

Stabiliteitsbeoordeling van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen



18 januari 2020

Hidde Wevers

VOORWOORD

Voor u ligt de scriptie 'Stabiliteitsbeoordeling van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen'. Deze scriptie is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente en in opdracht van waterschap Vallei en Veluwe. Van oktober 2019 tot en met december 2019 ben ik bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van de scriptie.

Graag zou ik binnen het waterschap Reindert Stellingwerff en Renée Rookus willen bedanken voor het begeleiden en ondersteunen van mijn afstudeeropdracht. Daarnaast kon ik bij de andere collega's binnen de afdeling planvorming van het waterschap altijd terecht voor advies en uitleg over mogelijke complicaties, waarvoor dank.

Buiten het waterschap zou ik graag Jord Warmink willen bedanken voor de begeleiding vanuit de Universiteit Twente en Raymond van der Meij van Deltares voor het helpen oplossen van problemen met de software D-Stability. Ook dijkspecialisten van organisaties die in het Stowa Kennis- en KundePlatform (KKP) hebben meegedacht aan de opzet van dit onderzoek ben ik dankbaar.

Tijdens mijn afstuderen heb ik mogen werken in een prettige werkomgeving.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Hidde Wevers

Enschede, 18 januari 2020

SAMENVATTING

Beheerders van primaire waterkeringen zijn verplicht om eens in de twaalf jaar te beoordelen of hun waterkeringen voldoen aan de huidige veiligheidsnorm. Het beoordelen van de veiligheid wordt uitgevoerd in verschillende beoordelingsrondes, die zijn vastgelegd in een wettelijk instrumentarium. De huidige beoordelingsronde is op 1 januari 2017 van start gegaan in het kader van het nieuwe Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI 2017) met nieuwe veiligheidsnormen.

Waterschap Vallei en Veluwe werkt momenteel aan de veiligheidsbeoordeling van dijktraject 52-2. Dit dijktraject is gelegen aan de westzijde van de IJssel en kenmerkt zich onder andere door de aanwezigheid van dijkwoningen. Dijkwoningen vallen binnen het WBI onder het type bebouwing van de Niet-Waterkerende Objecten (NWO's), dit zijn objecten in of op een waterkering zonder waterkerende functie. Een NWO is een indirect faalmechanisme, het falen van zo een object leidt niet direct tot falen van de waterkering maar kan de kans op een eventueel vervolgmecanisme wel versterken. Dat vervolgmecanisme is in dit onderzoek de macrostabiliteit binnenwaarts (STBI).

Binnen het WBI 2017 is er een toetspoor opgenomen die de invloed van NWO-bebouwing op directe faalmechanismen beoordeeld. Dit toetspoor omvat de eenvoudige toets en de toets op maat, terwijl de gedetailleerde toets ontbreekt. Hierdoor is het onmogelijk om voor elke dijkwoning een toetsoordeel te vellen zonder daarbij maatwerk te hoeven verrichten. Veel waterschappen, waaronder ook waterschap Vallei en Veluwe, worstelen daarom met de vraag hoe dijkwoningen meegenomen kunnen worden in de veiligheidsbeoordeling op trajectniveau. Op 1 januari 2023 dienen namelijk alle dijktrajecten volgens de nieuwe veiligheidsnormering beoordeeld te zijn.

Er is daarom vraag naar een efficiëntere beoordeling van de invloed van dijkwoningen op de veiligheid van dijken. In dit onderzoek is een eenvoudig toepasbare methode ontwikkeld die het mogelijk maakt om de binnenwaartse macrostabiliteit van dijktraject 52-2 ter plaatse van dijkwoningen te beoordelen. Allereerst is er een pilotstabiliteitsbeoordeling uitgevoerd met de toets op maat voor bebouwing van één maatgevende dijkwoninglocatie (IJsseldijk 45), hierin zijn variaties in eigenschappen inzichtelijk gemaakt middels een uitgebreide gevoeligheidsanalyse. In vrijwel alle gevallen is de faalkans van de maatgevende dijkwoninglocatie verwaarloosbaar klein. Op basis van de gevallen waarbij de dijkwoning wel tot een verhoogde faalkans van de dijk heeft geleid, is een vertaalslag gemaakt naar een methode door het opstellen van toepassingsvoorwaarden waarvoor het toetsoordeel van de maatgevende dijkwoninglocatie ook geldt voor andere dijkwoninglocaties:

- De geometrie van de dijk bij een andere dijkwoninglocatie beschikt over meer sterkte;
- Het overslagdebiet ter plaatse van de dijkwoninglocatie is niet groter dan 0,1 l/m/s;
- Als een dijkwoning op de binnenkruin staat, moet er minimaal 10 meter kruinbreedte overblijven. Wanneer de kruinbreedte echter gelijk is aan 10 meter:
 - o Is het eigen gewicht van een dijkwoning zonder kelder niet groter dan 20 kN/m²,
 - o Of heeft een dijkwoning een maximale kelderdiepte van 3,15 meter onder de kruin.

Voldoet een andere dijkwoninglocatie binnen dijktraject 52-2 aan deze toepassingsvoorwaarden, dan is de faalkans verwaarloosbaar klein. Voldoet een dijkwoninglocatie niet aan deze toepassingsvoorwaarden, dan kan vervolgens dezelfde methode voor de toets op maat worden doorlopen om tot een toetsoordeel te komen.

Voor het toepassen van de eenvoudig toepasbare methode bij andere dijktrajecten wordt aanbevolen om eerst de maatgevende dijkwoninglocatie te bepalen en de huidige methodologie te volgen om vervolgens nieuwe toepassingsvoorwaarden op te stellen. De resultaten van de pilotstabiliteitsbeoordeling in dit rapport zijn namelijk gebaseerd op maatgevende eigenschappen die binnen dijktraject 52-2 voorkomen en zijn daarom niet generiek toepasbaar op elk dijktraject.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	I
Samenvatting.....	II
Inhoudsopgave	III
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Doel en onderzoeksvragen.....	2
1.4 Afbakening	3
2 Theoretisch kader.....	5
2.1 Macrostabieleit binnenwaarts.....	5
2.2 Niet-waterkerende objecten	7
3 Methodologie	9
3.1 Inventariseren invloed dijkwoning op binnenwaartse macrostabieleit van de IJsseldijk.....	9
3.2 Vormen toetsoordeel STBI van maatgevende dijkwoninglocatie zonder dijkwoning	9
3.3 Vormen toetsoordeel STBI van maatgevende dijkwoninglocatie met dijkwoning.....	14
3.4 Bepalen invloed van variaties in eigenschappen op de stabiliteitsfactor.....	16
3.5 Vertalen van pilotstabiliteitsbeoordeling naar eenvoudig toepasbare methode	18
4 Resultaten.....	19
4.1 Invloed van een dijkwoning op de binnenwaartse macrostabieleit van de IJsseldijk.....	19
4.2 Toetsoordeel STBI van maatgevende dijkwoninglocatie zonder dijkwoning	21
4.3 Toetsoordeel STBI van maatgevende dijkwoninglocatie met dijkwoning	26
4.4 Gevoelighedsanalyse	30
4.5 Vertalen van pilotstabiliteitsbeoordeling naar een eenvoudig toepasbare methode	39
5 Discussie	41
6 Conclusie	42
7 Aanbevelingen.....	44
Referentielijst	45
Bijlage A: Methodologie schema.....	47
Bijlage B: Sonderingen en boringen	48
Bijlage C: Bouwtekeningen.....	53
Bijlage D: Resultaten onderzoeksvraag 2	58
Bijlage E: Resultaten onderzoeksvraag 3.....	67
Bijlage F: Resultaten onderzoeksvraag 4.....	73
Bijlage G: Resultaten D-Stability.....	81

1 INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

Nederland kent een rijke geschiedenis als het gaat om het waterbeheer. Primaire waterkeringen zijn gebouwd om het land te beschermen tegen overstromingen en zijn dan ook gesitueerd aan de belangrijkste waterlichamen in Nederland, zoals de Noordzee, het IJsselmeer en de grote rivieren. Kijkend naar de langetermijneffecten van klimaatverandering, de aanhoudende bodemdaling, de groeiende bevolking en de toename in economische waarde, zal het risico op overstromingen altijd aan de orde van de dag zijn. Om ons hiertegen te wapen zullen Rijkswaterstaat en de waterschappen altijd blijven investeren en innoveren om de waterveiligheid in Nederland te garanderen.

Beheerders van primaire waterkeringen zijn bij de Waterwet verplicht om eens in de twaalf jaar te beoordelen of hun waterkeringen voldoen aan de huidige veiligheidsnorm. De veiligheidsbeoordelingen worden uitgevoerd in verschillende beoordelingsrondes en deze zijn vastgelegd in een wettelijk instrumentarium. De huidige beoordelingsronde is op 1 januari 2017 van start gegaan in het kader van het nieuwe Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI 2017) met geactualiseerde veiligheidsnormen. Deze nieuwe veiligheidsnormen worden uitgedrukt in overstromingskansen in plaats van in overschrijdingskansen van een ontwerpwaterstand uit eerdere beoordelingsrondes (Helpdesk Water, 2017). De overstromingskans is gebaseerd op het overstromingsrisico, dat het product is van de kans dat er een overstroming plaatsvindt en de gevolgen die zo een overstroming kan hebben. De overschrijdingskans had daarentegen betrekking op een bepaalde waterstand die veilig gekeerd moest worden. In 2050 moeten alle primaire waterkeringen voldoen aan de nieuwe veiligheidsnormering (Helpdesk Water, 2017).

Dijkwoningen vallen binnen het WBI onder het type bebouwing van de Niet-Waterkerende Objecten (NWO's), dit zijn objecten in of op een waterkering zonder waterkerende functie. Een NWO is een indirect faalmechanisme, het falen van zo een object leidt niet direct tot falen van de waterkering maar kan de kans op een eventueel vervolgmecanisme wel versterken (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Daarom is het van belang om NWO's mee te nemen in de veiligheidsbeoordeling van waterkeringen. De macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) van een dijk met bebouwing blijkt op veel verschillende manieren te worden beïnvloed in vergelijking met andere faalmechanismen (Jongerijs, 2016), daarom richt dit onderzoek zich alleen op dit specifiek faalmechanisme.

Sinds de derde beoordelingsronde (2006-2011) als onderdeel van het vorige beoordelingsinstrumentarium, het VTV 2006, zijn NWO's al meegenomen in de veiligheidsbeoordeling van waterkeringen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Jongerijs (2016) concludeerde echter dat veel NWO's niet zijn beoordeeld omdat het onduidelijk was hoe de stappen in het VTV doorlopen hadden moeten worden en het was een enorme hoeveelheid werk om al deze stappen voor unieke NWO's te voltooien (Jongerijs, 2016).

Waterschap Vallei en Veluwe is, als beheerder van primaire waterkeringen, op 1 januari 2017 gestart met de eerste beoordelingsronde van het WBI 2017 en deze zal duren tot 1 januari 2023. Een deel van het beheergebied van waterschap Vallei en Veluwe is de IJsseldijk, een dijk langs de rivier de IJssel. Aangezien veel dijkwoningen niet zijn beoordeeld in de vorige beoordelingsronde, zal dit onderzoek zich richten op de dijkwoningen van dijktraject 52-2 van de IJsseldijk (Figuur 1.1).

1.2 PROBLEEMSTELLING

Binnen het WBI 2017 is er de mogelijkheid om de invloed van NWO-bebouwing op directe faalmechanismen mee te nemen in de veiligheidsbeoordeling. Hiervoor zijn de eenvoudige toets en de toets op maat beschikbaar gesteld, terwijl de gedetailleerde toets echter ontbreekt. Hierdoor is het onmogelijk om voor elke dijkwoning een toetsoordeel te vellen zonder daarbij maatwerk te hoeven verrichten. Tijdens de bijeenkomst van het Kennis- en KundePlatform (KKP) op 15 oktober 2019 bleek dat veel waterschappen daarom worstelen met de vraag hoe dijkwoningen meegenomen kunnen worden in de veiligheidsbeoordeling op trajectniveau (STOWA, 2019). Op 1 januari 2023 dienen namelijk alle dijktrajecten volgens de nieuwe veiligheidsnormering beoordeeld te zijn.

Een van de redenen voor het ontbreken van een gedetailleerde toets voor NWO's, is omdat altijd werd aangenomen dat het effect van een NWO op de stabiliteit van een waterkering verwaarloosbaar klein is (STOWA, 2019). Hierdoor is er een gebrek aan kennis en ervaring op dit gebied. Daarnaast is er veel verschil tussen soortgelijke NWO's. Elke dijkwoning is bijvoorbeeld uniek in zijn kenmerken, het vereist dus tijd en moeite om voor iedere dijkwoninglocatie individueel tot een toetsoordeel te komen. Daar komt nog bij dat niet van elke dijkwoning alle gegevens beschikbaar of makkelijk te verkrijgen zijn. Er is daarom vraag naar een efficiëntere beoordeling van de stabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen.

1.3 DOEL EN ONDERZOEKSVRAGEN

Het hoofddoel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een eenvoudig toepasbare methode om de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen te beoordelen. 'Eenvoudig toepasbaar' houdt in dat beperkte gegevens nodig zijn om een beoordeling te geven van de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk. De methode moet ervoor zorgen dat onderscheid kan worden gemaakt tussen locaties die een potentieel risico vormen en locaties waar het risico te verwaarlozen is, zonder het verrichten van maatwerk. Om het hoofddoel van het onderzoek te bereiken, richt dit onderzoek zich op het zoeken naar meer gedetailleerde criteria binnen de bestaande criteria van de eenvoudige toets van het WBI 2017, zodat waterschap Vallei en Veluwe de binnenwaartse stabiliteit van de IJsseldijk efficiënter kan beoordelen.

Allereerst is het van belang om meer inzicht te krijgen in de invloeden die een woning kan hebben op de binnenwaartse stabiliteit van een dijk. Op basis van die verkregen kennis kan voor onderzoeksvraag 2 een maatgevende dijkwoninglocatie worden gekozen. Het is ook een eerste stap in het begrijpen hoe deze invloeden in een model kunnen worden geïmplementeerd en welke gegevens van de dijkwoning daarvoor nodig zijn. Om deze reden is de eerste onderzoeksvraag als volgt geformuleerd:

1. *Op welke manieren kan een dijkwoning de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk beïnvloeden?*

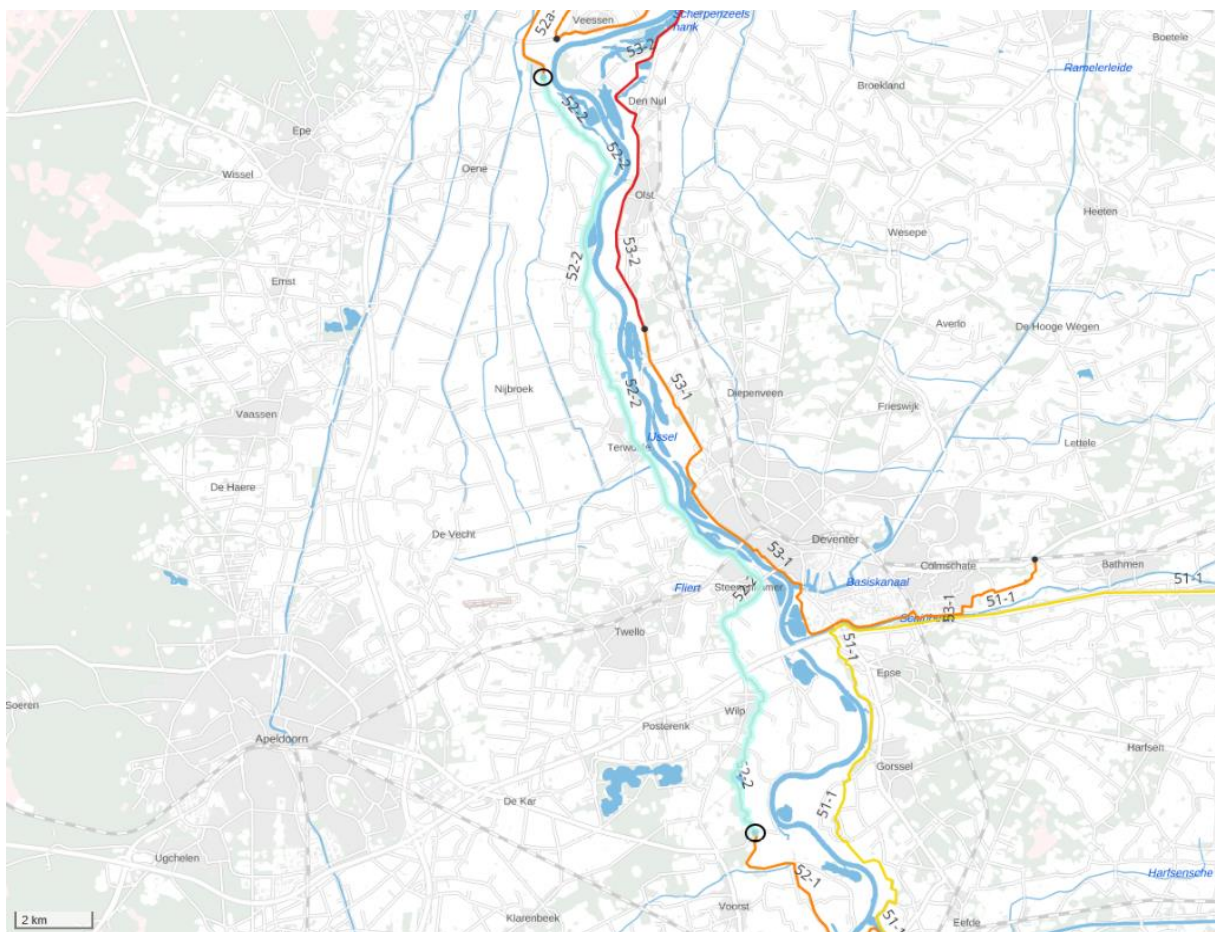
Om ervoor te zorgen dat ten minste één toetsspoor volledig is voltooid, begint de opdracht met een pilotstabiliteitsbeoordeling van één maatgevende dijkwoninglocatie. Om te voorkomen dat voor veel andere dijkwoninglocaties aanvullende berekeningen nodig zijn is de keuze gemaakt voor een maatgevende dijkwoninglocatie. Deze stabiliteitsbeoordeling zal vervolgens dienen als leidraad voor het ontwikkelen van de eenvoudig toepasbare methode en zal worden uitgevoerd in overeenstemming met het WBI 2017. Om de invloed van de woning op de binnenwaartse stabiliteit van de dijk te controleren, zal eerst een stabiliteitsbeoordeling van de dijk op de gekozen locatie worden uitgevoerd met het buiten beschouwing laten van de dijkwoning (i.e. nulsituatie). Daarna wordt de binnenwaartse stabiliteit van de dijk beoordeeld op dezelfde locatie inclusief de

dijkwoning. De toetsoorden worden vervolgens vergeleken om de invloed van de dijkwoning op de stabiliteit te bepalen. De volgende vier onderzoeksvragen luiden als volgt:

2. *Wat is het toetsoordeel over de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van de maatgevende dijkwoninglocatie in een situatie zonder dijkwoning?*
3. *Wat is het toetsoordeel over de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van de maatgevende dijkwoninglocatie in een situatie met dijkwoning?*
4. *Wat is de invloed van variaties in de eigenschappen van zowel de dijkwoning als het dijklichaam en ondergrond op de stabiliteitsfactor?*
5. *In hoeverre kan de pilotstabiliteitsbeoordeling van een maatgevende dijkwoninglocatie worden vertaald naar een eenvoudig toepasbare methode voor het beoordelen van de binnenwaartse macrostabiliteit bij meerdere dijkwoningen?*

1.4 AFBAKENING

Het onderzoek betreft een stabiliteitsbeoordeling van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen. De IJsseldijk is een primaire waterkering waarbij de westkant van de IJssel deel uitmaakt van het beheergebied van waterschap Vallei en Veluwe. Het waterschap werkt momenteel aan de veiligheidsbeoordeling van dijktraject 52-2. Dit dijktraject strekt zich uit over een afstand van 24,36 kilometer tussen Veessen en Voorst, zie Figuur 1.1. Het onderzoek richt zich op dit dijktraject, maar het is de bedoeling dat de eenvoudig toepasbare methode later ook kan worden gebruikt bij andere, nog te beoordelen, dijktrajecten.



Figuur 1.1 – Dijktraject 52-2 (in cyaan) van de IJsseldijk (Waterveiligheidsportaal, 2017)

Vanwege beperkte tijd wordt alleen rekening gehouden met het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit. Bovendien vermeldde Jongerius (2016) in zijn masterthesis dat bebouwing de binnenwaartse stabiliteit op veel verschillende manieren kan beïnvloeden in vergelijking met andere faalmechanismen, dus dat maakt dit faalmechanisme extra interessant. Het faalmechanisme piping ondervindt echter ook invloed van woningen, maar wordt niet onderzocht. Woningen aan de buitendijkse zijde van de dijk worden ook niet beschouwd.

De eenvoudige toets is in het WBI 2017 het eerste beoordelingsniveau van het toetsspoor macrostabiliteit binnenwaarts (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). De eenvoudige toetsen voor de dijkvakken van dijktraject 52-2 zijn al uitgevoerd door waterschap Vallei en Veluwe. De overgrote meerderheid van de dijkvakken voldoet niet aan de criteria en de dijkvakken waarbij de faalkans verwaarloosbaar werd geacht, zijn overgedimensioneerd en dus niet relevant voor deze studie. Daarom zal de eenvoudige toets op macrostabiliteit binnenwaarts in dit rapport niet worden uitgewerkt, wel wordt het kiezen van de maatgevende dijkwoninglocatie gebaseerd op een dijkvak dat niet voldoet aan de eenvoudige toets.

Binnenwaartse macrostabiliteit is een direct faalmechanisme. Omdat het onderzoek over dijkwoningen gaat, kunnen er ook indirecte faalmechanismen optreden. Het instorten van een dijkwoning is een voorbeeld van een indirect faalmechanisme, dit zal niet direct leiden tot falen van de dijk, maar kan de kans op falen als gevolg van binnenwaartse stabiliteit wel vergroten. Vanwege beperkte tijd en expertise zal de kans op falen van een dijkwoning niet worden bepaald. Er zijn bijvoorbeeld geen gegevens beschikbaar over de kans per jaar op instorten van een dijkwoning. Wel wordt gekeken naar de binnenwaartse stabiliteit in een scenario dat de dijkwoning gefaald is.

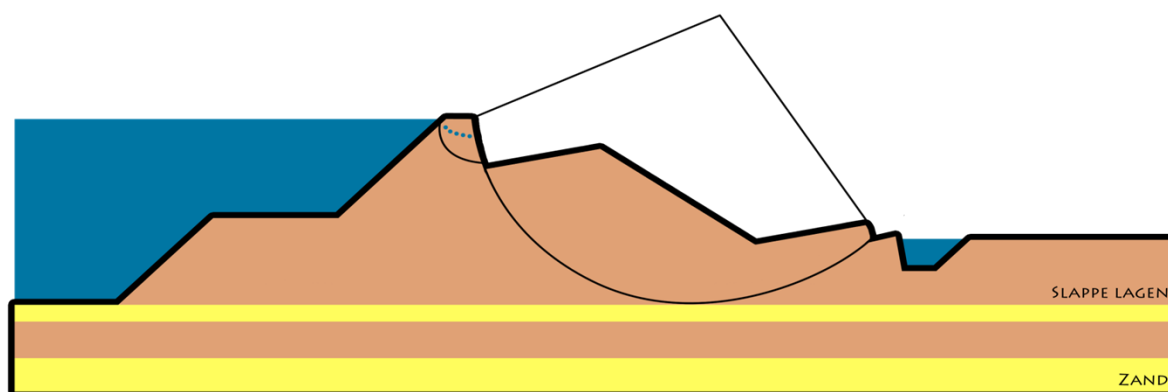
2 THEORETISCH KADER

Het belangrijkste deel van dit onderzoek is het maken van een stabiliteitsbeoordeling van de binnenwaartse macrostabiliteit voor de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen. Normaal gesproken bevat een theoretisch kader een analyse van vergelijkbare onderzoeken met betrekking tot de probleemstelling. Bij de veiligheidsbeoordeling van de IJsseldijk is waterschap Vallei en Veluwe zich aan de Waterwet te houden. Om deze reden zullen alleen documenten die door het WBI worden ondersteund geanalyseerd worden voor de beoordeling van de binnenwaartse macrostabiliteit.

Voor het beoordelen van dijkwoningen als onderdeel van de NWO's is er binnen het WBI geen ruimte voor het meenemen van de unieke eigenschappen van deze objecten in het beoordelingsproces. Er is een algemeen pad dat gevolgd kan worden, maar deze leidt vaak niet tot een beoordeling voor elke dijkwoning. Daarom zouden voor de beoordeling van dijkwoningen ook andere vergelijkbare onderzoeken buiten het WBI relevant kunnen zijn.

2.1 MACROSTABILITEIT BINNENWAARTS

Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) is een faalmechanisme waarbij een deel van het binnentalud instabiel wordt als gevolg van hoge waterstanden of zware regenval. De daaropvolgende infiltratie van water leidt tot een stijging van het freatisch vlak in het dijklichaam en een verhoging van de waterspanningen in de ondergrond, hierdoor zal de schuifweerstand van de grond verminderen. Als de schuifweerstand vervolgens onvoldoende is kunnen er grote delen van het binnentalud afschuiven (Aguilar López, 2016). Na een afschuiving van het binnentalud speelt de sterkte van het restprofiel een rol, wanneer deze reststerkte onvoldoende is zal de waterkering zijn waterkerende functie verliezen met als gevolg dat water het achterland in kan stromen. Dit mechanisme wordt geïllustreerd in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 – Illustratie van het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

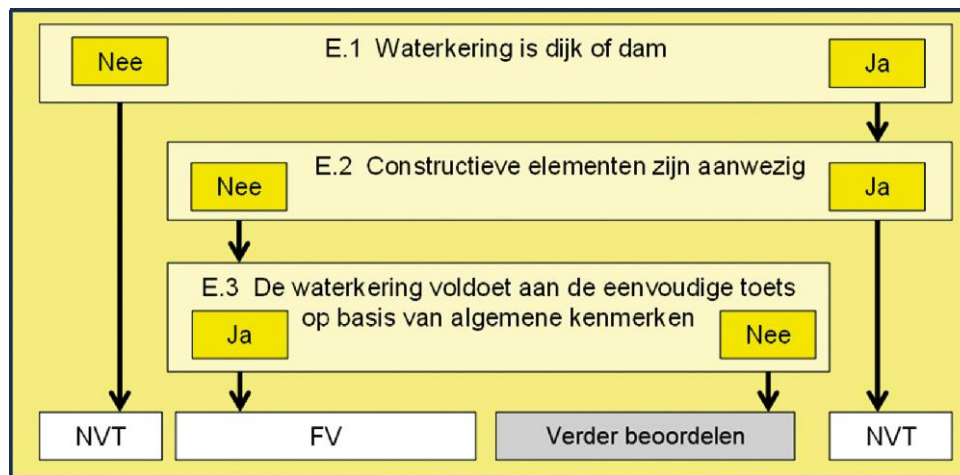
2.1.1 Toetsspoor STBI

In Bijlage III Sterkte en Veiligheid van het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016) staat beschreven hoe de macrostabiliteit binnenwaarts van waterkeringen beoordeeld dient te worden. Dit is vastgelegd in het toetsspoor STBI bestaande uit drie onderdelen: de eenvoudige toets, de gedetailleerde toets en de toets op maat.

2.1.2 Eenvoudige toets

De eenvoudige toets is opgedeeld in drie stappen (Figuur 2.2). In de eerste twee stappen wordt gecontroleerd of het type waterkering geschikt is voor het vervolg van het toetsspoor, een duin en

de aanwezigheid van constructieve elementen (ankers, nagels, damwanden etc.) in het grondlichaam zijn ongeschikt en worden getoetst door middel van andere toetssporen. In de derde stap wordt de waterkering beoordeeld op basis van de algemene kenmerken. Aan de hand van eenvoudige rekenregels wordt gekeken of het profiel van de waterkering voldoende sterkte bevat na het optreden van een afschuiving van het binnentalud. Als het restprofiel van voldoende sterkte is, voldoet de waterkering aan de eenvoudige toets en is de faalkans verwaarloosbaar. Als het restprofiel niet voldoende sterk is, dient de waterkering verder beoordeeld te worden door middel van de gedetailleerde toets op STBI.



Figuur 2.2 – Stappenschema eenvoudige toets op STBI (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

2.1.3 Gedetailleerde toets per vak

De gedetailleerde toets bestaat uit twee stappen. In de eerste stap wordt gecontroleerd of de waterkering geschikt is voor het uitvoeren van een berekening van de sterkte in een glijvlakmodel. Deze stap heeft betrekking op de aanwezigheid van constructieve elementen in het grondlichaam en wordt ook al in de eenvoudige toets behandeld. De tweede stap van de gedetailleerde toets is de analyse van de hydraulische belastingen op en de sterkte van de waterkering. De hydraulische belastingen op de waterkering kunnen worden bepaald aan de hand van Bijlage II Hydraulische belastingen en de software RisKeer van het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). De sterkte van de waterkering kan worden bepaald met behulp van glijvlakanalyses volgens de methode LiftVan. De software D-Stability, geleverd door Deltares, is door het ministerie van Infrastructuur en Milieu ter beschikking gesteld voor het uitvoeren van glijvlakanalyses volgens de methode LiftVan (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

Na de schematisering van de waterkering in D-Stability is het in staat om de binnenwaartse macrostabiliteit te beoordelen door een maatgevend glijvlak uit te rekenen met bijbehorende stabiliteitsfactor. De stabiliteitsfactor is het tegenwerkende moment gedeeld door het aandrijvende moment.

Er is een mogelijkheid voor verdere analyse van de binnenwaartse macrostabiliteit door het uitvoeren van een toets op maat.

