneer de helling steiler is dan 1:3 en/of de afrondingsstraal niet voldoet, de helling als gevarenzone wordt aangemerkt. In dat geval wordt het talud aangemerkt als obstakel, waardoor de wegberm (op het talud) breder moet zijn om aan de dimensies van obstakelvrije zone te voldoen. Deze situatie is onwaarschijnlijk in de praktijk, omdat hierdoor de breedte van het talud vele malen groter moet worden, wat veel geld kost. Terwijl er ook een bermbeveiligingsconstructie kan worden aangebracht.

Opgemerkt moet worden dat de waarden in de tabellen *aanbevolen* waarden zijn, hier kan van afgeweken worden. Wanneer bijvoorbeeld voor een steilere taludhelling wordt gekozen, dan is dat mogelijk. Dit heeft echter ontwerpconsequenties. Het uitgangspunt is dat er een veilige situatie wordt geconstrueerd, zodat wanneer een voertuig van de weg afraakt de gevolgen worden verkleind. Dit betekent dat er op het talud gekozen kan worden tussen een obstakelvrije zone of een bermbeveiligingsconstructie (bijvoorbeeld een vangrail). Een bermbeveiligingsconstructie is een constructie ter afscherming van een gevarenzone of ter beperking van de risico's daarin. De obstakelvrije zone is het gebied langs het deel van de verkeersbaan waarin geen obstakels mogen voorkomen (bij autosnelwegen valt de vluchtstrook hier ook onder). In Tabel 3 en Tabel 4 staat aangegeven wanneer een taludhelling binnen de obstakelvrije zone valt en hoe groot de obstakelvrije zone moet zijn. Wanneer op voorhand kan worden vastgesteld dat 'obstakels' binnen de obstakelvrije zone onvermijdbaar zijn en er een bermbeveiligingsconstructie moet worden aangebracht, is het niet nodig om uit te gaan van de obstakelvrije zone (Rijkswaterstaat, 2007, p. 7.42). In dat geval hoeven de aanbevolen waarden voor de taludhellingen niet te worden gehanteerd en zal worden gekozen voor het financieel meest efficiënte ontwerp.

Houben geeft aan dat veel wegen ontworpen zijn volgens oudere normen, in deze normen was een taludhelling van 1:1,5 een normale waarde. Tegenwoordig zijn deze hellingen, zoals te zien is in de tabellen, rond de 1:3. Het is echter aannemelijk dat veel wegen, zeker met een bermbeveiligingsconstructie, gebouwd zijn met een taludhelling van 1:1,5. Voornamelijk ook omdat deze taludhelling vanuit geotechnisch perspectief voldoende is. Tevens geeft Houben aan dat wegen in het rivierengebied overwegend een helling van 1:1,5 zullen hebben, aangezien de wegen daar al langere tijd liggen.

Aan de hand van de expertise van Houben en de bovenstaande beschrijving kan een uitspraak worden gedaan over de te verwachten taludhelling van verkeerswegen. Dit kan namelijk gekoppeld worden aan de wijze waarop het verkeer op wegen wordt beschermd tijdens een calamiteit:

- Door toepassing van een obstakelvrije zone
- Door toepassing van bermbeveiligingsconstructies (vangrails e.d.)

Verwacht wordt dat verhoogde wegen met een taludhelling van 1:1,5 beschikken over een bermbeveiligingsconstructie. Indien de wegen dat niet hebben, zal de taludhelling flauwer zijn, ten minste 1:3. De fysieke eigenschappen van het talud, van belang voor het waterkerend vermogen, die hiervan afgeleid worden zijn als volgt.

Fysieke eigenschap 2 wegen: De helling van het talud van de verhoogde weg;

** Bij aanwezigheid van de obstakelvrije zone, een taludhelling van minimaal 1:3*

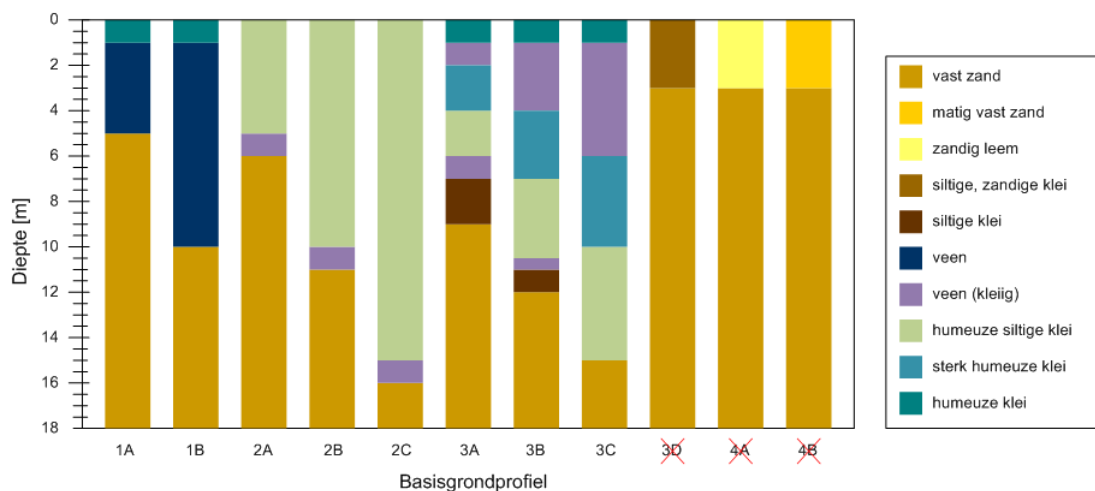
** Bij aanwezigheid van bermbeveiligingsconstructies, een taludhelling van 1:1,5*

2.2.3 Natuurlijke ondergrond

De bodemgesteldheid in Nederland is divers. Voor het ontwerpen van wegen is deze variabele van grote invloed. Duidelijke fysieke eigenschappen van de natuurlijke ondergrond voor het opstellen van een vereenvoudigde categorisering zijn niet eenvoudig af te leiden. De 'Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Onderbouw, deel 1 Algemeen' richt zich op het gebied van de geotechniek en geeft aan dat geotechnische aspecten reeds een rol spelen op het moment dat een wegverbinding in studie wordt genomen (Rijkswaterstaat, 1991). De natuurlijke ondergrond vormt de basis voor de stabiliteit van het weglichaam en is van grote invloed op zettingen van het weglichaam en het wegdek. In de 'ROA; hoofdstuk I Basiscriteria' worden in hoofdzak drie soorten grond in Nederland onderscheiden (Rijkswaterstaat, 1993, p. 214)

- Zand, onsamenhangend, goed doorlatend, weinig samendrukbaar
- Klei en leem, samenhangend, slecht doorlatend, sterk samendrukbaar
- Veen als klei, doch hoofdzakelijk organische bestanddelen bevattend

Voor de fysieke eigenschappen van wegen is een uitgebreider overzicht nodig. In het 'Keuzemodel wegconstructies' van het kenniscentrum voor verkeer, vervoer en infrastructuur wordt gebruik gemaakt van elf basisgrondprofielen (CROW, 2005, p. 17). In Figuur 12 zijn deze basisgrondprofielen weergegeven. De grondprofielen geven de laagopbouw weer die in Nederland verwacht kan worden.



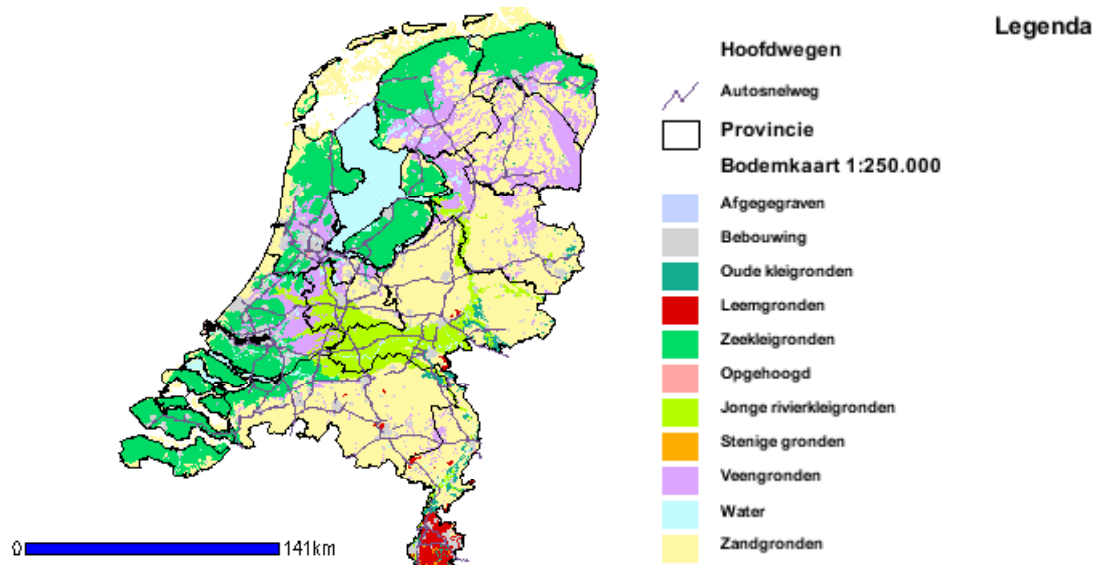
Figuur 12 – Basisgrondprofielen voor de natuurlijke ondergrond

De basisgrondprofielen zijn ondergebracht in vier hoofdgebieden, die in het vervolg van het onderzoek aangegeven zullen worden als type grondprofiel 1, 2, 3 en 4:

- | | |
|------------------|---|
| 1. Veengebied | 3. Rivierkleigebied |
| 2. Zeekleigebied | 4. Gebieden met een betere grondslag ² |

Aan de hand van bodemkaarten is het mogelijk om globaal een keuze te maken welk basisgrondprofiel in welk deel van Nederland van toepassing is. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van bijvoorbeeld de website bodemdata.nl, waarop een gedetailleerde bodemkaart beschikbaar is van Nederland, zoals weergegeven in Figuur 13 (Alterra Wageningen, 2010).

² Onder gebieden met een betere grondslag worden gebieden verstaan waar de grond een hogere draagkracht heeft.



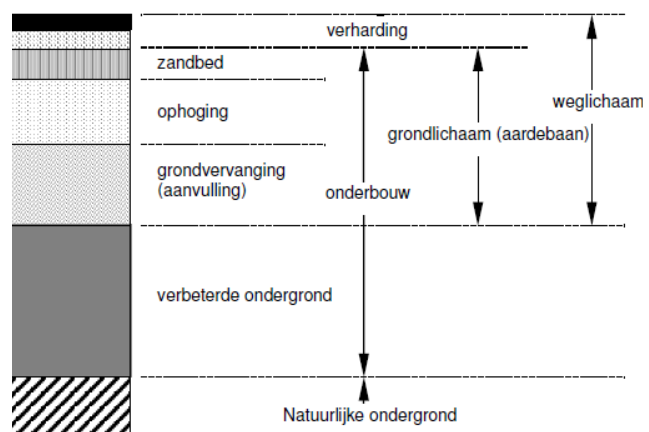
Figuur 13 - Bodemkaart Nederland (Alterra Wageningen, 2010)

De elf basisgrondprofielen kunnen gebruikt worden als veralgemeniseerd overzicht voor de natuurlijke ondergrond. Als echter goed de kaart in Figuur 13 wordt beschouwd, dan kan gesteld worden dat niet alle grondprofielen van toepassing zijn voor gebieden waar een overstromingcalamiteit kan optreden. Uit het overzicht van de basisgrondprofielen worden profiel type 3D, 4A en 4B verwacht in gebieden die hoger gelegen zijn dan de riviergebieden die te maken kunnen krijgen met overstromingen (binnen het kader van dit onderzoek). Deze drie profielen worden daarom niet opgenomen als fysieke eigenschap voor de ondergrond, de eerste acht basisgrondprofielen wel. Kortweg resulteert dit in de volgende fysieke eigenschap.

Fysieke eigenschap 3 wegen: De natuurlijke ondergrond van wegen, met een variatie in laagopbouw aan de hand van de eerste acht basisgrondprofielen in Figuur 12

2.2.4 Typen opbouw van het weglichaam

De opbouw van de onderbouw van wegconstructies is van belang voor de kracht afdracht van voertuigen op het wegdek. Een goede onderbouw minimaliseert zettingen en onregelmatige vervormingen tijdens het gebruik van wegen. De opbouw van het grondlichaam van wegen wordt door verschillende documenten geschematiseerd zoals weergegeven in Figuur 14. De onderbouw bestaat nagenoeg altijd tenminste uit een zandbed. Bij een hoge ligging van de weg kunnen zich onder dit zandbed een ophoging, een grondvervanging (aanvulling) en/of een verbeterde ondergrond bevinden. De verbeterde ondergrond bestaat uit een op kunstmatige wijze verbeterde natuurlijke ondergrond, bijvoorbeeld door verticale drainage of voorbelasting. Door een dergelijke verbetering kunnen zettingen worden verminderd en/of versneld en kan de stabiliteit van de ondergrond worden verbeterd.



Figuur 14 - Opbouw van de onderbouw van een wegconstructie (Rijkswaterstaat, 1998, p. 2.6)

Het gedeelte 'grondvervanging' in het weglichaam bevindt zich tussen het zandbed en/of de ophoging en de natuurlijke ondergrond. Grondvervanging is voornamelijk bedoeld voor het compenseren van zettingen in

gebieden met een zeer slechte, instabiele ondergrond. De ophoging is nodig om het gewenste alignement te verkrijgen. Hiervoor zal gebruik worden gemaakt van zand, het gebruik van klei of leem is uit te sluiten omdat deze grondsoorten teveel last hebben van zettingen. Het zandbed bevindt zich onder de verhardingconstructie en zorgt voor de stijfheid en het draagvermogen van de constructie. In het geval van een hoge grondwaterstand kan in het zandbed een draineerlaag van 'draineerzand' of 'ongebonden steen of steenachtig materiaal' worden toegepast. De onderbouw bestaat tenminste altijd uit een zandbed.

De verharding bestaat uit een fundering en een deklaag. De deklaag bestaat in principe uit een asfaltverharding of een cement-betonverharding (Rijkswaterstaat, 1998). Voor dit onderzoek wordt geen onderscheid gemaakt in het type deklaag. Doordat er altijd een zandbed aanwezig moet zijn in het weglichaam wordt uitgegaan van het volgende uitgangspunt.

Uitgangspunt 2 wegen: De kern van het grondlichaam bestaat uit zandachtig materiaal, een kleikern is zeer onwaarschijnlijk en wordt zodoende uitgesloten

De grondlichamen van verhoogde wegen kunnen in principe twee constructies hebben om de gevolgen van zettingen te voorkomen (CROW, 2002, p. 102);

- vast gefundeerd (bijv. funderen op palen),
- flexibel gefundeerd, aangelegd op of gedeeltelijk in slappe lagen (er is sprake van zetting, beperking hiervan door bijv. voorbelasting of lichtgewicht materialen zoals EPS-schuim).

Met beide constructietypen zijn veel combinaties mogelijk, waardoor de situatie specifieke opbouw van het weglichaam van wegconstructies sterk kan variëren. Houben geeft aan dat er slechts in uiterste gevallen vast gefundeerd zal worden, omdat dit zeer hoge kosten met zich meebrengt. Bijvoorbeeld veengronden kunnen deze methode vereisen, omdat ze slecht draagkrachtig zijn. De natuurlijke ondergrond heeft dan ook een invloed op de constructie van het grondlichaam. Voor de constructie van het grondlichaam worden in de 'Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Onderbouw, Product-methodenbladen' vijftien verschillende bouwmethoden voor wegen op slappe ondergrond gepresenteerd. De 'Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Onderbouw, Deel 1 Algemeen' haalt zes constructie typen aan, die gecombineerd kunnen worden met overige constructie technieken zoals verticale drainage en het gebruik van lichte materialen. Het 'Keuzemodel wegconstructies' van CROW voorziet in twaalf ophogetechnieken. Voor alle drie de documenten zijn de constructietypen weergegeven in appendix D.

Houben verwoordt dat veel van deze opties slechts in zeer extreme gevallen worden toegepast. De reguliere constructie van het grondlichaam bestaat uit een zandbed dat direct op de aanwezige ondergrond wordt geplaatst (op het maaiveld), waarbij de natuurlijke ondergrond wordt verbeterd door middel van verticale drainage. Enkel wanneer de natuurlijke ondergrond van zeer slechte kwaliteit is, wordt er gekozen voor een ingegraven zandcunet (diepe grondvervanging) of voor lichtgewicht ophoogmaterialen. Rondom het rivierengebied zal voornamelijk sprake zijn van kleigronden, waarvoor speciale constructietypen niet nodig zijn. De constructietypen zandcunet en lichtgewicht ophoogmaterialen worden daarom uitgesloten voor dit onderzoek.

Constructietypen waarbij gebruikt wordt gemaakt van verticale drainage, zandschermen en tijdelijke ophoging richten zich op het verbeteren van de natuurlijke ondergrond. De verticale drainage en tijdelijke ophoging worden namelijk toegepast in- en op de natuurlijke ondergrond om zettingen te versnellen, bijvoorbeeld bij kleigronden. Deze grondverbetering heeft geen invloed op het weglichaam maar enkel op het zettingproces

van de natuurlijke ondergrond. In het 'Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies' wordt zelfs aangegeven dat met grondverbetering door verticale drainage over het algemeen een grotere stabiliteit van de definitieve constructie wordt verkregen (TAW, 2001, p. 25).

Als fysieke eigenschap voor het weglichaam van verhoogde wegen wordt gekozen voor het eenvoudige constructietype, waarbij er sprake is van een zandbed (zandophoging) op het maaiveld. Zoals verwoord worden de andere constructietypen enkel in specifieke gevallen toegepast, daarom zijn ze niet bruikbaar voor een veralgemeniseerd profiel. Houben benadrukt hierbij dat vrijwel alle wegen volgens dit constructietype worden gebouwd. Dit resulteert in de volgende fysieke eigenschap van wegen.

Fysieke eigenschap 4 wegen: De opbouw van het weglichaam;

** Waarbij uitgegaan wordt van een zandbed (zandophoging) direct op het maaiveld*

2.2.5 Drainage

Drainage wordt beschouwd als een van de belangrijkste aspecten van het ontwerpen van wegen. Door de juiste drainage kan schade door vocht worden voorkomen. Water en vocht kunnen de wegconstructie binnendringen door infiltratie via de wegverharding, via de berm en het grondwater. Het schadelijke effect hiervan is dat het zandbed en de ondergrond worden verzwakt of dat er transport van fijne gronddeeltjes plaatsvindt wat resulteert in verlies van draagkracht. Tijdens een overstroming en daarmee de belasting van het weglichaam met water zullen deze aspecten ook aan de orde zijn.

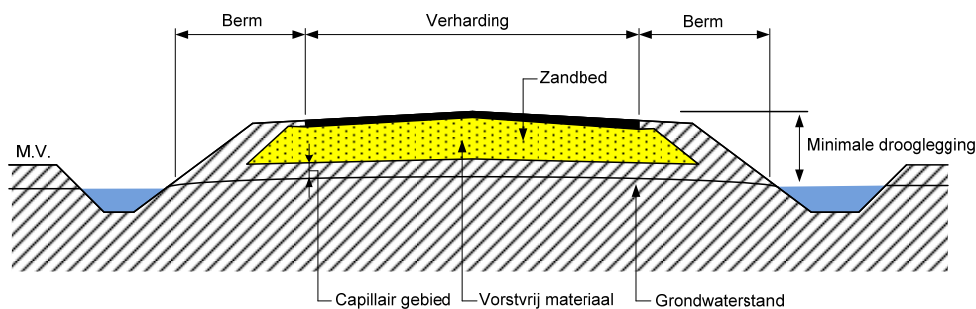
Om de gevolgen van waterinfiltratie te voorkomen wordt horizontale drainage in het weglichaam toegepast. Drainage wordt bij vrijwel alle wegen in Nederland toegepast, enkel bij kleine, oude landwegen kan dat afwijken. De horizontale drainage bestaat uit een goed doorlatende zandlaag, ook wel drainzandlaag genoemd, of in beperkte gevallen uit kunststof vervaardigde buizen. De drainzandlaag wordt gecreëerd door de natuurlijke ondergrond onder een afschot aan te leggen, waarna water door het goed doorlatende zandbed eenvoudig naar de buitenzijden van het weglichaam kan wegvloeien. In dit onderzoek worden de drainzandlaag en kunststof drainage beide verwoord onder 'drainage'.

De drainage in wegen kan tijdens een overstroming verschillende effecten met zich meebrengen. Zo kan de drainage, die naar beide zijden van het talud loopt, als gevolg hebben dat het overstromingswater van de buiten naar de binnenzijde van het talud uitstroomt, waardoor het gebied achter een verhoogde weg onderloopt zonder dat het weglichaam bezwijkt. Knoeff (2003, p. 36) toont in fase 5.1: 'Toetsen waterkerend vermogen van (spoor)wegen en slaperdijken' aan dat de toepassing van horizontale drainage in een weglichaam slechts zorgt voor een gering uitstroomdebiet naar de achterliggende polder. Dit gevaar wordt met zijn resultaten ondervangen. Wel is het zeer aannemelijk dat de drainage al zijn capaciteit kwijt raakt aan het afwateren van het overstromingswater van de buiten naar de binnentalud zijde (Van³, 2010). Hierdoor zal de drainage geen capaciteit over hebben om het weglichaam zelf te draineren, waardoor het freatisch vlak in het weglichaam verhoogd wordt. Het feit dat er in vrijwel alle wegen in Nederland drainage aanwezig is, blijft daarmee wel van kracht. Echter, aangezien de functie van de drainage verloren gaat tijdens een overstroming, wordt deze fysieke eigenschap van verhoogde wegen niet beschouwd.

³ Uit een interview met M. Van (29 april 2010), deskundige op het gebied van dijken, werkzaam bij Deltares.

2.2.6 Minimale drooglegging

In de vorige paragraaf is besproken dat vocht en water in een weglichaam de sterkte en stabiliteit kunnen aantasten. Dit kan mede worden veroorzaakt door het binnentreden van grondwater en vorstindringing. Om dit te voorkomen, moet een weg bij het ontwerp voldoen aan een minimale drooglegging en vorstvrije diepte. In het 'Handboek Wegontwerp – basiscriteria' wordt voor de vorstvrije diepte een indicatie van 0,6m boven de capillaire zone gegeven. Verder wordt er in het handboek een capillaire opstijging van water in zand van ongeveer 0,3m tot 0,5m aangenomen. Er is daarom globaal een afstand vanaf de verharding van 0,9m tot 1,1m tot de grondwaterspiegel nodig. Dit is de waarde voor de minimale drooglegging (CROW, 2002, p. 106). De 'Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Verhardingen' stelt echter dat gemiddeld vanaf de bovenkant van de verharding moet worden gerekend met een vorstindringingsdiepte van 0,7m tot 0,8m. Voor de capillaire stijging in zand wordt gemiddeld 0,5m à 0,6m gehanteerd. In dit geval is er tussen de bovenzijde van de verharding en de grondwaterspiegel (of de bovenzijde van een slappe ondergrond die vaak geheel is verzadigd met water) een drooglegging noodzakelijk van 1,2m tot 1,4m (zie Figuur 15 voor een visuele weergave). Gezien de spreiding in capillaire stijghoogte moet de drooglegging echter per situatie nader worden vastgesteld (Rijkswaterstaat, 1998, p. 2.9).



Figuur 15 - Dwarsdoorsnede weglichaam, minimale drooglegging

De waarden voor de vorstindringingsdiepte en capillaire stijghoogte zijn in de praktijk de enige harde gegevens die de hoogte van wegen bepalen. Het gevolg van de minimale drooglegging voor de fysieke eigenschappen van weglichamen is dat de minimale kruinhoogte van het weglichaam voorspeld kan worden aan de hand van de lokale grondwaterstand. In gebieden met een lage grondwaterstand, zoals in het oosten van Nederland, zal de minimale kruinhoogte van wegen laag zijn. Bij een grondwaterstand van bijvoorbeeld $-1,0\text{m}$ zal de kruinhoogte minimaal 0,2m tot 0,4m boven het maaiveld liggen. In het uiterste geval (constructietechnisch) zal de kruinhoogte van een weglichaam minimaal 0,9m tot 1,4m boven het maaiveld liggen. In deze situatie is de grondwaterstand gelijk aan het maaiveld. Dit betekent dat enkel *andere* eisen dan constructietechnische-eisen tot een hogere kruinhoogte zullen leiden. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij de aanpassingen die nodig zijn in het baanalignement of bij opritten van viaducten. Indien een hogere kruinhoogte niet nodig is, zal dit vanuit financieel oogpunt ook niet worden toegepast, ophogen kost namelijk veel geld.

Op basis van de vorstindringingsdiepte en minimale drooglegging leidt dit tot het volgende uitgangspunt.

Uitgangspunt 3 wegen: Een kruinhoogte $> 1,4\text{m}$ ten opzichte van het maaiveld is vanuit constructietechnisch oogpunt niet waarschijnlijk

2.2.7 Berm- en taludbekleding

De bekleding van aardebanen van wegen heeft voornamelijk twee functies. Allereerst zorgt de bekleding van aardebanen ervoor dat het verstuiwen van zand wordt voorkomen en begroeiing op het talud wordt

bevorderd. Ten tweede zorgt de bekleding en bekledingsgrond ervoor dat inwateren wordt voorkomen, waardoor anders verweking en erosie van het weglichaam kan ontstaan. Voor de bekledingsgrond wordt vaak grond gebruikt die vrijkomt tijdens de aanleg van de wegen, ook wel teelaarde genoemd. De dikte van deze laag bekledingsgrond is ongeveer 0,5m (STOWA, 2007, p. 90). Aan de bekledingsgrond worden echter geen specifieke eisen gesteld met betrekking tot erosiebestendigheid of dergelijke (in tegenstelling tot waterkeringen). Om inwateren van bijvoorbeeld regenwater te voorkomen wordt er voor de bermafdekking wel vaak een gering doorlatend materiaal gebruikt. Voor verhoogde wegen in het rivierengebied zal de bekleding voornamelijk bestaan uit lokaal aanwezige kleigronden.

Zoals te zien in Figuur 15, moeten de bermbekleding en het zandbed los van elkaar worden gezien. Dit betekent dat de kern van het weglichaam altijd een zandbed zal hebben, terwijl de berm en het talud vaak bestaan uit lokaal aanwezige grond. De berm en het talud van wegen zijn vrijwel altijd voorzien van een grasbekleding, waarbij opgemerkt moet worden dat het beheer van de grasbekleding niet gericht is op het verkrijgen van een sterke graszode. De mogelijke aanwezigheid van kale plekken en aantasting door dieren is groot. De 'Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen' haalt aan dat grasbekledingen van aardebannen van wegen een matig tot slechte erosiebestendigheid hebben (STOWA, 2007, p. 108). Dit is van invloed op het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. De genoemde kenmerken van de berm- en taludbekleding van wegen resulteren in de volgende fysieke eigenschap.

Fysieke eigenschap 5 wegen: De berm- en taludbekleding van wegen, met als kenmerken;

- * Bestaan overwegend uit lokaal aanwezige grond*
- * Bestaan in het rivierengebied uit een slecht doorlatende laag*
- * Heeft overwegend een grasbekleding, met matig tot slechte erosiebestendigheid*

2.2.8 Overzicht fysieke eigenschappen en uitgangspunten wegen

In deze paragraaf worden de fysieke eigenschappen en uitgangspunten die in de bovenstaande subparagrafen naar voren zijn gekomen, nog eens samengevat. De selectie van deze eigenschappen van wegen is gemaakt om inzicht te krijgen in fysieke kenmerken van verhoogde wegen, waarbij nog niet is toegespitst op eigenschappen die daadwerkelijk van belang zijn voor het waterkerend vermogen van wegen. Het onderstaande overzicht van de fysieke eigenschappen wordt in paragraaf 2.3 naast de fysieke eigenschappen gelegd die zijn afgeleid van waterkeringen. Door deze confrontatie kunnen de opgestelde fysieke eigenschappen die niet van belang zijn voor het waterkerend vermogen worden verwijderd. Met de samenvatting van de fysieke eigenschappen die in deze paragraaf naar voren zijn gekomen, wordt een antwoord gegeven op deelvraag 1.2.

Deelvraag 1.2: Welke fysieke eigenschappen kunnen opgesteld worden uit voorschriften voor wegontwerp om een categorisering in het waterkerend vermogen van verhoogde wegen te schetsen?

De van belang zijnde fysieke eigenschappen van wegen, afgeleid van voorschriften en ontwerphandleidingen voor verkeerswegen zijn:

1. De breedte dimensies van wegen conform de ROA en RONA (zoals weergegeven in Tabel 1)
2. De helling van het talud van de verhoogde weg;
 - * Bij aanwezigheid van de obstakelvrije zone, een taludhelling van minimaal 1:3
 - * Bij aanwezigheid van bermbeveiligingsconstructies, een taludhelling van 1:1,5
3. De natuurlijke ondergrond van wegen, met een variatie in laagopbouw aan de hand van de eerste acht basisgrondprofielen in Figuur 12

4. De opbouw van het weglichaam;
 - * Waarbij uitgegaan wordt van een zandbed (zandophoging) direct op het maaiveld
5. De berm- en taludbekleding van wegen, met als kenmerken;
 - * Bestaan overwegend uit lokaal aanwezige grond
 - * Bestaan in het rivierengebied uit een slecht doorlatende laag
 - * Heeft overwegend een grasbekleding, met matig tot slechte erosiebestendigheid

Bij het afleiden van deze fysieke eigenschappen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. In het onderzoek worden enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd
2. De kern van het grondlichaam bestaat uit zandachtig materiaal, een kleikern is zeer onwaarschijnlijk en wordt zodoende uitgesloten
3. Een kruinhoogte $> 1,4\text{m}$ ten opzichte van het maaiveld is vanuit constructietechnisch oogpunt niet waarschijnlijk

2.3 Confrontatie fysieke eigenschappen

In de vorige paragrafen 2.1 en 2.2 zijn aan de hand van de analyse van voorschriften voor waterkeringen en wegenbouw verschillende fysieke eigenschappen afgeleid die kenmerkend zijn voor waterkeringen en wegen. De fysieke eigenschappen van waterkeringen geven inzicht in eigenschappen van een grondlichaam die van belang zijn voor het waterkerend vermogen. Grondlichamen die verschillen in deze fysieke eigenschappen zullen bij belasting met water anders reageren. Het overzicht van de fysieke eigenschappen van wegen geeft inzicht in algemene kenmerken van wegen. In deze paragraaf worden de fysieke eigenschappen van waterkeringen naast de fysieke eigenschappen van wegen gelegd, zodat de fysieke eigenschappen van wegen aangescherpt kunnen worden op eigenschappen die daadwerkelijk van belang zijn voor het waterkerend vermogen van een weglichaam. Het resultaat hiervan is een lijst met fysieke eigenschappen die daadwerkelijk van belang zijn voor het waterkerend vermogen van de weg. Hiermee wordt een overzicht van criteria voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen gegenereerd.

De confrontatie van de fysieke eigenschappen wordt besproken in vier subparagrafen waarin fysieke eigenschappen van wegen en waterkeringen die zich op hetzelfde - of een overlappend gebied richten worden beschouwd. Deze vier subparagrafen richten zich op de volgende centrale fysieke eigenschappen:

- | | |
|-------------------------------|--|
| ▪ Taludhelling | ▪ Opbouw van de natuurlijke ondergrond |
| ▪ Opbouw van het grondlichaam | ▪ Kruinbreedte |

Bij deze confrontatie worden alle fysieke eigenschappen van waterkeringen en wegen in acht genomen, zoals ze ook staan vermeld in subparagraaf 2.1.8 en 2.2.8. Wanneer er ook uitgangspunten op de fysieke eigenschappen van toepassing zijn, dan worden deze gebruikt in de confrontatie. Bij elke subparagraaf worden allereerst de fysieke eigenschappen en uitgangspunten vermeld die van toepassing zijn op de centrale fysieke eigenschap. Vervolgens wordt voor het aanscherpen van de fysieke eigenschappen van wegen toegelicht welke afwegingen zijn gemaakt. Bij deze confrontatie staan de verhoogde wegen centraal, deze fysieke eigenschappen worden aangescherpt met behulp van de eigenschappen van waterkeringen. Elke paragraaf wordt afgesloten met een weergave van de aangepaste fysieke eigenschappen.

Taludhelling

De afgeleide fysieke eigenschappen van toepassing op de helling van het talud zijn weergegeven in de tekstvakken. De waarde van de referentiehelling voor waterkeringen houdt in dat bij deze helling, of flauwer, de toetsing op de faalmechanismen positief uitvalt (een betere stabiliteit).

Fysieke eigenschappen wegen

- * Bij een obstakelvrije zone minimaal 1:3
- * Bij bermbeveiligingsconstructies 1:1,5

Fysieke eigenschappen waterkeringen

- * Een buitentalud referentiehelling van 1:2,5
- * Bij een zandige dijk en zandig binnentalud, binnentalud flauwer dan 1:5

De fysieke eigenschappen voor de taludhelling onderscheiden zich door een referentiehelling van 1:2,5 of 1:5 en 1:3 of 1:1,5. Een taludhelling van 1:5 is voor verhoogde wegen zeer onwaarschijnlijk en vervalt daarmee. De referentiehelling voor het buitentalud van waterkeringen betreft 1:2,5 of *flauwer*, zoals besproken in subparagraaf 2.1.1. Daarom wordt er gekozen voor een referentiehelling van 1:3 als fysieke eigenschap voor de helling van het talud bij een obstakelvrije zone. Wanneer er bermbeveiligingsconstructies aanwezig zijn, wordt uitgegaan van een taludhelling van 1:1,5.

Fysieke eigenschappen voor de helling van het talud;

- * Een taludhelling van 1:3 of flauwer indien er geen bermbeveiligingsconstructies aanwezig zijn
- * Een taludhelling van 1:1,5 indien er wel bermbeveiligingsconstructies aanwezig zijn

Opbouw van het grondlichaam

De afgeleide fysieke eigenschappen en uitgangspunten van toepassing op de opbouw van het grondlichaam zijn weergegeven in de tekstvakken.

