

**Doorvertaling van bewezen
sterkte resultaten naar een
dijkvak**

Werkwijze en voorbeeld case



Doorvertaling van bewezen sterkte resultaten naar een dijkvak

Werkwijze en voorbeeld case

dr. Eng. A.C. Martins Teixeira
dr. E. Rosenbrand MSc

11200575-017

Titel

Doorvertaling van bewezen sterkte resultaten naar een dijkvak

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11200575-017	11200575-017-GEO-0002- jvm	30

Trefwoorden

betrouwbaarheid, bewezen sterkte, FU analyse, macrostabiliteit, STBI, faalkans, overleefde belastingen, doorsnede, dijkvak

Samenvatting

Recent zijn bewezen sterkte technieken ontwikkeld, deze zijn in de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating (Deltares 2016c) beschreven. De methodeontwikkeling voor bewezen sterkte (een faalkans updating (FU) analyse) was tot op heden gericht op analyses op het niveau van representatieve doorsnedes. Hieruit rijst de vraag in hoeverre de FU resultaten doorvertaald kunnen worden naar het hele dijkvak.

Dit rapport onderbouwd dat een a-priori maatgevende representatieve doorsnede ook na faalkans updating (FU) nog maatgevend zal zijn. Of in andere woorden, De a-posteriori betrouwbaarheid kan ook voor de rest van het dijkvak als minimaal aanwezig worden verondersteld. Hieraan ten grondslag liggen wel enkele voorwaarden, die in dit rapport uitgelicht worden en deze zijn geïllustreerd aan de hand van voorbeelden. Voorwaarden die over het algemeen van toepassing zijn voor een doorvertaling, zijn onder andere dat: het FU vak maatgevend moet zijn binnen het dijkvak, het FU vak mag niet overeind zijn gehouden door verborgen sterkte, en de grondopbouw moet (statistisch) homogeen zijn.

Het onderbouwen van de representativiteit in een FU-analyse is tweeledig:

- De representativiteit van de gekozen doorsnede voor een "bewezen sterkte" vak, een FU vak genoemd.
- De representativiteit van de FU vak update voor het hele dijkvak en voor het voldoen aan de bovengenoemde voorwaarden.

De twee uitgewerkte voorbeelden laten het effect van variabiliteit binnen een dijkvak op de update met een overleefde hoogwater situatie zien. Dit is gedaan op basis van gevoeligheidsanalyses. Uit beide voorbeelden blijkt dat de behaalde betrouwbaarheidsindex na een update van de maatgevende dwarsdoorsnede ook de minimale betrouwbaarheidsindex is voor het dijkvak.

De scope van dit rapport beperkt zich tot FU van een observatie die in het gehele dijkvak is waargenomen. Aanbevolen wordt om nader te onderzoeken welke aanvullende aandachtspunten een rol spelen bij de doorvertaling van een observatie waar dit niet het geval is, zoals een proefbelasting.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
03	sep. 2017	dr. Eng. A.C. Martins Teixeira		dr.ir. W. Kanning		dr.ir. M.S. Sule	
		dr. E. Rosenbrand MSc					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Context en probleemstelling	1
1.2 Aanpak en scope	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Voorgestelde werkwijze voor doorvertaling van FU analyses	3
2.1 Achtergrond informatie en algemeen voorgestelde werkwijze doorvertaling	3
2.2 Theoretische achtergrond voor de doorvertaling	4
2.3 Voorwaarden voor de doorvertaling	6
2.4 Aandachtspunten bij de doorvertaling	7
3 Eenvoudig voorbeeld	9
3.1 Beschrijving voorbeeld	9
3.1.1 Schematisering van de doorsneden	9
3.1.2 A-priori Faalkansanalyse	11
3.2 Faalkans updating	13
3.3 Gevoeligheidsanalyses FU vak, stap (a)	13
3.4 Doorvertaling naar dijkvak, stap (b)	16
4 Praktijk voorbeeld (case green)	20
4.1 Beschrijving voorbeeld	20
4.1.1 Schematisering representatief doorsnede	20
4.1.2 A-priori Faalkansanalyse	21
4.2 Faalkans updating	21
4.3 Gevoeligheidsanalyses FU vak, stap (a)	22
4.4 Doorvertaling naar dijkvak, stap (b)	25
5 Conclusies	29
Referenties	30
Bijlage(n)	
A Eenvoudig voorbeeld parameters	A-1
B Praktijk voorbeeld varianten en glijvlakken	B-1

1 Inleiding

1.1 Context en probleemstelling

Rijkswaterstaat ontwikkelt bewezen sterkte instrumenten om de methode landelijk toepasbaar te maken voor beoordelingen en dijkversterkingen. In de afgelopen anderhalf jaar is hiervoor de theoretische basis gelegd, software ontwikkeld en een handreiking geschreven die de stappen van een bewezen sterkte analyse uiteenzet (Deltares, 2016 a,b,c).

De ontwikkelingen tot op heden waren gefocust op analyses op dijkdoorsnede niveau. Om 'bewezen sterkte', faalkans updating (FU), resultaten voor langere dijkvakken te kunnen toepassen dient expliciet te worden onderbouwd dat de gekozen FU doorsnede ook representatief is voor het dijkvak.

Doel van dit project is om de aandachtspunten ter doorvertaling van FU resultaten op doorsnedeniveau naar dijkvakniveau te beschrijven met onderbouwing vanuit de theorie en te illustreren aan de hand van voorbeelden. Ten opzichte van de FU analyse werkwijze en stappen (Deltares, 2016c), worden in dit rapport de volgende 2 aanvullingen op FU stap 3 beschouwd:

- **Stap 0:** inschatting kansrijkheid.
- **Stap 1:** semi-probabilistische analyse.
- **Stap 2:** faalkans analyse.
- **Stap 3:** faalkans updating:
 - a) Onderbouwing van de representativiteit van de gekozen doorsnede voor een FU vak.
 - b) Onderbouwing van de FU vak update voor het hele dijkvak.

1.2 Aanpak en scope

Het voorliggende rapport beschouwt de doorvertaling van FU resultaten naar een dijkvak. Op basis van een theoretische beschouwing van het effect van FU is een werkhypothese opgesteld. Deze is geïllustreerd aan de hand van twee uitgewerkte voorbeelden. Een voorbeeld is fictief en puur illustratief voor de variaties die mogelijk optreden en het effect daarvan op FU. Het andere voorbeeld is een bestaande case.

De werkhypothese is: als het gekozen profiel maatgevend en representatief is voor ieder mogelijk profiel in het dijkvak, dan is het resultaat van de update ook maatgevend en representatief voor het dijkvak.

De voorbeelden illustreren het effect van kleine variaties binnen een FU vak, en grotere variaties binnen een dijkvak op de FU resultaten. In deze cases is er van uit gegaan dat de belasting in het gehele dijkvak aanwezig was.

In voorliggend document worden alleen aandachtspunten die effect hebben op de doorvertaling uitgelicht. Zoals eerder genoemd, is de gehanteerde werkwijze voor de doorvertaling als volgt:

- a) Onderbouwing van de representativiteit van de gekozen doorsnede voor een FU vak met behulp van gevoeligheidsanalyse. Kleine variaties binnen het FU vak (50 á 100 meter) zijn onderzocht.

- b) Onderbouwing van de FU vak update voor het hele dijkvak. De doorvertaling van FU vak resultaat naar dijkvak is onderzocht door verschillende doorsnedes te berekeningen.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de voorgestelde werkwijze (binnen het stappenplan) beschreven. Ook in Hoofdstuk 2 wordt de werkhypothese onderbouwd op basis van de theoretische grondslagen voor FU, en worden de aandachtspunten uitgelegd.

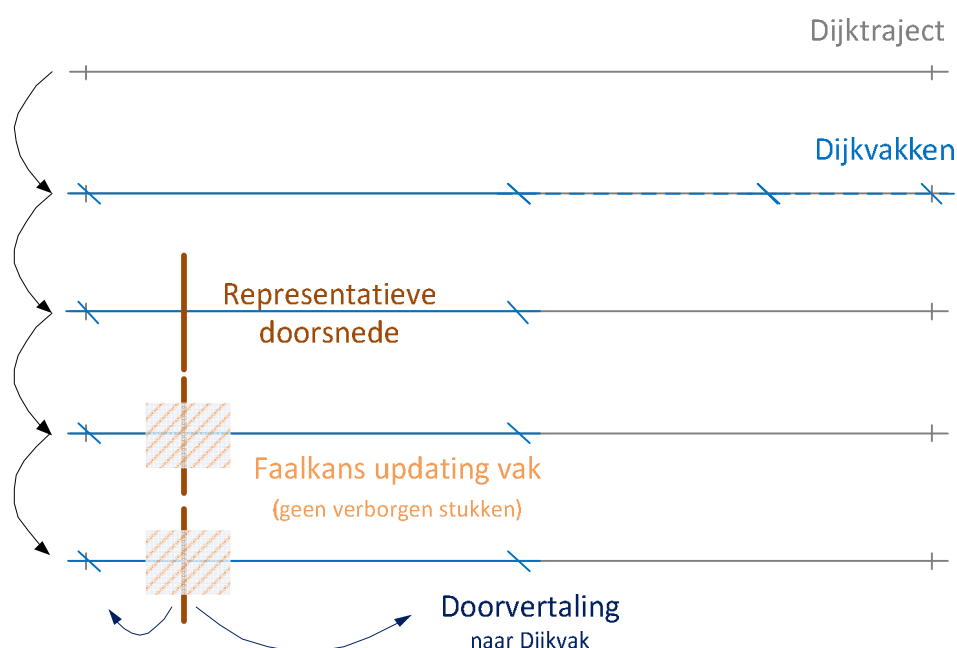
In Hoofdstuk 3 is een eenvoudig voorbeeld (ter illustratie) uitgewerkt, terwijl in hoofdstuk 4 een voorbeeld gebaseerd op een bestaande case (Deltares, 2016b) is uitgewerkt.

Vervolgens worden de conclusies en aanbevelingen bij hoofdstuk 5 gepresenteerd.

2 Voorgestelde werkwijze voor doorvertaling van FU analyses

2.1 Achtergrond informatie en algemeen voorgestelde werkwijze doorvertaling

Figuur 2.1 geeft een overzicht van de algemene voorgestelde stappen, wat betreft dijkvakindeling en keuze doorsnedes, faalkans updating, en doorvertaling van een faalkans updating (FU) analyse.



Figuur 2.1 Algemene stappen voorgestelde stappen doorvertaling. Bij een beoordeling wordt het dijktraject eerst opgedeeld in homogene dijkvakken. Per dijkvak wordt de representatieve doorsnede bepaald en deze wordt geschematiseerd (cf. SH Macrostabiliteit, RWS 2016b). Voor de doorsnede wordt faalkans updating (cf. Deltares 2016, a,c) toegepast. Voor een doorvertaling dient eerst te worden vastgesteld dat de schematisatie conservatief en daarmee representatief is voor het faalkans updating (FU vak) en vervolgens dat deze doorsnede daadwerkelijk representatief is voor het dijkvak

Voor de beoordeling (WBI 2017) zijn dijkvakken geïdentificeerd binnen een dijktraject, en binnen het dijkvak is een representatieve doorsnede gekozen. In semi-probabilistische en probabilistische sommen wordt de schematisering van dit representatieve doorsnede conservatief gedaan. Dat impliceert dat de bepaalde veiligheidsfactor (en betrouwbaarheid) de ondergrens is voor het dijkvak (faalkans bovengrens, op lengte-effect na). Dit is eveneens een belangrijke voorwaarde voor het doorvertalen van de resultaten naar het dijkvak, dit is alleen mogelijk indien de update gedaan is voor een representatieve schematisatie (zie details bij par.2.4.).

De werkwijze van een FU analyse zelf is in de documenten Deltares (2016 a, b en c) gedetailleerd beschreven, waarin de doorvertaling de laatste stap is:

- **Stap 0:** inschatting kansrijkheid.
- **Stap 1:** semi-probabilistische analyse.
- **Stap 2:** faalkans analyse.
- **Stap 3:** faalkans updating.

Belangrijke punten binnen een FU analyse, al genoemd in Deltares (2016 c) zijn:

1. Een FU analyse is vooral kansrijk als bijvoorbeeld de faalkans of de stabiliteit voornamelijk worden bepaald door (reduceerbare) sterkteonzekerheden, als het veiligheidstekort beperkt is, en als er een significante observatie is.
2. Binnen een FU analyse onderscheid gemaakt dient te worden gemaakt tussen twee situaties (Deltares, 2016c): de toetscondities: dit zijn de (toekomstige) condities die aangehouden worden ter vergelijking met de veiligheidseis, meestal in een bepaald zichtjaar in de toekomst, en de observatie: dit zijn de omstandigheden ten tijde van de (overleefde) observatie. Door tijdsafhankelijke effecten kan er een verschil ontstaan tussen de toets en de observatie.
3. Voor de toets en observatie is een conservatieve keuze tegengesteld: voor de toets is een keuze die resulteert in een lage stabiliteitsfactor conservatief, voor de observatie is een keuze die resulteert in een hoge stabiliteitsfactor echter conservatief (omdat deze een hogere a-posteriori faalkans oplevert).

Het doel van een doorvertaling is om op basis van het resultaat van een FU analyse op één locatie een uitspraak te doen over de rest van het dijkvak (resterende doorsneden). Er zal altijd enige mate van variabiliteit aanwezig zijn in een dijkvak, en de vraag is in hoeverre dit consequenties heeft voor de doorvertaling. In dit rapport worden deze vragen beschouwd aan de hand van de theoretische basis voor FU, en aan de hand van uitgewerkte voorbeelden en gevoeligheidsanalyses wordt de doorvertaling behandeld.

2.2 Theoretische achtergrond voor de doorvertaling

De werkhypothese voor dit rapport is dat het a-priori maatgevende profiel na updating ook maatgevend zal blijken.

Bij deze doorsnede leidt updating tot een groter effect, bij gunstigere delen van het vak leidt de update tot minder effect, echter de bijgestelde maatgevende doorsnede zal de a-priori gunstigere doorsneden niet 'inhalen' wat betreft betrouwbaarheidsindex. In essentie gaat het er om dat de bijgestelde faalkans van de representatieve doorsnede als ondergrens kan worden verondersteld voor het vak.

Deze hypothese wordt geschreven als (zie ook Figuur 2.2):

$$\text{als } Pf_{rep,priori} > Pf_{g,priori} \text{ dan } Pf_{rep,update} > Pf_{g,update}$$

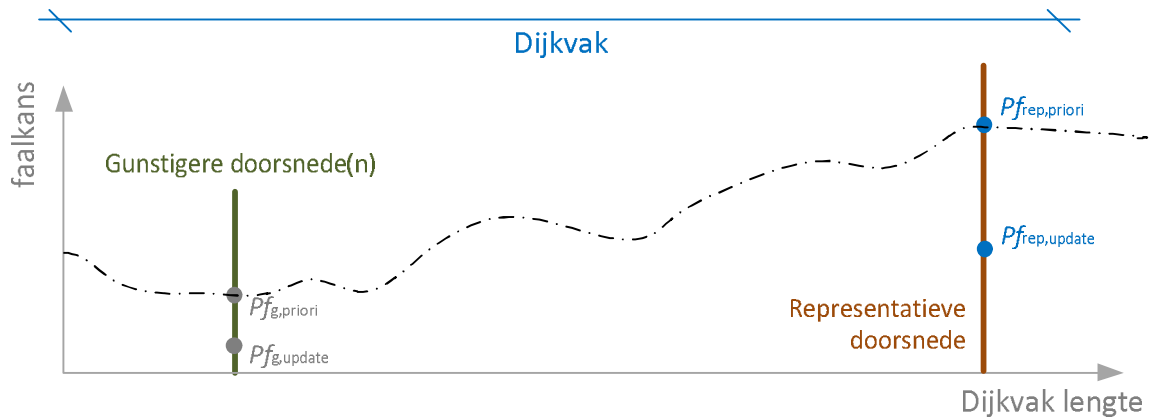
Waar:

$Pf_{rep,priori}$	faalkans van de representatieve doorsnede a-priori (toets).
$Pf_{g,priori}$	faalkans van gunstigere doorsneden a-priori (toets).
$Pf_{rep,update}$	faalkans van de representatieve doorsnede na update.
$Pf_{g,update}$	faalkans van gunstigere doorsneden na update.