2.2 NIET-WATERKERENDE OBJECTEN

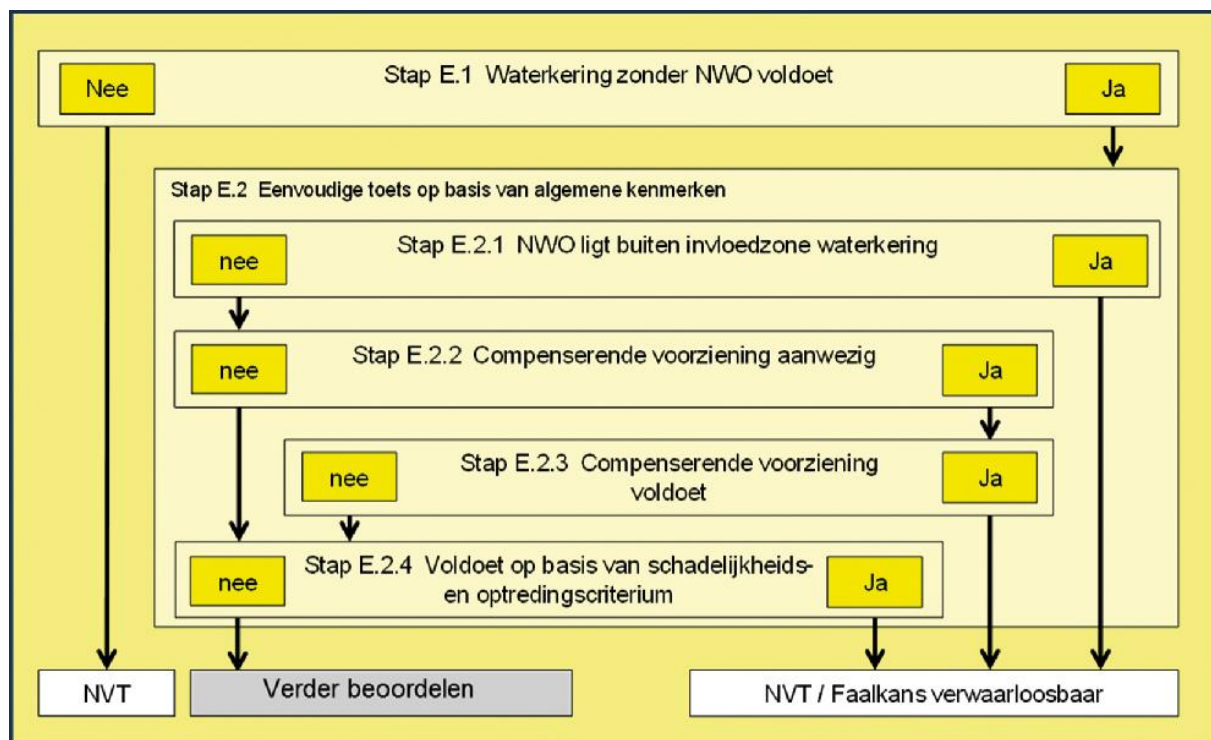
Niet-Waterkerende Objecten (NWO's) zijn onderverdeeld in de volgende objectgroepen: bebouwing, begroeiing, kabels en leidingen en overige constructies (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Een dijkwoning is onderdeel van het NWO-type bebouwing (NWObe)

2.2.1 Toetsspoor NWObe

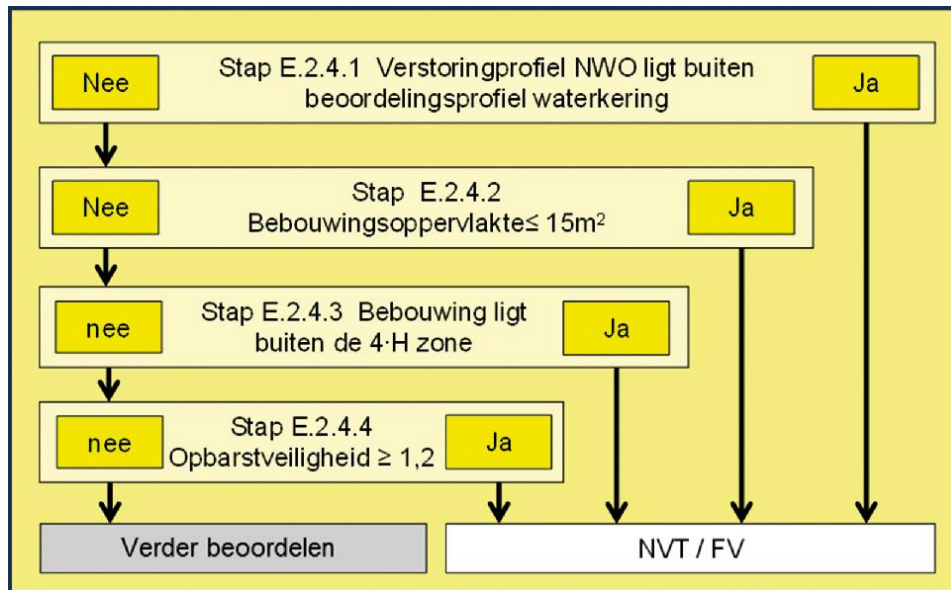
In Bijlage III Sterkte en Veiligheid van het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016) staat het toetsspoor voor het indirecte mechanisme NWO-bebouwing. Dit toetsspoor bestaat uit twee onderdelen: de eenvoudige toets en de toets op maat.

2.2.2 Eenvoudige toets

De eenvoudige toets is opgebouwd uit een aantal stappen, afhankelijk van de uitkomst van de voorgaande stap (Figuur 2.3). Allereerst wordt de stabiliteit van de waterkering beoordeeld in een situatie zonder aanwezigheid van het NWO, dit om de relevantie van de beoordeling op NWO te controleren. Indien de waterkering zonder de aanwezigheid van het NWO voldoet, kan het NWO vervolgens worden beoordeeld op basis van zijn algemene kenmerken. Relevante algemene kenmerken zijn bijvoorbeeld het verstoringprofiel ten opzichte van de invloedszone en het beoordelingsprofiel, de aanwezigheid van compenserende voorzieningen en de grootte van de bebouwingsoppervlakte. Indien het NWO niet voldoet aan de eenvoudige toets, is een verdere beoordeling nodig door middel van een toets op maat.



Figuur 2.3 – Stappenschema eenvoudige toets voor NWO's (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).



Figuur 2.4 – Stap E.2.4 van de eenvoudige toets NWObe (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

2.2.3 Toets op maat

De toets op maat is bedoeld om de invloed van een NWO per faalmechanismen te beoordelen. Het faalmechanisme in dit onderzoek is de macrostabiliteit binnenwaarts. De toets op maat is niet ontwikkeld voor NWO's, maar in het WBI wordt wel advies gegeven over hoe een NWO meegenomen zou kunnen worden in de stabiliteitsbeoordeling (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). In het geval van bebouwing kan een ontgrondingskuil als scenario worden meegenomen in de schematisering van een glijvlakmodel.

Verdere informatie over het uitvoeren van een geavanceerde analyse met betrekking tot de beoordeling van bebouwing is gegeven in *Achtergrondrapport bij de gedetailleerde toetsmethode NWO's* (Deltares, 2012) en *gedetailleerde toetsmethode NWO-bebouwing, Plan van Aanpak* (Deltares, 2014).

3 METHODOLOGIE

In de methodologie worden alle methoden beschreven die worden gebruikt om tot antwoorden op de vier onderzoeksvragen te komen. Kwalitatief onderzoek zal worden uitgevoerd voor onderzoeksvraag 1, terwijl de resultaten van onderzoeksvragen 2, 3, 4 en 5 gebaseerd zijn op kwantitatief onderzoek. Voor elke onderzoeksvraag wordt beschreven hoe de gegevens worden verzameld, welke kenmerken ze hebben en hoe ze worden geanalyseerd en toegepast. De methodologie is uitgewerkt in een schema in Figuur A.1 in Bijlage A: Methodologie schema.

3.1 INVENTARISEREN INVLOED DIJKWONING OP BINNENWAARTSE MACROSTABILITEIT VAN DE IJSSELDIJK

Onderzoeksvraag 1 is beantwoord door het uitvoeren van een literatuurstudie. Aguilar López (2016) en Jongerius (2016) hebben beide interessante literatuur over dit onderwerp onderzocht en gerapporteerd. Die onderzoeken zijn daarom doorgenomen om tot meer inzicht te komen in dit onderwerp. Ook zijn er in het verleden al meerdere technische rapporten en handreikingen gepubliceerd en beschikbaar gesteld op Helpdesk Water die veel bruikbare informatie bevatten, waaronder de Handreiking Constructief Ontwerpen (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1994) en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Veel van de informatie in deze rapporten is weliswaar verouderd, op het gebied van de invloed van dijkwoningen op de stabiliteit van dijken wordt echter in recentere rapporten vaak nog verwezen naar deze oude rapporten.

Op de bijeenkomst van de KKP van 15 oktober 2019 is kort besproken met andere waterschappen op welke manier een dijkwoning de stabiliteit van een dijk kan beïnvloeden (STOWA, 2019). De uitkomst van deze discussie heeft ervoor gezorgd dat er een meer inzicht is verkregen en aan welke effecten gedacht moet worden. Binnen het waterschap zijn er ook experts op het gebied van macrostabiliteit binnenwaarts en NWO's die om advies gevraagd zijn. Hieruit volgt dat het eigen gewicht van het gebouw en de aanwezigheid van een diepe fundering en/of een kelder twee kenmerken zijn waarmee rekening gehouden moet worden. Bovendien zijn de invloeden van deze kenmerken ook afhankelijk van hun locatie op de dijk.

3.2 VORMEN TOETSOORDEEL STBI VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE ZONDER DIJKWONING

3.2.1 Bepalen maatgevende dijkwoninglocatie

Het onderzoek begint met de pilotstabiliteitsbeoordeling van dijktraject 52-2 ter plaatse van één maatgevende dijkwoninglocatie. Het bepalen van de maatgevende dijkwoninglocatie is uitgevoerd met behulp van de GIS-software ArcGIS. In ArcGIS zijn verschillende data in verschillende stappen geanalyseerd op basis van de verkregen kennis uit onderzoeksvraag 1 en de criteria van de eenvoudige toets voor NWO-bebouwing van het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

Een eerste filter is toegepast door de binnendijkse woningen uit de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) binnen 20 meter van de teen van dijktraject 52-2 te selecteren en te exporteren als een aparte kaartlaag. 20 meter van de dijkteen is de grens van de 4*H-zone, stap E.2.4.3 uit de eenvoudige toets voor NWO-bebouwing (Figuur 2.4). Gebouwen buiten deze zone hebben een verwaarloosbare bijdrage aan de overstromingskans van de waterkering. Er is gekozen om buitendijkse woningen niet mee te nemen in de selectie, aangezien die buiten de invloedszone van

STBI vallen (stap E.2.1). Een tweede filter is toegepast door te kijken naar andere criteria uit de eenvoudige toets voor NWO-bebouwing die betrekking hebben op het toetsspoor STBI, zoals de aanwezigheid van compenserende voorzieningen (stap E.2.2) en het verstoringprofiel van de gebouwen ten opzichte van de beoordelingsprofielen voor STBI (stap E.2.4.1). Daarnaast zijn gebouwen met een bebouwingsoppervlakte kleiner dan 15 m² niet meegenomen (stap E.2.4.2), aangezien dan kan worden aangenomen dat het schuren zijn met een verwaarloosbare invloed.

Uit het tweede filter kwamen 42 dijkwoningen en die zijn vervolgens apart geanalyseerd door het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) als basiskaart te gebruiken. De oppervlakte van de woning, het bouwjaar, de afstand tot de kruinlijn en de hoogte en breedte van de kruin speelde hierin een rol. Hoe groter het oppervlak, hoe ouder de woning, hoe kleiner de afstand tot de kruinlijn en hoe smaller en lager de kruin worden aangemerkt als maatgevend. Ook is er rekening gehouden met dimensies van de omliggende dijkvakken aangezien het optreden van binnenwaartse macro-instabiliteit een 3D-effect is (Jongorius, 2016).

Op basis van de criteria is er een selectie van 22 dijkwoningen gemaakt binnen de 42 dijkwoningen. Deze geselecteerde dijkwoningen zijn daarna vergeleken door middel van een geotechnische kaart op de aanwezigheid van een kelder en de eventuele diepte van deze kelder ten opzichte van NAP. Aan de hand van deze aanvullende informatie is vervolgens een tweede en beperkte selectie gemaakt van dijkwoningen bestaande uit acht potentieel maatgevende locaties, zie Figuur F.1. De relevante gegevens van de dijkwoningen staan weergegeven in Tabel D.1 in Bijlage D.1.



Figuur 3.1 – Overzichtskaart acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties.

Deze acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties zijn staan weergegeven op de bijbehorende AHN-kaart in Figuur D.1 en met visuele impressies door middel van Google Street View in Figuur D.2 (zie Bijlage D.1)

Van deze acht dijkwoninglocaties is meer gedetailleerde informatie geanalyseerd met betrekking tot het dijkprofiel. Waar tot dusver alle informatie van de dijk gebaseerd is op interpretaties van de AHN-basiskaart, zijn nu de op basis van het AHN gegenereerde aanliggende dwarsprofielen van de dijkwoninglocaties in Figuur D.3 geploteerd en geanalyseerd. Door middel van het meetinstrument in ArcGIS is achtereenvolgend het hoogteverschil tussen de kruin en het achterland (verval), de breedte van de kruin en de hoogte van de kruin gemeten. Dit zijn drie belangrijke kenmerken van de geometrie van de dijk die de gevoeligheid voor een afschuiving van het binnentalud bepalen. Verder zijn de aanwezigheid van bermen, sloten en watergangen bekeken. De binnentaludhellingen tussen de dwarsprofielen zijn visueel vergeleken. De resultaten van deze metingen staan genoteerd in

Tabel D.2. Op basis van zowel de kenmerken van de dijkwoningen als van de dijklichamen is vervolgens een maatgevende dijkwoninglocatie gekozen: IJsseldijk 45.

3.2.2 Bepalen definitieve dwarsprofiel voor de nulsituatie

Na het bepalen van de maatgevende dijkwoninglocatie is er gedetailleerder gekeken naar de dwarsprofielen ter plaatse van dijkwoning IJsseldijk 45. Er zijn namelijk twee dwarsprofielen die dicht langs de dijkwoning zijn gegenereerd, met aan de zuidzijde dwarsprofiel 52-2_0195 en aan de noordzijde dwarsprofiel 52-2_0195+2 (Figuur D.4). Deze twee dwarsprofielen zijn vervolgens in een grafiek naast elkaar geplott om een indruk te krijgen van de verschillen tussen deze twee, dwarsprofiel 52-2_0195 heeft een breder en hoger dijklichaam dan dwarsprofiel 52-2_0195+2.

Voor de berekening van de nulsituatie worden beide dwarsprofielen gebruikt om inzicht te krijgen in het effect van het verschil in geometrie en omdat niet met zekerheid is vast te stellen hoe het dwarsprofiel onder de woning verloopt.

3.2.3 Uitvoeren gedetailleerde toets STBI

Voor de maatgevende dijkwoninglocatie is vervolgens de semi-probabilistische gedetailleerde toets op macrostabiliteit binnenwaarts uitgevoerd, in lijn met Bijlage III Sterkte en Veiligheid van het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). De maatgevende dijkwoning IJsseldijk 45 is hierin buiten beschouwing gelaten. De glijvlakanalyses zijn uitgevoerd in D-Stability (versie 20.1.1) volgens de methode LiftVan.

3.2.3.1 Schematisering in D-Stability

Het schematiseren van de dijk in D-Stability is uitgevoerd met behulp van de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Hierbij zijn de volgende gegevens nodig: de geometrie van het voorland, de dijk en het achterland; de laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam; de grondeigenschappen en de hydraulische belastingen. De geometrie van de profiellijnen 52-2_0195 en 52-2_0195+2 is door middel van de x- en z-coördinaten ingeladen in D-Stability.

Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam

De laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam is in kaart gebracht door sonderingen en boringen uit het geologische archief van waterschap Vallei en Veluwe en recente boringen van 15 oktober 2019 die zijn uitgevoerd door Fugro ter hoogte van de locatie (zie Bijlage B: Sonderingen en boringen). Verder zijn zandbanenkaarten gebruikt om een algehele indruk te krijgen van de ondergrondopbouw (Provincie Gelderland, 2019).

Grondeigenschappen

Iedere grondlaag heeft zijn specifieke kenmerken met betrekking tot het grondgedrag en de sterkte-eigenschappen. Een grondlaag kan zowel ongedraineerd als gedraineerd reageren. Ongedraineerd grondgedrag tijdens vervormingen doet zich voor bij ondoorlatende grondlagen (klei en veen) en voor goed doorlatende grondlagen (zand) dient er gerekend te worden met gedraineerde sterkte-eigenschappen, conform het WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

Voor de sterkte-eigenschappen van de grondlagen zijn de waarden verkregen uit de Voorlopige Rapportage Macrostabiliteit voor dijktraject 52-2 van waterschap Vallei en Veluwe (Rookus, 2019). In dit rapport zijn de waarden bepaald aan de hand van standaardwaarden uit de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016) en op basis van de NEN 9997-1 (NEN, 2017) en laboratoriumonderzoek (Grontmij, 2004).

Hydraulische belastingen

De hydraulische belastingen zijn verkregen uit het ArcGIS-database van waterschap Vallei en Veluwe. Deze hydraulische belastingen zijn afgeleid in RisKeer met een bijbehorende database van het WBI 2017, gebaseerd op waterstanden, windgolven en stroming uit het bovenriviereengebied (Rookus, 2019). Voor de gedetailleerde toets op binnenwaartse macrostabiliteit is de waterstand bij de norm van toepassing. Dit is de waterstand met een overschrijdingsfrequentie die getalsmatig gelijk is aan de norm van het dijktraject. De norm van het dijktraject is uitgedrukt in de signaleringswaarde¹ en de ondergrens².

D-Stability heeft de functie om met bouwfasen te werken. Bouwfasen zijn opeenvolgende momenten in tijd. Hierdoor wordt het mogelijk om de grensspanning tijdens hoogwater te bepalen door historische spanningen mee te nemen³. Er is gewerkt met twee bouwfasen: normale omstandigheden en enkele weken hoogwater. Bij het bovenriviereengebied waarin de IJssel zich bevindt worden hoge waterstanden veroorzaakt door hoge rivierafvoeren, dus het is aannemelijk dat een hoogwater enkele weken kan duren.

Het waterspanningsverloop bestaat uit de freatische lijn en de stijghoogtelijn van de watervoerende zandlaag. Het verloop van deze waterspanningen is geschematiseerd met behulp van Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004) en gecontroleerd met soortgelijke locaties uit dijktraject 52-1 die reeds zijn uitgevoerd door het waterschap met behulp van de Waternet Creator in RisKeer. D-Stability heeft de functie 'profiel inspector' waarmee onder andere het verloop van de waterspanningen over de diepte geïnspecteerd kunnen worden (Van der Meij, 2019). De profile inspector is gebruikt om het waterspanningsverloop te controleren op onrealistische gevallen.

3.2.3.2 Berekening in D-Stability

Na de schematisering in D-Stability is er begonnen met het berekenen van de binnenwaartse stabiliteit, hiervoor dient echter eerst de faaldefinitie te worden opgesteld.

Faaldefinitie

Voor het bepalen van de maatgevende glijcirkel zijn er een aantal restricties opgelegd. Alleen glijvlakken door de kruin worden als bepalend voor de faalkans geacht, niet elke afschuiving zal namelijk tot een overstroming leiden. In D-Stability is een zonering aangebracht door het intredepunt van de glijcirkel op te leggen tussen de binnen- en buitenkruinlijn van het bestaande dwarsprofiel. Glijvlakken buiten deze zone zouden ook maatgevend kunnen zijn als er sprake is van significante overslag ($> 1 \text{ l/m/s}$) in het geval van zanddijken, deze zijn namelijk gevoelig voor erosie. Het overslagdebiet kan verkregen worden uit het toetspoor Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB). Deze bedraagt $0,01 \text{ l/m/s}$ ter plaatse van de dijkwoninglocatie en is daardoor verwaarloosbaar klein.

Daarnaast speelt ook de diepte waarmee de glijcirkel in het dijklichaam snijdt een rol bij de invloed op de faalkans. De minimale glijvlakdiepte is afhankelijk van de geometrie van de dijk (grootte van het restprofiel), de waterstand bij de norm, het overslagdebiet en de erosiebestendigheid van het dijk materiaal en is gesteld op 1,0 meter.

¹ Signaleringswaarde = Overstromingskans van het dijktraject waarvan overschrijding gemeld moet worden aan de Minister van Infrastructuur en Milieu (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

² Ondergrens = Overstromingskans van het dijktraject die hoort bij het minimale beschermingsniveau dat de kering moet bieden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

³ De grensspanning wordt bepaald door de in situ effectieve spanning onder normale omstandigheden te verhogen met de ingevoerde standaardwaarde voor de POP (Van der Meij, 2019).

Faalkans per doorsnede

In D-Stability is door middel van een deterministische berekening met de rekenwaarden een maatgevende glijcirkel met bijbehorende stabiliteitsfactor berekend. Deze maatgevende glijcirkel kan in een nieuwe bouwfase worden geïmporteerd voor een semi-probabilistische berekening. Voor de semi-probabilistische berekening zijn een aantal grondeigenschappen gebruikt als stochastische variabele conform de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Verdere toelichting op de stochastische variabelen is te vinden in Bijlage D.4.1.3.

Vervolgens is de stabiliteitsfactor gecorrigeerd met een modelfactor. De modelfactor voor glijvlakanalyses volgens de methode LiftVan is 1,06 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Aan de hand van de gecorrigeerde stabiliteitsfactor en de maatgevende glijcirkel rekt D-Stability door middel van een FORM⁴-analyse een voorwaardelijke faalkans per doorsnede uit, gegeven de constante waterstand bij de norm. Het product van de voorwaardelijke faalkans en de kans op de waterstand bij de norm geeft de faalkans per doorsnede. De betrouwbaarheidsindex is naast de voorwaardelijke faalkans nog een maat voor veiligheid die door D-Stability wordt berekend.

3.2.3.3 Toetsoordeel STBI

Om een toetsoordeel te vellen over binnenwaartse macrostabiliteit kan gekeken worden binnen welke begrenzing de berekende faalkans per doorsnede valt, zodat aan deze faalkans een categorie toegekend kan worden. De begrenzing van de categorieën kan worden berekend met de faalkanseis per doorsnede ($P_{eis,dsn}$) en de signaleringswaarde en ondergrens van het dijktraject, volgens de formules uit Tabel 3.1. De signaleringswaarde en de ondergrens staan weergegeven in Tabel D.3, en met de andere gegevens uit deze tabel is met behulp van formule (1) de faalkanseis per doorsnede berekend. De begrenzing van de categorieën staan weergegeven in Tabel D.5. In Bijlage D.4.2 staat aanvullende informatie over het toetsoordeel over binnenwaartse macrostabiliteit.

Tabel 3.1 – Berekening van de begrenzing per categorie (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

Categorie	Beschrijving	Begrenzing categorie [1/jaar]
I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f,dsn} < 1/30 * P_{eis,sig,dsn}$
II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde	$1/30 * P_{eis,sig,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,sig,dsn}$
III _v	Voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	$P_{eis,sig,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,ond,dsn}$
IV _v	Voldoet mogelijk aan de ondergrens en/of aan de signaleringswaarde	$P_{eis,ond,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,ond}$
V _v	Voldoet niet aan de ondergrens	$P_{eis,ond} < P_{f,dsn} < 30 * P_{eis,ond}$
VI _v	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f,dsn} > 30 * P_{eis,ond}$

Waarin:

- $P_{f,dsn}$ Faalkans per doorsnede [1/jaar];
- $P_{eis,sig}$ Signaleringswaarde van het dijktraject [1/jaar];
- $P_{eis,ond}$ Ondergrens van het dijktraject [1/jaar];
- $P_{eis,sig,dsn}$ Faalkanseis per doorsnede bij de signaleringswaarde [1/jaar];
- $P_{eis,ond,dsn}$ Faalkanseis per doorsnede bij de ondergrens [1/jaar].

⁴ FORM = First Order Reliability Method, is een semi-probabilistische betrouwbaarheidsanalyse (Van der Meij, 2019).

3.3 VORMEN TOETSOORDEEL STBI VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE MET DIJKWONING

Na het vellen van een toetsoordeel in onderzoeksvraag 2, is de stabiliteitsbeoordeling vervolgd met het in acht nemen van de dijkwoning. De toets op maat voor NWObe is uitgevoerd door het implementeren van de dijkwoning in de gedetailleerde toets op STBI. D-Stability heeft geen functie voor het toevoegen van bebouwing in het glijvlakmodel. Daarom is de invloed van de dijkwoning nagebootst met behulp van andere functies in D-Stability.

3.3.1 Schematisering in D-Stability

Het schematiseren van de maatgevende dijkwoning IJsseldijk 45 is uitgevoerd in het bestaande D-Stability model van beide dwarsprofielen uit onderzoeksvraag 2. De invloed van de dijkwoning op de binnenwaartse macrostabiliteit is voor twee situaties onderzocht: de aanwezigheid van de dijkwoning en een scenario waarin de dijkwoning gefaald is. Het bepalen van de kans op falen van de dijkwoning is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten en daarom is er een conservatief scenario meegenomen waarin de dijkwoning gefaald is.

3.3.1.1 Invloed aanwezigheid dijkwoning

Bij de aanwezigheid van de dijkwoning wordt de invloed geschematiseerd door de bestaande geometrie van de woning en de permanente belasting als gevolg van het eigengewicht te implementeren.

Geometrie

Aangezien D-Stability een tweedimensionaal model is, zijn alleen de lengte van de dijkwoning evenwijdig aan het dwarsprofiel en de kelderdiepte van belang bij de schematisering van de geometrie. De lengte van de dijkwoning is verkregen uit bouwtekeningen die zijn opgevraagd bij de bewoners van IJsseldijk 45. De kelderdiepte is bepaald aan de hand van de geotechnische tekening en bouwtekeningen in Bijlage C en staat verder toegelicht in Bijlage E.1.1.2. De locatie van de dijkwoning op het dijklichaam is door middel van ArcGIS gemeten. De geometrie van de dijkwoning is geschematiseerd in beide dwarsprofielen, omdat niet met zekerheid vast te stellen is hoe dijk onder de woning verloopt en er een groot verschil zit in de faalkans van beide profielen.

Eigengewicht dijkwoning

Het eigengewicht van de dijkwoning is als een uniforme belasting op de onderkant van de fundering geschematiseerd. Het eigengewicht van de dijkwoning is niet bekend, daarom zijn er aannames gemaakt om de grootte van de uniforme belasting te bepalen. Het eigengewicht van de dijkwoning is verkregen uit (Jongerius, 2016), gebaseerd op een groot woonhuis waarbij het gewicht van de muren, het dak, de vloeren, de fundering en variabele belasting is meegenomen. Daarnaast staat er in NWO bebouwing op regionale keringen (Witteveen+Bos, 2014) ook een vuistregel over het gewicht van bebouwing op een dijklichaam. De gewichten uit beide bronnen zijn vergeleken, maar uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat er een verwaarloosbaar verschil is (zie Bijlage E.1.1.1).

Voldoende sterke constructieve elementen

Uitgaande dat de dijkwoning niet faalt, wordt ook aangenomen dat geen van haar constructieve elementen faalt. De keldermuur en fundering in het dijklichaam blijven daarbij intact. Om uit te sluiten dat de maatgevende glijcirkel hierdoorheen snijdt, is er een 'verboden line' geschematiseerd over de keldermuur en de fundering. De verboden line is een functie in D-Stability die voorkomt dat glijcirkels deze lijn snijden.

3.3.1.2 Invloed gefaalde dijkwoning

In de situatie met gefaalde dijkwoning wordt ervan uitgegaan dat de woning en al haar constructieve elementen gefaald zijn en er nog geen verstoring van de geometrie heeft

plaatsgevonden. De geometrie van de dijk is dus hetzelfde als voor de situatie met de aanwezigheid van dijkwoning. Uitgaande van een bezweken kelder muur of vloer, zijn er geen 'forbidden lines' getekend waardoor er kleine afschuivingen kunnen optreden die de achterliggende ruimte vullen met grond. Hierdoor kan de geometrie van de dijk nadelig veranderen en de eventuele positieve bijdrage van de constructieve elementen aan de stabiliteit wordt opgeheven. De eventuele kleine afschuivingen door het wegvallen van de 'forbidden lines' zijn bepaald met D-Stability. Er wordt van uitgegaan dat de grond van deze afschuiving verdwijnt, omdat onzeker is hoe de grond precies komt te liggen en niet kan worden aangenomen dat deze grond ook dezelfde sterkte zal hebben als voorheen. De grond is namelijk niet verdicht.

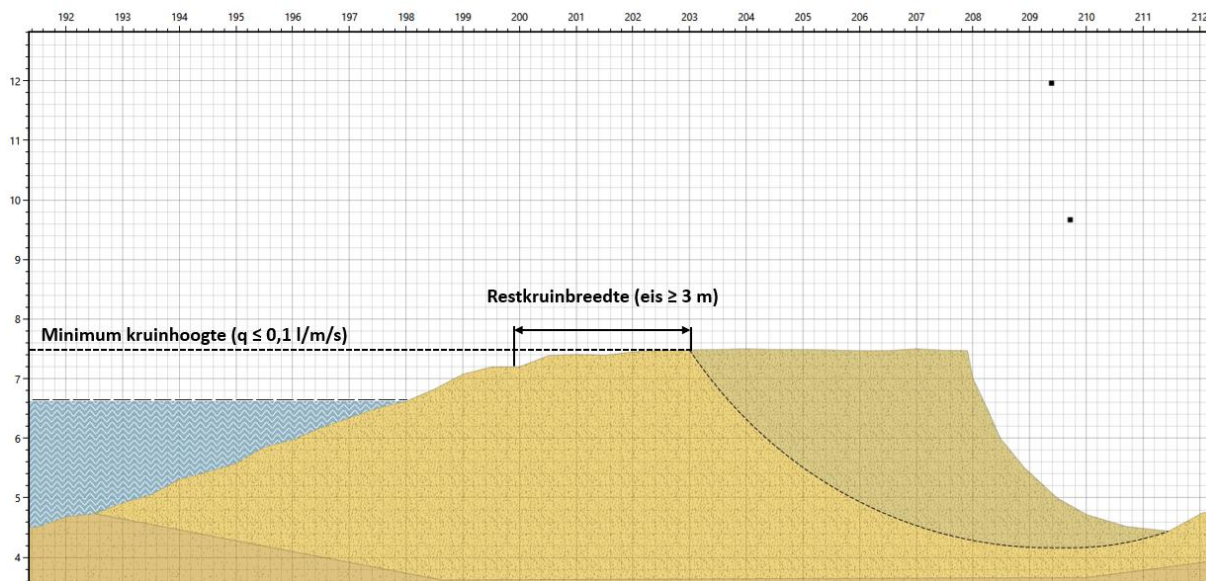
Er wordt aangenomen dat de invloed van belasting als gevolg van het eigengewicht van de woning hetzelfde is als bij het niet falen van de dijkwoning omdat de kelder en vloer gevuld worden met puin.

3.3.2 Berekening in D-Stability

3.3.2.1 Faaldefinitie

De faaldefinitie is voor de aanwezigheid van de dijkwoning hetzelfde als voor de nulsituatie. Voor het scenario met gefaalde dijkwoning is er echter een andere faaldefinitie opgesteld. De zonering voor het intredepunt van de glijcirkel is eerst op de kruin gelegd. Vervolgens vindt er een primaire afschuiving plaats, de vorm van de glijcirkel is echter klein en er wordt van uitgegaan dat deze glijcirkel niet zal leiden tot het falen van de dijk. Het kan het optreden van een eventuele secundaire afschuiving wel versterken.

