

Kwetsbaarheid van weglichamen tijdens en na overstromen

Vergroten inzicht in mogelijkheden evacuatie en



Kwetsbaarheid van weglichamen tijdens en na overstromen

**Vergroten inzicht in mogelijkheden evacuatie en
hulpverlening via het hoofdwegennet**

Ir. R. Stoevelaar

1209380-005

Titel

Kwetsbaarheid van weglichamen tijdens en na overstromen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
KPP RWS Kees van Muiswinkel (WVL)	1209380-005	1209380-005-VEB-0002- gbh	50

Trefwoorden

Klimaatsverandering, overstromingsgevolgen, geotechnische constructies, hoofdwegennet, kwetsbaarheid, effecten, stabiliteit, verweking, adaptatie, maatregelen

Samenvatting

In het KPP programma Aanlegvraagstukken (Kennis voor het Primaire Proces Aanleg) was Klimaatbestendigheid geotechnische constructies een van de projecten in 2013. In 2014 heeft vervolgonderzoek plaatsgevonden binnen het KPP programma waterveiligheid. Dit rapport is een verslaglegging van werk uitgevoerd in 2014.

Een landsdekkend beeld is opgesteld van het risico op instabiliteit van weglichamen door overstroming in de Acute fase en de Herstelfase. De resultaten zijn gepresenteerd in de vorm van kaartmateriaal. Het inzicht is nodig bij de beoordeling van de beschikbaarheid van de rijkswegen in overstroomde gebieden tijdens de feitelijke overstroming en in de periode na de overstroming, ofwel de:

- Acute fase: Dit is de periode na de dijkdoorbraak totdat de mensen het overstroomd gebied hebben verlaten. In crisismanagementtermen is dit de responsefase, waarin men probeert de ramp te beheersen en schade en slachtoffers te beperken.
- Herstelfase: Dit is de periode na de acute fase waarin het gebied wordt hersteld. Afhankelijk van het gebied kan het weken tot maanden duren voor het geheel watervrij is, hierna zal een gebied schoongemaakt en technisch hersteld moeten worden.

Aan de hand van cases zijn geometrische beoordelingscriteria opgesteld en vervolgens toegepast op het dwarsprofiel van de rijkswegen om daarmee een beoordeling uit te voeren. Een beoordeling is uitgevoerd voor het geval "geen schade aan weglichaam en rijbanen" en voor het geval "schade over een strookbreedte van maximaal 6 m". Dit is gedaan voor de bezwijkmechanismen afschuifinstabiliteit en verweking. Het weglichaam bestaat daarbij uit zand en voor de ondergrond is een pakket van klei of veen aangehouden.

Er worden op basis van de cases algemene conclusies getrokken gekoppeld aan de combinatie taludhelling en weghoogte. De lokale resultaten zijn op basis van deze geometrische kenmerken vertaald naar het bedreigde deel van het rijkswegennet.

Voor de afschuifinstabiliteit zijn analyses uitgevoerd volgens de methode Bishop. De bepalende grondparameters zijn de interne wrijvingshoek en cohesie en het effectief volumegewicht van de grond (o.a. bepaald door de grondwaterstand). Hierbij is een gelijkmatige verkeersbelasting van 20 kN/m² op alle rijbanen aangehouden. Bij de bepaling van de schade is uitgegaan van een nomogram (VTV2006, ref [6]) voor de inscharingslengte. Dit nomogram is gebaseerd op een gelijkmatig verdeelde ontwerpbelasting van 15 kN/m² op één rijstrook met een breedte van 2,5 m.

Voor de verweking is de bepalende grondparameter pakkingsdichtheid van het weglichaam. Deze is aangenomen als los gepakt. De aanpak volgens CUR113 (2008), ref [4], 'Oeverstabiliteit bij zandwinputten' is gevolgd. De inscharingslengte is conservatief berekend als 3 maal de taludhoogte. Het effect van verkeersbelasting is niet hier niet meegenomen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
--------	-------	--------	--------	--------	--------	-------------	--------

Titel

Kwetsbaarheid van weglichamen tijdens en na overstromen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
KPP RWS Kees van Muiswinkel (WVL)	1209380-005	1209380-005-VEB-0002- gbh	50

1	juli 2014	ir. J.C. Landwehr	ir. T.J. Bles	ing. A.T. Aantjes
		ir. R. Stoevelaar		
2	dec. 2014	ir. R. Stoevelaar	Ir. D. Pereboom	ing. A.T. Aantjes

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Doel van het onderzoek	3
1.3	Afbakening	3
1.4	Leeswijzer	4
2	Mechanismen	5
2.1	Bezwijken talud van het weglichaam door afschuifinstabiliteit (macrostabiliteit volgens Bishop)	5
2.2	Bezwijken van talud onder water door verweking	8
3	Uitgangspunten	11
3.1	Reliability Class NEN norm	11
3.2	Overstroming	11
3.3	Wegprofiel	11
3.4	Hoeveelheid water op wegdek	11
3.5	Grondopbouw	12
3.6	Verkeersbelasting	12
3.7	Stabiliteit	12
3.8	Verweking	13
4	Referentie dwarsprofielen	15
4.1	Keuze van dwarsprofiel locaties	15
5	Geometrische toetscriteria en resultaten	17
5.1	Acute fase, geen schade aan weglichaam	17
5.1.1	Omschrijving situatie	17
5.1.2	Toe te passen geometrisch criterium	17
5.1.3	Controle afschuifstabiliteit in Acute fase	17
5.1.4	Resultaat van de toetsing Acute fase	18
5.2	Herstelfase, geen schade aan weglichaam	18
5.2.1	Omschrijving situatie	18
5.2.2	Toe te passen geometrisch criterium	18
5.2.3	Resultaat van de toetsing Herstelfase	21
5.3	Acute fase, met accepteren van schade aan weglichaam en rijbaan	21
5.3.1	Omschrijving situatie	21
5.3.2	Toe te passen geometrisch criterium	21
5.3.3	Resultaat van de toetsing Acute fase bij schade	23
5.4	Herstel fase, met accepteren van schade aan weglichaam en rijbaan	23
5.4.1	Toe te passen geometrisch criterium	23
5.4.2	Resultaat van de toetsing Herstelfase bij schade	25
6	Conclusies	27
7	Aanbevelingen	29
7.1	Aanbevelingen	29
7.2	Maatregelen	30

Referenties

31

Bijlagen

A	Gegevens dwarsprofielen	A-1
B	Toelichting op de wijze waarop de taluds zijn bepaald (GIS)	B-1
C	Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Acute fase)	C-1
D	Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Herstelfase)	D-1
E	Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Acute fase), 6 m schadestrook	E-1
F	Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Herstelfase), 6 m schadestrook	F-1

1 Inleiding

1.1 Algemeen

In het KPP-programma Aanlegvraagstukken (Kennis voor het Primaire Proces Aanleg) was Klimaatbestendigheid geotechnische constructies een van de projecten in 2013. In 2014 heeft vervolgonderzoek plaatsgevonden binnen het KPP programma waterveiligheid [7]. Dit rapport is een verslaglegging van werk uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving in 2014.

Acute fase en herstelfase

Aanleiding voor het 2014 onderzoek is de vaststelling van kennisleemtes op het gebied van klimaatbestendigheid van geotechnische constructies. Er is behoefte aan beter inzicht in de robuustheid van evacuateroutes bij gebruik van de rijkswegen. Het gaat om de bezwijkmechanismen die optreden in de periode direct na een overstroming (Acute fase), waarbij het water op of boven het niveau van de weg is gekomen en de daarop volgende fase waarbij het water wordt weggepompt (Herstelfase). Bij een overstroming treedt een verzadiging op van het zand cunet met als mogelijk effect verweking van het talud of stabiliteitsverlies door afschuiving van het weglichaam.

Beoordeling

De beoordeling van de rijkswegen in de Acute fase en de Herstelfase is uitgevoerd aan de hand van geometrische criteria voor de taludhelling in combinatie met de hoogte van het weglichaam ten opzicht van het omringende gebied. Er is onderscheid gemaakt tussen:

- Een situatie waarbij geen schade aan het weglichaam wordt voorspeld, het weglichaam en de verharding blijven dan beschikbaar.
- Een situatie waarbij de buitenste strook van het weglichaam door instabiel grondgedrag verloren gaat, de verkeerscapaciteit wordt daardoor voor langere periode beperkt.

Criteria

Bij het opstellen van de criteria is een conservatieve keuze voor de waterstanden gedaan. Daarbij geldt voor het bezwijkmechanisme afschuifinstabiliteit dat de waterstand in het weglichaam tot de wegfundering reikt en de waterstand naast de weg weer het normale niveau heeft bereikt. Voor het bezwijkmechanisme verweking van het zandpakket is de maatgevende waterstand in het weglichaam tot het wegniveau aangehouden, terwijl de waterstand naast de weg ook nog op wegniveau ligt. Voor deze situatie is de invloed van de verkeersbelasting verwaarloosd.

Voor de grondsamenstelling onder de wegfundering is een pakket van klei of veen aangehouden. Deze aanname is reëel omdat de potentiële overstromingsgebieden, zoals aangegeven in de gehanteerde overstromingskaart van het Blue Spots onderzoek en het vervolg hierop [1], vrijwel altijd laag gelegen gebieden zijn. In deze gebieden is de ondiepe ondergrond afgezet tijdens vroegere, herhaalde overstromingen en deze bestaat dan meestal uit fijne, cohesieve grondsoorten: klei of veen.

Zes eerdere (2013) en drie nieuwe (2014) cases

In 2013 [2] is een tijdsafhankelijk stabiliteitsmodel ontwikkeld waarmee een weglichaam kan worden beoordeeld tijdens en na overstromingssituaties. Het model berekent de veiligheidsfactor voor de afschuifstabiliteit en houdt daarbij rekening met de tijdsafhankelijkheid van een externe verhoogde waterstand en met het tijdsverloop van de waterspanningen in het weglichaam. Met dit model zijn in 2013 een zestal dwarsprofielen doorgerekend voor de

overstromingsfase en de fase van dalende waterstand. Voor een dergelijke berekening is detailinformatie nodig over de tijdsduur van de overstroming, de daalsnelheid van het water, de doorlatendheid van het weglichaam en de samenstelling van de ondergrond.

De zes cases zijn aangevuld met extra analyses om geometrische beoordelingscriteria af te leiden; bij drie van de locaties zijn analyses uitgevoerd met een fictieve taludhelling en een fictieve taludhoogte.

Landsdekkend beeld van rijkswegen

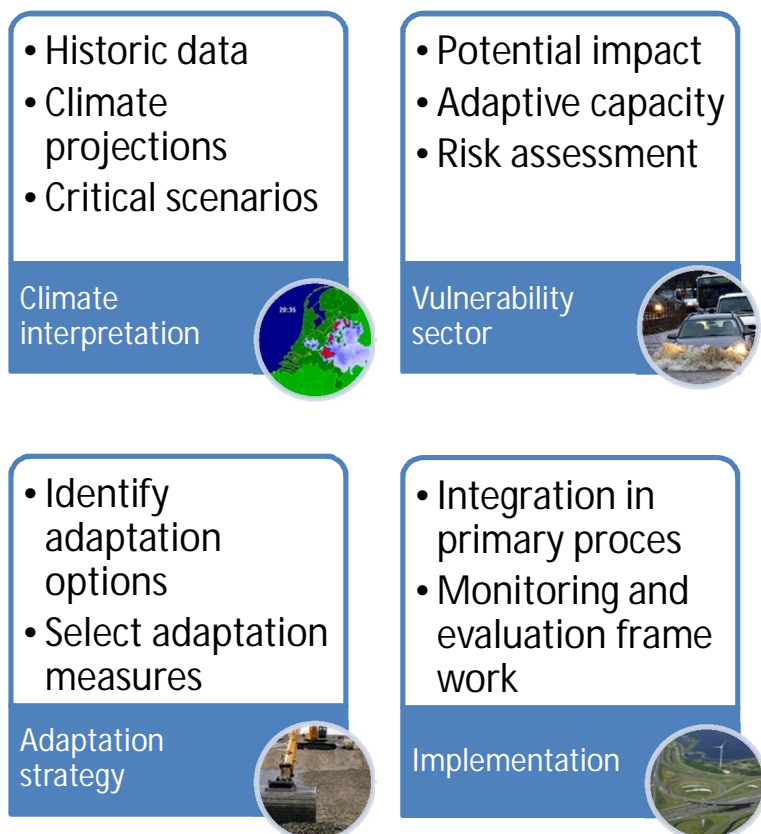
Het eindresultaat bestaat uit kaartmateriaal met een landsdekkend beeld van mogelijke verweking- en stabiliteitsproblemen bij rijkswegen in zowel de Acute fase als de Herstelfase.

Restcapaciteit van de weg

Opgemerkt wordt dat na optreden van een instabiliteit de weg nog restcapaciteit zal bezitten. Dit is bijvoorbeeld het geval als het geotechnisch bezwijkmechanisme de 1^e rechter rijstrook gedeeltelijk beïnvloedt; de 2^e en eventueel een 3^e rijstrook zijn dan nog bruikbaar. Voor het afschatten van de restcapaciteit van de weg worden globale ervaringsregels gebruikt voor de reikwijdte van een instabiliteit. De vastgestelde reikwijdte kan worden gebruikt als schatting voor de afstand tussen de nog bruikbare rijstrook en de kruinlijn van het talud. Daarbij moet het verkeer wel een veilige afstand bewaren tot de rand van de instabiliteit. De belastbaarheid van de weg door zwaar verkeer blijft echter een onzekere factor.

Plaats van het onderzoek

Het onderzoek past in de cyclus van Adaptatie op klimaatverandering zoals weergegeven in Figuur 1.1. Het stappenplan behelst een keten die doorlopen wordt van klimaatscenario naar implementatie. Een bijdrage wordt geleverd aan de stappen kwetsbaarheid (vulnerability) en adaptatie (adaptation).



Figuur 1.1 Stappenplan Adaptatie op Klimaatverandering (bron: Deltares)

1.2 Doel van het onderzoek

Het onderzoek moet het volgende bereiken:

Het opstellen van een landsdekkend beeld van het risico op instabiliteit van weglichamen t.g.v. overstroming in de Acute fase en de Herstelfase. De resultaten moeten beschikbaar komen in de vorm van kaartmateriaal.

Het inzicht is nodig bij de beoordeling van de beschikbaarheid van de rijkswegen in overstromde gebieden tijdens de feitelijke overstroming (Acute fase) en in de periode na de overstroming (Herstelfase).

1.3 Afbakening

In het onderzoek worden de geotechnische effecten beschouwd op een weglichaam van een rijksweg als gevolg van een overstroming. Voor een overzicht van de in Nederland aanwezige rijkswegen; zie Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Overzicht rijkswegennet

Er wordt optimaal gebruik gemaakt van de eerder uitgevoerde studie naar sterkte en stabiliteit van weglichamen [2]. Er worden algemene conclusies getrokken op basis van taludhelling en weghoogte en de aanname van de aanwezigheid van slappe lagen (klei/veen) in de ondergrond.

De lokale resultaten zijn op basis van geometrische kenmerken vertaald naar het bedreigde deel van het rijkswegennet. De resultaten worden gepresenteerd door een kleurclassificatie aan te geven op een kaart (rood en groen) voor verschillen in de beschikbaarheid. Daarnaast worden kansrijke maatregelen aangegeven die het mogelijk maken om de classificatie van een wegvak te verhogen.

Er is geen speciale aandacht besteed aan wegen op dijken. Deze wegen vormen wel een aandachtspunt omdat zowel hulpverleners (zwaar verkeer) als ramptoerisme (doorstroming) zorgen voor extra belasting op een moment dat de stabiliteit is afgenomen.

De beoordeling vindt plaats voor de potentiële overstromingsgebieden zoals in de eerdere Blue Spots overstromingsstudie en vervolgstudies gehanteerd [1].

1.4 Leeswijzer

Voor de uitvoering van het project is uitgegaan van de stappen hieronder weergegeven:

Stap 1 Beschrijving van te beoordelen mechanismen en relevante modellen in hoofdstuk 2.

In dit hoofdstuk wordt uitleg gegeven over het mechanisme afschuifinstabiliteit en het mechanisme verweking. Beide kunnen bij een zandlichaam optreden.

Stap 2 Vaststellen van uitgangspunten in hoofdstuk 3.