In analogie: $\text{als } \beta_{rep,priori} < \beta_{g,priori} \text{ dan } \beta_{rep,update} < \beta_{g,update}$

Onderstaande Figuur 2.2 toont de a-priori faalkans langs een dijkvak (gestippelde lijn). Ook zijn de update faalkansen voor de maatgevende doorsnede en voor een gunstigere doorsnede getoond op de locaties van de doorgetrokken lijnen. Het verschil tussen a-priori faalkans en de faalkans na update is groter bij de maatgevende doorsnede, maar de faalkans

na update blijft op de locatie van de a-priori maatgevende doorsnede groter dan voor de gunstigere doorsnede.



Figuur 2.2 Schematische illustratie van de werkhypothese. Het toont de a-priori faalkans langs een dijkvak en bijbehorende prior en posterior (FU) faalkansen voor de maatgevende/representatieve doorsnede en een andere gunstigere doorsnede

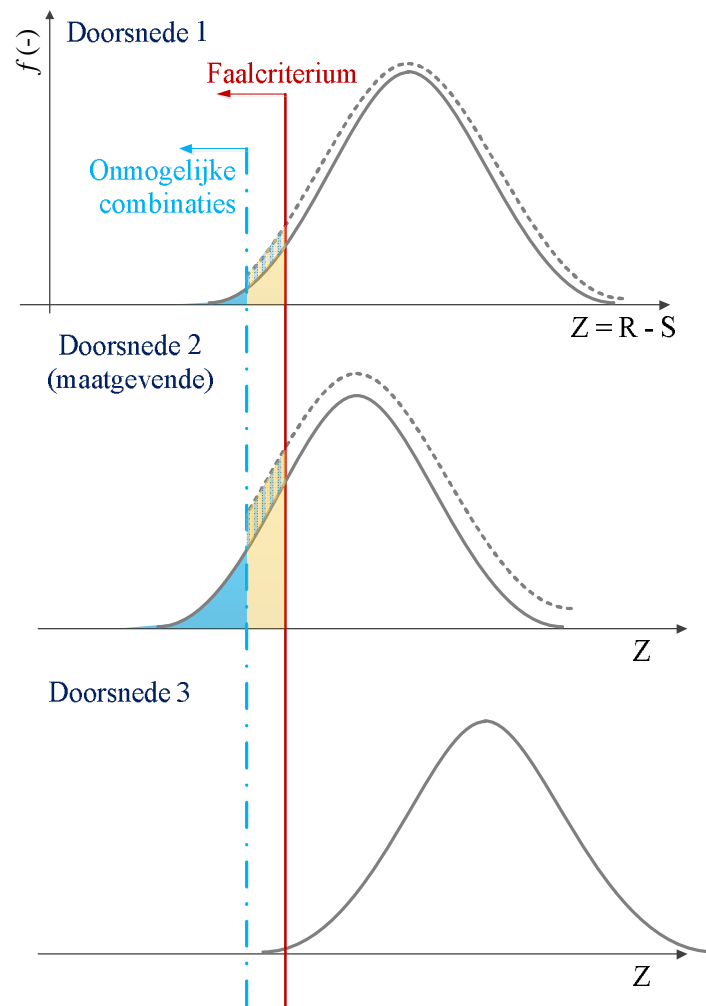
Bovenstaande hypothese volgt ook uit het effect van updating op de verdeling van de grenstoestandsfunctie, Z ($Z = R - S$) (Figuur 2.3). Hierin zijn de Z voor 3 doorsneden schematisch weergegeven, de doorgetrokken lijnen zijn de a-priori verdelingen. De rode lijn is het faal criterium, en de a-priori faalkans is het gebied links van het faal criterium (het blauwe en het gele vlak samen) genormaliseerd door het gehele oppervlak onder de a-priori verdeling (die gelijk aan 1 is).

De observatie van een overleefde belasting houdt praktisch gesproken in dat het blauwe gebied niet waar kan zijn, daar was de dijk immers bezwaken. Bij FU wordt dit oppervlak over de rest van de verdeling verdeeld, waardoor de a posteriori verdeling door de gestippelde lijn is weergegeven.

De a posteriori faalkans is nu het gebied links van het faal criterium en rechts van de observatie (het gele en het geel blauw gestreepte vak) genormaliseerd door het gebied onder de a-priori verdeling rechts van de onmogelijke combinaties (die <1 is).

In onderstaande figuur is te zien dat het herverdeelde gebied (blauw) het grootst is voor de maatgevende doorsnede. Echter het gebied links van het faal criterium (geel en geel met blauwe strepen) blijft altijd groter in de maatgevende doorsnede dan in de overige doorsneden. Het gebied waarmee genormaliseerd wordt (onder de doorgetrokken grenstoestandsfunctie en groter dan de onmogelijke combinaties) blijft ook het kleinst voor de maatgevende situatie. Hierdoor blijft de faalkans (= falende combinaties/normalisatie voor de maatgevende doorsnede) van de maatgevende doorsnede altijd groter dan die van gunstigere combinaties.

Let wel, dit is een schematische weergave van faalkans updating. In werkelijkheid is bijvoorbeeld het blauwe gebied niet noodzakelijkerwijs onmogelijk maar krijgt wel een kleinere kans. Deze uiteenzetting is dan ook geen bewijs maar ondersteunt de werkhypothese.



Figuur 2.3 Schematische illustratie van de verdeling van de grenstoestandsfunctie Z voor verschillende doorsneden binnen een dijkvak, en het effect van updating hierop. Het faalcriterium geeft aan de faalkans. Een observatie (blauwe stippellijn) is in alle doorsneden overleefd. Een deel van het oppervlak onder de a-priori verdeling is dus niet mogelijk (i.e. onmogelijke combinaties = blauw oppervlak). Bij FU wordt het gebied van de onmogelijke combinaties herverdeeld over de grenstoestandsfunctie, de a posteriori functie is de grijze gestippelde lijn. Het grootste gebied wordt bij de maatgevende doorsnede herverdeeld, hier is het effect van updating dus het grootst. Voor doorsnede 3 vindt geen herverdeling plaats en is de a posteriori lijn gelijk aan de a-priori lijn (a-priori faalkans was bijna nul)

2.3 Voorwaarden voor de doorvertaling

De werkwijze voor de doorvertaling is gebaseerd op de hypothese dat de update van de maatgevende doorsnede in een dijkvak leidt tot een update faalkans die ook weer maatgevend is voor het dijkvak (Par. 2.2). Met andere woorden, indien iedere doorsnede geupdated zou worden zouden deze updates een lagere faalkans hebben dan de update van de maatgevende doorsnede (Figuur 2.2). Deze werkhypothese is echter gebaseerd op een aantal voorwaarden:

- Een maatgevende doorsnede gekozen is voor updating, waarbij de input parameters conservatief gekozen zijn (cf. RWS 2016b, Deltares 2016c).
- De belastingen tijdens de observatie vergelijkbaar zijn voor het hele dijkvak.
- Regionale ondergrondinformatie (geldig voor het hele dijkvak) en bijbehorende spreiding is gebruikt (in tegenstelling tot lokale ondergrondinformatie).

- Het type bezwijken gelijk is in het hele dijkvak (faalmechanisme).

Hieruit volgt dat het voor de doorvertaling van belang is te onderbouwen dat de FU analyse is uitgevoerd op de maatgevende schematisatie, en dat er binnen het FU vak en het dijkvak geen gevallen zijn met een grotere a-priori faalkans.

De theoretische beschouwing van het effect van FU (par.2.2) is geïllustreerd aan de hand van twee uitgewerkte voorbeelden. Hier zijn zowel kleine variaties (bijv. hoogte van laagscheidingen, variaties in kruinhoogte) die binnen en FU vak op kunnen treden als grotere variaties (aanwezigheid berm of sloot) die binnen een dijkvak op kunnen treden van belang. Voorts dient aan voorwaarden voldaan te zijn.

De in dit rapport gehanteerde werkwijze voor de doorvertaling is als volgt:

- a) Onderbouwen van de representativiteit van de gekozen doorsnede voor een FU vak, dat wil zeggen onderbouwen dat variaties in stabiliteit verhogend zijn ten opzichte van de maatgevende schematisatie, en dat de genoemde voorwaarden van toepassing zijn.
- b) Onderbouwen van de representativiteit van het FU vak update voor het hele dijkvak en voor het voldoen aan de bovengenoemde voorwaarden.

In hoofdstukken 3 en 4 worden deze aan de hand van een eenvoudig voorbeeld (H3) en een praktijkvoorbeeld (H4) geïllustreerd. Deze voorbeelden weerleggen de werkhypothese dat resultaten voor de maatgevende doorsnede doorvertaald kunnen worden niet en maken aannemelijk dat de voorgestelde werkwijze toepasbaar is.

2.4 Aandachtspunten bij de doorvertaling

In par. 2.3 zijn voorwaarden genoemd waar bij de doorvertaling naar een dijkvak expliciet naar gekeken dient te worden. Degene die belangrijk zijn bij de doorvertaling worden hieronder toegelicht. De overige zijn al van belang voor een FU analyse, zie RWS (2016b) en Deltares (2016c).

Representativiteit doorsnede voor de toetssituatie (dit geldt algemeen bij de beoordeling)

In de schematisering worden de keuzes voor een representatieve modelering van de stabiliteit onderbouwd (RWS, 2016b). De representatieve doorsnede wordt bepaald door het schematiseren van alle belastingen, belasting-effecten en sterkte eigenschappen op een zodanige manier dat de op doorsnede-niveau berekende betrouwbaarheid als representatief kan worden beschouwd voor het hele dijkvak. Deze keuzes (binnen een dijkvak) zijn deel van de standaard werkwijze voor zowel semi-probabilistische analyses als faalkansanalyses en daarmee niet specifiek voor bewezen sterkte / faalkans update (FU) analyses. Een aandachtspunt bij schematiseren in lengterichting is dat niet alle kleine variaties relevant zijn, omdat ook in lengte richting, net als in verticale richting, sprake is van uitmiddeling. Zo middelen kleine fluctuaties in maaiveldligging uit over een glijvlaklengte van typisch ca. 50 m. Dit is niet specifiek voor FU analyses maar algemeen voor de schematisering.

Variaties in de observatie situatie binnen het dijkvak

Voor een doorvertaling naar het dijkvak is het belangrijk dat de belasting condities tijdens de observatie in het hele dijkvak aanwezig waren. Enkele gebruikelijke observaties zijn: Hoogwater situatie, verkeersbelasting of hoge freatische lijn (als gevolg van neerslag, of overslag).

Bronnen van variatie in de observatie zijn bijvoorbeeld de mate van infiltratie, en dus de ligging van het freatisch vlak langs de strekking in de observatie.

Het gevolg hiervan is dat de update die gebaseerd is op een observatie niet kan worden doorvertaald naar delen van het dijkvak waar die observatie niet is opgetreden.

Lokale vs. regionale ondergrondinformatie

Of de sterkte parameters regionaal of lokaal zijn heeft consequenties voor de doorvertaling. Bij regionale parameters is de onzekerheid veelal representatief voor het hele dijkvak. Dit hoeft dus niet een regionale proevenverzameling in de klassieke zin te zijn, regionaal houdt hier in geldig voor het hele dijkvak. Lokaal bepaalde sterkte parameters zijn representatief voor het volume van een afschuifvlak, en dus niet voor de variabiliteit die langs een langere dijkstrekking kan optreden. Met een update op een schematisatie met regionale sterkte parameters, is het effect van de update makkelijk door te vertalen langs het dijkvak, aangezien overal diezelfde sterkte parameters een rol spelen. Een update van lokale parameters echter is alleen geldig op die locatie. Door de grotere variatie bij de regionale parameters zal de a-priori faalkans hoger zijn dan bij dezelfde schematisatie met lokale parameters. Een schematisatie met regionale parameters zal daardoor echter ook meer winnen bij een update.

Variatie in het faalmechanisme

Als het bezwijkmechanisme niet gelijk is in alle doorsneden, houdt dat in dat andere factoren een rol spelen bij het bezwijken. In dit geval is de gekozen vakindeling mogelijk niet fijn genoeg, aangezien de aanname voor de doorvertaling is dat binnen een dijkvak het type bezwijken gelijk is. Wanneer verschillende typen bezwijken optreden is een verdere onderverdeling van het vak wenselijk, en zal voor ieder (sub)vak voor het maatgevende profiel een FU analyse gedaan moeten worden.

Hierbij wordt ondermeer gedacht aan het al dan niet optreden van opbarsten/ opdrijven, de diepte en de locatie van het glijvlak. Factoren die hier invloed op kunnen hebben zijn onder andere:

- Bodemopbouw: ligging van laagscheidingen, zowel de diepteligging als de laagdiktes.
- Geometrie van het dwarsprofiel: aanwezigheid van bermen, sloten, bebouwing, etc.
- Waterspanningen, deze worden ook beïnvloed door a); en b).

In ieder dijkvak zijn in meerdere of mindere mate variaties in de bovenstaande factoren. Met gebruik van gevoeligheidsanalyses en 'expert judgement' dient te worden ingeschat in hoeverre dit effect heeft op het bezwijkmechanisme.

3 Eenvoudig voorbeeld

Hierbij wordt een eenvoudig theoretisch voorbeeld behandeld waarin het effect van verschillen op een simpele basis variant worden beschouwd. Dit is dus niet de maatgevende variant. Doel is om inzichtelijk te maken wat het effect van verschillende typen variaties is.

Het eenvoudige voorbeeld toont aan wat de gevoeligheid is van de update voor verschillende parameters (zoals eerder uitgelegd), in hoeverre voldaan wordt aan de aannamen voor een doorvertaling in par.2.3, en wat we op basis van de FU analyse over het dijkvak kunnen zeggen. Dit is gedaan aan de hand van:

- Analyse van de variabiliteit binnen een FU vak, voor stap (a) (zie 3.3).
- Analyse van andere doorsneden binnen het dijkvak, voor stap (b) (zie 3.4).

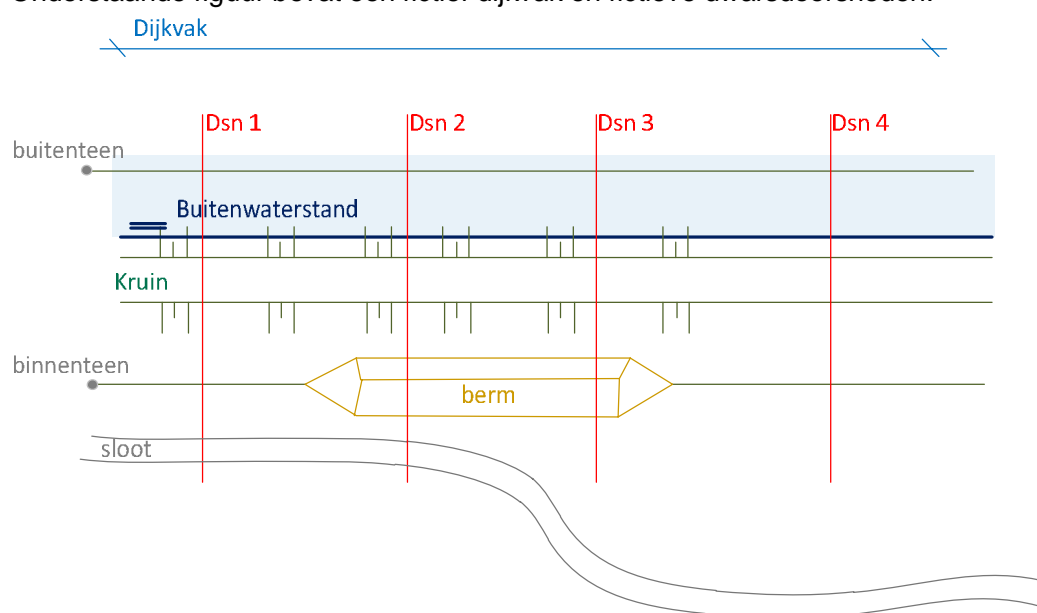
De volgende analyses moeten de werkhypothese aantonen, i.e. dat de betrouwbaarheidsindex na update van de a-priori niet maatgevende vakken hoger blijft dan de betrouwbaarheidsindex van het maatgevende vak na update.