Fysieke eigenschappen wegen

- * Een zandbed (zandophoging) direct op het maaiveld

De berm en taludbekleding;

- * Bekleding bestaat overwegend uit lokaal aanwezige grond
- * Bekleding bestaat in het rivierengebied uit een slecht doorlatende laag
- * Heeft overwegend een grasbekleding, met matig tot slechte erosiebestendigheid

Uitgangspunt wegen

- * De kern van het grondlichaam bestaat uit zandachtig materiaal, een kleikern is zeer onwaarschijnlijk en wordt zodoende uitgesloten

Fysieke eigenschappen waterkeringen

- * Zandlichaam (kern)
- * Kleilichaam (kern)
- * Slecht doorlatende toplaag (bijv. klei)
- * Goed doorlatende toplaag (bijv. zand)
- * De aanwezigheid of afwezigheid van drainage

De bekleding;

- * Het zandgehalte van de klei in de graszode, met een omslagpunt bij 50%
- * De kwaliteit van de grasbekleding

Allereerst kan de fysieke eigenschap 'zandlichaam (kern)' worden verwijderd, aangezien de lading hiervan wordt gedekt door de fysieke eigenschap van het grondlichaam van wegen; een zandbed direct op het

maaiveld. Verder kan de fysieke eigenschap 'kleilichaam (kern)' worden weggehaald, omdat bij wegen de kern van het grondlichaam bestaat uit een zandachtig materiaal, een kleikern wordt uitgesloten.

De fysieke eigenschappen voor de goed- en slecht doorlatende top laag, afgeleid van de voorschriften voor waterkeringen, hebben betrekking op de fysieke eigenschap van wegen dat de taludbekleding bestaat uit lokaal aanwezige grond. In het rivierengebied zal dit voornamelijk een slecht doorlatende top laag zijn, die veel klei bevat. In de praktijk zal het moeilijk zijn om in te schatten of de taludbekleding goed of slecht doorlatend is. Wel wordt er verwacht dat er lokaal aanwezige grond als taludbekleding is toegepast. Daarom wordt ervoor gekozen om als fysieke eigenschap voor de taludbekleding de lokaal aanwezige grond aan te houden. De lokaal aanwezige grond komt daarbij overeen met de bovenste grond laag van de basisgrondprofielen van de natuurlijke ondergrond. Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen de bovenste grond laag van grondprofiel type 1 en 3 of type 2. In de taludbekleding wordt gevarieerd met twee grondsoorten. De fysieke eigenschap voor waterkeringen, die een onderscheid maakt in het zandgehalte van de klei in de graszode, wordt door de lokaal aanwezige grond als taludbekleding ondervangen.

De fysieke eigenschappen voor de berm- en taludbekleding van wegen geven aan dat verhoogde wegen doorgaans een grasbekleding hebben, die dient als bescherming voor het onderliggende zandlichaam. De kwaliteit van de grasbekleding is voor het toetsen van waterkeringen van belang, dit bepaalt namelijk de mate van erosiebestendigheid van het talud bij belasting met water. De fysieke eigenschappen van wegen geven weer dat de grasbekleding op weglichamen overwegend een matig tot slechte erosiebestendigheid hebben. Ter veralgemenisering wordt dit omgezet in een uitgangspunt voor de berm- en taludbekleding van wegen; er wordt in het onderzoek uitgegaan van gras als taludbekleding van verhoogde wegen, met een matig tot slechte erosiebestendigheid.

De fysieke eigenschap van waterkeringen met betrekking tot drainage komt te vervallen. Verhoogde wegen hebben wel een goede drainage, maar tijdens een overstroming wordt de capaciteit van deze drainage volledig ingenomen door overstromingswater dat van de buitentalud zijde naar binnentalud zijde stroomt. Het aangepaste overzicht van de fysieke eigenschappen voor de opbouw van het grondlichaam is als volgt:

Fysieke eigenschappen voor de opbouw van het grondlichaam, met een onderscheid tussen;

- * Een zandbed (zandophoging) direct op het maaiveld
- * De taludbekleding die bestaat uit lokaal aanwezige grond, gelijk aan grondprofiel type 1/3 of type 2

Uitgangspunt voor de opbouw van het grondlichaam:

- * De kern van het grondlichaam bestaat uit zandachtig materiaal, een kleikern wordt uitgesloten
- * In het onderzoek wordt uitgegaan van gras als taludbekleding voor verhoogde wegen in Nederland, met een matig tot slechte erosiebestendigheid

Opbouw van de natuurlijke ondergrond

De afgeleide fysieke eigenschappen en uitgangspunten van toepassing op de opbouw van de (natuurlijke) ondergrond zijn weergegeven in de tekstvakken.

Fysieke eigenschappen wegen

- * De eerste 8 basisgrondprofielen, weergegeven in Figuur 12

Fysieke eigenschappen waterkeringen

- * Slecht doorlatende ondergrond (klei) en de dikte ervan
- * Goed doorlatende ondergrond (zand)

Uit beide overzichten van fysieke eigenschappen komt naar voren dat de voorschriften voor waterkeringen een minder gedetailleerde beschrijving geven van de opbouw van de ondergrond dan de voorschriften over wegen. Dit komt voornamelijk doordat de eenvoudige toetsing in het VTV is beschouwd. Deze eenvoudige toetsing gaat uit van een vereenvoudigde grondopbouw, die enkel een onderscheid maakt tussen een goed- en slecht doorlatende ondergrond. In het overzicht van de basisgrondprofielen (subparagraaf 2.2.3) wordt een veel bredere variatie aan natuurlijke ondergrond gepresenteerd, tot een diepte van 18m. Dit varieert van slecht tot goed doorlatende lagen, waarbij de dikte van de lagen is aangegeven. Aangezien dit samenhangt met het onderscheid tussen een goed- en slecht doorlatende ondergrond, wordt ervoor gekozen om deze basisgrondprofielen te gebruiken als de fysieke eigenschappen voor de opbouw van de ondergrond.

Fysieke eigenschappen voor de opbouw van de ondergrond, met een onderscheid tussen;

- * De eerste 8 basisgrondprofielen, zoals weergegeven in Figuur 12 op pagina 20

Kruinbreedte

De afgeleide fysieke eigenschappen en uitgangspunten van toepassing op de kruinbreedte zijn weergegeven in de tekstvakken.

Fysieke eigenschappen wegen

- * De breedte dimensies van wegen conform de ROA en RONA

Fysieke eigenschappen waterkeringen

- * De kruinbreedte van het grondlichaam
- * Aanwezigheid vlak maaiveld naast het talud

Uitgangspunt wegen

- * In het onderzoek worden enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd

Uitgangspunt waterkeringen

- * Niet-waterkerende objecten worden niet beschouwd in het onderzoek

De fysieke eigenschap om een vlak maaiveld naast het talud te hebben, heeft betrekking op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. De afmetingen van dit vlakke maaiveld naast het talud zijn klein, afhankelijk van de dimensies van het talud tot ongeveer 10,0m breed. Aan de hand van de uitgangspunten weergegeven in de tekstvakken, wordt ervoor gekozen om deze fysieke eigenschap niet verder te betrekken als criteria voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering. Hiervoor wordt gekozen omdat niet-waterkerende objecten buiten beschouwing worden gelaten, waardoor er geen objecten direct naast het grondlichaam zullen liggen. Verder worden enkel wegen buiten de bebouwde kom betrokken in het onderzoek. Daarom wordt er verwacht dat er een voldoende breed vlak maaiveld naast het talud aanwezig is.

Voor de kruinbreedte worden de minimale breedtes voor elke wegcategorie conform de oude richtlijnen voor wegontwerp (ROA en RONA) gebruikt. In het onderstaande tekstvak is hiervan een overzicht weergegeven dat wordt aangehouden als fysieke eigenschappen voor de kruinbreedte.

Fysieke eigenschappen van de kruinbreedte, met een onderscheid tussen;

Wegcategorie	Minimale totale kruinbreedte [m]
I	32,50
III	12,60
V	12,30
VI	11,60
VII	8,50
VIII	6,00

Uitgangspunten kruinbreedte;

- * In het onderzoek worden enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd
- * Niet-waterkerende objecten worden niet beschouwd in het onderzoek

2.4 Conclusies literatuuranalyse

In de eerste twee paragrafen van dit hoofdstuk zijn verschillende fysieke eigenschappen opgesteld die bepalend zijn voor het waterkerend vermogen van een grondlichaam en die kenmerkend zijn voor verkeerswegen. Hieruit zijn twee lijsten met fysieke eigenschappen naar voren gekomen, die in paragraaf 2.3 met elkaar zijn geconfronteerd. Door middel van deze confrontatie zijn de fysieke eigenschappen van wegen aangescherpt tot een overzicht van fysieke eigenschappen die van belang zijn voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Een samengevat overzicht van de confrontatie is hieronder weergegeven. Dit overzicht is opgesteld om een lijst van fysieke eigenschappen te hebben, die als criteria dienen voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering. Aan de hand van dit overzicht is het mogelijk om verschillende combinaties van fysieke eigenschappen op te stellen, die samen een eerste categorisering van verhoogde wegen vormen. Hieruit komen echter zeer veel verschillende categorieën (192), waardoor er nog niet gesproken kan worden van een *vereenvoudigde* categorisering. Tevens is er nog geen inzicht in het daadwerkelijk waterkerend vermogen van de categorieën. Daarom worden de fysieke eigenschappen in het volgende hoofdstuk onderworpen aan de toetsingmethodes voor faalmechanismen.

Met deze paragraaf wordt onderzoeksvraag 1 afgesloten, de fysieke eigenschappen in het onderstaande overzicht fungeren als criteria voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering. Tevens wordt met deze paragraaf de analyse van voorschriften en literatuur afgesloten en wordt overgegaan op het kwantitatieve deel van dit onderzoek; de toetsing op faalmechanismen.

Onderzoeksvraag 1: Welke fysieke eigenschappen dienen als criteria om uit verhoogde wegen een vereenvoudigde categorisering naar het waterkerend vermogen te genereren?

1. De opbouw van de ondergrond van wegen, met een onderscheid tussen:
 - * De eerste 8 basisgrondprofielen, zoals weergegeven in Figuur 12 op pagina 20
2. De opbouw van het grondlichaam, met een onderscheid tussen:
 - * Een zandbed (zandophoging) direct op het maaiveld
 - * De taludbekleding die bestaat uit lokaal aanwezige grond, gelijk aan grondprofiel type 1/3 of type 2
3. De minimale kruinbreedte, met een onderscheid tussen:
 - * Wegcategorie I 32,50m
 - * Wegcategorie III 12,60m
 - * Wegcategorie V 12,30m
 - * Wegcategorie VI 11,60m

* Wegcategorie VII 8,50m

* Wegcategorie VIII 6,00m

4. De helling van het talud:

* Een taludhelling van 1:3 of flauwer indien er geen bermbeveiligingsconstructies aanwezig zijn

* Een taludhelling van 1:1,5 indien er wel bermbeveiligingsconstructies aanwezig zijn

Bij deze fysieke eigenschappen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. De kern van het grondlichaam bestaat uit zandachtig materiaal, een kleikern is zeer onwaarschijnlijk en wordt zodoende uitgesloten
2. In het onderzoek worden enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd
3. Niet-waterkerende objecten worden niet beschouwd in het onderzoek
4. In het onderzoek wordt er vanuit gegaan dat verhoogde wegen in Nederland een matig tot slecht erosiebestendige bekleding hebben
5. Vanuit constructie technisch oogpunt is een kruinhoogte groter dan 1,4m niet waarschijnlijk
6. Het optreden van opdrijving van het binnenland is op verhoogde wegen niet van toepassing
7. Het optreden van buitenwaartse macro-instabiliteit is op verhoogde wegen niet van toepassing

3. Kwantitatieve analyse van de fysieke eigenschappen van invloed op het waterkerend vermogen

Het vorige hoofdstuk is afgesloten met een overzicht van fysieke eigenschappen, die van belang zijn voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Deze 19 fysieke eigenschappen genereren 192 verschillende combinaties van verhoogde wegen. Dit zijn teveel combinaties om te kunnen spreken van een vereenvoudigde categorisering waarmee snel inzicht kan worden verkregen in de invloed van een weg op een overstroming. In dit hoofdstuk worden daarom de fysieke eigenschappen onderworpen aan een kwantitatieve toetsing op faalmechanismen voor het bezwijken van een grondlichaam. Hiermee wordt inzicht verkregen in de faalmechanismen die op de verhoogde wegen van toepassing zijn en welke fysieke eigenschappen hiervoor daadwerkelijk van belang zijn. Aan de hand hiervan wordt het overzicht van de fysieke eigenschappen aangescherpt, zodat enkel de eigenschappen overblijven die van significant belang zijn voor het waterkerend vermogen.

In paragraaf 2.1 zijn de faalmechanismen voor het falen van een grondlichaam reeds aangehaald. In paragraaf 2.1 lag de nadruk echter op het afleiden van fysieke eigenschappen van belang voor de betreffende faalmechanismen, in plaats van het daadwerkelijk (fysiek) toetsen op de faalmechanismen. Deze toetsing vindt plaats in dit hoofdstuk. Daarvoor worden in paragraaf 3.1 de toetsingmethodes voor de faalmechanismen uitgelegd en wordt toegelicht welke faalmechanismen wel of niet van toepassing zijn op verhoogde wegen. Vervolgens worden in paragraaf 3.2 de resultaten van de getoetste fysieke eigenschappen weergegeven, waaruit duidelijk wordt welk faalmechanisme maatgevend is en welke maatgevende waterstand hierbij hoort. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de conclusies van de kwantitatieve analyse, waarin een overzicht van de vereenvoudigde categorisering met de bijbehorende maatgevende faalmechanismen en waterstanden wordt weergegeven.

3.1 Toetsingmethodes voor de faalmechanismen

In deze paragraaf worden de toetsingmethodes voor de faalmechanismen uitgewerkt. Hierbij komen de volgende faalmechanismen aan bod (zie Figuur 4).

- Overlopen en overslag
- Piping / heave
- Macrostabieliteit binnenwaarts
- Microstabieliteit
- Instabiliteit van de taludbekleding

De faalmechanismen buitenwaartse macro-instabiliteit en opdrijving van het binnenland zijn reeds uitgesloten in hoofdstuk 2 en worden niet behandeld in dit hoofdstuk.

3.1.1 Overloop en overslag

De toetsing van de fysieke eigenschappen op overloop en overslag is allereerst gerelateerd aan de kruinhoogte van het grondlichaam. De kruinhoogte moet voldoende zijn om het overlopen van het weglichaam te voorkomen. De kruinhoogte is ook van belang voor de mate van overslag, een hogere kruin beperkt de hoeveelheid water die overslaat en vermindert daarmee het overslagdebiet. Bij een stijgende overstromingswaterstand zal er eerst sprake zijn van overslag, gevolgd door overloop als de waterstand blijft stijgen. Het toetsen van de fysieke eigenschappen op overslag is dan ook maatgevend, het

Fysieke eigenschappen bepalend voor overloop en overslag:

- Kruinhoogte van het grondlichaam
- Taludhelling
- De taludbekleding

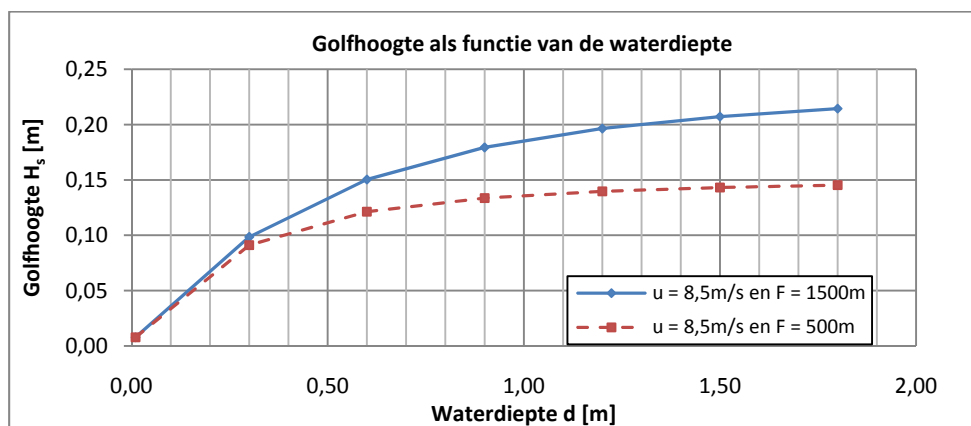
maximale overslagdebiet wordt bereikt voordat het weglichaam overloopt. Het overslagdebiet dat toelaatbaar is, is afhankelijk van de erosiebestendigheid van de kruin en het binnentalud van een weglichaam. Indien het overslagdebiet groter is dan dat de talusbekleding aan kan, dan zal dit zorgen voor een grote mate van infiltratie en erosie van het binnentalud, waardoor de bekleding zal falen door bijvoorbeeld afschuiving of uitspoeling, met een mogelijke bresvorming als gevolg.

De erosiebestendigheid van de talusbekleding van verhoogde wegen is verwoord in de opgestelde uitgangspunten en wordt als matig tot slecht erosiebestendig beschouwd. Aan de hand van deze beoordeling van de erosiebestendigheid is bepaald wat het maximaal toelaatbare overslagdebiet is. Voor verhoogde wegen is het maximale overslagdebiet 0,1l/m/s. Boven dit overslagdebiet ondervindt de talusbekleding teveel invloed van de overslag en is de stabiliteit van het weglichaam niet meer te garanderen. Dit is een veilige grens die voortkomt uit de 'Handreiking Constructief Ontwerpen', in de praktijk zal het overslagdebiet waarbij het binnentalud bezwijkt hoger liggen (Van, 2010). Voor een toelichting en uitgebreide onderbouwing van de bepaling van het maximale overslagdebiet wordt verwezen naar appendix E.

Het optreden van het maximale overslagdebiet is afhankelijk van een vijftal parameters, weergegeven in Tabel 5. Aan de hand van de eerste drie parameters kunnen de golfhoogte (H_s) en de golfperiode (T , de tijdsduur tussen twee golven) worden berekend (de gehanteerde formules zijn opgenomen in appendix F). Verschillende waarden voor de golfhoogte zijn in Figuur 16 weergegeven bij variërende waterdieptes. Deze waarden van de golfhoogte zijn benodigd voor het berekenen van het overslagdebiet. Van de figuur is af te leiden dat de golfhoogte bij een strijklengte van 1500m en een waterdiepte van 1,80m gelijk is aan 0,21m. Volgens Van (2010) zorgen golven met deze golfhoogte niet voor grote problemen bij overslag over de kruin.

Tabel 5 - Parameters voor de berekening van de golfhoogte, de golfperiode en het overslagdebiet (STOWA, 2007, p. 33)

Parameter	Parameterwaarde
1. De windsnelheid (u)	8,4m/s
2. De waterdiepte (d)	tot 1,80m
3. Strijklengte (F)	1500m
4. De helling van het buitentalud	1:1,5 of 1:3
5. De kruinhoogte (h_k)	tot 1,80m



Figuur 16 - Golfhoogtes bij verschillende waterdieptes en strijklengtes

Voor de windsnelheid wordt gerekend met een waarde die gemiddeld 90% van het jaar niet overschreden wordt. Door gebruik te maken van deze windsnelheid zullen de berekeningsresultaten voor het overslagdebiet in 90% van het jaar toereikend zijn (zie appendix G voor een overzicht van cumulatieve waarden voor windsnelheden). Extreme windsnelheden worden hierdoor niet beschouwd, maar deze hoeven ook niet per definitie gerelateerd te zijn aan het optreden van een overstroming. Een overstroming wordt veroorzaakt door een zeer groot afvoerdebiet vanuit bovenstrooms gelegen gebieden. Het bezwijken van een rivierdijk kan dan

ook plaatsvinden op een zonnige, rustige dag. Voor de tweede parameter in Tabel 5, de waterdiepte, wordt gevarieerd tot een waarde van 1,80m, dit ligt al ruim boven de verwachte kruinhoogte van verhoogde wegen van 1,4m. Voor de strijklengte (de lengte waarover de wind over het wateroppervlakte strijkt) wordt een maximale waarde van 1500m aangehouden, dit wordt gezien als een reële breedte van een overstroomd gebied waarin zich geen obstakels bevinden. Als referentie zijn in Figuur 16 ook golfhoogtes bij een strijklengte van 500m weergegeven. In de helling van het buitentalud wordt voor het berekenen van het overslagdebiet gevarieerd volgens de fysieke eigenschappen, een helling van 1:1,5 of 1:3.

Aan de hand van de gedefinieerde parameterwaarden kan berekend worden wat het overslagdebiet is bij een bepaalde waterdiepte en kruinhoogte. Hierbij is de kruinhoogtemarge (h_{krm}), het verschil tussen de kruinhoogte en de waterdiepte (zonder de golfhoogte), van belang voor het overslagdebiet. Hoe groter de kruinhoogtemarge, des te lager het overslagdebiet. De resultaten van de toetsing op overslag en de maatgevende waterstanden die hieruit volgen worden gepresenteerd in subparagraaf 3.2.1.

3.1.2 Piping / heave

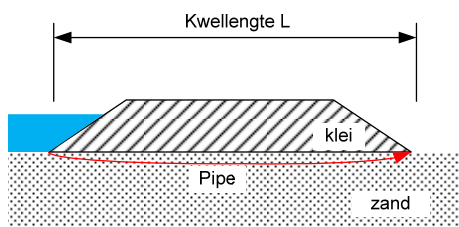
Bij de faalmechanismen piping en heave is er sprake van zandvoerende grondwaterstromingen (wellen) onder het grondlichaam. Deze wellen leiden tot stabiliteitsverlies in het grondlichaam, doordat de waterstromen gronddeeltjes uit de onderliggende grondlagen meevoeren. Bij piping is er sprake van horizontale waterstromingen (pipes), waarbij uittredende kwelstromen zand meevoeren aan de binnenzijde van het talud. Bij heave is er sprake van verticaal uittredend

Fysieke eigenschappen bepalend voor piping / heave:

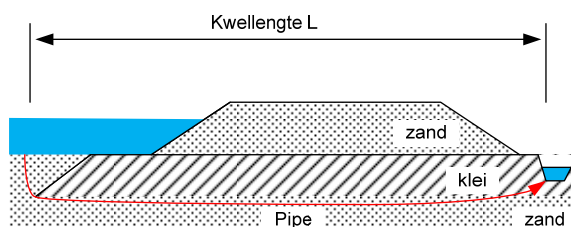
- Opbouw van het grondlichaam
- Opbouw van de natuurlijke ondergrond
- Kruinbreedte

grondwater, hierdoor nemen de korrelspanningen in het zand af en is er geen sprake meer van een verticaal evenwicht. Er treedt feitelijk een drijfzandsituatie op (TAW, 1999, p. 19). Dit kan het geval zijn achter een kwelscherm aan de binnenzijde van een grondlichaam. In het vervolg wordt er enkel nog gesproken van piping. Ten eerste omdat verhoogde wegen geen kwelscherm zullen hebben en ten tweede omdat de rekenregel van Bligh, die onder andere wordt gehanteerd in het VTV (2007), geen onderscheid maken tussen piping en heave.

Piping kan optreden indien er in de ondergrond een zandlaag aanwezig is die een onvoldoende dik, slecht doorlatende laag boven zich heeft. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn indien een weglichaam geheel zou bestaan uit klei op een goed doorlatende ondergrond (Figuur 17). Het intredepunt van piping bevindt zich dan aan de buitenteen van het talud en zal lopen tot de binnenteen van het talud, deze afstand is de kwellengte (L). Een ander voorbeeld van wanneer piping kan optreden is wanneer het weglichaam bestaat uit zand met daaronder een slecht doorlatend pakket (Figuur 18).



Figuur 17 - Piping bij kleidijk met zand ondergrond



Figuur 18 - Piping bij zanddijk met klei ondergrond

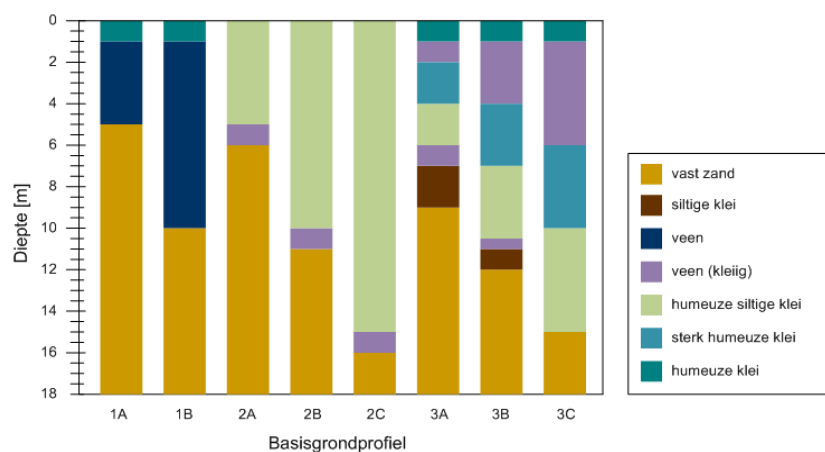
Voor het kunnen optreden van piping moet allereerst de zandlaag in contact staan met het overstromingswater. Is dit niet het geval, dan kan er door toedoen van de overstroming geen waterdruk verschil ontstaan aan de binnen en buitenzijde van het grondlichaam en kan er geen piping optreden (TAW, 1999, p. 17). Als er

wel direct contact is tussen het overstromingswater en de zandlaag, dan is de dikte van het slecht doorlatende pakket bepalend voor het gevaar op piping. Door de aanwezigheid van een sloot aan de binnentalud zijde, zal hier de afdekkende laag het dunst zijn en bestaat het gevaar dat daar het uittredepunt voor piping zal liggen. Voor het ontstaan van de waterstromen (pipes) in de onderliggende grondlagen van het dijklichaam, is de factor tijd van groot belang. De waterstromen ontstaan niet instantaan maar vormen zich langzaam maar zeker doordat zand uitstroomt bij het uittredepunt. Door grond, korrel en waterspanningen onder het grondlichaam is het echter niet met zekerheid te voorspellen hoe lang het duurt voordat de 'pipes' zich volledig onder het grondlichaam hebben gevormd (Biesboer, 2009).

Voor het toetsen op piping worden in het VTV vier typen grondlichamen onderscheiden, die variëren in de opbouw van het grondlichaam en de ondergrond.

- Type 1A; (dijk)lichaam bestaande uit klei op een slecht doorlatende ondergrond (klei- en veenlagen)
- Type 2A; (dijk)lichaam bestaande uit zand op een slecht doorlatende ondergrond (klei- en veenlagen)
- Type 1B; (dijk)lichaam bestaande uit klei op een goed doorlatende ondergrond, waarbij er direct onder de zool van het (dijk)lichaam geen afdekkend slecht doorlatende lagen aanwezig zijn
- Type 2B; (dijk)lichaam bestaande uit zand op een goed doorlatende ondergrond, waarbij er direct onder de zool van het (dijk)lichaam geen afdekkend slecht doorlatende lagen aanwezig zijn

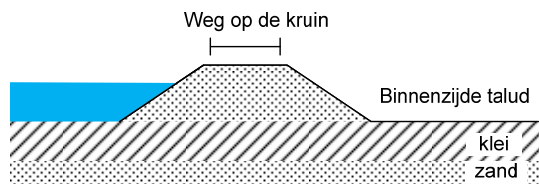
Type 1A en 1B vallen direct af, aangezien als uitgangspunt wordt gehanteerd dat het grondlichaam van verhoogde wegen enkel uit zand bestaat. Op type 2B wordt geen toetsing op piping toegepast, omdat er bij een zandlichaam op een zand-ondergrond geen sprake is van piping, maar eerder van het faalmechanisme micro-instabiliteit (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 138). Enkel type 2A hoeft dan ook getoetst te worden op het faalmechanisme piping.



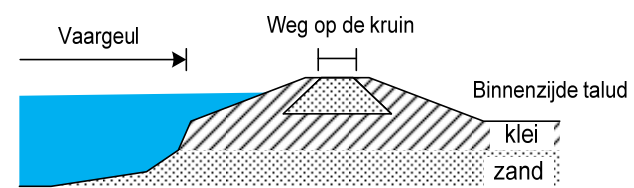
Figuur 19 – Basisgrondprofielen van de natuurlijke ondergrond

Voor de toetsing is het type natuurlijke ondergrond en de opbouw hiervan benodigd. Dit wordt door de opgestelde fysieke eigenschappen weergegeven door acht basisgrondprofielen, weergegeven in Figuur 19. Aan deze grondprofielen is te zien dat de bovenste grondlaag bestaat uit een slecht doorlatend pakket. Elk grondprofiel heeft als bovenste grondlaag een kleihoudende grondsoort. Op grotere diepte bevinden zich zandlagen, bijvoorbeeld voor basis grondprofiel 1A op een diepte vanaf 5m. Vanuit het oogpunt van het faalmechanisme piping, zal het overstromingswater in contact moeten kunnen komen met de zandlagen in de grondprofielen. Verhoogde wegen liggen echter op slecht doorlatende grondlagen, waarbij er geen verbinding tussen het overstromingswater en de zandlagen mogelijk is Figuur 20. Bij rivierdijken is dit over het algemeen wel het geval, omdat er bijvoorbeeld een vaargeul is aangelegd, zoals weergegeven in Figuur 21. Slechts in een uitzonderlijke situatie zou er bij verhoogde wegen piping kunnen optreden, bijvoorbeeld wanneer er dicht bij een weg een zandafgraving of een meer ligt. Met dit gegeven kan geconcludeerd worden dat het

faalmechanisme piping niet kan optreden bij belasting van verhoogde wegen met water tijdens een overstroming. De toetsing op piping is niet van toepassing op verhoogde wegen.



Figuur 20 - Schematische dwarsdoorsnede verhoogde weg



Figuur 21 - Schematische dwarsdoorsnede rivierdijk

3.1.3 Macrostabiliteit binnenwaarts

Onder het faalmechanisme macro-instabiliteit wordt het afschuiven van grote delen van het grondlichaam bedoeld. Dit afschuiven treedt op langs rechte of gebogen glijvlakken, waarin geen krachteenevenwicht meer aanwezig is. Het krachteenevenwicht heeft betrekking op grond, korrel en waterspanningen in- en onder het grondlichaam, die de weerstand tegen afschuiven bepalen. Het gevaar op binnenwaartse macro-instabiliteit treedt voornamelijk op wanneer een grondlichaam wordt belast met hoogwater. Voor verhoogde wegen doet de situatie van hoogwater zich voor tijdens een overstroming. De hoge waterstand tegen het buitentalud leidt tot een verhoging van het freatisch vlak in het grondlichaam en een toename van de waterspanningen in de ondergrond. Hierdoor neemt de weerstand tegen afschuiven af.

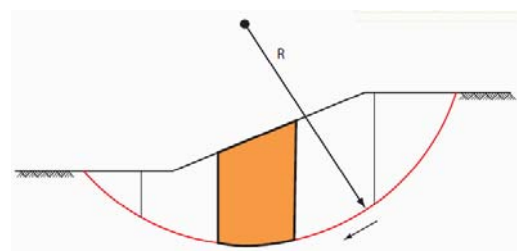
Fysieke eigenschappen bepalend voor macrostabiliteit:

- Opbouw van het grondlichaam
- Opbouw van de natuurlijke ondergrond
- Helling van het talud
- Kruinhoogte
- Kruinbreedte

MStab

Voor het toetsen van verhoogde wegen op het faalmechanisme binnenwaartse macro-instabiliteit zal in dit onderzoek gebruik worden gemaakt van de computersoftware 'MStab, versie 9.10' (Delft GeoSystems, 2010). MStab is een programma voor het ontwerpen van en de controle op stabiliteit van ophogingen op een slappe ondergrond. De software wordt algemeen erkend als hulpmiddel voor het analyseren van de taludstabiliteit op basis van een twee-dimensionale geometrie. Het programma beschikt onder andere over de mogelijkheid om de grondstructuur te configureren met verschillende grondlagen, waarbij het tevens mogelijk is om een uniforme belasting, zoals een verkeersbelasting, in te voeren.

Voor het bepalen van de afschuiving van het binnentalud maakt MStab gebruik van de methode Bishop. De methode Bishop gaat uit van het afschuiven van het binnentalud langs gebogen glijvlakken met een variërende straal R , weergegeven in Figuur 22. De methode verdeelt de grond boven elk glijvlak in een aantal verticale kolommen, waarvoor de verhouding tussen de maximale schuifkracht en de normale grondspanning langs het glijvlak wordt beschouwd. Het krachteenevenwicht op het glijvlak wordt per verticale kolom en voor ieder glijvlak berekend. Het programma zoekt vervolgens automatisch naar het glijvlak met de laagste veiligheidsfactor. Dit is het kritische glijvlak dat bepalend is voor het gevaar op binnenwaartse macro-instabiliteit (Delft GeoSystems, 2007, p. 217).



Figuur 22 - Schematisering van het glijvlak in de methode Bishop (Delft GeoSystems, 2007, p. 217)

Met behulp van MStab kunnen de fysieke eigenschappen van belang voor macrostabiliteit gevarieerd worden ingevoerd. Deze fysieke eigenschappen richten zich op de ruimtelijk dimensies van verhoogde wegen. Naast de dimensies van het grondlichaam heeft MStab voor de berekeningen de volgende gegevens nodig:

- Het verloop van het freatisch vlak in het grondlichaam
- Vier grondparameters van de verschillende grondlagen in de basisgrondprofielen

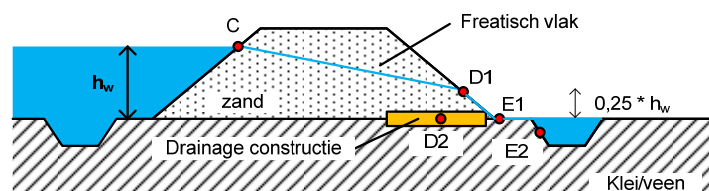
Dimensies van het grondlichaam

Voor het bepalen van de dimensies van het grondlichaam wordt gebruikt gemaakt van de opgestelde fysieke eigenschappen in paragraaf 2.4. De kruinbreedte van het grondlichaam wordt gevarieerd volgens de wegcategorieën. Voor de helling van het talud wordt gevarieerd tussen een taludhelling van 1:1,5 en 1:3. De kruinhoogte is voor wegen in Nederland verschillend, er wordt daarom voor gekozen om in de simulaties te variëren in de kruinhoogte met een $h_k = 0,60\text{m}$, $h_k = 1,20\text{m}$ en $h_k = 1,80\text{m}$. Ondanks dat de kruinhoogte vanuit constructietechnische redenen niet hoger dan 1,4m wordt verwacht, geeft een kruinhoogte tot 1,80m inzicht in de te verwachten weerstand tegen macrostabiliteit bij hogere wegen. Voor de taludbekleding wordt een dikte van 0,5m aangehouden, horizontaal vanaf de taludhelling gemeten (zie Figuur 24). De grondeigenschappen van de taludbekleding worden gelijk gesteld aan de bovenste grondlaag van het basisgrondprofiel dat wordt gebruikt in de simulatie, zodat de taludbekleding overeenkomt met de lokaal aanwezige grond.