In dit hoofdstuk zijn de uitgangspunten voor de achterliggende analyses aangegeven om tot geometrische beoordelingscriteria te komen.

Stap 4 Vaststellen referentie dwarsprofielen in hoofdstuk 4.

In dit hoofdstuk zijn kenmerken en locaties van de referentie dwarsprofielen (cases) aangegeven.

Stap 5 Bepaling geometrische criteria en toetsresultaten in hoofdstuk 5.

In dit hoofdstuk worden de criteria voor de beoordeling voor Acute fase en de Herstelfase gepresenteerd. Tevens zijn alternatieve, scherpere criteria geformuleerd voor een beoordeling waarbij een schadestrook van 6 m optreedt. De resultaten worden gepresenteerd in de vorm van vier kaarten.

Stap 6 Conclusies, aanbevelingen en maatregelen in de hoofdstukken 6 en 7.

In hoofdstuk 7 worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

2 Mechanismen

Voor het beoordelen van de stabiliteit van een weglichaam zijn de mechanismen afschuifinstabiliteit en verweking beschouwd.

Het mechanisme afschuifinstabiliteit heeft een bezwijkpatroon dat in principe cirkelvormig verloopt en waarbij op het afschuifvlak onvoldoende wrijvingsweerstand wordt gevonden om het gewicht van de grondmoot te dragen. Het afschuifvlak loopt door tot onder het niveau van het aangrenzende maaiveld.

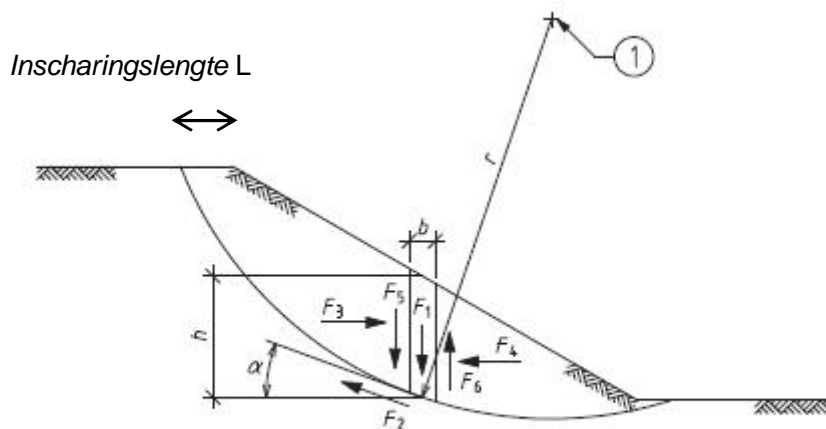
Het mechanisme verweking treedt op bij een talud onder water. Bij een te steil talud en relatief los gepakte zanden is er geen intern evenwicht en treedt verdichting op. De waterspanningen lopen daarbij snel op en waardoor de korrelspanningen en dus de weerstand sterk wordt gereduceerd. Een situatie van drijfzand is het gevolg en het talud zal onder een kleine helling uitvloeien. Bij verweking zijn de zandeigenschappen van het weglichaam van belang.

Een ander mechanisme is dat van bresvloeiing. Daarbij ontstaat door een lokale verstoring van een te steil talud met vast gepakt zand een dichtheidsstroming, waarbij het zand en water een zware vloeistof vormen. Het proces geeft een terugschrijdend steil bezwijkvlak. Het stromingsproces stopt als er geen bergingscapaciteit voor het getransporteerde zand aanwezig is. Het resultaat is hier ook een zeer flauwe eindhelling van het talud. Bresvloeiing kan optreden in specifieke gevallen. Het onderscheid tussen een verwekingsvloeiing en een bresvloeiing is voor hoge (of eigenlijk diepe) onderwater taluds, zoals bij zandwinputten of baggerdepots, vaak niet te zien. Voor taluds van weglichamen met beperkte weghoogtes wordt bresvloeiing als niet belangrijk gezien.

2.1 **Bezweijken talud van het weglichaam door afschuifinstabiliteit (macrostabiliteit volgens Bishop)**

Het weglichaam en de aanwezige taluds zijn ontworpen voor een situatie waarbij een bepaalde drooglegging aanwezig is. De freatische grondwaterstand zal zich normaal gesproken in het grondlichaam bevinden en niet bij het talud van het weglichaam uittreden.

De stabiliteit van de ophoging (taluds), de zogenaamde macrostabiliteit, wordt doorgaans volgens de methode Bishop geanalyseerd. Op deze wijze kan worden getoetst of de stabiliteit voldoende hoog is. In Figuur 2.1 is het principe van een cirkelvormig glijvlak om een rotatiecentrum van Bishop (lamellenmethode) weergegeven, zie ook [3]. Bishop beschouwt het momentevenwicht om dat rotatiecentrum. Aan de bovenzijde van het weglichaam wordt het effect van de instabiliteit zichtbaar door verzakking op wegniveau over de zogenaamde inscharingslengte L ; zie Figuur 2.1.



Legenda

1 Rotatie centrum

Figuur 2.1 Stabiliteit van een cirkelvormig glijvlak volgens Bishop en de krachtwerking (F_1 tot F_6) voor een willekeurige kolom met breedte b en hoogte h

Het gewicht van een kolom grond (en/of eventueel water) met een breedte b en hoogte h , veroorzaakt een aandrijvend moment om het middelpunt. Als dit kolommetje aan de andere zijde van het middelpunt zou staan dan weergegeven in Figuur 2.1 zou deze een tegenwerkend moment om het middelpunt tot gevolg hebben. Het aandrijvend moment kan vergroot worden door de aanwezigheid van een load (externe belasting, zoals een voertuig). Aan de onderzijde van de kolom grond zal, op het vlak van de cirkel, een bepaalde schuifkracht ontwikkeld kunnen worden, afhankelijk van het gewicht van de kolom en de sterkte-eigenschappen van de grondsoort (cohesie en interne wrijvingshoek). Deze schuifkrachten houden het afschuiven tegen en veroorzaken een tegenwerkend moment. De veiligheid tegen afschuiven, ofwel de safety factor (SF), wordt bepaald door het tegenwerkend moment te delen door het aandrijvend moment.

De basisvergelijking volgens [5] is weergegeven in onderstaande Figuur 2.2.

$$r \times \sum_{i=1}^{i=n} R_{\tau, \max; i; d} - r \times \sum_{i=1}^{i=n} (F_{eg; i; d} \times \sin \alpha_{i; d}) - \sum_{i=1}^{i=n} M_{i; d} \geq 0$$

waarin:

- $F_{eg; i; d}$ de rekenwaarde voor het eigengewicht van de lamel i , inclusief bovenbelasting, in kN;
- $M_{i; d}$ is de rekenwaarde van het moment rond het rotatiecentrum van de krachten exclusief het moment door $F_{eg; i; d}$ en $R_{\tau, \max; i; d}$, in kNm;
- $R_{\tau, \max; i; d}$ is de rekenwaarde van de weerstandbiedende schuifkracht van lamel i , tangentiaal aan het glijvlak (inclusief laterale paalweerstand), in kN;
- $\alpha_{i; d}$ is de rekenwaarde van de hoek tussen de horizontaal en de raaklijn van het glijvlak op de middellijn van lamel i , in $^{\circ}$;
- r is de straal van de glijcirkel, in m;
- b is de breedte van de lamel, in m;
- n is het aantal lamellen.

Figuur 2.2 Basisvergelijking Bishop lamellenmethode

Wanneer de grondwaterstand hoger wordt zal de stabiliteit van het talud veranderen. Doordat meer grond onder water komt neemt door afname van de verticale korrelspanning de schuifsterkte af en daarmee het tegenwerkend moment. Wanneer het overstromingswater, het water wat door de overstroming tegen het weglichaam staat, weer gaat zakken, ontstaat vaak een meer maatgevende situatie. Dat komt omdat de freatische grondwaterstand in het weglichaam de zakkende buitenwaterstand niet direct kan volgen en dus hoger blijft staan.

Bepalende grondparameters zijn de interne wrijvingshoek en cohesie en het effectief volumegewicht van de ondergrond (o.a. bepaald door de grondwaterstand). Geometrische aspecten zijn de hoogte (maaiveld weg t.o.v. omringend maaiveld) en de helling van het talud. Bij de analyse is rekening gehouden met een gelijkmatige verkeersbelasting van 20 kN/m² op alle rijbanen.

Voor de inschatting van het effect (inscharingslengte) van een instabiliteit kan gebruik gemaakt worden van het nomogram uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV2006) [6]. In dit voorschrift wordt een vergelijkbare situatie bekeken voor de beoordeling van het restprofiel van een dijklichaam bestaand uit zand. Bij het opstellen van de leidraad is de verkeersbelasting in rekening gebracht als een gelijkmatig verdeelde ontwerpbelasting van 15 kN/m² op één rijstrook met een breedte van 2,5 m. De inscharingslengte in het zandlichaam op een pakket slappe lagen wordt berekend met de formule:

$$L = f_k \cdot h$$

Waarin:

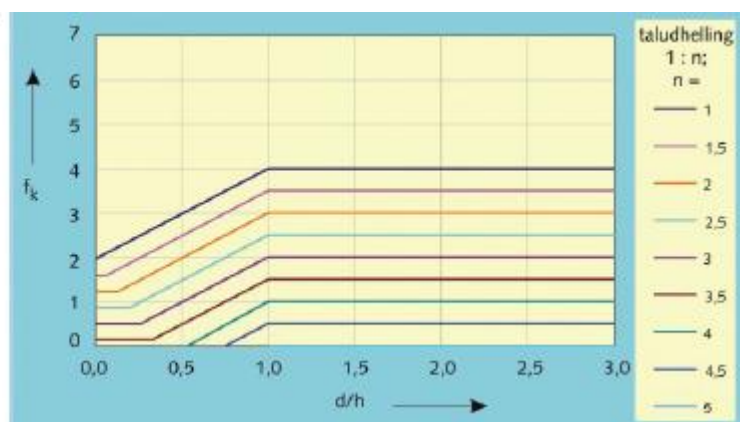
f_k is de coefficient, volgens Figuur 2.3

h is de hoogte van de weg t.o.v. het omringende gebied, volgens Figuur 2.4

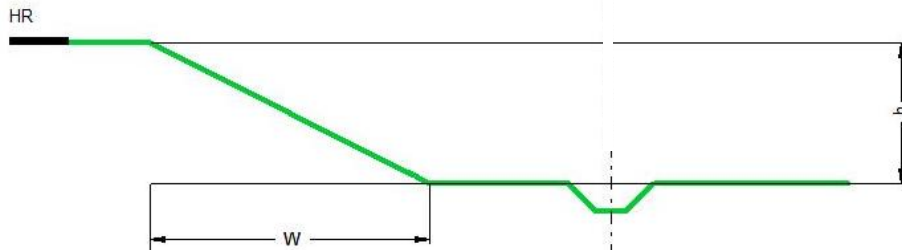
Voor de rijkswegen in de potentiële overstromingsgebieden wordt aangehouden dat er onder de wegfundering een pakket slappe lagen (d) aanwezig is met een dikte minimaal gelijk aan de dikte van het zandpakket (h); dus $d/h > 1$.

De taludhelling is de verhouding h/W volgens Figuur 2.4.

Figuur 5 - 4.14
Grafiek f_k versus d/h (of d_2/h_2) voor een grondlichaam met kern van zand (type 2)



Figuur 2.3 f_k -waarde voor een grondlichaam met kern van zand (ref [6])



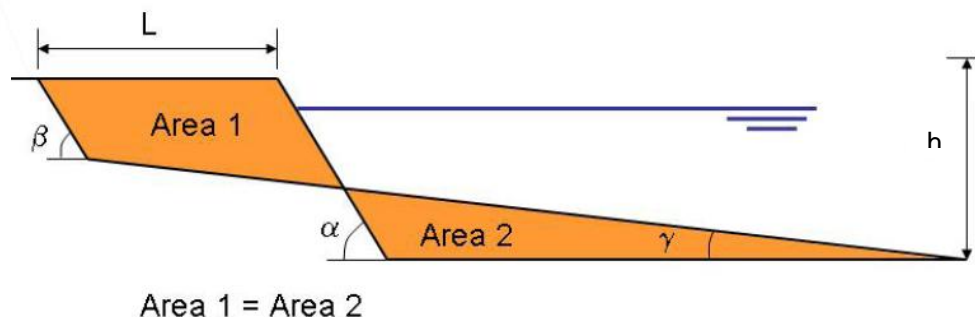
Figuur 2.4 Geometrie van dwarsdoorsnede

2.2 Bezijken van talud onder water door verweking

Taluds kunnen onder water minder steil opgezet worden als gevolg van een verminderd effectief gewicht en verminderde schuifsterkte. Daarnaast kunnen onderwater-taluds door verweking onderuit zakken en flauwer worden. De kans hierop is groter op locaties waar losgepakte zanden voorkomen.

Bij taluds van weglichamen moet rekening worden gehouden met los gepakt zand als gevolg van de 'vrije' horizontale bewegingsmogelijkheid van het zand in het weglichaam nabij het talud. Conform de bepalingen voor aanleg van onderwater taluds kan worden nagegaan of er een kans is op verweking na het onderwater komen te staan van een talud van een weglichaam [4]. Bij deze benaderende analyse wordt geen rekening gehouden met verkeersbelasting.

In Figuur 2.5 is het effect van een zettingsvloeiing (verweking) weergegeven. Als gevolg van verweking van een talud van een weglichaam (onder hoek α) ligt de grond uit 'area 1' na de zettingsvloeiing ter plaatse van 'area 2', waarbij er een flauw talud onder hoek γ resteert. L is de inscharingslengte.



Figuur 2.5 Flauwer talud na zettingsvloeiing

De kans op een verwekingsgevoelig talud neemt toe als de taludhelling steiler wordt en als de taludhoogte groter wordt. Taludbescherming (groen of verharding) verlaagt de kans op verweking. Door metingen, o.a. sonderingen, kan worden aangetoond dat er geen losgepakt zand aanwezig is en daarmee kan de kans op verweking worden uitgesloten.

Wanneer geen gegevens bekend zijn van het talud en de pakkingsdichtheid van het zandlichaam, wordt volgens [4] de kans op verweking verwaarloosbaar als:

$$\text{taludhelling} < 1 : 7 * \left(\frac{h}{30}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Voor kleine taludhoogtes (tot circa 3 m) kan, vanwege de veronderstelling dat er dan een laagdikte van maximaal 3 m losgepakt zand aanwezig is, een iets ruimere grens worden gehanteerd:

$$\text{taludhelling} < 1 : 4 * \left(\frac{h}{30}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Voorgaande benadering kan ook voor hogere taluds worden toegepast, echter dan moet worden aangetoond, bijvoorbeeld met grondonderzoek, dat er niet meer dan 3 m losgepakt zand aanwezig is.

De inscharingslengte L (zie Figuur 2.5) wordt op conservatieve wijze bepaald op maximaal 3 maal de taludhoogte H. Opgemerkt wordt dat dit deze waarde is bepaald voor hoge onderwatertaluds vanaf 10 m. In het algemeen wordt aangenomen dat de inscharingslengte lager kan uitvallen voor lagere taluds.

De bepalende grondparameters voor dit mechanisme zijn de pakkingsdichtheden van het zand in het weglichaam. In deze studie wordt aangenomen dat het zand in het weglichaam los gepakt is. Bepalende geometrische aspecten zijn de taludhelling en hoogte van het talud.

3 Uitgangspunten

3.1 Reliability Class NEN norm

Door Rijkswaterstaat is aangegeven dat een wegconstructie is ingedeeld in RC1; de Reliability Class (of betrouwbaarheidsindex) indeling volgens NEN-EN 1990 (Eurocode 0), zie Tabel 3.1. Dit komt overeen met de vroegere indeling in klasse 2 volgens de NEN6700 serie. Deze indeling zegt iets over de 'belangrijkheid' van de geotechnische constructie en de gevolgschade bij bezwijken. Een constructie is voldoende betrouwbaar indien wordt aangetoond dat deze gedurende een referentieperiode voldoende weerstand kan bieden aan alle belastingen die redelijkerwijs kunnen optreden. De betrouwbaarheidsindex β is een maat voor de faalkans en zegt iets over de kans dat een uiterste grenstoestand binnen de referentieperiode wordt overschreden. Hoe hoger de belangrijkheid van een constructie, des te hoger is de benodigde betrouwbaarheidsindex en des te lager de faalkans. Als referentieperiode voor blijvende constructies wordt veelal 50 jaar als standaard gehanteerd.