3.1 Beschrijving voorbeeld

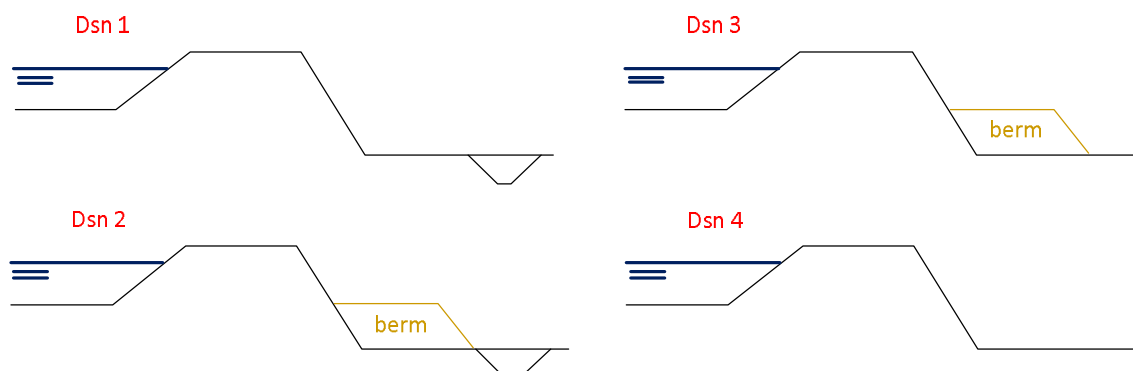
Om het effect van verschillende varianten op de doorvertaling op een eenvoudige manier te illustreren is een basis variant gekozen met een simpele geometrie (zonder sloot of berm). De basis variant is daarmee niet de maatgevende doorsnede, zoals wel het geval zou zijn bij een toetsing. Voor het voorliggende voorbeeld is de intentie echter een eenvoudige vergelijking van het effect verschillende afwijkingen binnen een FU/dijkvak op de update te illustreren.

3.1.1 Schematisering van de doorsneden

Onderstaande figuur bevat een fictief dijkvak en fictieve dwarsdoorsneden.



(a) Bovenaanzicht van het dijkvak met 4 doorsneden



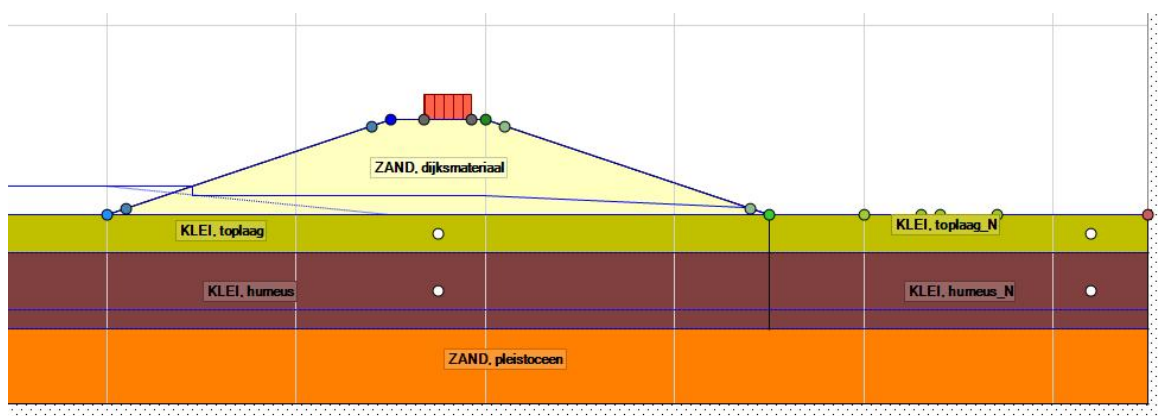
(b) mogelijk doorsnede geometrieën in het dijkvak

Figuur 3.1 'Eenvoudige voorbeeld' dijkvak, Dsn=doorsnede. In het dijkvak zijn doorsneden met berm en sloot (Dsn2), met alleen een sloot (Dsn1), met alleen een berm (Dsn3) en zonder berm en sloot (Dsn4) aanwezig

Dit voorbeeld dient slechts ter illustratie van het effect van verschillende variaties op de FU resultaten.

Voor stappen (a) en (b) wordt doorsnede (Dsn) 4 als een 'basis' schematisatie gebruikt - Figuur 3.2. Hiermee kan het effect van varianten binnen het vak, zoals een berm of een sloot, worden vergeleken. In een beoordeling zou men uiteraard het maatgevende profiel kiezen voor de FU analyse.

Voor dit eenvoudige voorbeeld wordt aangenomen dat er geen verschillen zijn tussen de toets en observatie modellering. Er wordt vanuit gegaan dat de beschouwde variaties (bv. een berm) al aanwezig waren tijdens de observatie, en dat er geen bodemdaling is opgetreden. De schematisering van toets en observatiesituaties is in Figuur 3.2 weergegeven. Voor de gebruikte parameters wordt verwezen naar Bijlage A.



Figuur 3.2 'Eenvoudige voorbeeld' geschematiseerd dwarsprofiel – Dsn 4 (toets en observatie situaties)

Hieronder staan de belangrijkste aannames voor de dijkvak schematisatie:

Dezelfde (homogene) condities langs het dijkvak:	Veranderende omstandigheden binnen het dijkvak:
<ul style="list-style-type: none"> • hydraulische belasting, Gumbel verdeling – Bijlage A, • freatisch vlak, gebruik ‘waternet creator’ die de schematiseringshandleiding macrostabiliteit volgt – RWS (2016b) • Laagopbouw - Figuur 3.2, • Grondparameters, regionale verzameling/onzekerheid – Bijlage A. Door een regionale proevenverzameling te hanteren zijn de resultaten makkelijker door te vertalen dan wanneer lokale ondergrondinformatie wordt gebruikt, zoals uitgelegd in paragraaf 2.2, • Verkeersbelasting, • Bodemdaling: niet van toepassing. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrie van de dijk: aanwezigheid van bermen en sloot varieert in de huidige analyse, zoals weergegeven in Figuur 3.2.

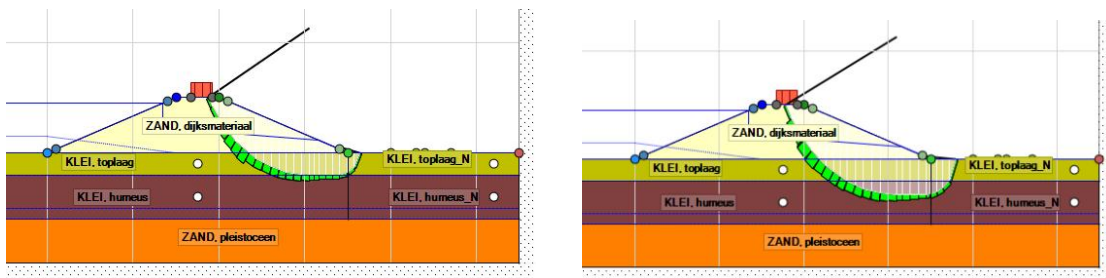
Tabel 3.1 Aannames voor de dijkvak schematisatie van het ‘eenvoudige voorbeeld’

3.1.2 A-priori Faalkansanalyse

Een toets faalkansanalyse (a-priori faalkansanalyse zonder updating) is onderdeel van de FU analyse, namelijk stap 2. De werkwijze hiervoor is in Deltares (2017) beschreven. Voor de representatieve doorsnede zijn twee glijvlakken beschouwd (glijvlak 1 en glijvlak 2). In de semi-probabilistische analyse is het glijvlak 2 maatgevend, maar in de probabilistische analyse is het glijvlak 1 maatgevend – zie Figuur 3.3. Glijvlak 1 gaat door één van de twee klei lagen en glijvlak 2 gaat door de twee klei lagen.

De berekende stabiliteitsfactor in een semi-probabilistische analyse (met waterstand bij norm NAP + 4.27 m en rekenwaarden voor grond parameters – zie Bijlage A) bedraagt $SF_{\text{glijvlak2}} = 0.98$ en $SF_{\text{glijvlak1}} = 1.02$. De fragility curves, voor beide glijvlakken, zijn in Figuur 3.4 weergegeven. De curve van glijvlak 1 heeft een lagere betrouwbaarheidsindex en is daarom maatgevend. De totale faalkans is dus bepaald door de fragility curve van glijvlak 1 te combineren met de waterstandsstatistiek (ook in Figuur 3.4 gegeven), waarbij een toets situatie betrouwbaarheidsindex van $\beta_{\text{dsn, glijvlak1}} = 3.3$ is bepaald.

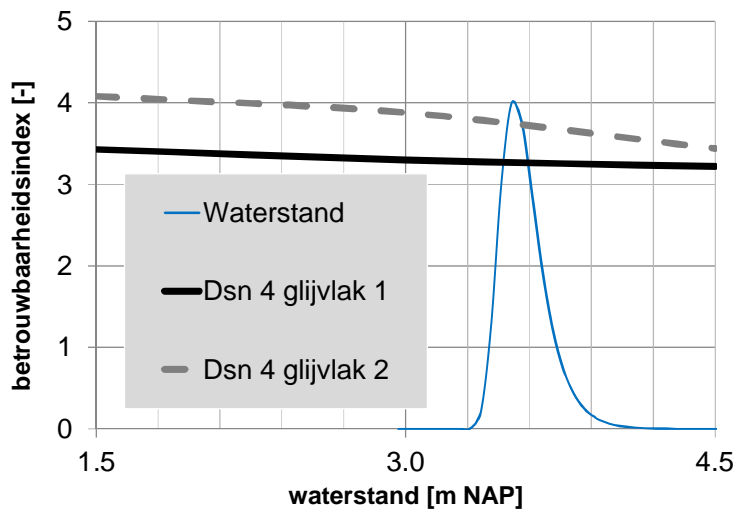
De grootste bijdrage aan de faalkans (o.b.v. invloedscoëfficiënten zie Figuur 3.5) wordt geleverd door de sterkte van de kleilaag, die op basis van een regionale proevenverzameling is afgeleid.



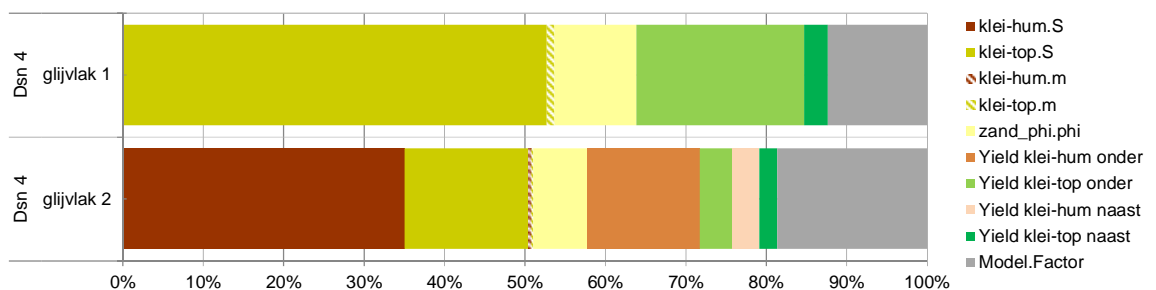
(a) glijvlak 1

(b) glijvlak 2

Figuur 3.3 'Eenvoudige voorbeeld' glijvlakken. Glijvlak 1 is maatgevend bij een probabilistische analyse terwijl glijvlak 2 is maatgevend bij een semi-probabilistische analyse



Figuur 3.4 'Eenvoudige voorbeeld' toetsituatie fragility curves (zwarte lijn en gestreepte lijn) en waterstandkansverdeling (blauwe curve)



Figuur 3.5 'Eenvoudige voorbeeld' toetsituatie invloedscoëfficiënten – glijvlak 1 en glijvlak 2. S , m , ϕ en $Yield$ zijn de sterkte parameters van de grond. $Yield$ is de grensspanning. Voor het glijvlak 1 is de invloed van de S het grootst; dat houdt in dat deze parameter het meeste invloed heeft op het falen

3.2 Faalkans updating

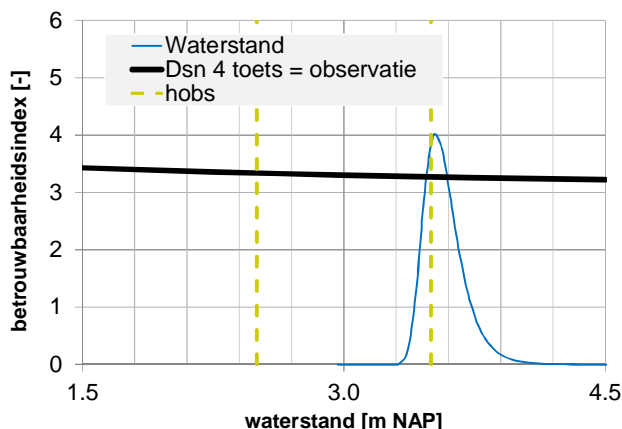
Hier wordt faalkans updating toegepast. De werkwijze hiervoor is in Deltares (2016c) beschreven. Faalkans updating houdt in dat overleefde belastingcondities worden beschouwd en deze informatie gebruikt wordt om de faalkans bij te stellen ('bewezen sterkte'). Bij de (overleefde) belastingcondities is het van belang dat aannemelijk kan worden gemaakt dat:

- De grenstoestand ten tijde van de observatie niet is overschreden.
- Er geen verborgen sterkte is die voor de observatie zorgt.
- De observatie geldt voor het hele dijkvak, bv. buitenwaterstand of verkeersbelasting (dit betekend volledige correlatie tussen observaties bij verschillende doorsneden). Dit is van belang voor de doorvertaling, zoals behandeld in H2.

De gebruikt fragility curves (toets = observatie) zijn in Figuur 3.6 gepresenteerd (a-prior betrouwbaarheidsindex : $\beta_{dsn,glijvlak1} = 3.3$) en de a-posteriori betrouwbaarheidsindex ($\beta_{dsn,post}$) is voor 2 geobserveerde waterstanden (h_{obs}) berekend:

- $h_{obs} = \text{NAP} + 2.5 \text{ m}$, $\beta_{dsn,post} = 3.6$.
- $h_{obs} = \text{NAP} + 3.5 \text{ m}$, $\beta_{dsn,post} = 4.3$.

Voor de faalkans updating is glijvlak 1 nog de maatgevend.



Figuur 3.6 'Eenvoudige voorbeeld' toets en observatie fragility curve voor glijvlak 1 (zwarte lijn) samen met waterstandkansverdeling (blauwe curve) en twee geobserveerde waterstanden

De volgende paragrafen latten het effect van verschillen in een FU vak (par.3.3) en dijkvak (par.3.4) zien, zoals eerder beschreven.

3.3 Gevoeligheidsanalyses FU vak, stap (a)

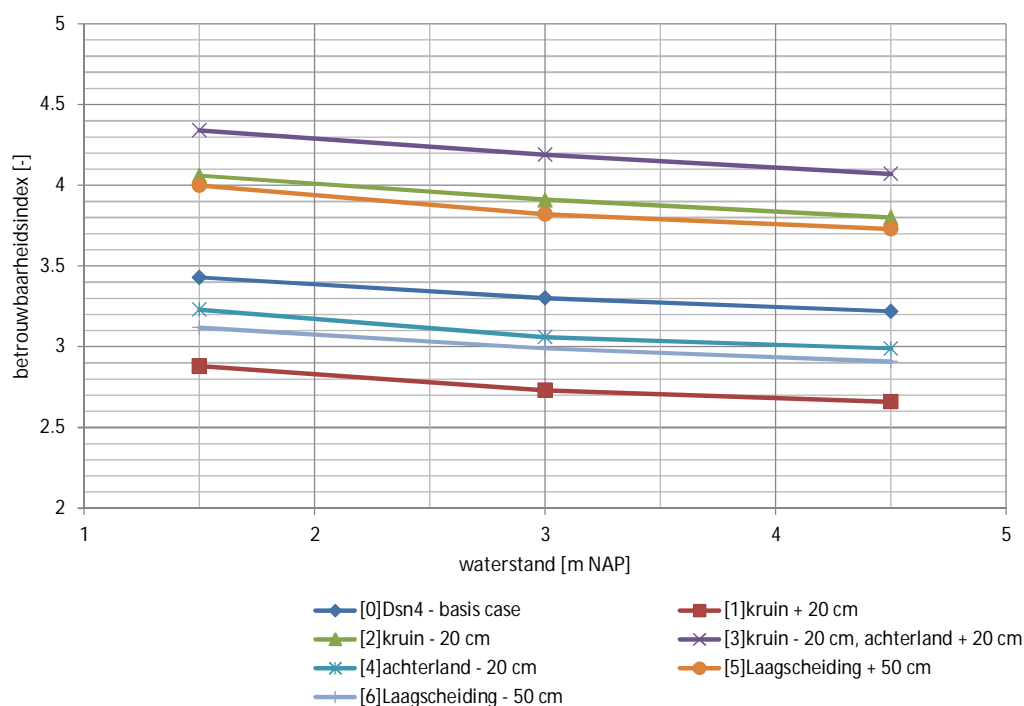
Om de resultaten voor het FU vak te kunnen onderbouwen wordt gekeken naar kleine variaties die op kunnen treden binnen het FU vak. Hier wordt het maatgevende glijvlak 1 uitgewerkt (maatgevende bij probabilistische analyse bij par.3.2.). Dit betreft stap (a) in hoofdstuk 2.