Freatisch vlak

Het verloop van het freatische vlak in het grondlichaam heeft invloed op de schuifkrachten in het glijvlak. Voor het bepalen van het verloop van het freatisch vlak in een grondlichaam worden in het 'Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken' benaderingsmethodes aangereikt (TAW, 2004, pp. b1.2 - b1.6). Deze benaderingsmethodes maken een onderscheid in de opbouw van de natuurlijke ondergrond en het grondlichaam. Voor verhoogde wegen en de opgestelde basisgrondprofielen wordt uitgegaan van een grondlichaam bestaande uit zand op een samendrukbare natuurlijke grondlaag. Er wordt tevens een onderscheid gemaakt in de aanwezigheid van een open of een gesloten bekleding op het buitentalud. Een gesloten bekleding (slecht doorlatende toplaag) met een dikte kleiner dan 1,5m dient in dit geval als een open bekleding te worden beschouwd (TAW, 2004, p. b1.6). Voor verhoogde wegen is de dikte van de teelaarde toplaag rond de 0,5m. Voor de benaderingsmethodes voor het bepalen van het freatisch vlak zal het grondlichaam van verhoogde wegen daarom in zijn geheel als zandlichaam worden beschouwd.

Voor het bepalen van het freatisch vlak wordt ervan uitgegaan dat er sprake is van een freatisch vlak in zijn stationaire vorm. Dit houdt in dat het freatisch vlak zich volledig gevormd heeft in het grondlichaam. In dit geval kan een lineair



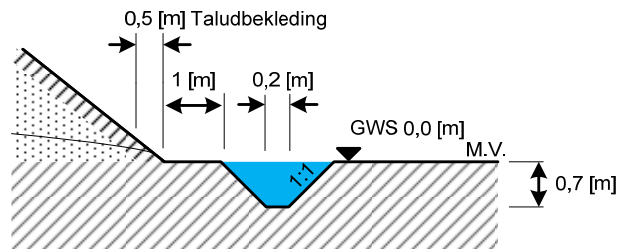
Figuur 23 – Bepaling freatisch vlak

verlopende lijn voor het freatisch vlak aangenomen worden (Figuur 23). Hiervoor wordt gekozen omdat verhoogde wegen een grondlichaam van zand hebben. Doordat de dichtheid van zand klein is, en daardoor de stroomsnelheid van het water door het zandlichaam hoog is, zal het freatisch vlak snel een stationair verloop aannemen. Het freatisch vlak loopt van punt C naar punt D2 (het midden van een drainage constructie) indien er drainage aanwezig is in het grondlichaam, zo niet, dan loopt het freatisch vlak naar punt D1. Zoals verwoord in subparagraaf 2.2.5 hebben verhoogde wegen een goede drainage. Deze drainage raakt tijdens een overstroming echter al zijn capaciteit kwijt aan het afwateren van overstromingswater van de buiten naar de

binnenzijde van het talud. Het freatisch vlak zal tijdens een overstroming daarom van punt C naar D1 lopen. De hoogte van punt D1 is afhankelijk van de overstromingswaterstand en is gelijk aan $0,25 \cdot h_w$. Afhankelijk van de aanwezigheid of afwezigheid van een teensloot loopt het freatisch vlak vervolgens naar punt E1 of E2. Wanneer er geen teensloot aanwezig is, of wanneer de grondwaterstand gelijk is aan het maaiveld, loopt het freatisch vlak van punt D1 naar punt E1. Wanneer er wel een teensloot aanwezig is, loopt het freatisch vlak naar punt E2 op het sloottalud (het slootpeil).

Volgens Houben (2010) hebben vrijwel alle wegen in Nederland aan beide zijden van het talud een teensloot, zodat de drainage in het grondlichaam hierop kan afvloeien. Op basis hiervan wordt er voor de toetsing met MStab uitgegaan van een teensloot aan beide taludzijden. Tijdens een overstroming zal deze teensloot echter vol water staan, omdat de drainage in het weglichaam het overstromingswater naar de binnenzijde van het talud afvloeit. De grondwaterstand aan de binnenzijde van het talud zal daarom gelijk zijn aan het maaiveld. Het freatisch vlak dat gebruikt wordt in MStab loopt daarom van punt C – D1 – E1 en blijft gelijk aan het maaiveld.

Voor de dimensionering van de teensloot wordt ervan uitgegaan dat de teensloot op een afstand van 1,00m van de taludteen ligt, met een sloothelling van 1:1, een diepte van 0,70m en 0,20m breed op de slootbodem (zie Figuur 24). Het slootpeil wordt gelijk genomen aan het maaiveld.



Figuur 24 – Schematische weergave dimensies weglichaam MStab

Grondparameters

In MStab zijn voor de methode Bishop vier grondparameters van belang voor de verschillende grondlagen. De grondlagen worden samengesteld aan de hand van de acht basisgrondprofielen, zoals gedefinieerd in de fysieke eigenschappen. De benodigde grondparameters zijn als volgt:

- Nat volumiek gewicht van de grondlagen (γ_{sat})
- Droog volumiek gewicht van de grondlagen (γ_d)
- Effectieve cohesie van de grondlagen (c')
- Effectieve inwendige wrijvingshoek van de grondlagen (ϕ')

In Figuur 25 zijn de parameterwaarden weergegeven voor de grondlagen in de acht basisgrondprofielen. De parameterwaarden zijn afkomstig uit het achtergrond rapport van het 'Keuzemodel wegconstructies' (CROW, 2005, pp. 12 - 16). CROW baseert deze parameterwaarden op de NEN 6740 'basiseisen en belastingen' voor de geotechniek (NEN, 1993). Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de parameterwaarden in het rivierengebied. Voor het weglichaam zelf wordt ophoogzand gebruikt.

Gebied	Grondsoort	Volumiek gewicht onverzadigd	Volumiek gewicht verzadigd	Cohesie	Hoek van inwendige wrijving
		γ_d	γ_a	c_d	φ_d
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(°)
1. veengebied	Organische klei	14,0	14,0	3,1	12,6
	veen	10,5	10,5	1,6	16,9
2. zeekleigebied	Organisch siltig/ zandige klei	15,0	15,0	3,8	19,0
	veen	11,5	11,5	3,8	16,9
3. rivierengebied	Organische klei	14,0	14,0	3,1	12,6
	Kleilig veen	11,5	11,5	3,8	16,9
	sterk organisch siltige klei	13,0	13,0	1,6	12,6
	Organisch siltige klei	15,0	15,0	3,1	12,6
	veen	11,5	11,5	3,8	16,9
	Siltige klei	16,0	16,0	3,1	12,6
	Siltige en zandige klei	17	18	4,9	21,5
Betere ondergrond	zandige leem	18	19	2,5	23,5
	matig vast zand	18	20	0	27,9
Ophoogzand		17	19	0	30
vaste zandlaag		18	20	0	30

■	humeuze klei
■	veen (kleilig)
■	sterk humeuze klei
■	humeuze siltige klei
■	veen
■	siltige klei
■	vast zand

Figuur 25 – Grond parameterwaarden voor MStab (CROW, 2005, p. 16)

Veiligheidsfactor

Het uitvoeren van de berekeningen in MStab leidt tot een veiligheidsfactor voor elk glijvlak dat kan optreden in het grondlichaam. Deze veiligheidsfactor wordt bepaald aan de hand van de weerstand tegen afschuiven gedeeld door de aandrijvende kracht voor het afschuiven. Bij een veiligheidsfactor (safety factor) van 1,00 is er sprake van een grenstoestand, boven deze veiligheidsfactor is het grondlichaam stabiel, onder deze factor moet het grondlichaam als instabiel worden beschouwd. In de praktijk wordt er voor de veiligheidsfactor als grens vaak 1,15 aangehouden, zodat er een veiligheidsmarge in de berekening wordt inbegrepen. In dit onderzoek worden echter geen veiligheidsfactoren in rekening gebracht, aangezien dit niet leidt tot een harde uitspraak over de maatgevende faalmechanismen en de bijbehorende waterstanden. Naar aanleiding van het interview met Van (29 april 2010), deskundige op het gebied van dijken bij Deltares, wordt er in dit onderzoek een veiligheidsfactor van 0,90 gehanteerd als grenswaarde voor het wel of niet optreden van binnenwaartse macrostabiliteit. Deze waarde is afkomstig van het 10% 3D-effect, wat de extra sterkte van de zijanten van de grondmoot die afschuift in beschouwing neemt (Den Haan & Feddema, oktober 2009). Van geeft aan dat ook deze waarde nog voldoende is, aangezien tijdens de watersnoodramp in 1995 zelfs waarden voor de veiligheidsfactor van 0,6 voldeden.

Bij grote kruinbreedtes is het aannemelijk dat een eerste afschuiving van het binnentalud niet direct leidt tot het volledig bezwijken van het grondlichaam, omdat er reststerkte overblijft. Na de eerste afschuiving zijn echter wel vervolgschuivingen te verwachten, met als gevolg kruinverlagingen en meer erosie van het blootgelegde zandlichaam. Knoeff en Calle (2002) hebben onderzoek gedaan naar het bepalen van de reststerkte van grondlichamen na binnenwaartse macro-instabiliteit. Hierbij richten zij zich op de kans van het optreden van; een tweede afschuiving, micro-instabiliteit en overslag door een kruinverlaging. Het bepalen van de reststerkte is echter een grijs gebied waarover moeilijk harde uitspraken zijn te doen met betrekking tot de tijd en waterstand die nodig is om na een eerste afschuiving het grondlichaam volledig te laten bezwijken. Daarom wordt er in dit onderzoek veiligheidshalve van uitgegaan dat het grondlichaam faalt wanneer er een eerste glijvlak optreedt, reststerkte wordt niet in acht genomen.

De toetsingresultaten van de fysieke eigenschappen op binnenwaartse macrostabiliteit worden gepresenteerd en toegelicht in subparagraaf 3.2.3.

3.1.4 Microstabiliteit

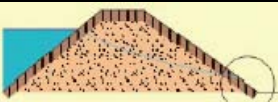
Het faalmechanisme micro-instabiliteit betreft een lokale instabiliteit van het binnentalud onder invloed van waterstroming en waterdrukken vanuit de kern van het grondlichaam. Ondanks dat microstabiliteit zich richt op zeer plaatselijke instabiliteiten, kunnen de gevolgen van falen op dit kleine niveau tot bezwijken van het gehele grondlichaam leiden. In Figuur 26 is weergegeven hoe het faalmechanisme micro-instabiliteit eruit ziet en welke vormen kunnen optreden.

Fysieke eigenschappen

bepalend voor microstabiliteit:

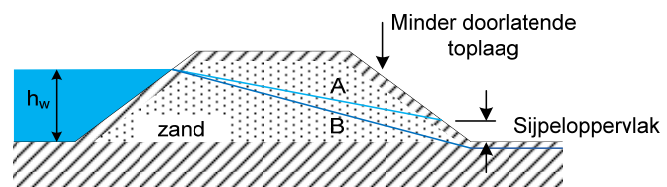
- Opbouw van het grondlichaam
- Kruinbreedte
- Helling van het talud

Voor het daadwerkelijk optreden van micro-instabiliteit moeten twee zaken tegen elkaar worden afgewogen, de druk van het freatisch vlak in het grondlichaam tegen de binnentalud bekleding en daar tegenin het gewicht en wrijving van de taludbekleding. In een normale situatie zal het freatisch vlak in een verhoogde weg aan de binnen- en buitenzijde van het talud gelijk zijn. Het freatisch vlak in het grondlichaam zal stijgen wanneer er door een overstroming een waterstand tegen het weglichaam aanstaat. Het freatisch vlak zal initieel aan de buitentalud zijde het snelst stijgen, waarna deze stijging zich afnemend doorzet naar het binnentalud (Figuur 27). Belangrijk voor het ontstaan van micro-instabiliteit is het uittredepunt van het freatisch vlak ten opzicht van het maaiveld. Wanneer het freatisch vlak in het grondlichaam boven het maaiveld ligt (lijn A), kan de taludbekleding worden uitgespoeld of afgedrukt, in dat geval is er sprake van gevaar op micro-instabiliteit. Het gebied op het binnentalud waar micro-instabiliteit kan optreden is in Figuur 27 weergegeven door het sijpeloppervlak. Het freatisch vlak weergegeven door lijn B eindigt onder het maaiveld, in dit geval treedt er geen micro-instabiliteit op. Dit komt doordat de waterdruk die ontstaat door het freatisch vlak in dat geval geen taludbekleding kan laten uitspoelen of afdrukken.

Type dijk	Micro-instabiliteit
Zanddijk	 Uitspoelen
Zanddijk met kleiafdekking	 Afdrukken/afschuiven

Figuur 26 – Faalmechanisme microstabiliteit (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 111)

Bij verhoogde wegen belast met overstromingswater zal het freatisch vlak boven het maaiveld uitkomen, doordat de drainage in het weglichaam geen capaciteit over heeft om het freatisch vlak omlaag te brengen. Daardoor is er sprake van een



Figuur 27 – Freatisch vlak van invloed op micro-instabiliteit

sijpeloppervlak op het binnentalud. In dit geval bestaat het gevaar dat er micro-instabiliteit optreedt. Afhankelijk van de hoogte van het uittredepunt van het freatisch vlak zal er ook daadwerkelijk micro-instabiliteit optreden. Om hier inzicht in te krijgen worden er in het 'Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructie' rekenregels aangereikt voor het berekenen van het sijpeloppervlak dat maximaal is toegestaan. Met deze waarden kan vervolgens beschouwd worden of het uittredepunt van het freatisch vlak hier onder of boven ligt. Wanneer het uittredepunt van het freatisch vlak onder de maximale waarde van het sijpeloppervlak ligt, dan wordt voldaan aan de toetsing op microstabiliteit. Bij het berekenen van het maximale sijpeloppervlak wordt een onderscheid gemaakt tussen de toetsing op afdrukken en de toetsing op afschuiven van de taludbekleding. Bij de toetsing op afdrukken wordt er daadwerkelijk berekend of de taludbekleding door de waterdruk omhoog wordt gedrukt (krachtenevenwicht loodrecht op het talud). Bij de toetsing op

afschuiven wordt het krachterevenwicht evenwijdig aan de taludbekleding beschouwd. Voor een overzicht van de rekenregels en de mechanismen afdrucken en afschuiven wordt verwezen naar appendix H.

Voor het berekenen van het sijpeloppervlak zijn twee fysieke eigenschappen van belang, de taludbekleding en de taludhelling. Verder zijn er een aantal veiligheidsfactoren van belang. De waarden die hiervoor in dit onderzoek worden gehanteerd zijn weergegeven in Tabel 6 (TAW, 2001).

Tabel 6 – Parameters en parameterwaarden voor de toetsing op micro-instabiliteit

Parameter	Parameterwaarden
1. Dikte taludbekleding (loodrecht op het talud)	0,5m
2. Grondeigenschappen taludbekleding	
Profiel 1 en 3: Humeuze klei	$c' = 3800\text{N/m}^2$ en $\phi' = 16,9^\circ$ en $\rho_g = 1150\text{kg/m}^3$
Profiel 2: Humeuze siltige klei	$c' = 3100\text{N/m}^2$ en $\phi' = 12,6^\circ$ en $\rho_g = 1500\text{kg/m}^3$
3. De helling van het buitentalud	1:1,5 of 1:3
4. Materiaalfactor voor de volumieke massa ($\gamma_{m,\rho}$)	1,0
5. Materiaalfactor voor de cohesie ($\gamma_{m,c}$)	1,25 of 1,0
6. Materiaalfactor voor de hoek van inwendige wrijving ($\gamma_{m,\phi}$)	1,1 of 1,0
7. Breedte van een moot grond, evenwijdig aan het talud (Δx)	0 tot $\Delta h/\sin\alpha$
8. Partiële veiligheidsfactor voor het gebruikte model (γ_d)	1,0
9. Partiële veiligheidsfactor voor de schade (γ_n)	1,0

Toelichting Tabel 6: Voor de grondeigenschappen van de taludbekleding zijn de toplagen van grondprofiel 1, 2 en 3 gebruikt (zie Figuur 19). Hierbij hebben grondprofiel 1 en 3 als toplaag een humeuze kleilaag en heeft grondprofiel 2 een humeuze siltige kleilaag. De variatie in de materiaalfactoren heeft betrekking op veiligheidsmarges die worden opgenomen in verschillende rapporten. In deze rapporten wordt aangeraden om deze factoren in acht te nemen, aangezien er doorgaans onzekerheid bestaat over de exacte eigenschappen van materialen (GeoDelft, 2000). Ondanks dat er in dit onderzoek harde waarden worden beschouwd, wordt er in dit geval voor gekozen om zowel te toetsen met de aanbevolen factoren als met een factor van 1,0.

Het criterium voor het daadwerkelijk voldoen van de fysieke eigenschappen aan de toetsing op microstabiliteit is afhankelijk van het uittredepunt van het freatisch vlak dat in de praktijk ontstaat. Het uittredepunt van het freatisch vlak is reeds gedefinieerd als 0,25 keer de overstromingswaterstand. Om te voldoen aan de toetsing dient het freatisch vlak lager uit te treden dan het maximale sijpeloppervlak.

Toetsing op microstabiliteit voldoet indien; Maximaal toegestaan sijpeloppervlak $> 0,25 \cdot h_w$

Hierbij is h_w de overstromingswaterstand. De toetsingresultaten van de fysieke eigenschappen op micro-instabiliteit worden gepresenteerd en toegelicht in subparagraaf 3.2.2.

3.1.5 Instabiliteit van de taludbekleding

De bekleding van verhoogde wegen zorgt voor de bescherming van het zandbed tegen erosie bij belasting met water, bijvoorbeeld hevige regenval. In het geval van een overstroming zal de buitentalud bekleding ook bescherming bieden tegen erosie door overstromingswater. Voor erosie van de buitentalud bekleding wordt een onderscheid gemaakt tussen de volgende typen:

Fysieke eigenschappen bepalend voor de instabiliteit van de taludbekleding:

- Kruinhoogte (waterdiepte)
- Opbouw van het grondlichaam

- Erosie door golfklap
- Erosie van de onderlagen
- Erosie door golfoploop en golfoverslag
- Afschuiving

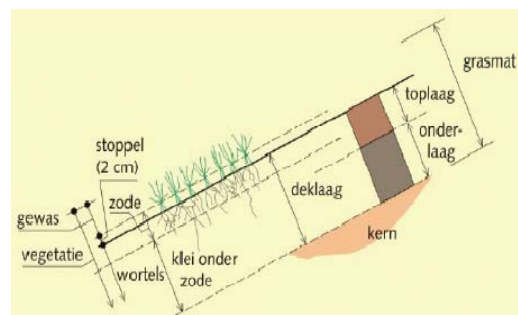
De bovenstaande vier typen worden in deze paragraaf toegelicht. Voordat dit wordt gedaan, is eerst uitleg benodigd over de twee voornaamste factoren van invloed op erosie van het buitentalud. Dit zijn de golfhoogte en de dikte en kwaliteit van de grasmattbekleding van het talud.

Golfhoogte

De golfhoogte van het overstromingswater is van belang voor de mate van erosie die kan optreden op het buitentalud. Bij een hogere golfhoogte zal er meer kinetische kracht op het talud worden uitgeoefend, waardoor er meer kans op erosie ontstaat. Aan de hand van de rekenregel van Bretschneider (TAW, 1985, p. 215) is te berekenen wat de significante golfhoogte is die optreedt bij een bepaalde windsnelheid, strijklengte en waterdiepte in het overstroomde gebied (appendix F). De golfhoogte bij verschillende waterdieptes is reeds aangehaald in subparagraaf 3.1.1 en weergegeven in Figuur 16. Deze golfhoogtes zijn benodigd voor het toetsen op het gevaar van de verschillende vormen van erosie.

Kwaliteit van de grasmattbekleding

De grasmattbekleding van het taludlichaam is erg belangrijk voor het beschermen van de taludkern tegen erosie. Onder het begrip 'grasmatt' vallen het gewas, de toplaag en de onderlaag (zie Figuur 28). De toplaag is het intensief doorwortelde bovenste deel van de deklaag. Een goede grasmatt is veel beter erosiebestendig dan een kaal kleidek van de meest erosiebestendige klei. Voor een goede grasmatt is de zodekwaliteit van groot belang voor de erosiebestendigheid (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 342). De kleilaag onder de graszode draagt enkel bij aan de reststerkte van de grasmatt. In de praktijk varieert de doorworteling, die voornamelijk plaatsvindt in de toplaag, tussen de 0,05m en 0,2m onder het maaiveld (de zodedikte). In de uitgangspunten is aangehaald dat de erosiebestendigheid van de grasmatt van wegen matig tot slecht is. Hiermee hangt samen dat de aanleg en het onderhoud van de grasmatt van wegen ook niet gericht is op het creëren van een sterke grasmatt. De parameterwaarden die van belang zijn voor de grasmattbekleding worden voor de verschillende typen erosie aangehaald in de onderstaande alinea's.



Figuur 28 – Opbouw van de grasmattbekleding (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 333)

De kleilaag onder de graszode draagt enkel bij aan de reststerkte van de grasmatt. In de praktijk varieert de doorworteling, die voornamelijk plaatsvindt in de toplaag, tussen de 0,05m en 0,2m onder het maaiveld (de zodedikte). In de uitgangspunten is aangehaald dat de erosiebestendigheid van de grasmatt van wegen matig tot slecht is. Hiermee hangt samen dat de aanleg en het onderhoud van de grasmatt van wegen ook niet gericht is op het creëren van een sterke grasmatt. De parameterwaarden die van belang zijn voor de grasmattbekleding worden voor de verschillende typen erosie aangehaald in de onderstaande alinea's.

Erosie door golfklap

Voor het toetsen op erosie door golfklap is een combinatie van de significante golfhoogte, de graszode dikte en de graserosiecoëfficiënt benodigd. Aan de hand van deze parameters kan de maximale toelaatbare belastingduur voor het buitentalud worden berekend, die als volgt wordt uitgedrukt (TAW, 1998, p. 29):

$$t_{max} = \frac{d_z}{\gamma C_E H_s^2} \quad (6)$$

Waarbij:

t_{max} = maximale toelaatbare belastingduur [s]

C_E = graserosiecoëfficiënt [$m^{-1}s^{-1}$]

d_z = zodedikte [m]

H_s = significante golfhoogte [m]

γ = veiligheidscoëfficiënt [-]

Zoals reeds aangehaald, varieert de zodedikte tussen de 0,05 en 0,2m. Doordat de kwaliteit van de graszode van verhoogde wegen overwegend een matig tot slechte erosiebestendigheid heeft, wordt ervoor gekozen om de zodedikte aan te nemen op 0,05m. Voor de veiligheidscoëfficiënt wordt in het 'Technisch Rapport Erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding' een waarde van 2 aangehouden (TAW, 1998, p. 29). Aangezien

dit onderzoek zich richt op harde waarden waarbij geen veiligheidsfactoren in acht worden genomen, wordt voor de veiligheidscoëfficiënt een waarde van 1 gebruikt. Dit is mede gebaseerd op het interview met Van (2010), hij gaf aan dat voorschriften met betrekking tot erosie een erg veilige marge aanhouden. De graserosiecoëfficiënt is afhankelijk van de erosiebestendigheid van de grasmat. De parameterwaarden voor de graserosiecoëfficiënt zijn weergegeven in Tabel 7 (TAW, 1998, p. 28). Voor een matig tot slecht erosiebestendige grasmat wordt een waarde van $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ voor de graserosiecoëfficiënt gehanteerd.

Tabel 7 – Graserosiecoëfficiënten

Erosiebestendigheid grasland	Verwachtingswaarde voor $C_E [\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}]$
Goed	0,5 à $1,5 \cdot 10^{-6}$
Matig	1,5 à $2,5 \cdot 10^{-6}$
slecht	2,5 à $3,5 \cdot 10^{-6}$

De toetsingresultaten van de buitentalud bekleding op erosie door golfklap worden gepresenteerd en toegelicht in subparagraaf 3.2.4.

Erosie door golfoploop en golfoverslag

Voor het toetsen op erosie door golfoploop en golfoverslag, wordt in het VTV allereerst de bewezen sterkte van de taludbekleding beschouwd. Hierover is voor dit onderzoek geen uitspraak te doen. Vervolgens wordt de ondergrens van de belasting beschouwd. Indien het overslagdebiet kleiner of gelijk aan $0,1 \text{ l/m/s}$ is, hoeft er niet getoetst te worden op erosie door golfoploop en golfoverslag. De taludbekleding wordt in dit geval geacht de belasting door de golven te doorstaan zonder gevaarlijke schade (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 350). Van (2010) verwoorde dat de taludbekleding van verhoogde wegen zelfs tegen een overslagdebiet van $1,0 \text{ l/m/s}$ bestand is. Op basis hiervan wordt voor de erosie door golfoploop en golfoverslag aangenomen dat dit niet van toepassing is op verhoogde wegen.

Erosie van de onderlagen

Bij het toetsen op erosie van de onderlagen wordt de reststerkte die de onderlaag heeft nadat de graszode weggeslagen is beschouwd. Hiervoor zijn de belangrijkste parameters de dikte van de onderlaag en de kwaliteit van de klei. Het buitentalud moet allereerst aan een aantal voorwaarden voldoen, als hier niet aan voldaan wordt, is de reststerkte van de onderlagen te beschouwen als afwezig. De voorwaarden zijn:

- De golfhoogte $H_s < 2,0 \text{ m}$
- De dikte van de kleilaag $d_k > 0,4 \text{ m}$

Aan de voorwaarde voor de golfhoogte zal voldaan worden, Figuur 16 geeft weer dat de golfhoogte maximaal $0,21 \text{ m}$ zal zijn. Aan de voorwaarde voor de dikte van de kleilaag wordt tevens voldaan, er is normaal gesproken een teelaardelaag van $0,5 \text{ m}$ aanwezig op het talud. Deze teelaarde laag bestaat uit lokaal aanwezige grond en heeft als functie om erosie van het zandbed door regenval te voorkomen, deze laag zal daarom gedeeltelijk bestaan uit klei. Daarmee wordt aan de voorwaarde voor de dikte van de kleilaag $> 0,4 \text{ m}$ voldaan.

Omdat aan beide voorwaarden wordt voldaan, kan vervolgens de extra reststerkte die wordt verkregen door de onderlagen worden afgeleid uit Figuur 29.

Niveau		Beneden GHW/WP/GRW + 1m				Boven GHW/WP/GRW + 1m			
Erosiebestendigheid	Dikte kleilaag H_s	0,2	0,5	1,0	> 1,6	0,2	0,5	1,0	> 1,6
		< 2,0				< 2,0			
Weinig (c3)	< 0,4 m	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,7 m	2	1,5	1,5	1	2	1,5	1,5	1
	1,0 m	3,5	3	3	2	3,5	3	3	2
	1,2 m	5	4,5	4,5	3	5	4,5	4,5	3
Goed (c1) en matig (c2)	< 0,4 m	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,7 m	4	3	2	1,5	3,5	2,5	1,5	1
	1,0 m	7,5	6	4	3	6,5	5	3	2
	1,2 m	11	9	6	4,5	9,5	7,5	4,5	3

Figuur 29 – Bepaling reststerkte kleilaag (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 292)

Voor verhoogde wegen geldt dat de bekleding zich bevindt op een droge hoogte, dus boven het gemiddelde hoogwater (GHW). De erosiebestendigheid van de klei wordt aangenomen op weinig, zoals vermeld in de uitgangspunten. Bij een maximale dikte van de kleilaag van 0,7m, resulteert dit in een reststerkte van 1,5 tot 2 uur. Voor dit onderzoek wordt een reststerkte van de talusbekleding van 1,5 uur gebruikt.

Afschuiving

Bij het toetsen op afschuiving van de buitentalud bekleding wordt beschouwd of de bekleding kan afschuiven door golfbelasting. Voor verhoogde wegen voldoet de bekleding aan de toetsing op afschuiving indien de golfhoogte kleiner is dan de kleilaagdikte (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 280). De toetsing op afschuiving is weergegeven met formule (7).

$$d_k > H_s \quad (7)$$

Waarbij:

d_k = kleilaagdikte [m]

H_s = golfhoogte [m]

Voor verhoogde wegen is de teelaarde toplaag circa 0,5m en de maximale golfhoogte (H_s) zal niet hoger zijn dan 0,21m (zie Figuur 16), dus: $0,5 > 0,21$

Afschuiving van de buitentaludbekleding is op verhoogde wegen niet van toepassing

3.2 Toetsingsresultaten van de faalmechanismen

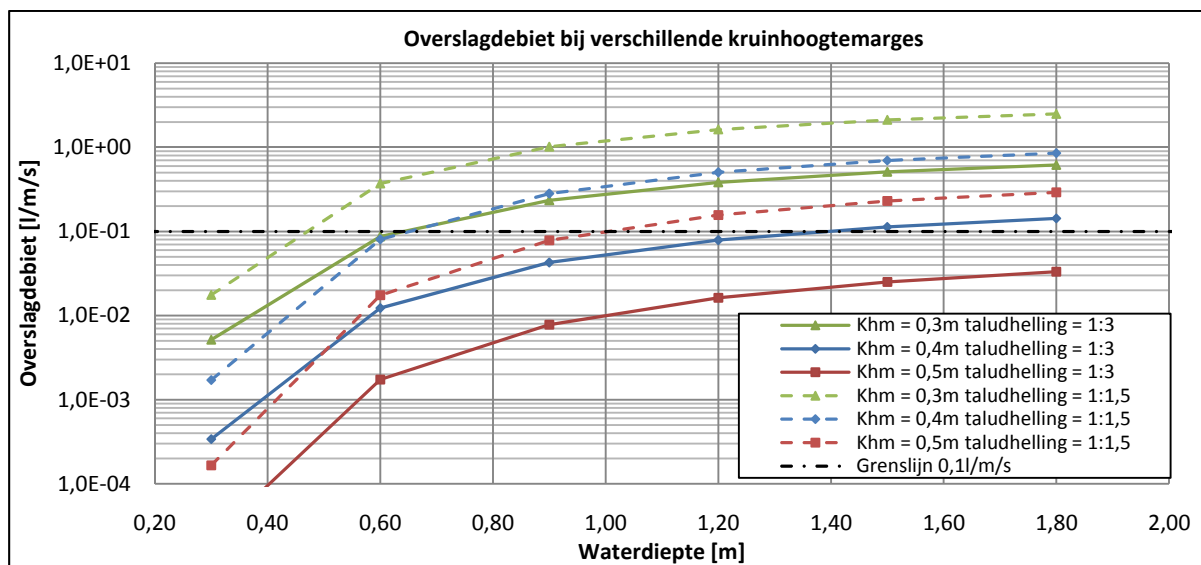
De toetsingsmethodes voor de faalmechanismen die zijn beschreven in de vorige paragraaf worden in deze paragraaf toegepast om de opgestelde fysieke eigenschappen daadwerkelijk te toetsen. In Tabel 8 is een overzicht weergegeven van de verschillende faalmechanismen die wel of niet van toepassing zijn op verhoogde wegen. Het doel van de toetsing is om enerzijds te beschouwen hoe groot de invloed van de verschillende fysieke eigenschappen op de faalmechanismen is, zodat het overzicht met fysieke eigenschappen aangescherpt kan worden. Anderzijds wordt met de toetsing inzicht verkregen in de maatgevende waterstand die de fysieke eigenschappen met betrekking tot de faalmechanismen kunnen keren. Uit deze paragraaf volgt de definitieve vereenvoudigde categorisering met de bijbehorende maatgevende faalmechanismen en waterstanden.

Tabel 8 – Faalmechanismen van toepassing op de fysieke eigenschappen van verhoogde wegen

Faalmechanismen	Van toepassing op de toetsing van verhoogde wegen	
	Ja	Nee
Overloop ⁴		X
Overslag	X	
Piping / heave		X
Microstabiliteit	X	
Buitenwaarts macrostabiliteit		X
Binnenwaarts macrostabiliteit	X	
Instabiliteit van de buitentalud bekleding	X	
Opdrijven		X

3.2.1 Overslag

Deze subparagraaf presenteert de resultaten van de toetsing op het faalmechanisme overslag. Hierbij is uitgegaan van de parameterwaarden uit subparagraaf 3.1.1. Voor het optreden van een maximaal overslagdebiet van 0,1l/m/s is de kruinhoogtemarge (h_{khm}) van groot belang. Hoe kleiner de kruinhoogtemarge, hoe groter het overslagdebiet bij gelijk blijvende omstandigheden. Om een indruk te krijgen van de kruinhoogtemarge die benodigd is om onder een overslagdebiet van 0,1l/m/s te blijven, zijn in Figuur 30 verschillende resultaten weergegeven voor het overslagdebiet bij verschillende kruinhoogtemarges. Uit de grafiek is af te leiden welke invloed een kruinhoogtemarge van 0,3m, 0,4m en 0,5m heeft op het overslagdebiet. In appendix F zijn de onderliggende formules uitgewerkt.



Figuur 30 - Overslagdebiet bij verschillende kruinhoogtemarges

Aan de hand van Figuur 30 kan gesteld worden dat bij een taludhelling van 1:1,5 een kruinhoogtemarge van 0,4m te laag is om aan een maximaal overslagdebiet van 0,1l/m/s te voldoen indien de waterdiepte groter wordt dan 0,65m. Bij een taludhelling van 1:3 is een kruinhoogtemarge van 0,4m voldoende tot een waterdiepte van 1,35m.