De indeling in een reliability class wordt gebruikt voor de bepaling van partiële materiaalfactoren voor sterkte eigenschappen, partiële belastingfactoren voor belastingen en safetyfactors voor de beoordeling van de veiligheid. Deze zijn in de normen gegeven.

NEN-EN 1990		NEN 6700		CUR-publicaties 162 / 166	
Klasse *)	β_{50}	Klasse	β_{50}	Klasse	β_{50}
				I	2,5 à 2,6
RC1	3,3	1	3,2	II	3,4
		2	3,4		
RC2	3,8	3	3,6		
RC3	4,3			III	4,2 à 4,3

*) RC staat voor *Reliability Class*

Tabel 3.1 Reliability Class indeling conform NEN-EN 1990; overzicht β -factoren UGT voor referentieperiode 50 jaar [ref 5]

3.2 Overstroming

Aangenomen wordt dat een overstroming optreedt. Dit kan gebeuren door het falen van een waterkering of door extreme regen. Hierdoor stijgt het water buiten het wegprofiel tot tegen het weglichaam of zelfs tot boven het weglichaam. Aangenomen is dat de weg geheel onder water komt te staan. In de berekeningen voor de macrostabiliteit is aangenomen dat het water naast de weg binnen 1 dag wordt verlaagd tot het normale niveau. Dit is een conservatief uitgangspunt.

3.3 Wegprofiel

De informatie betreffende de te beschouwen wegprofielen is bepaald op basis van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN2). De geometrische eigenschappen van de dwarsprofielen zijn automatisch bepaald en vastgelegd in de vorm van maaiveldhoogtes en taludhelling. De dwarsprofielen zijn met een gemiddelde tussenafstand van 100 m bepaald.

3.4 Hoeveelheid water op wegdek

Voor de onderhavige studie is de hoeveelheid water op de weg niet beschouwd. Deze is niet van belang voor de beschouwing van het mechanisme afschuifinstabiliteit. In de analyses is een grondwaterstand tot wegniveau aangenomen.

3.5 Grondopbouw

Bij de berekeningen voor de cases is voor het bepalen van de grondopbouw naast en onder de weg gebruik gemaakt van de informatie uit DINO [www.dinoloket.nl]. DINO is de afkorting voor Data Informatie Nederlandse Ondergrond. Het DINOloket biedt toegang tot de DINO database van de Geologische Dienst Nederland – TNO. De database bevat talrijke gegevens van de Nederlandse ondergrond, zoals booronderzoeken, sondeeronderzoeken en grondwateronderzoeken.

De grondparameters voor de cases zijn via correlatie met de sondeerwaarde bepaald met behulp van Tabel 2b uit NEN 9997 [5]. Dit betreffen conservatieve representatieve grondparameters voor Nederlandse omstandigheden.

3.6 Verkeersbelasting

Afschuifinstabiliteit

Voor de stabiliteitsbeoordelingen voor de cases wordt een gelijkmatig verdeelde belasting van 20 kN/m^2 gehanteerd op alle rijbanen. De vluchtstrook is daarbij onbelast (representatieve waarde). Voor een nadere toelichting wordt verwezen naar [2]. Bij de bepaling van de inscharingslengte via een nomogram is rekening gehouden met een beperktere verkeersbelasting, namelijk een gelijkmatig verdeelde ontwerpbelasting van 15 kN/m^2 op één rijstrook met een breedte van 2,5 m.

Verweking

Bij de bepaling van het effect en de inscharingslengte in een benaderende analyse wordt geen rekening gehouden met verkeersbelasting. Een aanpak kan zijn om de verkeersbelasting in rekening te brengen in de vorm van een toeslag op de werkelijke taludhoogte. Gezien de nauwkeurigheid van de benaderende relatie is in deze studie hiervan afgezien.

3.7 Stabiliteit

Voor het beschouwen van de stabiliteit is gemaakt van de modellering van het Bishop model in D-GeoStability 10.1. In D-GeoStability wordt uitgegaan van een vastgelegde freatische waterlijn in het weglichaam en een buitenwaterstand (overstromingswater). De waterlijn wordt bepaald voor de situatie met hoog water (water tegen het weglichaam tot aan wegdek). De verwachte maatgevende situatie is die na het verlagen van het overstromingswater. Het buitenwater is gezakt, terwijl het grondwater in het weglichaam nog niet volgt. Hierbij wordt aangenomen dat aan de teen van het talud de grondwaterstand tot maaiveld komt en vervolgens oploopt tot het punt aan de rand van de weg.

Er is gerekend met representatieve belastingen en representatieve grondparameters om het werkelijke grondgedrag zo goed mogelijk te simuleren. Het sondeerbeeld is bepaald op basis van archiefonderzoek. De toegepaste werkwijze is gelijkwaardig aan de werkwijze van de norm. De safetyfactor in een permanente situatie dient voor de representatieve situatie ca. 1,3 te bedragen. Deze waarde komt overeen met een $SF=1,0$ indien gebruik was gemaakt van rekenwaarden voor belastingen en parameters conform de NEN normen. In een tijdelijke situatie, zoals bij een overstroming, is een safetyfactor van 1,1 acceptabel. Deze waarde komt overeen met een $SF=0,85$ indien gebruik was gemaakt van rekenwaarden voor belastingen en parameters conform de NEN normen.

Wordt een safetyfactor kleiner dan 1,1 berekend dan zullen grote vervormingen door instabiliteit gaan optreden of zal een instabiliteit in de vorm van een afschuiving plaatsvinden.

Voor de bepaling van de inscharingslengte wordt het VTV2006 [6] volgens paragraaf 2.1 gevolgd.

3.8 Verweking

Voor het beschouwen van de verweking en bepaling van de inscharingslengte wordt de CUR113 [4] volgens paragraaf 2.2 gevolgd.

4 Referentie dwarsprofielen

4.1 Keuze van dwarsprofiel locaties

Bij de keuze van de zes cases in [2] is naast de karakterisering 'groot gevolg door onvoldoende draagkracht/verlies van stabiliteit' ook gekeken naar de variatie over Nederland.

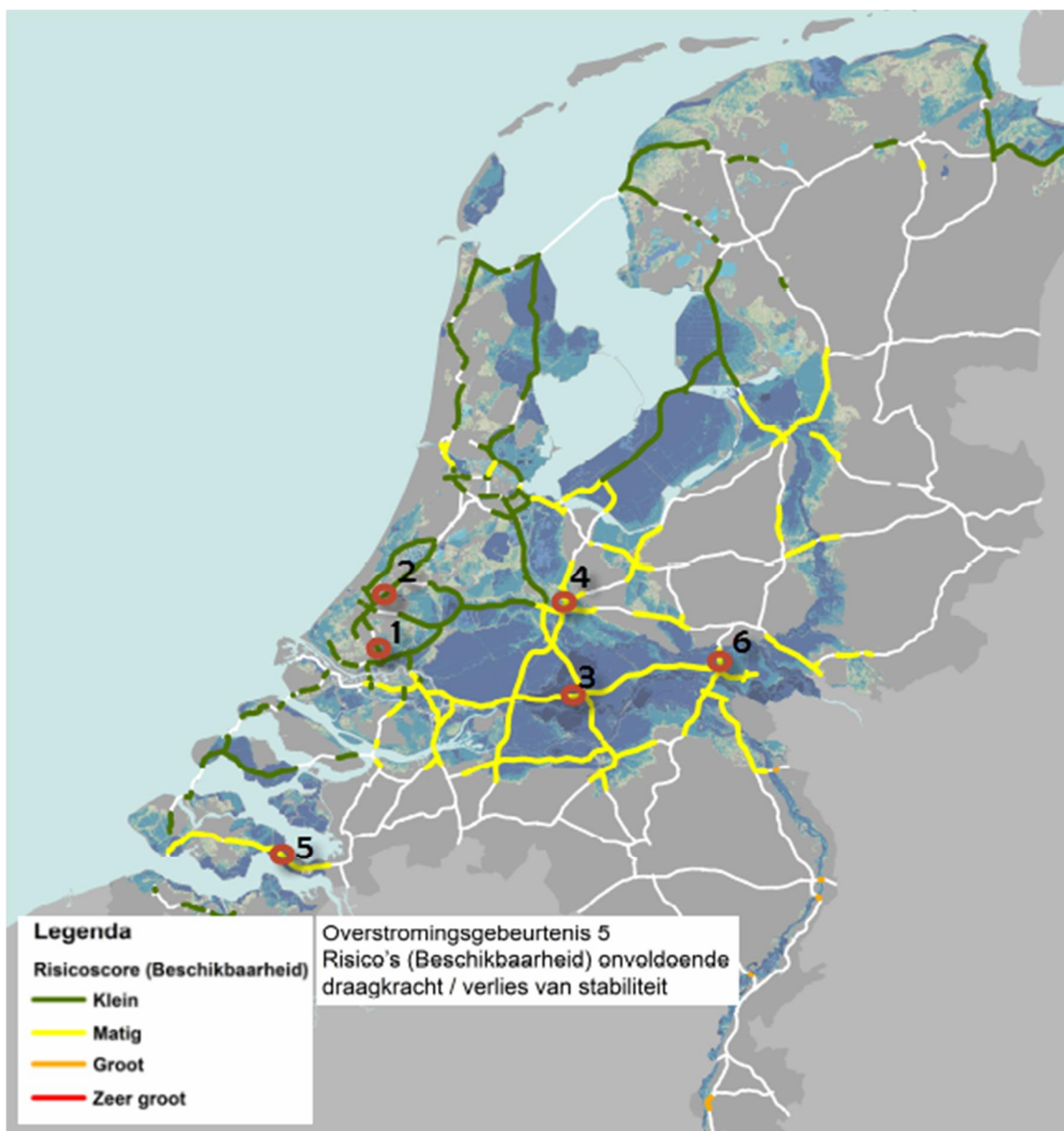
Daarbij is rekening gehouden met de aanwezige grond (zijn er veenlagen direct naast of onder de weg aanwezig) en de aard van de grond in de eerste meters onder de toplaag naast de weg. Tevens zijn wegen uitgekozen waarbij het wegdek enkele meters boven het omliggende maaiveld ligt. Dit omdat bij lage wegen een stabiliteitsprobleem minder realistisch is. Met de informatie van het Blue spots onderzoek [1], en het vervolg hierop, zijn de locaties bepaald waar het overstromingswater tot ongeveer wegdek niveau of daarboven uitkomt.

De gekozen locaties met kenmerkende weghoogte en overstromingswaterpeil, aankomsttijd van het overstromingswater en coördinaten in RD zijn weergegeven in Tabel 4.1. Uit de gegevens blijkt dat voor alle locaties geldt dat het overstromingswater of het wegniveau benadert dan wel de weg doet overstromen. In dat laatste geval zal aan beide zijden van de weg water staan.

Weglocatie	Weg-hoogte	Waterpeil	Hoogte randen asfalt	Aankomsttijd X van overstromingswater [dagen]	Xcoor (RD)	Ycoor (RD)
1. A13	-0,7	-0,6	-1,0	0 – 0,5	88432	440426
2. A4	-2,6	-0,7	-3,0	0 – 0,5	89322	456479
3. A15	2,2	6,7	1,9	0 – 0,5	143122	429365
4. A27	3,3	3,6	3,0	0,5 - 2	139111	454084
5. A58	1,8	4,2	1,5	0 – 0,25	62734	384396
6. A50	10,4	10,0	10,2	0,25 - 1	181391	437308

Tabel 4.1 Beoordeelde locaties en enkele kenmerkende locatie eigenschappen (hoogtematen in NAP)

De locaties zijn weergegeven in Figuur 4.1 op een in [1] geproduceerde kaart (inschattingskaart door expertgroep), waarin de risicoscore voor het aspect beschikbaarheid van de weg voor het onderwerp onvoldoende draagkracht/verlies van stabiliteit is aangegeven. In bijlage A zijn meer gedetailleerde locatiegegevens per dwarsprofiel gegeven.



Figuur 4.1 Beoordeelde locaties op kaart met risicoscore voor aspect beschikbaarheid voor het onderwerp onvoldoende draagkracht/verlies van stabiliteit (risicoscore is bepaald door inschatting van expertgroep); referentie [1]

5 Geometrische toetscriteria en resultaten

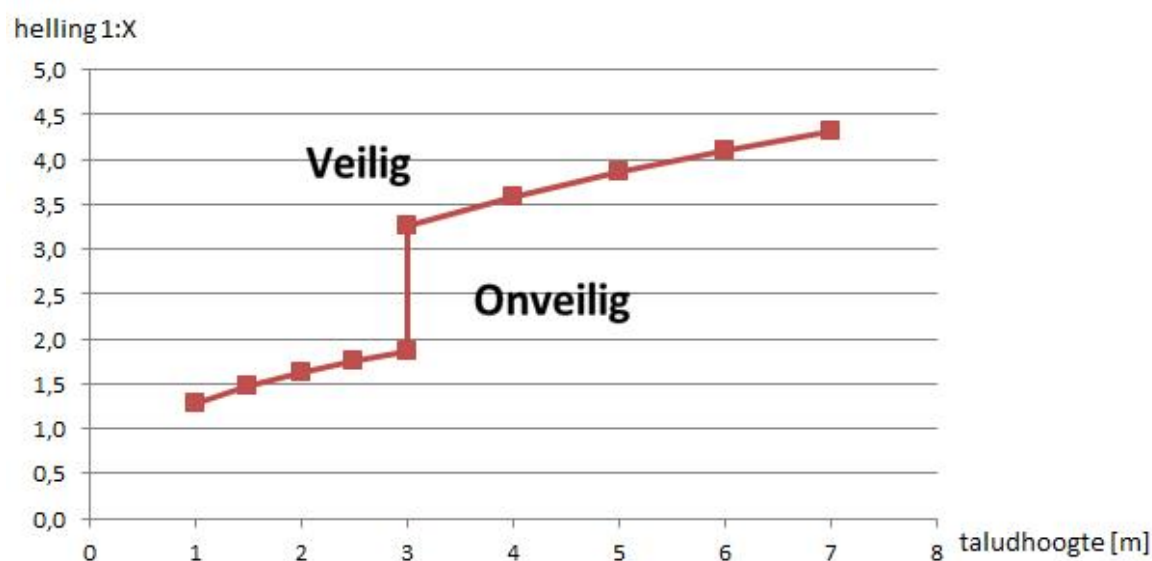
5.1 Acute fase, geen schade aan weglichaam

5.1.1 Omschrijving situatie

In deze situatie wordt uitgegaan van een volledige overstroming waarbij het water, ook in het weglichaam, tot het wegniveau of tot net boven het wegniveau reikt. Uitgangspunt is de beoordeling van trajecten waar geen schade aan het weglichaam en de rijbanen zal voorkomen zodat deze weer kunnen worden opengesteld voor verkeer.

5.1.2 Toe te passen geometrisch criterium

Het criterium voor verweking is in dit geval maatgevend omdat de berekende safetyfactors voor afschuifstabiliteit voldoende zijn (zie par. 5.1.3). De beoordeling kan plaatsvinden door de helling van het talud in combinatie met de hoogte van het talud te toetsen. In Figuur 5.1 is de begrenzing volgens de formules in paragraaf 2.2 weergegeven. In de benaderende aanpak is geen verkeersbelasting meegenomen.



Figuur 5.1 Criterium voor verweking – Acute fase

5.1.3 Controle afschuifstabiliteit in Acute fase

In Tabel 5.1 zijn de berekende safety factoren gegeven. Voor dwarsprofiel 1 (dwp1) zijn variatieberekeningen uitgevoerd (in blauw aangegeven) om de grens van instabiliteit te verkennen. De conclusie is dat alle dwarsprofielen stabiel zijn, waarbij wordt opgemerkt dat alleen in dwarsprofiel 1 is bij een steile helling van 1:1,5 een zeer lokale oppervlakkige instabiliteit is berekend. Het criterium voor verweking is ook voor deze geometrie maatgevend.

Een safetyfactor groter dan 1,1 is voldoende voor een tijdelijke situatie; dit is in Tabel 5.1 met groen aangegeven. Een safetyfactor kleiner dan 1,0 is met rood aangegeven. Bij de berekeningen is de verkeersbelasting meegenomen.