De beschouwde schematisatie zijn in Tabel 3.2 samengevat. Voor elke variant wordt de freatische lijn gedefinieerd relatief aan de kruin hoogte en dezelfde waarden van de grensspanningen zijn gehanteerd in alle varianten. De stabiliteitsfactoren voor de varianten zijn ook in onderstaande tabel weergegeven, waar variant 1 maatgevende is.

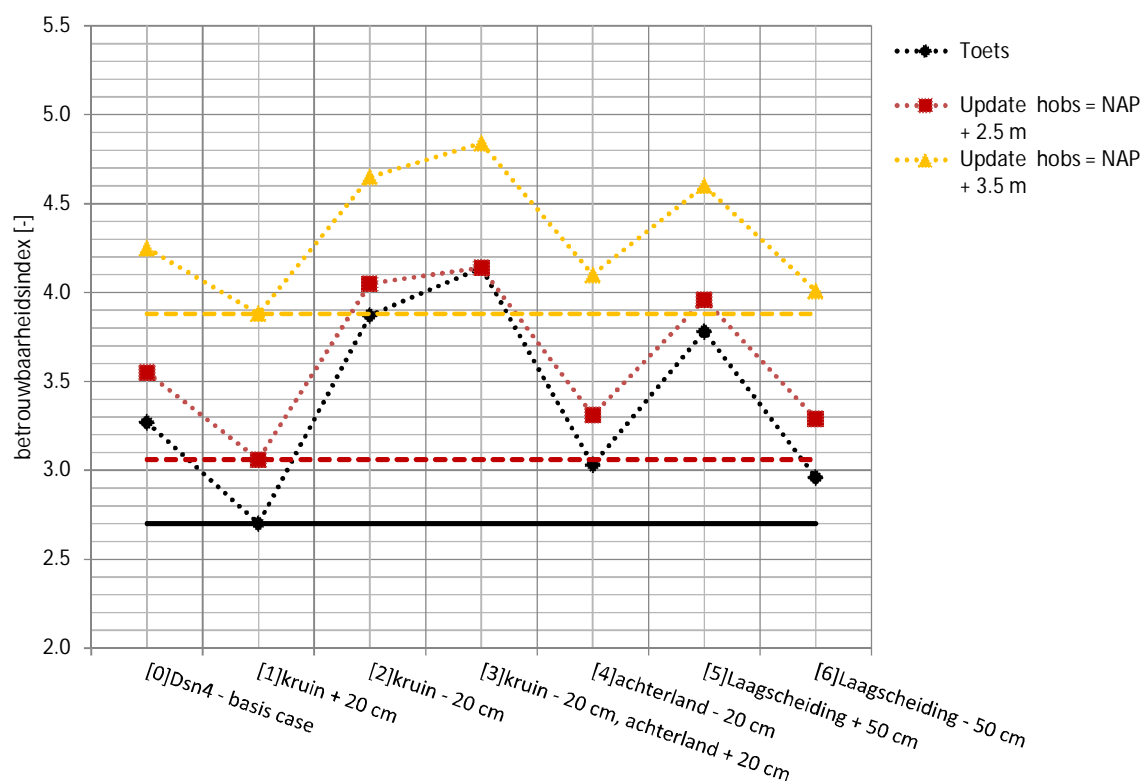
Figuur 3.7 geeft de fragility curves per variant weer. De resultaten (met update) zijn in de onderstaande tabellen samengevat, terwijl Figuur 3.8 het effect van de updates voor de verschillende varianten weer geeft.

Variant	0 (Dsn4)	1	2	3	4	5	6
Kruin hoogte [m NAP]	5	5.2	4.8	4.8	5	5	5
Achterland hoogte [m NAP]	0	0	0	0.2	-0.2	0	0
Diepte laagscheiding [m NAP]	-2	-2	-2	-2	-2	-1.5	-2.5
Stabiliteitsfactoren (WBN en rekenwaarden)	0	1	2	3	4	5	6
Glijvlak 1	1.02	0.96	1.08	1.12	0.99	1.06	1.00
Glijvlak 2 (ter informatie)	0.98	0.93	1.03	1.07	0.95	0.99	0.98

Tabel 3.2 'Eenvoudige voorbeeld' beschrijving varianten binnen FU vak en bijbehorende stabiliteitsfactoren. WBN = Waterstand bij norm; Dsn = doorsnede



Figuur 3.7 'Eenvoudige voorbeeld' fragility curves (toets en observatie) voor varianten binnen FU vak (glijvlak 1). De fragility curve van variant 1 is het laagste, dit is dus de maatgevende variant in dit voorbeeld



Figuur 3.8 'Eenvoudig voorbeeld' toetssituatie en FU analyse voor varianten binnen FU vak glijvlak 1. De zwarte lijnen (Toets) tonen de a-priori betrouwbaarheidsindex. De andere lijnen (Update hobs = ...) tonen de betrouwbaarheidsindex na een update met een geobserveerde waterstand van 2 m, of 3.5 m NAP, respectievelijk. Deze figuur laat zien dat de variant met de laagste toets betrouwbaarheidsindex, variant 1, ook na update de laagste betrouwbaarheidsindex heeft

Variant	0	1	2	3	4	5	6
NAP + 1.5 m	3.4	2.9	4.1	4.3	3.2	4.0	3.1
NAP + 3.0 m	3.3	2.7	3.9	4.2	3.1	3.8	3.0
NAP + 4.5 m	3.2	2.7	3.8	4.1	3.0	3.7	2.9

a) Fragility curve points, betrouwbaarheidsindex per waterstand (toets en observatie).

Variant	0	1	2	3	4	5	6
Toets	3.3	2.7	3.9	4.1	3.0	3.8	3.0
Update $h_{obs} = \text{NAP} + 2.5 \text{ m}$	3.6	3.1	4.1	4.1	3.3	4.0	3.3
Update $h_{obs} = \text{NAP} + 3.5 \text{ m}$	4.3	3.9	4.7	4.8	4.1	4.6	4.0

b) prior en posterior betrouwbaarheidsindices (β_{dsn}) voor updates met geobserveerde waterstanden.

Tabel 3.1 'Eenvoudig voorbeeld' FU resultaten van varianten binnen FU vak (glijvlak 1)

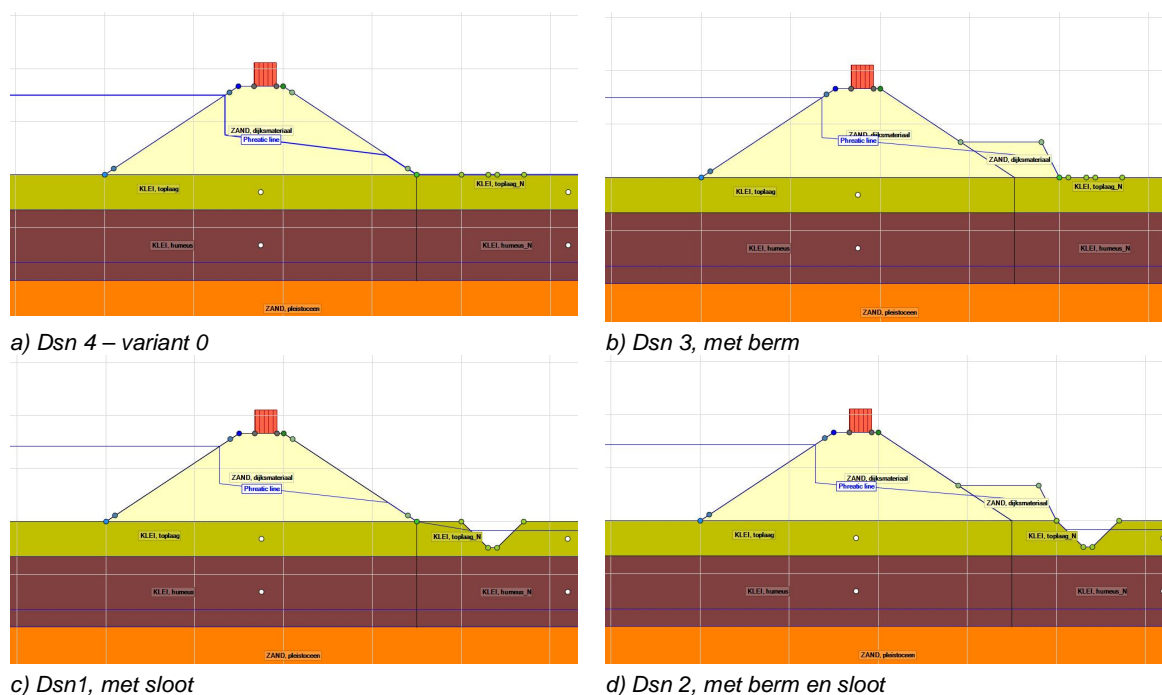
De gevoeligheidsanalyse toont aan dat variant 1 zowel a-priori als na update de laagste betrouwbaarheidsindex heeft. Dit weerlegt de hypothese dat de variant met de laagste a-priori betrouwbaarheidsindex na update nog steeds de laagste betrouwbaarheidsindex heeft. Met andere woorden, variant 1 moet worden gebruikt voor de doorvertaling aangezien deze de laagste a-priori betrouwbaarheid heeft. Na updating heeft deze nog steeds de laagste betrouwbaarheid, wat de geldigheid van de veronderstelde aanpak onderschrijft. In conclusie, de resultaten van stap (a) laten zien dat de varianten die een hogere toets betrouwbaarheidsindex hebben dan maatgevende, na de update ook nog een hogere betrouwbaarheidsindex hebben. Dit weerlegt de hypothese die in hoofdstuk 2 staat niet. Deze variaties zijn ter illustratie van mogelijke variatie op de maatgevende doorsnede beschouwd. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat wanneer de update voor de meest maatgevende variant leidt tot voldoen aan de norm, dat dit ook voor gunstigere varianten het geval zal zijn, mits de verschillen t.a.v. de basis schematisatie klein en het type bezwijken niet beïnvloeden zijn zoals in bovenstaande voorbeeld.

3.4 Doorvertaling naar dijkvak, stap (b)

Om de resultaten voor het hele dijk vak te kunnen onderbouwen wordt gekeken naar variaties (zoals laagopbouw, waterspanningen en geometrie) die op kunnen treden binnen het dijkvak. Dit betreft stap (b) in hoofdstuk 2.

In het (fictieve) dijkvak zijn 4 mogelijke doorsneden waarvoor we het effect van FU willen weten, zoals weergegeven in Figuur 3.1.

De beschouwde dijkvak schematisaties zijn in Tabel 3.3 samengevat. Figuur 3.9 laat het verloop van de freatische lijn laten zien voor de verschillende schematisaties. De waarden van de grensspanningspunten binnenwaarts zijn gelijk voor alle 4 doorsneden, dat houdt in dat de grensspanning onder de berm hoger is (POP is gelijk onder de berm en binnenwaarts, dit zal niet het geval zijn als de berm nog gebouwd moeten worden). De stabiliteitsfactoren voor de varianten zijn ook daarin weergegeven. De maatgevende doorsnede is Dsn 1.



Figuur 3.9 'Eenvoudige voorbeeld' mogelijk geometrieën binnen het dijkvak

Doorsnede	Dsn4	Dsn 3	Dsn 1	Dsn 2
Beschrijving	Zonder berm en sloot	Met berm	Met sloot	Met berm en sloot
Stabiliteitsfactoren (WBN en rekenwaarden)	Dsn4	Dsn 3	Dsn 1	Dsn 2
Glijvlak 2	0.98	1.22	0.94	1.06

Tabel 3.3 'Eenvoudige voorbeeld' beschrijving doorsneden binnen dijkvak en bijbehorende stabiliteitsfactoren. Doorsnede 1 is maatgevend

Voor FU is het van belang dat het type bezwijken tijdens de toets gelijk is aan het type bezwijken tijdens de observatie en ook dat hetzelfde glijvlak, het maatgevende glijvlak van de observatie, beschouwd wordt (Deltares 2016c). Voor de vier schematisatie zijn daarom in eerste instantie zowel glijvlak 1 als glijvlak beschouwd om te zien welke maatgevend zijn (zie Figuur 3.3). In dit geval kijken we naar dezelfde glijvlakken voor alle geometrieën binnen het dijkvak. Omdat glijvlak 2 maatgevend is voor de geometrieën met een berm en met een sloot wordt voor de basis case nu het glijvlak 2 beschouwd.

Figuur 3.10 geeft de fragility curves weer. De resultaten (met update) zijn in de onderstaande tabellen samengevat, terwijl Figuur 3.11 het effect van de updates voor de verschillende varianten weer geeft. Deze resultaten laten wederom zien dat de a-priori maatgevende doorsnede maatgevend blijft.

De maatgevende doorsnede is Dsn 1 (met een sloot) en deze blijft voor en na de update maatgevend. De geüpdatete betrouwbaarheid van de maatgevende Dsn 1 is dus representatief voor de andere doorsneden, en dus de dijkvak. Ergo, als de maatgevende doorsnede wordt gebruikt, in dit geval Dsn 1, kan doorvertaling worden toegepast.

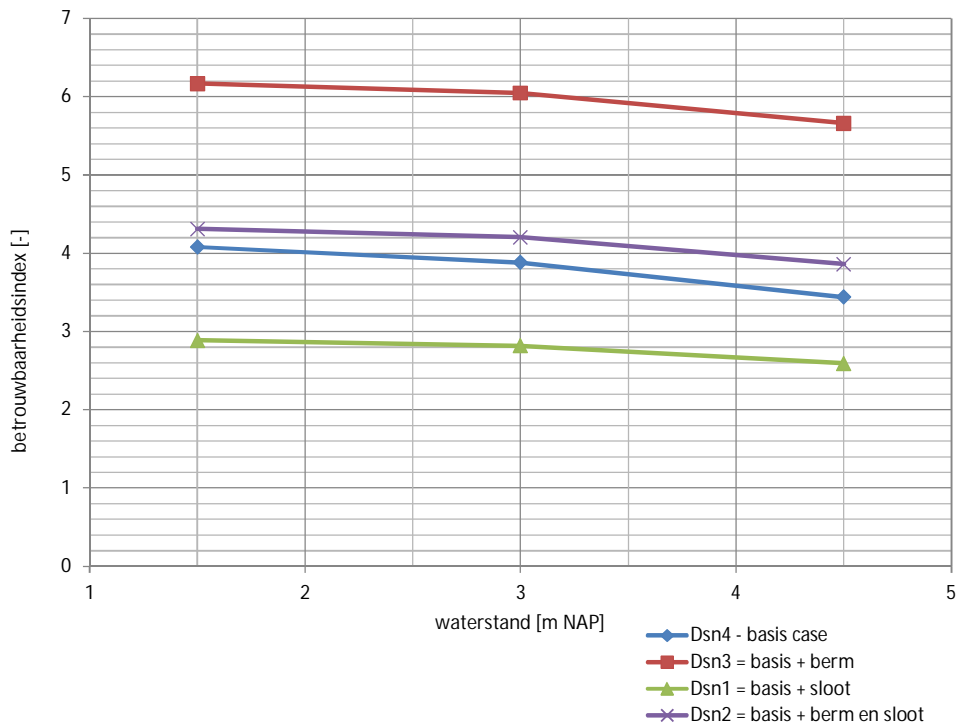
Doorsnede	Dsn4	Dsn 3	Dsn 1	Dsn 2
Naam	Basis case	Berm	Sloot	Berm en sloot
NAP + 1.5 m	3.4	6.2	2.9	4.3
NAP + 3.0 m	3.3	6.0	2.8	4.2
NAP + 4.5 m	3.2	5.7	2.6	3.9

a) Fragility curve points, betrouwbaarheidsindex per waterstand. Doorsnede 1 is maatgevend met de laagste betrouwbaarheidsindex voor alle waterstanden

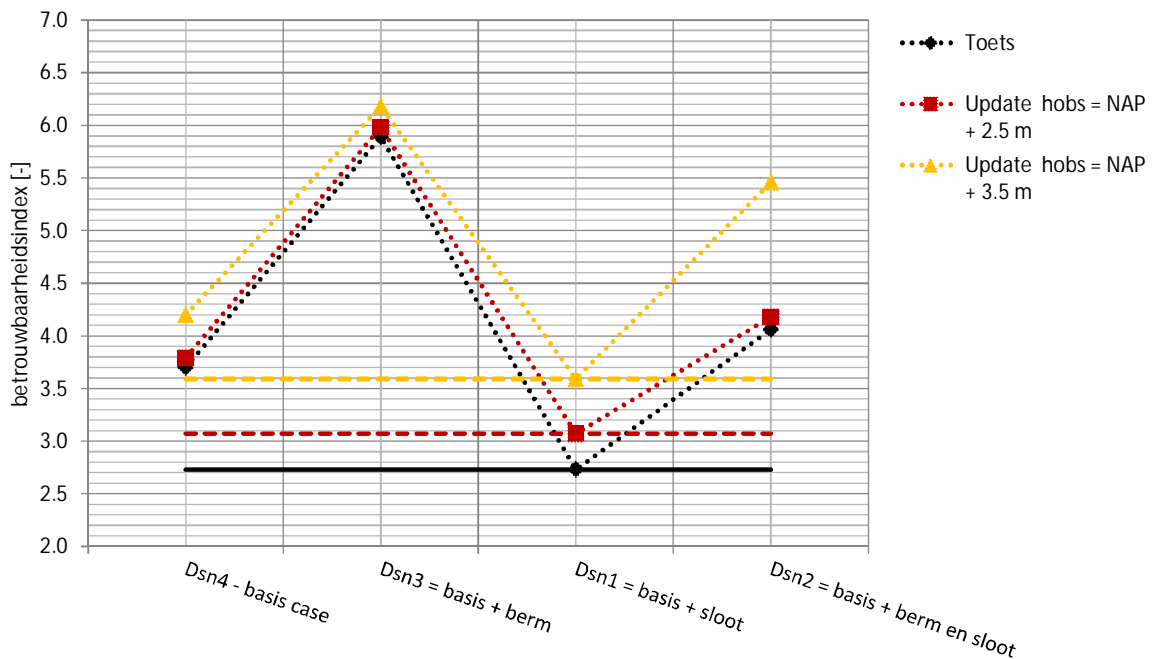
Variant	Dsn4	Dsn 3	Dsn 1	Dsn 2
Naam	Basis case	Berm	Sloot	Berm en sloot
Toets	3.3	5.9	2.7	4.1
Update $h_{obs} = \text{NAP} + 2.5 \text{ m}$	3.6	6.0	3.1	4.2
Update $h_{obs} = \text{NAP} + 3.5 \text{ m}$	4.3	6.2	3.6	5.5

b) prior en posterior betrouwbaarheidsindices (β_{dsn}) na update met observatie waterstanden. Doorsnede 1 is maatgevend in de toets en ook na update met beide waterstanden.