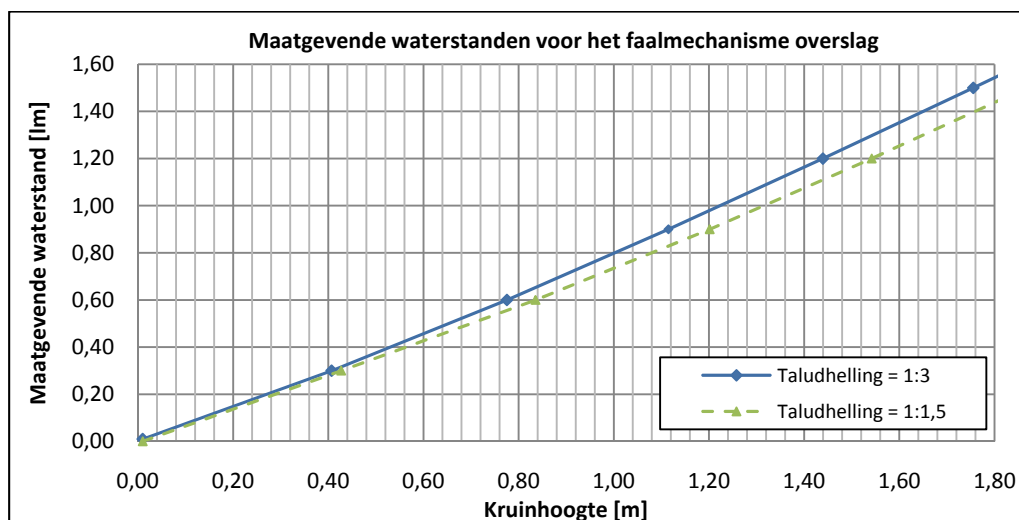
⁴ Het faalmechanisme overloop is wel van toepassing op verhoogde wegen, er wordt echter niet op getoetst omdat er bij overloop sprake is van een waterstand gelijk aan de kruinhoogte. Aangenomen wordt dat wanneer de toetsing op overslag niet voldoet er sprake is van overloop, overslag is daarmee maatgevend.

Theoretisch gezien zou een weglichaam met een taludhelling van 1:1,5 een $h_{\text{ghm}} > 0,4\text{m}$ nodig hebben wanneer de waterdiepte groter dan 0,65m wordt. Dit is theoretisch het geval, waarbij het gaat om het *overslagdebiet* en er geen rekening wordt gehouden met de kruinbreedte van het weglichaam. Bij golfhoogtes tot 0,21m (Figuur 16) is het voor de hand liggend dat deze golven, bij een kruinhoogtemarge van 0,4m, niet tot het binnentalud van het weglichaam zullen komen. De golven zouden dan een afstand van 6,00m tot 32,50m moeten overbruggen, wat niet reëel is. Welke invloed de breedte van het weglichaam exact heeft op het overslaan van overstromingswater en het ontstaan van instabiliteit van het binnentalud is niet bekend. Op basis van golven tot een hoogte van 0,21m en de kruinbreedtes is het echter aannemelijk dat slechts een kleine hoeveelheid water het binnentalud zal bereiken. Van (2010) geeft daarbij aan dat een kruinhoogtemarge van 0,4m in deze situatie groot is. Het maximale overslagdebiet van 0,1l/m/s is namelijk gerelateerd aan een zeer veilige grens voor een taludbekleding van gras. Naar inschatting van Van kan een taludbekleding van gras zeker een overslagdebiet van 1,0l/m/s aan. Dit baseert Van op een eerste reeks golfoverslag proeven, uitgevoerd door A. van Hoven, werkzaam bij Deltares⁵.

Op basis van het 'veilige' overslagdebiet van 0,1l/m/s, de lage golfhoogtes ten opzichte van de kruinhoogtemarges en de breedte van weglichamen met daarbij de informatie uit het interview met Van, wordt ervoor gekozen om de kruinhoogtemarge te bepalen bij een overslagdebiet van 1,0l/m/s. De informatie uit het interview met Van wordt als meer accuraat beschouwd voor de toetsing op overslag. Daarbij komt dat een 'veilige' marge geen toegevoegde waarde heeft op het kunnen doen van een harde uitspraak over de weerstand van verhoogde wegen tegen overslag.

De resultaten van de toetsing op overslag bij een maximaal overslagdebiet van 1,0l/m/s zijn weergegeven in Figuur 31. In het figuur is exact weergegeven welke waterstand er per kruinhoogte maximaal mogelijk is om te voldoen aan de toetsing op overslag. In het figuur is daarom niet het overslagdebiet weergegeven, want die is vastgesteld op 1,0l/m/s, maar is de kruinhoogte weergegeven met daarbij de maatgevende waterstand. In het figuur is de benodigde kruinhoogtemarge verwerkt in de maatgevende waterstand:

Maatgevende waterstand = Kruinhoogtemarge - kruinhoogte



Figuur 31 - Maatgevende waterstanden voor het faalmechanisme overslag

⁵ De golfoverslag proeven worden uitgevoerd voor het nieuwe Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV).

De maatgevende waterstand voor het faalmechanisme overslag is bijvoorbeeld bij een taludhelling van 1:3 en een kruinhoogte van 1,50m gelijk aan 1,26m. De benodigde kruinhoogtemarge is in dat geval $1,50\text{m} - 1,26\text{m} = 0,24\text{m}$. Aan de hand van Figuur 31 kunnen de maatgevende waterstanden per kruinhoogte voor het faalmechanisme overslag worden bepaald. Dit resulteert in de volgende uitspraak voor het faalmechanisme overslag:

De maatgevende waterstanden voor het faalmechanisme overslag zijn afhankelijk van de kruinhoogte en de taludhelling en worden bepaald aan de hand van Figuur 31.

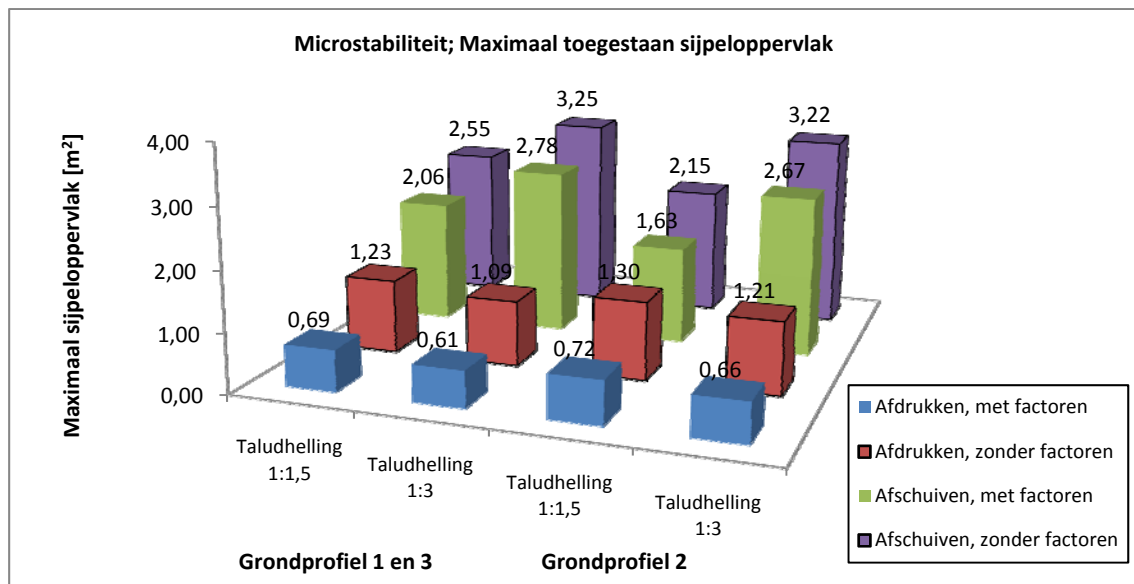
Bij een kruinhoogte van 1,40m zijn de volgende waterstanden maatgevend:

Bij een taludhelling van 1:1,5 is de maatgevende waterstand 1,07m

Bij een taludhelling van 1:3 is de maatgevende waterstand 1,16m

3.2.2 Microstabiliteit

Voor de toetsing op microstabiliteit is het maximaal toegestane sijpeloppervlak op het binnentalud van belang. De berekeningsresultaten van het maximaal toegestane sijpeloppervlak worden in deze subparagraaf gepresenteerd. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de parameterwaarden uit subparagraaf 3.1.4. In de fysieke eigenschappen van verhoogde wegen is gevarieerd met een taludhelling van 1:1,5 of 1:3 en een taludbekleding gelijk aan de toplaag van grondprofiel type 1/3 of grondprofiel type 2. De resultaten van deze combinaties zijn weergegeven in Figuur 32. In de figuur is het maximale sijpeloppervlak (uitgedrukt in meter per strekkende meter) weergegeven voor zowel het afdrukken als het afschuiven van de taludbekleding. Tevens zijn de berekeningsresultaten met en zonder veiligheidsfactoren weergegeven. De waarden boven de kolommen geven het maximaal toegestane sijpeloppervlak weer.



Figuur 32 – Berekeningsresultaten voor microstabiliteit; maximaal toegestaan sijpeloppervlak

Uit de figuur komt naar voren dat in het slechtste geval het sijpeloppervlak maximaal 0,61m per strekkende meter mag zijn (grondprofiel type 1 en 3 en taludhelling 1:3). Dit betekent dat er geen afdrukken van de binnentalud bekleding optreedt tot een uittredepunt van het freatisch vlak op een hoogte van maximaal 0,61m. Bij deze waarde is er gerekend met veiligheidsfactoren, zodat er nog aan de veilige kant wordt gezeten. Zonder veiligheidsfactoren ligt het laagste maximale sijpeloppervlak op 1,63m per strekkende meter (grondprofiel type 2 en taludhelling 1:1,5). Wanneer het uittredepunt van het freatisch vlak op het binnentalud

hoger ligt dan 0,61m met veiligheidsfactoren en 1,63m zonder factoren, wordt niet voldaan aan de toetsing op microstabiliteit. Om in de praktijk echter een uittredepunt van het freatisch vlak op een hoogte groter dan 0,61m te hebben, is een overstromingswaterstand benodigd van:

$$0,25 * h_w = 0,61\text{m}$$

$$h_w = 2,44\text{m}$$

Hiermee kan worden vastgesteld dat het faalmechanisme micro-instabiliteit niet optreedt bij verhoogde wegen belast met een overstromingswaterstand tot 2,44m. Deze overstromingswaterstand is groter dan de maximaal verwachte kruinhoogte van 1,4m. Aangezien de combinaties van fysieke eigenschappen allemaal een maatgevende waterstand voor het faalmechanisme microstabiliteit van 2,44m of hoger hebben (een maximaal toegestaan sijpeloppervlak $> 0,61\text{m}^2$), wordt er geen onderscheid gemaakt in de resultaten van de verschillende fysieke eigenschappen. Indien wegen hoger zijn dan 2,44m is de weerstand tegen microstabiliteit afhankelijk van de opgestelde fysieke eigenschappen voor de taludhelling en de natuurlijke ondergrond.

De maatgevende waterstand voor het faalmechanisme microstabiliteit is gelijk aan de kruinhoogte tot een:

$$h_k \leq 2,44\text{m}$$

Het resultaat dat het faalmechanisme microstabiliteit geen gevaar oplevert voor verhoogde wegen wordt ook door Knoeff onderkend (2003, p. 36).

3.2.3 Binnenwaartse macrostabiliteit

In deze subparagraaf wordt de toetsing van de opgestelde fysieke eigenschappen op binnenwaartse macrostabiliteit beschreven. Nadat in subparagraaf 3.1.3 de randvoorwaarden voor de simulaties met MStab zijn opgesteld, wordt in deze paragraaf beschouwd hoe groot de invloed van de verschillende fysieke eigenschappen op binnenwaartse macrostabiliteit is en welke maatgevende waterstanden hieruit afgeleid kunnen worden. Hiervoor zijn de volgende fysieke eigenschappen doorgerekend, de:

- natuurlijke ondergrond;
- taludhelling;
- kruinbreedte.

Allereerst worden voor grondprofiel type 1 resultaten uit MStab weergegeven. Uit deze resultaten volgen verschillende gevolgtrekkingen waarmee inzicht wordt verkregen in het verschil tussen de basisgrondprofielen 1A en 1B. Tevens wordt hieruit duidelijk of er voldaan wordt aan de toetsing op macrostabiliteit en welke invloed de taludhelling en de breedte van de kruin heeft op binnenwaartse macrostabiliteit. Ditzelfde wordt gedaan voor grondprofiel type 2 en 3. Opgemerkt moet worden dat er voor de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit is gerekend tot een kruinhoogte van 1,80m.

Grondprofiel type 1

Voor grondprofiel type 1 zijn in Tabel 9 toetsingsresultaten voor de veiligheidsfactoren uit MStab weergegeven. In de tabel wordt gevarieerd met drie verschillende kruinhoogtes, waarbij de maatgevende waterstand per kruinhoogte is weergegeven in de tabel. De veiligheidsfactor is berekend voor een taludhelling van 1:1,5 en 1:3 en de wegcategorieën VIII en I.

Tabel 9 - Resultaten uit MStab voor grondprofiel 1A en 1B, veiligheidsfactor $\geq 0,90$ voldoet

Grondprofiel	Kruinhoogte [m]	Waterhoogte [m]	Veiligheidsfactor			
			Wegcategorie VIII (6,00m)		Wegcategorie I (32,50m)	
			1:1,5	1:3	1:1,5	1:3
1A	0,60	0,60	1,77	1,98	1,81	2,03
	1,20	1,20	1,12	1,38	1,18	1,45
	1,80	1,80	0,91	1,16	0,97	1,26
1B	0,60	0,60	1,77	1,98	1,81	2,03
	1,20	1,20	1,11	1,38	1,18	1,45
	1,80	1,80	0,91	1,16	0,97	1,26

Uit Tabel 9 is af te lezen dat bij een gelijke taludhelling, kruinhoogte en kruinbreedte de veiligheidsfactoren voor grondprofiel 1A en 1B nagenoeg gelijk zijn. Kleine verschillen in de orde van grootte van eenhonderdste zijn het gevolg van afrondingen in MStab. Op basis van deze overeenkomst tussen beide grondprofielen wordt ervoor gekozen om basisgrondprofiel 1A en 1B samen te voegen onder grondprofiel 1*, welke gelijk is aan basisgrondprofiel 1B.

Verder is duidelijk te zien dat de veiligheidsfactor bij een taludhelling van 1:1,5 en 1:3 voor alle kruinhoogtes en kruinbreedtes groter is dan 0,90. Tevens is te zien dat, naarmate de kruinbreedte groter wordt, de veiligheidsfactor toeneemt. Hieruit kan worden afgeleid dat wanneer de smalste wegcategorie VIII voldoet, ook de overige wegcategorieën voldoen aan de toetsing op binnenwaartse macro-instabiliteit. Op basis hiervan wordt ervoor gekozen om in het vervolg van dit onderzoek enkel nog de veiligheidsfactor te berekenen voor wegcategorie VIII.

Samengevat:

- Grondprofiel type 1 voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit. De maatgevende waterstand hierbij is gelijk aan de kruinhoogte.
- Basisgrondprofiel 1A en 1B geven gelijke resultaten en worden samengevoegd onder grondprofiel 1*, gelijk aan 1B.

Grondprofiel type 2

Voor basisgrondprofiel 2A en 2C zijn in Tabel 10 veiligheidsfactoren uit MStab weergegeven. Basisgrondprofiel 2B is niet opgenomen, omdat deze waarden gelijk zijn aan die van profiel 2A en 2C, zoals ook het geval bleek bij basisgrondprofiel 1A en 1B, behandeld in de vorige alinea. De veiligheidsfactor is enkel berekend voor wegcategorie VIII, wanneer wegcategorie VIII voldoet zullen de andere, bredere wegcategorieën ook voldoen. Dit is gedaan conform de toetsingsresultaten van grondprofiel type 1.

Tabel 10 - Resultaten uit MStab voor profiel 2A en 2C, veiligheidsfactor $\geq 0,90$ voldoet

Grondprofiel	Kruinhoogte [m]	Waterhoogte [m]	Veiligheidsfactor	
			Wegcategorie VIII (6,00m)	
			1:1,5	1:3
2A	0,60	0,60	1,76	1,93
	1,20	1,20	1,13	1,30
	1,80	1,80	<u>0,89</u>	1,06
	1,80	1,78	0,90	
2C	0,60	0,60	1,76	1,93
	1,20	1,20	1,13	1,30
	1,80	1,80	<u>0,89</u>	1,06
	1,80	1,78	0,90	

Uit de resultaten in Tabel 10 kan allereerst worden afgeleid dat wegcatgorie VIII niet voldoet aan de toetsing bij een kruinhoogte en waterhoogte van 1,80m. Wanneer de waterstand verlaagd wordt met 0,02m tot 1,78m, dan voldoet de wegcatgorie wel. Verder is te zien dat basisgrondprofiel 2A en 2C gelijke veiligheidsfactoren hebben in overeenkomstige situaties. Basisgrondprofiel 2B zit tussen beide profielen in en geeft tevens gelijke toetsingsresultaten. In het vervolg van het onderzoek worden deze drie profielen samengevoegd onder grondprofiel 2*, gelijk aan grondprofiel 2C. Voor grondprofiel type 2 voldoet enkel een kruinhoogte van 1,80m bij een taludhelling van 1:1,5 niet. De waterstand waarbij deze combinatie wel voldoet verschilt zeer weinig van de kruinhoogte (0,02m). Tevens is het verschil in de veiligheidsfactor gering. Op basis hiervan wordt ervoor gekozen om grondprofiel type 2 tot een kruinhoogte van 1,80m toch te beschouwen als bestand tegen binnenwaartse macrostabiliteit.

Samengevat:

- Grondprofiel type 2 voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit tot een kruinhoogte van 1,80m. De maatgevende waterstand hierbij is gelijk aan de kruinhoogte.
- Basisgrondprofiel 2A, 2B en 2C geven gelijke resultaten en worden samengevoegd onder grondprofiel 2*, gelijk aan 2C.

Grondprofiel type 3

Voor basisgrondprofiel 3A, 3B en 3C zijn in Tabel 11 veiligheidsfactoren uit MStab weergegeven. Uit de tabel is af te lezen dat alle getoetste combinaties voldoen aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit. Verder is te zien dat bij een taludhelling van 1:1,5 de veiligheidsfactoren voor alle drie de basisgrondprofielen overeenkomen. De onderverdeling naar basisgrondprofiel 3A, 3B en 3C heeft bij deze taludhelling geen invloed op de veiligheidsfactor

Tabel 11 - Resultaten uit MStab voor profiel 3A, 3B en 3C, veiligheidsfactor $\geq 0,90$ voldoet

Grondprofiel	Kruinhoogte [m]	Waterhoogte [m]	Veiligheidsfactor	
			Wegcatgorie VIII (6,00m)	
			1:1,5	1:3
3A	0,60	0,60	1,77	1,97
	1,20	1,20	1,13	1,37
	1,80	1,80	0,91	0,97
3B	0,60	0,60	1,77	1,97
	1,20	1,20	1,13	1,37
	1,80	1,80	0,91	1,18
3C	0,60	0,60	1,77	1,97
	1,20	1,20	1,13	1,37
	1,80	1,80	0,91	1,18

voor binnenwaartse macrostabiliteit. Wel zit er een verschil in de resultaten bij een taludhelling van 1:3. Bij deze situatie geeft grondprofiel 3A lagere waarden voor de veiligheidsfactor. Er wordt echter nog wel voldaan aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit. Deze lagere waarden zijn het gevolg van de opbouw van de natuurlijke ondergrond van basisgrondprofiel 3A.

Samengevat:

- Grondprofiel type 3 voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit. De maatgevende waterstand hierbij is gelijk aan de kruinhoogte.
- Bij een taludhelling van 1:1,5 geven basisgrondprofiel 3A, 3B en 3C gelijke resultaten. Doordat profiel 3A afwijkt bij een taludhelling van 1:3, wordt ervoor gekozen om enkel profiel 3B en 3C samen te voegen onder grondprofiel 3*, gelijk aan basisgrondprofiel 3B.
- Bij een taludhelling van 1:3 geven basisgrondprofiel 3B en 3C gelijke resultaten en worden samengevoegd onder grondprofiel 3*, gelijk aan basisgrondprofiel 3B.

Resumé toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit

De bovenstaande beschrijving van de toetsingsresultaten op binnenwaartse macrostabiliteit geeft weer dat tot een kruinhoogte van 1,80m de maatgevende waterstand bij alle combinaties van fysieke eigenschappen gelijk is aan de kruinhoogte. Op basis hiervan wordt gesteld dat er geen gevaar voor macrostabiliteit optreedt tot een kruinhoogte van 1,80m. Indien wegen hoger zijn dan 1,80m is de weerstand tegen macrostabiliteit afhankelijk van de opgestelde fysieke eigenschappen voor de taludhelling, de wegbreedte en de natuurlijke ondergrond. Doordat in dit onderzoek wegen tot een hoogte van 1,80m worden beschouwd, kan de volgende uitspraak worden gedaan voor het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit:

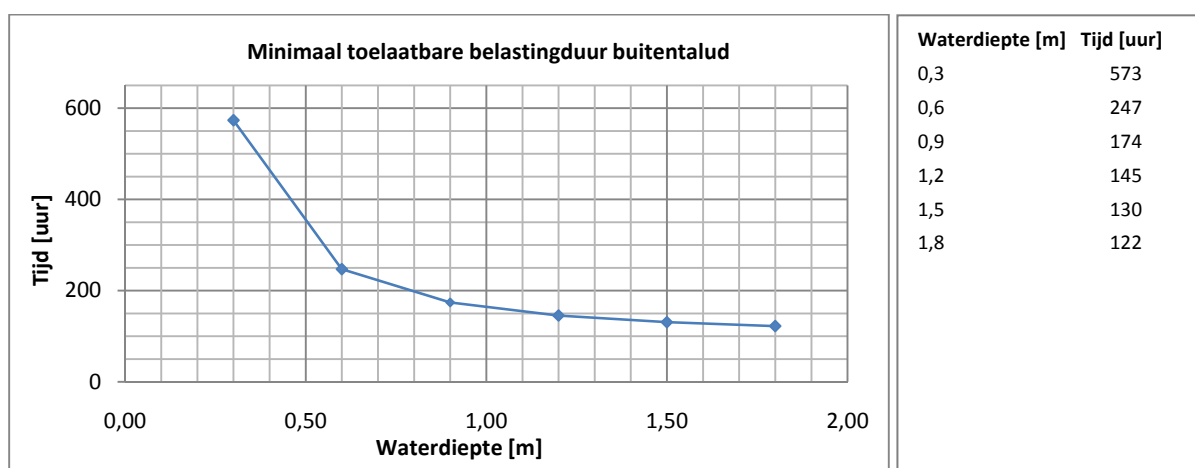
De maatgevende waterstand voor het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit is gelijk aan de kruinhoogte tot een $h_k \leq 1,80m$

In appendix I is uiteengezet wat de invloed van de aanwezigheid of afwezigheid van een teensloot is op de toetsingsresultaten. Tevens is in appendix I beschouwd welke invloed de positie en de dimensies van de teensloot hebben op de toetsingsresultaten.

3.2.4 Instabiliteit van de buitentalud bekleding

In deze paragraaf worden de toetsingsresultaten voor het optreden van erosie van het buitentalud toegelicht. Dit is het vierde en laatste faalmechanisme waarop de fysieke eigenschappen van verhoogde wegen getoetst dienen te worden. In tegenstelling tot de toetsingsresultaten van de overige drie faalmechanismen, worden de toetsingsresultaten voor de weerstand tegen erosie uitgedrukt in *tijd*. Voor de toetsing is uitgegaan van het meest pessimistische scenario, zoals beschreven in subparagraaf 3.1.5, met daarbij de reeds berekende golfhoogtes bij een windsnelheid van 8,5m/s. De berekende toelaatbare belastingduur van het buitentalud geeft daarom de belastingduur aan die *minimaal* mogelijk is.

Voor de toetsing op erosie van de buitentalud bekleding hoeft enkel getoetst te worden op erosie door golfklap. De toetsingresultaten voor erosie door golfklap, berekend met formule (6), zijn grafisch weergegeven in Figuur 33. In de grafiek is tevens de reststerkte van de taludbekleding opgenomen.



Figuur 33 – Minimaal toelaatbare belastingduur van het buitentalud per waterdiepte (met $u = 8,5m/s$)

Van Figuur 33 is af te lezen wat de minimaal toelaatbare belastingduur bij verschillende waterdieptes is. Bijvoorbeeld bij een waterdiepte van 1,80m is de minimaal toelaatbare belastingduur nog 122 uur, wat overeen komt met 5 dagen. Aangezien bij de berekeningen voor Figuur 33 is uitgegaan van het meest

pessimistische scenario, zal de toelaatbare belastingduur in de praktijk hoger zijn. Voor de weerstand van verhoogde wegen tegen erosie van de buitentalud bekleding kan de volgende uitspraak worden gedaan:

De minimaal toelaatbare belastingduur voor het faalmechanisme erosie van de buitentalud bekleding wordt weergegeven door Figuur 33. Bij een waterdiepte van 1,80m komt dit overeen met 5 dagen.

3.3 Conclusies kwantitatieve analyse

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Om hierover snel een uitspraak te kunnen doen in de praktijk is er in de vorige paragrafen naar een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen toegewerkt. In dit hoofdstuk zijn de eerder opgestelde fysieke eigenschappen onderworpen aan de toetsing op faalmechanismen. Door deze kwantitatieve toetsing heeft een laatste aanscherping van de fysieke eigenschappen plaatsgevonden en is inzicht verkregen in de maatgevende waterstanden per faalmechanisme.

In deze paragraaf wordt naar aanleiding van de toetsingsresultaten uit paragraaf 3.2 allereerst beschouwd welk faalmechanisme maatgevend is en welke fysieke eigenschappen hierdoor maatgevend zijn voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Vervolgens wordt de vereenvoudigde categorisering van gepresenteerd, met bij elke categorie het maatgevende faalmechanisme en de maatgevende waterstand.

3.3.1 Maatgevend faalmechanisme en maatgevende fysieke eigenschappen

In paragraaf 3.1 zijn verschillende faalmechanismen besproken en is verwoord waarom ze wel of niet van toepassing zijn op verhoogde wegen. Hieruit is naar voren gekomen dat de faalmechanismen; overslag, microstabiliteit, binnenwaartse macrostabiliteit en instabiliteit van de buitentalud bekleding van toepassing zijn. De opgestelde fysieke eigenschappen van verhoogde wegen zijn vervolgens op deze faalmechanismen getoetst in paragraaf 3.2. In Tabel 12 is een overzicht weergegeven van de maatgevende waterstanden of belastingduur van de vier faalmechanismen, resulterend uit paragraaf 3.2.

Tabel 12 - Maatgevende waterstand of belastingduur per faalmechanisme

Faalmechanisme	Maatgevende waterstand of belastingduur	Maatgevende waterstand bij een kruinhoogte van 1,80m
Overslag	Afhankelijk van de kruinhoogte (zie Figuur 31)	Helling 1:1,5 $\rightarrow h_w = 1,43\text{m}$ Helling 1:3 $\rightarrow h_w = 1,54\text{m}$
Microstabiliteit	Gelijk aan de kruinhoogte tot een $h_k \leq 2,44\text{m}$	$h_w = 1,80\text{m}$
Binnenwaarts macrostabiliteit	Gelijk aan de kruinhoogte tot een $h_k \leq 1,80\text{m}$	$h_w = 1,80\text{m}$
Instabiliteit van de taludbekleding	Afhankelijk van de waterdiepte (zie Figuur 33)	Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow t = 5$ dagen

Uit het overzicht in Tabel 12 kan afgeleid worden dat het faalmechanisme overslag maatgevend is tot in ieder geval een kruinhoogte van 1,80m. Hierbij is de maatgevende waterstand afhankelijk van de kruinhoogte en de taludhelling. In dit onderzoek wordt vanuit constructietechnische redenen niet verwacht dat wegen hoger zijn dan 1,4m. Om inzicht te krijgen in de weerstand van verhoogde wegen tegen overstromingen die hoger zijn dan de verwachte hoogte van 1,4m, is er desondanks gerekend tot een kruinhoogte van 1,80m. Voor de minimaal toelaatbare belastingduur van de buitentalud bekleding door erosie geldt een waarde van 5 dagen bij een waterstand van 1,80m. Deze tijdsduur is in verhouding tot de verwachte evacuatieduur dusdanig lang dat het faalmechanisme overslag als maatgevend wordt beschouwd.

Aan de hand van het faalmechanisme overslag kunnen vervolgens de maatgevende fysieke eigenschappen die van daadwerkelijk belang zijn voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen worden bepaald. Hiervoor zijn de fysieke eigenschappen benodigd die van invloed zijn op het faalmechanisme overslag. Buiten de fysieke eigenschappen van het weglichaam zelf zijn er ook externe factoren van invloed op de weerstand tegen het bezwijken van verhoogde wegen door overslag. Hiervan is een overzicht weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 - Maatgevende fysieke eigenschappen van belang voor het waterkerend vermogen

Gevarieerde fysieke eigenschappen	Externe factoren
▪ Taludhelling; 1:1,5 of 1:3	▪ Strijklengte; $F = 1500m$
▪ Kruinhoogte; 0,00m tot 1,80m	▪ Windsnelheid; $u = 8,5m/s$

3.3.2 Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen

Op basis van het maatgevende faalmechanisme overslag en de maatgevende fysieke eigenschappen van verhoogde wegen die hierop van invloed zijn, kan de vereenvoudigde categorisering worden vormgegeven. Als resultaat van het uitgevoerde onderzoek zijn dan ook de volgende twee vereenvoudigde categorieën van verhoogde wegen met betrekking tot het waterkerend vermogen opgesteld.

Categorie A Taludhelling 1:1,5	Categorie B Taludhelling 1:3
• Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte, zie Figuur 31. Bij $h_k = 1,40m \rightarrow h_w = 1,07m$ • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33. Bij $h_w = 1,80m \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Overslag	• Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte, zie Figuur 31. Bij $h_k = 1,40m \rightarrow h_w = 1,16m$ • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33. Bij $h_w = 1,80m \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Overslag

Tussen beide categorieën ligt het onderscheid in de taludhelling van de verhoogde weg. Daarbij is het in de praktijk voor beide categorieën benodigd om de maatgevende waterstand en belastingsduur te bepalen aan de hand van de kruinhoogte die in elke specifieke situatie van toepassing is. Daarbij dient Figuur 31 gehanteerd te worden voor het bepalen van de maatgevende waterstand en Figuur 33 voor het bepalen van de minimaal toelaatbare belastingsduur.

Aan de hand van de bovenstaande vereenvoudigde categorisering en de geanalyseerde toetsingsresultaten, wordt een antwoord gegeven op de deelvragen van onderzoeksvraag 2.

Deelvraag 2.1: Welke faalmechanismen zijn van toepassing op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen?

De faalmechanismen overslag en instabiliteit van de buitentalud bekleding zijn van toepassing op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen tot een kruinhoogte van 1,80m. Bij een kruinhoogte groter dan 1,80m spelen, afhankelijk van de situatie, tevens microstabiliteit en binnenwaartse macrostabiliteit een rol.

Deelvraag 2.2: Wat zijn de maatgevende waterstanden of belastingstijden waarbij de categorieën bezwijken?

Het waterkerend vermogen waarbij de categorieën bezwijken is minimaal 5 dagen, met een maatgevende waterstand die afhankelijk is van de kruinhoogte van de verhoogde weg. Er is geen sprake van één maatgevende waterstand, de maatgevende waterstand varieert afhankelijk van de kruinhoogte. Bij een kruinhoogte van 1,40m geldt een maatgevende waterstand van $h_w = 1,07\text{m}$ voor de vereenvoudigde categorie A en $h_w = 1,16\text{m}$ voor categorie B.

De maatgevende waterstand is voor het faalmechanisme overslag altijd lager dan de kruinhoogte, dit in verband met de kruinhoogtemarge die benodigd is om het overslagdebiet $\leq 1,0\text{l/m/s}$ te houden.

Bij het opstellen van de vereenvoudigde categorisering zijn verschillende uitgangspunten gehanteerd, zoals vermeld in paragraaf 2.4. Deze uitgangspunten zijn in het onderstaande tekstvak opgenomen als scope voor het gebruik van de vereenvoudigde categorisering. Tevens zijn onder de scope aspecten opgenomen die bij de afbakening van het onderzoek zijn vastgelegd. Bij het gebruik van de vereenvoudigde categorisering is het van groot belang dat de opgestelde scope in acht worden genomen. De resultaten en conclusies zijn namelijk niet van toepassing indien een beschouwde weg in de praktijk buiten de opgestelde scope valt.

Scope voor het gebruik van de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen

- Het maatgevende faalmechanisme en de maatgevende waterstanden zijn van toepassing tot een kruinhoogte van 1,80m.
- In het onderzoek zijn enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd.
- Niet-waterkerende objecten in of op het weglichaam worden niet beschouwd.
- De talusbekleding wordt in het onderzoek als matig tot slecht erosiebestendig beschouwd.
- In het onderzoek is een statische waterlast tegen de verhoogde wegen beschouwd, zonder stromingskrachten. Wel is golfslag in beschouwing genomen.
- Op de vereenvoudigde categorisering is geen verkeersbelasting van toepassing.
- Duikers onder en coupures in verhoogde wegen worden in het onderzoek niet beschouwd.

4. Kwantitatieve analyse bij een statische verkeersbelasting

In dit hoofdstuk wordt de kwantitatieve analyse van de fysieke eigenschappen, opgesteld in paragraaf 2.4, uitgewerkt onder invloed van een statische verkeersbelasting op het wegdek. Door het toepassen van een statische verkeersbelasting wordt een situatie getoetst die zich in de praktijk kan voordoen wanneer er bijvoorbeeld een file ontstaat, dit kan het geval zijn tijdens een (acute)evacuatie. Aan de hand van de resultaten die in dit hoofdstuk gepresenteerd worden, ontstaat inzicht in de mogelijkheden om verhoogde wegen tijdens een overstroming te laten belasten door verkeer. Ondanks dat er in de praktijk situaties zullen zijn waarbij er geen sprake is van een statische belasting, maar juist van een dynamische belasting (rijdend verkeer), genereert het beschouwen van een statische belasting inzicht in de invloed van verkeer op het waterkerend vermogen van verhoogde wegen.