	Veiligheidsfactor Safetyfactor	hoogte [m]	helling 1:	breedte talud [m]	afstand tot insteek sloot [m]	grondsoort cirkel
	min					
dwp 1	1,18	1,7	3,5	6	6	veen
dwp 1	1,18	1,7	2,4	4	6	veen
dwp 1	1,18	1,7	2,4	4	16	veen
dwp 1	1,18	1,7	2	3,4	16	veen
dwp 1	0,8	1,7	1,5	2,5	16	veen
dwp 2	1,18	1,7	4,1	7	7	klei
dwp 2	1,18	1,5	2,7	4	7	klei
dwp 3	2,75	0,5	26	13	8	cunet/klei/veen
dwp 3	2,75	0,5	22	11	8	cunet/klei/veen
dwp 4	1,4	1,3	6,9	9	1	cunet/klei/zand
dwp 4	1,4	1,3	8,4	11	1	cunet/klei/zand
dwp 5	1,1	3,7	4,8	18	1	klei
dwp 5	1,1	3,8	5	19	1	klei
dwp 6	1,1	3	3,3	10	5	klei/veen
dwp 6	1,1	3	5	15	5	klei/veen

Tabel 5.1 Berekende waarden voor de safetyfactor – Acute fase

5.1.4 Resultaat van de toetsing Acute fase

Het resultaat van de geometrische beoordeling van de rijkswegen is weergegeven op de kaart in Bijlage C.

Voor enkele kleine delen van de rijkswegen in het overstromde gebied was het niet mogelijk de toets automatisch uit te voeren omdat er op basis van het hoogtebestand niet automatisch een eenduidig wegprofiel kon worden vastgesteld. Deze weggedeelten zijn aangegeven als witte lijnen binnen het bedreigde gebied.

5.2 Herstelfase, geen schade aan weglichaam

5.2.1 Omschrijving situatie

In deze situatie wordt uitgegaan van weggepompt overstromingswater en een ongunstige grondwaterstand tot wegniveau in het weglichaam. De wegpomptijd is conservatief aangehouden op 1 dag. Uitgangspunt is de beoordeling van trajecten waar geen schade aan het weglichaam en de rijbanen zal voorkomen zodat deze weer kunnen worden opengesteld voor verkeer.

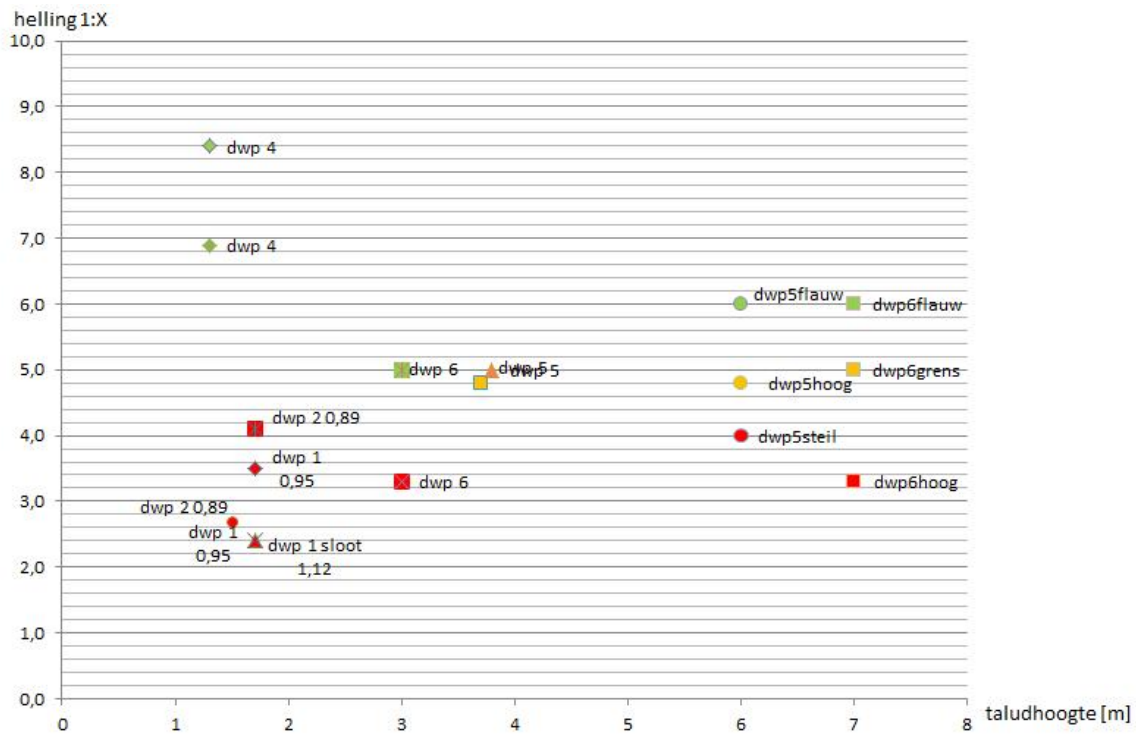
5.2.2 Toe te passen geometrisch criterium

Het criterium voor afschuifstabiliteit is in deze fase maatgevend. De beoordeling kan plaatsvinden door de waarde van de helling van het talud te toetsen. De resultaten van analyses van de cases zijn in Tabel 5.2 weergegeven. De variatieberekeningen zijn in blauw aangegeven. In de berekeningen is de verkeersbelasting meegenomen. Een safetyfactor groter dan 1,1 is voldoende voor een tijdelijke situatie; dit is in de Tabel 5.2 met groen aangegeven. Een safetyfactor tussen 1,0 en 1,1 is met geel aangegeven en een safetyfactor kleiner dan 1,0 is met rood aangegeven. De berekeningspunten zijn met dezelfde kleurcodering aangegeven in Figuur 5.2.

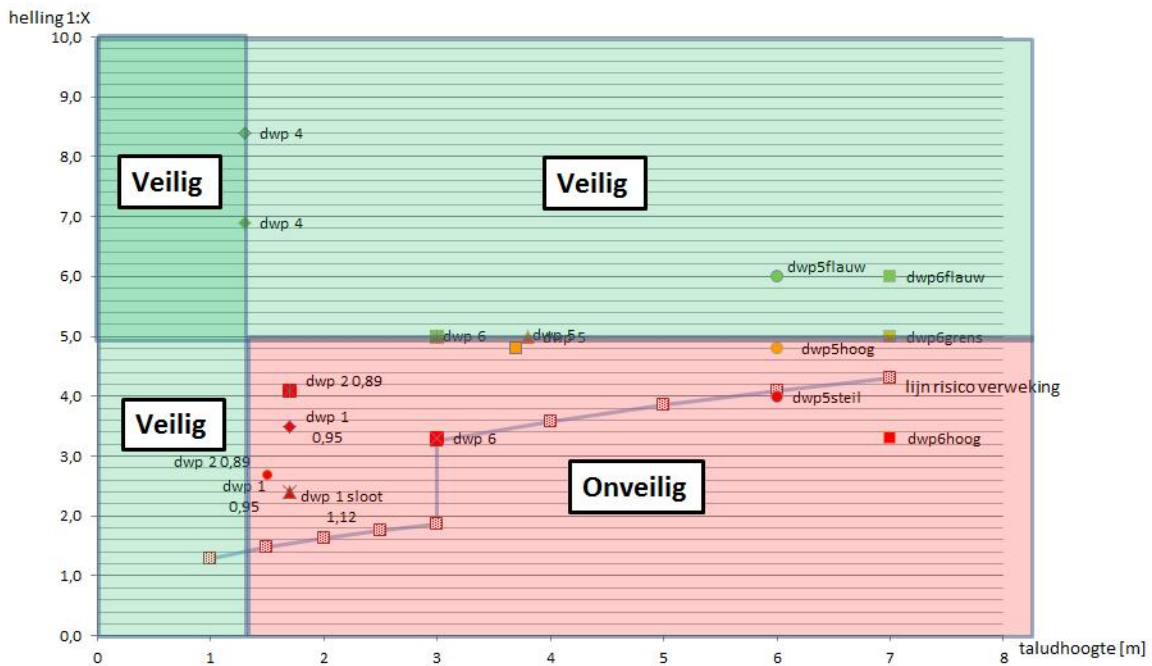
In Figuur 5.3 is het toetscriterium gepresenteerd. De helling van het talud moet flauwer zijn dan 1:5 om schade aan het weglichaam te voorkomen. Taludhoogten kleiner dan 1,3 m zijn stabiel, onafhankelijk van de taludhelling. Voor een helling van 1:5 is een talud juist nog voldoende stabiel, onafhankelijk van de taludhoogte. Het mechanisme verweking is in de herstelfase niet maatgevend, het verwekingscriterium wordt afgedekt door het stabiliteitscriterium; zie Figuur 5.3.

	Veiligheidsfactor Safetyfactor minimaal	hoogte [m]	helling 1:	breedte talud [m]	afstand tot insteek sloot [m]	grondsoort cirkel
dwp 1	0,95	1,7	3,5	6	6	veen
dwp 1	0,95	1,7	2,4	4	6	veen
dwp 1	1,12	1,7	2,4	4	16	veen
dwp 2	0,89	1,7	4,1		7	klei
dwp 2	0,89	1,5	2,7	4	7	klei
dwp 3	2,57	0,5	26	13	8	cunet/klei/veen
dwp 3	2,57	0,5	22	11	8	cunet/klei/veen
dwp 4	1,69	1,3	6,9	9	1	cunet/klei/zand
dwp 4	1,69	1,3	8,4	11	1	cunet/klei/zand
dwp 5	1,1	3,7	4,8	18	1	klei
dwp 5	1,1	3,8	5	19	1	klei
dwp 6	0,96	3	3,3	10	5	klei/veen
dwp 6	1,1	3	5	15	5	klei/veen
dwp5hoog	1,1	6	4,8	28,8	1	klei
dwp5flauw	1,33	6	6	36	1	klei
dwp5steil	0,8	6	4	24	1	klei
dwp6hoog	0,83	7	3,3	21,9	5	klei/veen
dwp6grens	1,1	7	5	30	5	klei/veen
dwp6flauw	1,23	7	6	36	5	klei/veen

Tabel 5.2 Berekende waarden voor de safetyfactor – Herstelfase



Figuur 5.2 Berekende waarden van de safetyfactor als functie van taludhoogte en taludhelling – Herstelfase



Figuur 5.3 Criterium voor afschuifstabiliteit – Herstelfase

5.2.3 Resultaat van de toetsing Herstelfase

Het resultaat van de geometrische beoordeling van de rijkswegen is weergegeven op de kaart in Bijlage D.

Voor enkele kleine delen van de rijkswegen in het overstroomde gebied was het niet mogelijk de toets automatisch uit te voeren omdat er op basis van het hoogtebestand niet automatisch een eenduidig wegprofiel kon worden vastgesteld. Deze weggedeelten zijn aangegeven als witte lijnen binnen het bedreigde gebied.

5.3 Acute fase, met accepteren van schade aan weglichaam en rijbaan

5.3.1 Omschrijving situatie

Voor deze situatie is een voorbeeld uitgewerkt voor een schadestrook van 6 m. Een strook van het weglichaam ter breedte van 6 m gaat daarbij verloren door een inscharing van 6 m door het verwekingsmechanisme. Er wordt uitgegaan van een volledige overstroming waarbij het water, ook in het weglichaam, tot het wegniveau of tot net boven wegniveau reikt. Opgemerkt wordt dat de analyse voor een andere gekozen inscharingslengte, b.v. 3 m of 9 m, kan worden herhaald.

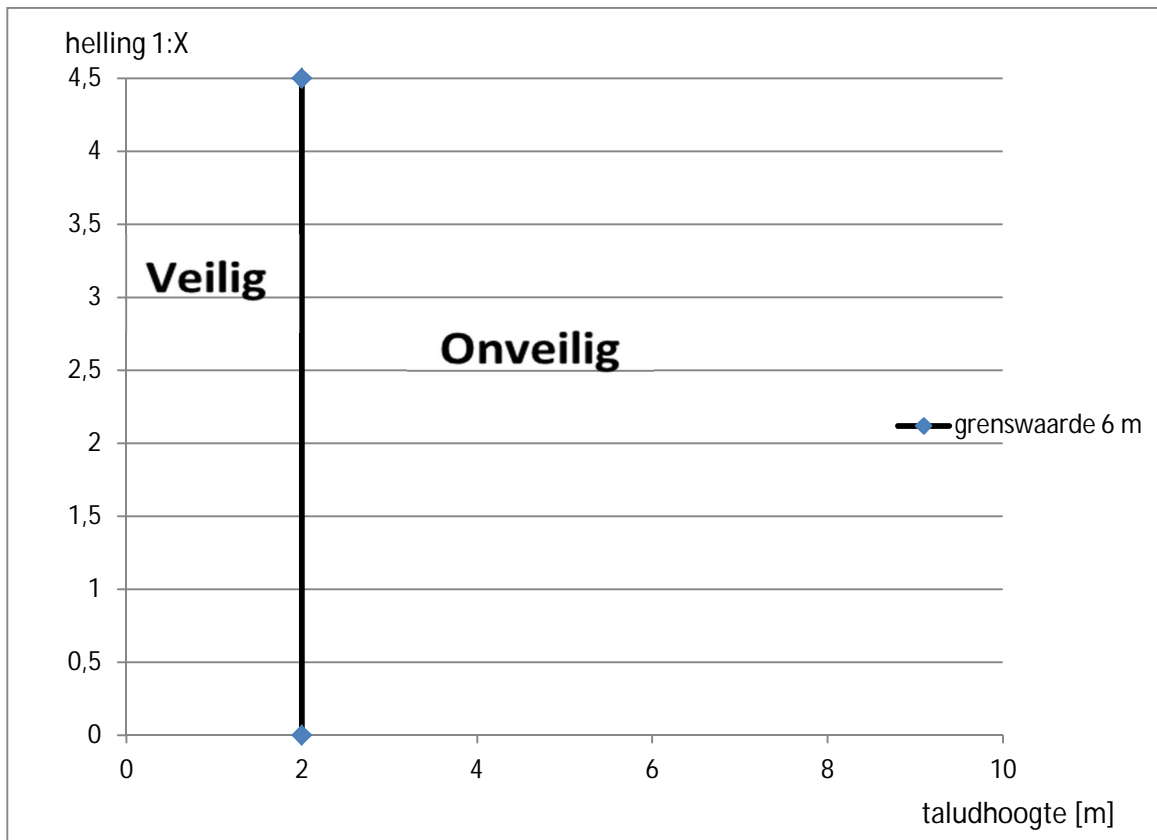
De verkeersbelasting kan voor alle geometrieën in voldoende mate worden gedragen, zoals blijkt uit de berekeningen van de afschuifstabiliteit (inclusief verkeersbelasting); zie paragraaf 5.1.3. De inscharingslengte en de grenswaarden zijn bepaald volgens paragraaf 2.2. In de benaderende aanpak is geen verkeersbelasting meegenomen.

De belastbaarheid door verkeer van de rijstroken direct naast de inscharing kan wel beperkt zijn door onzekerheid over de restgeometrie van het weglichaam, met name de steilheid en hoogte van de insnijding. Aanbevolen wordt om veiligheidshalve rekening te houden met een extra veiligheidszone met een strookbreedte gelijk aan de taludhoogte h (toepassen van een spreidingshoek van 45°).

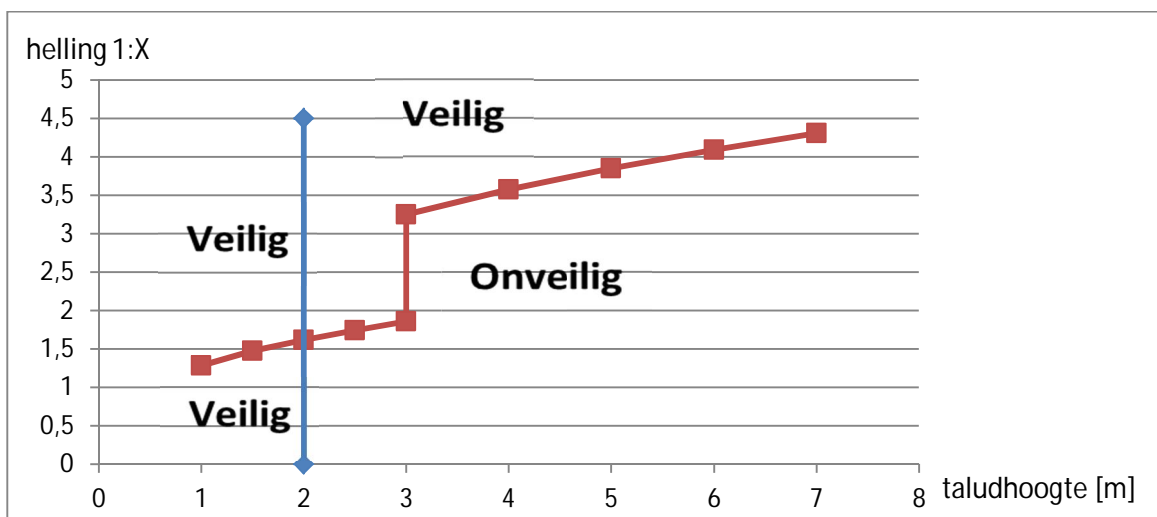
5.3.2 Toe te passen geometrisch criterium

Het criterium voor verweking is maatgevend maar wordt ruimer gekozen omdat een inscharingslengte van 6 m alleen kan optreden bij een weghoogte groter dan 2 m (de inscharingslengte is 3 maal de taludhoogte). Voor de taludhoogte tot 2 m zijn er dan geen beperkingen aan de taludhelling. Zie Figuur 5.4.