Tabel 3.2: 'eenvoudige voorbeeld' FU resultaten voor mogelijk geometrieën binnen dijkvak.



Figuur 3.10 'Eenvoudige voorbeeld' fragility curves voor mogelijk geometrieën binnen dijkvak (glijvlak 2). De fragility curve van doorsnede 1 is het laagste, deze is a-priori maatgevend



Figuur 3.11 'Eenvoudige voorbeeld' toetssituatie en FU analyse van de varianten binnen het dijkvak (glijvlak 2). A-priori heeft doorsnede 1 de laagste betrouwbaarheidsindex, dit blijft na update het geval

In conclusie, indien een FU berekening beschikbaar is waarvan aangetoond kan worden dat:

- De schematisatie maatgevend is voor het FU vak (stap (a)).
- De schematisatie ook maatgevend is voor het dijkvak (stap(b)).
- Dat aan de voorwaarden voor FU (par. 2.3) zijn voldaan, is de betrouwbaarheidsindex na update ook minimaal aanwezig voor het dijkvak.

In hoofdstuk 4 wordt een praktijk voorbeeld geïllustreerd waarin de gevoeligheidsanalyse wel voor de maatgevende doorsnede in het dijkvak wordt uitgevoerd.

4 Praktijk voorbeeld (case green)

In dit hoofdstuk wordt een praktijkvoorbeeld gepresenteerd. Zoals in H3, het voorbeeld toont aan dat als de beschikbare FU berekening voor de maatgevende doorsnede in het vak is gedaan, met een conservatieve schematisatie van kleine variaties in het FU vak, deze na update ook de maatgevende schematisatie van het dijkvak weergeeft. Mits ook aan de overige voorwaarden in par 2.3 is voldaan. Met andere woorden dat de behaalde betrouwbaarheidsindex representatief is voor het dijkvak. In dit hoofdstuk kijken we wederom naar:

- Analyse van de variabiliteit binnen een FU vak, voor stap (a) (zie 4.3).
- Analyse van andere doorsneden binnen het dijkvak, voor stap (b) (zie 4.4).

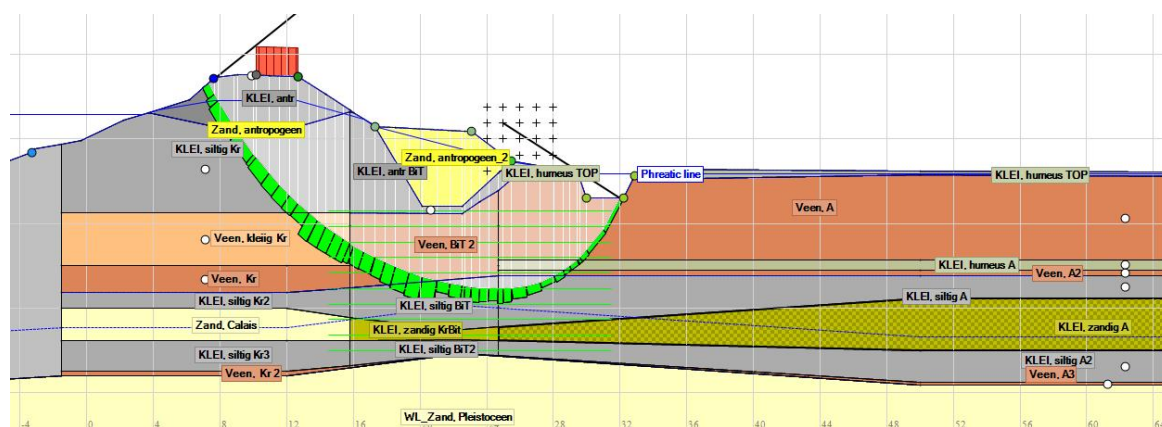
4.1 Beschrijving voorbeeld

Dit voorbeeld is "case green" uit (Deltares, 2016b). Het betreft hier een groene dijk zonder bebouwing. Variaties die binnen het dijkvak op kunnen treden zijn de aanwezigheid van een sloot, bodembouw en de afmetingen van de berm.

In tegenstelling tot het eenvoudige voorbeeld zijn de toets en de observatie situatie in dit geval niet gelijk vanwege bodemdaling (Deltares, 2016b). Ook is de verkeersbelasting tijdens de toets wel aanwezig maar tijdens de observatie niet. Verder is in het dijkvak tijdens de observatie (en tijdens de toets) geen verborgen sterkte aanwezig.

4.1.1 Schematisering representatief doorsnede

Onderstaande figuur toont de ondergrondschematisatie van de toets situatie en het kritieke glijvlak, voor details wordt verwezen naar case rapport (Deltares, 2016b).



Figuur 4.1 'Praktijk voorbeeld' geschematiseerd dwarsprofiel (toetsituatie)

Hieronder staan de belangrijkste aannames voor de dijkvak schematisatie.

Dezelfde (homogene) condities langs het dijkvak	Veranderende omstandigheden binnen het dijkvak
<ul style="list-style-type: none"> hydraulische belasting, Gumbel verdeling Grondparameters, regionale verzameling/onzekerheid Verkeersbelasting Bodemdaling (10 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> freatisch vlak Laagopbouw Geometrie van de dijk Mogelijk aanwezigheid van sloot

Tabel 4.1 Aannames voor de dijkvak schematisatie van het 'praktijk voorbeeld'

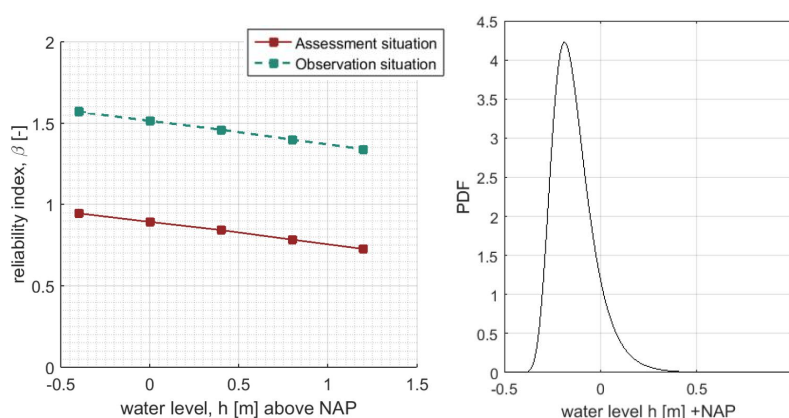
4.1.2 A-priori Faalkansanalyse

De betrouwbaarheidsindex in de toets situatie, de a-priori faalkans, is $\beta_{dsn} = 0.91$, en de stabiliteitsfactor is $SF = 0.71$ (met NAP + 1.15 m en rekenwaarden). Het ontwerp punt van de waterstand is -0,15 m NAP, wat relatief dicht bij de gemiddelde waterstand van -0.4 m NAP is.

De gekwadrateerde FORM invloed coëfficiënten geven aan dat meer dan 80% van de onzekerheid veroorzaakt wordt door de sterkte parameters van de grond, die onzekerheid kan verkleind worden door FU (voor details zie Deltares, 2016b).

4.2 Faalkans updating

De fragility curves voor de toets en de observatie zijn hieronder weergegeven op basis van (Deltares, 2016b). De toets situatie ligt ver onder de observatie en beide situaties laten een relatief klein effect van de waterstand op de faalkans zien. Daarom wordt geen beduidend effect van updating verwacht (Deltares, 2016a).



Figuur 4.2 'Praktijk voorbeeld' toetsituatie fragility curve en waterstandkansverdeling. Links, fragility curves voor de toets situatie en de observatie. Rechts de waterstandkansverdeling. De fragility curves lopen vrij vlak, dat houdt in dat de waterstand een beperkt effect op de betrouwbaarheidsindex heeft

Bij de (overleefde) belastingcondities is het van belang dat aannemelijk kan worden gemaakt dat (zoals in H2 en H3 al genoemd):

- De grenstoestand ten tijde van de observatie niet is overschreden.
- Er geen verborgen sterkte is die voor de observatie zorgt.

- De observatie geldt voor het hele dijkvak, bv. buitenwaterstand of verkeersbelasting (dit betekent volledige correlatie tussen observaties bij verschillende doorsneden). Dit is van belang voor de doorvertaling, zoals behandeld in par 2.2.

De posterior betrouwbaarheidsindex ($\beta_{dsn,post}$) is voor 3 geobserveerde waterstanden berekend (Deltares, 2016a):

- $h_{obs} = \text{NAP} - 0.2 \text{ m}$, $\beta_{dsn,post} = 1.14$.
- $h_{obs} = \text{NAP} + 0.2 \text{ m}$, $\beta_{dsn,post} = 1.17$.
- $h_{obs} = \text{NAP} + 1.0 \text{ m}$, $\beta_{dsn,post} = 1.26$.

Het beperkte effect van updating was verwacht, gezien de hogere sterkte van de observatie en gezien de beperkte invloed van de waterstand op de betrouwbaarheidsindex (Deltares, 2016b).

Hier voeren wij vergelijkbare analyse uit zoals in het eenvoudige voorbeeld. De volgende paragrafen laten het effect van verschillen in een FU vak en dijkvak zien.

4.3 Gevoeligheidsanalyses FU vak, stap (a)

Om de resultaten voor het FU vak te kunnen onderbouwen wordt gekeken naar kleine variaties die op kunnen treden binnen het FU vak. De volgende wordt beschouwd:

- Geometrie
 - [var.1] kruin niveau -20 cm
 - [var.2] kruin niveau -20 cm en achterland niveau + 20 cm
- Laagscheiding
 - [var.3] geen "KLEI, humeus A" in achterland. De grensspanningspunten van "KLEI, humeus A" en "Veen, A2" zijn weggelaten.
 - [var.4] bovenkant van "Veen, Kleilig Kr" omhoog brengen + 50 cm
- Freatisch vlak
 - [var.5] Freatische vlak omhoog brengen + 30 cm
 - [var.6] Freatische vlak omlaag brengen - 30 cm

De beschouwde schematisaties zijn in Tabel 4.2 samengevat. De stabiliteitsfactoren voor de varianten zijn ook daarin weergegeven. Deze schematisaties zijn ook in Bijlage B gepresenteerd.

De stabiliteitsfactor is praktisch gelijk alle varianten. Variant 5, met een hogere freatische lijn heeft de laagste stabiliteit (0.01 verschil t.o.v. de basis variant). Dit 0.01 verschil lijkt hier niet relevant te zijn, omdat het van kleine numeriek ruis komen. Als er sprake is van een maatgevender variant, deze zou de eerste schematisatie vervangen. Bij de semi-probabilistische analyses zien wij dat de basis variant en varianten 2, 3 en 5 maatgevend kunnen zijn.

Alle varianten hebben heel vergelijkbaar kritieke glijvlakken, zie Bijlage B.

Variant	0 (basis)	1	2	3	4	5	6
Beschrijving	Base case	Kruin – 20 cm	Kruin – 20 cm, achterland + 20 cm	Geen klei humeus	Veen Kleiig Kr + 50 cm	PL + 30 cm	PL – 30 cm
Stabiliteitsfactoren (NAP + 1.15 m en rekenwaarden)	0	1	2	3	4	5	6
Kritiek glijvlak	0.71	0.72	0.71	0.71	0.74	0.70	0.72

Tabel 4.2 'Praktijk voorbeeld' beschrijving varianten binnen FU vak en bijbehorende stabiliteitsfactoren (PL = freatische lijn)

Figuur 4.3 geeft de fragility curves weer. De fragility curves tonen aan dat varianten 3 en 5 echt de maatgevend lijken te zijn (basis variant $\beta_{dsn} = 0.9$, terwijl voor varianten 3 en 5 $\beta_{dsn} = 0.8$). Ook hier is het verschil niet groot, toch als er sprake is van een maatgevender variant, deze zou de eerste schematisatie vervangen.

De resultaten (met update) zijn in de onderstaande tabellen samengevat, terwijl Figuur 4.4 het effect van de updates voor de verschillende varianten weer geeft. Deze resultaten worden in samenhang met de resultaten van de doorvertaling besproken in paragraaf 4.5.