Na de primaire glijcirkel met een stabiliteitsfactor kleiner dan 1,0 is er een ontgroning geschematiseerd, waarna de zonering voor het intredepunt van de secundaire glijcirkel is gelegd op 3 meter vanaf de buitenkruinlijn (Figuur 3.2). 3 meter is de minimaal benodigde (rest)kruinbreedte voor rivierdijken, waarbij de eis is dat de stabiliteitsfactor minimaal gelijk of groter moet zijn dan de vereiste stabiliteitsfactor. Deze eis is afkomstig uit de 'Restbreedte-bij-Overhoogte'-methode van het Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken (TRAS) (Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2009). De vereiste stabiliteitsfactor is berekend in Bijlage E.1.2 en heeft bij de signaleringswaarde een waarde van 1,20. Als de secundaire glijcirkel door de minimaal benodigde kruinbreedte van 3 meter snijdt en de bijbehorende stabiliteitsfactor is kleiner dan de vereiste stabiliteitsfactor, dan is uitgegaan van het verliezen van het waterkerend vermogen van de dijk. De minimaal benodigde kruinbreedte is van toepassing bij een minimum vereiste kruinhoogte die hoort bij een overslagdebiet van 0,1 l/m/s.



Figuur 3.2 – Zonering van de 'Restbreedte-bij-Overhoogte'-methode uit het TRAS.

3.3.2.2 Faalkans per doorsnede

De faalkans per doorsnede is voor de situatie met dijkwoning op dezelfde manier berekend. In het scenario met gefaalde dijkwoning is de faalkans per doorsnede echter berekend met de maatgevende glijcirkel van de secundaire afschuiving. De primaire afschuiving heeft namelijk een voorwaardelijke faalkans van 1 jaar^{-1} , en dus een faalkans die gelijk is aan de kans op de waterstand bij de norm.

3.3.3 Toetsoordeel STBI

Voor het toetsoordeel van de situatie met dijkwoning is dezelfde methode gebruikt als bij Onderzoeksvraag 2, zie 3.2.3.3.

In het geval van secundaire afschuivingen bij de gefaalde dijkwoning kan de vereiste stabiliteitsfactor ook worden gebruikt om een oordeel te vellen over de binnenwaartse macrostabiliteit. De vereiste stabiliteitsfactor is het product van de partiële veiligheidsfactoren. De partiële veiligheidsfactoren zijn de schematiseringsfactor, de modelfactor, de materiaalfactor en de schadefactor. De schadefactor is gekoppeld aan de faalkanseis, maar zal meestal niet worden toegepast voor semi-probabilistische berekeningen omdat de binnenwaartse macrostabiliteit vaak moet voldoen aan een faalkanseis (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

Het berekenen van de vereiste stabiliteitsfactor en de partiële veiligheidsfactoren is uitgevoerd in Bijlage E.1.2 door middel van de formules (2), (3) en (4).

3.4 BEPALEN INVLOED VAN VARIATIES IN EIGENSCHAPPEN OP DE STABILITEITSFACTOR

Om tot het antwoord op onderzoeksvraag 4 te komen is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In de gevoeligheidsanalyse wordt gekeken wat de invloed is van variaties in eigenschappen van zowel de dijkwoning als het dijklichaam en de ondergrond op de uitkomst van het glijvlakmodel. De uitkomst van het glijvlakmodel is uitgedrukt in een stabiliteitsfactor in plaats van een voorwaardelijke faalkans om snel inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de binnenwaartse macrostabiliteit.

In het geval van variaties in eigenschappen met betrekking tot de dijkwoning is gekeken naar twee situaties: aanwezigheid van de dijkwoning en gefaalde dijkwoning. Bij variaties in eigenschappen die

betrekking hebben op het dijklichaam en de ondergrond is ook gekeken naar de nulsituatie om zo de invloed van de dijkwoning in kaart te brengen. In de gevoeligheidsanalyse wordt elke keer één eigenschap gevarieerd zodat de verandering in de stabiliteitsfactor aan deze eigenschap kan worden toegeschreven

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor het dwarsprofiel 52-2_0195, de geometrie van dit dwarsprofiel komt in de nulsituatie meer overeen met de situatie inclusief dijkwoning. Voor het andere dwarsprofiel, 52-2_0195+2, is in de situatie met dijkwoning veel grond aangevuld waardoor dit geen realistische afspiegeling is van de invloed van de dijkwoning. In overleg met experts binnen het waterschap is ervoor gekozen om de volgende eigenschappen in de gevoeligheidsanalyse te variëren: de uniforme belasting, het dijkmateriaal, de ondergrondopbouw en de kenmerken van een dijkwoning. Het enige dat in de gevoeligheidsanalyse constant is gebleven is de geometrie van de dijk, het veranderen van de geometrie is in D-Stability namelijk een tijdrovend proces. De eigenschappen zijn gevarieerd met mogelijk maatgevende eigenschappen die bij andere dijkwoninglocaties van dijktraject 52-2 voorkomen.

3.4.1 Schematisering

3.4.1.1 Uniforme belasting

Voor de grootte van uniforme belasting is een aanname gemaakt van 13 kN/m². Om meer inzicht te krijgen in de invloed in variatie van de uniforme belasting is voor de volledigheid de waarde gevarieerd tussen de 0 kN/m² en de 50 kN/m², met intervallen van 3 kN/m². Bij waarden waar de stabiliteitsfactor een sprong maakt zijn kleinere intervallen gekozen.

De dijkwoning is een oude boerderij met een voorhuis en een achterhuis, dus het is aannemelijk dat het voorhuis zwaarder weegt dan het achterhuis omdat er meer muren per oppervlakte aanwezig zijn en het dak bestaat uit dakpannen in tegenstelling tot een rieten dak op het achterhuis. De verdeling van de uniforme belasting tussen het voorhuis en achterhuis is gevarieerd op basis van percentages van het voorhuis ten opzichte van het achterhuis.

3.4.1.2 Dijkmateriaal en ondergrondopbouw

De eigenschappen van de verschillende grondsoorten is op dezelfde manier verkregen als voor de maatgevende dijkwoninglocatie in 3.2.3.1. Het verloop van de freatische lijn en stijghoogtelijn is geschematiseerd op basis van Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004) en vergeleken met vergelijkbare situaties uit dijktraject 52-1 die reeds zijn uitgevoerd door het waterschap in RisKeer, dit geldt voor alle variaties in de opbouw van het dijklichaam en de ondergrond.

3.4.1.3 Kenmerken van een dijkwoning

Over de kelderdieptes ten opzichte van het dijklichaam is voor de dijkwoningen van dijktraject 52-2 niet snel inzicht in te krijgen. Bij de aanwezigheid van een kelder zijn in geotechnische tekeningen vaak wel de keldervloerhoogtes gegeven ten opzichte van NAP. Doordat de dijkwoningen verspreid liggen over het hele dijktraject en de hoogtes van het maaiveld daarbij ook verschillen, zijn de keldervloerhoogtes niet direct een goede vergelijking voor de kelderdieptes. De kelderdieptes worden aangeduid door de keldervloerhoogtes te vergelijken met een vast referentiepunt, de bijbehorende kruinhoogte. De dikte van de keldervloer is meegenomen in de kelderdiepte, omdat de onderkant van de keldervloer in D-Stability wordt geschematiseerd. Over de keldervloerdiktes is niks bekend, daarom worden dezelfde diktes aangehouden als voor dijkwoning IJsseldijk 45.

3.5 VERTALEN VAN PILOTSTABILITEITSBEOORDELING NAAR EENVOUDIG TOEPASBARE METHODE

Waterschap Vallei en Veluwe is verantwoordelijk voor de beoordeling van zijn primaire waterkeringen. De Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) houdt toezicht op dit proces, controleert op naleving en rapporteert dit aan het einde van de beoordelingsronde (2023) aan de minister van Infrastructuur en Waterstaat (Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2016). Om ervoor te zorgen dat de ILT de beoordeling goedkeurt, is een goed onderbouwde methode voor de beoordeling van de stabiliteit van dijkwoningen een vereiste.

Om op basis van de pilotstabiliteitsbeoordeling een eenvoudig toepasbare methode te ontwikkelen die het mogelijk maakt om de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen te beoordelen, zijn eerst alle resultaten van de gevoeligheidsanalyse in een Excel-werkblad uitvoerig geanalyseerd. Door de gevoeligheidsanalyse is de onzekerheid in de uitkomst toegeschreven aan de onzekerheid in de eigenschappen, en waar nodig geoptimaliseerd. Ook zijn alle mogelijk maatgevende eigenschappen van dijkwoninglocaties binnen dijktraject 52-2 gevarieerd binnen de bestaande geometrie van de maatgevende dijkwoninglocatie. Hiermee is getracht om de betrouwbaarheid van de methode deels te onderbouwen. De betrouwbaarheid van de methode betreft de toepasbaarheid op andere dijkwoningen.

Uit de uitgebreide gevoeligheidsanalyse is gebleken dat in vrijwel alle gevallen de faalkans van de maatgevende dijkwoninglocatie verwaarloosbaar klein is. Op basis van de gevallen waarbij de dijkwoning wel tot potentieel risico op falen van de dijk heeft geleid, is kritisch geanalyseerd welke methode tot dusver is gebruikt en bij welke voorwaarden het resultaat toepasbaar is op andere dijkwoninglocaties. Vervolgens zijn er toepassingsvoorwaarden opgesteld waarvoor het toetsoordeel (= voldoet aan de faalkanseis) van de maatgevende dijkwoninglocatie ook geldt voor andere dijkwoninglocaties. Voldoet een dijkwoninglocatie binnen dijktraject 52-2 niet aan de toepassingsvoorwaarden, dan is er gekeken hoe de stabiliteit beoordeeld op deze locatie beoordeeld kan worden.

Bij het ontwikkelen van de methode is van grof naar fijn gewerkt, van alle dijkwoninglocaties is er een maatgevende dijkwoninglocatie gekozen. Op basis van de resultaten van deze maatgevende dijkwoninglocatie zijn criteria gedefinieerd die meerdere dijkwoninglocaties kunnen beoordelen op stabiliteit. De methode zorgt er dus voor dat er weer van fijn naar grof gewerkt kan worden. Door het kiezen van een maatgevende dijkwoninglocatie wordt getracht om zoveel mogelijk dijkwoningen goed te keuren, waardoor minder aanvullende berekeningen nodig zijn voor dijkwoninglocaties die niet goedgekeurd kunnen worden.

Om alles overzichtelijk weer te geven is er een flowchart gemaakt (Figuur 4.18) en is er een samenvatting gemaakt van de doorlopen methodiek vanaf het begin van het onderzoek tot aan het eind (zie Bijlage H).

4 RESULTATEN

4.1 INVLOED VAN EEN DIJKWONING OP DE BINNENWAARTSE MACROSTABILITEIT VAN DE IJSSELDIJK

De binnenwaartse macrostabiliteit is onder andere afhankelijk van de horizontale locatie van de dijkwoning ten opzichte van het dijklichaam. Zo is de invloed verwaarloosbaar wanneer de dijkwoning zich bevindt in het voorland of op het buitentalud (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Dijkwoningen op de kruin, het binnentalud en in het achterland zijn daarom wel relevant voor dit onderzoek.

De invloeden van een dijkwoning op de binnenwaartse macrostabiliteit zullen eerst beschreven worden in een situatie waarbij de dijkwoning niet faalt, dus alleen de invloed van de aanwezigheid van de dijkwoning. Daarna in een situatie waarbij het falen (instorten, bezwijken) van een dijkwoning als scenario wordt meegenomen.

4.1.1 Invloed aanwezigheid dijkwoning op de binnenwaartse macrostabiliteit

Een manier waarbij de aanwezigheid van een dijkwoning invloed kan hebben op de macrostabiliteit binnenwaarts is door het optreden van extra belastingen op het dijklichaam. Er is weinig bekend van deze belastingen en dijklichamen zijn meestal niet op deze belastingen ontworpen of gecontroleerd (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1994). Extra belasting als gevolg van het eigengewicht is een permanente belasting waarvan de invloed afhankelijk is van de positie van de woning ten opzichte van het maatgevende glijvlak. Bevindt de dijkwoning zich in het actieve deel van een glijvlak, dan kan de extra belasting zorgen voor het versterken van het aandrijvende moment en heeft dus een negatieve invloed op de binnenwaartse stabiliteit. Op het passieve deel heeft de dijkwoning in principe geen negatieve invloed op de stabiliteit, het kan daarentegen juist wel het tegenwerkende moment versterken. Het actieve deel van een glijvlak is meestal de kruin en de hoger gelegen delen van het binnentalud, terwijl het passieve deel een stuk achterland en lager gelegen delen van het binnentalud omvat. Extra belasting als gevolg van wind is een veranderlijke belasting die ook een rol kan spelen bij het beïnvloeden van de stabiliteit door de aanwezigheid van een dijkwoning.

De invloed op de binnenwaartse macrostabiliteit als gevolg van de extra belasting is echter alleen van toepassing zodra de dijkwoning is gefundeerd op staal. Bij een dijkwoning die op palen is gefundeerd worden de extra belastingen namelijk naar dieper gelegen draagkrachtige grondlagen overgedragen. Daarnaast kunnen de funderingspalen de glijcirkel snijden waardoor deze juist een positieve bijdrage zouden kunnen hebben door het verhogen van de schuifweerstand. In de Handreiking Constructief Ontwerpen (HCO) staat echter ook dat funderingspalen nadelige gevolgen zouden kunnen hebben door het perforeren van aanwezige afsluitende grondlagen (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1994). Hierdoor kan het grondwaterloop worden beïnvloed. Deze funderingswijze wordt toegepast bij gebieden met moeras-, klei- of veengrond. In het gebied rond de IJsseldijk is de fundering op staal echter de meest gebruikte methode (De Vree, 2019).

Niet alleen funderingspalen kunnen door middel van het snijden van een potentieel maatgevend glijvlak een positieve bijdrage leveren aan de binnenwaartse macrostabiliteit. Ook constructieve elementen van dijkwoningen, zoals een kelder- of funderingsmuur, kunnen bij een potentieel ondiep glijvlak dienen als blokkade (Jongorius, 2016).

In de HCO staat onder meer dat de aanwezigheid van een dijkwoning in het dijklichaam ook de freatische lijn binnen het grondlichaam zowel kan verhogen als kan verlagen (Technische

Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1994). Bij hoge waterstanden kan een dijkwoning hoog op het buitentalud of langs de buitenkruin de freatische grondwaterstand verhogen wanneer lekwegen langs de funderingen en kelderwanden van de dijkwoning optreden. Ook bij hevige neerslag zou door slechte afwatering bij dijkwoningen water het grondlichaam in kunnen trekken. Ter plaatse van dijkwoningen kan echter ook door verstening de neerslag meer worden afgevoerd, waardoor het water minder kans heeft om in het dijklichaam te infiltreren. De verhoging van de freatische lijn heeft als gevolg dat de schuifweerstand van de grond zal afnemen. Dit kan het optreden van een eventuele afschuiving versterken met het falen van de waterkerende functie van de dijk als mogelijk gevolg. De diepteligging van de fundering of kelder in het dijklichaam speelt hierin een belangrijke rol.

4.1.2 Invloed falen dijkwoning op de binnenwaartse macrostabiliteit

Het falen van een dijkwoning zou tijdens twee verschillende scenario's kunnen optreden. Een dijkwoning kan falen als gevolg van een hoogwater doordat bijvoorbeeld de waterspanningen in het dijklichaam tijdelijk verhoogd zijn. Een dijkwoning kan ook falen als gevolg van externe factoren, zoals een aardbeving of bouwwerkzaamheden. In het tweede geval is de invloed op de binnenwaartse macrostabiliteit verwaarloosbaar in vergelijking met het eerste geval. De kans op een hoogwater binnen afzienbare tijd na het falen van de dijkwoning is namelijk verwaarloosbaar klein, aangezien het falen van de dijkwoning en het optreden van hoogwater niet gecorreleerd zijn. Hierdoor is er voldoende tijd voor detectie en herstelwerkzaamheden mocht de dijkwoning falen. Het falen van een dijkwoning als gevolg van externe factoren zal daarom buiten beschouwing gelaten worden in dit onderzoek.

De kans op falen van een dijkwoning als gevolg van een hoogwater is afhankelijk van veel factoren en is niet met zekerheid vast te stellen, daarom zal dit buiten beschouwing gelaten worden. Aangezien de faalkans van de dijkwoning niet wordt bepaald, moet ervan uitgegaan worden dat de woning gefaald is. Dit is een conservatieve aanpak, omdat de faalkans van een dijkwoning vaak als verwaarloosbaar wordt aangenomen. Dit is in de volgende situatie het geval:

- Als een dijkwoning aan het Bouwbesluit voldoet wordt aangenomen dat deze voldoende constructieve sterkte heeft. Dit geldt voor gebouwen die na 1992 gebouwd zijn, dit is het jaar dat het Bouwbesluit in werking trad (Bossenbroek, 2019).

Het falen van een dijkwoning kan op meerdere manieren invloed hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit van een dijk. Allereerst is het van belang dat de belasting als gevolg van het eigengewicht van de dijkwoning niet zal verdwijnen nadat de dijkwoning is bezweken. Het gewicht van het puin zal alleen compacter op het dijklichaam komen te liggen (Jongorius, 2016).

Het falen van een dijkwoning kan ook voor verstoring van het dijklichaam zorgen als deze zich in het grondlichaam bevindt (kelder). Zo zou door verhoogde waterspanningen de druk op een kelderwand te hoog kunnen worden waardoor deze bezwijkt en zijn grondkerende functie verliest. De grond die deze muur keerde verplaatst zich naar de lager gelegen delen van de woning met een verstoring van het dijkprofiel als gevolg. De invloed hiervan is vooral afhankelijk van de ligging van de kelder ten opzichte van het beoordelingsprofiel. Het beoordelingsprofiel is het minimum profiel dat de garantie moet bieden dat de waterkering voldoende sterk is (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007). Na bezwijken van een dijkwoning is de reststerkte van belang, het restprofiel kan gevoeliger zijn voor binnenwaartse macro-instabiliteit.

4.2 TOETSOORDEEL STBI VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE ZONDER DIJKWONING

In onderzoeksvraag 2 wordt een toetsoordeel gegeven over de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van de maatgevende dijkwoninglocatie in een situatie zonder dijkwoning. Er is eerst een maatgevende dijkwoninglocatie gekozen, vervolgens kan de veiligheid van het dwarsprofiel bij deze locatie worden beoordeeld door het uitvoeren van een gedetailleerde toets op STBI.

4.2.1 Gekozen maatgevende dijkwoninglocatie

Voor de pilotstabiliteitsbeoordeling van dijktraject 52-2 ter plaatse van een dijkwoning dient eerst de maatgevende dijkwoninglocatie bepaald te worden. IJsseldijk 45 is gekozen als maatgevende dijkwoninglocatie uit acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties (zie Figuur 4.1). Het bepalen van deze locatie staat beschreven in 3.2.1.

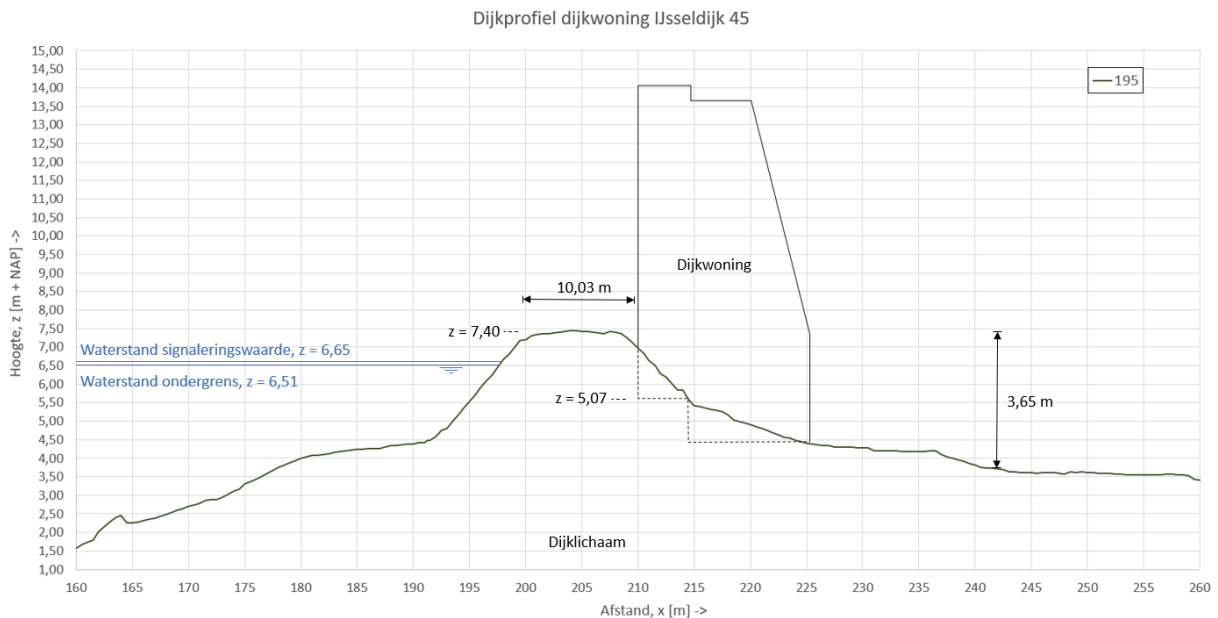
IJsseldijk 45 is gesitueerd in Welsum (Overijssel) en is volgens het BAG gebouwd in het jaar 1910, de woning wordt echter nog op een topografische kaart uit 1850 waargenomen. Het bouwjaar 1910 betreft waarschijnlijk een aanbouw. Verder is de dijkwoning gelegen op een schaaldijk met de kolk Katerstede in de oever. Het aanliggende en maatgevende dwarsprofiel is 52-2_0195+2, gelegen in dijkvak 31. De dijk heeft een hoogte van 7,40 meter boven NAP en een waterstand van 6,65 meter boven NAP bij de signaleringswaarde en een waterstand van 6,51 meter boven NAP bij de ondergrens.



Figuur 4.1 – Foto van de gekozen maatgevende dijkwoninglocatie IJsseldijk 45 te Welsum vanaf de noordzijde geschoten.

Reden voor de keuze voor IJsseldijk 45 als maatgevende dijkwoninglocatie is met name de combinatie van relatief groot hoogteverschil tussen de kruin en het achterland (3,65 meter) en de relatief smalle kruinbreedte (10,03 meter). Bij beide aspecten scoort deze dijkwoninglocatie als derde, terwijl de verschillen met de tweede te verwaarlozen zijn. Daarnaast is er een teensloot aanwezig aan de binnenwaartse zijde. De karakteristieken van de locatie IJsseldijk 45 lijken veel op

die van de naastgelegen dijkwoning, IJsseldijk 43. De keuze voor IJsseldijk 45 tussen deze twee is te wijten aan de ietwat smallere kruin (10,03 meter tegenover 10,28 meter) en de lagere keldervloerhoogte (5,07 meter boven NAP tegenover 5,47 meter boven NAP). Tijdens een verkenning langs de IJsseldijk viel ook op dat de voorgevel als gevolg van zettingen scheef is komen te staan, dit zou de stabiliteit van de woning kunnen aantasten. Zie Figuur 4.2 voor de afmetingen van het dwarsprofiel met dijkwoning IJsseldijk 45. De dijkwoning en dwarsprofiel zijn op schaal getekend, gebaseerd op data uit het AHN.



Figuur 4.2 – Afmetingen van dwarsprofiel 52-2_0195 met dijkwoning IJsseldijk 45 en de waterstanden bij de norm.

4.2.2 Gedetailleerde toets STBI

4.2.2.1 Geometrie

Het dwarsprofiel heeft een lengte van 350 meter, waarbij 150 meter binnendijks en 200 meter buitendijks gebied vanaf de buitenkruinlijn is meegenomen. Hierdoor heeft het dwarsprofiel voldoende lengte om de maatgevende glijcirkel geheel in te kunnen sluiten (zie Figuur D.7).

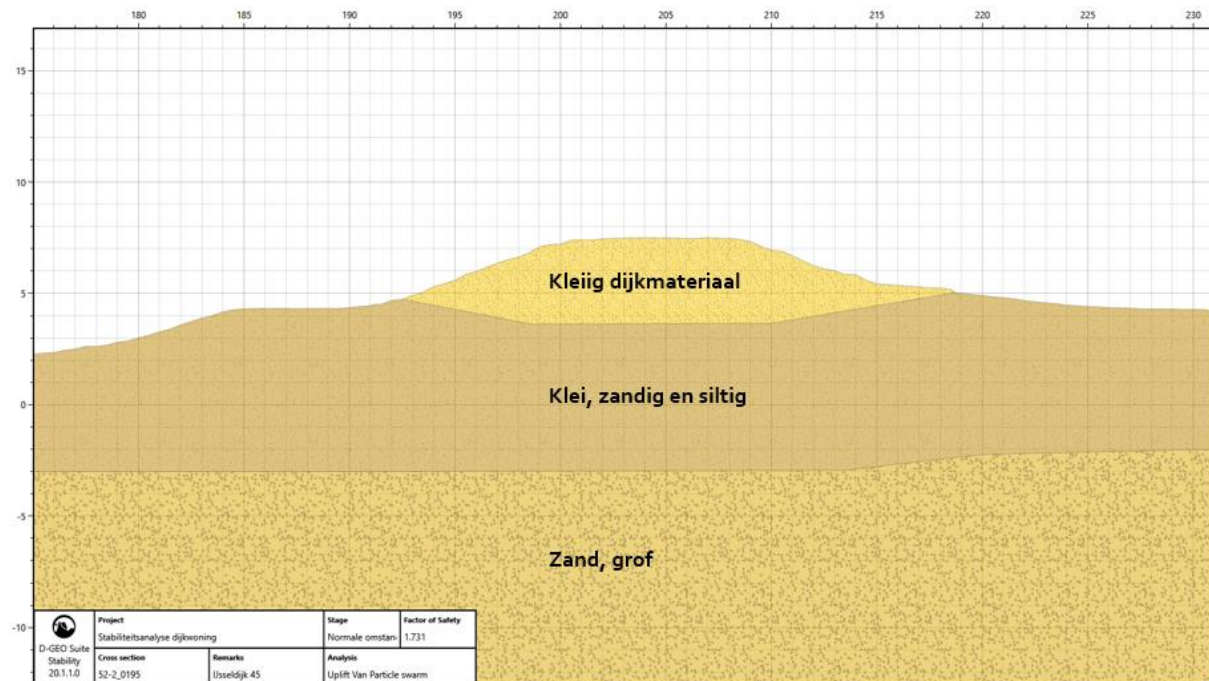
4.2.2.2 Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam

Uit de sonderingen en boringen is voortgekomen dat het dijklichaam voornamelijk bestaat uit kleilig materiaal. Klei is in vergelijking met zand gevoeliger voor afschuivingen, wat deze locatie extra maatgevend maakt. Door de belasting van de dijk op de ondergrond treedt er zetting op, hier is bij de schematisering van de geometrie rekening mee gehouden.

De ondergrond kenmerkt zich door een toplaag met een dikte van 5,0 tot 6,0 meter bestaande uit zandig en siltige klei. Onder de toplaag bevindt zich een watervoerende laag bestaande uit (grof) zand. Deze watervoerende laag heeft een dikte tussen de 4,5 en 5,0 meter.

De watervoerende laag rust op een minimaal 4,0 meter dikke kleilaag op een diepte van 7,5 meter onder NAP. Er staat 'minimaal 4,0 meter' omdat de sonderingen reiken tot een diepte van $\pm 11,5$ meter onder NAP. De ondergrond is gesimplificeerd door deze kleilaag niet te schematiseren, dit heeft als gevolg dat de resultaten van de glijvlakanalyse beter te interpreteren zijn en het waterspanningsverloop eenvoudiger te schematiseren is. Daarnaast is het een conservatieve aanpak, aangezien de kleilaag zorgt voor een kleinere watervoerende laag onder de toplaag

waardoor de stijghoogtelijn lager uitvalt met als gevolg dat de waterspanningen op het dijklichaam lager zullen zijn. Zie Figuur 4.3 voor de laagopbouw.



Figuur 4.3 – Laagopbouw van het dijklichaam en de ondergrond ter plaatse van dijkwoning IJsseldijk 45 ⁵.

D.4.1.3 Grondeigenschappen

Er is van uitgegaan dat de slecht doorlatende toplaag (klei, zandig en siltig) onder de freatische lijn ongedraineerd reageert. Boven de freatische lijn is de grond niet volledig met water verzadigd, waardoor voor deze grondlagen in D-Stability met gedraineerde eigenschappen is gerekend. Dit geldt voor het dijklichaam en een deel van de toplaag. Voor de watervoerende zandlaag onder de toplaag zijn gedraineerde eigenschappen toegekend.

Het volumiek gewicht is opgedeeld in onverzadigd volumiek gewicht (γ_{unsat}) en verzadigd volumiek gewicht (γ_{sat}). De cohesie (c') speelt in de huidige beoordelingsronde geen rol en heeft daarom de waarde 0 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). De hoek van inwendige wrijving (Φ) is toegepast voor de gedraineerde grondlagen. Voor de ongedraineerde grondlagen is gerekend met ongedraineerde schuifsterkteparameters volgens de SHANSEP ⁶ methode. De ongedraineerde schuifsterkteparameters zijn de ongedraineerde schuifsterkteratio (S), de sterkte-toename-exponent (m) en de pre-overburden pressure (POP). Een eerste inschatting van de grensspanning ⁷ wordt bepaald door een conservatieve standaardwaarde voor de POP aan te nemen, deze is constant over de hele grondlaag.

Het gemiddelde (μ) en de standaarddeviatie (σ) van de grondeigenschappen worden in D-Stability gebruikt bij het bepalen van de rekenwaarde en het genereren van een probabilistische verdeling.

De grondeigenschappen zijn weergegeven in Tabel 4.1.

⁵ De kleur van de grondlagen zijn automatisch toegevoegd door D-Stability op basis van de ingevoerde volumieke gewichten, dus het is mogelijk dat ze niet altijd logisch lijken.

⁶ SHANSEP = Stress History And Normalized Soil Engineering Properties

⁷ De grensspanning is een maat voor de in situ toestand van de grond.

Tabel 4.1 – Grondeigenschappen van de toegepaste grondsoorten bij IJsseldijk 45.