Voor een weghoogte groter dan 2 m geldt het eerder gepresenteerde criterium voor verweking. De toets is volgens Figuur 5.5 uitgevoerd.



Figuur 5.4 Criterium gebaseerd op inscharingseis bij maximale inscharingslengte van 6 m – Acute fase



Figuur 5.5 Criterium voor verweking, gecombineerde eis bij maximale inscharingslengte van 6 m – Acute fase

5.3.3 Resultaat van de toetsing Acute fase bij schade

Het resultaat van de geometrische beoordeling van de rijkswegen is weergegeven op de kaart in Bijlage E. Het valt op dat het toelaten van schade over een strookbreedte van 6 m de hoeveelheid veilige weggedeelten niet sterk toeneemt. Dit geeft aan dat als er schade optreedt deze veelal een flinke omvang zal hebben.

Voor enkele kleine delen van de rijkswegen in het overstroomde gebied was het niet mogelijk de toets automatisch uit te voeren omdat er op basis van het hoogtebestand niet automatisch een eenduidig wegprofiel kon worden vastgesteld. Deze weggedeelten zijn aangegeven als witte lijnen binnen het bedreigde gebied.

5.4 Herstel fase, met accepteren van schade aan weglichaam en rijbaan

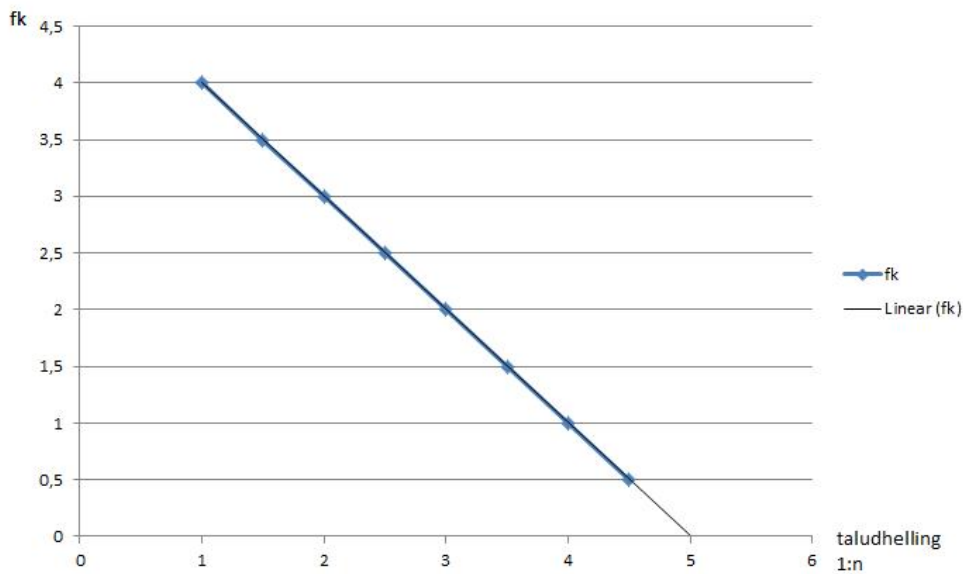
Omschrijving situatie

Voor deze situatie is een voorbeeld uitgewerkt voor een schadestrook van 6 m, een strook van het weglichaam ter breedte van 6 m gaat daarbij verloren door een inscharing van 6 m door afschuifinstabiliteit. In deze situatie wordt uitgegaan van weggepompt overstromingswater en een ongunstige grondwaterstand tot wegniveau in het weglichaam. De wegpomptijd is conservatief aangehouden op 1 dag.

De belastbaarheid door verkeer van de rijstroken direct naast de inscharing kan wel beperkt zijn door onzekerheid over de restgeometrie van het weglichaam, met name de steilheid en hoogte van de insnijding. Aanbevolen wordt om veiligheidshalve rekening te houden met een extra veiligheidszone met een strookbreedte gelijk aan de taludhoogte h (toepassen van een spreidingshoek van 45°).

5.4.1 Toe te passen geometrisch criterium

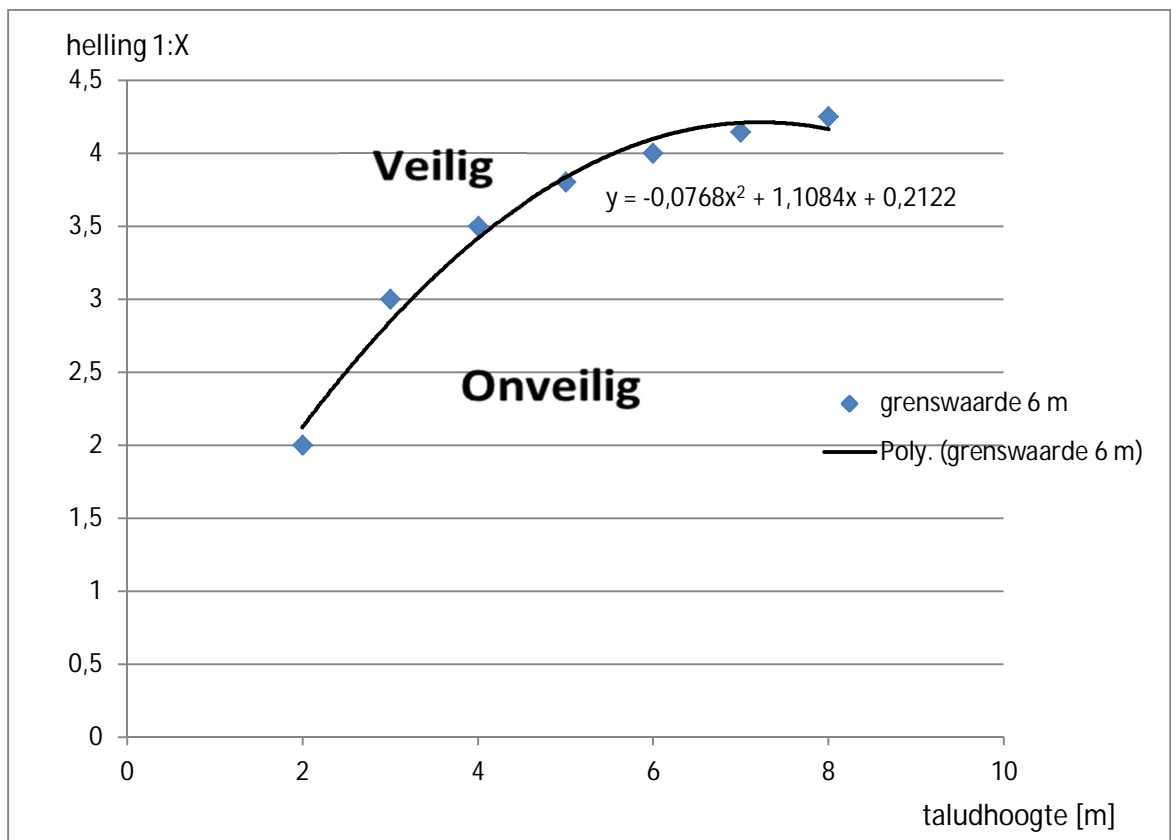
Het criterium voor afschuifinstabiliteit is maatgevend en kan worden getoetst met de waarde van de taludhelling en de hoogte van de weg. De begrenzing is gebaseerd op de formule voor de inscharingslengte $L = f_k \cdot h$; zie nomogram in Figuur 2.3. In dit nomogram is rekening gehouden met een beperkte verkeersbelasting (een gelijkmatig verdeelde ontwerpbelasting van 15 kN/m^2 op één rijstrook met een breedte van 2,5 m). Uit het volgende blijkt het nomogram echter te kunnen worden toegepast omdat het voldoende conservatief is. Bij de analyse van het weglichaam is voor afschuifinstabiliteit in paragraaf 5.2.2. een veilige taludhelling van 1:5 vastgesteld, hierbij is een verkeersbelasting van 20 kN/m^2 (over alle rijstroken) in rekening gebracht. Voor de waarde $d/h > 1$ zijn de f_k -waarden als functie van de taludhelling weergegeven in Figuur 5.6. Bij extrapolatie van de f_k -grafiek blijkt dat bij een taludhelling van 1:5 de f_k -waarde 0 is (geen inscharingslengte, dus een stabiel talud).



Figuur 5.6 f_k -waarde als functie van de taludhelling (ref.6)

Voor de inscharingslengte van 6 m kan de voor een specifieke taludhelling de bijbehorende maatgevende taludhoogte worden bepaald en worden weergegeven als toetscriterium; zie Figuur 5.7. De individuele resultaten van de analyse zijn benaderd met een polynoom om een automatische verwerking mogelijk te maken. De y-waarde is de helling van het talud en de x-waarde is de weghoogte h .

Voor de weghoogte tot 2 m zijn er geen beperkingen aan de taludhelling omdat de inscharingslengte daarbij kleiner dan is 6 m.



Figuur 5.7 Criterium voor afschuifinstabiliteit, inscharingseis bij inscharingslengte van 6 m – Herstelfase

5.4.2 Resultaat van de toetsing Herstelfase bij schade

Het resultaat van de geometrische beoordeling van de rijkswegen is weergegeven op de kaart in Bijlage F. Het valt op dat het toelaten van schade over een strookbreedte van 6 m de hoeveelheid veilige weggedeelten aanmerkelijk toeneemt. Opgemerkt wordt dat het landsdekkende beeld afhangt van de hier gekozen breedte (6m) van de schadestrook.

Voor enkele kleine delen van de rijkswegen in het overstroomde gebied was het niet mogelijk de toets automatisch uit te voeren omdat er op basis van het hoogtebestand niet automatisch een eenduidig wegprofiel kon worden vastgesteld. Deze weggedeelten zijn aangegeven als witte lijnen binnen het bedreigde gebied.

6 Conclusies

Een weglichaam is niet ontworpen op hoge waterstanden. Daarom is onderzoek uitgevoerd naar de stabiliteit en verweking van een weglichaam bij hoge waterstanden, door overstromen. Dit onderzoek is in 2013 voor een zestal cases (locaties in het hoofdwegennet) uitgevoerd [2]. In de huidige studie (2014) is het gehele hoofdwegennet onderzocht. Een weglichaam kan instabiel zijn in de Acute fase, maar is het meest kwetsbaar in de Herstelfase als het waterpeil zakt.

Met conservatieve aannames is een landsdekkend beeld gegenereerd van de kwetsbaarheid van weglichamen. Hieruit blijkt dat dit lokaal wordt bepaald door de hoogte en steilte van het talud van het weglichaam. Verspreid over alle locaties waar wegen overstromen kan de weg daarom schade ondervinden. In de Acute fase betreft dit grofweg een derde van alle door overstroming bedreigde wegen en in de Herstelfase grofweg twee derde. In de analyses waarbij een schadestrook van 6 m wordt geaccepteerd blijkt dat de situatie in de Acute fase niet aanmerkelijk gunstiger wordt, dit is wel het geval voor de Herstelfase.

Voor enkele kleine delen van de rijkswegen in het overstroomde gebied was het niet mogelijk omdat er op basis van het hoogtebestand niet automatisch een eenduidig wegprofiel kon worden vastgesteld. Deze weggedeelten zijn aangegeven als witte lijnen binnen het bedreigde gebied. Voor deze weggedeelten kan de beoordeling van de beschikbaarheid pas plaatsvinden na een inspectie ter plaatse en een toets met de in deze rapportage gepresenteerde criteria.

De analyse kan nog verder worden gedetailleerd, waardoor de kwetsbaarheid beperkter zal zijn dan nu berekend. Dit heeft met de volgende gehanteerde uitgangspunten te maken:

- In de berekeningen is aangenomen dat het waterniveau komt tot boven bovenkant weg. Deze aanname is op zich reëel omdat uit de Blue Spot studie en de vervolgstudies (Deltares, [1]) bekend is dat in het bedreigde gebied vrijwel alle wegen zullen overstromen, maar lokaal kan gevonden worden dat het water niet geheel tot wegniveau komt te staan. Als dit in de analyse wordt meegenomen dan zullen in de Acute fase minder kwetsbare plekken worden gevonden.
- Het water wordt in de berekeningen in 1 dag weggepompt. Dit is zeer snel en in de praktijk zal er langzamer worden weggepompt. Hoe sneller het water wordt weggepompt, hoe groter de kans op instabiliteit. Met dynamische berekeningen waarin de verlagingsnelheid en ook de doorlatendheid van het weglichaam wordt meegenomen, kan nauwkeuriger worden vastgesteld of de weg stabiel blijft. Hierdoor zullen minder kwetsbare plekken in de Herstelfase worden gevonden.

Het wordt verwacht dat ook met de uitgebreidere analyses gevonden wordt dat grote delen van het hoofdwegennet schade oplopen tijdens een grote overstroming in zowel de Acute als de Herstelfase.

7 Aanbevelingen

7.1 Aanbevelingen

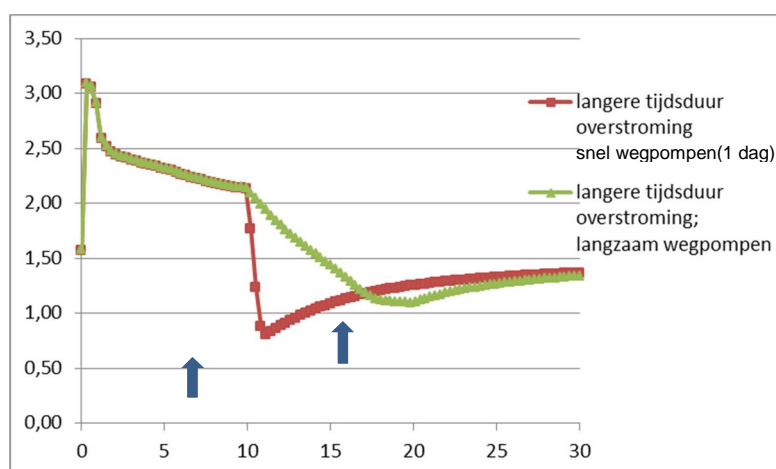
In de huidige studie is voor het eerst een landsdekkend overzicht ontwikkeld waarmee inzicht wordt verkregen in de (in)stabiliteit van rijkswegen tijdens en na overstromen. Om dit overzicht te ontwikkelen zijn conservatieve aannames gehanteerd. Het is de verwachting dat de berekeningen positiever uitvallen als gebruik gemaakt wordt van nauwkeuriger (locatieafhankelijke) data. Daarnaast kan ook gebruik gemaakt worden van een nauwkeuriger rekenmodel. Hieronder worden in volgorde van verwacht effect de verbeteringen benoemd.

Gebruik maken van locatieafhankelijke overstromingsdata

Er zijn twee aannames gedaan die in veel gevallen te conservatief zullen zijn. Deze zijn:

- Daalsnelheid van het water

De stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd met de aanname dat het water in 1 dag is weggepompt. Dit is vaak te conservatief; in diepgelegen polders gaat het namelijk over 1 centimeter per dag. Bij het langzamer wegpompen van het overstromingswater worden de gevonden safetyfactoren voor bezwijken minder laag [2]. Zie blauwe pijlen in Figuur 6.1 ter illustratie. Daarom wordt aanbevolen om in de berekeningen rekening te houden met de verwachte daalsnelheid per locatie.