Variant	0	1	2	3	4	5	6
NAP – 0.4 m	0.9	1.1	1.1	0.8	1.3	0.8	1.1
NAP + 0.4 m	0.8	1.0	1.0	0.7	1.2	0.7	1.0
NAP + 1.2 m	0.7	0.9	0.8	0.6	1.1	0.6	0.9

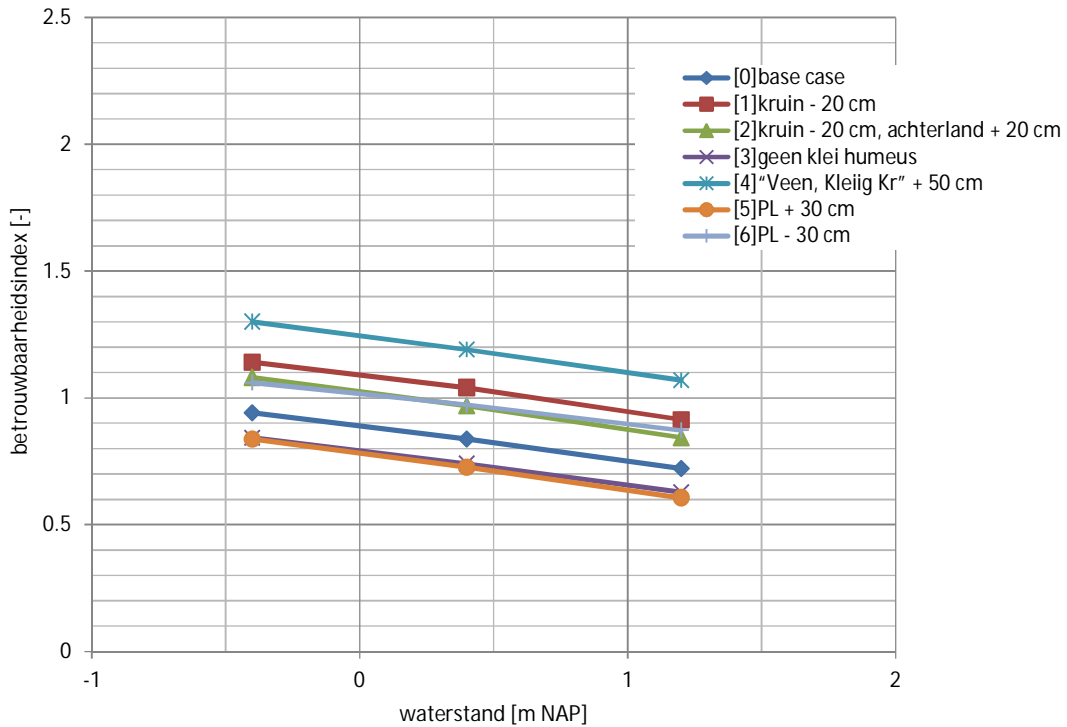
a) Fragility curve points, betrouwbaarheidsindex per waterstand (toets). Variant 3 en 5 hebben de laagste betrouwbaarheidsindex bij alle waterstanden

Variant	0	1	2	3	4	5	6
Toets	0.9	1.1	1.0	0.8	1.3	0.8	1.0
Update $h_{obs} = \text{NAP} - 0.2 \text{ m}$	1.1	1.3	1.2	1.1	1.4	1.1	1.2
Update $h_{obs} = \text{NAP} + 1.0 \text{ m}$	1.3	1.4	1.3	1.2	1.5	1.2	1.4

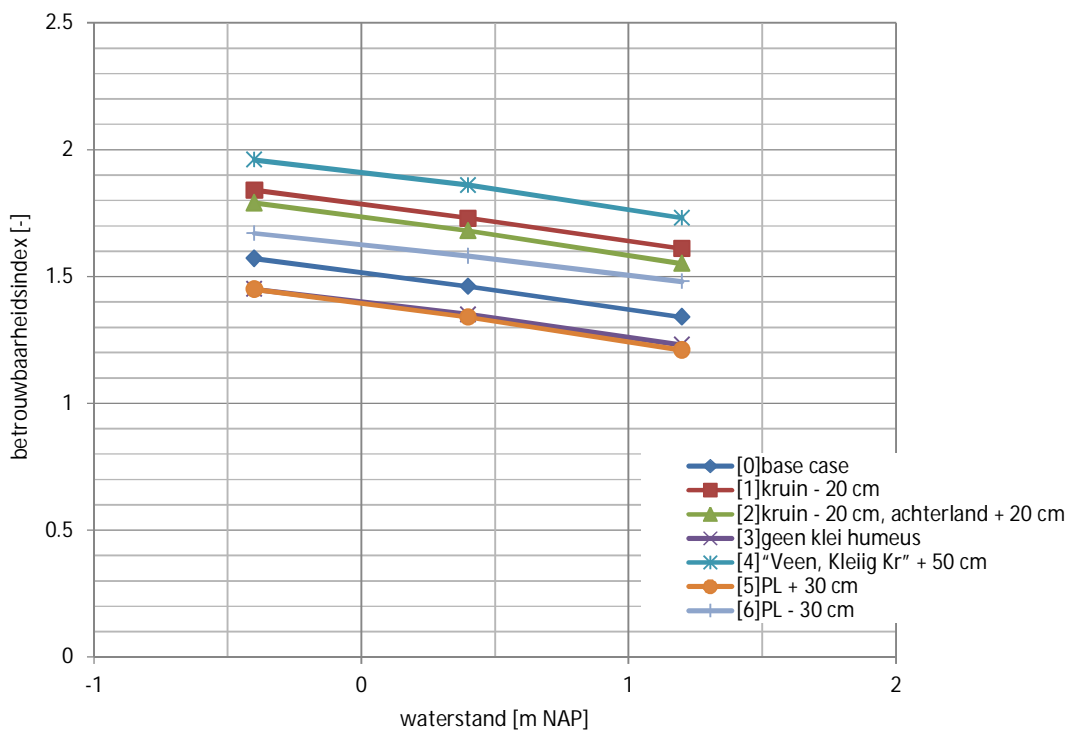
b) prior en posterior betrouwbaarheidsindices (β_{dsn}) voor updates met geobserveerde waterstanden.

Tabel 4.1 'Praktijk voorbeeld' FU resultaten van varianten binnen FU vak

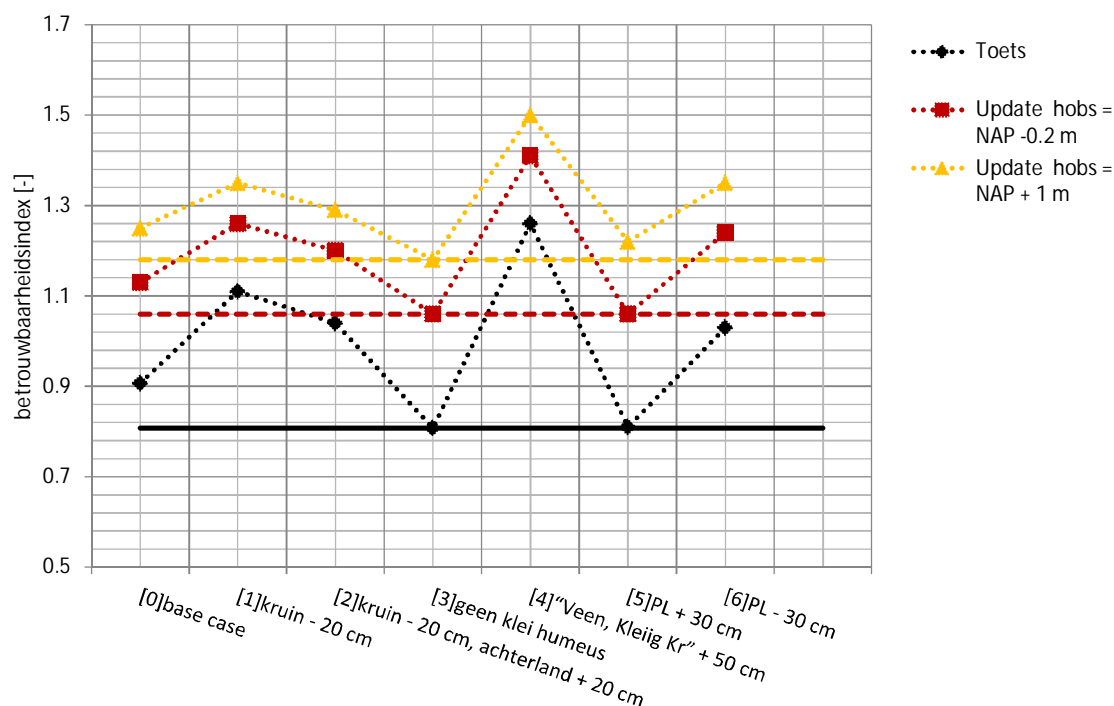
Toets situatie (verkeer 13.3)



Observatie situatie (verkeer 0)



Figuur 4.3 'Praktijk voorbeeld' toets (boven) en observatiesituatie (onder) fragility curves voor varianten binnen FU vak. Bij de observatie is verkeer niet aanwezig, bij de toets wel. De maatgevende variant in zowel de toets als de observatie is variant 5



Figuur 4.4 ‘Praktijk voorbeeld’ toets situatie en FU analyse voor varianten binnen FU vak. De zwart lijnen (Toets) tonen de a-priori betrouwbaarheidsindex. De andere lijnen (Update hobs =...) tonen de betrouwbaarheidsindex na een update met een geobserveerde waterstand van -0.2 m, of 1.0 m NAP, respectievelijk. Deze figuur laat zien dat de variant met de laagste toets betrouwbaarheidsindex, ook na update de laagste betrouwbaarheidsindex heeft. Met andere woorden, doorsnede 5 moet worden gebruikt voor de doorvertaling aangezien deze de laagste a-priori betrouwbaarheid heeft

De gevoeligheidsanalyse van het FU vak laat zien dat voor de meeste gevallen de maatgevende situatie in de a-priori, na updating maatgevend blijft. Met andere woorden, doorsnede 5 moet worden gebruikt voor de doorvertaling aangezien deze de laagste a-priori betrouwbaarheid heeft. Verschillen in betrouwbaarheidsindex kleiner dan 0,1 zijn marges in de berekeningen.

4.4 Doorvertaling naar dijkvak, stap (b)

Om de resultaten voor het hele dijk vak te kunnen onderbouwen wordt gekeken naar variëaties (zoals laagopbouw, waterspanningen en geometrie) die op treden binnen het dijkvak. Dit betreft stap (b) in hoofdstuk 2.

Voor de praktijk case wordt beschouwd dat binnen het dijkvak zijn er 4 mogelijke doorsneden waarvoor we het effect van FU willen weten. De volgende variëaties worden beschouwd:

- Geometrie
[dsn.8] geen sloot.
[dsn.9] geen sloot en aangepaste berm.
- Laagscheiding/Bodemopbouw
[dsn.7] bovenkant van “Veen, Kleilig Kr” en “Veen, Kr” omhoog brengen + 50 cm.

Deze zijn in Tabel 3.3 samengevat. De stabiliteitsfactoren voor de doorsneden zijn ook daarin weergegeven. De maatgevende doorsnede is Dsn 0 (base case). De waarden van de grensspanningspunten zijn gelijk voor alle geschematiseerd doorsneden. Alle doorsneden hebben heel vergelijkbaar kritieke glijvlakken, zie Bijlage B.

Doorsnede	0	7	8	9
Beschrijving	Base case	“Veen, Kleiig Kr” en “Veen, Kr” + 50 cm	Geen sloot	Geen sloot Andere berm
Stabiliteitsfactoren (NAP + 1.15 m en rekenwaarden)	0	7	8	9
Kritiek glijvlak	0.71	0.74	0.75	0.83

Tabel 4.3 ‘Praktijk voorbeeld’ beschrijving doorsneden binnen dijkvak en bijbehorende stabiliteitsfactoren.

Doorsnede 0 is maatgevend

Figuur 4.5 geeft de fragility curves weer. De resultaten (met update) zijn in de onderstaande tabellen samengevat, terwijl Figuur 4.6 het effect van de updates voor de verschillende varianten weer geeft. De gevoeligheidsanalyse van het dijkvak laat zien dat de maatgevende situatie in de a-priori, na updating maatgevend blijft. De FU resultaten voor de verschillende geometrieën in het FU vak en in het dijkvak laten dus hetzelfde beeld zien. Dit ondersteunt de hypothese in hoofdstuk 2.

Doorsnede	0	7	8	9
NAP – 0.4 m	0.9	2.1	1.6	2.6
NAP + 0.4 m	0.8	2.0	1.5	2.5
NAP + 1.2 m	0.7	1.8	1.4	2.4

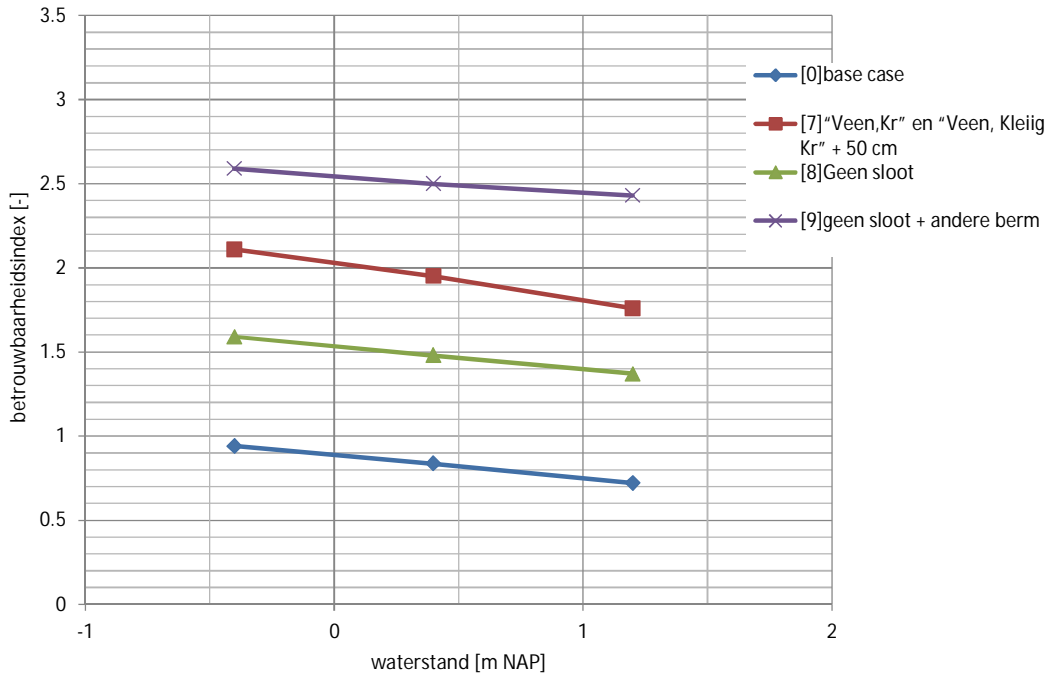
a) Fragility curve points, betrouwbaarheidsindex per waterstand. Doorsnede 0 is maatgevend

Doorsnede	0	7	8	9
Toets	0.9	2.06	1.55	2.56
Update $h_{obs} = \text{NAP} - 0.2 \text{ m}$	1.1	2.08	1.59	2.60
Update $h_{obs} = \text{NAP} + 1.0 \text{ m}$	1.3	2.10	1.60	2.62

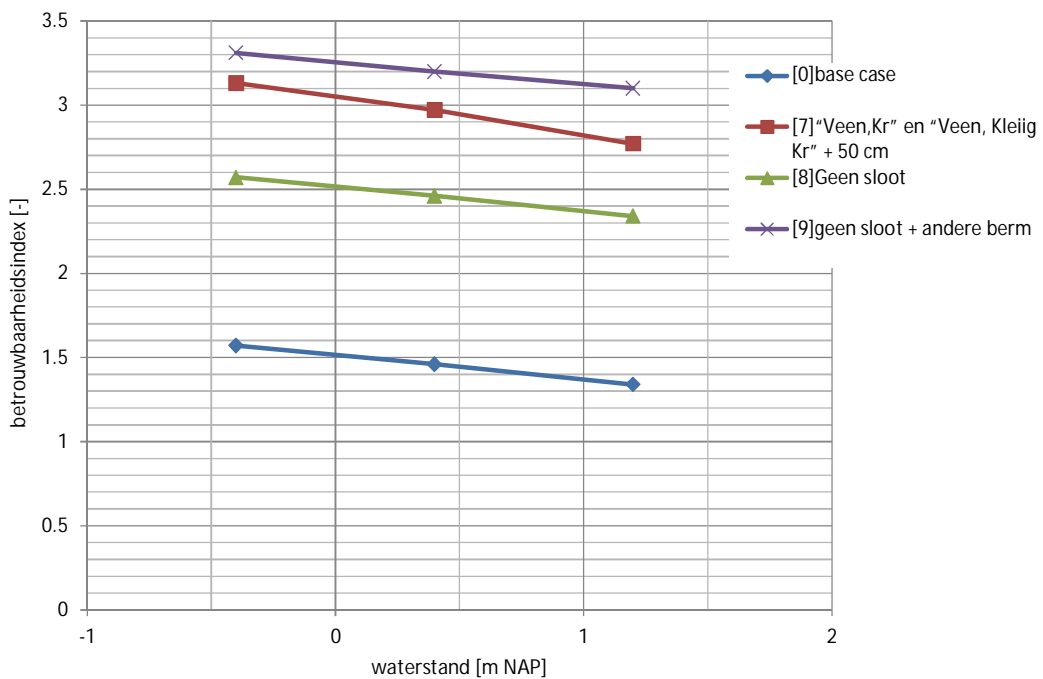
b) Prior en posterior betrouwbaarheidsindices (β_{dsn}) na update met observatie waterstanden. Doorsnede 0 is maatgevend in de toets en ook na update met beide waterstanden

Tabel 4.2 ‘Praktijk voorbeeld’ FU resultaten voor mogelijk geometrieën binnen dijkvak