Grondsoort	Beschrijving	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'	Φ' (μ σ)	S (μ σ)	M (μ σ)	POP (μ σ)
Dijkmateriaal klei	Kleiig dijkmateriaal	19,6	19,9	0	32 1,98	-	-	-
H_Ro_z&k_k	Klei, zandig en siltig	18,6	18,8	-	32 1,38	0,30 0,018	0,9 0,02	27 5,24
P_Rg_zm	Zand, grof	18	20	0	34 1,05	-	-	-

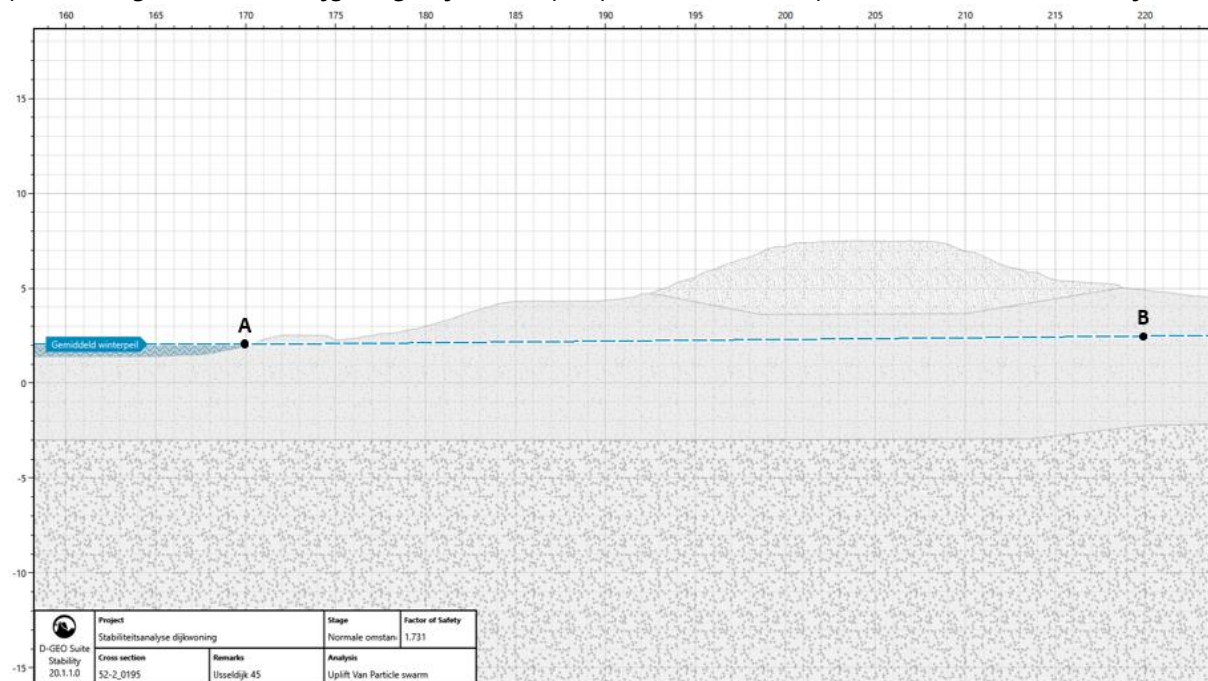
Waarin:

- γ_{unsat} Onverzadigd volumiek gewicht [kN/m³];
- γ_{sat} Verzadigd volumiek gewicht [kN/m³];
- c' Cohesie [kPa];
- Φ' Hoek van inwendige wrijving [°];
- S Ongedraineerde schuifsterkteratio [-];
- m Sterktetoename-exponent [-];
- POP Pre-overburden pressure [kPa].

D.4.1.4 Hydraulische belastingen

Voor de schematisering is de waterstand bij de signaleringswaarde gebruikt omdat er verwacht wordt dat de doorsnede bij de dijkwoning voldoet aan de ondergrens. De waterstand bij de signaleringswaarde is een waterstand die eens in de 3.000 jaar voorkomt, deze betreft 6,65 meter boven NAP.

Bij normale omstandigheden wordt uitgegaan van het gemiddeld winterpeil. De gemiddelde winterafvoer ter hoogte van Olst (andere kant van de IJssel) is 2,05 meter boven NAP (punt A). De Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) binnendijs is 2,6 meter boven NAP (punt B). Het verloop van de freatische lijn onder het dijklichaam is handmatig geschematiseerd tussen deze twee punten (Figuur 4.4). De stijghoogtelijn verloopt hydrostatisch ten opzichte van de freatische lijn.

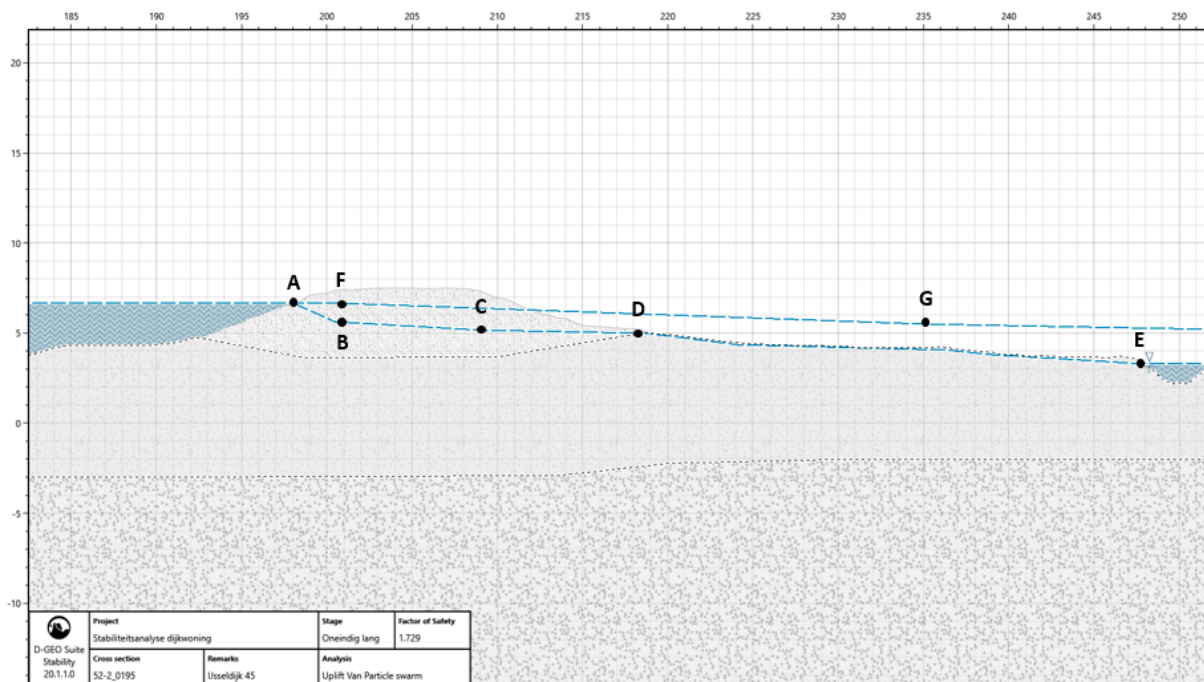


Figuur 4.4 – Het verloop van de freatische lijn tijdens winterse omstandigheden in D-Stability.

Bij enkele weken hoogwater wordt ervan uitgegaan dat het waterspanningsverloop de eindtoestand heeft bereikt. Het waterspanningsverloop bestaat uit de freatische lijn en de stijghoogtelijn van de watervoerende zandlaag.

De freatische lijn begint buitendijks met een hoogte gelijk aan de waterstand bij de signaleringswaarde (6,65 m + NAP) en loopt door tot het buitentalud (punt A). In de dijk verloopt de freatische lijn vanaf het buitentalud lineair tot een hoogte van 1,0 meter onder de waterstand bij de norm (5,65 m + NAP) ter hoogte van de buitenkruinlijn (punt B). Vervolgens verloopt de freatische lijn lineair tot een hoogte van 1,5 meter onder de waterstand ter hoogte van de binnenkruinlijn (punt C). Een groot deel van de dijk is daarmee verzadigd. Gezien de drainerende eigenschappen van het dijklichaam is de verwachting dat deze initiële hoogte conservatief is aangenomen en dat in werkelijkheid de freatische lijn lager ligt. Na de binnenkruinlijn loopt de freatische lijn lineair door tot de binnentoe op maaiveldhoogte (punt D), waarna hij de maaiveldhoogte aanhoudt tot aan de sloot (punt E) (Figuur 4.5). Daar verloopt de freatische lijn tussen het maaiveld ($\pm 3,8$ m + NAP) en de GHG (2,6 m + NAP). Deze hoogte, 3,3 meter boven NAP, is conservatief aangenomen omdat de afwatering van de teensloot minimaal is door het kleine verhang.

De stijghoogtelijn van de watervoerende laag verloopt buitendijks gelijk aan de waterstand tot de buitenkruinlijn (punt F), waar hij lineair afloopt tot 5,5 meter boven NAP op 20 meter van de dijk (punt G) (Figuur 4.5). Daarna is de stijghoogtelijn licht aflopend aangenomen tot een uiteindelijk hoogte van +3,5 m t.o.v. NAP, omdat er geen stijghoogtemetingen beschikbaar zijn en dit toch een conservatieve aanname is. Het waterspanningsverloop is met Riskeer gecontroleerd met behulp van de Waternet Creator bij een soortgelijke locatie, met ook een kolk in de oever.



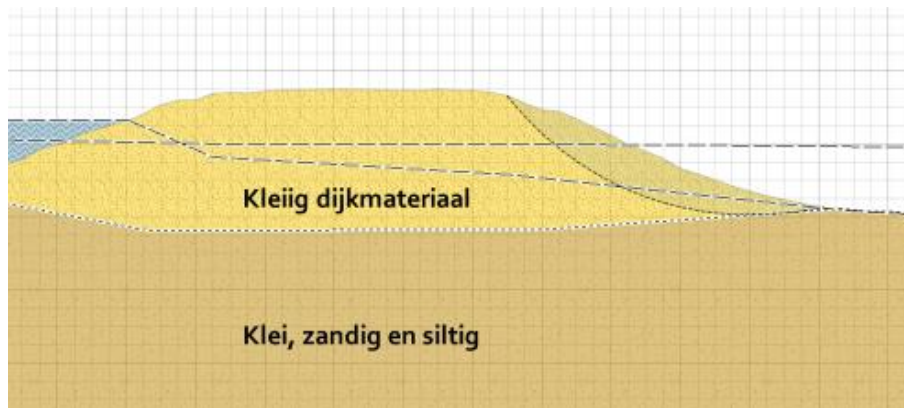
Figuur 4.5 – Het verloop van de freatische lijn (onder) en de stijghoogtelijn (boven) onder extreem hoogwater in D-Stability.

D.1.4.5 Verkeersbelastingen

Verkeersbelasting is niet meegenomen in de schematisering. In Bijlage D.1.4.5 staat een toelichting voor deze keuze.

4.2.3 Toetsoordeel STBI

Uit de deterministische berekening met de rekenwaarden in D-Stability volgt een stabiliteitsfactor (F_d) met een maatgevende glijcirkel Figuur 4.6.



Figuur 4.6 – Maatgevende glijcirkel bij de nulsituatie in dwarsprofiel 52-2_0195+2.

Deze stabiliteitsfactor is gecorrigeerd in een semi-probabilistische berekening met de modelfactor (γ_d). Aan de hand van de gecorrigeerde stabiliteitsfactor en de maatgevende glijcirkel is door D-Stability een voorwaardelijke faalkans per doorsnede ($P_{f,c}$) met bijbehorende betrouwbaarheidsindex (β) uitgerekend. Het product van de voorwaardelijke faalkans en de kans op de waterstand bij de signaleringswaarde ($1/3.000 \text{ jaar}^{-1}$) is de faalkans (P_f). In Tabel 4.2 staan de resultaten van de glijvlakanalyse voor de twee dwarsprofielen.

Tabel 4.2 – Resultaten voor de glijvlakanalyse bij de dwarsprofielen 52-2_0195 en 52-2_0195+2.

Dwarsprofiel	Stabiliteitsfactor berekend F_s [-]	Stabiliteitsfactor correctie $F_{s,d}/\gamma_d$ [-]	Betrouwbaarheidsindex β [-]	Voorwaardelijke faalkans $P_{f,c}$ [jaar ⁻¹]	Faalkans bij situatie P_f [jaar ⁻¹]
52-2_0195	1,729	1,631	10,010	$7,56 \cdot 10^{-24}$	$2,52 \cdot 10^{-27}$
52-2_0195+2	1,300	1,226	5,149	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$3,42 \cdot 10^{-11}$

Met een faalkans van $2,52 \cdot 10^{-27}$ valt de veiligheid van dwarsprofiel 52-2_0195 (zuidzijde) in categorie I_v. Voor dwarsprofiel 52-2_0195+2 (noordzijde) valt de veiligheid met een faalkans van $3,42 \cdot 10^{-11}$ ook in categorie I_v. Dit betekent dat de dijk ruim voldoet aan de signaleringswaarde. In Bijlage D.4.2 staan de begrenzingswaarden per categorie.

4.3 TOETSOORDEEL STBI VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE MET DIJKWONING

In Onderzoeksvraag 3 wordt een toetsoordeel gegeven over de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van de maatgevende dijkwoninglocatie in een situatie met dijkwoning. De toets op maat voor NWObe is uitgevoerd door het implementeren van de dijkwoning in de gedetailleerde toets op STBI. De invloed van de dijkwoning is onderzocht voor een situatie met de aanwezigheid van de dijkwoning en in een situatie met gefaalde dijkwoning.

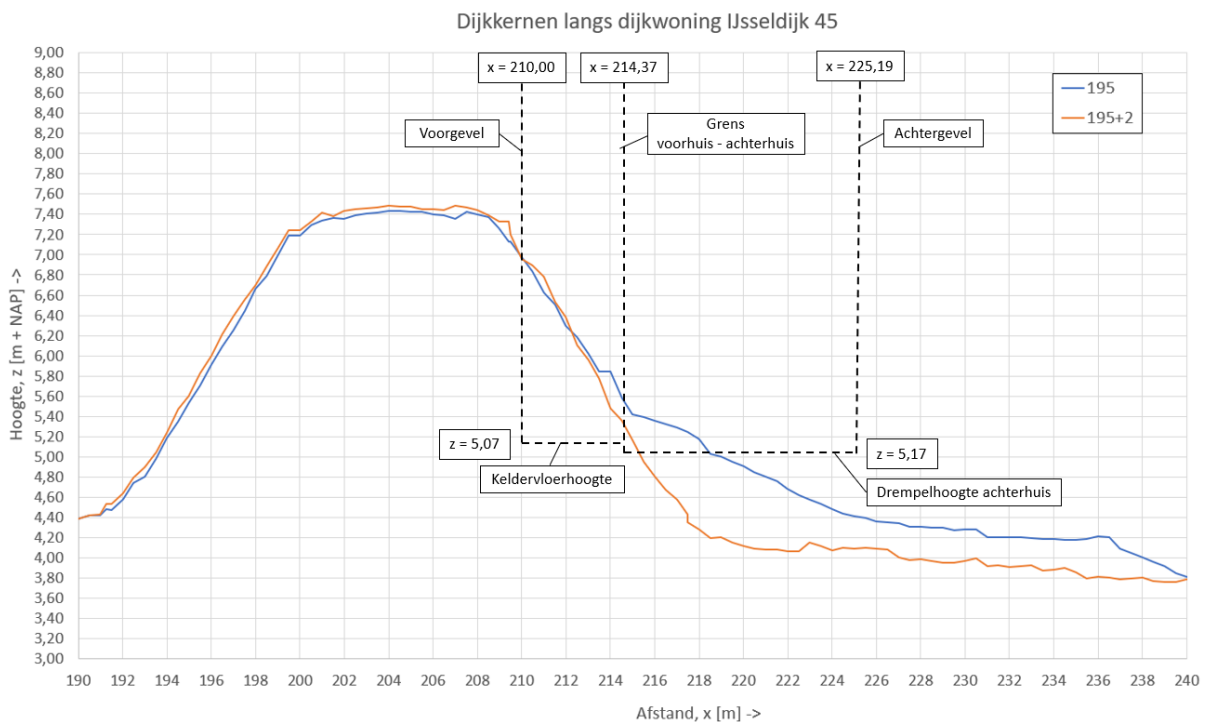
4.3.1 Invloed aanwezigheid dijkwoning

4.3.1.1 Geometrie

De dijkwoning heeft een lengte van 15,19 meter evenwijdig aan het dwarsprofiel en een maximale breedte van 10,71 meter loodrecht op het dwarsprofiel. Het voorhuis is smaller dan het achterhuis met een breedte van 6,47 meter. Alle tweedimensionale afmetingen van de dijkwoning staan in

Figuur E.1. De dijkwoning staat voor een deel in en voor een deel op het dijklichaam. De buitenkant van voorgevel van de woning is gelegen op de binnenkruinlijn ($x = 210,00$ m) en de buitenkant van de achtergevel staat op een afstand van 15,19 meter van de voorgevel ($x = 225,19$ m), zie Figuur 4.7).

De dijkwoning heeft een kelder onder het voorhuis in het bovenbinnentalud. De vloerhoogte van deze kelder is 5,07 meter boven NAP. De drempelhoogte van het voorhuis is 7,07 meter boven NAP, maar is niet relevant voor de schematisering. De kelder heeft een lengte van 4,37 meter evenwijdig aan het dwarsprofiel en een breedte van ongeveer 3,00 meter loodrecht op het dwarsprofiel. De kelder is geschematiseerd van $x = 210,00$ m tot $x = 214,37$ m.



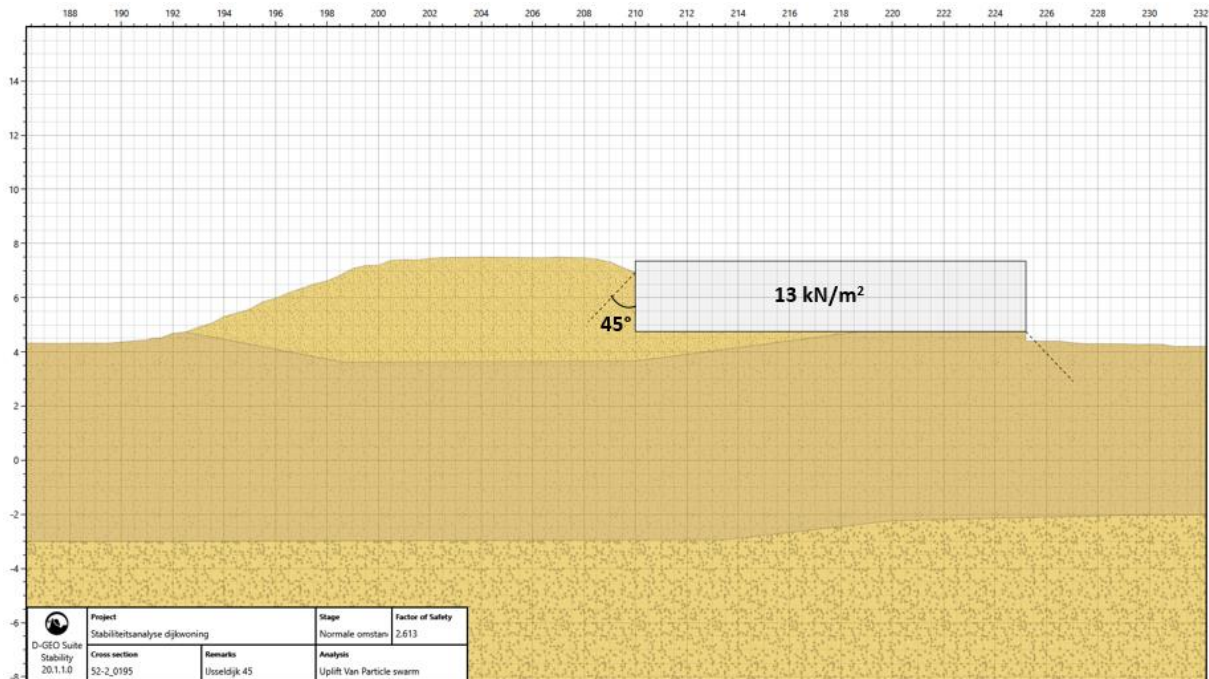
Figuur 4.7 – Dijkkernen langs dijkwoning IJsseldijk 45.

Het achterhuis heeft een lengte van 10,70 meter en is geschematiseerd van $x = 214,37$ m tot $x = 225,19$ m. De drempelhoogte van het achterhuis is 5,17 meter boven NAP (Figuur 4.7). Na het inzien van de bouwtekening en een aantal vragen aan de bewoner is voortgekomen dat de vloer met beton is geëgaliseerd. Onder deze betonlaag is de grond aangevuld met zand. De diktes en de hoogtes van de vloer variëren, omdat er veel verhogingen in de woning aanwezig zijn. De dikte van de keldervloer is 0,42 meter (zie Bijlage C) en de hoogte van de onderkant van deze vloer is als maatgevend voor de hele woning aangenomen. Dit komt neer op een hoogte van 4,75 meter boven NAP en grofweg 2,6 meter onder de kruin.

4.3.1.2 Eigengewicht dijkwoning

Het gewicht van de dijkwoning is verkregen uit (Jongorius, 2016), gebaseerd op een groot woonhuis waarbij het gewicht van de muren, het dak, de vloeren, de fundering en variabele belasting is meegenomen. De totale uniforme belasting als gevolg van het eigengewicht en variabele belasting is gesteld op 13 kN/m^2 , zie 3.3.1.1. Het gewicht van bebouwing kan tussen de 10 kN/m^2 en 20 kN/m^2 worden aangehouden (Witteveen+Bos, 2014). Uit de gevoeligheidsanalyse in Resultaten 4.4 blijkt echter dat het verschil in stabiliteitsfactoren verwaarloosbaar klein is binnen het bereik van 10 kN/m^2 en 20 kN/m^2 voor de uniforme belasting, hierdoor is de waarde van 13 kN/m^2 constant aangehouden (Figuur 4.8).

Om de belastingspreiding van de dijkwoning in rekening te brengen is een veilige constante spreidingshoek van 45° aangehouden. In D-Stability kunnen voor de belasting ook aanpassingspercentages van de grondlagen worden opgegeven. Voor de cohesieve grondsoorten is een aanpassingspercentage van 0% toegepast en dit wordt ook ondersteund door de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Voor niet-cohesieve grondsoorten is een aanpassingspercentage van 50% gehanteerd (Viehöfer & Hergarden, 2015). In Bijlage E staat meer toelichting over deze waarden.



Figuur 4.8 – Uniforme belasting door eigen gewicht dijkwoning op het dijklichaam.

4.3.1.3 Voldoende sterke constructieve elementen

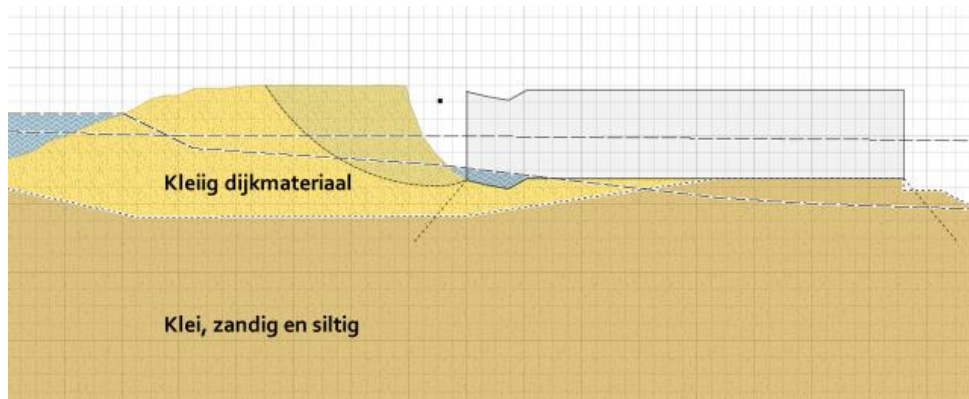
Om uit te sluiten dat de maatgevende glijcirkel door de kelderwand of fundering snijdt, is er een 'forbidden line' geschematiseerd over de kelderwand en de fundering (Figuur E.4).

4.3.2 Invloed gefaalde dijkwoning

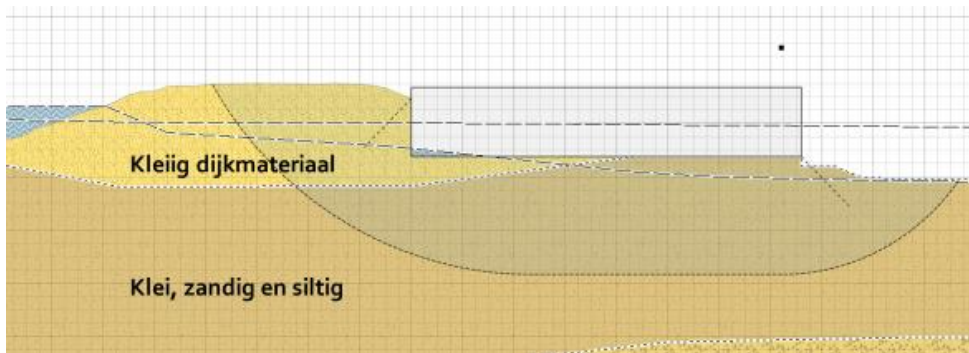
De geometrie van de dijk is hetzelfde als voor de situatie met de aanwezigheid van dijkwoning. Uitgaande van een bezwaken kelderwand of vloer, zijn er geen 'forbidden lines' getekend waardoor er kleine afschuivingen kunnen optreden die de achterliggende ruimte vullen met grond. Verder wordt er aangenomen dat de invloed van belasting als gevolg van het eigengewicht van de woning hetzelfde is als bij het niet falen van de dijkwoning omdat de kelder en vloer gevuld worden met puin. In 3.3.1.2 staat gedetailleerder beschreven hoe de invloed van de gefaalde dijkwoning is geschematiseerd.

4.3.3 Toetsoordeel binnenwaartse macrostabiliteit in een situatie met dijkwoning

De maatgevende glijcirkels voor beide situaties bij de twee dwarsprofielen zijn berekend in D-Stability, zie Figuur 4.9 en Figuur 4.10.



Figuur 4.9 – Maatgevende glijcirkel gefaalde dijkwoning in dwarsprofiel 52-2_0195+2.



Figuur 4.10 – Maatgevende glijcirkel intacte dijkwoning in dwarsprofiel 52-2_0195+2.

In Tabel 4.3 staan de resultaten van de glijvlakanalyse voor de twee situaties bij dwarsprofiel 52-2_0915.

Tabel 4.3 – Resultaten voor de twee situaties bij dwarsprofiel 52-2_0195.

Dwarsprofiel	Stabiliteitsfactor berekend F_s [-]	Stabiliteitsfactor correctie $F_{s,d}/\gamma_d$ [-]	Betrouwbaarheidsindex β [-]	Voorwaardelijke faalkans $P_{f,c}$ [jaar ⁻¹]	Faalkans bij situatie P_f [jaar ⁻¹]
<i>Aanwezigheid dijkwoning</i>	2,178	2,055	8,290	$5,69 \cdot 10^{-17}$	$1,90 \cdot 10^{-20}$
<i>Falen dijkwoning</i>	1,294	1,221	5,118	$1,54 \cdot 10^{-7}$	$5,14 \cdot 10^{-11}$

Met een faalkans van $1,90 \cdot 10^{-20}$ bij de aanwezigheid van de dijkwoning in dwarsprofiel 52-2_0195 valt de veiligheid in categorie I_v . Voor de situatie met gefaalde dijkwoning is de berekende stabiliteitsfactor groter dan de vereiste stabiliteitsfactor van 1,2, dit betekent dat de waterkering zijn waterkerende functie behoudt. Deze situatie is voor de volledigheid ook semi-probabilistisch doorgerekend en valt met een faalkans van $5,14 \cdot 10^{-11}$ in de categorie I_v . De dijk voldoet dus ruim aan de signaleringswaarde voor beide situaties.

In Tabel 4.4 staan de resultaten van de glijvlakanalyse voor de twee situaties bij dwarsprofiel 52-2_0915+2. Dit dwarsprofiel ligt aan de noordzijde van de dijkwoning.

Tabel 4.4 – Resultaten voor de twee situaties bij dwarsprofiel 52-2_0195+2.

Dwarsprofiel	Stabiliteits-factor berekend F_s [-]	Stabiliteits - factor correctie $F_{s,d}/\gamma_d$ [-]	Betrouwbaarheidsindex β [-]	Voorwaardelijke faalkans $P_{f,c}$ [jaar ⁻¹]	Faalkans bij situatie P_f [jaar ⁻¹]
<i>Aanwezigheid dijkwoning</i>	1,989	1,876	7,421	$5,82 \cdot 10^{-14}$	$1,94 \cdot 10^{-17}$
<i>Gefaalde dijkwoning</i>	1,349	1,273	5,828	$2,81 \cdot 10^{-9}$	$9,36 \cdot 10^{-13}$

Met een faalkans van $1,94 \cdot 10^{-17}$ bij de aanwezigheid van de dijkwoning in dwarsprofiel 52-2_0195+2 valt de veiligheid in categorie IV. Voor de situatie met gefaalde dijkwoning is de berekende stabiliteitsfactor groter dan de vereiste stabiliteitsfactor van 1,2, dit betekent dat de waterkering zijn waterkerende functie behoudt. Deze situatie is voor de volledigheid ook semi-probabilistisch doorgerekend en valt met een faalkans van $9,36 \cdot 10^{-13}$ in de categorie IV. De dijk voldoet dus ruim aan de signaleringswaarde voor beide situaties.

4.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE

De gevoeligheidsanalyse heeft betrekking op mogelijk maatgevende eigenschappen van dijkwoninglocaties binnen dijktraject 52-2. Deze mogelijk maatgevende eigenschappen worden getest in de geometrie van dijkwoninglocatie IJsseldijk 45.

De eigenschappen die in de gevoeligheidsanalyse gevarieerd zullen worden zijn achtereenvolgend:

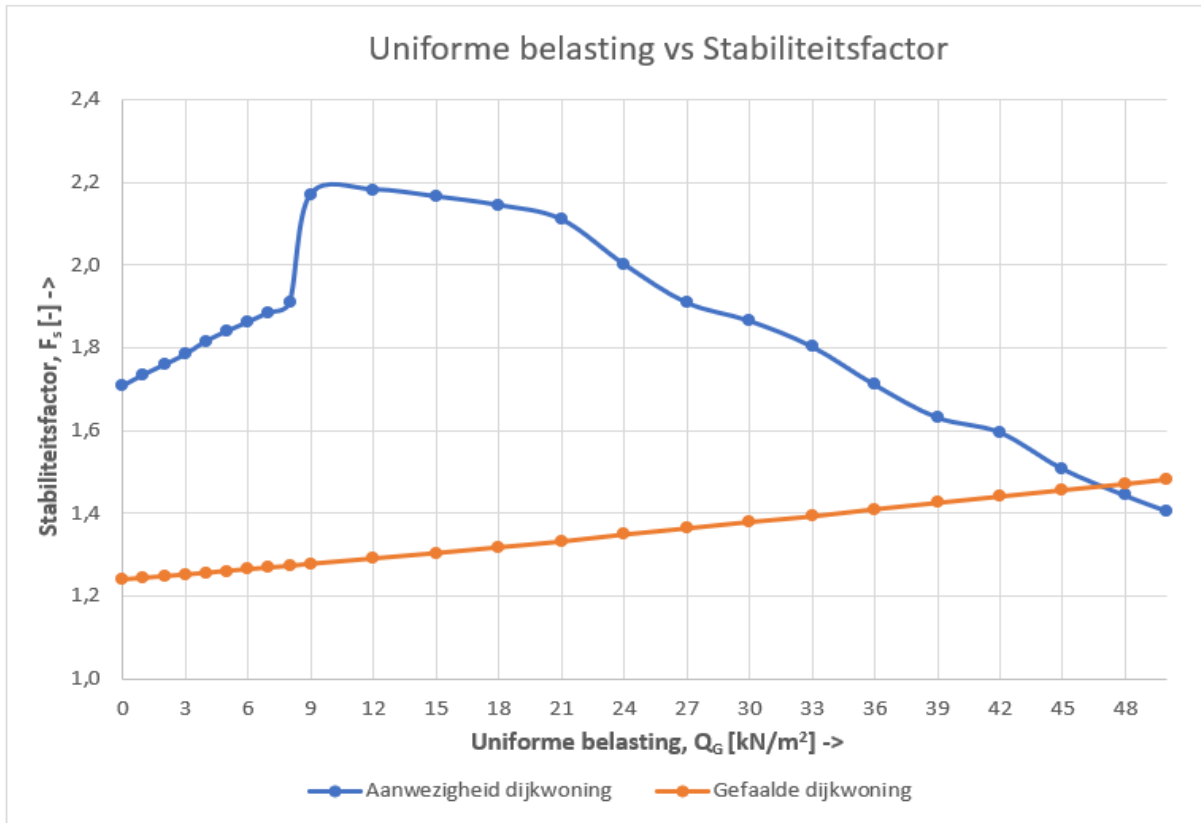
- De uniforme belasting;
- Het dijkmateriaal;
- De ondergrondopbouw;
- De kenmerken van een dijkwoning.