Figuur 7.1 Stabiliteit als functie van de tijd bij een 10d durende overstroming en snel/langzaam wegpompen overstromingswater (horizontaal –tijd in dagen, verticaal safetyfactor,) ref[2]

- Hoogte van de overstroming

De stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd voor alle locaties waar water aanwezig is bij de weg tijdens een overstroming. Daarbij is aangenomen dat bij alle locaties de gehele weg is overstroomd (de 'kruin' staat onder water). Voor die gevallen waarbij er alleen water tegen de weg aan staat is dit een te conservatieve aanname. Daarom wordt aanbevolen om bij de berekeningen ook rekening te houden met de hoogte van de overstroming.

Gebruikmaken van meer geavanceerde modellen

Om een landsdekkend beeld te verkrijgen zijn eenvoudige rekenmodellen toegepast. De volgende verbeteringen zijn hierin mogelijk:

- Toepassen van meer geavanceerdere rekenmodellen om het voorkomen en het effect van verweking te voorspellen. Hierbij kan het effect van de verkeersbelasting worden meegenomen.
- Het schademechanisme afschuifinstabiliteit kan met een dynamisch model [2] worden vastgesteld en uit deze berekening kan ook de inscharingslengte per dwarsprofiel worden afgeleid. Dit op basis van een nauwkeuriger inschatting van de afpompsnelheid ter plaatse en de tijdsduur van de overstroming. De kaarten zullen een minder conservatief beeld geven.

Wanneer op deze manier wordt gerekend kunnen de resultaten in een overzichtskaart van de inscharingslengte worden gepresenteerd. Hiermee wordt een inzicht gekregen in de variatie van de strookbreedte die door de schademechanismen verloren gaat. De aanpak kan eerst d.m.v. pilots voor een aantal locaties worden onderzocht.

Gebruik maken van locatieafhankelijke data van de ondergrond

In de huidige berekeningen is een sterk vereenvoudigd ondergrondmodel gehanteerd. Voor verweking (acute fase) en instabiliteit (herstelfase) hebben deze aannames gevolgen.

- Voor verweking is nu aangenomen dat – in (de taluds van) het weglichaam - los zand aanwezig is. Door (al beschikbare) informatie/metingen, o.a. sonderingen, kan worden aangetoond dat losgepakt zand niet aanwezig is en daarmee kan de kans op verweking worden uitgesloten. De aanpak kan eerst d.m.v. pilots voor een aantal locaties worden onderzocht.
- Voor stabiliteit is de dikte en doorlatendheid van zandlagen van belang. Nu is aangenomen dat een zandlichaam aanwezig is tot maaiveld met daaronder slappe lagen. Dit is vaak conservatief, omdat er meestal een zandcunet aanwezig zal zijn in de slappe lagen. Met aanvullende analyses kan de classificatie van weggedeelten worden verbeterd. De analyses moeten worden uitgevoerd op basis van de geometrische informatie over de dwarsprofielen en informatie over samenstelling van het weglichaam (doorlatendheid en conusweerstand) en de ondergrond (dikte van de samendrukbare grondlagen onder het weglichaam). Met een aanpak à la DAM (Dijksterkte Analyse Module, zoals in de waterkering wereld gebruikt, kan een slag gemaakt worden zonder dat al teveel gedetailleerde informatie nodig is. Ook hier kan de aanpak eerst d.m.v. pilots voor een aantal locaties worden onderzocht.

7.2 Maatregelen

De volgende maatregelen kunnen worden overwogen om de robuustheid van het wegennet te vergroten.

(1)

Opstellen van ontwerprichtlijnen voor aanleg van nieuwe kritische (delen van) rijkswegen waarbij aspect overstromingsrisico wordt verwerkt. Dit kan o.a. in de vorm van stabiliteitsverhogende constructies bij (het talud van) het weglichaam:

- Verlagen steilheid taluds
- Beïnvloeding van waterstand in weglichaam door actief pompen na een calamiteit
- Toepassen van constructieve elementen in het talud

(2)

Door het verder weg brengen van de wegsloten langs de rijkswegen wordt de situatie gunstiger.

Referenties

- [1] Hier wordt een reeks van rapporten bedoeld:
- [Deltares, 2012]
Investigation of the blue spots in the Netherlands National Highway Network
Deltares rapport 1205568-000-GEO-0007-jvm, mei 2012, in opdracht van
Rijkswaterstaat, (thans) Water, Verkeer en Leefomgeving
- [Deltares, 2013]
Risico's van overstroming voor het functioneren van het hoofdwegennet
1207849-000-GEO-0002, Versie 2, 18 oktober 2013, definitief, in opdracht van
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
- [Deltares, 2014a]
Functie van het hoofdwegennet tijdens overstromen (bij evacuatie, redding en in de
nafase),
Rapport 1207849-000-GEO-0005-gbh, 18 februari 2014, definitief, in opdracht van
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
- [Deltares, 2014b]
Risico's van overstromen regionale wateren voor functioneren hoofdwegennet
Rapport 1207849-000-GEO-0004-gbh, 19 februari 2014, definitief, in opdracht van
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
- [2] Deltares (2013), KPP GE5 Klimaatbestendigheid geotechnische constructies –
Sterkte en stabiliteit wegen bij overstromingen', kenmerk 1207839-000-GEO-0004,
v3, Delft.
- [3] Rijkswaterstaat (1998, 4^e editie 2006), 'Handleiding wegenbouw, ontwerp
verhardingen', Delft.
- [4] CUR aanbeveling 113 (2008), 'Oeverstabiliteit bij zandwinputten', Stichting CurNet,
Gouda.
- [5] NEN 9997-1+C1:2012 nl (consolidatie van NEN-EN 1997-1+C1:2012 en NEN-EN
1997-1+C1:2012/NB:2012), 'Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1, Delft.
- [6] Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007), Voorschrift Toetsen op Veiligheid
Primaire Waterkeringen (VTV2006)
- [7] Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2014
Getekende Overeenkomst tussen de Stichting Deltares en het Ministerie van
Infrastructuur en Milieu voor het uitvoeringsjaar 2014, brief met kenmerk RWS-
2014/3177, 21 januari 2014.
Genoemde overeenkomst valt onder de Samenwerkingsovereenkomst tussen de
stichting Deltares en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu van 20 december
2012, kenmerk KW-31078379.

A Gegevens dwarsprofielen

A.1 Profiel 1: A13 t.h.v. hmp 17.0

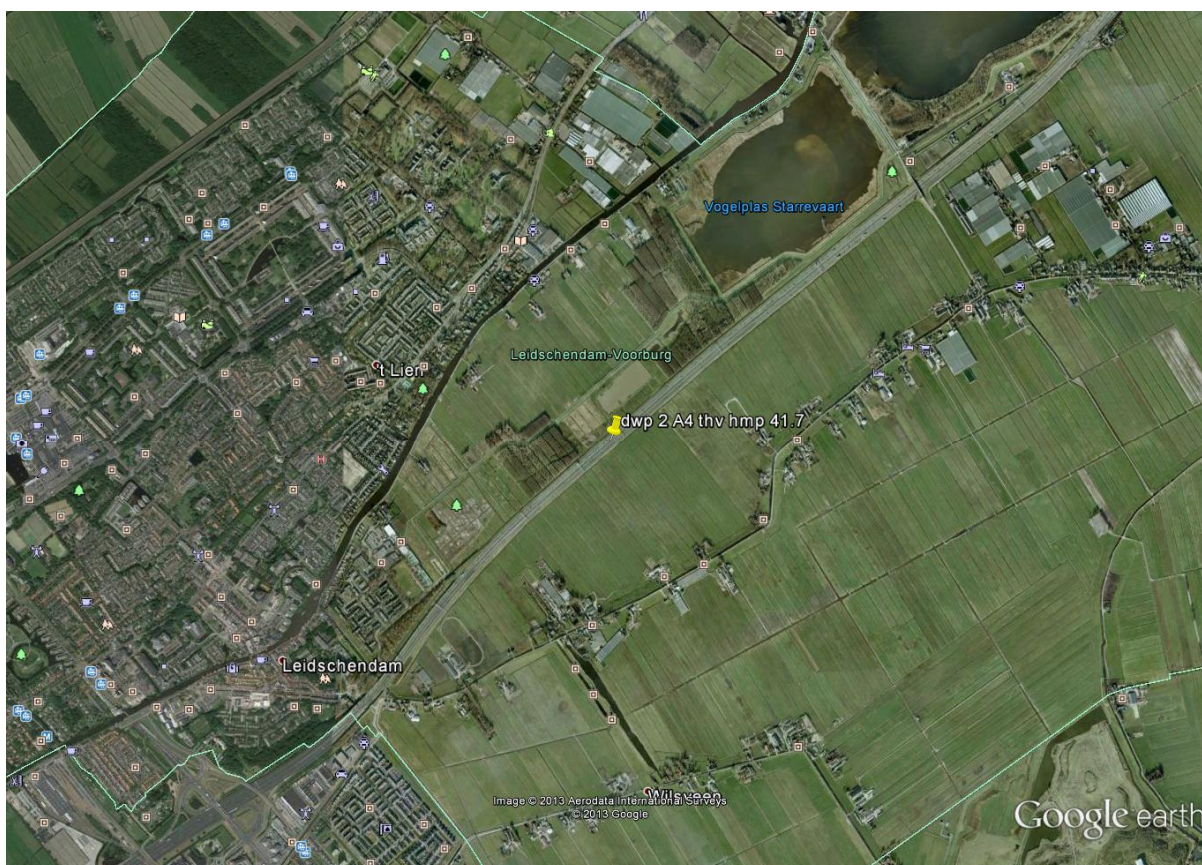
Locatie	Hmp 17.0
Omschrijving	Tussen Rotterdam en afslag 11 N209
Type	3 baans weg
Kenmerken	Sluit aan bij INCAH casegebied Omgeving Rotterdam Veen gebied



Figuur A.1 Bovenaanzicht dwarsprofiel 1 A13

A.2 Profiel 2: A4 t.h.v. hmp 41.7

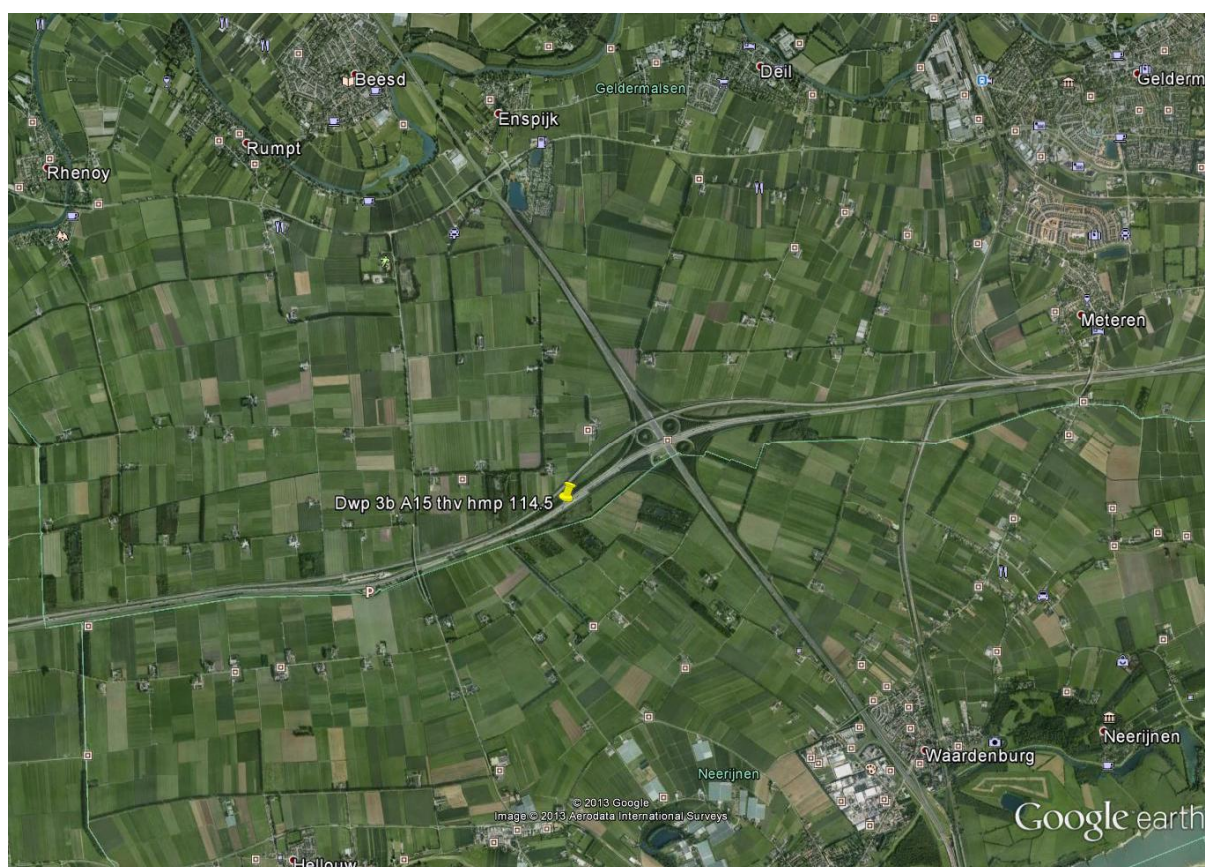
Locatie	Hmp 41.7
Omschrijving	tussen Leischendam en Vlietlanden
Type	3 baans weg
Kenmerken	Omgeving Den Haag Veengebied



Figuur A.2 Bovenaanzicht dwarsprofiel 2 A4

A.3 Profiel 3: A15 t.h.v hmp 114.5

Locatie	Hmp 114.5
Omschrijving	Tussen afslag 29 N848 en knooppunt Deil
Type	3 baans weg
Kenmerken	Rivierengebied



Figuur A.3 Bovenaanzicht dwarsprofiel 3 A15

A.4 Profiel 4: A27 t.h.v. hmp 78.2

Locatie	Hmp 78.2
Omschrijving	Tussen knp Lunetten en knp Rijnsweerd
Type	4 baansweg
Kenmerken	Omgeving Utrecht Klei, veen,zand ondergrond



Figuur A.4 Bovenaanzicht dwarsprofiel 4 A27

A.5 Profiel 5: A58 t.h.v. hmp 135.4

Locatie	Hmp 135.4
Omschrijving	Tussen afslag 32 en afslag Yerseke (nabij Vlaketunnel)
Type	2 baansweg
Kenmerken	Omgeving Zeeland Klei grond



Figuur A.5 Bovenaanzicht dwarsprofiel 5 A58

A.6 Profiel 6: A50 t.h.v. hmp 156,2

Locatie	Hmp 156.2
Omschrijving	Nabij knp Valburg
Type	2/3 baansweg
Kenmerken	Omgeving Arnhem Rivierengebied



Figuur A.6 Bovenaanzicht dwarsprofiel 6 A50

B Toelichting op de wijze waarop de taluds zijn bepaald (GIS)

Het geautomatiseerd bepalen van de relevante taluds langs de rijkswegen is uitgevoerd in een aantal stappen. Deze stappen zijn:

1. Bepaling van de X- en Y-coördinaten van lijnen van ongeveer 100 meter lengte dwars op de hoofdrijbanen van de rijkswegen. Deze dwarslijnen zijn bepaald om de 100 meter langs de as van de weg en uitsluitend in gebieden waar de as van de weg binnen potentieel overstroomd gebied ligt. Op de lijn zijn per elke meter punten gedefinieerd.
2. Op deze punten, die samen een dwarslijn vormen, is de Z-coördinaat bepaald door uit het AHN2 (met afmeting van de cellen van 50 x 50 cm) de waarde op het punt uit te lezen.
3. Tijdens de bepaling van de hoogteligging is bepaald waar de lijnen de randen van de rijbaan kruisen.
4. Bepaling taluds is door, vanuit de twee in stap drie gevonden punten, naar buiten toe te werken en het einde van het talud te bepalen. Tot dit einde gevonden is wordt telkens de lokale helling bepaald. De grootste gevonden waarde wordt gebruikt. De hoogteligging van het einde van het talud wordt genomen als het punt waarop het talud eindigt. De hoogte van de weg wordt bepaald als gemiddelde over de punten tussen beide kruisingen met de rand van de weg. De beide taludhoogten zijn dan het verschil tussen beide getallen. Van beide aldus gevonden maximale hellingen en taludhoogtes worden voor verdere stappen de waarden *behorende bij de grootste hoogte* gebruikt.
5. Met de aldus gevonden waarden voor h en h/W wordt berekend of de lijn voldoet aan de 4 criteria voor veiligheid (Stabiliteit acute fase, stabiliteit herstelfase, acute fase met 6 m schadestrook en herstelfase met 6 m schadestrook).