Dit hoofdstuk beschouwd allereerst in paragraaf 4.1 de eerder beschreven faalmechanismen. In deze paragraaf wordt de invloed van een statische verkeersbelasting op de faalmechanismen en de bijbehorende toetsingsmethodes beschreven, zodat duidelijk wordt op welke faalmechanismen de fysieke eigenschappen opnieuw getoetst moeten worden. De resultaten van deze toetsing worden weergegeven in paragraaf 4.2. Dit wordt gevolgd door een weergave van de conclusies van de kwantitatieve analyse bij een statische verkeersbelasting in paragraaf 4.3. Hierin worden de maatgevende faalmechanismen en waterstanden besproken voor de fysieke eigenschappen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen bij een statische verkeersbelasting.

4.1 Beschouwing van de faalmechanismen onder invloed van een statische verkeersbelasting

In hoofdstuk 3 is een uiteenzetting gedaan van verschillende faalmechanismen die kunnen optreden bij grondlichamen onder belasting van water. Hierbij is beschouwd welke faalmechanismen van toepassing zijn op verhoogde wegen zonder een statische verkeersbelasting. Uit deze analyse kwam naar voren dat de fysieke eigenschappen getoetst moesten worden op de faalmechanismen; overslag, micro-instabiliteit, binnenwaartse macrostabiliteit en instabiliteit van de buitentalud bekleding.

Voordat de fysieke eigenschappen getoetst kunnen worden met een statische verkeersbelasting, wordt eerst beschouwd welke invloed een statische verkeersbelasting heeft op het ontstaan van de faalmechanismen. Daarvoor wordt in subparagraaf 4.1.1 voor de verschillende faalmechanismen verwoord of ze van toepassing zijn op verhoogde wegen onder invloed van een statische verkeersbelasting. Tevens wordt beschouwd of er een nieuwe berekening op de fysieke eigenschappen moet worden uitgevoerd door de statische verkeersbelasting. Indien dit niet het geval is, worden de toetsingsresultaten uit hoofdstuk 3 overgenomen. De faalmechanismen waarop wel opnieuw getoetst moet worden komen aan bod in paragraaf 4.2.

4.1.1 Beschrijving van de faalmechanismen

In deze subparagraaf wordt voor de verschillende faalmechanismen, zoals genoemd in de inleiding van paragraaf 3.1, beschreven welke invloed het toepassen van een statische verkeersbelasting heeft op het ontstaan van het faalmechanisme. Hierbij wordt beschouwd of het faalmechanisme wel of niet van toepassing is en of er, door de statische verkeersbelasting, opnieuw op de fysieke eigenschappen getoetst moet worden.

In deze paragraaf wordt hoofdzakelijk ingegaan op de invloed van de statische verkeersbelasting op het ontstaan van de faalmechanismen. Mogelijke secundaire gevolgen van een statische verkeersbelasting, zoals het versnellen van het bezwijken, worden kort verwoord maar niet verder meegenomen in het onderzoek.

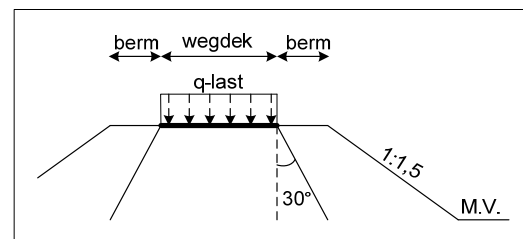
Piping en heave

De faalmechanismen piping en heave hebben betrekking op watervoerende zandlagen onder een grondlichaam. Zoals vastgesteld in hoofdstuk 3, heeft overstromingswater tegen verhoogde wegen geen verbinding met zandlagen in de natuurlijk ondergrond. Op basis hiervan is het ontstaan van de faalmechanismen piping en heave als niet van toepassing beschouwd op verhoogde wegen. De aanwezigheid van een statische verkeersbelasting verandert niets aan het ontbreken van een verbinding tussen het overstromingswater en zandlagen in de natuurlijk ondergrond. Een statische verkeersbelasting heeft daarom geen invloed op het ontstaan van de faalmechanismen piping en heave. Beide faalmechanismen zijn niet van toepassing op met een statische verkeersbelasting.

Microstabiliteit

Het faalmechanisme microstabiliteit is gerelateerd aan het uitspoelen van zand uit het binnentalud, doordat het freatisch vlak in het grondlichaam te hoog boven het maaiveld aan de binnentalud zijde uittreedt. Zonder statische verkeersbelasting is de toetsing op microstabiliteit van toepassing op verhoogde wegen. Deze toetsing richt zich op het afdrukken en afschuiven van de binnentalud bekleding. Het toepassen van een statische verkeersbelasting op het wegdek heeft op het ontstaan van microstabiliteit geen directe invloed.

Door een statische verkeersbelasting treedt er een toename van de grondspanningen in het weglichaam op. Deze toename vindt plaats op het moment dat de belasting op het wegdek komt. De toename van de grondspanning komt vervolgens snel in evenwicht doordat het weglichaam uit zand bestaat. Het freatisch vlak in het grondlichaam en de waterdruk tegen de



Figuur 34 - Schematisering van de krachtenafdracht in grond

taludbekleding veranderen niet. Verder kan een statische verkeersbelasting van invloed zijn op micro-instabiliteit door de krachtenafdracht van de belasting in de grond die leidt tot een hogere gronddruk op de taludbekleding. Door de hoek waaronder de krachtenafdracht in grond plaatsvindt, een hoek van 30° tot 45°, en de aanwezigheid van een wegberm bij wegen, bereikt de krachtenafdracht de taludbekleding echter niet (zie Figuur 34). In de figuur is een hoek van 30° weergegeven, deze hoek wordt in dit onderzoek aangehouden als de hoek waaronder de statische verkeersbelasting zijn krachten afdraagt aan de ondergrond. De krachtenafdracht van de belasting in het weglichaam komt zodoende niet in de buurt van de taludbekleding. Het faalmechanisme microstabiliteit blijft wel van toepassing op verhoogde wegen, maar de toetsingsresultaten zonder statische verkeersbelasting veranderen niet ten opzichte van de situatie met een statische verkeersbelasting. De resultaten voor de toetsing op microstabiliteit uit hoofdstuk 3 worden overgenomen.

Buitenwaartse macrostabiliteit

Buitenwaartse macrostabiliteit treedt hoofdzakelijk op bij een zeer snelle val van de overstromingswaterstand. Zoals toegelicht in hoofdstuk 3, wordt buitenwaartse macrostabiliteit als niet van toepassing beschouwd. Dit is voornamelijk het geval omdat een zeer snelle val van de overstromingswaterstand tegen verhoogde wegen niet waarschijnlijk is. De aanwezigheid van een statische verkeersbelasting heeft geen invloed op het dalen van de overstromingswaterstand. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat een statische verkeersbelasting geen

invloed heeft op het ontstaan van buitenwaartse macro-instabiliteit. Het faalmechanisme buitenwaartse macrostabiliteit is zodoende niet van toepassing op verhoogde wegen belast met een statische verkeersbelasting⁶.

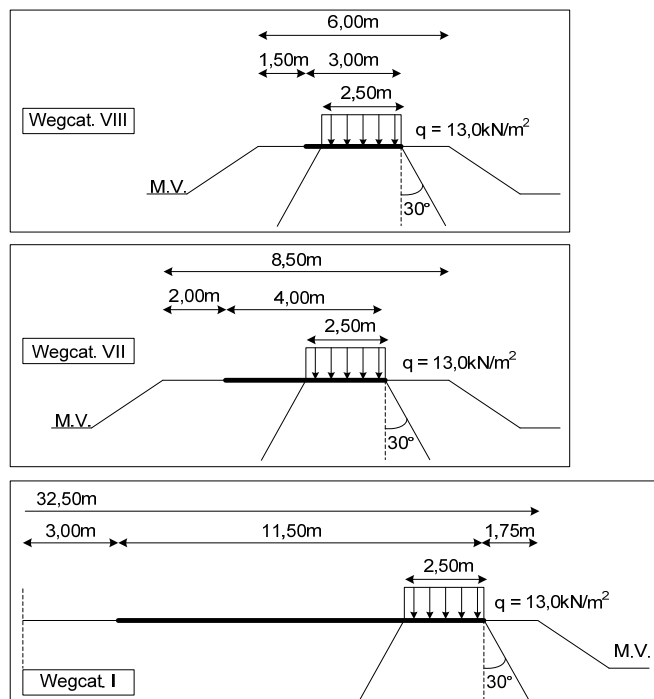
Overslag en overlopen

Het gevaar voor het optreden van de faalmechanismen overslag en overlopen wijzigen niet door de aanwezigheid van een statische verkeersbelasting en blijven van toepassing. De statische verkeersbelasting kan wel een secundaire invloed hebben op overslag. Enerzijds kan het overslagdebiet dat het binnentalud bereikt kleiner worden, doordat er verkeer op de weg staat. Anderzijds zal de belasting zorgen voor andere grondspanningen in het weglichaam, waardoor overslaand water dat het binnentalud bereikt mogelijk eerder tot bezwijken van het weglichaam zal zorgen. Hier wordt in de literatuur echter niet op ingegaan bij het beschouwen van overslag en wordt zodoende buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Het faalmechanisme overslag blijft van toepassing op verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting, waarbij de maatgevende waterstanden worden overgenomen van hoofdstuk 3.

Binnenwaartse macrostabiliteit

Binnenwaartse macrostabiliteit betreft het ontstaan van glijvlakken in het binnentalud, doordat grond, korrel en waterspanningen in en onder het grondlichaam niet meer in evenwicht zijn. De aanwezigheid van een statische verkeersbelasting op het weglichaam heeft hierop invloed. Wanneer de belasting boven een glijvlak staat, dan zal dit glijvlak eerder bezwijken. Daarom moet er opnieuw getoetst worden op binnenwaartse macro-instabiliteit met een statische verkeersbelasting.

Voor de toetsing op macrostabiliteit wordt dezelfde geometrie en uitgangssituatie gehanteerd zoals is beschreven in subparagraaf 3.1.3. Tevens worden dezelfde waarden voor de grondparameters aan-



Figuur 35 - Schematisering van de statische verkeersbelasting in MStab

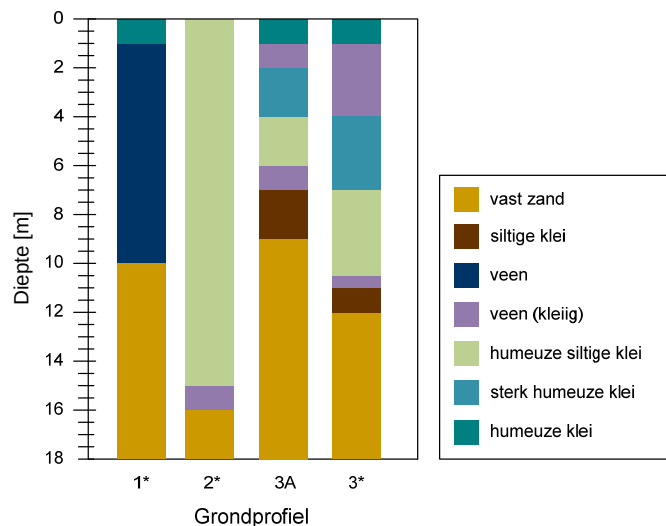
gehouden. Voor de toetsing wordt gebruik gemaakt van MStab. Met MStab is het mogelijk om een uniforme statische belasting op het grondlichaam aan te brengen. Voor de statische verkeersbelasting wordt een waarde aangehouden van $13,0 \text{ kN/m}^2$ over een breedte van 2,5m. Deze waarde is afkomstig uit de 'Handreiking Constructief ontwerpen' en wordt aanbevolen voor het beoordelen van de binnenwaartse macrostabiliteit (TAW, 1994, p. 19). Een verkeersbelasting van $13,0 \text{ kN/m}^2$ komt overeen met een vrachtwagen beladen met zand voor bijvoorbeeld het versterken van primaire of secundaire waterkeringen. De statische verkeersbelasting wordt in MStab geplaatst op de rand van de wegverharding over een breedte van 2,50m (zie Figuur 35). Bij wegcategorieën die meerdere rijstroken hebben, wordt enkel één statische verkeersbelasting over een breedte van 2,50m op de rand van de wegverharding geplaatst (zoals bij wegcategorie I). In deze situatie heeft

⁶ Indien er in de praktijk toch buitenwaartse macro-instabiliteit optreedt, dan zal er door de belasting een secundair effect optreden. Door een statische verkeersbelasting zal het buitentalud eerder afschuiven.

een statische verkeersbelasting namelijk het meeste invloed op het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit.

De natuurlijke ondergrond waarop de belasting wordt afgedragen, wordt gevarieerd aan de hand een samenvoeging van een aantal basisgrondprofielen. Deze samenvoeging staat beschreven in subparagraaf 3.2.3. In deze paragraaf kwam naar voren dat een aantal basisgrondprofielen dezelfde resultaten gaven bij de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit, deze basisgrondprofielen zijn vervolgens samengevoegd. In Figuur 36 zijn de samengevoegde grondprofielen waarop getoetst wordt met een statische verkeersbelasting weergegeven.

Uit subparagraaf 3.2.3 komt tevens naar voren dat een bredere kruin resulteert in een hogere weerstand tegen macro-instabiliteit. Op basis hiervan is er in subparagraaf 3.2.3 enkel getoetst op wegcategorie VIII, indien deze kruinbreedte voldeed, dan voldeden de andere wegcategorieën ook. Door het toepassen van een statische verkeersbelasting kan deze uitspraak echter niet direct worden overgenomen. De statische verkeersbelasting wordt namelijk op de rand van de wegverharding geplaatst. De afstand van de rand van de wegverharding tot het begin



Figuur 36 – Grondprofielen voor de toetsing met een verkeersbelasting

van het talud is afhankelijk van de bermbreedte en daarmee verschillend per wegcategorie (zie Figuur 35). Wanneer de statische verkeersbelasting dicht bij het talud staat, zal dit van invloed zijn op het optreden van het faalmechanisme macro-instabiliteit. Om inzicht te krijgen in de invloed van de kruinbreedte en de afstand van de belasting tot de taludhelling, wordt daarom voor grondprofiel 1* beschouwd welke invloed wegcategorie VIII, VII en I hebben op de toetsingsresultaten.

Instabiliteit van de buitentalud bekleding

Uit hoofdstuk 3 is naar voren gekomen dat de instabiliteit van de buitentalud bekleding als faalmechanisme optreedt zonder een statische verkeersbelasting. Het faalmechanisme richt zich op erosie van het buitentalud, waarbij een statische verkeersbelasting geen invloed zal hebben op het eerder of later ontstaan van een instabiele buitentalud bekleding. De statische verkeersbelasting heeft daarom geen invloed op de erosie van het buitentalud. Desondanks blijft het faalmechanisme van invloed op de stabiliteit van een verhoogde weg, doordat de erosie wel optreedt. De weerstand tegen de instabiliteit van de buitentalud bekleding blijft dan ook gelijk met en zonder statische verkeersbelasting. De toetsingsresultaten uit hoofdstuk 3 zijn tevens van toepassing op verhoogde wegen met een verkeersbelasting.

4.1.2 Faalmechanismen van toepassing op verhoogde wegen met een verkeersbelasting

Uit de beschrijvingen in de voorgaande alinea's kan afgeleid worden dat de volgende faalmechanismen van toepassing zijn op verhoogde wegen waarop een statische verkeersbelasting wordt aangebracht;

- overslag
- microstabiliteit
- binnenwaartse macrostabiliteit
- instabiliteit van de buitentalud bekleding

Voor de faalmechanismen overslag, microstabiliteit en instabiliteit van de buitentalud bekleding gelden dezelfde resultaten zoals gepresenteerd in hoofdstuk 3. De fysieke eigenschappen worden daarom op deze drie faalmechanismen niet aanvullend getoetst. Op binnenwaartse macrostabiliteit wordt wel een aanvullende toetsing uitgevoerd. De resultaten van deze toetsing worden gepresenteerd in paragraaf 4.2.

4.2 Toetsingsresultaten op binnenwaartse macrostabiliteit bij een statische verkeersbelasting

In deze paragraaf worden de toetsingsresultaten van de fysieke eigenschappen op binnenwaartse macro-instabiliteit met een statische verkeersbelasting weergegeven. De opbouw van de paragraaf is gestructureerd aan de hand van de vier grondprofielen 1*, 2*, 3A en 3* waarop getoetst is (zie Figuur 36 op pagina 58). Door middel van de toetsingsresultaten kan er een uitspraak worden gedaan over de maatgevende waterstand voor verschillende combinaties van fysieke eigenschappen. Opgemerkt moet worden dat er voor de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit is gerekend tot een kruinhoogte van 1,80m. De geometrische uitgangssituatie en parameterwaarden die zijn gebruik voor de toetsing zijn opgenomen in subparagraaf 4.1.1.

Grondprofiel type 1*

Voor grondprofiel type 1* zijn de toetsingsresultaten uit MStab weergegeven in Tabel 14. In de tabel is weergegeven welke kruinhoogte, waterhoogte en statische verkeersbelasting is toegepast. Voor de volledigheid is gecontroleerd en bevestigd dat het andere profiel in grondprofiel type 1* gelijke resultaten geeft.

Tabel 14 - Toetsingsresultaten uit MStab voor grondprofiel 1* met een statische verkeersbelasting, veiligheidsfactor $\geq 0,90$ voldoet

Grondprofiel	Kruinhoogte [m]	Waterhoogte [m]	Belasting [kN/m ²]	Veiligheidsfactor					
				Wegcategorie VIII (6,00m)		Wegcategorie VII (8,50m)		Wegcategorie I (32,50m)	
				1:1,5	1:3	1:1,5	1:3	1:1,5	1:3
1*	0,60	0,60	13,0	1,36	1,55	1,49	1,61	1,47	1,63
	1,20	1,20	13,0	1,03	1,23	1,14	1,30	1,16	1,35
	1,80	1,80	13,0	<u>0,89</u>	1,07	0,93	1,13	0,97	1,20
	1,80	1,77	13,0	0,90	Bovenstaande combinaties voldoen reeds aan de toetsing				
	1,80	1,80	12,3	0,90					

Uit de tabel kan afgeleid worden dat bij een taludhelling van 1:3 voor alle combinaties voldaan wordt aan de toetsing bij een statische verkeersbelasting van 13,0kN/m². Bij een taludhelling van 1:1,5 is dit niet het geval in combinatie met wegcategorie VIII. Bij een kruinhoogte en waterhoogte van 1,80m wordt niet voldaan aan de toetsing. Ter verduidelijking zijn in de laatste twee rijen van de tabel resultaten weergegeven waarbij wegcategorie VIII en een taludhelling van 1:1,5 wel voldoen. Bijvoorbeeld bij een waterhoogte van 1,77m of wanneer de belasting verlaagd wordt naar 12,3kN/m². Ter vereenvoudiging wordt ervoor gekozen om grondprofiel type 1* bij een taludhelling van 1:1,5 te beschouwen als bestand tegen macrostabiliteit met een statische verkeersbelasting van 13,0kN/m² waarbij de waterhoogte gelijk is aan de kruinhoogte tot een $h_k \leq 1,80$ m. Hiervoor wordt gekozen omdat het waterstandverschil bij een kruinhoogte van 1,80m slechts 0,03m is tussen het wel of niet voldoen aan de toetsing. Tevens is het belastingsverschil van 0,7kN/m² klein. Aan de hand van de toetsingsresultaten van wegcategorie VIII, VII en I kan afgeleid worden dat een bredere kruin resulteert in hogere veiligheidsfactoren. Indien wegcategorie VIII voldoet zullen ook de bredere wegcategorieën voldoen.

Samengevat:

- Grondprofiel type 1* voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit onder invloed van een statische verkeersbelasting. De maatgevende waterstand hierbij is gelijk aan de kruinhoogte.
- Naarmate de kruinbreedte groter wordt, neemt ook de veiligheidsfactor toe, indien wegcategorie VIII voldoet, zullen ook de andere wegcategorieën voldoen.

Grondprofiel type 2*

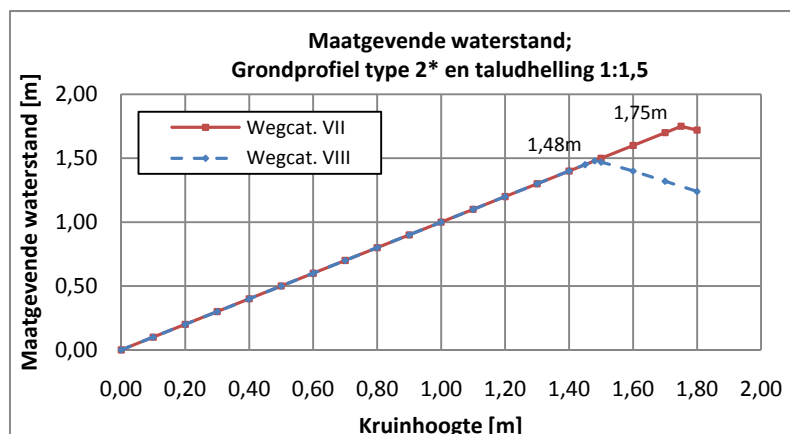
Voor grondprofiel type 2* zijn de toetsingsresultaten met een statische verkeersbelasting uit MStab weergegeven in Tabel 15. Voor de volledigheid is gecontroleerd en bevestigd dat de andere twee profielen in grondprofiel type 2* gelijke resultaten geven.

Tabel 15 - Toetsingsresultaten uit MStab voor grondprofiel 2* met een statische verkeersbelasting, veiligheidsfactor $\geq 0,90$ voldoet

Grondprofiel	Kruinhoogte [m]	Waterhoogte [m]	Belasting [kN/m ²]	Veiligheidsfactor			
				Wegcategorie VIII (6,00m)		Wegcategorie VII (8,50m)	
				1:1,5	1:3	1:1,5	1:1,5
2*	0,60	0,60	13,0	1,26	1,36	1,35	1,49
	1,20	1,20	13,0	0,98	1,10	1,05	1,15
	1,80	1,80	13,0	<u>0,83</u>	0,96	<u>0,89</u>	0,93

Uit de toetsingsresultaten is af te leiden dat bij een taludhelling van 1:3 en wegcategorie VIII wordt voldaan aan de toetsing. Op basis hiervan zijn er geen resultaten weergegeven voor de andere wegcategorieën bij een taludhelling van 1:3.

Bij een taludhelling van 1:1,5 voldoen zowel wegcategorie VIII als VII *niet* aan de toetsing bij



Figuur 37 - Maatgevende waterstand voor grondprofiel type 2* en taludhelling 1:1,5

een kruinhoogte en waterhoogte van 1,80m. Wegcategorie VI voldoet wel. Om inzicht te verschaffen in het verloop van de maatgevende waterstand per kruinhoogte voor wegcategorie VIII en VII, is berekend welke waterstand er maximaal mogelijk is tot een kruinhoogte van 1,80m (zie Figuur 37). Uit de grafiek is af te leiden dat wegcategorie VIII voldoet aan de toetsing bij een waterstand gelijk aan de kruinhoogte tot $h_k \leq 1,48\text{m}$. Bij een toename van de kruinhoogte vanaf een $h_k = 1,48\text{m}$ daalt de maatgevende waterstand. Voor wegcategorie VII ligt dit punt op een kruinhoogte van $h_k = 1,75\text{m}$. De maatgevende waterstand voor beide wegcategorieën is dan ook afhankelijk van de kruinhoogte van de verhoogde weg. Bij een kruinhoogte van 1,80m ligt de maatgevende waterstand voor wegcategorie VIII op een $h_w = 1,24\text{m}$ en voor wegcategorie VII op $h_w = 1,72\text{m}$. In dit geval is de statische verkeersbelasting gelijk gebleven en is de waterstand verlaagd.

Samengevat:

- Grondprofiel type 2* voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit onder invloed van een statische verkeersbelasting, waarbij de maatgevende waterstand afhankelijk is van de wegcategorie, de taludhelling en de kruinhoogte.

Grondprofiel type 3A en 3*

Voor grondprofiel type 3A en 3* zijn de toetsingsresultaten met een statische verkeersbelasting uit MStab weergegeven Tabel 16. De resultaten van wegcatégorie V en III zijn samengevoegd, omdat hieruit gelijke waarden naar voren komen. Voor de volledigheid is gecontroleerd en bevestigd dat het andere profiel in grondprofiel type 3* gelijke resultaten geeft.

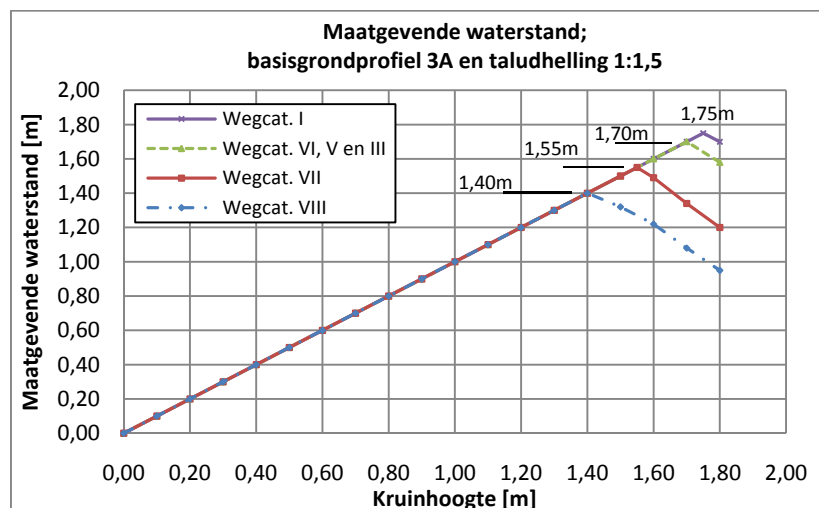
Tabel 16 - Toetsingsresultaten uit MStab voor profiel 3A en 3* met een statische verkeersbelasting, veiligheidsfactor $\geq 0,90$ voldoet

Grondprofiel	Kruinhoogte [m]	Waterhoogte [m]	Belasting [kN/m ²]	Veiligheidsfactor							
				Wegcat. VIII (6,00m)		Wegcat. VII (8,50m)		Wegcat. VI (11,60m)		Wegcat. V en III (12,30m)	
				1:1,5	1:3	1:1,5	1:3	1:1,5	1:3	1:1,5	1:1,5
3A	0,60	0,60	13,0	1,23	1,24	1,27	1,29	1,34	1,36	1,33	1,30
	1,20	1,20	13,0	0,96	0,98	1,01	1,02	1,05	1,10	1,05	1,05
	1,80	1,80	13,0	<u>0,80</u>	<u>0,84</u>	<u>0,84</u>	<u>0,88</u>	<u>0,87</u>	0,93	<u>0,87</u>	<u>0,89</u>
3*	0,60	0,60	13,0	1,36	1,52	1,50					
	1,20	1,20	13,0	1,05	1,23	1,14					
	1,80	1,80	13,0	<u>0,89</u>	1,07	0,93					
	1,80	1,77	13,0	0,90							
	1,80	1,80	12,3	0,90							
				Indien wegcatégorie VIII en/of VII voldoet, voldoen tevens de bredere wegcatégorieën en zijn zodoende niet berekend. Hetgeen wel noodzakelijk was voor profiel 3A.							

Uit de resultaten in de tabel is af te leiden dat voor grondprofiel type 3* een zelfde situatie aan de orde is als voor grondprofiel type 1*. Enkel bij een kruinhoogte en waterhoogte van 1,80m, een taludhelling van 1:1,5 en wegcatégorie VIII wordt niet voldaan aan de toetsing. Het waterstandverschil tussen het wel of niet voldoen is slechts 0,03m. Wederom wordt er daarom voor gekozen om grondprofiel 3* in zijn geheel te beschouwen als bestand tegen macrostabiliteit onder invloed van een statische verkeersbelasting tot een $h_k \leq 1,80m$.

Aan de hand van de tabel is duidelijk te zien dat grondprofiel type 3A niet goed bestand is tegen het faalmechanisme macrostabiliteit onder belasting van een statische verkeersbelasting bij een kruinhoogte van 1,80m. Bij een taludhelling van 1:1,5 voldoet namelijk geen van de wegcatégorieën bij een kruinhoogte en waterhoogte van 1,80m aan de toetsing. Ook een taludhelling van 1:3 toont bij een kruinhoogte van 1,80m tot en met wegcatégorie VII geen voldoende resultaat.

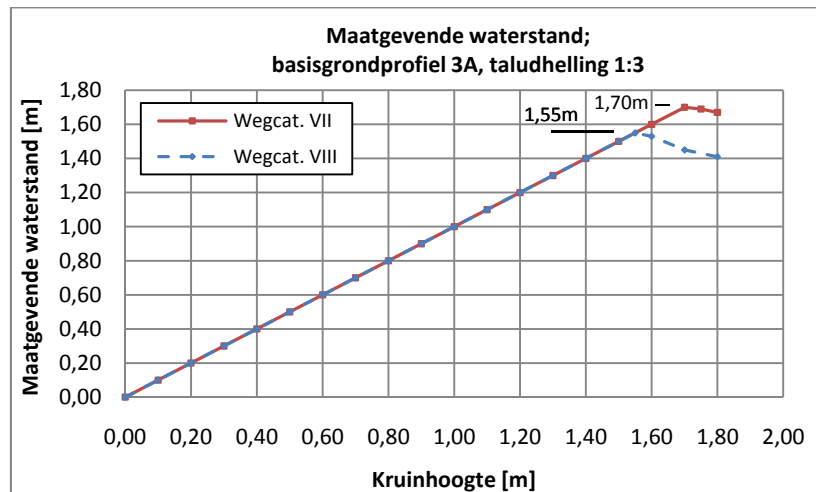
Verschillende combinaties van fysieke eigenschappen voldoen bij grondprofiel type 3A niet aan de toetsing. Om inzicht te verschaffen in het verloop van de maatgevende waterstand per kruinhoogte voor grondprofiel type 3A, is er bij een taludhelling van 1:1,5 en 1:3 berekend welke waterstand er maximaal bij verschillende kruinhoogtes mogelijk is.



Figuur 38 - Maatgevende waterstand voor basisgrondprofiel 3A en taludhelling 1:1,5

Voor een taludhelling van 1:1,5 is dat weergegeven in Figuur 38 voor wegcategorie VIII tot en met I. In de grafiek zijn wegcategorie VI, V en III samengevoegd, omdat uit de berekeningen voor alle drie de categorieën gelijke resultaten komen. Uit de grafiek is af te leiden dat wegcategorie VIII voldoet aan de toetsing bij een kruinhoogte gelijk aan de waterstand tot $h_k \leq 1,40\text{m}$. Voor wegcategorie VII ligt dit kantelpunt op een kruinhoogte van $h_k = 1,55\text{m}$, voor wegcategorie VI, V en III op een kruinhoogte van $h_k = 1,70\text{m}$ en voor wegcategorie I op een kruinhoogte van $h_k = 1,75\text{m}$. Vervolgens neemt de maatgevende waterstand af bij een toenemende kruinhoogte. Voor het bepalen van de maatgevende waterstand per wegcategorie en taludhelling is dan ook de kruinhoogte benodigd.

Voor grondprofiel type 3A voldoen wegcategorie VIII en VII niet aan de toetsing bij een taludhelling van 1:3. Ook voor deze combinaties is berekend wat de maatgevende waterstand bij verschillende kruinhoogtes is, dit is weergegeven in Figuur 39. Aan de hand van het figuur is te zien dat het kantelpunt van wegcategorie VIII, waarop de maatgevende



Figuur 39 - Maatgevende waterstand voor basisgrondprofiel 3A en taludhelling 1:3

waterstand niet meer gelijk is aan de kruinhoogte, ligt op een $h_k = 1,55\text{m}$. Voor wegcategorie VII ligt dit kantelpunt op $h_k = 1,70\text{m}$. Verder is aan het figuur te zien dat er tot een verwachte weghoogte van 1,40m voor beide wegcategorieën wordt voldaan aan de toetsing.

Samengevat:

- Grondprofiel type 3A voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit onder invloed van een statische verkeersbelasting, waarbij de maatgevende waterstand afhankelijk is van de wegcategorie, taludhelling en kruinhoogte.
- Grondprofiel type 3* voldoet aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit onder invloed van een statische verkeersbelasting. De maatgevende waterstand is gelijk aan de kruinhoogte tot $h_k \leq 1,80\text{m}$.

4.2.1 Overzicht van de toetsingresultaten op binnenwaartse macrostabiliteit

In de bovenstaande beschrijving van de toetsingsresultaten op binnenwaartse macrostabiliteit zijn verschillende maatgevende waterstanden naar voren gekomen. Om hier een overzichtelijk beoordeling van te kunnen maken, is in Tabel 17 een samengevatte weergave van de resultaten gepresenteerd. In de tabel is voor elke combinatie van fysieke eigenschappen weergegeven waar het kantelpunt zit waarbij een verhoging van de kruinhoogte leidt tot een verlaging van de maatgevende waterstand. Tevens is in de tabel aangegeven welke maatgevende waterstand er bij een kruinhoogte van 1,80m hoort.

Tabel 17 – Samengevat overzicht van de toetsingsresultaten op macrostabiliteit met een verkeersbelasting

		Profiel 1* en 3*		Profiel 2*			Profiel 3A						
Taludhelling		1:1,5 en 1:3	1:1,5		1:3		1:1,5			1:3			
Wegcategorie		Allen	VIII	VII	VI t/m I	Allen	VIII	VII	VI t/m III	I	VIII	VII	VI t/m I
$h_k = h_w$	$h_k \leq [m]$	1,80	1,48	1,75	1,80	1,80	1,40	1,55	1,70	1,75	1,55	1,70	1,80
$h_k = 1,80m$	$h_w = [m]$	1,80	<u>1,24</u>	1,72	1,80	1,80	<u>0,95</u>	<u>1,20</u>	1,58	1,70	<u>1,41</u>	1,67	1,80

Toelichting op Tabel 17: De rij $h_k = h_w$ geeft de waarde van het kantelpunt weer, vanaf waar de waterhoogte niet meer gelijkmatig stijgt met de kruinhoogte. De rij $h_k = 1,80m$ geeft de maatgevende waterstand weer bij een kruinhoogte van 1,80m. De onderstreepte waarden geven waterstanden weer die lager zijn dan de resultaten van het faalmechanisme overslag, hier wordt op ingegaan in subparagraaf 4.3.1.