4.4.1 Uniforme belasting

De invloed van de verschillen in de grootte en de verdeling van de uniforme belasting zijn inzichtelijk gemaakt middels een gevoeligheidsanalyse voor de situaties aanwezigheid van dijkwoning en gefaalde dijkwoning. De resultaten zullen hieronder worden weergegeven en geïnterpreteerd.

4.4.1.1 Grootte

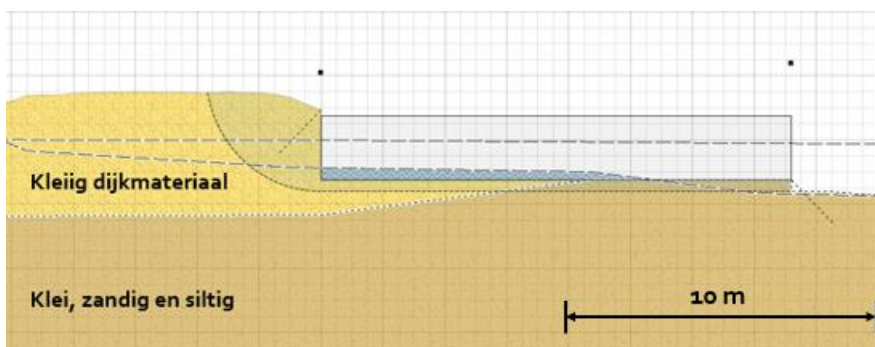
Voor de uniforme belasting als gevolg van het eigen gewicht van de dijkwoning is een aanname gemaakt, omdat niet met zekerheid kan worden vastgesteld wat het daadwerkelijke gewicht is. De onzekerheid in de uniforme belasting bestaat vooral uit een waarde tussen de 10 kN/m² en 20 kN/m² (zie Bijlage E.1.1). Het resultaat van de stabiliteitsfactor bij verschillende belastingen staat geplott in Figuur 4.11.



Figuur 4.11 – Verloop van de stabiliteitsfactor bij verschillende waarden voor het eigen gewicht van de dijkwoning.

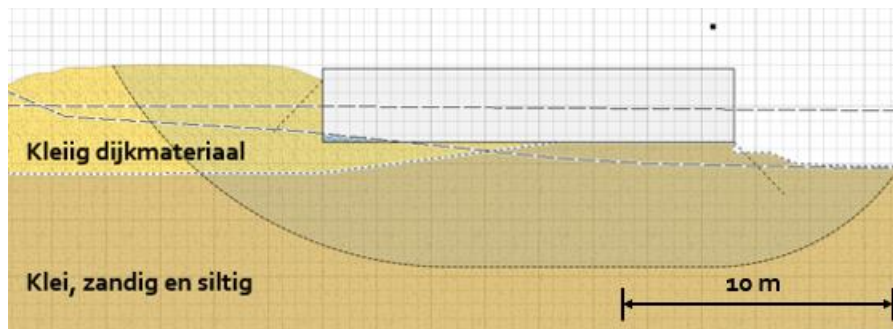
Tijdens het variëren van de uniforme belasting in deze situatie zijn er drie maatgevende glijcirkels waar te nemen die verschillend zijn van vorm.

Figuur 4.11 laat zien dat de stabiliteitsfactor bij de aanwezigheid van de dijkwoning laag begint ($F_s = 1,708$) en een sprong maakt naar een soort evenwicht tussen 9 kN/m^2 en 21 kN/m^2 , gelijk aan de stabiliteitsfactor in de nulsituatie ($F_s = 2,178$). Vervolgens neemt de stabiliteitsfactor weer lineair af. De lage stabiliteitsfactor onder een belasting van ongeveer 9 kN/m^2 kan verklaard worden doordat het gewicht van het afwezige grondlichaam dan meer weegt dan het eigen gewicht van de dijkwoning. Tussen de 0 kN/m^2 en 8 kN/m^2 heeft de maatgevende glijcirkel dan ook dezelfde vorm, waarbij de dijkwoning in het passieve deel staat (Figuur 4.12). Het tegenwerkende moment door de dijkwoning is kleiner dan bij de aanwezigheid van het grondlichaam, met een lagere stabiliteitsfactor als gevolg.



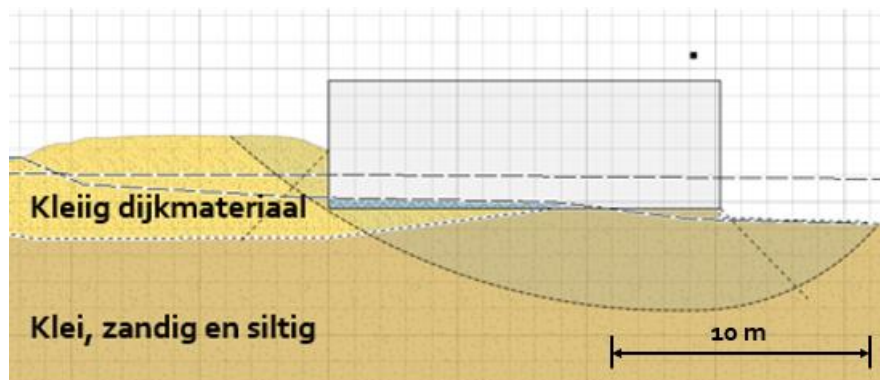
Figuur 4.12 – Maatgevende glijcirkel met dezelfde vorm tussen 0 kN/m^2 en 8 kN/m^2 .

Naarmate de belasting groter wordt, veranderen en verschuiven ook de maatgevende glijcirkels. Bij 24 kN/m^2 is de lengte van de glijcirkel veel groter, waarbij het intredepunt verder naar de buitenkruinlijn is geschoven en terwijl het uitredepunt zich verder in het achterland bevindt. Ook snijdt de glijcirkel dieper in het dijklichaam.



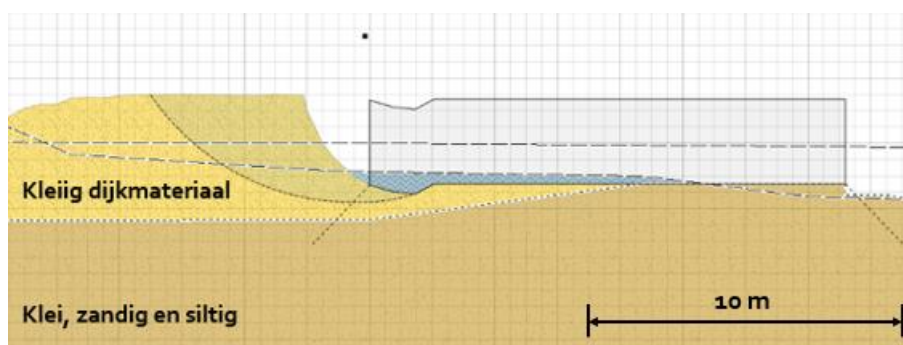
Figuur 4.13 – Maatgevende glijcirkel met dezelfde vorm tussen 8 kN/m^2 en 24 kN/m^2 .

Bij nog grotere belastingen verschuift het intredepunt van de maatgevende glijcirkel meer naar de binnenkruinlijn en de dijkwoning, waardoor de dijkwoning zich meer in het actieve deel gaat bevinden (Figuur 4.14). De stabiliteitsfactor neemt hierbij ook af omdat het vergroten van de belasting het aandrijvende moment versterkt.



Figuur 4.14 – Maatgevende glijcirkel met dezelfde vorm tussen 24 kN/m^2 en 50 kN/m^2 .

Bij de gefaalde dijkwoning neemt de stabiliteitsfactor lineair toe naarmate de belasting groter wordt, zie Figuur 4.11. De maatgevende glijcirkel is in deze situatie voor alle belastingen van gelijke vorm met de dijkwoning in het passieve deel (Figuur 4.15). Het toenemen van de stabiliteitsfactor valt dus te verklaren door het versterken van het tegenwerkende moment door het vergroten van de belasting. Bij elke belasting blijft de stabiliteitsfactor wel boven de vereiste stabiliteitsfactor van 1,2, dit houdt in dat de gefaalde dijkwoning niet leidt tot falen van de waterkering.



Figuur 4.15 – Maatgevende glijcirkel bij gefaalde dijkwoning met dezelfde vorm.

4.4.1.2 Verdeling voorhuis/achterhuis

Bij verdeling van de uniforme belasting tussen het voorhuis en achterhuis is het gewicht van het voorhuis vergroot en het gewicht van het achterhuis constant gelaten. In Figuur F.2 van Bijlage F is te zien dat de verdeling van de belasting tussen voorhuis en achterhuis vrijwel geen invloed heeft op de stabiliteitsfactor bij zowel de aanwezigheid van de dijkwoning als bij de gefaalde dijkwoning. De stabiliteitsfactor voor de situatie gefaalde dijkwoning komt tevens niet onder de grens van de vereiste stabiliteitsfactor.

Daarnaast is de situatie waarbij de belasting van het voorhuis twee keer groter is dan het achterhuis (200%) niet realistisch te noemen, en ook daar is het verschil in stabiliteitsfactor verwaarloosbaar klein. De verdeling van de belasting is dus niet van belang voor de veiligheid.

4.4.2 Dijkmateriaal

Om de invloed van het soort dijkmateriaal op de binnenwaartse macrostabiliteit te bepalen, wordt de stabiliteitsfactor bij zandig dijkmateriaal berekend. In de bestaande situatie bestaat het dijklichaam uit kleiig materiaal, deze stabiliteitsfactoren zijn in 4.2 en 4.3 berekend.

De bestaande ondergrond, een toplaag van zandig en siltige klei met daaronder een watervoerend zandpakket, blijft constant (Tabel 4.5).

Tabel 4.5 – Stabiliteitsfactoren voor de drie situaties bij de bestaande situatie (kleidijk) links en bij een zanddijk rechts.

Situatie	Dijkmateriaal	Stabiliteitsfactor F_s [-]	Dijkmateriaal	Stabiliteitsfactor F_s [-]
Nulsituatie	Kleiig	1,729	Zandig	1,728
Aanwezigheid dijkwoning	Kleiig	2,178	Zandig	2,196
Gefaalde dijkwoning	Kleiig	1,294	Zandig	1,291

Zoals te zien aan de stabiliteitsfactoren voor de drie situaties bij de kleidijk en zanddijk is dat er geen verschil merkbaar is. De maatgevende glijcirkels hebben bij elke situatie dezelfde vorm als bij de bestaande situatie. Dit is te verklaren doordat de dijken in dijktraject 52-2 niet uitsluitend uit een grondsoort bestaan. Er worden twee soorten dijkmaterialen onderscheiden, kleiig en zandig. Bij kleiig dijkmateriaal bestaat de dijk overwegend uit klei, maar het is ook vermengd met zandige en siltige klei. Hierdoor komen de grondeigenschappen van beide dijken vrijwel overeen.

4.4.3 Ondergrondopbouw

Om de invloed van veranderingen in de ondergrondopbouw op de binnenwaartse macrostabiliteit te bepalen, wordt de stabiliteitsfactor voor zand als ondergrond en voor een samendrukbare ondergrond berekend. De veranderingen in de ondergrond zijn aangebracht in de bestaande toplaag voor zowel de kleidijk als de zanddijk. Daaronder zal het bestaande watervoerende zandpakket constant blijven. Dit levert de volgende vier geohydrologische situaties op:

1. Kleidijk en samendrukbare ondergrond;
2. Kleidijk en zand als ondergrond;
3. Zanddijk en samendrukbare ondergrond;
4. Zanddijk en zand als ondergrond.

Voor de samendrukbare ondergrond wordt gekeken naar de ondergrondopbouw zoals die het gebied van dijktraject 52-2 voorkomt. Aan de hand van het geotechnisch lengteprofiel kan een maatgevende samendrukbare ondergrond worden geselecteerd. Humeuze klei en veen zullen gecombineerd worden tot een 3,5 meter dikke laag humeuze klei met daarboven toplaag van kleiig zand met een dikte tussen de 1,0 m en 2,0 m. Daaronder bevindt zich het watervoerende zandpakket.

Voor zand als ondergrond gaat het om fijn zand dat in het Pleistoceen door de wind is afgezet. Het zand vormt een doorlatende toplaag en heeft een dikte tussen de 5,0 m en 6,0 m. Daaronder bevindt zich het watervoerende zandpakket.

De stabiliteitsfactoren voor de samendrukbare ondergrond en zand als ondergrond staan weergegeven in Tabel 4.6.

Tabel 4.6 – Stabiliteitsfactoren voor de drie situaties bij verschillende ondergronden en dijkmateriaal.

Geohydrologische situatie	Ondergrond	Dijk	Nulsituatie F_s [-]	Aanwezigheid dijkwoning F_s [-]	Gefaalde dijkwoning F_s [-]
Bestaande situatie	Klei, zandig en siltig	Klei	1,729	2,178	1,294
Zand op klei	Klei, zandig en siltig	Zand	1,728	2,196	1,291
Klei op klei	Kleiig zand met humeuze klei	Klei	1,728	1,466	1,321
Zand op klei	Kleiig zand met humeuze klei	Zand	1,732	1,593	1,323
Klei op zand	Zand als ondergrond	Klei	1,728	1,851	1,222
Zand op zand	Zand als ondergrond	Zand	1,573	2,064	1,223

4.4.3.1 Kleiig zand met humeuze klei

In Tabel 4.6 is te zien dat er bij de nulsituatie en gefaalde woning geen verschil is tussen een klei- en zanddijk op kleiig zand met humeuze klei. Alleen bij de aanwezigheid van de dijkwoning is er een verschil in de stabiliteitsfactoren. De stabiliteitsfactor bij een kleidijk is kleiner dan bij de zanddijk. De vorm van de maatgevende glijcirkels zijn bij beide gevallen soortgelijk, het intredepunt ligt bij de kleidijk alleen wat verder naar de dijkwoning. Hierdoor is het aandeel van het gewicht van de dijkwoning op het aandrijvende moment ietwat groter, met een kleinere stabiliteitsfactor als gevolg.

Bij de bestaande ondergrond was er voor de aanwezigheid van de dijkwoning geen verschil tussen een klei- of zanddijk. Wel was de stabiliteitsfactor bij die ondergrond (zandig en siltige klei) vele malen groter dan bij deze ondergrond (kleiig zand met humeuze klei) het geval is (2,178 tegen \pm 1,53). Dat valt te verklaren door het feit dat de maatgevende glijcirkel bij de aanwezigheid van de dijkwoning diep door de ondergrond snijdt en de overgang van het grove zand naar de humeuze klei vormt een zwakke plek omdat de schuifweerstand hier laag is.

Voor de nulsituatie en de gefaalde dijkwoning had het verschil in samendrukbare ondergrond geen invloed. De maatgevende glijcirkels staan in Bijlage G.

4.4.3.2 Zand als ondergrond

In Tabel 4.6 is te zien dat er bij de gefaalde dijkwoning geen verschil is tussen een klei- en zanddijk op fijn zand. Bij de nulsituatie en de aanwezigheid van de dijkwoning is er een verschil in de stabiliteitsfactoren. In de nulsituatie is de stabiliteitsfactor bij een kleidijk groter dan bij de zanddijk, terwijl de glijcirkels een soortgelijke vorm hebben. Bij de zanddijk ligt de freatische lijn in het dijklichaam alleen wat hoger, waardoor de korrelspanning iets meer is afgenomen dan bij de kleidijk. Hierdoor is de stabiliteitsfactor ook kleiner. Bij de aanwezigheid van de dijkwoning is de stabiliteitsfactor bij een kleidijk juist kleiner dan bij de zanddijk.

Zand als ondergrond heeft een lagere stabiliteitsfactor dan de bestaande situatie bij de nulsituatie van zanddijk op zand (1,573 tegen 1,729). Voor kleidijk op zand is de stabiliteitsfactor gelijk met de bestaande situatie. Bij de kleidijk op zand en de zanddijk op zand met de aanwezigheid van de dijkwoning zijn de stabiliteitsfactoren beide kleiner dan in de bestaande situatie (1,851 en 2,064 tegen 2,178). De glijcirkels gaan bij de zand als ondergrond beide recht onder de vloer door, terwijl het glijvlak in de bestaande situatie diep door de toplaag snijdt. De stabiliteitsfactoren bij de gefaalde dijkwoning zijn vrijwel gelijk aan de bestaande situatie en allen groter dan de vereiste stabiliteitsfactor van 1,2.

Zand als ondergrond heeft ervoor gezorgd dat de dijk minder veilig is, maar de verschillen in stabiliteitsfactoren zijn klein. De maatgevende glijcirkels staan in Bijlage G.

4.4.4 Kenmerken van een dijkwoning

De kenmerken van een dijkwoning hebben betrekking op de geometrie, locatie en eigenschappen van de constructieve elementen. De volgende kenmerken worden gevarieerd op de mogelijkheden binnen dijktraject 52-2:

- Kelder
- Woninglengte
- Locatie
- Onvoldoende sterke vloer

4.4.4.1 Kelder

In dijktraject 52-2 zijn er meer dijkwoningen met kelders. Iedere dijkwoning is anders, waarbij ook elke kelder andere afmetingen heeft. De invloed van een kelder op het afschuiven van het binnentalud verhoudt zich tot de diepte, lengte en breedte.

Kelderdiepte

Om de invloed van de kelderdiepte op de faalkans van de dijk te bepalen wordt de kelderdiepte gevarieerd binnen een bereik met voorkomende kelderdieptes van dijkwoningen binnen dijktraject 52-2. De kelderdieptes staan uitgedrukt ten opzichte van de bestaande kruinhoogte bij IJsseldijk 45 (7,40 m + NAP). De bestaande kelder heeft een diepte van 2,65 meter.

Tabel 4.7 – Stabiliteitsfactoren bij verschillende kelderdieptes voor de twee situaties.

Kelderdiepte [m t.o.v. kruinhoogte]	Aanwezigheid dijkwoning Stabiliteitsfactor, F_s [-]	Gefaalde dijkwoning Stabiliteitsfactor, F_s [-]
2,15	2,109	1,580
2,65	2,178	1,294
3,15	2,251	1,064
3,65	2,087	0,842

Zoals te zien in Tabel 4.7 heeft de kelderdiepte bij de aanwezigheid van de dijkwoning niet veel invloed op de stabiliteitsfactor, dit komt vanwege het feit dat de constructieve elementen bij deze situatie voldoende sterkte bevatten. De glijcirkel kan niet door de kelder muur snijden waardoor het effect van de diepte klein is.

Bij de gefaalde dijkwoning heeft de kelderdiepte veel invloed, waarbij de waarde van de stabiliteitsfactor zelfs onder de vereiste stabiliteitsfactor (1,2) komt. Dit betekent volgens de faaldefinitie uit 3.3.2.1 dat de dijk hierdoor zijn waterkerende functie verliest. Allereerst is het noemenswaardig dat de kelderdiepte van 3,65 meter afkomstig is van dijkwoning IJsseldijk 51. Deze dijkwoning staat op de binnenkruinlijn van een, vergeleken met de dijk ter plaatse van IJsseldijk 45, overgedimensioneerde dijk. Zo heeft deze dijk een 2 meter bredere kruin en bovendien een minder steile helling. Daardoor is het toepassen van deze kelderdiepte in bestaande kelder bij dwarsprofiel 52-2_0195 geen realistische situatie.

Ook bij een 3,15 meter diepe kelder komt de stabiliteitsfactor onder de 1,2. In de faaldefinitie uit 3.3.2.1 is ook te lezen dat de huidig toegepaste zonering van 3 meter restbreedte van de bestaande kruin een conservatieve aanname is. Daarom is voor deze situatie de zonering van het intredepunt ook opgelegd op 2,5 en 2 meter kruinbreedte. Hieruit kwamen achtereenvolgend de stabiliteitsfactoren 1,118 en 1,223.

Kelderlengte

De kelderlengte is hier gedefinieerd als de lengte evenwijdig aan het dwarsprofiel. De lengte van de kelder heeft geen invloed op de stabiliteitsfactor in de situatie van gefaalde dijkwoning. De glijvlakken bij de gefaalde woning snijden door de voorkant van het huis, een langere kelder richting de achterkant van de woning heeft geen invloed op deze glijvlakken.

De kelderlengte heeft bij de aanwezigheid van de dijkwoning wel invloed op de stabiliteitsfactor, dit is bij de kelderdiepte van 3,65 meter getest. Deze kelderdiepte is, zoals hierboven vermeld, niet realistisch in het bestaande dijklichaam. Bij deze kelderdiepte had een verhoging van de kelderlengte met 6 meter als gevolg dat de stabiliteitsfactor daalde van 2,087 naar 1,782. Het maatgevende glijvlak veranderde van diep door de ondergrond naar ondiep onder de vloer door. Deze glijvlakken zijn terug te vinden in Bijlage G.

4.4.4.2 Woninglengte

De woninglengte is gevarieerd door de voorgevel van de dijkwoning 1 meter verder op de kruin en 1 meter verder op het binnentalud te plaatsen. Bij de aanwezigheid van de dijkwoning veranderde met name de vorm van het glijvlak en deze nam een naar het oog onrealistische vorm aan bij de voorgevel 1 meter verder op de kruin. Het ondiepe glijvlak snijdt recht onder de vloer door, de stabiliteitsfactor bij dit glijvlak is 1,573. Met de methode Bishop lijkt er wel een realistisch glijvlak uit te komen met een stabiliteitsfactor die lijkt op de bestaande situatie (2,279 tegen 2,178). In Bijlage G zijn deze glijvlakken terug te vinden en in de Discussie zal hier verder op ingegaan worden. Bij de voorgevel 1 meter verder op het binnentalud had het glijvlak dezelfde vorm als in de bestaande situatie met een stabiliteitsfactor van 2,255, ten opzichte van 2,178 (bestaande situatie).

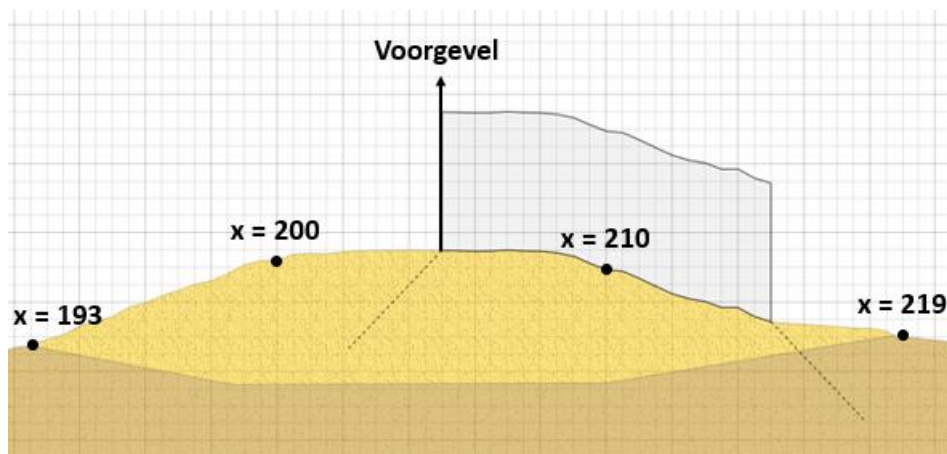
Bij de gefaalde dijkwoning met de voorgevel 1 meter verder op de kruin heeft de stabiliteitsfactor een waarde van 1,107. Ook voor deze situatie geldt dat de stabiliteitsfactor kleiner is dan de vereiste stabiliteitsfactor. Daarom is de zonering voor het intredepunt gelegd op 2,5 meter restbreedte van de bestaande kruin (zie Kelderlengte). Dit levert een stabiliteitsfactor van 1,205 op, hetgeen zou betekenen dat de dijk voldoende sterkte heeft.

Wanneer de voorgevel juist 1 meter verder op het binnentalud wordt gelegd, is de stabiliteitsfactor 1,409. Dit betekent dat de dijk zijn waterkerende functie behoudt.

4.4.4.3 Locatie

Over vrijwel de gehele IJsseldijk van dijktraject 52-2 loopt een weg over de kruin op de plek waar dijkwoningen zijn gesitueerd, op een enkele woning na (e.g. Rijkstraatweg 5, te Wilp). Hier is de dijk echter overgedimensioneerd en wordt verwacht dat de woning geen gevaar vormt. Veel dichter tegen de binnenkruinlijn dan dijkwoning IJsseldijk 45 komt niet voor binnen dijktraject 52-2, omdat de weg een groot deel van de kruin in beslag neemt.

Voor de invloed van de locatie wordt alleen gekeken naar dijkwoningen op en niet in het dijklichaam, dit zijn woningen met ondiepe funderingen en hierbij speelt alleen het eigen gewicht van de woning een rol (zie Bijlage F.1.4.3 voor verdere toelichting). De karakteristieke punten van het dijklichaam zijn globaal (Figuur 4.16): buitenteen ($x = 193$), buitenkruin ($x = 200$), binnenkruin ($x = 210$) en binnenteen ($x = 219$). De nulsituatie zonder belasting heeft een stabiliteitsfactor van 1,728.



Figuur 4.16 – Karakteristieke punten van het dijklichaam met een uniforme belasting op het profiel.

Tabel 4.8 – Stabiliteitsfactor bij verschillende locaties van een dijkwoning op het dijklichaam.

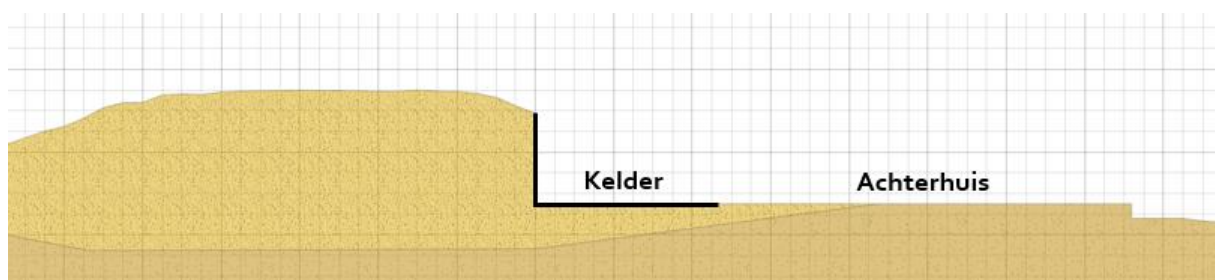
x-coördinaat voorgevel [m]	Stabiliteitsfactor bij 20 kN/m ² [-]	Vershil t.o.v. nulsituatie (1,728)	Stabiliteitsfactor bij 13 kN/m ² [-]	Vershil t.o.v. nulsituatie (1,728)
195	1,688	-2%	1,728	0%
200	1,335	-23%	1,423	-18%
202,5	1,028	-41%	1,103	-36%
205	0,962	-44%	1,142	-34%
206	0,981	-43%	1,172	-32%
206,5	0,980	-43%	1,224	-29%
207,5	1,045	-40%	1,258	-27%
208	1,085	-37%	1,299	-25%
209	1,131	-35%	1,288	-25%
209,5	1,321	-24%	1,461	-15%
210	1,533	-11%	1,643	-5%
215	2,072	20%	1,729	0%
220	1,728	0%	1,728	0%

Tabel 4.8 laat zien dat de stabiliteitsfactor bij de voorgevel op de binnenkruinlijn ($x = 210$) een daling van 11% heeft ten opzichte van de nulsituatie. De stabiliteitsfactor heeft met 1,533 echter nog een veilige waarde. Naarmate de dijkwoning verder op de kruin staat neemt de stabiliteitsfactor flink af, dijkwoningen die relatief verder op de binnenkruinlijn van dwarsprofiel 52-2_0195 staan komen vrijwel niet voor. Van de acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties is IJsseldijk 45 de woning op een binnenkruin met de minst brede kruin (zie Bijlage D.1). Aan het verschil tussen de stabiliteitsfactoren bij 20 kN/m² en 13 kN/m² voor de uniforme belasting te zien, heeft de grootte van het eigen gewicht van de dijkwoning veel invloed. De grootte van het eigen gewicht vertaalt zich met name in het aantal verdiepingen dat de woning telt.

4.4.4.4 Onvoldoende sterke vloer

In de bestaande situatie is er bij de aanwezigheid van dijkwoning IJsseldijk 45 een forbiddende lijn over de gehele vloer van de woning geschematiseerd, waardoor de vloer dient als blokkade tegen potentiële glijvlakken. Dit vanwege het feit dat de vloer bestaat uit beton met als uitgangspunt dat deze betonnen vloer voldoende sterkte bevat tegen opbarsten.

In deze situatie wordt in de gevoeligheidsanalyse de vloer van het achterhuis zonder forbiddende lijn getekend, omdat er ook een houten ondervloer had kunnen liggen. Kelders hebben van nature een zware vloer om opdrijven te voorkomen, dus daar is wel een forbiddende lijn gezet (Figuur 4.17).



Figuur 4.17 – Forbiddende lijn (vetgedrukte zwarte lijn) getekend in de kelder (beton) en niet in het achterhuis (hout).

Net als bij de situatie met gefaalde woning vindt er eerst een primaire afschuiving plaats met een stabiliteitsfactor kleiner dan 1,0. Van deze afschuiving wordt aangenomen dat de dijk genoeg reststerkte heeft waardoor het niet zal leiden tot het verliezen van het waterkerend vermogen. Voor het restprofiel is vervolgens een secundaire afschuiving berekend met een stabiliteitsfactor van 1,304. Dit is hoger dan de vereiste stabiliteitsfactor van 1,2, waardoor wordt aangenomen dat de dijk niet faalt.