Hieronder volgt een meer gedetailleerde beschrijving van elke stap.

Bepaling dwarslijnen

Deze lijnen zijn bepaald om de 100 meter langs de as van de weg en uitsluitend in gebieden waar de as van de weg binnen potentieel overstroomd gebied ligt. Op de lijn zijn elke meter punten gedefinieerd.

De as van de weg is genomen uit het shape bestand WegVakken van het NWBW versie 1 oktober 2011 (NWBW20111001_'R','P'_B), gefilterd op beheerder rijk (WEGBEHSRT="R") en type hoofdrijbaan (BST_CODE="HR").

Als potentieel overstroomd gebied is het grid height_m5.asc gebruikt.

De gebruikte routines (in C#) zijn Reshaper.exe om de filtering uit te voeren en PerpLines.exe voor de bepaling van de lijnen.

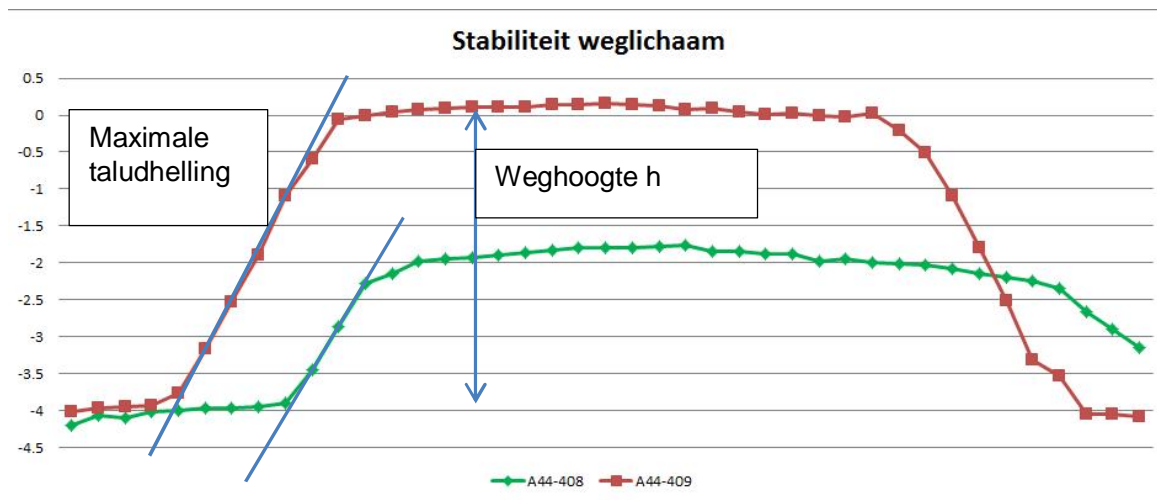
Bepaling hoogte

Vanwege de grote hoeveelheid gegevens zijn vóór deze stap alle kaartbladen van het AHN2 teruggebracht tot grids in 16 bits integers. Het bereik daarvan is -32768 tot + 32767, de opgeslagen waarden zijn het aantal cm's boven NAP. In Zuid-Limburg zijn alle waarden >

327.67 meter op 32767 cm gesteld. Aangezien in dat gebied geen potentieel overstromde gebieden liggen doet dit niet af aan de bepaling.

De gebruikte routine is FillFromAHN.exe

In Figuur 9.1 is een voorbeeld van de weghoogte h en de maximale taludhelling aangegeven.



Figuur 0.1 Voorbeeld van de bepaling van de maximale taludhelling en de weghoogte h (meetpunten h.o.h. 1 m)

Kruising met randen rijbaan

Het BPS_banen bestand is gefilterd op hoofdrijbaan. Vanuit het midden van elke dwarslijn (punt 50) is zowel naar links als naar rechts het laatste punt gezocht dat nog binnen een hoofdrijbaan polygoon ligt. Routine fillRoadEdges in FillFromAHN.exe

Bepaling taluds

Telkens wordt over een interval van drie punten de helling bepaald. Is de helling stijgend ten opzichte van het midden van de weg over een zoeklengte van 6 m, dan eindigt het talud direct aan de wegrand (stabiliteit bij verdiepte ligging wordt niet bepaald). Het talud eindigt ook als de helling beneden een grenswaarde van 1:40 daalt (als gemiddelde over 3 m).

Beoordeling

Met behulp van de gegeven formules wordt bepaald of deze doorsnede in het veilige of onveilige gebied ligt.

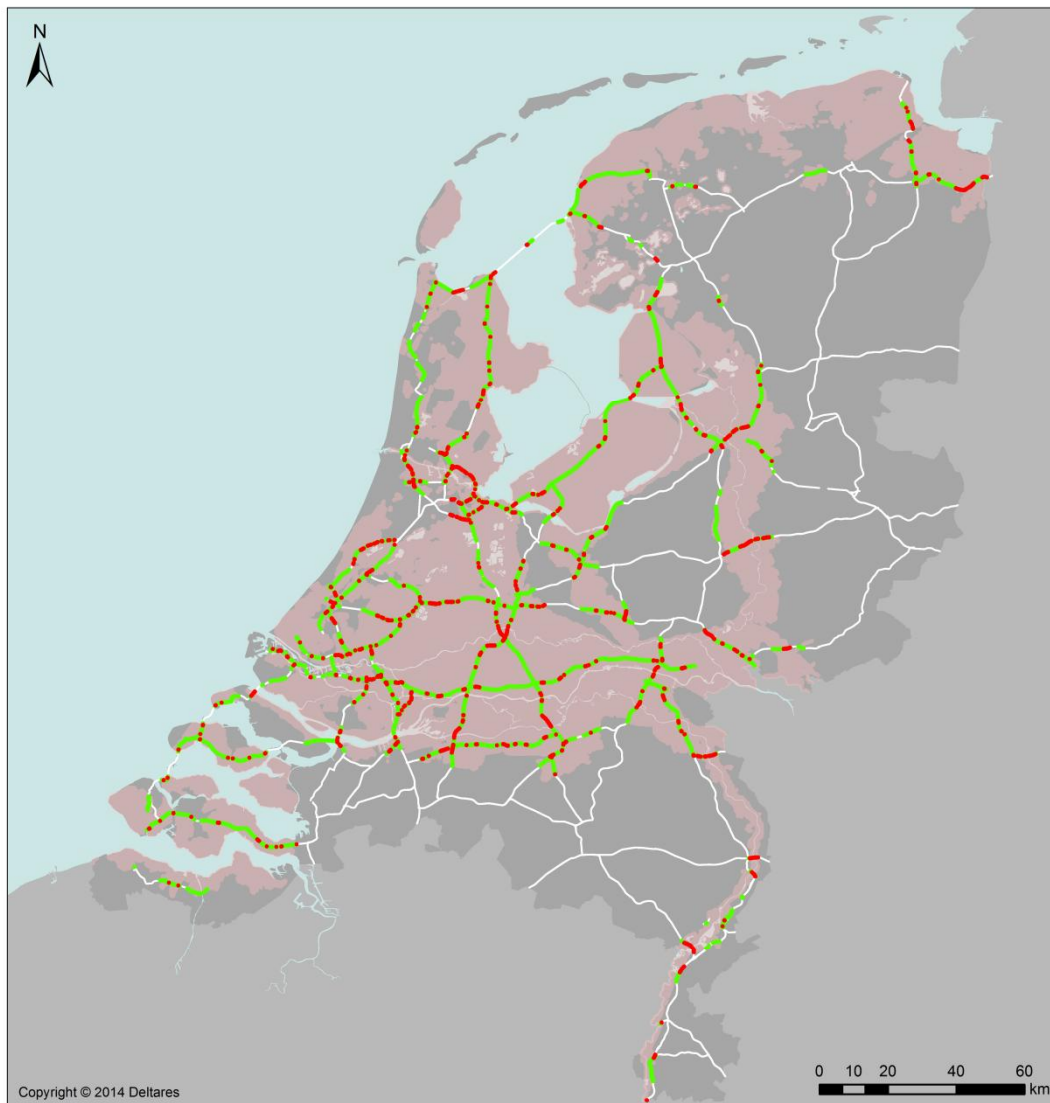
C Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Acute fase)

Inclusief enkele detailkaarten.

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Beoordeling stabiliteit van rijkswegen - acute fase



Legenda

Wegen

- Niet stabiel
- Stabiel

Gebied

- Bedreigd
- Open water
- Buitenland
- Nederland



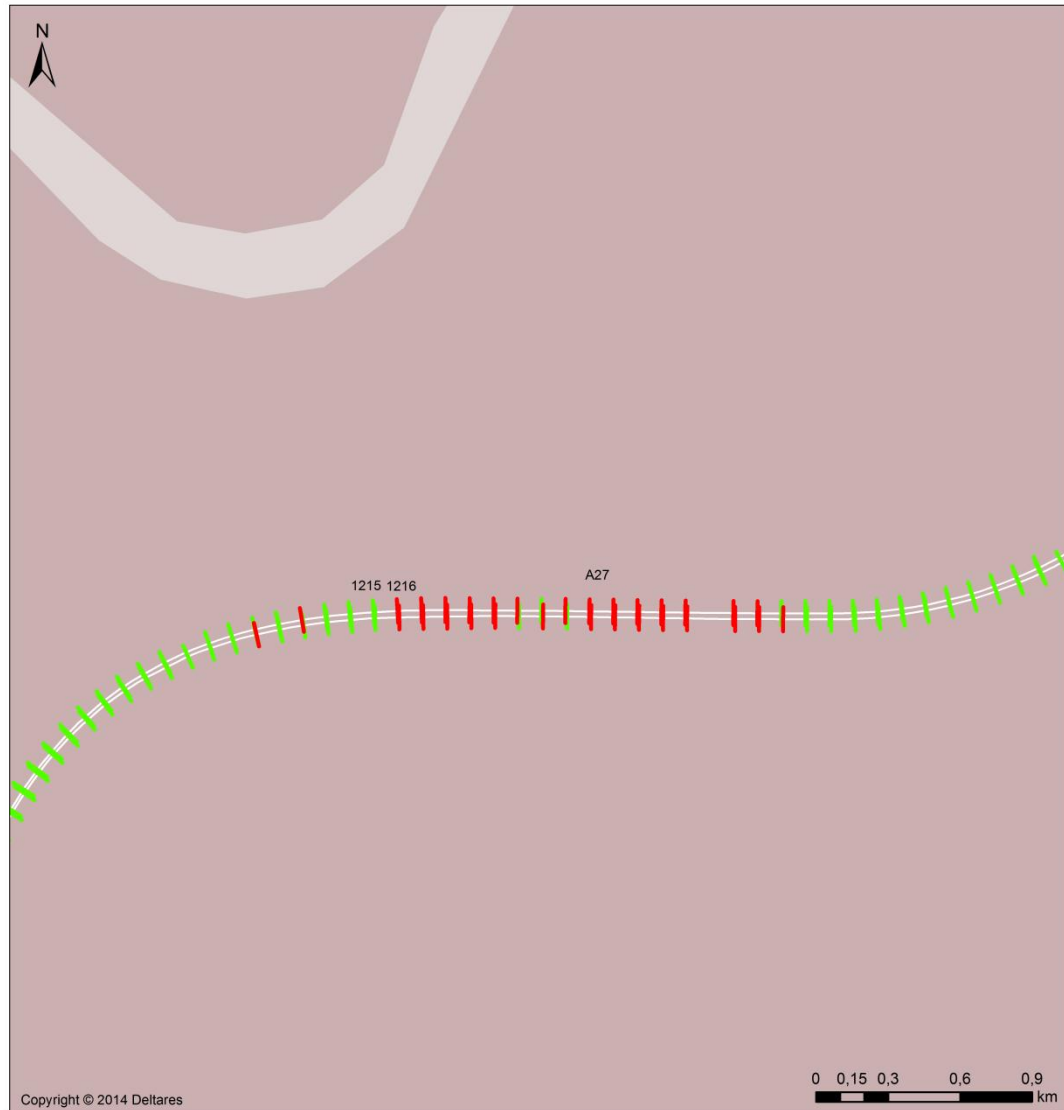
Figuur: kaart 1

Project nummer: 1209380.005
Datum: 2014-10-30
Status: Definitief
Auteur: André Hendriks

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Beoordeling stabiliteit van rijkswegen - acute fase



Copyright © 2014 Deltares

0 0,15 0,3 0,6 0,9 km

Legenda

Wegen

- Niet stabiel
- Stabiel

Gebied

- Bedreigd
- Noordzee
- Buitenland
- Nederland

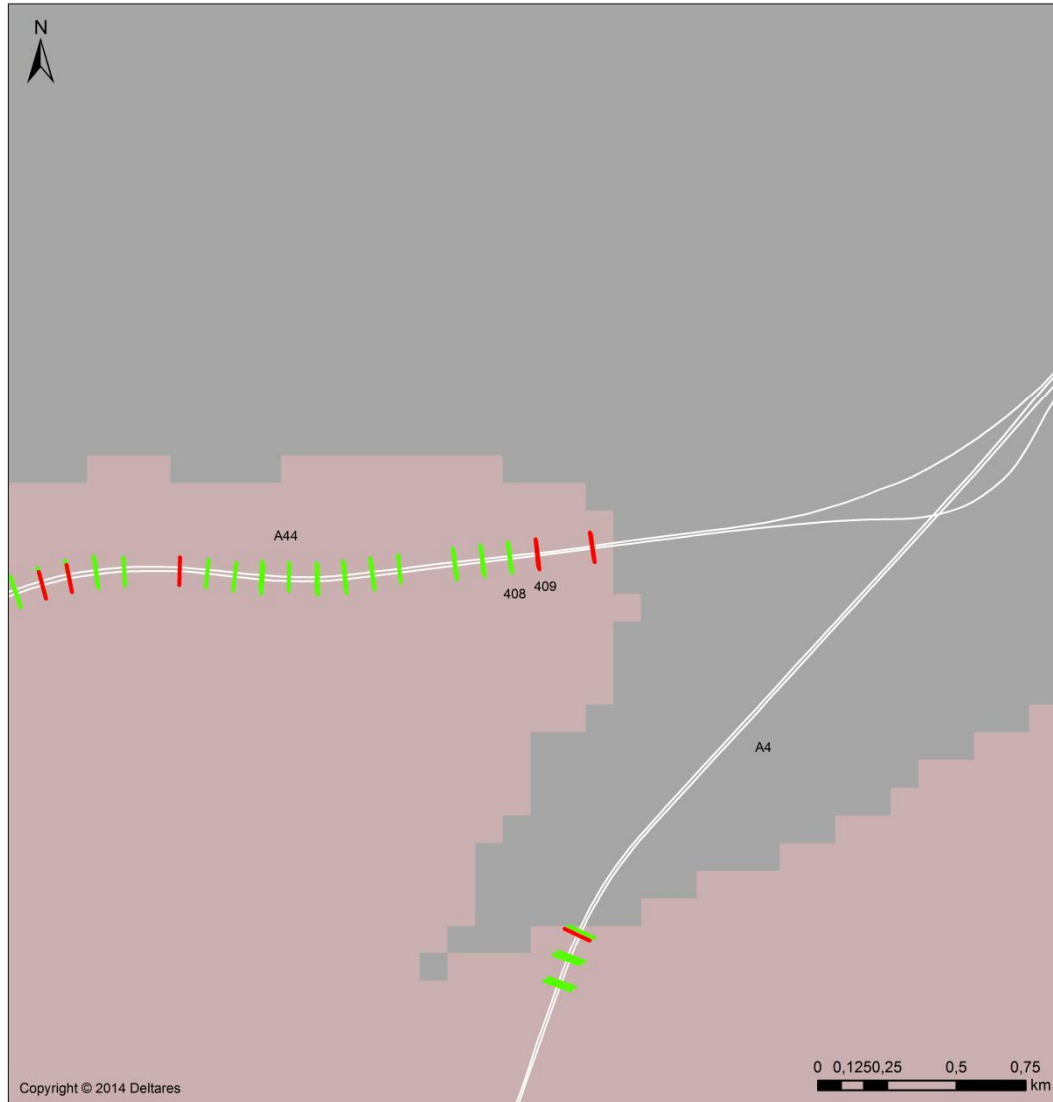


Figuur: kaart 1a
Project nummer: 1209380.005
Datum: 2014-10-30
Status: Definitief
Auteur: André Hendriks