Aan de hand van de tabel kan vastgesteld worden dat een deel van de combinaties van fysieke eigenschappen voldoet aan de toetsing tot een waterhoogte en kruinhoogte van 1,80m. Het overige deel voldoet alleen als de waterhoogte lager dan de kruinhoogte is (de dik gedrukte waarden). In deze gevallen is de maatgevende waterstand afhankelijk van de kruinhoogte van de verhoogde weg. De toetsingsresultaten die niet voldoen bij een waterhoogte gelijk aan de kruinhoogte zijn van belang voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering.

4.3 Conclusies kwantitatieve analyse bij een statische verkeersbelasting

In deze paragraaf wordt aan de hand van de toetsingsresultaten uit hoofdstuk 3 en paragraaf 4.2 beschouwd welke faalmechanismen tijdens een overstroming maatgevend zijn voor verhoogde wegen onder invloed van een statische verkeersbelasting. Vervolgens wordt beschouwd welke verkeersbelasting er mogelijk is wanneer de overstromingswaterstand zo hoog mogelijk wordt gehouden. Aansluitend wordt ingegaan op de maatgevende fysieke eigenschappen die van belang zijn voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. In subparagraaf 4.3.2 wordt tot slot de vereenvoudigde categorisering met een statische verkeersbelasting gepresenteerd. Dit leidt tot een antwoord op de deelvragen van onderzoeksvraag 3.

4.3.1 Maatgevende faalmechanismen en maatgevende fysieke eigenschappen

In paragraaf 4.1 zijn verschillende faalmechanismen besproken en is verwoord waarom ze wel of niet van toepassing zijn op verhoogde wegen. Hieruit is naar voren gekomen dat de faalmechanismen; overslag, microstabiliteit, binnenwaartse macrostabiliteit en instabiliteit van de buitentalud bekleding van toepassing zijn op verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting. Voor de faalmechanismen overslag, microstabiliteit en instabiliteit van de buitentalud bekleding zijn de toetsingsresultaten overgenomen uit hoofdstuk 3. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 18. Een samenvatting van de toetsingsresultaten op binnenwaartse macrostabiliteit is weergegeven in Tabel 17.

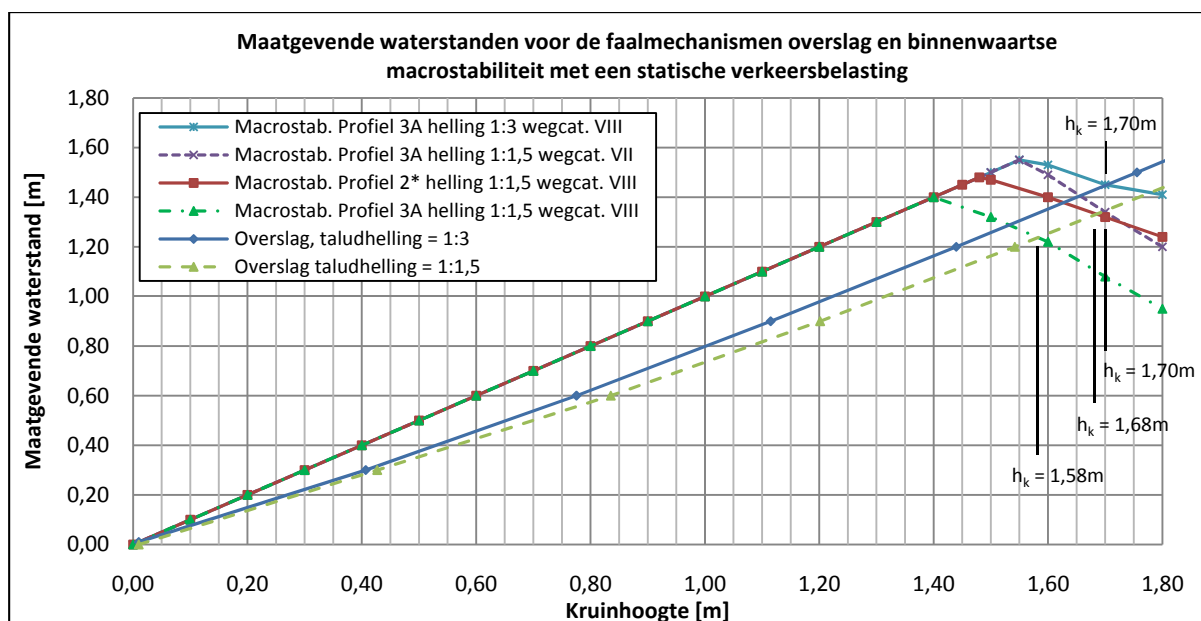
Tabel 18 - Maatgevende waterstand of belastingsduur per faalmechanisme bij een statische verkeersbelasting

Faalmechanisme	Maatgevende waterstand of belastingsduur	Maatgevende waterstand bij een kruinhoogte van 1,80m
Overslag	Afhankelijk van de kruinhoogte (zie Figuur 31)	Helling 1:1,5 $\rightarrow h_w = 1,43m$ Helling 1:3 $\rightarrow h_w = 1,54m$
Microstabiliteit	Gelijk aan de kruinhoogte tot een $h_k \leq 2,44m$	$h_w = 1,80m$
Instabiliteit van de taludbekleding	Afhankelijk van de waterdiepte (zie Figuur 33)	Bij $h_w = 1,80m \rightarrow t = 5$ dagen

Aan de hand van beide tabellen kan afgeleid worden dat het faalmechanisme overslag niet meer maatgevend is in alle situaties (zoals wel het geval zonder belasting). Door middel van het vergelijken van de maatgevende waterstanden bij een kruinhoogte van 1,80m is dit snel dit zien (de onderstreepte waarden in Tabel 17). Zo is bijvoorbeeld de maatgevende waterstand bij overslag gelijk aan 1,43m (bij een kruinhoogte van 1,80m en een taludhelling van 1:1,5). Voor binnenwaartse macrostabiliteit ligt de maatgevende waterstand lager bij zowel grondprofiel 2* met wegcategorie VIII ($h_w = 1,24m$) als bij grondprofiel 3A met wegcategorie VIII en VII ($h_w = 0,95m$ en $h_w = 1,20m$). In deze gevallen is binnenwaartse macro-instabiliteit het maatgevende faalmechanisme. Hetzelfde geldt voor een taludhelling van 1:3 in combinatie met grondprofiel 3A en wegcategorie VIII. Voor de andere combinaties is overslag maatgevend.

Microstabiliteit is niet van belang tot in ieder geval een kruinhoogte van 1,80m. Ook het faalmechanisme instabiliteit van de buitentalud bekleding wordt door de lange belastingsduur in verhouding tot een verwachte evacuatieduur niet als maatgevend beschouwd.

Zoals aangegeven, is bij een viertal combinaties van fysieke eigenschappen het faalmechanisme macro-instabiliteit maatgevend bij een kruinhoogte van 1,80m. Bij lagere kruinhoogtes is echter ook het faalmechanisme overslag van belang. Er is sprake van een overgangspunt in het maatgevende faalmechanisme naarmate de kruinhoogte groter wordt. Voor het bepalen van dit overgangspunt zijn in Figuur 40 de maatgevende waterstanden per kruinhoogte voor het faalmechanisme overslag en binnenwaartse macrostabiliteit weergegeven. Het overgangspunt wordt weergegeven door het snijpunt van de grafieklijnen van macrostabiliteit en overslag bij een overeenkomstige taludhelling.



Figuur 40 - Weergave van de maatgevende waterstanden voor de faalmechanismen overslag en binnenwaartse macrostabiliteit

Het figuur laat duidelijk zien dat het faalmechanisme overslag bij lagere kruinhoogtes de maatgevende waterstand bepaalt en daarmee het maatgevende faalmechanisme is. Bijvoorbeeld bij een kruinhoogte van 1,40m, op deze kruinhoogte is de maatgevende waterstand voor overslag 1,16m respectievelijk 1,08m, terwijl de maatgevende waterstand voor macro-instabiliteit voor alle vier de combinaties gelijk is aan de kruinhoogte van 1,40m.

Het overgangspunt van het faalmechanisme overslag naar het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit is als voorbeeld aangegeven met een verticaal gestippelde lijn voor grondprofiel 3A, een taludhelling van 1:1,5 en wegcategorie VIII. Het overgangspunt voor de vier combinaties ligt op de volgende kruinhoogtes:

- Profiel 3A, taludhelling 1:3 en wegcategorie VIII $\rightarrow h_k = 1,70\text{m}$
- Profiel 3A, taludhelling 1:1,5 en wegcategorie VII $\rightarrow h_k = 1,70\text{m}$
- Profiel 3A, taludhelling 1:1,5 en wegcategorie VIII $\rightarrow h_k = 1,58\text{m}$
- Profiel 2*, taludhelling 1:1,5 en wegcategorie VIII $\rightarrow h_k = 1,68\text{m}$

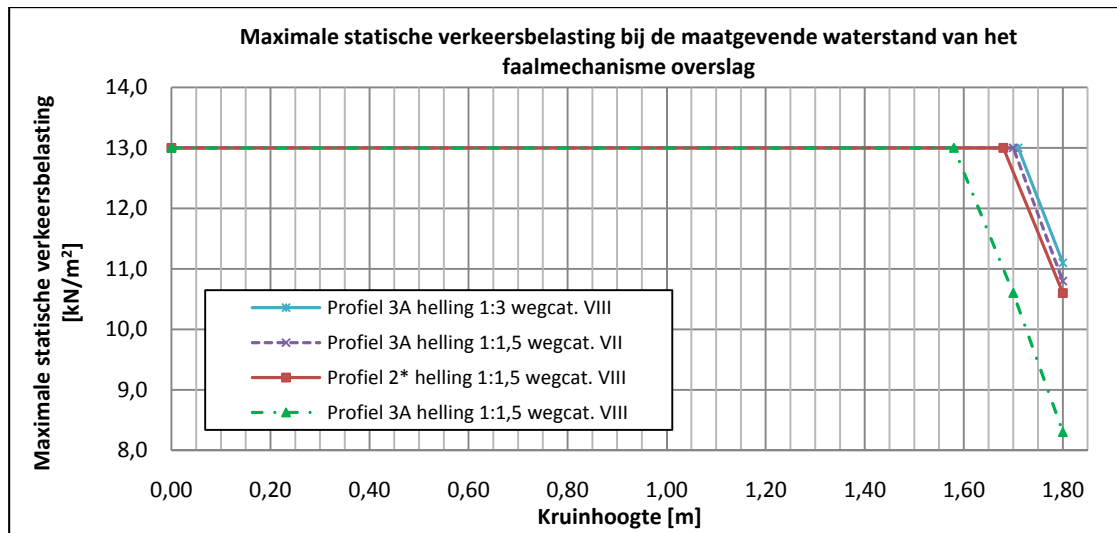
Indien de kruinhoogte van een verhoogde weg, die overeenkomt met een van de bovenstaande combinaties, hoger is dan de aangegeven waarde, dan is het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit maatgevend. Het gaat hierbij enkel om wegen met een kruinbreedte smaller dan 11,60m (wegcategorie VI), bij bredere wegen treedt geen binnenwaartse macrostabiliteit op (tot in ieder geval een kruinhoogte van 1,80m). Hierbij is er getoetst met een statische verkeersbelasting van $13,0\text{kN/m}^2$.

Maximale statische verkeersbelasting bij de maatgevende waterstand van overslag

In de bovenstaande beschrijving is naar voren gekomen bij welke kruinhoogte er voor vier combinaties van fysieke eigenschappen geen sprake meer is van overslag als maatgevend faalmechanisme, maar dat binnenwaartse macrostabiliteit maatgevend wordt. Deze overgang wordt veroorzaakt door de statische verkeersbelasting. De verkeersbelasting beïnvloedt namelijk het faalmechanisme macrostabiliteit, terwijl overslag hiervan geen invloed ondervindt.

Door de toegepaste statische verkeersbelasting te verlagen vanaf het zojuist bepaalde overgangspunt, kan worden voorkomen dat binnenwaartse macrostabiliteit het maatgevende faalmechanisme wordt. Hierbij is het van belang dat de maatgevende waterstand gelijk wordt genomen aan de maatgevende waterstand van het faalmechanisme overslag. Vervolgens moet de belasting worden verlaagd tot de waarde waarbij er voldaan wordt aan de toetsing op binnenwaartse macrostabiliteit. Op deze wijze wordt beschouwd welke statische verkeersbelasting maximaal toelaatbaar is bij de maatgevende waterstanden van het faalmechanisme overslag. Feitelijk wordt hiermee de situatie gezocht waarin zowel sprake is van het faalmechanisme overslag (met betrekking tot de waterstand) als van het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit (met betrekking tot de waterstand en de belasting).

In Figuur 41 is weergegeven wat de maximale statische verkeersbelasting is bij verschillende kruinhoogtes voor de vier combinaties van fysieke eigenschappen. Voor de overige combinaties van fysieke eigenschappen geldt dat de maximaal toelaatbare statische verkeersbelasting gelijk is aan de toegepaste belasting van $13,0\text{kN/m}^2$. Voor het opstellen van het figuur is bij elke kruinhoogte de maatgevende waterstand van het faalmechanisme overslag gehanteerd (zie Figuur 40). Als de verkeersbelasting groter is dan de maatgevende belasting in de grafiek, dan is er sprake van binnenwaartse macrostabiliteit.



Figuur 41 - Maximale statische verkeersbelasting bij de maatgevende waterstand van het faalmechanisme overslag

De bovenstaande figuur laat zien dat grondprofiel 3A met een taludhelling van 1:1,5 en wegcategorie VIII bij een kruinhoogte van 1,80m een maximale statische verkeersbelasting van $8,3\text{ kN/m}^2$ kan weerstaan om te voldoen aan de toetsing op macrostabiliteit en overslag. Voor de overige drie combinaties ligt de maximale verkeersbelasting hoger.

Een statische verkeersbelasting van $8,3\text{ kN/m}^2$ komt overeen met een belasting van 830 kg/m^2 . Een normale personenauto levert een belasting van circa 170 kg/m^2 , een SUV een belasting van circa 280 kg/m^2 en een grote touringcar een belasting van circa 600 kg/m^2 . Een statische verkeersbelasting van $8,3\text{ kN/m}^2$ of groter betreft dan ook bijvoorbeeld beladen vrachtwagens.

Op basis van de bovenstaande beschrijving kan gesteld worden dat er tijdens een (acute) evacuatie technisch gezien zonder problemen gebruik kan worden gemaakt van verhoogde wegen waar overstromingswater tegenaan staat. Wanneer beladen vrachtwagens of bijvoorbeeld militaire voertuigen gebruik maken van de wegen tijdens een overstroming, bestaat de kans dat er binnenwaartse macro-instabiliteit optreedt. Het verschil tussen het waterkerend vermogen van verhoogde wegen met of zonder een statische verkeersbelasting is daarmee klein.

Maatgevende fysieke eigenschappen

Aan de hand van de faalmechanismen overslag en binnenwaartse macrostabiliteit kunnen de maatgevende fysieke eigenschappen van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting worden bepaald. Buiten de fysieke eigenschappen van het

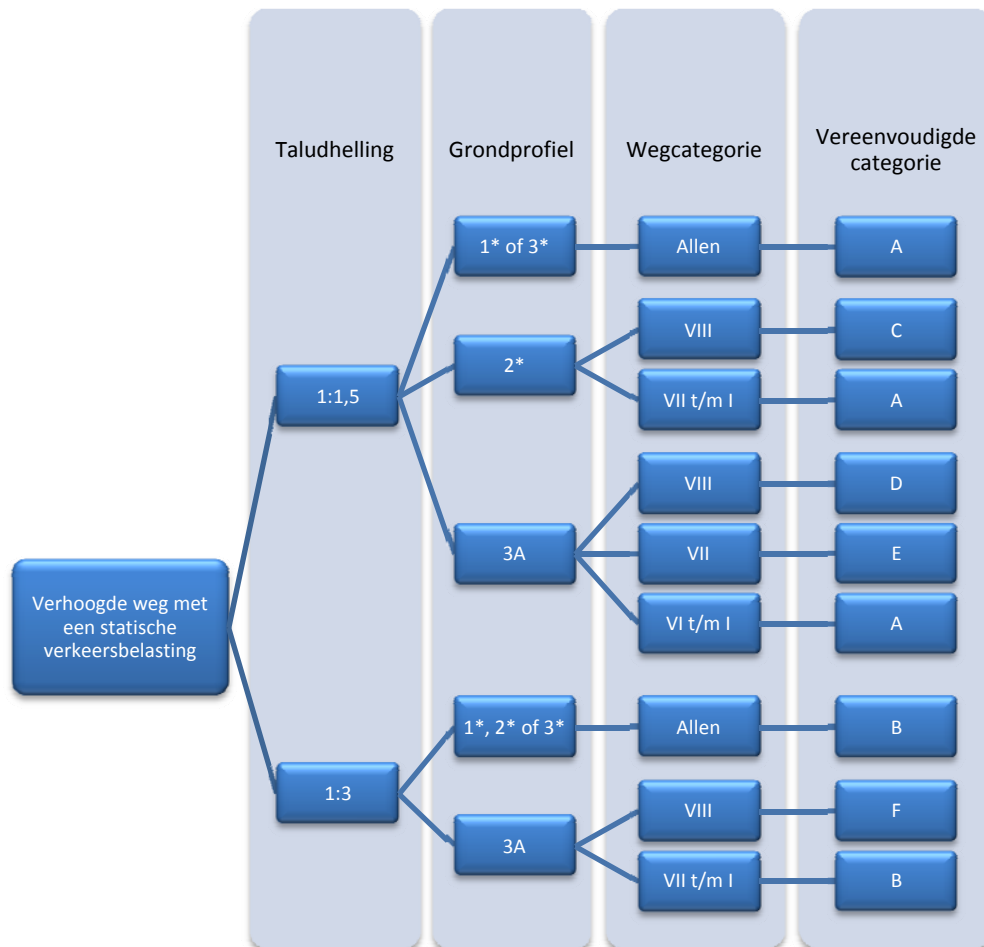
Tabel 19 - Maatgevende fysieke eigenschappen van belang voor het waterkerend vermogen bij een statische verkeersbelasting

Gevarieerde fysieke eigenschappen	Externe factoren
▪ Taludhelling; 1:1,5 of 1:3	▪ Strijklengte; $F = 1500\text{ m}$
▪ Grondprofiel; 1*, 2*, 3* of 3A	▪ Windsnelheid; $u = 8,5\text{ m/s}$
▪ Wegcategorie; VIII, VII of VI t/m I	
▪ Kruinhoogte; 0,00m tot 1,80m	

weglichaam zelf zijn er ook externe factoren van invloed op de weerstand tegen het bezwijken door overslag. In Tabel 19 is een overzicht weergegeven van de daadwerkelijke fysieke eigenschappen van belang voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting. Deze fysieke eigenschappen fungeren als criteria voor het opstellen van de vereenvoudigde categorisering met een statische verkeersbelasting.

4.3.2 Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting

Op basis van de maatgevende faalmechanismen binnenwaartse macrostabiliteit en overslag kan de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting worden opgesteld. De onderverdeling van de categorisering is gebaseerd op de maatgevende fysieke eigenschappen. De vereenvoudigde categorisering bestaat uit zes categorieën, waarbij categorie A en B overeenkomen met de categorieën uit hoofdstuk 3. Aan de hand van de schematisering in Figuur 42 is te bepalen in welke vereenvoudigde categorie een verhoogde weg valt. Onder de schematisering zijn de zes categorieën weergegeven.



Figuur 42 - Diagram voor het bepalen van de categorie behorende bij een verhoogde weg met een statische verkeersbelasting

Categorie A • Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte, zie Figuur 40 Bij $h_k = 1,40\text{m} \rightarrow h_w = 1,07\text{m}$ • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33 Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Overslag	Categorie C • Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur 40 en 41 • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33 Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag	Categorie D • Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur 40 en 41 • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33 Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag
Categorie E • Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur 40 en 41 • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33 Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag	Categorie B • Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte, zie Figuur 40 Bij $h_k = 1,40\text{m} \rightarrow h_w = 1,16\text{m}$ • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33 Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Overslag	Categorie F • Maatgevende waterstand: Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur 40 en 41 • Toelaatbare belastingsduur: Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur 33 Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen • Maatgevend faalmechanisme: Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag

De gepresenteerde vereenvoudigde categorisering bevat twee categorieën (A en B) waarbij het faalmechanisme 'overslag' maatgevend is voor alle combinaties van fysieke eigenschappen tot ten minste een kruinhoogte van 1,80m. Hieronder vallen tevens alle verhoogde wegen met een kruinbreedte die groter is dan 11,60m. Voor de overige vier categorieën is het maatgevende faalmechanisme afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting die wordt toegepast. Om het maatgevende faalmechanisme en de maatgevende waterstand te bepalen, wordt gebruik gemaakt van Figuur 40 bij een statische verkeersbelasting van $13,0\text{kN/m}^2$ en van Figuur 41 wanneer de statische verkeersbelasting variabel is. De maatgevende waterstanden zijn bij alle zes de categorieën afhankelijk van de kruinhoogte en dienen in een praktijksituatie bepaald te worden aan de hand van de kruinhoogte van de wegen die beschouwd worden.

Door middel van de opgestelde vereenvoudigde categorisering en de resultaten beschreven in deze paragraaf, wordt een antwoord gegeven op de deelvragen van onderzoeksvraag 3.

Deelvraag 3.1: Welke faalmechanismen zijn, onder invloed van de maximale statische verkeersbelasting, van toepassing op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen?

De faalmechanismen overslag, binnenwaartse macrostabiliteit en instabiliteit van de buitentalud bekleding zijn van toepassing op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen onder invloed van een statische verkeersbelasting, tot een kruinhoogte van 1,80m. Het maatgevende faalmechanisme is afhankelijk van de kruinhoogte, de taludhelling, de natuurlijke ondergrond en de kruinbreedte. Door middel van de vereenvoudigde categorisering met een statische verkeersbelasting wordt het maatgevende faalmechanisme

bepaald. Bij een kruinhoogte groter dan 1,80m speelt, afhankelijk van de situatie, tevens micro-instabiliteit een rol.

Deelvraag 3.2: Wat zijn de maatgevende waterstanden of belastingstijden waarbij de maximaal belaste categorieën bezwijken?

De maatgevende waterstanden waarbij de maximaal belaste categorieën bezwijken, zijn afhankelijk van de kruinhoogte, de taludhelling, de natuurlijke ondergrond en de kruinbreedte. Door middel van de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting worden de maatgevende waterstanden bepaald. Enkel wegen met een kruinbreedte kleiner dan 11,60m ondervinden invloed van de statische verkeersbelasting. De maatgevende belastingstijd waarbij de categorieën van verhoogde wegen bezwijken is minimaal 5 dagen.

Deelvraag 3.3: Welke statische verkeersbelastingen zijn maximaal toelaatbaar op de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen wanneer de maatgevende waterstanden zonder verkeersbelasting worden gehanteerd?

De statische verkeersbelastingen die maximaal toelaatbaar zijn wanneer de maatgevende waterstanden gehanteerd worden die mogelijk zijn zonder statische verkeersbelasting, zijn afhankelijk van de kruinhoogte, de taludhelling, de natuurlijke ondergrond en de kruinbreedte van de verhoogde weg. Tot in ieder geval een kruinhoogte van 1,58m is de maximaal toelaatbare belasting gelijk aan de toegepaste belasting van $13,0\text{kN/m}^2$ uit deelvraag 3.2. Tot een kruinhoogte van 1,80m is dit mogelijk indien de kruinbreedte groter dan 11,60m is. Afhankelijk van de vereenvoudigde categorie blijft de toelaatbare verkeersbelasting gelijk of neemt af bij een toenemende kruinhoogte. De maximaal toelaatbare statische verkeersbelasting wordt bepaald aan de hand van de vereenvoudigde categorisering met een statische verkeersbelasting.

Bij het opstellen van de vereenvoudigde categorisering zijn verschillende uitgangspunten gehanteerd, zoals vermeld in paragraaf 2.4. Deze uitgangspunten zijn in het onderstaande tekstvak opgenomen als scope voor het gebruik van de vereenvoudigde categorisering. Tevens zijn onder de scope aspecten opgenomen, die bij de afbakening van het onderzoek zijn vastgelegd. Bij het gebruik van de categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting is het van groot belang dat de opgestelde scope in acht worden genomen. De resultaten en conclusies van het onderzoek zijn van toepassing binnen de opgestelde scope.

Scope voor het gebruik van de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting

- Het maatgevende faalmechanisme en de maatgevende waterstanden zijn van toepassing tot een kruinhoogte van 1,80m.
- Als statische verkeersbelasting is er, behalve indien anders vermeld, een uniform verdeelde belasting van $13,0\text{kN/m}^2$ over een breedte van 2,5m toegepast.
- In het onderzoek zijn enkel wegen buiten de bebouwde kom beschouwd.
- Niet-waterkerende objecten in of op het weglichaam worden niet beschouwd.
- De taludbekleding wordt in het onderzoek als matig tot slecht erosiebestendig beschouwd.
- In het onderzoek is een statische waterlast tegen de verhoogde wegen beschouwd, zonder stromingskrachten. Wel is golfslag in beschouwing genomen.
- Duikers onder en coupures in verhoogde wegen worden in het onderzoek niet beschouwd.

5. Conclusies en aanbevelingen

Het doel van het uitgevoerde onderzoek is het verschaffen van kwalitatief en kwantitatief inzicht in het waterkerend vermogen van verhoogde wegen. Dit is bereikt door middel van het vereenvoudigd categoriseren van verhoogde wegen ten aanzien van waterkerende fysieke eigenschappen. Aan de hand van deze vereenvoudigde categorisering is inzicht verkregen in de maatgevende faalmechanismen en waterstanden bij elke categorie en daarmee in de invloed van verhoogde wegen op overstromingen en de beschikbaarheid voor evacuatie.

In dit hoofdstuk worden aan de hand van de onderzoeksvragen de belangrijkste conclusies van het onderzoek beschouwd, dit wordt gevolgd door een eindconclusie. Vervolgens worden een aantal aanbevelingen gedaan voor het beschouwen van verhoogde wegen in overstromingsscenario's en bij (acute)evacuaties. Afsluitend wordt ingegaan op aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

5.1 Conclusies van het onderzoek

De conclusies van dit onderzoek worden beschouwd aan de hand van de drie onderzoeksvragen, zoals opgesteld in hoofdstuk 1 van dit rapport. Aansluitend wordt de eindconclusie van het onderzoek beschreven.

Onderzoeksvraag 1: Welke fysieke eigenschappen dienen als criteria om uit verhoogde wegen een vereenvoudigde categorisering naar het waterkerend vermogen te genereren?

De fysieke eigenschappen van verhoogde wegen die dienen als criteria richten zich allereerst op de opbouw van de natuurlijke ondergrond, waarbij een onderscheid is gemaakt in acht basisgrondprofielen. Verder is de opbouw van het weglichaam van belang, hiervoor is een zandbed direct op het maaiveld aangehouden. Voor de taludbekleding van het weglichaam is gebruikt gemaakt van de lokaal aanwezige grond, wat overeenkomt met de bovenste grondlaag van de acht basisgrondprofielen. Voor de kruinbreedte is gevarieerd aan de hand van de minimale kruinbreedte van wegcategorie I (32,50m), III en V tot en met VIII (6,00m). Tot slot dient de taludhelling als criteria, in de taludhelling is gevarieerd tussen een helling van 1:1,5 of 1:3.

Onderzoeksvraag 2: Hoe groot is het waterkerend vermogen van verhoogde wegen?

Het waterkerend vermogen van verhoogde wegen zonder een verkeersbelasting is, in ieder geval tot een kruinhoogte van 1,80m, betekenisvol. Tot een kruinhoogte van ten minste 1,80m is het faalmechanisme overslag maatgevend. Het exacte waterkerende vermogen bij het faalmechanisme overslag is afhankelijk van de taludhelling en de kruinhoogte. Als externe invloedsfactoren zijn tevens de windsnelheid en de strijklengte van belang. Bij een kruinhoogte van 1,80m is de maatgevende waterstand 1,43m (taludhelling 1:1,5) respectievelijk 1,54m (taludhelling 1:3). Naarmate de kruinhoogte lager wordt, neemt ook de maatgevende waterstand af.

Het faalmechanisme instabiliteit van de buitentalud bekleding speelt pas een rol wanneer het buitentalud langer dan 5 dagen belast wordt met overstromingswater, waarbij kruinhoogtes lager dan 1,80m een langere belastingsduur kunnen weerstaan.

In dit onderzoek zijn verhoogde wegen tot een kruinhoogte van 1,80m beschouwd. Wanneer de kruinhoogte groter is dan 1,80m, zijn de faalmechanismen micro-instabiliteit en binnenwaartse macrostabiliteit tevens van toepassing. Afhankelijk van de fysieke eigenschappen van verhoogde wegen is micro-instabiliteit van toepassing vanaf een kruinhoogte van 2,44m en binnenwaartse macrostabiliteit vanaf een kruinhoogte van

1,80m. Beide faalmechanismen treden op bij grotere kruinhoogtes doordat de verhouding tussen de hoogte en de breedte van wegen gunstig is voor de weerstand tegen beide faalmechanismen.

Aan de hand van de opgestelde vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen, weergegeven in appendix J, kan de maatgevende waterstand zonder statische verkeersbelasting worden bepaald.

Onderzoeksvraag 3: Hoe groot is de invloed van statische verkeersbelastingen met betrekking tot het waterkerend vermogen van verhoogde wegen?

Er kan geconcludeerd worden dat statische verkeersbelastingen een negatieve invloed hebben op de stabiliteit van een weglichaam. De waarneembare invloed van statische verkeersbelastingen op verhoogde wegen is echter tot ten minste een kruinhoogte van 1,80m minimaal.

Het toepassen van een statische verkeersbelasting heeft enkel invloed op het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit. Dit komt doordat verkeersbelastingen een extra aandrijvende kracht genereren voor het laten afschuiven van delen van het binnentalud. Binnenwaartse macrostabiliteit zal, afhankelijk van de fysieke eigenschappen van een verhoogde weg, bij een maatgevende statische verkeersbelasting van $13,0\text{kN/m}^2$ optreden vanaf een kruinhoogte van 1,58m. Boven een kruinhoogte van 1,58m is het maatgevende faalmechanisme afhankelijk van de kruinhoogte, de taludhelling, de natuurlijke ondergrond en de kruinbreedte. Bij een kruinbreedte groter dan 11,60m zijn wegen in ieder geval bestand tegen een statische verkeersbelasting van $13,0\text{kN/m}^2$ tot een kruinhoogte van ten minste 1,80m. Indien verhoogde wegen smaller zijn dan 11,60m, zijn de wegen ten minste bestand tegen een statische verkeersbelasting tot $8,3\text{kN/m}^2$.

Aan de hand van de opgestelde vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen met een statische verkeersbelasting, weergegeven in appendix J, kan het maatgevend faalmechanisme en de maatgevende waterstand worden bepaald.

Eindconclusie van het onderzoek

Verhoogde wegen hebben een grote invloed op overstromingen en kunnen zodoende worden opgenomen in overstromingsscenario's en (acute)evacuatie plannen. Verhoogde wegen kunnen overstromingswater keren, vertragen of sturen waardoor gebieden niet of later zullen overstromen. Hierdoor kan extra evacuatietijd worden gegenereerd. Voor overstromingsscenario's is het van belang dat verhoogde wegen zonder verkeersbelasting tot ten minste een kruinhoogte van 1,80m kunnen worden beschouwd als bestand tegen overstromingen. Wegen met een statische verkeersbelasting kunnen tot ten minste een kruinhoogte van 1,58m worden beschouwd als bestand tegen overstromingen. Indien de kruinbreedte groter is dan 11,60m zelfs tot een hoogte van 1,80m. Het verschil tussen het waterkerend vermogen met en zonder een statische verkeersbelasting is klein, daarom is het vanuit de praktische toepasbaarheid van de vereenvoudigde categorisering aan te raden om enkel categorie A en B te beschouwen.

Voor de beschikbaarheid van (evacuatie)wegen kunnen verhoogde wegen enerzijds beschouwd worden als barrière tussen het punt waar een dijk is doorgebroken en de (evacuatie)weg die van belang is. Een tussen-gelegen verhoogde weg zal het overstromingswater keren tot de maatgevende waterstand en zodoende de overstroming sturen. Anderzijds kunnen wegen belast met overstromingswater een statische verkeersbelasting weerstaan tot ten minste een kruinhoogte van 1,58m. Hiermee is een eerste inzicht verkregen in de bruikbaarheid van verhoogde wegen tijdens een overstroming voor een (acute)evacuatie.

5.2 Aanbevelingen voor het beschouwen van verhoogde wegen tijdens overstromingen

Aan de hand van het in dit onderzoek verkregen inzicht in de invloed van verhoogde wegen op overstromingen, is het mogelijk om de onderstaande aanbevelingen te kunnen doen voor het beschouwen van verhoogde wegen tijdens overstromingen.