4.4.5 Samenvatting resultaten gevoeligheidsanalyse

Om op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse een methode te ontwikkelen zullen ze eerst kort en bondig samengevat worden. De nulsituatie is de situatie zonder dijkwoning. In de situatie met dijkwoning is er een ontgroning geschematiseerd, omdat de dijkwoning zich in het grondlichaam bevindt (kelder). Bij de aanwezigheid van de dijkwoning wordt geacht dat al haar constructieve elementen voldoende sterkte hebben. Dit heeft ertoe geleid dat:

- De binnenwaartse macrostabiliteit ter plaatse van de dijkwoning wordt versterkt in de gevallen met een zandig en siltige klei en zand als ondergrond, de gemiddelde verandering in stabiliteitsfactor bedraagt van +23%.
- De binnenwaartse macrostabiliteit ter plaatse van de dijkwoning wordt verzwakt in het geval van een toplaag met kleiig zand en humeuze klei met gemiddeld -12%.
- De dijkwoning bij een eigen gewicht van meer dan 36 kN/m² een negatieve invloed heeft op de stabiliteit in de bestaande situatie.

- d. De kelderdiepte een verwaarloosbare invloed heeft op de stabiliteit van de dijk.

Als een dijkwoning een ondiepe fundering heeft en zich niet in het grondlichaam, maar op het grondlichaam, bevindt, heeft dit de volgende effecten:

- a. De negatieve invloed van een dijkwoning op de stabiliteit wordt groter naarmate deze zich meer op de kruin bevindt en een groter eigen gewicht heeft.
- b. Er is een positief effect op stabiliteit als een dijkwoning zich laag op het talud bevindt.

Bij de gefaalde dijkwoning in het grondlichaam wordt conservatief aangenomen dat al haar constructieve elementen zijn bezwaken en verdwenen. Dit heeft als gevolg dat:

- a. De dijkwoning bij de locatie op de binnenkruinlijn bij elke grondopbouw een negatieve invloed zal hebben, met gemiddeld -25%.
- b. De kelderdiepte bij de binnenkruin een significant negatieve invloed heeft op de stabiliteit, een verandering van -38% bij een verlaging van 0,5 m en mogelijk falen tot gevolg. Bij een verlaging van de kelderdiepte met 1 m verliest de dijk zijn waterkerende functie.

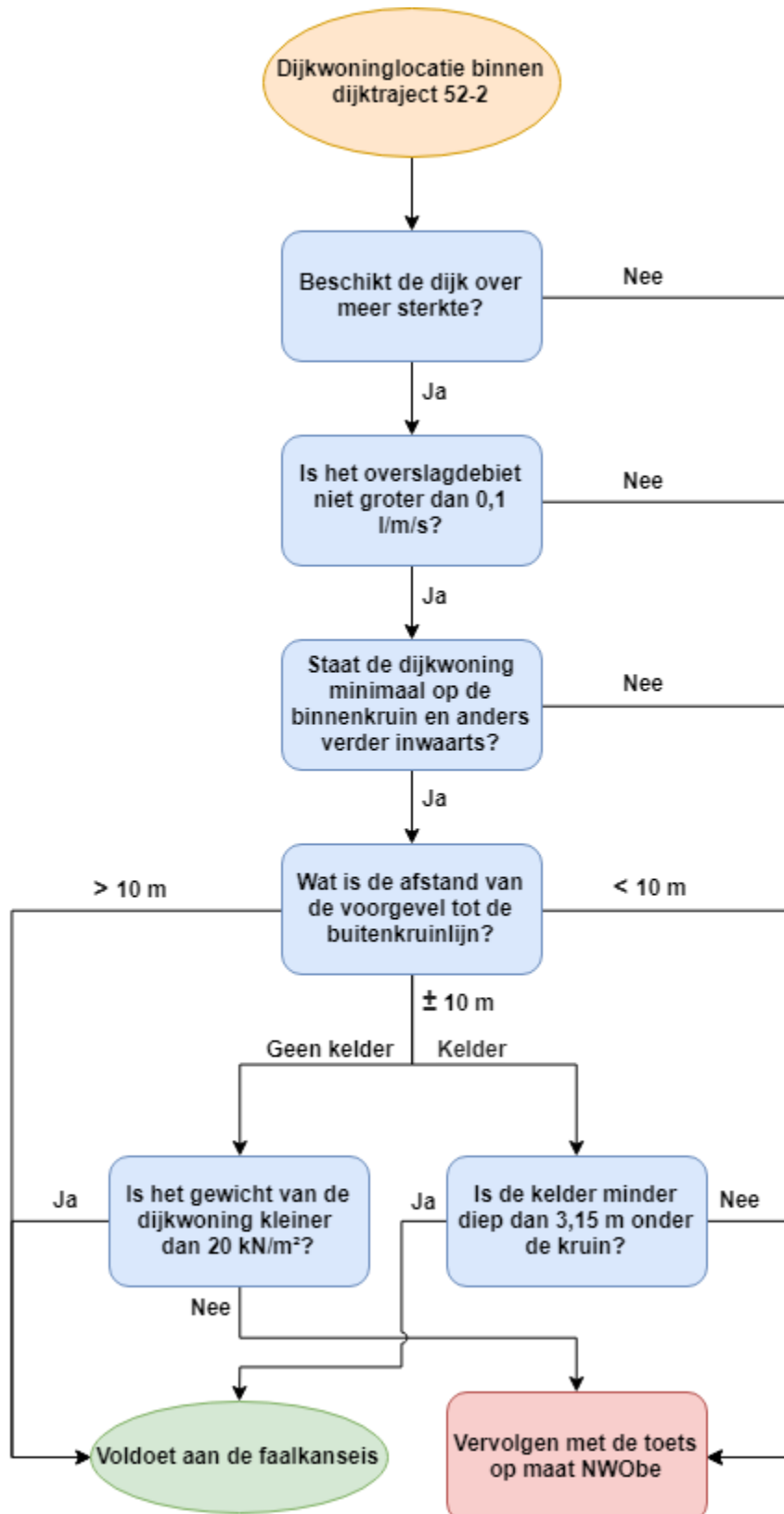
Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat bij de conservatief geschematiseerde maatgevende dijkwoninglocatie, er zowel positieve als negatieve effecten kunnen voordoen. In veel gevallen waarbij er een negatief effect werd waargenomen resulteerde dit vervolgens alsnog in een toetsoordeel dat ruim voldoet aan de signaleringswaarde (I_v). In de gevallen waarbij de maatgevende dijkwoning echt tot een potentieel risico op falen van de dijk heeft geleid, is bij een gefaalde kelder dieper dan 3,15 meter onder de binnenkruinlijn. Ook een dijkwoning met een ondiepe fundering en meer dan 20 kN/m² eigen gewicht dat op de binnenkruin staat, waarbij minder dan 10 meter kruinbreedte overblijft.

4.5 VERTALEN VAN PILOTSTABILITEITSBEOORDELING NAAR EEN EENVOUDIG TOEPASBARE METHODE

Het enige dat in de gevoeligheidsanalyse constant is gebleven is de geometrie van de dijk. Het kan gesteld worden dat het resultaat van de stabiliteitsbeoordeling bij de maatgevende dijkwoninglocatie IJsseldijk 45 van toepassing is om een toetsoordeel te geven dat aan de faalkanseis voldoet, wanneer de geometrie van de dijk bij een andere dijkwoninglocatie binnen dijktraject 52-2 over meer sterkte beschikt. Er zijn echter nog een aantal toepassingsvoorwaarden waaraan de dijkwoninglocatie moet voldoen:

1. Het overslagdebiet ter plaatse van de locatie is niet groter dan 0,1 l/m/s;
2. Bij een dijkwoning dat op de binnenkruin staat, moet minimaal 10 meter kruinbreedte overblijven.
3. Bij een dijkwoning dat op de binnenkruin staat, waarbij 10 meter kruinbreedte overblijft:
 - a. Is het eigen gewicht van een dijkwoning zonder kelder niet groter dan 20 kN/m² (drie verdiepingen volgens (Jongorius, 2016) en twee verdiepingen volgens (Witteveen+Bos, 2014)),
 - b. Of heeft een dijkwoning een maximale kelderdiepte van 3,15 meter onder de kruin.

Voor een dijkwoninglocatie die over minder sterkte beschikt dan de maatgevende dijkwoninglocatie kan vervolgens dezelfde methode voor de toets op maat worden doorlopen. De methode start in dat geval bij stap 4 (in Bijlage H). Om snel inzicht te krijgen over de sterkte van de dijk, kunnen de desbetreffende dwarsprofielen in een Excel-werkblad naast elkaar geplott worden, nadat ze zijn geschaald op de waterstand bij de norm. De flowchart staat weergegeven in Figuur 4.18.



Figuur 4.18 – Flowchart van de eenvoudig toepasbare methode voor de beoordeling van dijkwoninglocaties in dijktraject 52-2.

5 DISCUSSIE

Bij de aanwezigheid van de dijkwoning snijdt het glijvlak soms recht onder de vloer door, met een lage stabiliteitsfactor als gevolg. Als dit glijvlak vervolgens probabilistisch wordt berekend, komt er een verwaarloosbaar kleine faalkans uit. Significant kleiner dan de faalkans bij een diep glijvlak met een hogere stabiliteitsfactor in de situatie aanwezigheid dijkwoning. Het is onzeker of dit ondiepe glijvlak realistisch is te noemen, of dat dit gewoon een fout in het model is omdat het natuurlijk niet gemaakt is om een woning erin te schematiseren. De forbidden line op de vloer is de oorzaak. Als deze vervolgens met de methode Bishop worden berekend komt een glijvlak met bijbehorende stabiliteitsfactor uit die wel realistisch lijkt met sommige uitgevoerde LiftVan berekeningen. De methode LiftVan is echter wel de methode die door het WBI 2017 voorgedragen wordt.

D-Stability is een 2D-software en kan daardoor 3D-aspecten van dijkwoningen niet meenemen. Een glijvlak vindt vaak plaats over een minimale breedte van 30 meter. De breedte van een dijkwoning kan dus wel degelijk wat zeggen over de invloed op het glijvlak. Als de stabiliteitsfactor bij de situatie met dijkwoning groter is dan de situatie zonder dijkwoning betekent dit dat de locatie van de dijkwoning lokaal sterker is dan de aangrenzende delen van de dijk. Door het meenemen van de 3D-effecten zal de sterkte van de dijk echter lager uitvallen. Als de stabiliteitsfactor bij de situatie met dijkwoning kleiner is dan de situatie zonder dijkwoning betekent dit het tegenovergestelde, de locatie van de dijkwoning is een zwakke plek. Kijkend naar de minimale breedte van een afschuifvlak, deze zwakke plek zal minder zwak zijn door de sterkere aangrenzende dijk.

Bij IJsseldijk 45 is ook duidelijk te zien dat de woning op een iets een verhoging ligt ten opzichte van de aangrenzende dijk aan de noordzijde. Dwarsprofiel 52-2_0195 (zuidzijde) heeft een geometrie die meer overeenkomt met de vloerhoogtes van de dijkwoning. Dit wil zeggen dat de locatie van de dijkwoning lokaal sterker is dan de aangrenzende dijk aan de noordzijde, waardoor de resultaten van de berekening met het meenemen van het 3D-effect uit kunnen vallen.

De faalkans van de dijkwoning is niet meegenomen, maar zou wel degelijk de faalkans van de dijk kunnen verminderen. Er is nu namelijk een scenario meegenomen waarbij de dijkwoning gefaald is, wanneer aan dit scenario een faalkans van de dijkwoning kan worden gekoppeld zal dit een kleinere faalkans opleveren.

De eenvoudig toepasbare methode die in dit onderzoek is voorgeschreven berust op toepassingsvoorwaarden die zijn opgesteld op basis van de resultaten van de pilotstabiliteitsbeoordeling. Deze resultaten zijn gebaseerd op maatgevende eigenschappen die binnen dijktraject 52-2 voorkomen en zijn daarom niet toepasbaar op elk dijktraject. Om voor andere dijktrajecten toepassingsvoorwaarden op te stellen kunnen dezelfde stappen in dit onderzoek worden doorlopen, alleen dienen de maatgevende eigenschappen op het desbetreffende dijktraject te worden afgestemd. De maatgevende eigenschappen betreft de geometrie van de dijkwoninglocatie, de opbouw van de ondergrond en het dijklichaam, de grondeigenschappen van elke grondlaag, de hydraulische belastingen en de eigenschappen met betrekking tot de dijkwoning.

6 CONCLUSIE

6.1 INVLOED VAN EEN DIJKWONING OP DE BINNENWAARTSE MACROSTABILITEIT VAN DE IJSSELDIJK

In onderzoeksvraag 1 zijn de verschillende manieren waarop een dijkwoning invloed kan hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk onderzocht. Op welke manier een dijkwoning de stabiliteit van een dijk beïnvloed is afhankelijk van de situatie waarin deze zich verkeert. De aanwezigheid van een intacte dijkwoning zal de stabiliteit anders beïnvloeden dan een gefaalde woning. Bij de aanwezigheid van de dijkwoning treden er extra belastingen op het dijklichaam op, afhankelijk van de ligging van de dijkwoning ten opzichte van het glijvlak kan deze invloed zowel positief als negatief zijn. Wanneer de dijkwoning zich in het grondlichaam bevindt kan het tevens bijdragen aan de stabiliteit door mogelijke glijvlakken te blokkeren door middel van haar constructieve elementen. Bij de gefaalde woning is uitgegaan dat het eigen gewicht nog steeds aanwezig is en blijft het daardoor belasting uitoefenen op het dijklichaam. Daarentegen zullen de keldermuren hun grondkerende functie verliezen met mogelijke afschuivingen als gevolg.

6.2 TOETSOORDEEL STBI VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE ZONDER DIJKWONING

Om een toetsoordeel te geven over de binnenwaartse macrostabiliteit van de maatgevende dijkwoninglocatie is er begonnen met het uitvoeren van de gedetailleerde toets per vak. Om inzicht te krijgen in de invloed van de dijkwoning op de binnenwaartse macrostabiliteit, is eerst een berekening met de nulsituatie gedaan. Dit is gedaan voor twee dwarsprofielen langs de dijkwoning. Met een faalkans van $2,52 \cdot 10^{-27}$ jaar⁻¹ valt de veiligheid van dwarsprofiel 52-2_0195 (zuidzijde) in categorie Iv. Voor dwarsprofiel 52-2_0195+2 (noordzijde) valt de veiligheid met een faalkans van $3,42 \cdot 10^{-11}$ jaar⁻¹ ook in categorie Iv. Dit betekent dat de dijk ruim voldoet aan de signaleringswaarde.

6.3 TOETSOORDEEL STBI VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE MET DIJKWONING

Na het berekenen van de nulsituatie is de dijkwoning geschematiseerd in het bestaande model. Dit is gedaan voor zowel de situatie aanwezigheid dijkwoning als gefaalde dijkwoning. Met een faalkans van $1,90 \cdot 10^{-20}$ jaar⁻¹ bij de aanwezigheid van de dijkwoning in dwarsprofiel 52-2_0195 en een faalkans van $1,94 \cdot 10^{-17}$ jaar⁻¹ bij dwarsprofiel 52-2_0195+2 valt de veiligheid voor beide dijken in categorie Iv. Voor de situatie met gefaalde dijkwoning is de berekende stabiliteitsfactor bij beide dwarsprofielen groter dan de vereiste stabiliteitsfactor van 1,2, dit betekent dat de waterkering zijn waterkerende functie behoudt. Deze situatie is voor de volledigheid ook semi-probabilistisch doorgerekend en valt met een faalkans van $5,14 \cdot 10^{-11}$ jaar⁻¹ bij dwarsprofiel 52-2_0195 en een faalkans van $9,36 \cdot 10^{-13}$ jaar⁻¹ bij dwarsprofiel 52-2_0195+2. De maatgevende dijkwoninglocatie voldoet dus ruim aan de signaleringswaarde voor beide situaties.

6.4 INVLOED VAN VARIATIES IN EIGENSCHAPPEN OP DE STABILITEITSFACTOR

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat bij de conservatief geschematiseerde maatgevende dijkwoninglocatie, er zowel positieve als negatieve effecten kunnen voordoen. In veel gevallen waarbij er een negatief effect werd waargenomen resulteerde dit vervolgens alsnog in een toetsoordeel dat ruim voldoet aan de signaleringswaarde (Iv). In de gevallen waarbij de maatgevende dijkwoning echt tot falen van de dijk heeft geleid, is bij een gefaalde kelder dieper dan 3,15 meter onder de binnenkruinlijn. Dit is ook het geval bij een dijkwoning met ondiepe fundering en zonder kelder met een gewicht van meer dan 20 kN/m² dat op de binnenkruin staat.

6.5 VERTALEN VAN PILOTSTABILITEITSBEOORDELING NAAR EENVOUDIG TOEPASBARE METHODE

In vrijwel alle gevallen is de faalkans van de maatgevende dijkwoninglocatie verwaarloosbaar klein. Op basis van de gevallen waarbij de dijkwoning wel tot een verhoogde faalkans van de dijk heeft geleid, is een vertaalslag gemaakt naar een methode door het opstellen van toepassingsvoorwaarden waarvoor het toetsoordeel van de maatgevende dijkwoninglocatie ook geldt voor andere dijkwoninglocaties:

- De geometrie van de dijk bij een andere dijkwoninglocatie beschikt over meer sterkte;
- Het overslagdebiet ter plaatse van de dijkwoninglocatie is niet groter dan $0,1 \text{ l/m/s}$;
- Als een dijkwoning op de binnenkruin staat, moet er minimaal 10 meter kruinbreedte overblijven. Wanneer de kruinbreedte echter gelijk is aan 10 meter:
 - o Is het eigen gewicht van een dijkwoning zonder kelder niet groter dan 20 kN/m^2 ,
 - o Of heeft een dijkwoning een maximale kelderdiepte van 3,15 meter onder de kruin.

Voldoet een andere dijkwoninglocatie binnen dijktraject 52-2 aan deze toepassingsvoorwaarden, dan is de faalkans verwaarloosbaar klein. Voldoet een dijkwoninglocatie niet aan deze toepassingsvoorwaarden, dan kan vervolgens dezelfde methode voor de toets op maat worden doorlopen om tot een toetsoordeel te komen.

7 AANBEVELINGEN

7.1 ANDERE FAALMECHANISMEN

Dit onderzoek heeft zich gericht op het beoordelen van de binnenwaartse macrostabiliteit van de IJsseldijk ter plaatse van dijkwoningen. Om tot een volledig toetsoordeel te komen voor dijkwoningen in het kader van NWO's, zal er ook gekeken moeten worden naar andere faalmechanismen die beïnvloed zouden kunnen worden door dijkwoningen. In de masterscriptie van Jongerius (2016) staat voor veel faalmechanismen hoe deze door middel van bebouwing beïnvloed worden. Het rapport van Jongerius is echter voor het verschijnen van het WBI 2017 geschreven, waardoor dit niet in conformiteit is met het nieuwe beoordelingsinstrumentarium. Zo zijn de glijvlakanalyses voor de binnenwaartse macrostabiliteit bijvoorbeeld uitgevoerd met de methode Bishop in plaats van LiftVan. Dit rapport geeft echter wel een zeer goede inkijk in de invloeden van verschillende mogelijke scenario's met dijkwoningen op meerdere faalmechanismen.

7.2 BEHEERDERSOORDEEL FAALKANS DIJKWONING

Aangezien er een scenario is meegenomen waarbij de faalkans van de dijkwoning op 1 gezet, zou het mogelijk kunnen zijn dat dit een te conservatieve aanpak is waarbij er uitkomt dat bij meerdere locaties de dijk zal falen. In dit geval zou kwalitatief onderbouwd kunnen worden waarom deze dijkwoning wellicht niet zal falen. Dit is onderdeel van het beheerdersoordeel, dat in de regel niet getalsmatig hoeft te worden onderbouwd.

7.3 AANSCHERPEN HUIDIGE METHODE

Verder kan worden aanbevolen om het bepalen van de maatgevende dijkwoninglocatie nog eens opnieuw te beschouwen. Dit is namelijk uitgevoerd in een beginstadium waarbij nog niet alle kennis en inzichten beschikbaar waren. De maatgevende dijkwoninglocatie is toch een leidraad in het verslag, al zijn de maatgevende eigenschappen wel deels meegenomen in de gevoeligheidsanalyse. Door een meer maatgevende dijkwoninglocatie kunnen ook de toepassingsvoorwaarden worden aangescherpt, hetgeen ertoe leidt dat meer dijkwoninglocaties en met meer zekerheid goedgekeurd kunnen worden. De huidige methode die is gebruikt is redelijk eenvoudig toe te passen als een dwarsprofiel al in RisKeer is gezet met bijbehorende laagopbouw van de ondergrond en dijklichaam en grondeigenschappen. Dit kan vervolgens overgenomen worden in D-Stability. De enige toevoeging die dan gedaan moet worden is de dijkwoning en die kan redelijk vereenvoudigd worden geschematiseerd. Voor de uniforme belasting kan een waarde tussen de 10 kN/m² en 20 kN/m² worden aangenomen. Het dwarsprofiel kan worden ingeladen. Er wordt dan wel aangeraden om Waternet Creator te gebruiken bij de schematisering van de waterlijnen, omdat er dan meer consistentie is met de analyses in RisKeer.

7.4 3D-EFFECT EN LINTBEBOUWING

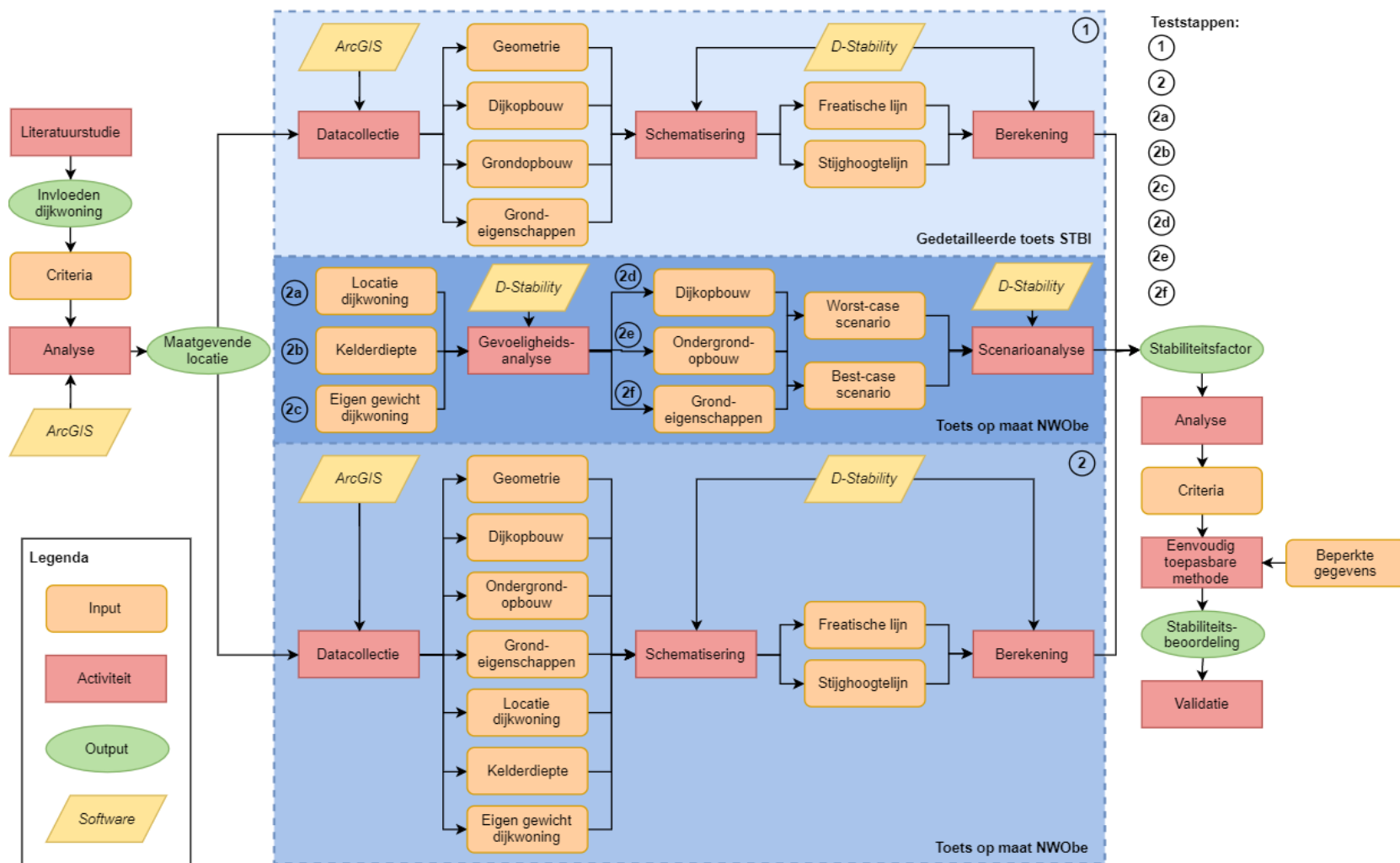
Om de methode ook bij een volgend dijktraject bruikbaar te maken zullen er aanbevelingen gedaan moeten worden. Het volgende te beoordelen dijktraject is 52a-1 en in tegenstelling tot dijktraject 52-2 is er daar in het dorp Veessen sprake van lintbebouwing op de dijk. In de Discussie zijn de 3D-effecten besproken, dus is het ook zinvol om te weten hoe dit zich verhoudt ten opzichte van lintbebouwing. In het geval van lintbebouwing zal door het meenemen van 3D-effecten de sterkte van de dijk juist niet veel veranderen, omdat de dijk op een afstand van de minimale breedte van een afschuifvlak (>30m) redelijk homogeen zal zijn. De breedte van de lintbebouwing speelt hierin natuurlijk ook een rol, bij lintbebouwing breder dan het potentieel maatgevende glijvlak kunnen de constructieve elementen wel extra stevigheid bieden door de schuifweerstand te verhogen.

REFERENTIELIJST

- Aguilar López, J. P. (2016). *Probabilistic Safety Assessment of Multi-functional Flood Defences*. PhD thesis, University of Twente, Enschede.
- Bossenbroek, J. (2019). *Achtergrondrapport niet-waterkerende objecten (NWO's)*. Advies & Automatisering. Ridderkerk: Waterschap Hollandse Delta.
- De Vree, J. (2019, November 10). *Paalfundering*. Retrieved from Joostdevree.nl: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/paalfundering.shtml>
- Deltares. (2012). *Gedetailleerde toetsmethode NWO's, achtergrondrapport*.
- Deltares. (2014). *gedetailleerde toetsmethode NWO-bebouwing, Plan van aanpak versie 2*.
- Expertise Netwerk Waterveiligheid. (2009). *Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken*. Delft: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Expertise Netwerk Waterveiligheid. (2016). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Grontmij. (2004). *Dijkkring 52: Veluwe, Dp 50-682 en Dijkkring 11: IJsseldelta, Dp 682-749, Resultaten laboratoriumonderzoek en proevenverzameling*. Grontmij.
- Helpdesk Water. (2017). *Over het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium*. Retrieved Oktober 4, 2019, from Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/beoordelingsronde-2017-2023/>
- Hoogwaterbeschermingsprogramma. (2016, Mei 10). *Vragen rondom Implementatie Nieuwe Normering (HWBP)*. Retrieved from Hoogwaterbeschermingsprogramma: <https://www.hoogwaterbeschermingsprogramma.nl/kennisbank/Nieuwe+Normering+documenten/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=516086>
- Jongerijs, Y. R. (2016). *Reliability of a dike influenced by a building*. MSc thesis, Technical University Delft, Hydraulic Engineering, Delft.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage I Procedure*. Helpdesk Water.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen*. Helpdesk Water.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage III Sterkte en Veiligheid*. Helpdesk Water.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2016). *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, WBI 2017*. Helpdesk Water.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen: Bijlage II, bedoeld in artikel 2 van de Regeling veiligheid*.
- NEN. (2017). *NED 9997-1+C2:2017 NL; Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene Regels*.

- Provincie Gelderland. (2019, November 16). *Zandbanen*. Retrieved from Open Data Gelderland: <https://opendata.gelderland.nl/toepassing/zandbanen>
- Rookus, R. (2019). *Concept Achtergrondrapport Macrostabieliteit (STBI en STBU) dijktraject 52-2*. Planvorming. Apeldoorn: Waterschap Vallei en Veluwe.
- STOWA. (2015). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen - Module B: Belastingen*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- STOWA. (2019, Oktober 15). Discussie bij Kennis- en KundePlatform (KKP). Amersfoort.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (1994). *Handreiking Constructief Ontwerpen + bijlagen*. Delft.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TRWD)*.
- Van der Meij, R. (2019). *D-Stability User Manual*. Delft: Deltares.
- Viehöfer, T., & Hergarden, I. (2015). *Dijkversterking primaire waterkering. Gebiedsontwikkeling Ooijen en Wanssum. Uitgangspunten en ontwerp groene keringen*. Nijmegen: Royal HaskoningDHV.
- Waterveiligheidsportaal. (2017, January 1). *Nationaal Basisbestand Primaire Waterkeringen (NBPW)*. Retrieved from Waterveiligheidsportaal: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>
- Witteveen+Bos. (2014). *NWO bebouwing op regionale keringen*. Rotterdam: Witteveen+Bos.

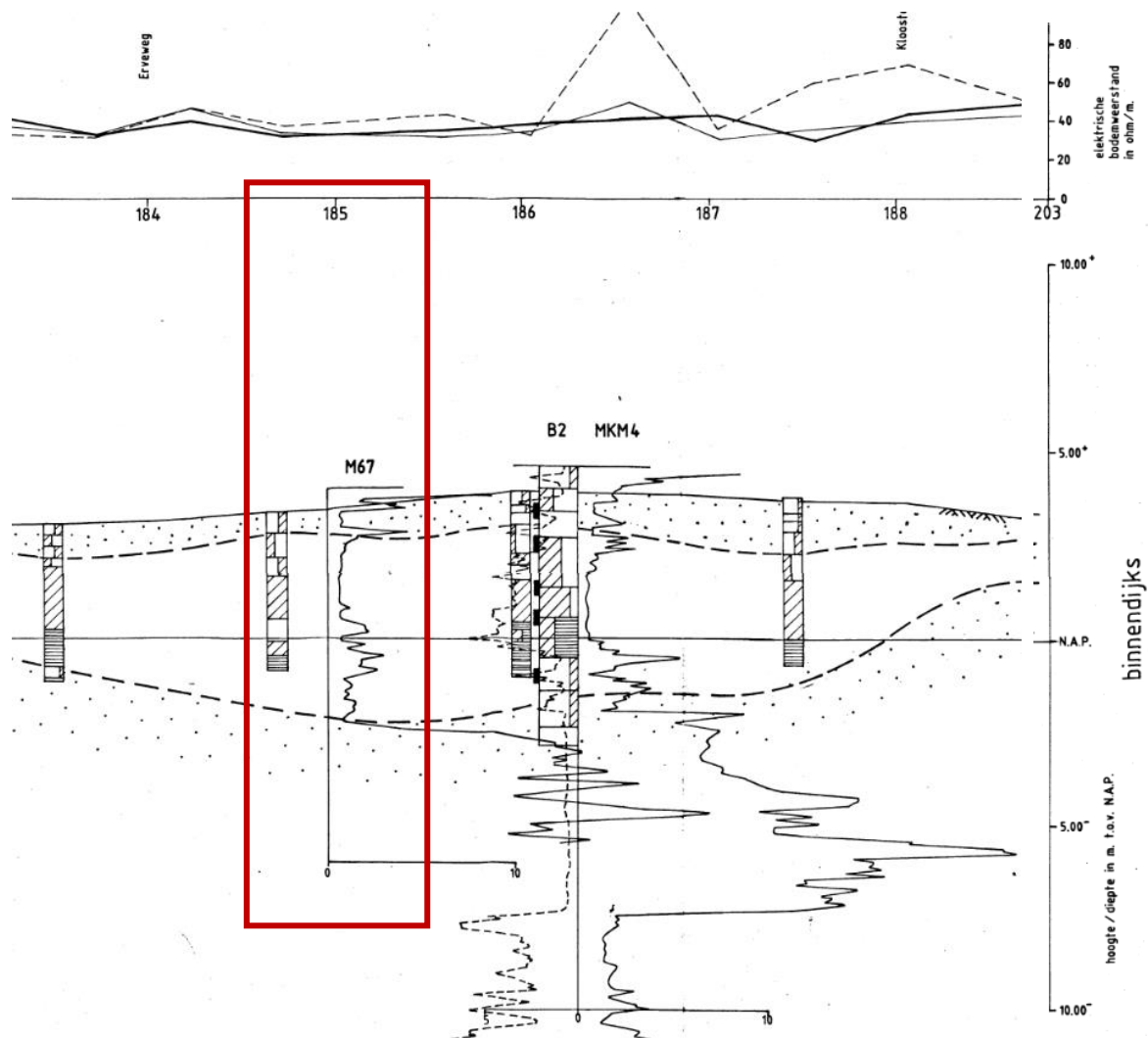
BIJLAGE A: METHODOLOGIE SCHEMA



Figuur A.1 – Schema van de methodologie.