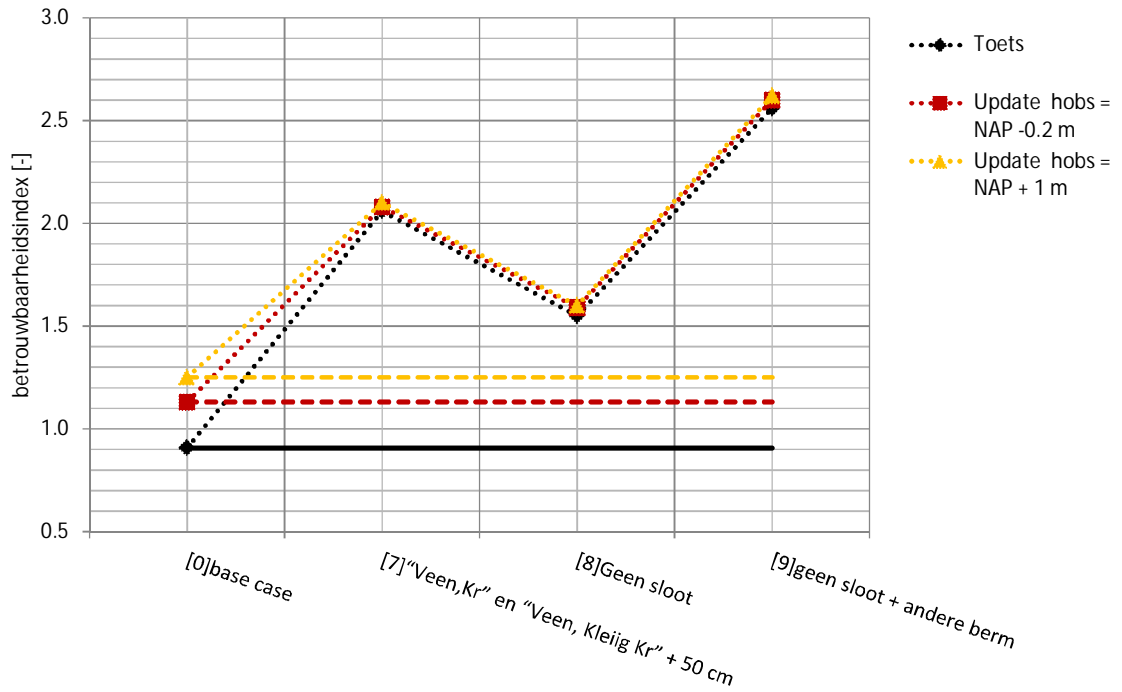
Toets situatie (verkeer 13.3)



Observatie situatie (verkeer 0)



Figuur 4.5 'Praktijk voorbeeld' toets (boven) en observatiesituatie (onder) fragility curves voor varianten binnen dijkvak. Bij de observatie is verkeer niet aanwezig, bij de toets wel. De maatgevende variant in zowel de toets als de observatie is Doorsnede 0



Figuur 4.6 'Praktijk voorbeeld' toetsituatie en FU analyse van de varianten binnen het dijkvak. A-priori heeft doorsnede 0 de laagste betrouwbaarheidsindex, dit blijft na update het geval

5 Conclusies

Doel van dit project was om de doorvertaling van faalkans updating (FU) resultaten op doorsnedeniveau naar dijkvakniveau te beschrijven met onderbouwing vanuit de theorie, en deze te illustreren aan de hand van voorbeelden.

De hoofdconclusies die we uit de theoretische beschouwingen en uitgewerkte voorbeelden kunnen trekken is dat als faalkans updating op een a-priori maatgevende representatieve doorsnede wordt toegepast, ook a-posteriori kan worden verondersteld dat de betrouwbaarheid in andere delen (doorsnedes) van het dijkvak minimaal zo groot zal zijn als van de (a-priori) maatgevende. Hiervoor gelden wel enkele voorwaarden, die in dit rapport uitgelicht worden (H2) en geïllustreerd aan de hand van voorbeelden (H3, H4):

- Een maatgevende doorsnede gekozen is voor updating, waarbij de input parameters conservatief gekozen zijn (cf. RWS 2016b, Deltares 2016c).
- De belastingen tijdens de observatie vergelijkbaar zijn voor het hele dijkvak.
- Regionale ondergrondinformatie (geldig voor het hele dijkvak) en bijbehorende spreiding is gebruikt (in tegenstelling tot lokale ondergrondinformatie).
- Het type bezwijken gelijk is in het hele dijkvak (faalmechanisme).

Zoals in bovenstaande voorwaarden beschreven is in deze studie uitgegaan van een situatie waarbij de voor faalkans updating toegepaste belastingcondities overal in het dijkvak zijn opgetreden, zoals typisch het geval bij een hoogwaterbelasting of bij bovenbelastingen. Voor situaties waarbij de belasting slechts in een beperkt deel van het dijkvak aanwezig was, zoals bij proefbelastingen, zijn waarschijnlijk aanvullende voorwaarden nodig. Aanbevolen wordt om te onderzoeken hoe ook in dergelijke situaties faalkans updating toegepast kan worden op langere strekkingen dijk.

Referenties

- Deltares (2016a). Reliability updating for slope stability of dikes - Approach with fragility curves (background report). Rapport nummer: 1230090-033. Auteurs: Schweckendiek, T. & Kanning, W.
- Deltares (2016b). Reliability updating for slope stability of dikes - Test cases report. Rapport nummer: 1230090-037. Auteurs: Schweckendiek, T. & Teixeira, A. & van der Krogt, M. & Kanning, W.
- Deltares (2016c). Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating. Groene Versie - Macrostabieliteit Binnenwaarts. Rapport nummer: 1230090-032. Auteurs: Kanning, W. & Schweckendiek, T.
- Deltares (2017). Handreiking Faalkansanalyse Macrostabieliteit. Groene Versie. Rapport nummer: 11200575-016. Auteurs: Schweckendiek, T., van der Krogt, M., Rijnveld, B. & Teixeira, A.
- RWS (2016a). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 - Bijlage I. Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen (bijlage bij artikel 1) - <http://wetten.overheid.nl/BWBR0039040/2017-01-01#BijlageI>.
- RWS (2016b). Schematiseringshandleiding macrostabieliteit WBI 2017, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 1 december 2016. [https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-\(wbi\)/producten-wbi/](https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-(wbi)/producten-wbi/)

A Eenvoudig voorbeeld parameters

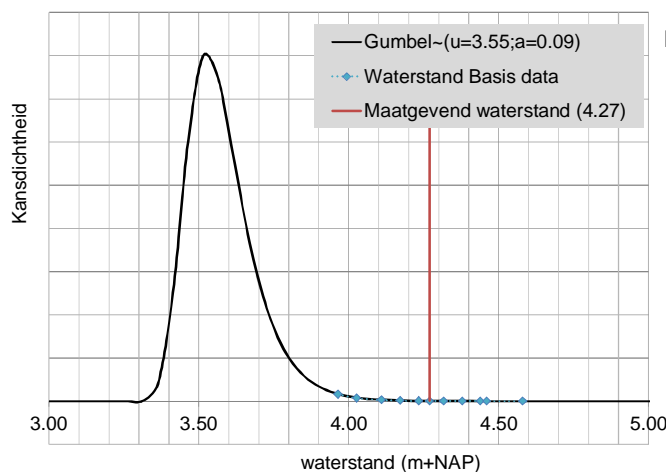
Voor een regionale proevenverzameling zijn de grondparameters weergegeven in Tabel A.1, en voor de waterstad kansverdeling wordt gebruik gemaakt van de uitvoer van een Hydra model zoals in Tabel A.2 weergegeven.

Parameter	Gemiddelde	Standaard afwijking ¹⁾	Verdeling type	Rekenwaarden
ZAND, dijksmateriaal				
γ/γ_{verz} [kN/m ³]	18/20	-	deterministisch	18/20
c' [kPa]	0	-	deterministisch	0
ϕ' [°]	32,5	2,5	lognormaal	28.6
KLEI, toplaag				
γ/γ_{verz} [kN/m ³]	15/15	-	deterministisch	15/15
S [-]	0,30	0,03	lognormaal	0.25
m [-]	0,9	0,03	lognormaal	0.85
POP [kPa]	22	9,5	lognormaal	10
KLEI, humeus				
γ/γ_{verz} [kN/m ³]	14/14	-	deterministisch	14/14
S [-]	0,32	0,03	lognormaal	0.27
m [-]	0,9	0,03	lognormaal	0.85
POP [kPa]	22	9,5	lognormaal	10
ZAND, pleistoceen				
c' [kPa]	0	-	deterministisch	0
ϕ' [°]	35	2	lognormaal	31.8
γ/γ_{verz} [kN/m ³]	18/20	-	deterministisch	18/20

¹⁾ Standaardafwijking van het gemiddelde van de populatie langs het glijvlak

Tabel A.1 Eenvoudige kansverdelingen grond/invoer - parameters

Waterstand [m NAP]	Frequentie* [1/jaar]
+3,96	0,01
+4,03	0,005
+4,11	0,002
+4,17	0,001
+4,23	0,0005
+4,27	0,00033
+4,32	0,0002
+4,38	0,0001
+4,44	0,00005
+4,46	0,00004
+4,58	0,00001

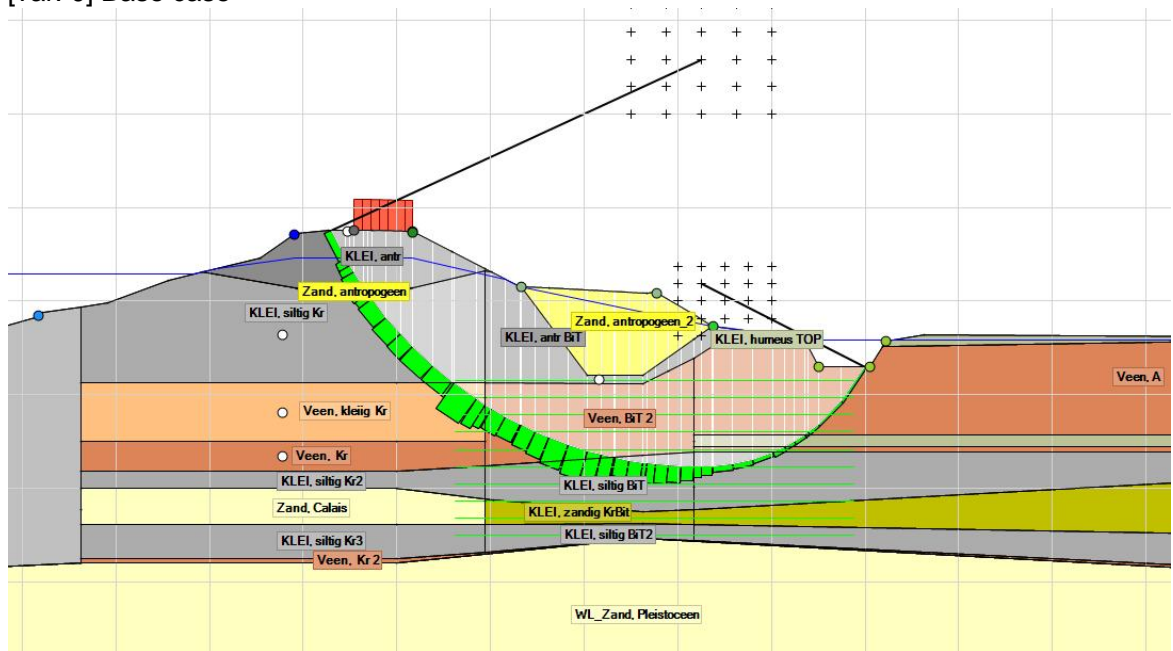


(*Voor de berekening van de overschrijdingskansen per jaar kan gebruik worden gemaakt van de volgende formule: $P(h>h) = 1 - \exp(-\text{frequentie})$. Bij kleine kansen zoals in dit voorbeeld is er praktisch geen verschil tussen overschrijdingskansen en frequenties.)

Tabel A.2 Eenvoudige voorbeeld: Overschrijdingsfrequenties waterstanden

B Praktijk voorbeeld varianten en glijvlakken

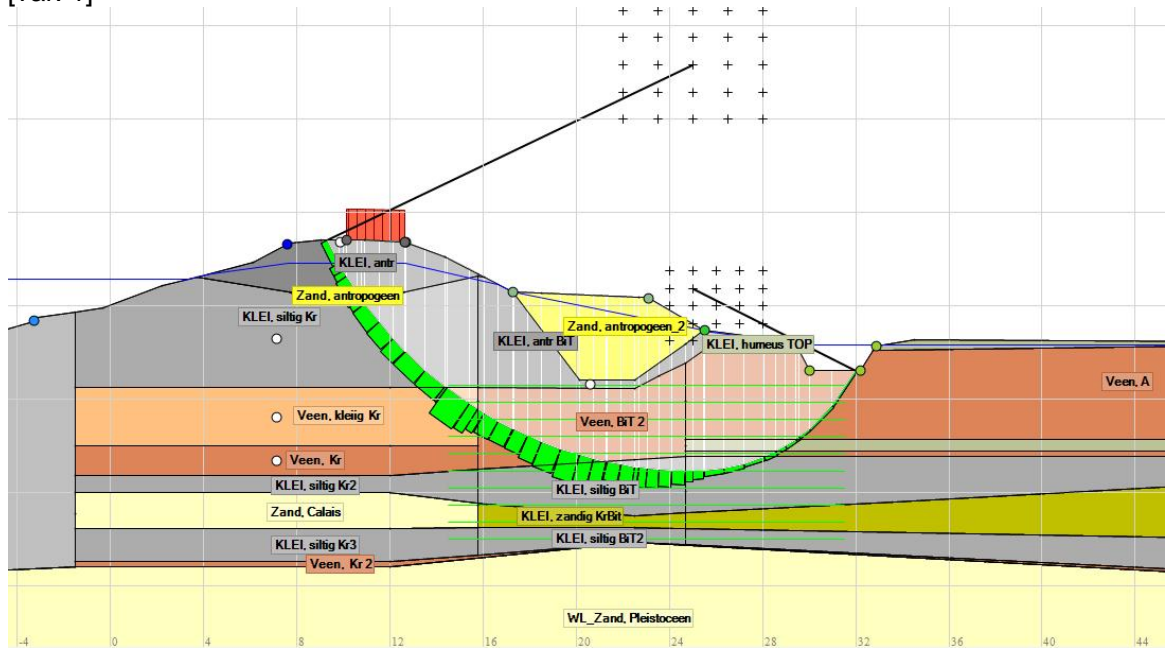
[var. 0] Base case



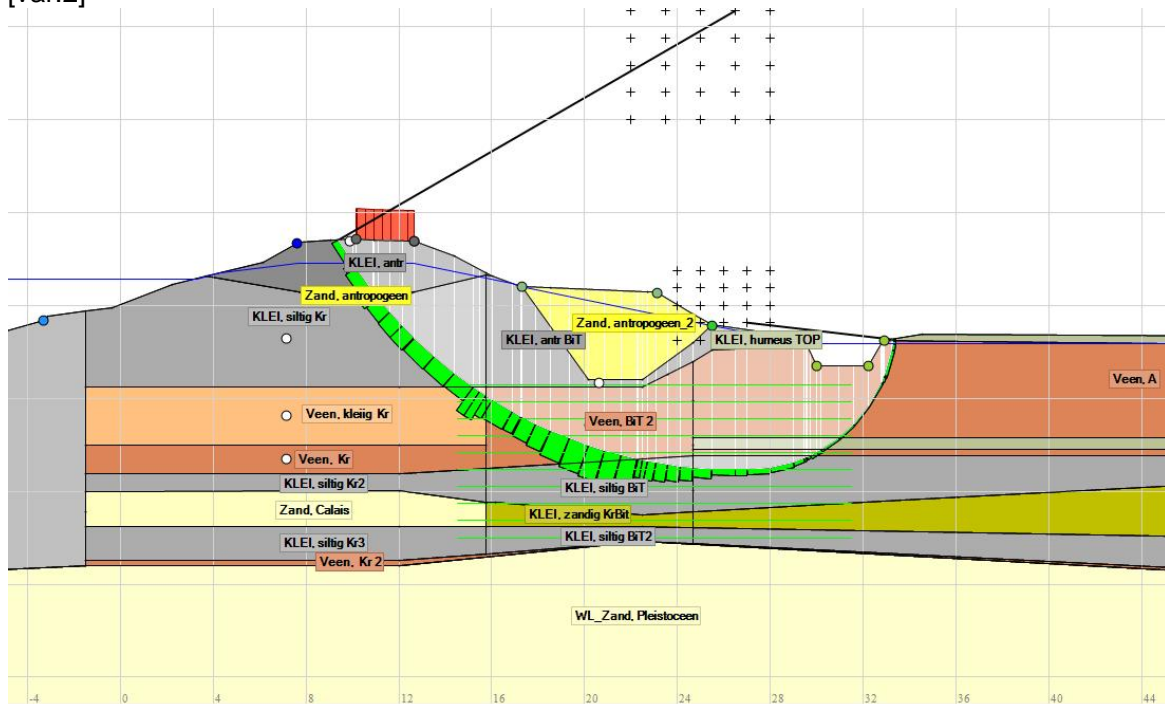
FU vak varianten:

- Geometrie
 [var.1] kruin niveau -20 cm.
 [var.2] kruin niveau -20 cm en achterland niveau + 20 cm.