- Tot ten minste een kruinhoogte van 1,80m kunnen verhoogde wegen in beschouwing worden genomen bij overstromingsscenario's en evacuatieplannen. Hierbij moet voor het bepalen van de maatgevende waterstand gebruik worden gemaakt van de in dit rapport opgestelde vereenvoudigde categorisering. Indien er sprake is van een statische verkeersbelasting, moet er vanaf een kruinhoogte van 1,54m een afweging worden gemaakt tussen het verlagen van de toegestane statische verkeersbelasting of het verlagen van de toelaatbare waterstand.
- In het onderzoek zijn duikers onder en coupures in verhoogde wegen niet beschouwd. Duikers zorgen ervoor dat het waterpeil in de teensloten aan beide zijden van de weg gelijk blijft. Bij een overstroming zal er een debiet door deze duikers naar de binnenzijde van het weglichaam stromen. De grootte van het debiet door de duikers is onbekend. Op basis hiervan wordt aanbevolen om, tot nader onderzoek, voorzieningen te treffen voor het afsluiten van duikers onder belangrijke wegen. Hiermee wordt voorkomen dat het debiet door de duikers resulteert in een overstroming van het binnenland. Tevens wordt hiermee overmatige erosie rondom de duikers voorkomen, waardoor het weglichaam mogelijk eerder zal bezwijken.
- Het maatgevende faalmechanisme betreft overslag tot een kruinhoogte van 1,80m zonder een verkeersbelasting en 1,58m met een verkeersbelasting. Bij dit faalmechanisme is de maatgevende waterstand afhankelijk van de benodigde kruinhoogtemarge. Aanbevolen wordt om op de buitenzijde van de kruin een ophoging te plaatsen (zoals gebeurd in bosrijke gebieden voor het kanaliseren van klein gedierte), zodat hiermee een extra kruinhoogte wordt gecreëerd. Dit kan bijvoorbeeld door een houten afrastering. Op deze wijze kan de ophoging fungeren als kruinhoogtemarge, waardoor het mogelijk is om de toelaatbare waterstand te verhogen.

5.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In het uitgevoerde onderzoek zijn een aantal onderwerpen aan het licht gekomen waarop aanvullend onderzoek gewenst is:

- De invloed van een dynamische verkeersbelasting op verhoogde wegen belast door overstromingswater. Trillingen door een dynamische belasting zullen van invloed zijn op de grond, water en korrelspanningen in weglichamen waardoor faalmechanismen mogelijk eerder optreden. Door hierin inzicht te verschaffen wordt duidelijk wat de bruikbaarheid van verhoogde wegen belast door overstromingswater is. Op basis van de uitgevoerde toetsing met een statische verkeersbelasting kan hierover geen gefundeerde uitspraak worden gedaan.
- De exacte invloed van duikers en coupures onder verhoogde wegen. Hierbij dient onderzocht te worden hoe groot het debiet is dat door de duikers stroomt. Vervolgens is het van belang om te beschouwen welke invloed dit heeft op de stabiliteit van de verhoogde wegen en de snelheid waarmee het binnenland overstroomd.
- De invloed van het freatisch vlak in een weglichaam op de zettingen van het wegdek bij een statische en dynamische verkeersbelasting. Tijdens een overstroming verloopt het freatisch vlak lineair afnemend door

het weglichaam, in een situatie zonder overstroming is dat niet het geval. Tijdens een overstroming zullen er daardoor bij belasting van het wegdek ongelijke zettingen optreden waardoor het wegdek zelf mogelijk niet meer bruikbaar is voor verkeer.

- Het maatgevend faalmechanisme zonder statische verkeersbelasting betreft overslag tot ten minste een kruinhoogte van 1,80m. De maatgevende waterstand die hierbij toelaatbaar is, is afhankelijk van de kruinhoogtemarge en daarmee afhankelijk van het overslagdebiet dat is toegestaan op de kruin en het binnentalud. Het is wenselijk dat er vervolgonderzoek wordt uitgevoerd naar de invloed van de kruinbreedte van verhoogde wegen op het overslagdebiet dat is toegestaan. Hierbij kan tevens de invloed van de wegverharding op de kruin worden beschouwd.
- In het uitgevoerde onderzoek zijn niet waterkerende objecten buiten beschouwing gelaten. Om inzicht te krijgen in de mate van invloed van niet waterkerende objecten op het waterkerend vermogen van verhoogde wegen, is het wenselijk dat hier vervolgonderzoek naar wordt gedaan.

Bibliografie

- Alam, M. J., & Zakaria, M. (2002). Design and Construction of Roads in Flood Affected Areas. *Engineering Concerns of Flood*, 91 - 99.
- Alterra Wageningen. (2010, Februari 12). *Informatie over bodemdata*. Opgehaald van www.bodemdata.nl
- Biesboer, F. (2009). Pipingproef. *De Ingenieur*, 38 - 39.
- CROW. (2002). *Handboek Wegontwerp - Basiscriteria*. Ede: CROW.
- CROW. (2002). *Handboek Wegontwerp - Erftoegangswegen*. Ede: CROW.
- CROW. (2002). *Handboek Wegontwerp - Gebiedsontsluitingswegen*. Ede: CROW.
- CROW. (2002). *Handboek Wegontwerp - Stroomwegen*. Ede: CROW.
- CROW. (2005). *Keuzemodel wegconstructies - Achtergrondrapport*. Ede: CROW.
- CROW. (2005). *Keuzemodel wegconstructies*. Ede: CROW.
- Delft GeoSystems. (2010). *Informatie over MStab*. Opgeroepen op maart 9, 2010, van <http://www.delftgeosystems.nl/>
- Delft GeoSystems. (2007). *MStab Version 9 - Slope Stability Software for Soft Soil Engineering*. Delft: GeoDelft.
- Den Haan, A. J., & Feddema, A. (oktober 2009). Deformatie en sterkte van ophogingen en dijken op slappe Nederlandse grond. *Geotechniek*, 52 - 55.
- Dhakal, M. R. (2007). *Assessment of Hydrodynamic impacts of floods on Roads and Road structures in the Lower Mekong Floodplains*. Delft: UNESCO - IHE.
- Doorewaard, P., & Verschuren, H. (2005). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Utrecht: Lemma BV.
- Esselink, S. F. (2009). *Lijnelementen in de polders en de invloed daarvan op het overstromingsverloop*. Enschede: Universiteit Twente.
- GeoDelft. (2000). *Microstabiliteit: overzicht modellering CO-393440/81 versie 1*. Delft: GeoDelft.
- KNMI. (sd). *KNMI HYDRA PROJECT*. Opgeroepen op mei 2010, van KNMI: <http://www.knmi.nl/samenw/hydra/cgi-bin/freqtab.cgi>
- Knoeff, J. G. (2001). *Effectiviteit tweede waterkeringen / Fase 4.1*. Delft: GeoDelft.
- Knoeff, J. G. (2001). *Effectiviteit tweede waterkeringen / Fase 4.2*. Delft: GeoDelft.
- Knoeff, J. G. (2003). *Toetsen waterkerend vermogen (spoor)wegen en slaperdijken / Fase 5.1*. Delft: DelftCluster.
- Knoeff, J. G., & Calle, E. O. (2002). *Indicatie van reststerkte na binnenwaartse macroinstabiliteit*. Delft: Delft Cluster.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen*. Den Haag: RWS.
- NEN. (1993). *NEN 6740; Geotechniek TGB 1990 Basiseisen en belastingen*. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- Rijkswaterstaat. (1991). *Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Onderbouw - Deel 1 Algemeen*. Delft: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2004). *Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Onderbouw, Product-methodenbladen, versie 2.0*. Delft: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1998). *Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Verhardingen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2007). *Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen*. Rotterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

- Rijkswaterstaat. *Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen - HOOFDSTUK I BASISCRITERIA*.
- Rijkswaterstaat. (1993). *Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen - HOOFDSTUK III DWARSPROFIELEN*. Rotterdam: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (1986). *Richtlijnen voor het ontwerpen van niet-autosnelwegen - hoofdstuk II DWARSPROFIELEN*. 's-Gravenhage: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2006). *Veiligheid Nederland in Kaart - Inschatting van het aantal slachtoffers ten gevolge van overstroming*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Schreuder, A. (2008, september). *'Eeuwig dijken verhogen helpt niet'*. Opgeroepen op december 2009, van de website van het NRC Handelsblad: http://www.nrc.nl/binnenland/deltacommissie/article1836586.ece/Eeuwig_dijken_verhogen_helpt_niet
- Steketee, H. (1997, mei). *Hoe veilig is veilig genoeg?* Opgeroepen op december 2009, van de website van het NRC Handelsblad: <http://www.nrc.nl/W2/Lab/Profiel/Waterkering/veiligheid.html>
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). (2007). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen*. Zwijndrecht: Hageman Fulfilment.
- STOWA. (2009). *Handreiking ontwerpen & verbeteren Waterkeringen langs regionale rivieren*. Utrecht: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- STOWA. (2007). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen*. Zwijndrecht: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- TAW. (1994). *Handreiking Constructief ontwerpen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (1994). *Handreiking Constructief ontwerpen, bijlagen 2 - 5*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (1985). *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken - deel 1*. 's-Gravenhage: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (1998). *TECHNISCH RAPPORT EROSIEBESTENDIGHEID VAN GRASLAND ALS DIJKBEKLEDING*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (2002). *Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij dijken*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (2001). *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (1999). *Technisch rapport Zandmeevoerende Wellen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Theunissen, R. P. (2006). *A probabilistic flood risk assessment and the impact of compartmentation*. Delft: Technische Universiteit Delft.

Personen:

- Ir. L.J.M. Houben. 12 maart 2010. *Interview*. Technische Universiteit Delft. Universitair docent afdeling Bouw – Wegbouwkunde.
- Dr. ir. M. Van. 29 april 2010. *Interview*. Deltares, Geodelft. Deskundige op het gebied van dijken.

Appendices

Appendix A	Lijst met afkortingen en symbolen
Appendix B	Verklarende woordenlijst
Appendix C	Dijkkringgebieden in Nederland
Appendix D	Opbouwconstructies voor grondlichamen van wegen
Appendix E	Toelichting toegestaan overslagdebiet
Appendix F	Rekenregels faalmechanisme overslag
Appendix G	Potentiële windsnelheid in Nederland
Appendix H	Rekenregels faalmechanisme micro-instabiliteit
Appendix I	Invloedsfactoren voor de toetsing van binnenwaartse macro-instabiliteit met MStab
Appendix J	Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen

Appendix A Lijst met afkortingen en symbolen

Afkortingen

CROW	Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek
EPS	Expanded polystyrene
GHW	Gemiddeld Hoogwater
GWS	Grondwaterstand
HW	Handboek Wegontwerp
Khm	Kruinhoogtemarge
M.V.	Maaiveld
NOA	Nieuwe Ontwerprichtlijnen Autosnelwegen
NWO	Niet-waterkerende objecten
ROA	Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen
RONA	Richtlijnen voor het Ontwerpen van Niet-Autosnelwegen
SF	Safety factor
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
SUV	Sports Utility Vehicle
TAW	Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
VNK	Veiligheid Nederland in Kaart
VTV	Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen

Symbolen

A	Lengte waarover een vlak maaiveld achter het talud aanwezig is
b_{kr}	Kruinbreedte
c	Cohesie van klei
C_E	Graserosiecoëfficiënt
d	Waterdiepte van het overstromingswater
d_k	Dikte van de kleibekleding op het talud
d_z	Zodedikte van de grasbekleding
F	Strijklengte
f_a en f_k	Factor afhankelijk van de dikte van het slecht doorlatend pakket gedeeld door kruinhoogte
g	Versnelling van de zwaartekracht
h_k	Kruinhoogte
h_{khm}	Kruinhoogtemarge
h_w	Waterstand van het overstromingswater
Δh	Stijghoogte van het freatisch vlak, het sijpeloppervlak
ΔH	Hoogteverschil tussen de waterstand voor de kering en erachter of het maaiveld
H_s	Golfhoogte
k	Minimaal vereiste kruinbreedte
kN	Kilo newton
L	Kwelweglengte
l	liter

m	meter
n	Cotangens van de taludhelling
q	Overslagdebiet
$q_{1:1,5}$	Overslagdebiet bij een taludhelling van 1:1,5
$q_{1:3}$	Overslagdebiet bij een taludhelling van 1:3
q_{vb}	Statische verkeersbelasting
s	seconde
s_0	Golfsteilheid
T	Golfperiode
$T_{m-1,0}$	Spectrale golfperiode
t_{max}	Maximaal toelaatbare belastingsduur van het buitentalud
u	Windsnelheid
Δx	Lengte van een stuk taludbekleding waarmee wordt gerekend bij micro-instabiliteit
Δx_{max}	Maximale lengte van de taludbekleding onder invloed van afdrucken bij micro-instabiliteit
α	Hellingshoek van het talud
ξ_0	Brekerparameter
γ	Invloedsfactoren voor de berekening van het overslagdebiet, veiligheidscoëfficiënt
γ_d	Veiligheidsfactor voor het gebruikte model bij micro-instabiliteit
γ_n	Veiligheidsfactor voor de schade bij micro-instabiliteit
$\gamma_{m,c}$	Materiaalfactor voor de cohesie
$\gamma_{m,\phi}$	Materiaalfactor voor de hoek van inwendige wrijving
$\gamma_{m,p}$	Materiaalfactor voor de voor de volumieke massa
γ_{sat}	Nat volumiek gewicht van de grond
γ_d	Droog volumiek gewicht van de grond
ρ_w	Volumieke massa van water
ρ_g	Volumieke massa van grond
σ_g	Gronddruk aan de onderzijde van het afdekkend pakket
σ_w	Opwaartse waterdruk aan de onderzijde van het afdekkend pakket
ϕ	Hoek van inwendige wrijving van klei

Appendix B Verklarende woordenlijst

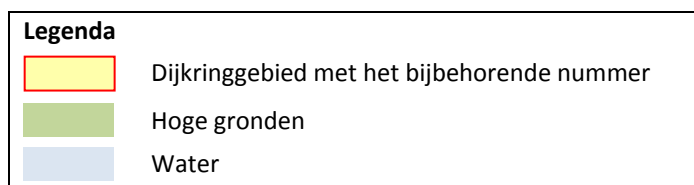
Basisgrondprofiel	Vastgestelde profielen voor de opbouw van de natuurlijke ondergrond
Bermbeveiligingsconstructie	Een constructie ter afscherming van een gevarezone van een verkeersweg of ter beperking van de risico's daarin
Capillaire werking	Vermogen van grond om water aan te zuigen en vast te houden boven het freatisch vlak
Coupure	Onderbreking in een weglichaam voor de doorvoer van een (water)weg of spoorweg
Drooglegging	De afstand tussen de verharding en de freatische grondwaterstand
Faalmechanisme	Mechanisme waarop een grondlichaam bezwijkt (bijvoorbeeld piping of overslag)
Freatisch vlak	De vrije grondwaterspiegel
Golfperiode	De tijdsduur tussen twee golven
Glijvlak	Het vlak waarlangs grond afglijdt bij het faalmechanisme macrostabiliteit
Kruinhoogte	Hoogte van een grondlichaam of verhoogde weg
Kruinhoogtemarge	Het verschil tussen de kruinhoogte en de verwachte waterstand
Kwelweglengte	Lengte van de kwelweg, van het intreepunt naar het uittredepunt
Lijnelement	Verhoging in het landschap, zoals een (spoor)weglichaam
Niet-waterkerend object	Object op of in een dijk dat geen waterkerende functie heeft, zoals leidingen, woningen en bomen
Obstakelvrije zone	Het gebied naast de rijbaan waar zich geen obstakels mogen bevinden
Overslagdebiet	De hoeveelheid liter water die per seconde per meter dijk overslaat
Safety factor	De veiligheidsfactor in MStab die het optreden van macrostabiliteit weergeeft
Sijpeloppervlak	Het oppervlak op het binnentalud waar water uitsijpelt
Striijklengte	Lengte waarover de wind over het wateroppervlakte strijkt
Teelaardelaag	Een laag van de taludbekleding die bestaat uit lokaal aanwezige grond
Vereenvoudigde categorisering	Een overzicht van categorieën die gebaseerd zijn op fysieke eigenschappen van verhoogde wegen die van significant belang zijn voor het waterkerend vermogen van verhoogde wegen
Vorstindringingsdiepte	De afstand waarover vorst indringt in het weglichaam vanaf de top van de wegverharding
Zodedikte	De dikte van de doorworteling in de toplaag van een grasmat

Appendix C Dijkkringgebieden in Nederland

In het onderstaande figuur is een overzicht weergegeven van de dijkkringgebieden in Nederland.



Figuur 43 - Dijkkringgebieden in Nederland (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, p. 24)



Appendix D Opbouwconstructies voor grondlichamen van wegen

In deze appendix wordt een overzicht getoond van de verschillende opbouwconstructies voor het grondlichaam van wegen, die zijn afgeleid uit drie verschillende bronnen. In de onderstaande Tabel 20 is per bron aangegeven welke constructiemethoden worden verwoord.

Tabel 20 - Overzicht van opbouwconstructies voor grondlichamen van wegen

(Rijkswaterstaat, 2004) Product-methodenbladen	(Rijkswaterstaat, 1991, p. 4.7) Deel 1 Algemeen	(CROW, 2005, p. 18) Keuzemodel
Zandophoging op maaiveld met verticale kunststofdrains	Zandbed op ophoging op diepe grondvervangning	Zandophoging
Zandophoging op maaiveld met verticale kunststofdrains en extra ophoging	Zandbed op ophoging op ondiepe grondvervangning	Zandophoging, met 1m tijdelijke extra overhoogte
Polystyreeschuim ophoging met belastingspreidende (schuim)-betonplaat (evenwichtsconstructie)	Zandbed op ophoging op maaiveld	Zandophoging, met 2m tijdelijke extra overhoogte
Polystyreeschuim ophoging met voorbelasting (zand)	Zandbed in ondiep cunet	Zandophoging plus verticale kunststofdrains
Schuimbeton evenwichtsconstructie	Zandbed op maaiveld	Zandophoging plus verticale kunststofdrains, met 1m tijdelijke extra overhoogte
Zandophoging op maaiveld met luchtdrukconsolidatie	Aanleg op van nature aanwezig materiaal	Zandophoging plus verticale kunststofdrains, met 2m tijdelijke extra overhoogte
Damwand tussen verbreding en bestaande weg		Zandophoging plus zandschermen
Damwand aan buitenzijde verbreding		Zandophoging plus zandschermen, met 1m tijdelijke extra overhoogte
Keermuur aan buitenzijde verbreding, bestaande uit panelen met grondwapening		Zandophoging plus zandschermen, met 2m tijdelijke extra overhoogte
Zandophoging op paalfundering		Lichtgewicht ophoogmateriaal
Zandophoging op gestabiliseerde grondkolommen		Lichtgewicht ophoogmateriaal plus verticale kunststofdrains
Zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen (GEC)		Lichtgewicht ophoogmateriaal plus zandschermen
Zandophoging op verticale zandschermen met bemaling		
Zandophoging op maaiveld met de BeauDrain methode		

Appendix E Toelichting toegestaan overslagdebiet

In deze appendix wordt toegelicht wat het maximaal toelaatbare overslagdebiet is voor verhoogde wegen, waarbij wordt gehanteerd dat verhoogde wegen een matig tot slecht erosiebestendige bekleding hebben.

In de 'Handreiking Constructief Ontwerpen, Bijlagen 2 – 5' wordt onder andere ingegaan op het ontstaan van erosie op het binnentalud door een hoge mate van overslag. Als gevolg van de erosie treedt het bezwijkmechanisme afschuiving van het binnentalud op. Voor het bepalen van het gevaar op afschuiving van het binnentalud zijn vier parameters met bijbehorende categorieën van belang (TAW, 1994):

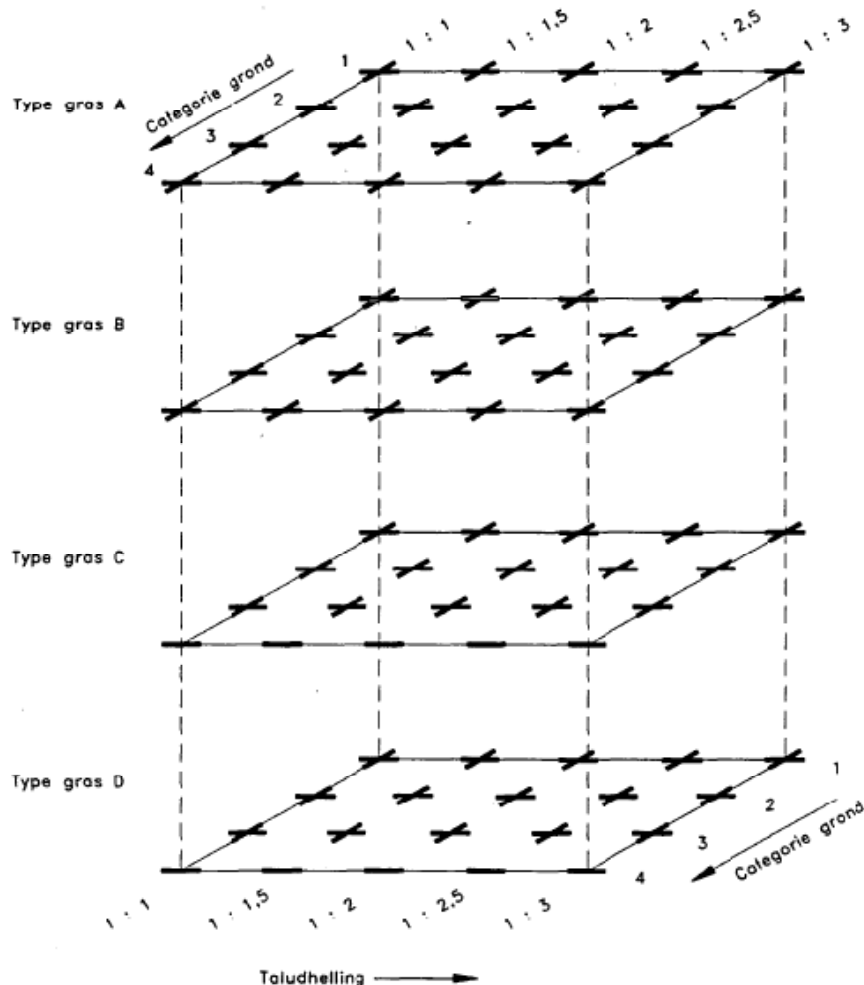
Parameters	Categorie
▪ Overslagdebiet	0,1 en 1,0 en 10l/m/s
▪ Helling van het binnen talud	1:1, 1:1,5 en 1:2, 1:2,5 en 1:3
▪ Type grond	Categorie 1 klei: vloeigrens > 45% en zandgehalte < 40% Categorie 2 klei: vloeigrens < 45% en zandgehalte < 40% Categorie 3 klei: zandgehalte > 40% Categorie 4 zand: lutumpercentage > 8%
▪ Type grasmat	Zie Figuur 44 Categorie A: Waterstaatkundig of natuurtechnisch beheer Categorie B: Aangepast agrarisch of extensief agrarisch beheerd Categorie C: Intensief agrarisch beheerde grond, slecht onderhouden Categorie D: Praktisch geen begroeiing aanwezig

Het type grond dat is gebruikt voor het binnentalud hangt af van de lokale situatie en zal variëren van een slecht doorlatende top laag (klei, categorie 1) tot een goed doorlatende top laag (zand, categorie 4). Voor het type en de kwaliteit van de grasmat wordt gebruikt gemaakt van het uitgangspunt dat de taludbekleding van verhoogde wegen een matig tot slechte

Doorworteling		
Sterk		
Matig		
Weinig		
Bedekking		
50%	70%	85%
100%		
B	A	A
C	B	A
C	C	B

Figuur 44 - Type grasmat als functie van bedekking en doorworteling (TAW, 1994, p. 62)

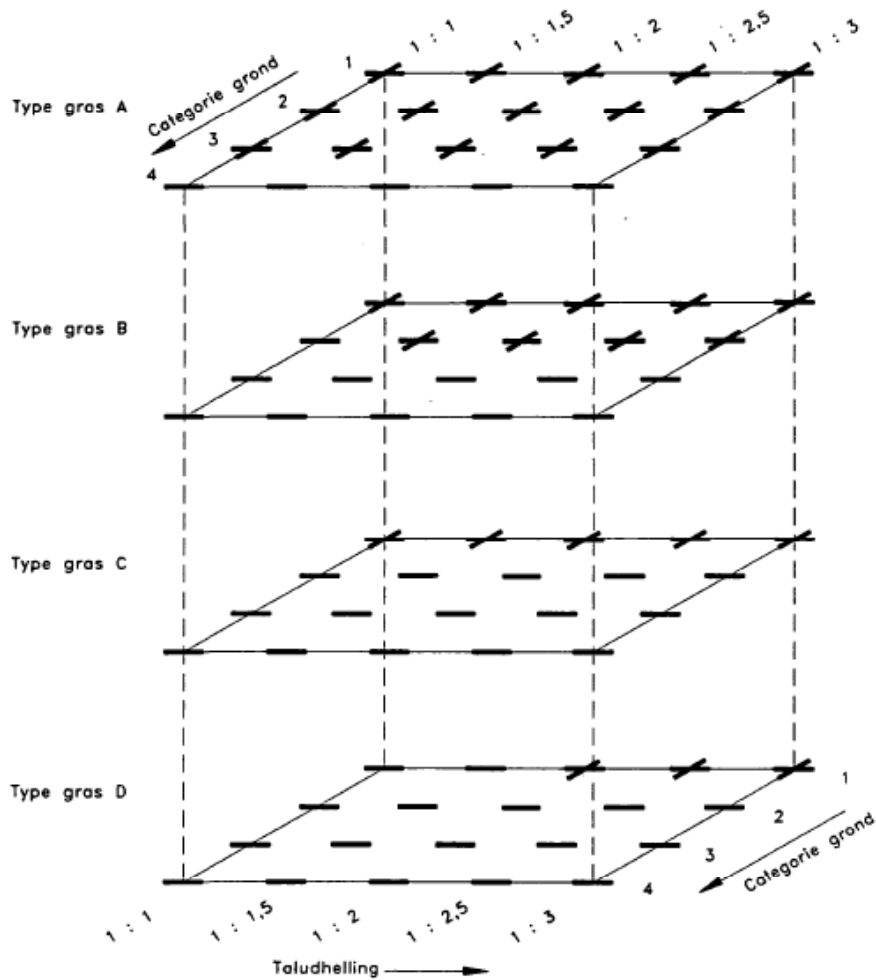
erosiebestendigheid heeft. Hiertoehoren grasmat categorie C tot B/C. Worden deze vier parameters vervolgens bij elkaar in een schematisering gezet voor elk overslagdebiet, dan kan worden afgelezen welke combinatie van type gras, categorie grond en taludhelling nodig zijn om voldoende erosie bestendig te zijn tegen het betreffende overslagdebiet. Dit is in Figuur 45 weergegeven voor een overslagdebiet van 0,1l/m/s, waarbij een '+' een positieve combinatie weergeeft en een '-' een slechte combinatie. In de figuur is te zien dat enkel bij grastype C en D en grondcategorie 4 een '-' teken staat. Deze situatie zal bij verhoogde wegen zeer weinig voorkomen, omdat vaak de lokaal aanwezige grond op het talud wordt aangebracht en in de buurt van rivieren zal hier vaak klei in zitten. De overige combinaties krijgen een positieve score, wat betekent dat het gevaar op erosie laag is.



Figuur 45 - Combinaties van de taludhelling, grond en grastype bij een overslagdebiet van 0,1l/m/s (TAW, 1994, p. 65)

Bij een overslagdebiet van 1,0l/m/s scoren de combinaties voor grastype C en B/C beduidend minder goed, zoals weergegeven in Figuur 46. Voor grastype C voldoet enkel grondcategorie 1, waardoor een groot deel van de overige grondtypen voor taludbekledingen afvallen, terwijl ook deze bij verhoogde wegen voorkomen. Uit het figuur wordt duidelijk dat een overslagdebiet van 1,0l/m/s voor erosieproblemen zal zorgen bij verhoogde wegen.

Aan de hand van beide figuren wordt vastgesteld dat het maximaal toelaatbare overslagdebiet bij verhoogde wegen 0,1l/m/s is. Voor dit overslagdebiet staan er in Figuur 45 al enkele '-' tekens weergegeven, een hoger overslagdebiet zal tot nog meer '-' tekens leiden waardoor het gevaar op erosie van het binnentalud te groot wordt. Opgemerkt moet worden dat door nieuwe inzichten, opgedaan in een interview met Van (2010) en door andere factoren, zoals golfhoogtes en de kruinbreedte van wegen, een wijziging in het aangenomen maximale overslagdebiet heeft plaatsgevonden. Het maximale overslagdebiet van 0,1l/m/s wordt als een zeer veilige grens beschouwd maar leidt in het kader van het onderzoek niet tot harde uitspraken over het waterkerend vermogen van verhoogde wegen.



Figuur 46 - Combinaties van de taludhelling, grond en grastype bij een overslagdebiet van 1,0l/m/s (TAW, 1994, p. 66)

Appendix F Rekenregels faalmechanisme overslag

In deze appendix worden de rekenregels voor de toetsing op het faalmechanisme overslag toegelicht. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt in het berekenen van de golfhoogte, de golfperiode en het overslagdebiet.

Berekening van de golfhoogte

Voor het berekenen van de golfhoogte wordt gebruik gemaakt van de rekenregel van Bretschneider (TAW, 1985, p. 215), weergegeven in formule (F.1).

$$H_s = \left(u^2 \left(0,283 \tanh \left[0,530 \left(\frac{g d}{u^2} \right)^{0,750} \right] \tanh \frac{0,0125 \left(\frac{g F}{u^2} \right)^{0,42}}{\tanh \left[0,530 \left(\frac{g d}{u^2} \right)^{0,750} \right]} \right) \right) / g \quad (\text{F.1})$$

Waarbij:

H_s = significante golfhoogte [m]

u = windsnelheid [m/s]

F = strijklengte [m]

g = versnelling van de zwaartekracht [m/s^2]

d = waterdiepte van het overstromingswater [m]

Voor Nederland wordt in dit onderzoek uitgegaan van een gemiddelde windsnelheid van 5,5m/s (wat overeenkomt met windkracht 4) en een maximale strijklengte van de wind over het water van $F = 1500\text{m}$. De versnelling van de zwaartekracht $g = 9,81\text{m/s}^2$.

Berekening van de golfperiode

Voor het berekenen van de golfperiode wordt tevens gebruik gemaakt van de rekenregel van Bretschneider (TAW, 1985, p. 215), weergegeven in formule (F.2). De golfperiode is de tijdsduur tussen twee opeenvolgende golven op dezelfde plaats.

$$T = \left(u \left(2\pi * 1,2 \tanh \left[0,833 \left(\frac{g d}{u^2} \right)^{0,375} \right] \tanh \frac{0,077 \left(\frac{g F}{u^2} \right)^{0,25}}{\tanh \left[0,833 \left(\frac{g d}{u^2} \right)^{0,375} \right]} \right) \right) / g \quad (\text{F.2})$$

Waarbij:

T = golfperiode [s]

u = windsnelheid [m/s]

F = strijklengte [m]

g = versnelling van de zwaartekracht [m/s^2]

d = waterdiepte van het overstromingswater [m]

Voor het berekenen van het overslagdebiet wordt gebruikt gemaakt van de spectrale golfperiode. De spectrale golfperiode houdt ook rekening met dubbeltoppige spectra, waardoor daarvoor geen aparte berekening meer nodig is. De omreken formule van de golfperiode naar de spectrale golfperiode is weergegeven in formule (F.3) (TAW, 2002, p. 8).

$$T_{m-1,0} = T / 1,1 \quad (\text{F.3})$$

Waarbij:

T = golfperiode [s]

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode [s]

Berekening van het overslagdebiet

Voor het berekenen van het overslagdebiet wordt een onderscheid gemaakt tussen twee situaties. Een situatie waarin de golven breken op het talud en een situatie waarin de golven *niet* breken op het talud. Indien ervan uit wordt gegaan dat de golven breken op het talud, moet er een andere formule voor de berekening van het overslagdebiet worden gebruikt dan wanneer de golven niet breken. Bij een taludhelling van 1:3 of flauwer breken vrijwel alle golven op het buitentalud, terwijl bij hellingen van 1:1,5 of steiler de meeste golven tegen het talud oplopen zonder te breken (TAW, 1985, p. 50).

Voor het berekenen van het overslagdebiet bij een taludhelling van 1:3, waarbij de golven breken op het talud, wordt gebruikt gemaakt van formule (F.4). Voor het berekenen van het overslagdebiet bij een taludhelling van 1:1,5 waarbij de golven niet breken, wordt formule (F.5) gebruikt (TAW, 2002, p. 28).

$$q_{1:3} = \left(\frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} * \gamma * \xi_0 * \exp \left(-4,3 * \frac{h_{khm}}{H_s} * \frac{1}{\xi_0 * \gamma} \right) * \sqrt{g * H_s^3} \right) * 1000 \quad (F.4)$$

$$q_{1:1,5} = \left(0,2 * \exp \left(-2,3 * \frac{h_{khm}}{H_s} * \frac{1}{\gamma} \right) * \sqrt{g * H_s^3} \right) * 1000 \quad (F.5)$$

Met:

$$\xi_0 = \tan \alpha / \sqrt{s_0}$$

$$s_0 = 2 * \pi * H_s / (g * T_{m-1,0}^2)$$

Waarbij:

q = overslagdebiet [l/m/s]

g = versnelling van de zwaartekracht = 9,81 m/s²

H_s = significante golfhoogte [m]

ξ_0 = brekerparameter [-]

s_0 = golfsteilheid [-]

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode [s]

$\tan \alpha$ = taludhelling [-]

h_{khm} = kruinhoogtemarge [m]

γ = invloedsfactoren = 1,0 [-]

Zoals te zien aan beide formules is de brekerparameter alleen van toepassing bij de taludhelling van 1:1,5. Voor de parameter γ , de invloedsfactoren, wordt een waarde van 1,0 gehanteerd. Onder deze parameter vallen verschillende invloeden op het overslagdebiet, zoals de ruwheid van de taludbekleding (bij gras 1,0), de aanwezigheid van een tussenberm of de hoek van de golfaanval. Bij een waarde $\gamma = 1,0$ geldt het meest pessimistische scenario, wat wordt gehanteerd in dit onderzoek.