BIJLAGE B: SONDERINGEN EN BORINGEN

De sonderingen van binnendijks en buitendijks zijn afkomstig uit hetzelfde bestand van 1990 uitgevoerd door Heidemij Adviesbureau, ze zijn alleen bijgesneden voor een overzichtelijkere weergave.



waterschap oost-veluwe
verbetering ijsselbandijk
scherpenhof - wetsum hmp. 218 - 180

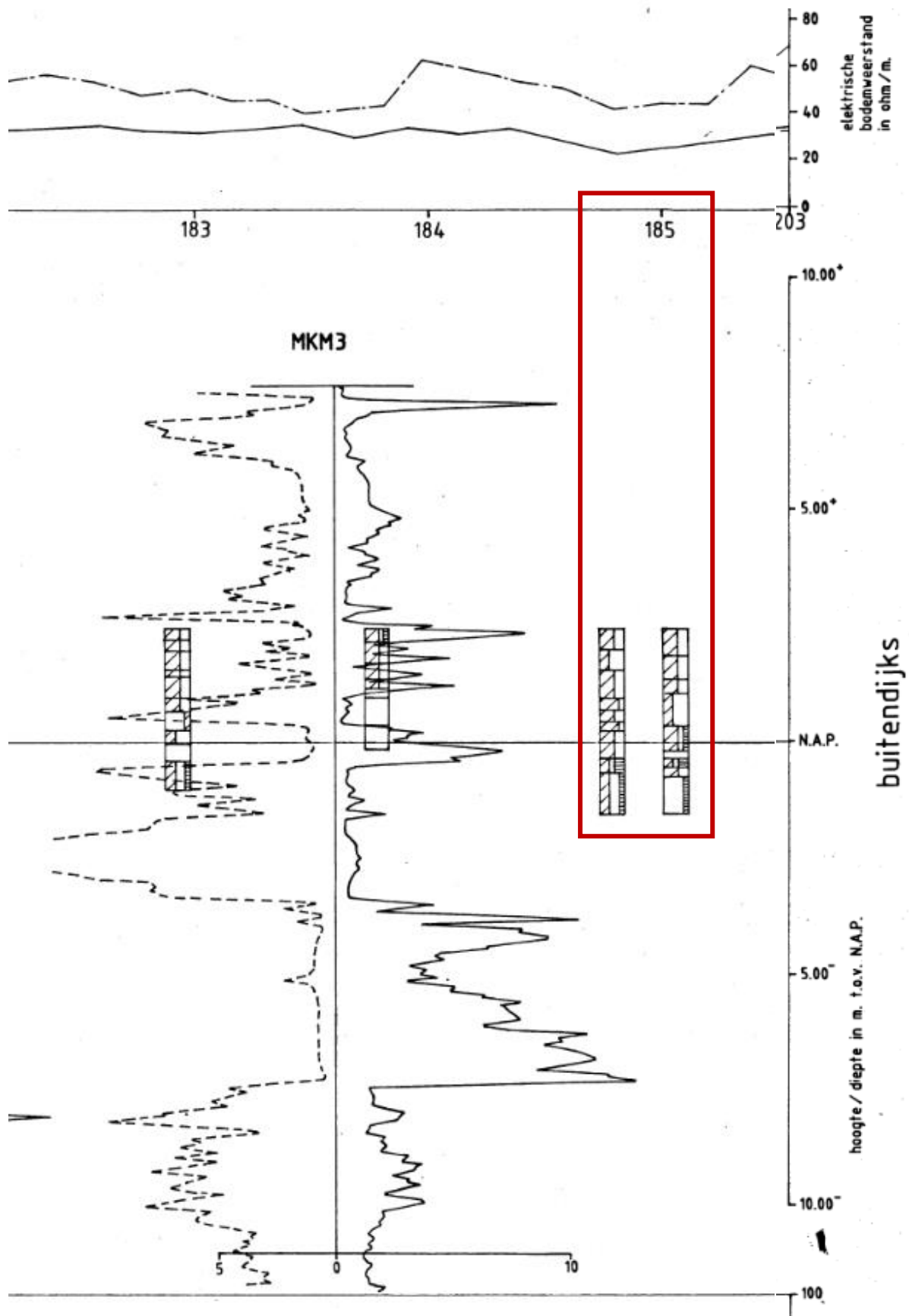
grondlengteprofiel hmp. 202 - 178

Getekend	gam.	gam.			
Gecontroleerd					
Datum	okt '87	juli '90			
Microfilm					

Heidemij Adviesbureau

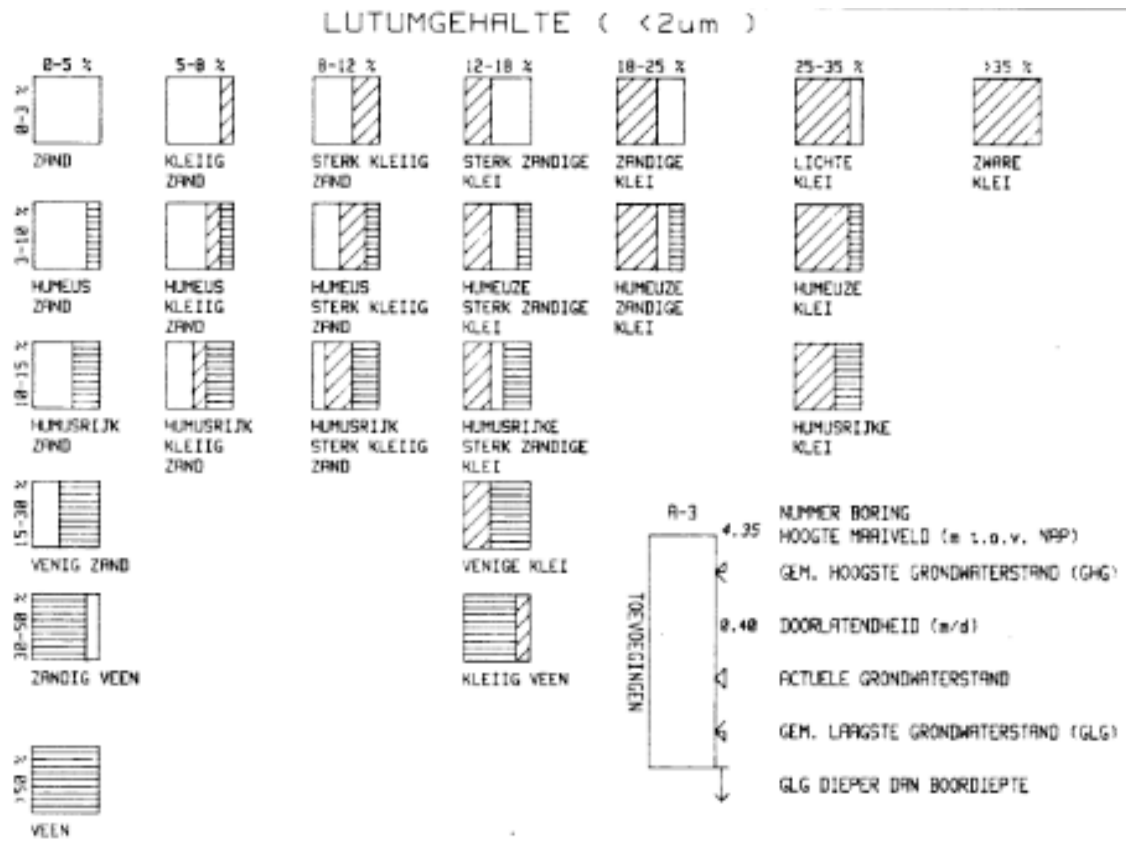
Projectnummer	634-16330
Tekening	7-6
Schaal	1 : 2000 / 1 : 100
Sector	g+w
Code Id	
Ind vorm	
Stadium	
Afmetingen	114 x 60
Projectleider	ir. g. stuimer
Vestigingsplaats	arnhem
Heidemij Adviesbureau BV Statutair gevestigd te Arnhem Handelsregister Arnhem 53755 Auteursrechten voorbehouden	

Figuur B.1 – Binnendijkse sondering (M67) en boring bij dijkwoninglocatie IJsseldijk 45 ter hoogte van dijkpaal 185.



Figuur B.2 – Buitendijkse boringen bij dijkwoninglocatie IJsseldijk 45 ter hoogte van dijkpaal 185

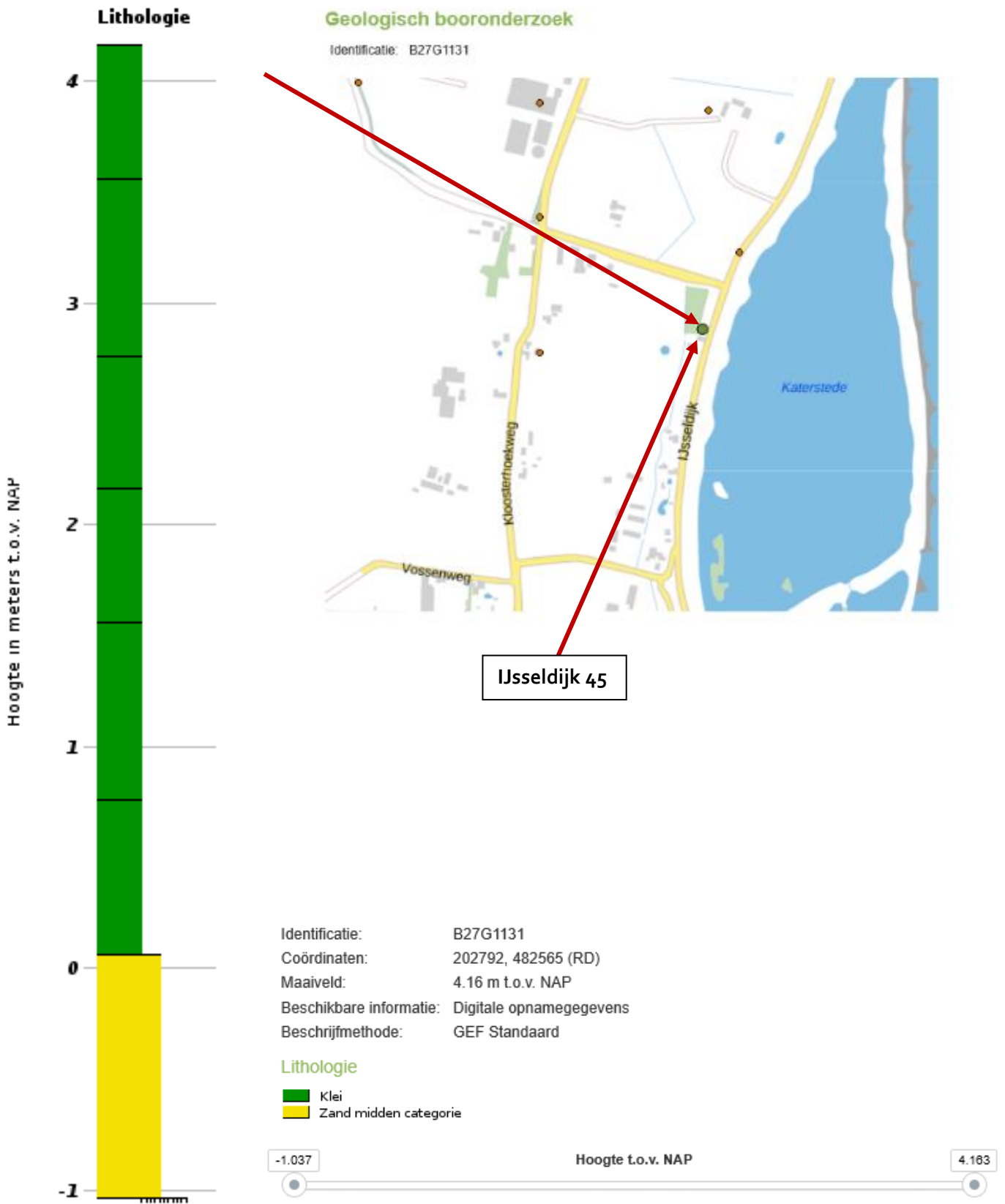
ORGANISCHE STOF GEHALTE



Figuur B.3 – Legenda voor Figuur B.1 en B.2.

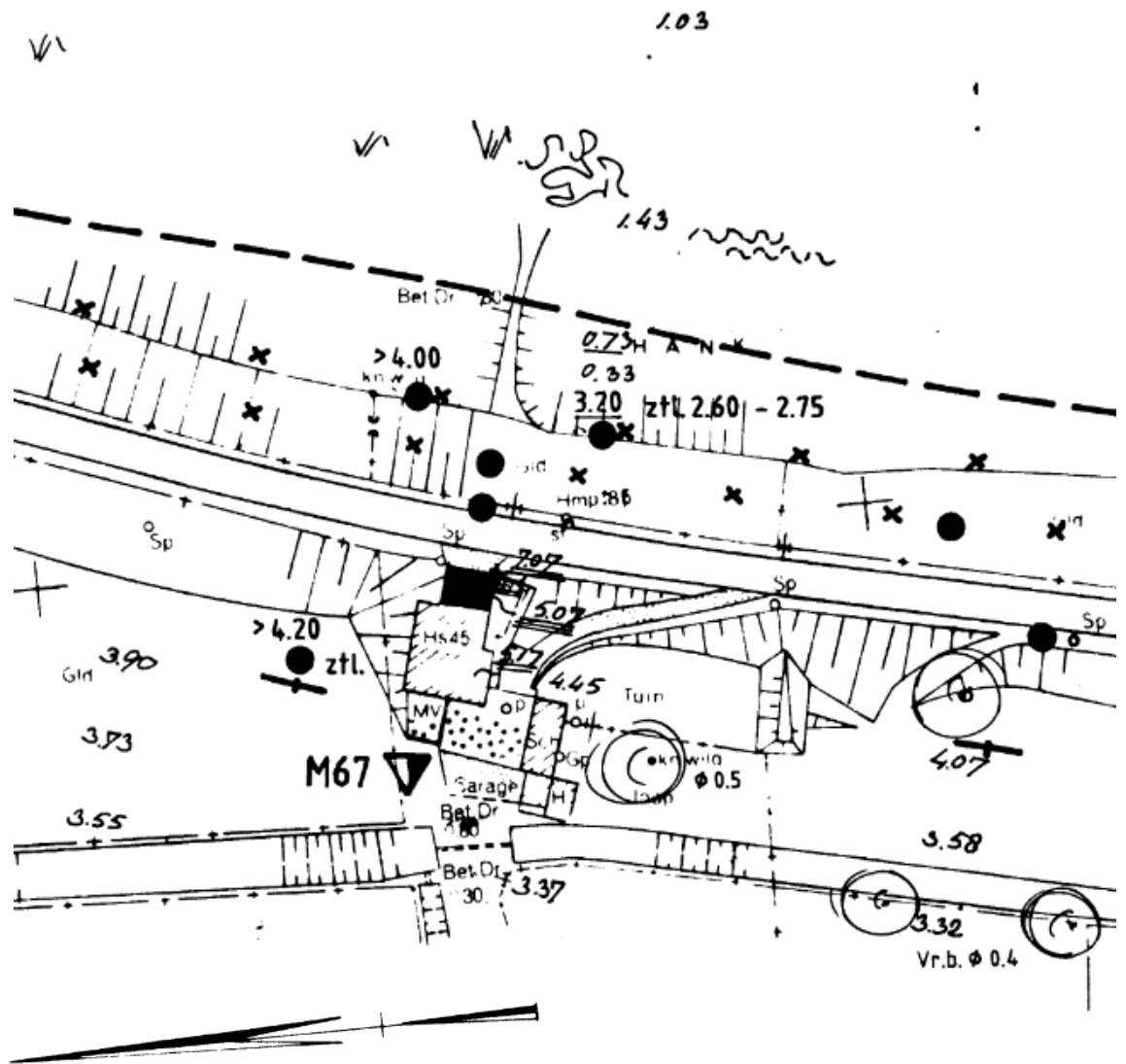


Figuur B.4 – Boring op de kruin ten noorden van IJsseldijk 45, uitgevoerd op 15 oktober 2019 door Fugro (DINOloket).



Figuur B.5 – Boring op de binnenteen bij dijkwoning IJsseldijk 45, uitgevoerd op 15 oktober 2019 door Fugro (afkomstig van DINOloket).

BIJLAGE C: BOUWTEKENINGEN



voor legenda zie tekening 6-1

waterschap oost-veluwe
verbetering ijsselbandijk
scherpenhof-welsum hmp. 218 - 180

situatie hmp. 194 - 180

Getekend	gam.	gam.	gam.
Gecontroleerd			
Datum	okt. '87	juli '90	nov. '90
Microfilm			

Heidemij Adviesbureau

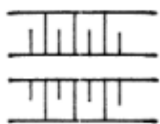


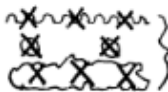





















































ARCHIEF
-1.203.12

Projectnummer	634-16330
Tekening	7-4
Schaal	1 : 1000
Sector	g+w
Code Id	
Ind vorm	
Stadium	
Almetingen	140 x 30
Projectleider	ir. g. sluiser
Vestigingsplaats	arnhem
Heidemij Adviesbureau BV Statutair gevestigd te Arnhem Handelsregister Arnhem 53755 Auteursrechten voorbehouden	

Figuur C.1 – Geotechnische tekening ter plaatse van dijkwoning IJsseldijk 45, uitgevoerd in 1990 door Heidemij Adviesbureau.

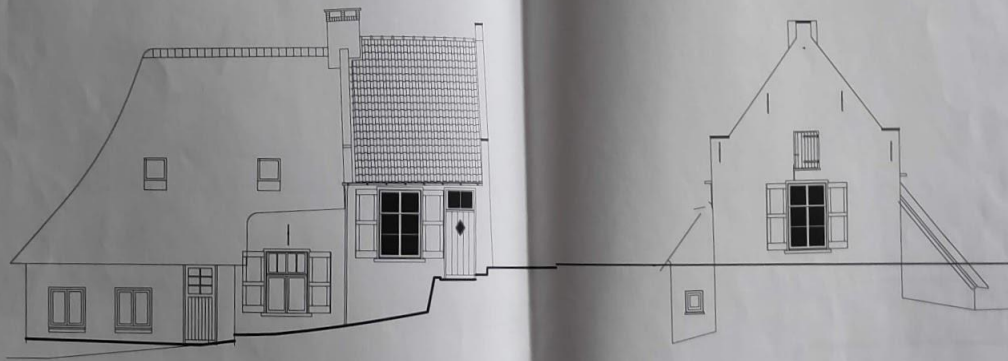
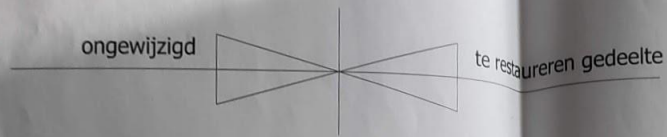
verklaring (voor zover van toepassing)

alle maten en afmetingen met twee cijfers achter de komma zijn meters, tenzij anders vermeld
de overige maten en afmetingen zijn millimeters, tenzij anders vermeld

<u>bestaande toestand</u>	<u>plan</u>																																																			
aanduidingen volgens NEN 3256 (tenzij anders vermeld)																																																				
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: right;">7.65</td> <td style="width: 35%;">terreinhoogte</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>7.50</u></td> <td>drempelhoogte</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">7.47</td> <td>vloerhoogte</td> <td style="text-align: right;">f.o.v. N.A.P. in m</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>5.57</u></td> <td>keldervloerhoogte</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><u>6.50</u></td> <td>bedemhoogte kruipruimte</td> <td></td> </tr> </table>	7.65	terreinhoogte		<u>7.50</u>	drempelhoogte		7.47	vloerhoogte	f.o.v. N.A.P. in m	<u>5.57</u>	keldervloerhoogte		<u>6.50</u>	bedemhoogte kruipruimte		<p>Dp 506 dwarsprofiel met nummer en opnamering</p>  <p>te verbeteren dijklichaam</p> <p>MHW + 6.49 maatgevende hoogwaterlijn f.o.v. N.A.P.</p> <p>1 : 3 taludhelling</p> <p>+ 7.44 planhoogte f.o.v. N.A.P.</p> <p>..... aankoopgrens</p> <p>----- werkgrens</p> <p> aankoopgrens (dwarsprofiel)</p> <p> werkgrens (dwarsprofiel)</p> <p> te rooien beplanting</p> <p> aan te brengen beplanting (door derden)</p>																																				
7.65	terreinhoogte																																																			
<u>7.50</u>	drempelhoogte																																																			
7.47	vloerhoogte	f.o.v. N.A.P. in m																																																		
<u>5.57</u>	keldervloerhoogte																																																			
<u>6.50</u>	bedemhoogte kruipruimte																																																			
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center;"></td> <td style="width: 35%;">meetlijn</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>as</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>afrostering</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>heg</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>houtwal</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>bomenrij</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>begin-einde houtwal</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>begin-einde bos-boomgaard</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>kant verharding</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>cultuurgrens</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>gevel</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>bovengr. leiding</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>beschoeiing-betuining</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>bovenkant rail</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>waterspiegel</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>bovenkant modder</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>rest</td> <td></td> </tr> </table> <p> beplanting</p>		meetlijn			as			afrostering			heg			houtwal			bomenrij			begin-einde houtwal			begin-einde bos-boomgaard			kant verharding			cultuurgrens			gevel			bovengr. leiding			beschoeiing-betuining			bovenkant rail			waterspiegel			bovenkant modder			rest		
	meetlijn																																																			
	as																																																			
	afrostering																																																			
	heg																																																			
	houtwal																																																			
	bomenrij																																																			
	begin-einde houtwal																																																			
	begin-einde bos-boomgaard																																																			
	kant verharding																																																			
	cultuurgrens																																																			
	gevel																																																			
	bovengr. leiding																																																			
	beschoeiing-betuining																																																			
	bovenkant rail																																																			
	waterspiegel																																																			
	bovenkant modder																																																			
	rest																																																			

Figuur C.2 – Legenda bij Figuur C.1.

werknummer: 7334 tek. 01 d.d. januari 1999

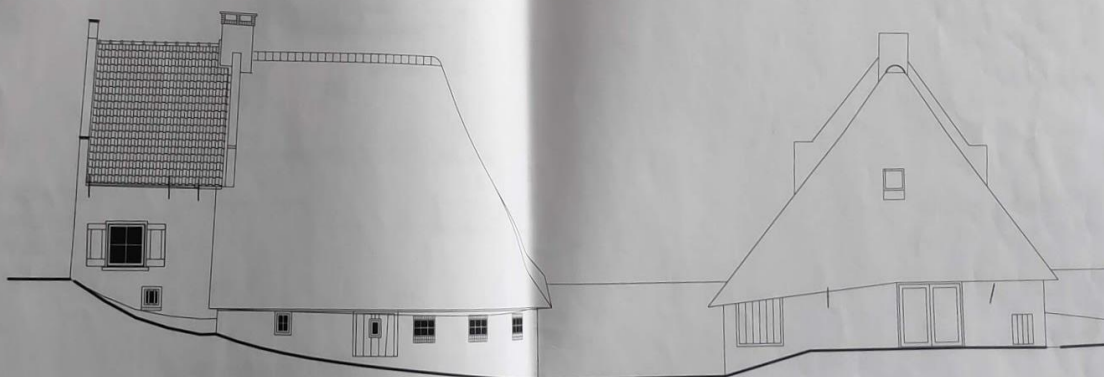


gewijzigde toestand zuidgevel

gewijzigde toestand oostgevel

architectenbureau brand dorpsstraat 48 7431 cl diepenveen tel. 0570-592323 fax 0570-592646

werknummer: 7334 tek. 02 d.d. januari 1999

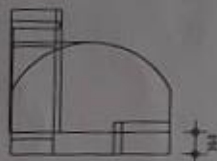
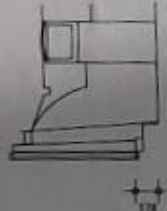
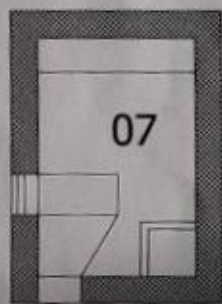


gewijzigde toestand noordgevel

bestaande toestand westgevel

architectenbureau brand dorpsstraat 48 7431 cl diepenveen tel. 0570-592323 fax 0570-592646

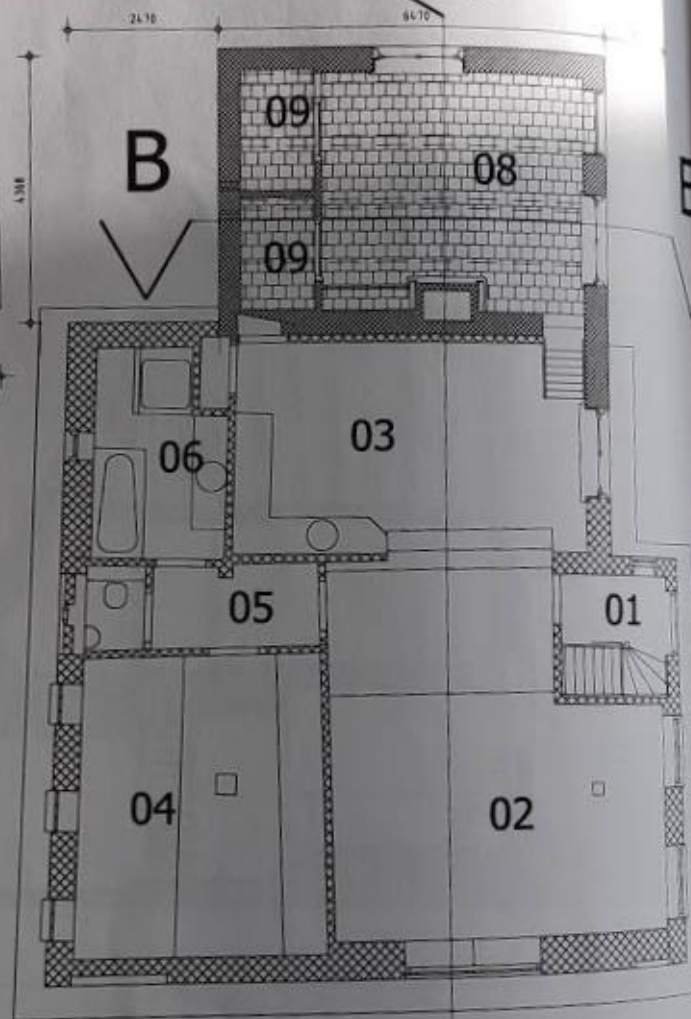
werknummer: 7334 tek. 01 d.d. januari 1999



bestaande plattegrond
kelder voorhuis
**PAS OP! NIVEAU 07 IS
CA. 380 LAGER DAN 03!!**

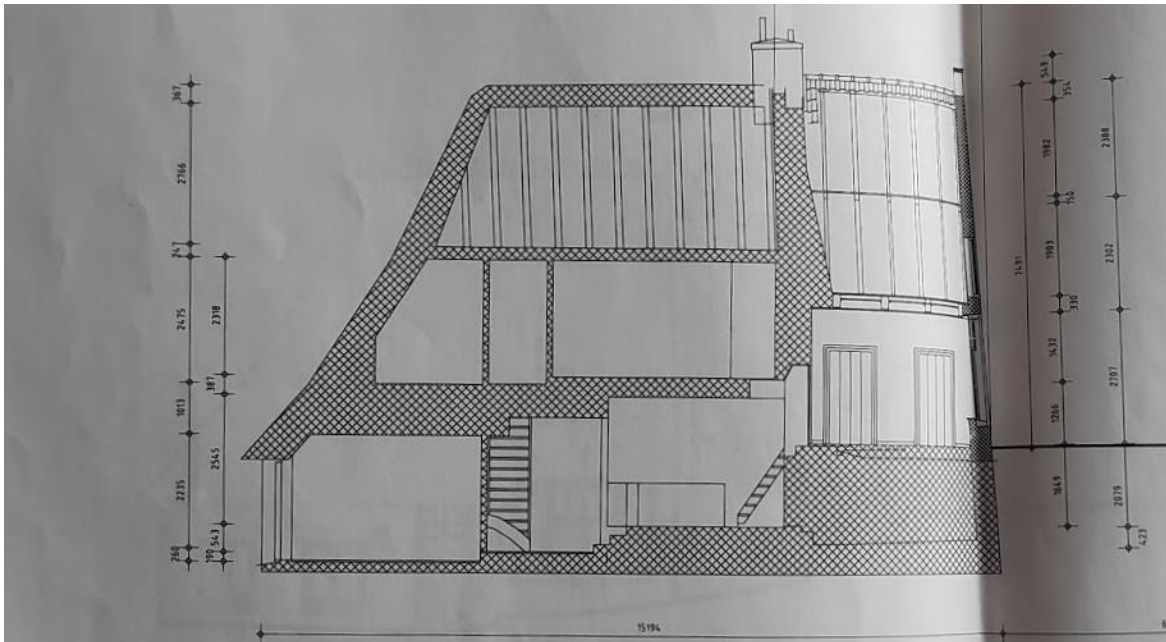
- 01 entree
- 02 zitkamer
- 03 eetkamer/keuken
- 04 slaapkamer
- 05 hal
- 06 badkamer
- 07 kelder
- 08 voorkamer
- 09 bedstee