[var. 1]

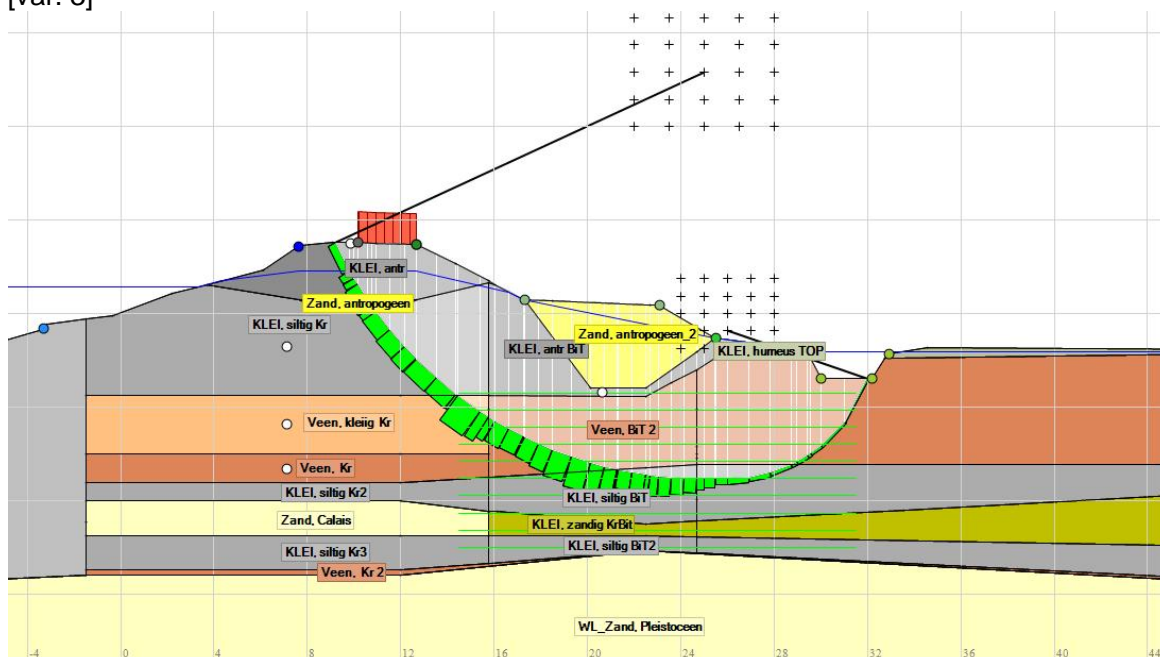


[var.2]

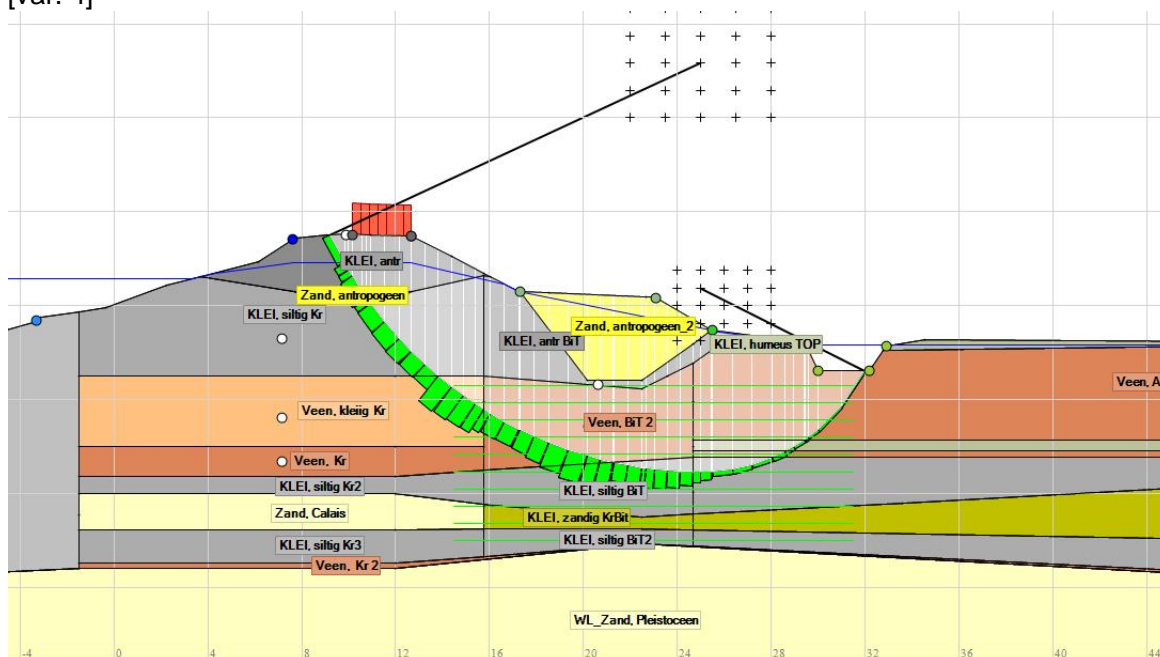


- Laagscheiding
 [var.3] geen "KLEI, humeus A" in achterland. De grensspanningspunten van "KLEI, humeus A" en "Veen, A2" zijn weggelaten.
 [var.4] bovenkant van "Veen, Kleilig Kr" omhoog brengen + 50 cm.

[var. 3]

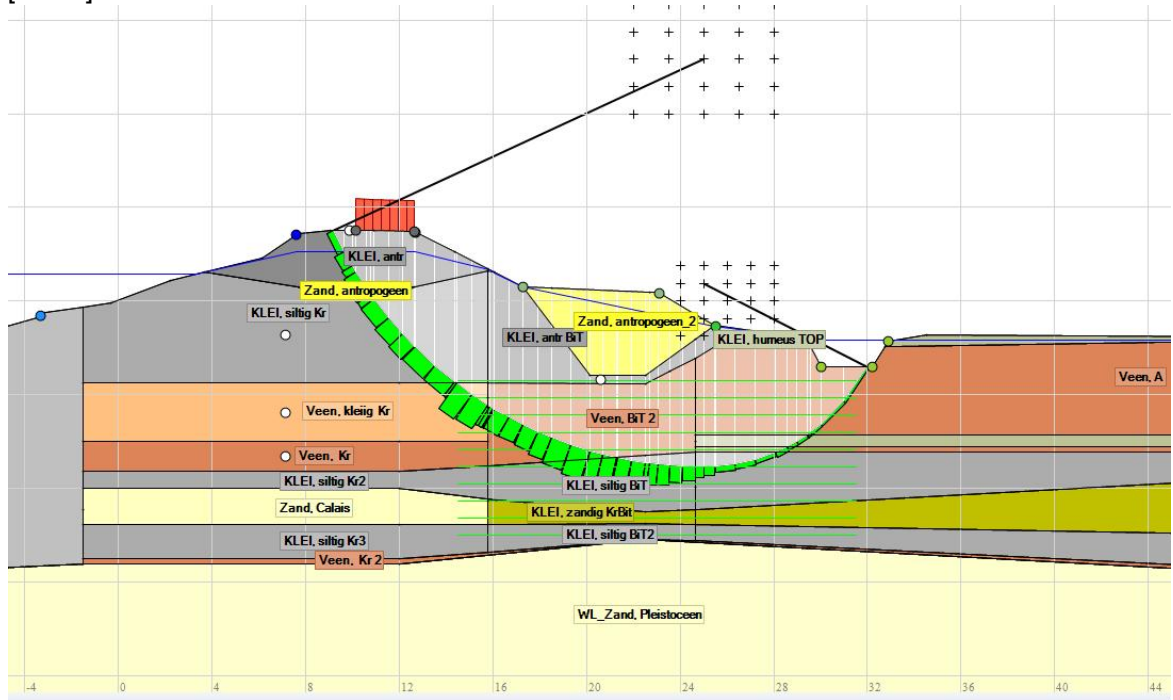


[var. 4]

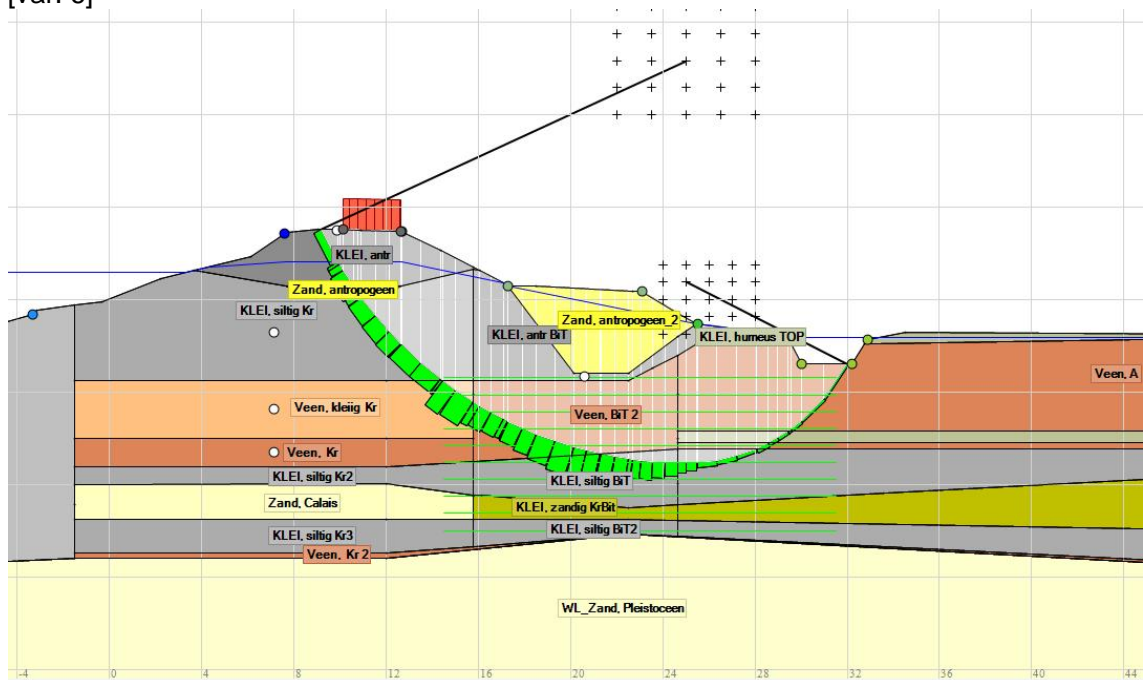


- Freatisch vlak
 [var.5] Freatische vlak omhoog brengen + 30 cm.
 [var.6] Freatische vlak omlaag brengen – 30 cm.

[var. 5]



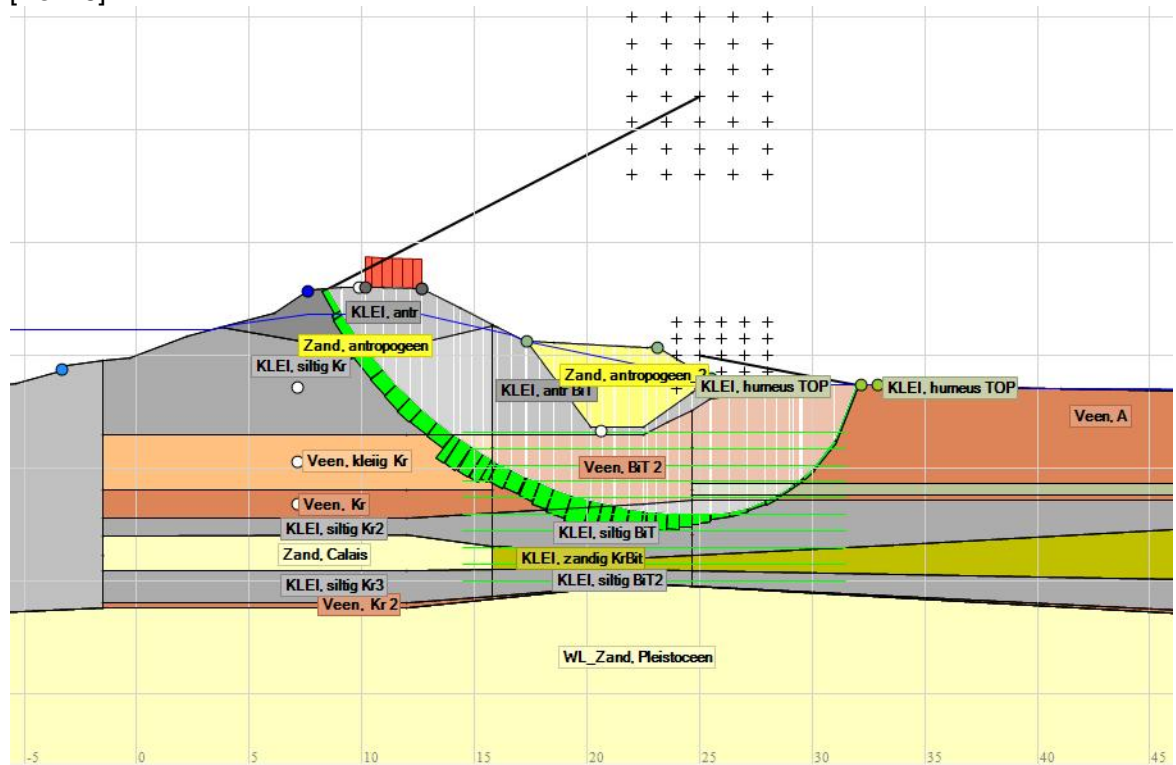
[var. 6]



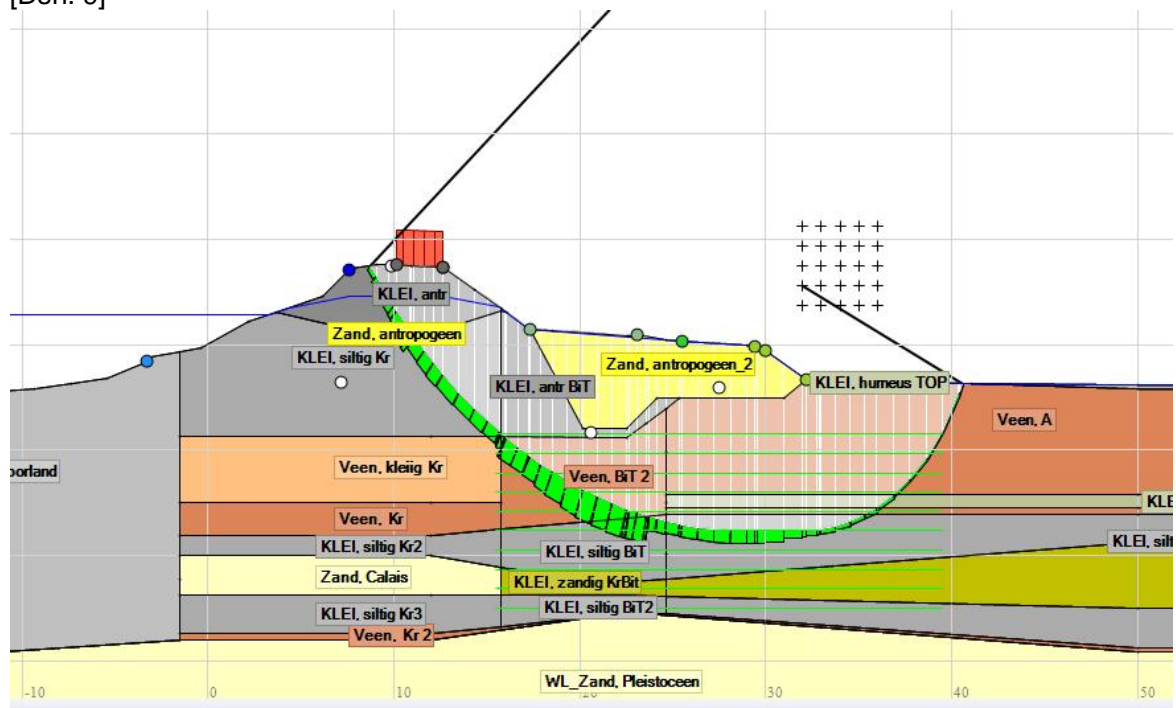
Dijkvak varianten:

- Geometrie
 [Dsn.8] geen sloot.
 [Dsn.9] geen sloot en aangepaste berm.

[Dsn. 8]



[Dsn. 9]



- Laagscheiding/Bodemopbouw
[Dsn.7] bovenkant van "Veen, Kleilig Kr" en "Veen, Kr" omhoog brengen + 50 cm

[Dsn. 7]