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Beoordeling stabiliteit van rijkswegen - acute fase



Legenda

Wegen

- Niet stabiel
- Stabiel

Gebied

- Bedreigd
- Noordzee
- Buitenland
- Nederland



Figuur: kaart 1b

Project nummer: 1209380.005

Datum: 2014-10-30

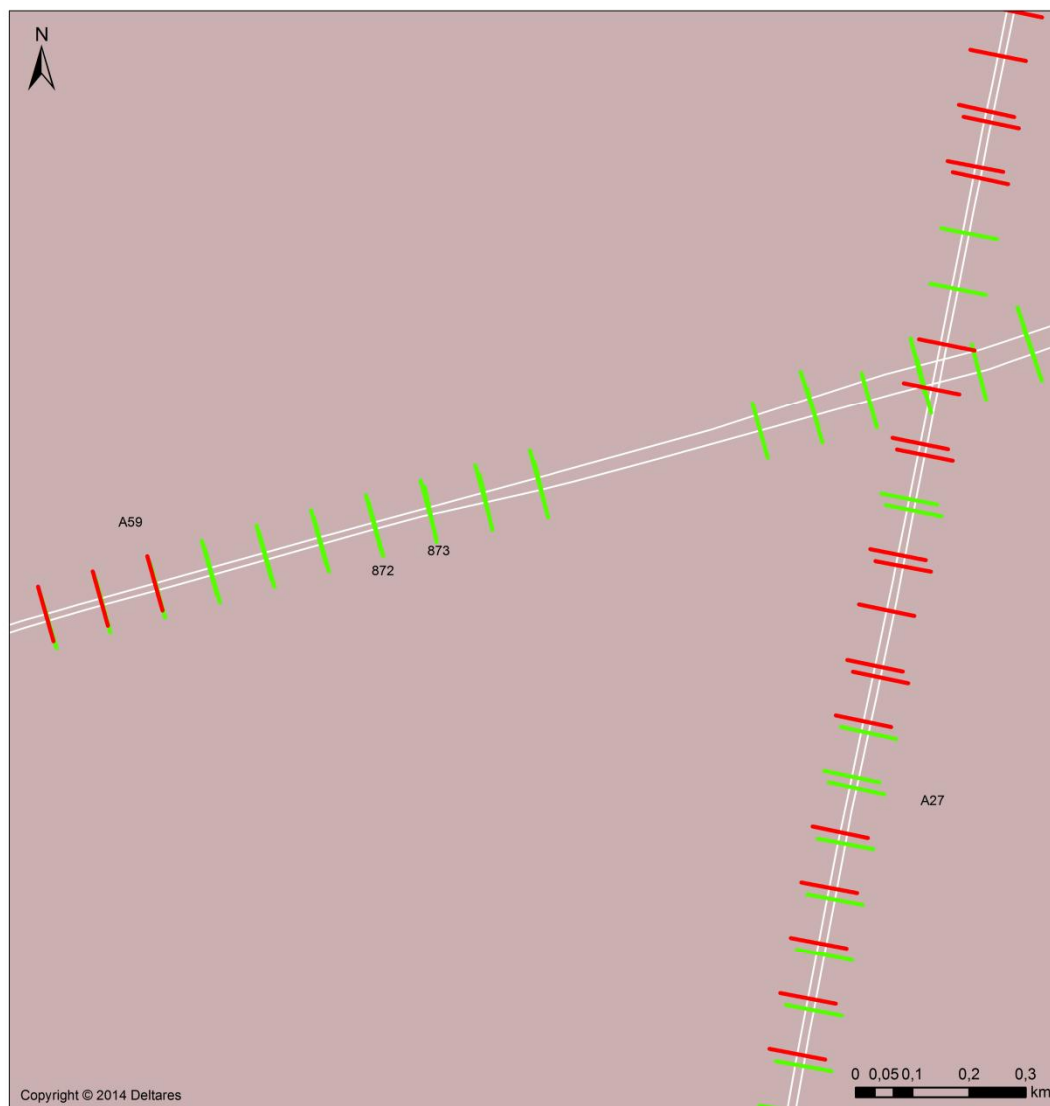
Status: Definitief

Auteur: André Hendriks

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Beoordeling stabiliteit van rijkswegen - acute fase



Legenda

- Wegen
— Niet stabiel
— Stabiel

Gebied

- Bedreigd
Noordzee
Buitenland
Nederland



Figuur: kaart 1c

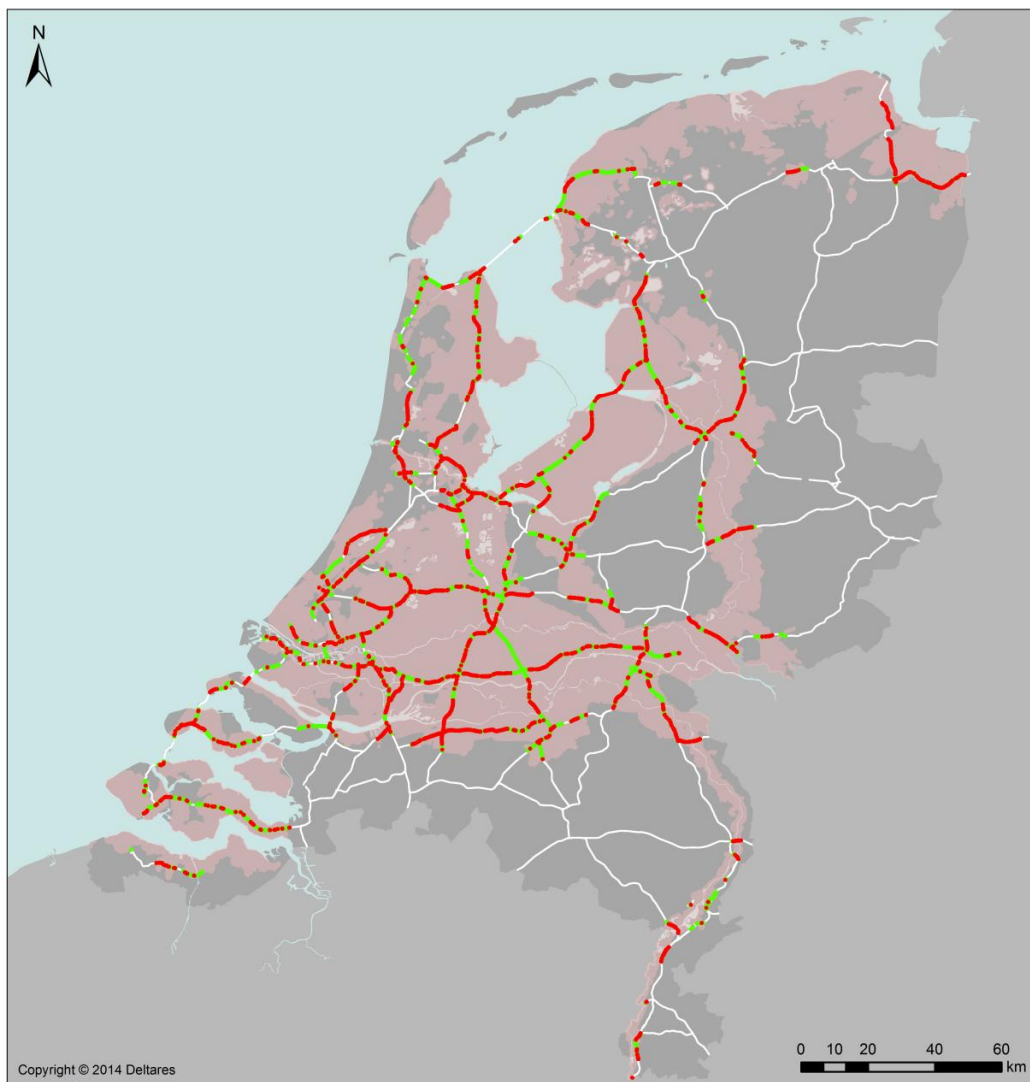
Project nummer: 1209380.005
Datum: 2014-10-30
Status: Definitief
Auteur: André Hendriks

D Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Herstelfase)

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Becoördeling stabiliteit van rijkswegen - herstelfase



Legenda

Wegen

- Niet stabiel
- Stabiel

Gebied

- Bedreigd
- Open water
- Buitenland
- Nederland



Figuur: kaart 2

Project nummer: 1209380.005

Datum: 2014-10-30

Status: Definitief

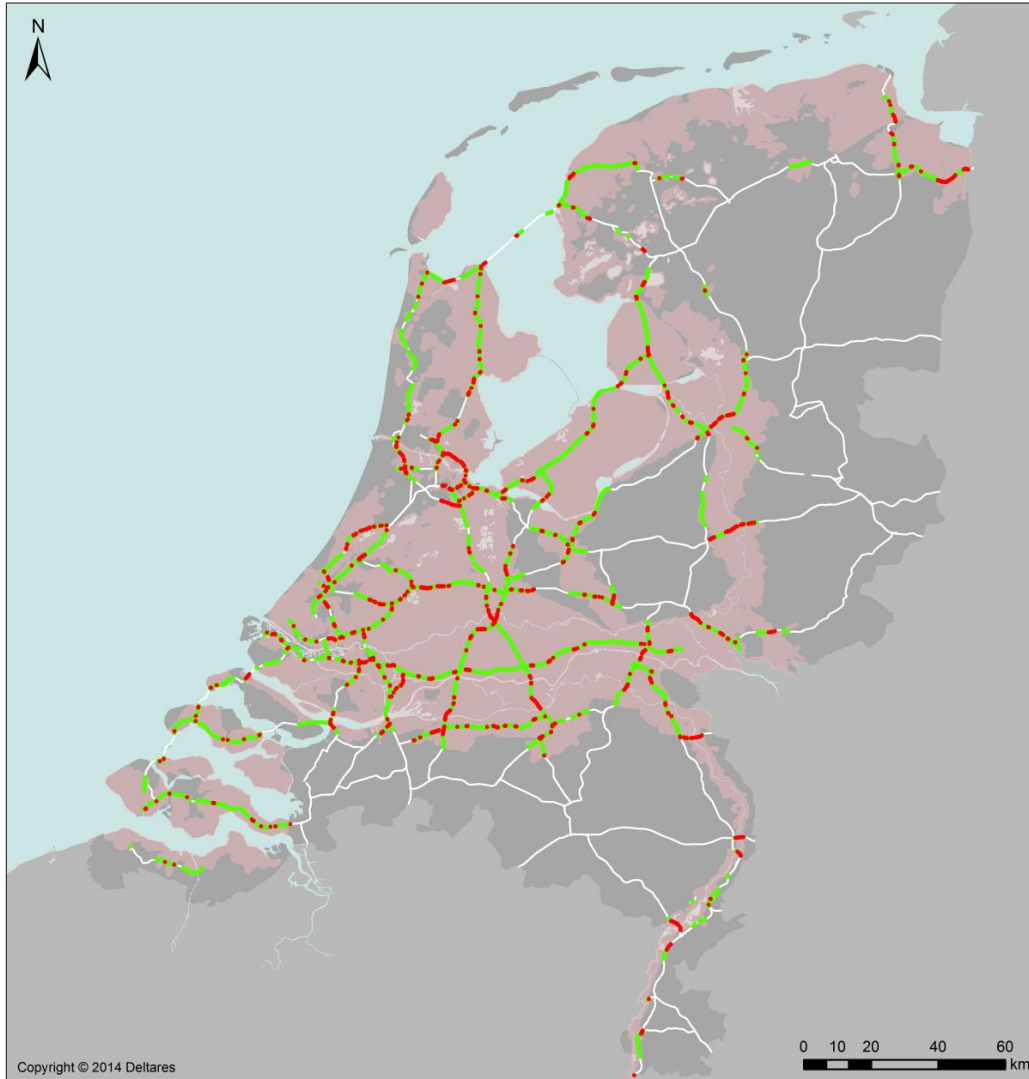
Auteur: André Hendriks

E Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Acute fase), 6 m schadestrook

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Beoordeling stabiliteit van rijkswegen - acute fase, 6m schadestrook



Legenda

- Wegen
- Niet stabiel
 - Hoofdrijbaan stabiel, 6 m aan buitenzijde kan instabiel zijn

Gebied

- Bedreigd
- Open water
- Buitenland
- Nederland



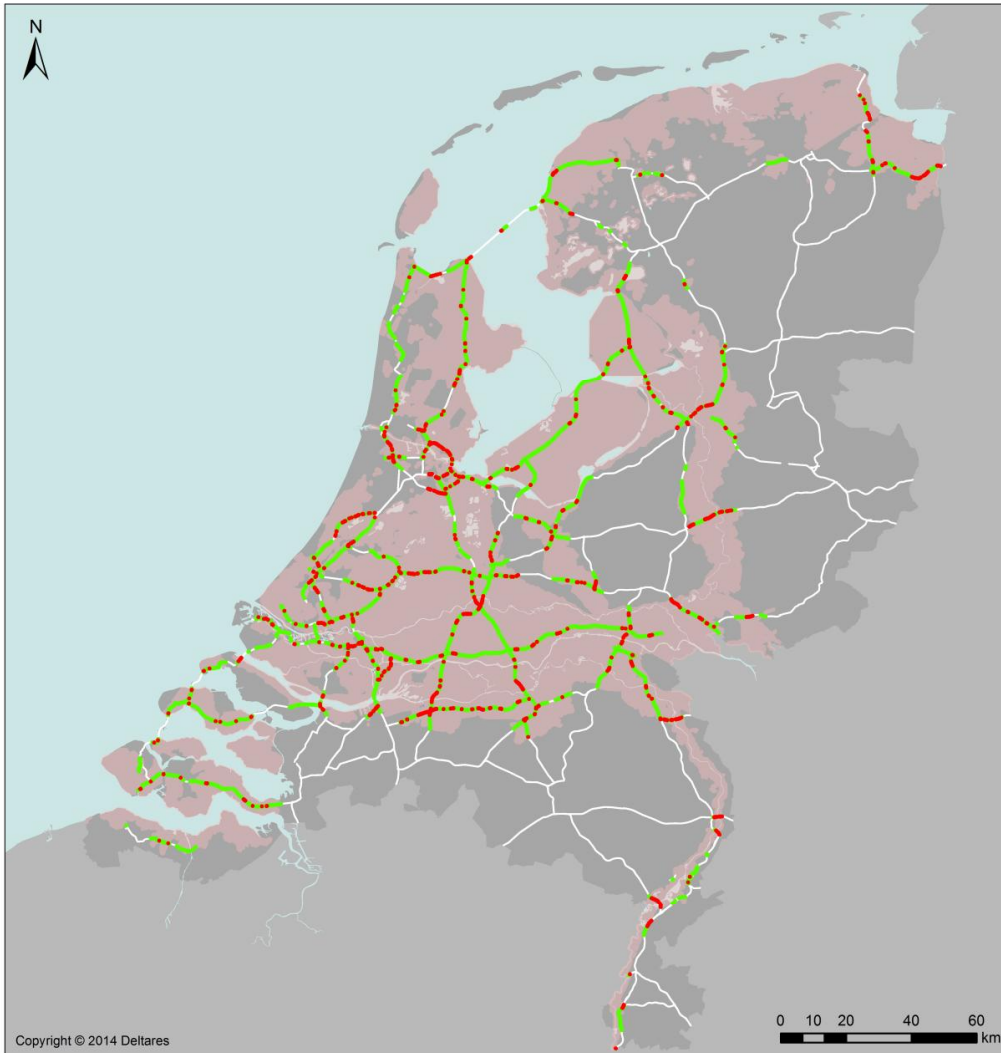
Figuur: kaart 3
 Project nummer: 1209380 005
 Datum: 2014-10-30
 Status: Definitief
 Auteur: André Hendriks

F Beoordeling stabiliteit van rijkswegen (Herstelfase), 6 m schadestrook

Kwetsbaarheid hoofdwegennet

Deltares

Beoordeling stabiliteit van rijkswegen - herstelfase, 6m schadestrook



Legenda

Wegen

— Niet stabiel

— Hoofdrijbaan stabiel, 6 m aan buitenzijde kan instabiel zijn

Gebied

Bedreigd

Open water

Buitenland

Nederland



Figuur: kaart 4

Project nummer: 1209380.005

Datum: 2014-10-30

Status: Definitief

Auteur: André Hendriks