Appendix G Potentiële windsnelheid in Nederland

In Figuur 47 is een frequentietabel van de potentiële windsnelheid in Nederland weergegeven. In de figuur zijn in de linker kolom verschillende windsnelheden aangegeven, waarbij in rechter kolom de cumulatieve percentages van deze windsnelheden over de periode van 1971 – 2000 zijn aangegeven. De kolommen in het midden van de figuur geven de cumulatieve percentages aan voor verschillende windrichtingen. De windsnelheden zijn gemeten op de locatie 'Herwijnen', gelegen op 1km ten noorden van de Maas en 12km ten oosten van Gorinchem. Deze locatie wordt als een representatieve locatie gezien voor dit onderzoek, aangezien het in het midden in het rivierengebied ligt.

In de figuur is in de rechter kolom af te lezen dat een windsnelheid tot 7,9m/s cumulatief 87,86% voorkomt en dat een windsnelheid tot 8,9m/s cumulatief 92,54% voorkomt in Nederland. Dit betekent dat gemiddeld 87,86% van de tijd per jaar de windsnelheid tussen de 0,0m/s en 7,9m/s zal liggen op de locatie 'Herwijnen'. In dit onderzoek wordt ervoor gekozen om te rekenen met een cumulatieve waarde van 90%, zodat de berekeningsresultaten in 90% van het jaar van toepassing zijn. Hiervoor wordt een windsnelheid van 8,4m/s aangehouden, gebaseerd op: $87,86 + \frac{92,54-87,86}{2} = 90,2\%$ met een windsnelheid van $7,9 + \frac{8,9-7,9}{2} = 8,4\text{m/s}$

FREQUENCY TABLE OF POTENTIAL WIND SPEED - CUMULATIVE RELATIVE														
356 Herwijnen					Year					1971-2000				
Wind direction (*10 degrees)														
Var/ Calm	35-01	02-04	05-07	08-10	11-13	14-16	17-19	20-22	23-25	26-28	29-31	32-34	Cum.	
Wind speed (m/s)	Cumulative in percentage													
0.0 - 0.9	0.45	0.13	0.13	0.12	0.15	0.14	0.13	0.14	0.12	0.14	0.15	0.12	0.11	2.03
1.0 - 1.9	1.00	0.92	1.07	1.15	1.17	0.88	0.86	1.01	1.02	0.94	0.97	0.78	0.81	12.59
2.0 - 2.9	1.10	1.96	2.68	2.88	2.88	2.09	2.10	2.36	2.60	2.26	2.23	1.85	1.80	28.77
3.0 - 3.9	1.11	2.99	4.12	4.29	4.57	3.41	3.35	3.87	4.73	4.06	3.61	3.01	2.88	45.99
4.0 - 4.9	1.12	3.78	5.29	5.30	5.85	4.44	4.24	5.15	7.18	6.11	4.80	4.11	3.79	61.15
5.0 - 5.9	1.12	4.35	6.02	5.84	6.63	5.09	4.80	6.06	9.11	7.94	5.84	5.01	4.45	72.27
6.0 - 6.9	-	4.72	6.52	6.30	7.22	5.45	5.17	6.73	10.84	9.73	6.77	5.69	4.92	81.17
7.0 - 7.9	-	4.95	6.79	6.57	7.60	5.64	5.35	7.27	12.28	11.25	7.62	6.20	5.24	87.86
8.0 - 8.9	-	5.08	6.96	6.72	7.83	5.73	5.43	7.58	13.27	12.46	8.33	6.58	5.46	92.54
9.0 - 9.9	-	5.14	7.03	6.78	7.91	5.76	5.46	7.78	13.80	13.24	8.78	6.78	5.57	95.15
10.0 - 10.9	-	5.16	7.08	6.82	7.96	5.77	5.47	7.89	14.22	13.91	9.09	6.93	5.64	97.06
11.0 - 11.9	-	5.18	7.10	6.84	7.98	5.77	5.48	7.95	14.49	14.35	9.32	7.03	5.66	98.26
12.0 - 12.9	-	5.18	7.11	6.84	7.99	5.77	5.48	7.98	14.66	14.62	9.47	7.08	5.68	99.00
13.0 - 13.9	-	5.18	7.11	6.84	8.00	-	5.48	7.99	14.76	14.80	9.59	7.11	5.69	99.44
14.0 - 14.9	-	-	-	6.85	8.00	-	-	8.00	14.81	14.90	9.64	7.13	5.70	99.69
15.0 - 15.9	-	-	-	-	8.00	-	-	8.01	14.84	14.96	9.69	7.15	5.70	99.84
16.0 - 16.9	-	-	-	-	-	-	-	-	14.85	14.99	9.71	7.15	-	99.91
17.0 - 17.9	-	-	-	-	-	-	-	-	14.85	15.01	9.72	7.16	-	99.95
18.0 - 18.9	-	-	-	-	-	-	-	-	14.85	15.02	9.73	7.16	-	99.98
19.0 - 19.9	-	-	-	-	-	-	-	-	14.85	15.02	9.73	7.17	-	99.99
20.0 - 20.9	-	-	-	-	-	-	-	-	14.85	15.03	9.73	7.17	-	99.99
21.0 - 21.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.03	9.74	7.17	-	99.99
22.0 - 22.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.03	9.74	7.17	-	100.00
23.0 - 23.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.03	9.74	7.17	-	100.00
24.0 - 24.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.03	9.74	7.17	-	100.00
25.0 - 25.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.03	-	7.17	-	100.00
26.0 - 26.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.17	-	100.00
27.0 - 27.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28.0 and higher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

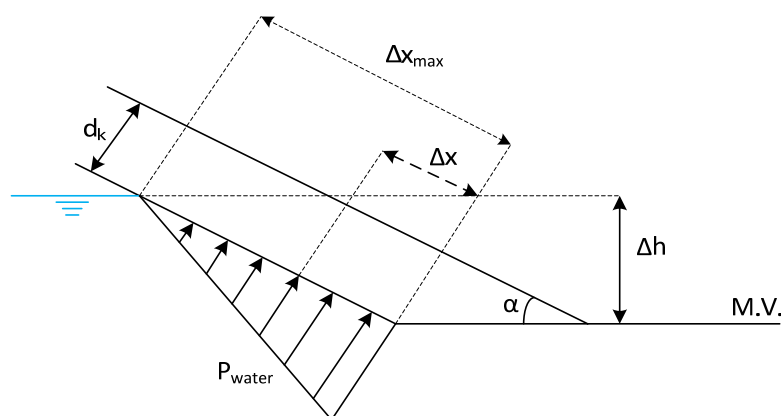
Figuur 47 - Frequentietabel van de potentiële windsnelheid in Nederland (KNMI)

Appendix H Rekenregels faalmechanisme micro-instabiliteit

In deze appendix worden de rekenregels voor het toetsen op micro-instabiliteit gepresenteerd en toegelicht. Voor de toetsing van verhoogde wegen, die vallen onder de categorie ‘zanddijk met een afdekkende kleilaag op het binnentalud’, wordt een onderscheid gemaakt tussen de toetsing op afdrukken van de kleilaag en de toetsing op een combinatie van afdrukken en afschuiven van de kleilaag door waterdruk onder de kleilaag. Beide mechanismen van micro-instabiliteit worden toegelicht. De rekenregels zijn afgeleid uit het ‘Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies’ en het rapport ‘Microstabiliteit: overzicht modellering’.

Afdrukken van de kleilaag

Het krachtenevenwicht dat voor de toetsing op het afdrukken van de kleilaag van belang is, is weergegeven in Figuur 48. Indien de waterdruk groter wordt dan de neerwaartse druk van de toplaag, wordt de toplaag afgedrukt en ontstaat er micro-instabiliteit. De berekening voor deze toetsing is weergegeven door formule (H.1).



Figuur 48 - Spanningen loodrecht op de kleilaag, afdrukken van de kleilaag

$$\frac{2 c d}{\gamma_{m,c}} + \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,\rho}} * \Delta x d \cos \alpha + \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,\rho}} * \Delta x d \sin \alpha \frac{\tan \varphi}{\gamma_{m,\varphi}} \geq \gamma_n \gamma_d \left(\Delta h - \frac{1}{2} \Delta x \sin \alpha \right) \frac{\rho_w g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta x \quad (\text{H.1})$$

Waarbij:

α = helling van het talud [°]

d_k = dikte van de kleibekleding [m]

γ_d = partiële veiligheidsfactor voor gebruikte model

γ_n = partiële veiligheidsfactor schade

ρ_w = volumieke massa water $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

ρ_g = volumieke massa grond $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Δh = stijghoogte van het water, het sijpeloppervlak [m]

Δx = lengte van het stuk taludbekleding waarmee wordt gerekend [m]

$\Delta x_{\max}$ = maximale lengte van de taludbekleding onder invloed van afdrukken [m]

c = cohesie van de klei $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

g = versnelling van de zwaartekracht = $9,81 \text{ m/s}^2$

$\gamma_{m,c}$ = materiaalfactor voor de cohesie

$\gamma_{m,\varphi}$ = materiaalfactor voor de hoek van inwendige wrijving

$\gamma_{m,\rho}$ = materiaalfactor voor de volumieke massa

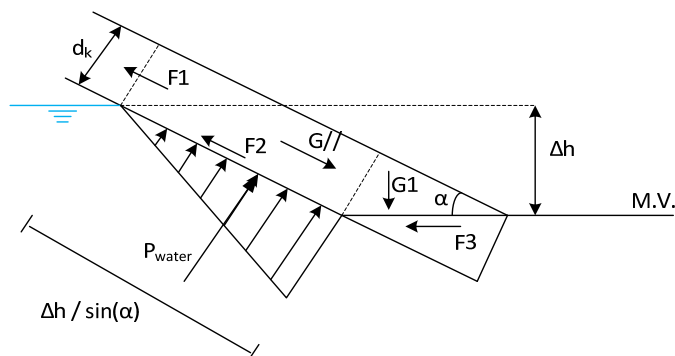
φ = hoek van inwendige wrijving van de klei [°]

Toelichting op de berekening:

De berekening weergegeven in formule (H.1) zet feitelijk twee zaken tegenover elkaar. Aan de linker zijde van het '≥' teken staat de berekening van de druk een weerstand die door de kleilaag wordt veroorzaakt. Hierbij worden de weerstand door de cohesie van de klei, het gewicht van de bekleding loodrecht op het talud en de wrijving van de bekleding aan de taludteen bij elkaar opgeteld. Indien dit groter of gelijk is aan de waterdruk, weergegeven door de berekening aan de rechter zijde van het '≥' teken, treedt er geen afdrucken op. Aan de rechterzijde wordt dan ook de gemiddelde waterdruk over een lengte Δx berekend, met daarbij een aantal veiligheidsfactoren. Door Δx te variëren tussen 0 en $\Delta x_{\max}$ wordt gezocht naar de waarde voor Δh waarbij de som van de spanningen gelijk aan nul is. Hieruit komt de laagste waarde voor Δh waarbij afdrucken kan plaatsvinden en is daarmee de maximale hoogte voor het uittredepunt van het freatisch vlak. Om de laagste waarde van Δh te vinden moeten zowel Δx als Δh gevarieerd worden ingevoerd, op een iteratieve wijze.

Afdrukken en afschuiven van de kleilaag

Voor het toetsen op de combinatie van afdrucken en afschuiven van de kleilaag door waterdruk onder de kleilaag is het krachtenevenwicht weergegeven in Figuur 49. De berekening voor deze toetsing is weergegeven door formule (H.2).



Figuur 49 - Spanningen evenwijdig aan de kleilaag, afschuiven van de kleilaag

$$\gamma_n \gamma_d \left[\Delta h d \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,p}} - \left[\frac{c d}{\gamma_{m,c}} + \frac{c \Delta h}{\gamma_{m,c} \sin \alpha} + \left[\frac{\Delta h}{\tan \alpha} d \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,p}} - \frac{1}{2} \frac{\rho_w g \Delta h^2}{\gamma_{m,p} \sin \alpha} \right] \frac{\tan \varphi}{\gamma_{m,\varphi}} \right] \right] \leq \frac{c d}{\gamma_{m,c} \sin \alpha} + \frac{1}{2} \frac{d^2 \rho_g g}{\sin \alpha \gamma_{m,p}} \quad (\text{H.2})$$

Waarbij:

α = helling van het talud [°]

d_k = dikte van de kleibekleding [m]

γ_d = partiële veiligheidsfactor voor gebruikte model

γ_n = partiële veiligheidsfactor schade

ρ_w = volumieke massa water $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

ρ_g = volumieke massa grond $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Δh = stijghoogte van het water, het sijpeloppervlak [m]

c = cohesie van de klei $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

g = versnelling van de zwaartekracht = 9,81 m/s²

$\gamma_{m,c}$ = materiaalfactor voor de cohesie

$\gamma_{m,\varphi}$ = materiaalfactor voor de hoek van inwendige wrijving

$\gamma_{m,p}$ = materiaalfactor voor de volumieke massa

φ = hoek van inwendige wrijving van de klei [°]

Toelichting op de berekening:

De berekening weergegeven in formule (H.2) zet feitelijk twee zaken tegenover elkaar. Enerzijds wordt bekeken hoe groot de wrijving is die ontstaat door de cohesie aan de bovenzijde van de beschouwde moot taludbekleding (F_1) en de wrijving tussen de klei en zandlaag (F_2). Wanneer deze wrijving kleiner is dan het component van het gewicht van de grond evenwijdig aan het talud ($G//$), moet er beschouwd worden of de reactiekracht aan de teen (F_3) en de moot grond die hierop rust (G_1) nog voldoende weerstand kunnen bieden tegen het afschuiven. Hierbij heeft de waterdruk (P_{water}) invloed op de wrijving en grondspanning. In formule (H.2) bevat het deel links van het ' $\leq$ ' teken de berekening van $F_1 + F_2 - G//$ welke kleiner of gelijk moet zijn aan het rechter deel, wat de som berekent van $F_3 + G_1$.

Appendix I Invloedsfactoren voor de toetsing op binnenwaartse macro-instabiliteit met MStab

In deze appendix wordt ingegaan op factoren die van invloed zijn op de toetsing van de fysieke eigenschappen op binnenwaartse macro-instabiliteit met MStab. Dit werkt tevens door op de toetsingsresultaten. In het uitgevoerde onderzoek is een vaste dimensie en positie van de teensloot aangehouden. Op deze factoren wordt in deze appendix gevarieerd, zodat inzicht wordt verkregen in de gevoeligheid van veranderingen in deze factoren. Hierbij komen de volgende variaties aan bod;

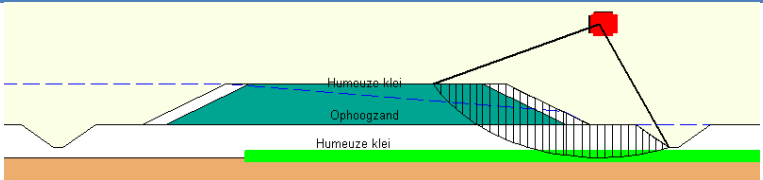
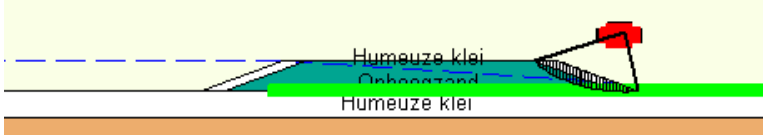
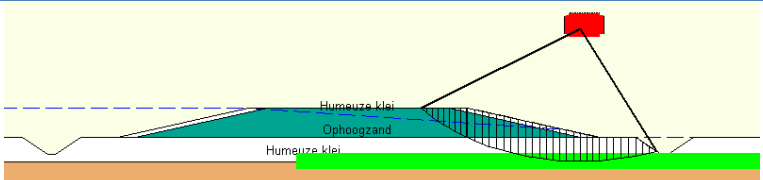
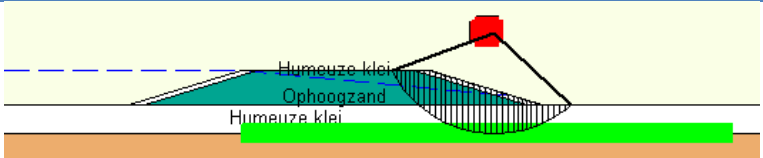
- aanwezigheid of afwezigheid van een teensloot;
- de positie van de teensloot ten opzichte van de taludhelling;
- de dimensies van de teensloot.

Deze appendix heeft als doel om een eerste inzicht te verschaffen in de invloed van de bovenstaande factoren. Daarom wordt er enkel bij een kruinhoogte van 1,20m, grondprofiel 1*, wegcategorie VIII en een taludhelling van 1:1,5 en 1:3 beschouwd wat het verschil in de toetsingsresultaten is. De overstromingswaterstand is gelijk aan de kruinhoogte en de grondwaterstand in het binnenland is gelijk aan het maaiveld. Hierbij wordt de situatie beschouwd zonder een statische verkeersbelasting.

Aanwezigheid of afwezigheid van een teensloot

In de onderstaande Tabel 21 is weergegeven welke invloed de aanwezigheid of afwezigheid van een teensloot heeft op de veiligheidsfactor.

Tabel 21 - Invloed van de aanwezigheid of afwezigheid van een teensloot op binnenwaartse macrostabiliteit

Taludhelling	Veiligheidsfactor	Kritisch glijvlak
1:1,5	1,11	
1:1,5	1,11	
1:3	1,38	
1:3	1,45	

Bij een taludhelling van 1:1,5 is de aanwezigheid van een teensloot niet van invloed op de veiligheidsfactor (bij de gehanteerde afstand van de teensloot tot het talud). De locatie van het glijvlak is wel verschillend. Met een teensloot loopt het kritische glijvlak duidelijk richting de bodem van de teensloot.

Bij een taludhelling van 1:3 is de teensloot tevens van invloed op de waarde van de veiligheidsfactor. Het verschil in de veiligheidsfactor $\Delta SF = 0,07$. Zonder een teensloot is het weglichaam stabiel.

Positie van de teensloot ten opzichte van de taludhelling

In Tabel 22 staan de waarden van de veiligheidsfactor bij verschillende afstanden van de teensloot tot het talud.

Tabel 22 - Invloed van de positie van de teensloot ten opzichte van het talud op binnenwaartse macrostabiliteit

Afstand teensloot tot talud	Veiligheidsfactor			
	0,00m	0,50m	1,00m	1,50m
Taludhelling				
1:1,5	0,94	1,02	1,11	1,11
1:3	1,19	1,27	1,38	1,45

Bij zowel een taludhelling van 1:1,5 als 1:3 is van de toetsingsresultaten af te leiden dat bij een toenemende afstand van de teensloot tot de taludhelling, de veiligheidsfactor tevens toeneemt. Hoe dichterbij het talud gelegen is, hoe minder stabiel het weglichaam is.

Bij een taludhelling van 1:3 en een afstand van 1,50m is de waarde voor de veiligheidsfactor gelijk aan de waarde zonder een teensloot (zie vorige alinea). In dit geval ligt de teensloot dusdanig ver van het talud dat het weglichaam geen invloed ondervindt van de teensloot. Bij een taludhelling van 1:1,5 is dit tevens het geval.

Dimensies van de teensloot

In Tabel 23 zijn voor verschillende dimensies van de teensloot de bijbehorende veiligheidsfactoren weergegeven. Er is uitgegaan van een teensloot die begint op een afstand van 1,00m van de taludteen.

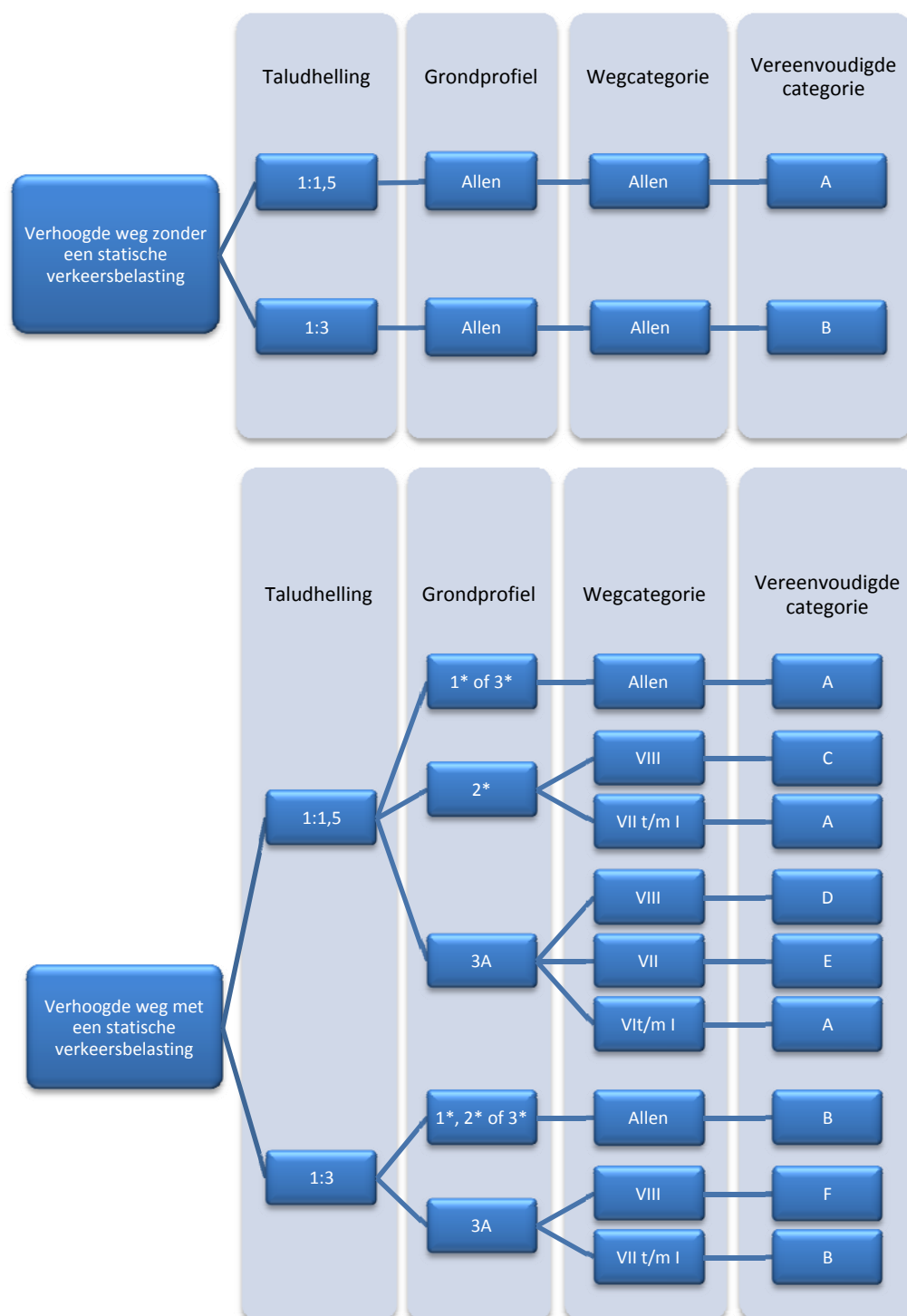
Tabel 23 - Invloed van de dimensies van de teensloot op binnenwaartse macrostabiliteit

Taludhelling	Diepte	Helling sloot	Breedte bodem	Veiligheidsfactor	Toelichting
1:1,5	0,5	1:1	0,2m	1,13	
	0,7	1:1	0,2m	1,11	Gebruikt in het rapport
	1,0	1:1	0,2m	1,11	
	0,5	1:2	0,2m	1,12	
	0,7	1:2	0,2m	1,12	
	1,0	1:2	0,2m	1,12	
1:3	0,5	1:1	0,2m	1,37	
	0,7	1:1	0,2m	1,38	Gebruikt in het rapport
	1,0	1:1	0,2m	1,38	
	0,5	1:2	0,2m	1,43	
	0,7	1:2	0,2m	1,43	
	1,0	1:2	0,2m	1,43	

De waarden in de bovenstaande tabel tonen duidelijk aan dat de invloed van verschillende teensloot dimensies minimaal is. Hierbij moet opgemerkt worden dat wanneer de teensloot dichterbij het talud staat, dit mogelijk tot andere resultaten kan leiden.

Appendix J Vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen

Deze appendix geeft de vereenvoudigde categorisering van verhoogde wegen weer. De vereenvoudigde categorisering is van toepassing op verhoogde wegen tot een kruinhoogte van 1,80m. Aan de hand van de schematisering, weergegeven in Figuur 50, kan de vereenvoudigde categorie waarin een verhoogde weg valt bepaald worden. De vereenvoudigde categorieën staan weergegeven onder de schematisering.



Figuur 50 - Diagram voor het bepalen van de vereenvoudigde categorie behorende bij een verhoogde weg

Categorie A

- Maatgevende waterstand:
Afhankelijk van de kruinhoogte, zie Figuur I1
Bij $h_k = 1,40\text{m} \rightarrow h_w = 1,07\text{m}$
- Toelaatbare belastingsduur:
Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur I2
Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen
- Maatgevend faalmechanisme:
Overslag

Categorie B

- Maatgevende waterstand:
Afhankelijk van de kruinhoogte, zie Figuur I1
Bij $h_k = 1,40\text{m} \rightarrow h_w = 1,16\text{m}$
- Toelaatbare belastingsduur:
Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur I2
Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen
- Maatgevend faalmechanisme:
Overslag

Categorie C

- Maatgevende waterstand:
Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur I3 en I4
- Toelaatbare belastingsduur:
Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur I2
Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen
- Maatgevend faalmechanisme:
Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag

Categorie D

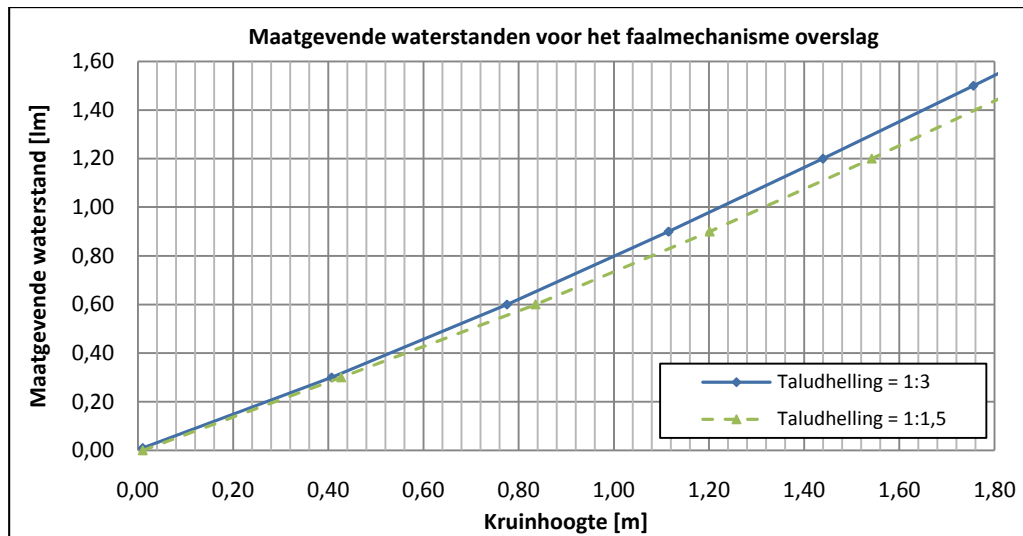
- Maatgevende waterstand:
Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur I3 en I4
- Toelaatbare belastingsduur:
Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur I2
Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen
- Maatgevend faalmechanisme:
Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag

Categorie E

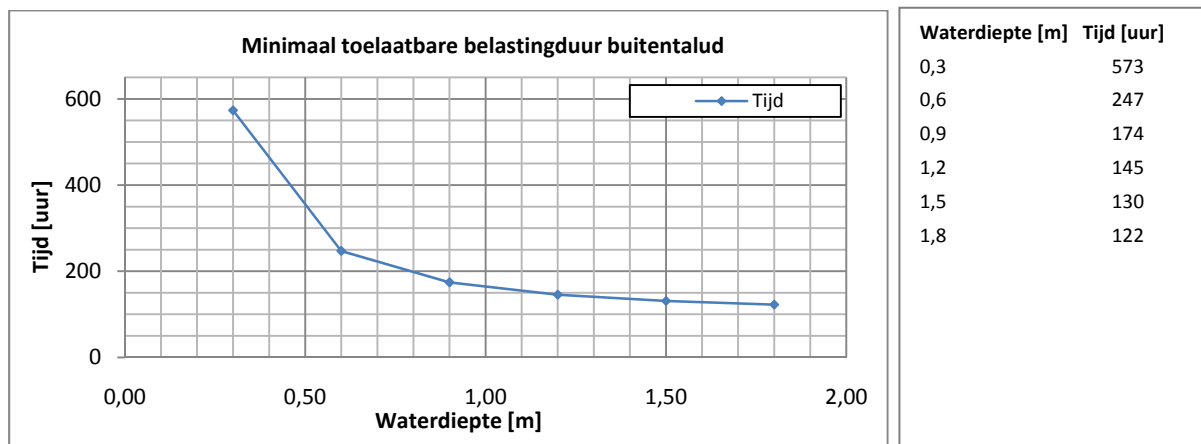
- Maatgevende waterstand:
Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur I3 en I4
- Toelaatbare belastingsduur:
Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur I2
Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen
- Maatgevend faalmechanisme:
Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag

Categorie F

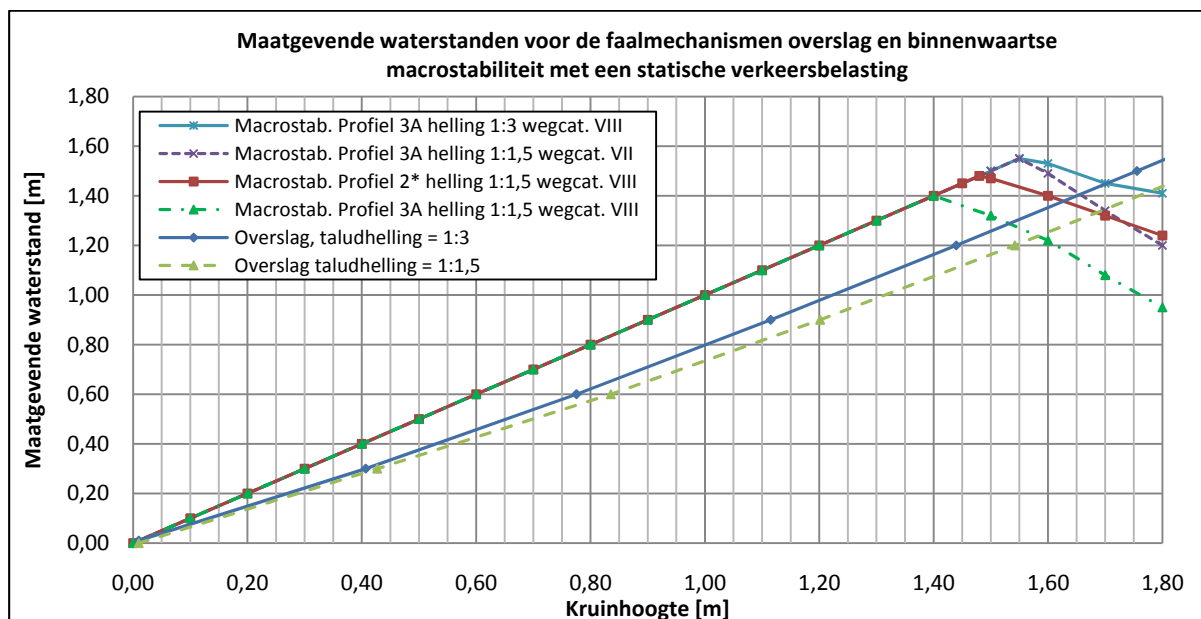
- Maatgevende waterstand:
Afhankelijk van de kruinhoogte en de statische verkeersbelasting, zie Figuur I3 en I4
- Toelaatbare belastingsduur:
Afhankelijk van de waterstand, zie Figuur I2
Bij $h_w = 1,80\text{m} \rightarrow 5$ dagen
- Maatgevend faalmechanisme:
Binnenwaartse macrostabiliteit en/of overslag



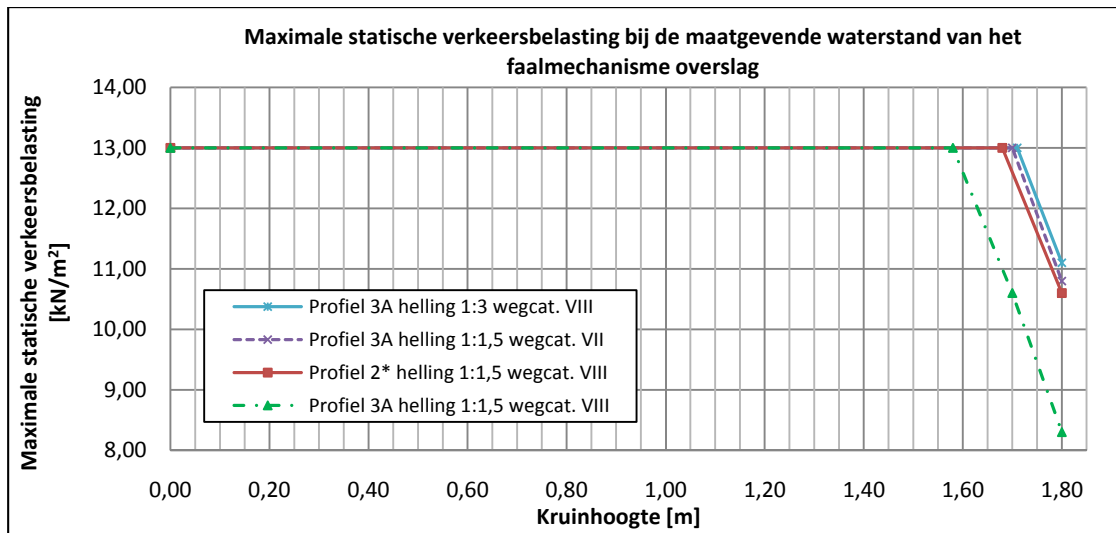
Figuur 11 - Maatgevende waterstanden voor het faalmechanisme overslag



Figuur 12 – Minimaal toelaatbare belastingduur van het buitentalud per waterdiepte (met $u = 8,5\text{m/s}$)



Figuur 13 - Overzichtsweergave van de maatgevende waterstanden bij de faalmechanismen overslag en binnenwaartse macrostabiliteit



Figuur I4 - Maximale statische verkeersbelasting bij de maatgevende waterstand van het faalmechanisme overslag