- 10 overloop
- 11 werkkamer
- 12 werkkamer
- 13 bergkast
- 14 berging
- 15 zolderkamer
- 16 zolder

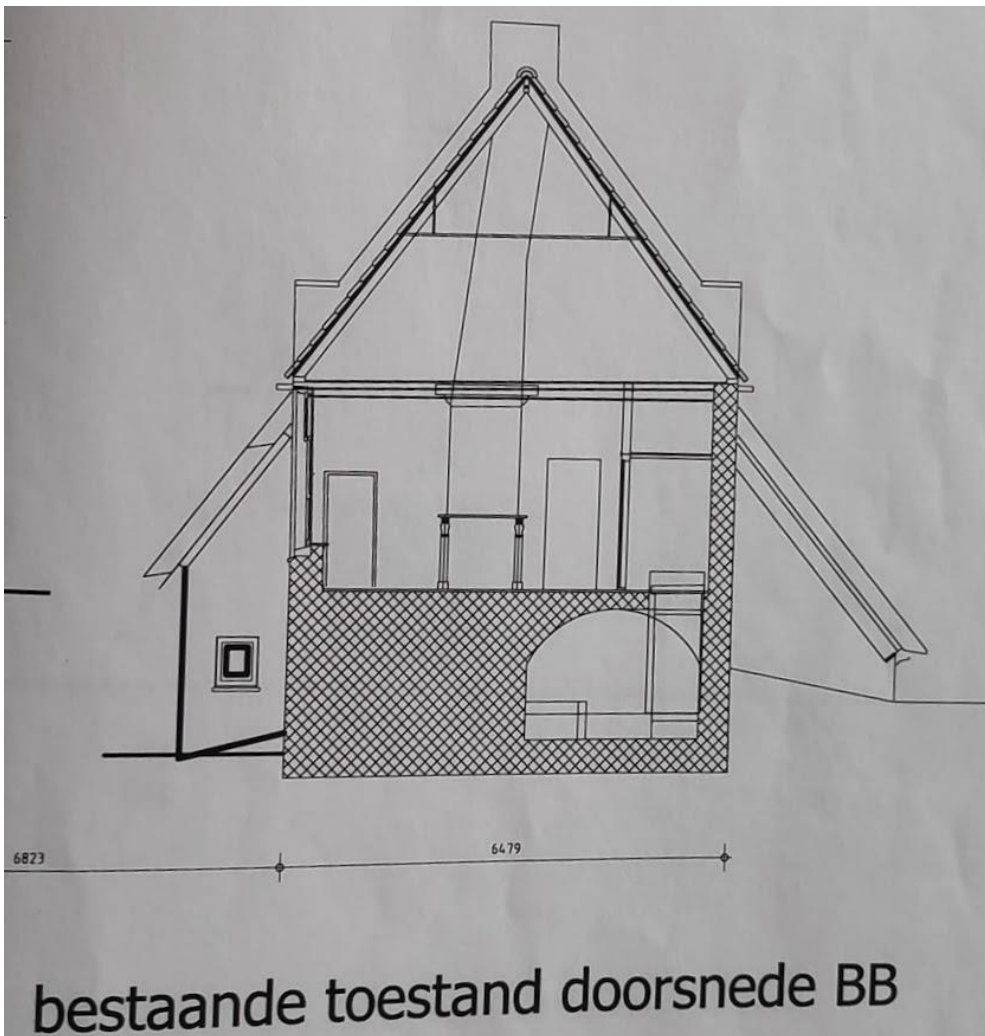


bestaande plattegrond beganegrand

architectenbureau brand dorpsstraat 48 7431 cl



bestaande toestand doorsnede AA



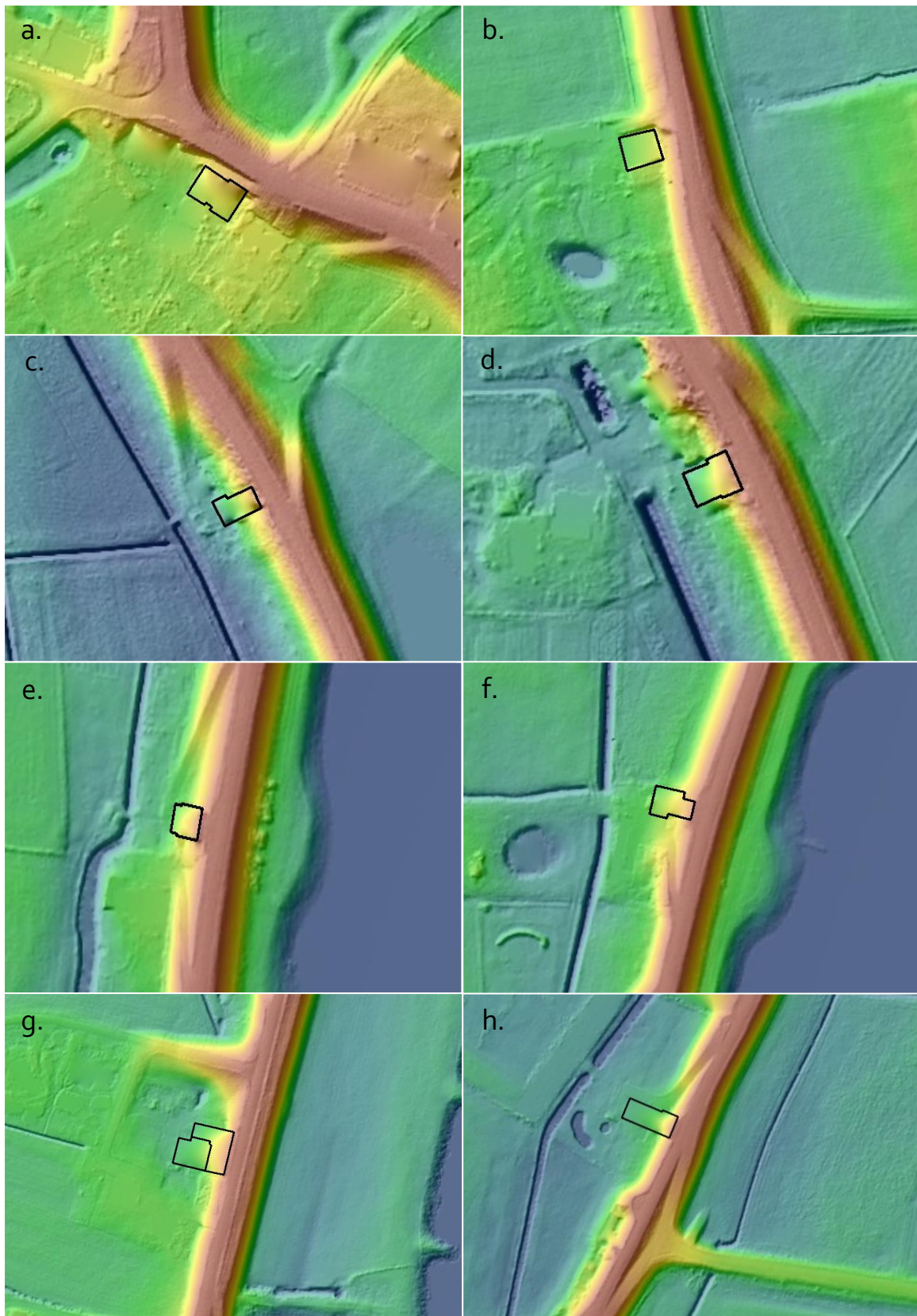
bestaande toestand doorsnede BB

BIJLAGE D: RESULTATEN ONDERZOEKSVRAAG 2

D.1 BEPALEN VAN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE

De acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties staan weergegeven op de bijbehorende AHN kaart (Figuur D.1).

De visuele impressie van de acht dijkwoninglocaties is door middel van schermafbeeldingen in Google Street View weergegeven in Figuur D.2. Alle dijkwoningen zijn binnendijks gelegen, bij enkele dijkwoningen is de schermafbeelding echter van een andere kant genomen omdat het daardoor beter zichtbaar is.



a. Banddijk 31
 c. IJsseldijk 19
 e. IJsseldijk 43
 g. IJsseldijk 51

b. Banddijk 49
 d. IJsseldijk 21
 f. IJsseldijk 45
 h. IJsseldijk 83

Figuur D.1 – De acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties weergegeven op de bijbehorende AHN kaart.



- a. Bandijk 31
- c. IJsseldijk 19
- e. IJsseldijk 43
- g. IJsseldijk 51

- b. Bandijk 49
- d. IJsseldijk 21
- f. IJsseldijk 45
- h. IJsseldijk 83

Figur D.2 – Visuele impressie van de acht dijkwoninglocaties middels schermafbeeldingen in Google Street View.









De relevante gegevens van de dijkwoningen staan weergegeven in Tabel D.1.

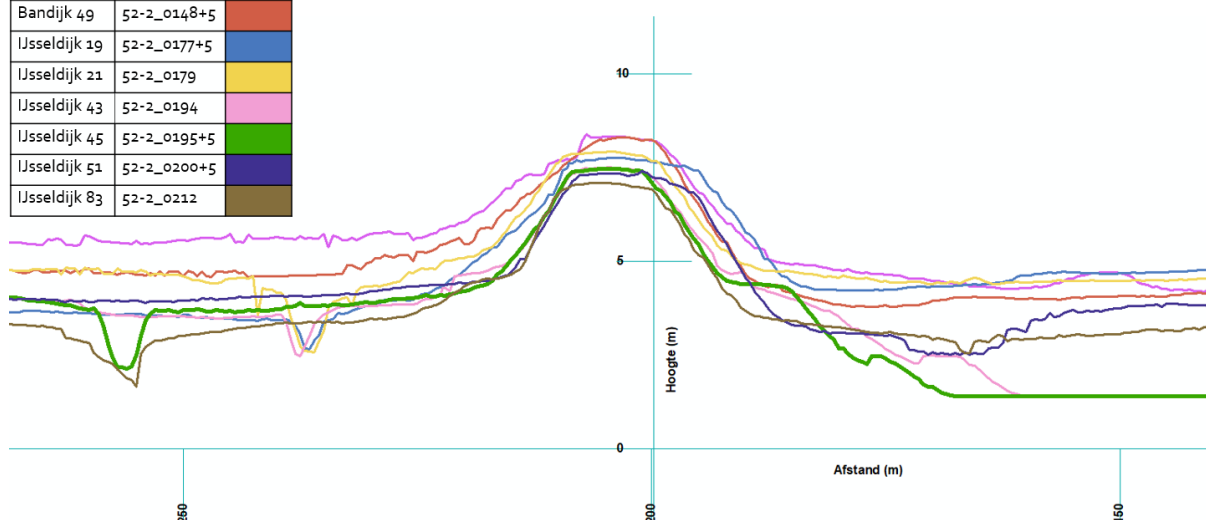
Tabel D.1 – Relevante gegevens van de acht maatgevende dijkwoningen.

Locatie	Plaats	Bouwjaar [jaar]	Kelder- vloerhoogte [m + NAP]	Dijkvak [-]	HM + DM [hm + dm]
Bandijk 31	Terwolde	1800	5,02	22	131 + 1
Bandijk 49	Terwolde	1848	4,19	24	148 + 4
IJsseldijk 19	Welsum	1925	5,69	28	177 + 5
IJsseldijk 21	Welsum	1924	5,04	28	179 + 1
IJsseldijk 43	Welsum	1907	5,47	31	193 + 8
IJsseldijk 45	Welsum	1910	5,07	31	195 + 1
IJsseldijk 51	Welsum	1896	4,00	32	201 + 0
IJsseldijk 83	Welsum	1906	4,13	32	211 + 9

Van deze acht dijkwoninglocaties is meer gedetailleerde informatie geanalyseerd met betrekking tot het dijkprofiel. Waar tot dusver alle informatie van de dijk gebaseerd is op interpretaties van de AHN-basiskaart, zijn nu de op basis van het AHN gegenereerde aanliggende dwarsprofielen van de dijkwoningen in Figuur D.3 geplott en geanalyseerd. De figuur geeft echter geen goed beeld van de verticale positie van de dwarsprofielen ten opzichte van de waterstand van de IJssel. Ze zijn weliswaar geplott op hun daadwerkelijke coördinaten, maar de dijkwoningen bevinden zich op verschillende locaties aan de rivier. Zo zit er bijvoorbeeld hemelsbreed een afstand van 7,45 kilometer tussen de locaties die het meest stroomopwaarts (Bandijk 31) en het meest stroomafwaarts (IJsseldijk 83) gelegen zijn. Dit heeft als gevolg dat de rivier verder stroomafwaarts ook lager gelegen is, waardoor de hoogte van de dijk en de waterstand bij de signaleringswaarde ten opzichte van NAP ook lager zullen zijn. Voor een goede vergelijking tussen de dwarsprofielen zou het wellicht beter zijn om de dwarsprofielen te schalen op basis van één waterstand. Figuur D.3 is echter wel een realistisch beeld van de absolute ligging van de profielen.

Legenda

Locatie	Dijkprofiel	Kleur
Bandijk 31	52-2_0131	
Bandijk 49	52-2_0148+5	
IJsseldijk 19	52-2_0177+5	
IJsseldijk 21	52-2_0179	
IJsseldijk 43	52-2_0194	
IJsseldijk 45	52-2_0195+5	
IJsseldijk 51	52-2_0200+5	
IJsseldijk 83	52-2_0212	



Figuur D.3 – Dwarsprofielen van de acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties tegen elkaar geplott.

Tabel D.2 – Meetresultaten van de belangrijkste kenmerken van de geometrie

Locatie	Profiellijn	Verval [m]	Kruinbreedte [m]	Kruinhoogte [m + NAP]	Waterstand bij de norm [m + NAP]	Kruin minus waterstand [m]
Banddijk 31	52-2_0131	2,58	9,24	8,28	7,18	1,1
Banddijk 49	52-2_0148+5	3,41	9,81	8,25	7,07	1,18
Ijsseldijk 19	52-2_0177+5	3,55	11,21	7,92	6,79	1,13
Ijsseldijk 21	52-2_0179	3,85	14,36	7,73	6,79	0,94
Ijsseldijk 43	52-2_0194	3,65	10,28	7,48	6,65	0,83
Ijsseldijk 45	52-2_0195+2	3,65	10,03	7,40	6,65	0,75
Ijsseldijk 51	52-2_0200+5	3,27	12,02	7,25	6,53	0,72
Ijsseldijk 83	52-2_0212	3,69	11,96	7,12	6,32	0,8

D.2 GEKOZEN MAATGEVENDE DIJKWONINGLOCATIE

Ijsseldijk 45 is gekozen als maatgevende dijkwoninglocatie binnen dijktraject 52-2 voor de pilot-beoordeling. Reden voor deze keuze staat beschreven in de 4.2.1.

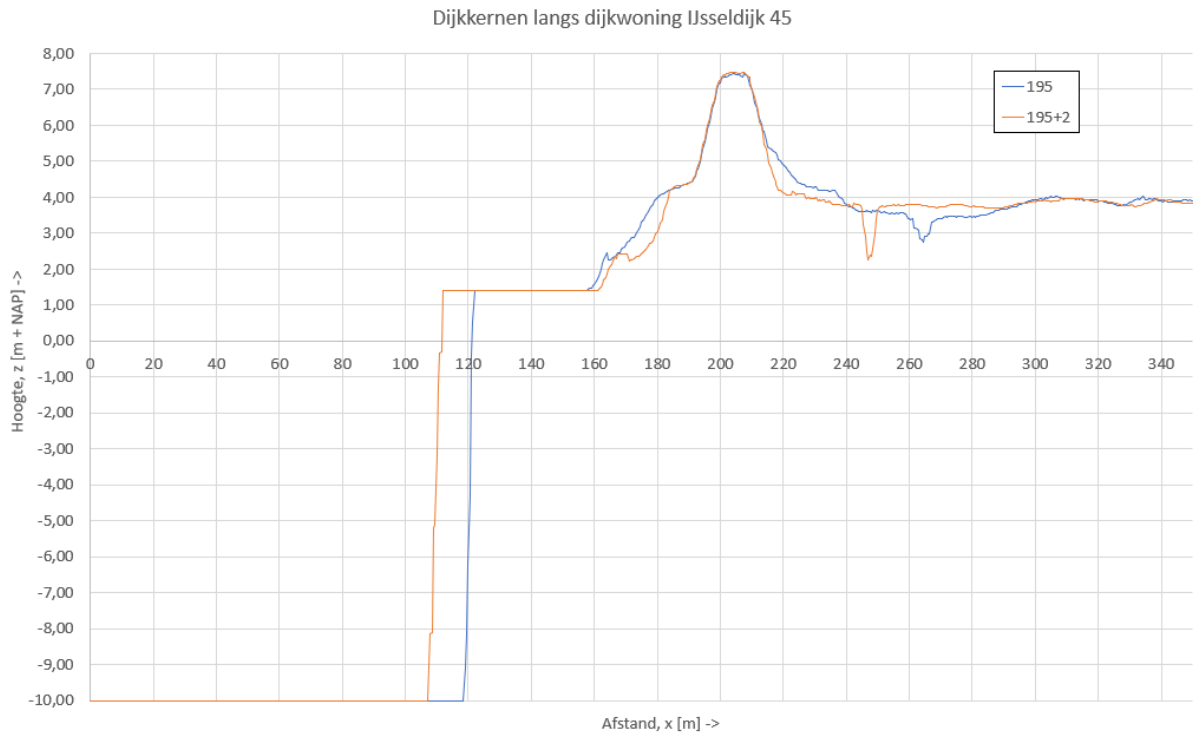
D.3 BEPALEN DEFINITIEVE DWARSPROFIEL VAN NULSITUATIE

Er zijn twee dwarsprofielen die dicht langs de dijkwoning zijn gegenereerd, met aan de zuidzijde dwarsprofiel 52-2_0195 en aan de noordzijde dwarsprofiel 52-2_0195+2 (Figuur D.4).



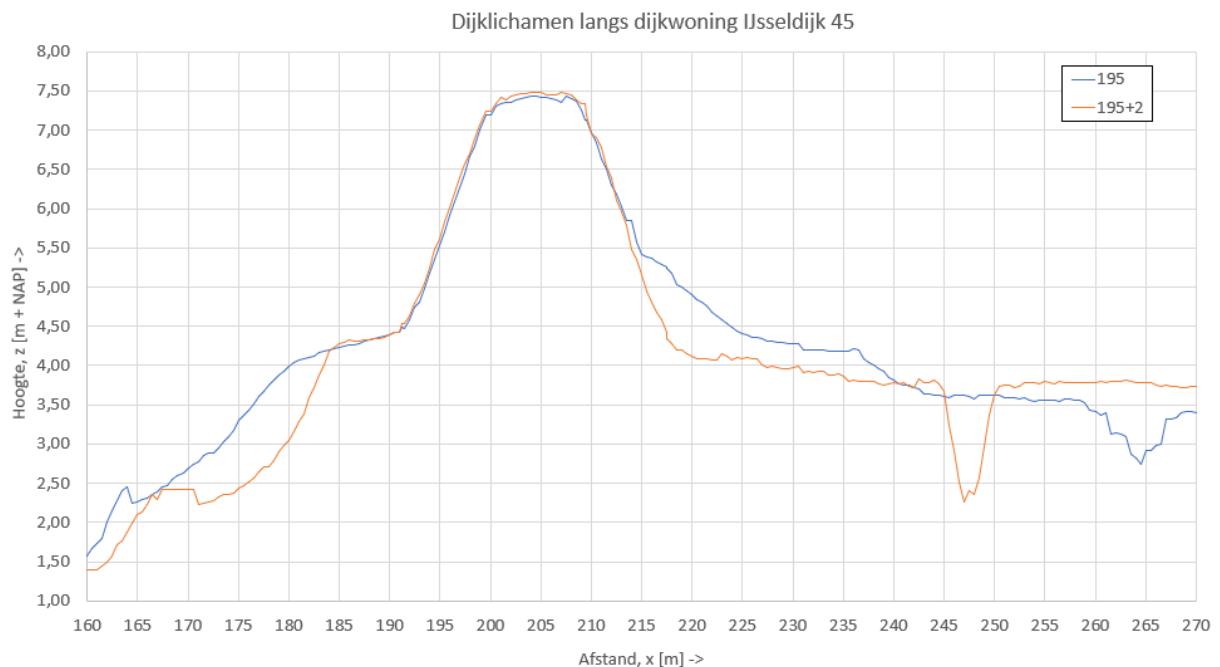
Figuur D.4 – De twee dwarsprofielen ten noorden (52-2_0195+2) en ten zuiden (52-2_0195) van dijkwoning Ijsseldijk 45.

De dwarsprofielen zijn anders georiënteerd dan in Figuur D.4, de rivier is hier aan de linkerkant gesitueerd zoals dat ook in D-Stability georiënteerd dient te worden. Het water op Figuur D.4 is overigens niet de IJssel, maar de kolk Katerstede in de oever gelegen. Over de bodem van deze kolk zijn in het AHN geen data beschikbaar, de -10 m t.o.v. NAP is geschat door het waterschap gebaseerd op het feit dat de kolk een zandwinning is.



Figuur D.5 – Dwarsprofiel 52-2_0195 (blauw) tegen dwarsprofiel 52-2_0195+2 (oranje).

In Figuur D.6 zijn de dwarsprofielen geplott met alleen het dijklichaam om beter inzicht te krijgen in de geometrie die relevant is voor de stabiliteit van het dijklichaam. Dwarsprofiel 52-2_0195 heeft een breder en hoger dijklichaam dan dwarsprofiel 52-2_0195+2. Aan de zuidzijde van de woning is de grond dus hoger gelegen dan aan de noordzijde.



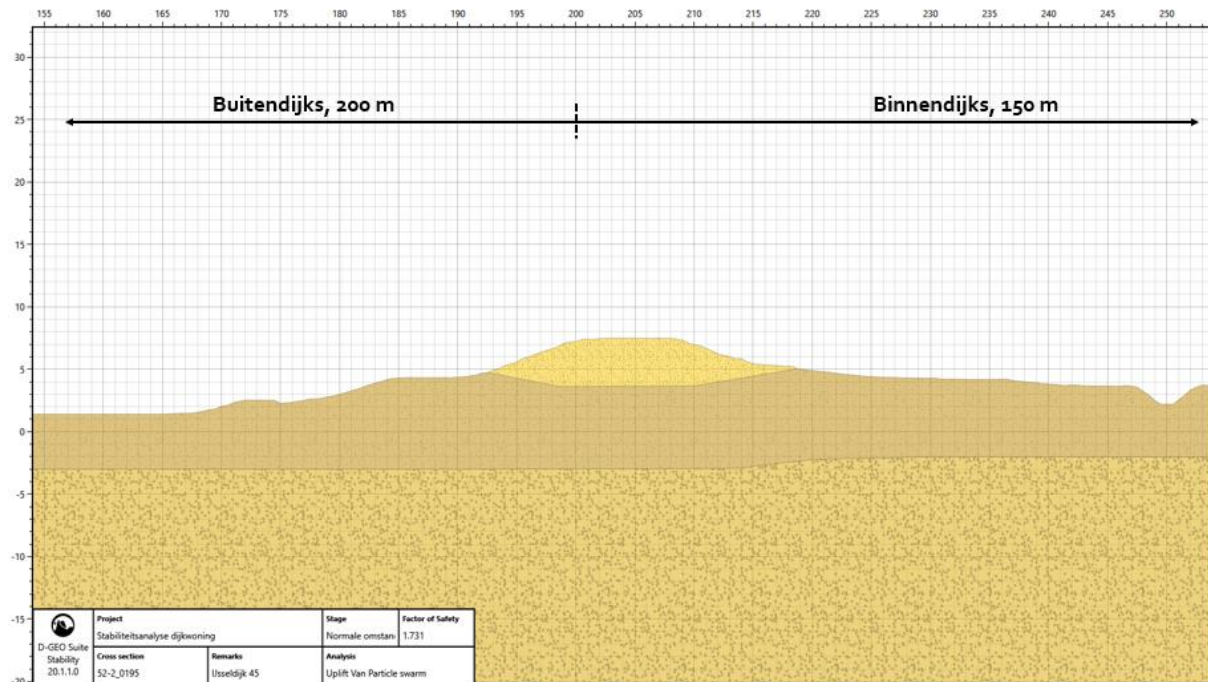
Figuur D.6 – Dijklichamen van dwarsprofielen 52-2_0195 (blauw) en 52-2_0195+2 (oranje) tegen elkaar geplott.

D.4 RESULTATEN GEDETAILEERDE TOETS STBI

De referentieberekening wordt uitgevoerd met de nulsituaties van de dwarsprofielen 52-2_0195 en 52-2_0195+2. De nulsituatie is de situatie zonder dijkwoning.

D.4.1 Schematisering

D.4.1.1 Geometrie



Figuur D.7 – Voorbeeld van geometrie dwarsprofiel 52-2_0195 in D-Stability, dit is een gedeelte van het totale dwarsprofiel.

D.4.1.2 Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam

Er is geen gebruik gemaakt van een globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) om de verschillende mogelijkheden (scenario's) van de ondergrondopbouw te beschrijven. Aangezien de sonderingen, boringen en de stabiliteitsbeoordeling op één specifieke locatie zijn uitgevoerd en deze beoordeling geldt op doorsnedeniveau in plaats van op vakniveau. Daarnaast zal in Onderzoeksvraag 4 een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd die verschillende verschillen in de opbouw van de ondergrond meeneemt.

D.1.4.5 Verkeersbelastingen

Naast permanente belasting van het eigengewicht en de veranderlijke hydraulische belastingen kan het dijklichaam ook belasting ondervinden van verkeer. De verkeersbelasting is echter niet meegenomen omdat het WBI 2017 niet vereist dat bij zeer extreme buitenwaterstand nog zwaar materieel op een dijk moet kunnen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Het gaat hier hooguit om de verkeersbelasting die zich in werkelijkheid voor kan doen. Ook hier geldt dat een realistische belasting vergelijkbaar is met een lichte vrachtauto met pick-up. Rekening houdend met de duur van de verkeersbelasting in relatie tot de snelheid van afschuiven is deze belasting verwaarloosbaar. Bovendien is dijktraject 52-2 niet aangewezen als vluchtroute bij calamiteiten.

D.4.2 Toetsoordeel

Voor een semi-probabilistische werkwijze geldt dat de binnenwaartse macrostabiliteit in een dijkvak dient te voldoen aan een faalkanseis. De faalkanseis voor een beoordeling per vak en mechanisme in de gedetailleerde toets wordt berekend op basis van de norm voor het dijktraject, de lengte van het dijktraject en de faalkansruimtefactor voor macrostabiliteit. Dit levert de faalkanseis voor macrostabiliteit binnenwaarts en kan worden berekend aan de hand van de volgende formule:

$$P_{eis,dsn} = \frac{\omega * P_{eis}}{1 + \frac{a * L_{traject}}{b}} \quad (1)$$

Waarin:

- $P_{eis,dsn}$ Faalkanseis voor binnenwaartse macrostabiliteit per doorsnede [1/jaar];
- P_{eis} Norm van het dijktraject [1/jaar];
- ω Faalkansruimtefactor voor binnenwaartse macrostabiliteit [-];
- a Mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte [-];
- b Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject [m];
- $L_{traject}$ Lengte van het dijktraject [m].

In Tabel D.3 staan de waarden voor de parameters gegeven. Deze zijn gebaseerd op dijktraject 52-2 en het toetsspoor macrostabiliteit binnenwaarts (STBI).

Tabel D.3 – Waarden voor de parameters voor formule (1).

Symbol	Waarde	Eenheid
$P_{eis,sig}$	1/3.000	[1/jaar]
$P_{eis,ond}$	1/1.000	[1/jaar]
ω	0,04	[-]
a	0,033	[-]
b	50	[m]
$L_{traject}$	24.360	[m]

Om een toetsoordeel per vak te geven wordt de berekende faalkans per doorsnede vergeleken met de faalkanseis per doorsnede. Met de gegevens uit Tabel D.3 kan de faalkanseis per doorsnede ($P_{eis,dsn}$) worden berekend en vervolgens de begrenzing van de categorieën. Voor het berekenen van de begrenzing, zie Tabel D.4.

Tabel D.4 – Berekening van de begrenzing per categorie (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

Categorie	Beschrijving	Begrenzing categorie [1/jaar]
I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f,dsn} < 1/30 * P_{eis,sig,dsn}$
II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde	$1/30 * P_{eis,sig,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,sig,dsn}$
III _v	Voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	$P_{eis,sig,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,ond,dsn}$
IV _v	Voldoet mogelijk aan de ondergrens en/of aan de signaleringswaarde	$P_{eis,ond,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,ond}$
V _v	Voldoet niet aan de ondergrens	$P_{eis,ond} < P_{f,dsn} < 30 * P_{eis,ond}$
VI _v	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f,dsn} > 30 * P_{eis,ond}$

Waarin:

- $P_{f,dsn}$ Faalkans per doorsnede [1/jaar];
- $P_{eis,sig}$ Signaleringswaarde van het dijktraject [1/jaar];
- $P_{eis,ond}$ Ondergrens van het dijktraject [1/jaar];
- $P_{eis,sig,dsn}$ Faalkanseis per doorsnede bij de signaleringswaarde [1/jaar];
- $P_{eis,ond,dsn}$ Faalkanseis per doorsnede bij de ondergrens [1/jaar].

Bij het berekenen van de binnenwaartse macrostabiliteit van een dijk moet rekening gehouden worden met verschillende onzekerheden die de uitkomst kunnen beïnvloeden. Hierbij moet gedacht worden aan onzekerheden in materiaaleigenschappen, in de schematisering van de ondergrond en waterspanningen en modelonzekerheden. Om de onzekerheden in materiaaleigenschappen af te dekken kunnen de karakteristieke waarden (5% ondergrenswaarden) gecorrigeerd worden met een materiaalfactor (γ_m) en zo tot rekenwaarden te komen. De materiaalfactoren zijn echter gelijk aan 1,0 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). De onzekerheid over de ondergrond en waterspanningen worden afgedekt door het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse, de schematiseringsfactor (γ_b) kan hierom gelijk worden gesteld aan 1,0. Door het afdekken van deze onzekerheden kan tot een voldoende betrouwbare beoordeling van de dijk gekomen worden.

Om een toetsoordeel te geven kan gekeken worden binnen welke begrenzing de berekende faalkans per doorsnede valt, zodat aan deze faalkans een categorie toegekend kan worden. De begrenzing van de categorieën staan weergegeven in Tabel D.5.

Tabel D.5 - Categoriëring toetsoordeel per vak voor binnenwaartse macrostabiliteit.

Categorie	Beschrijving	Ondergrens [1/jaar]	Bovengrens [1/jaar]
I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	0	1/38.426.378
II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde	1/38.426.378	1/1.280.879
III _v	Voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	1/1.280.879	1/426.960
IV _v	Voldoet mogelijk aan de ondergrens en/of aan de signaleringswaarde	1/426.960	1/1000
V _v	Voldoet niet aan de ondergrens	1/1.000	1/33
VI _v	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	1/33	1

BIJLAGE E: RESULTATEN ONDERZOEKSVRAAG 3

E.1 RESULTATEN TOETS OP MAAT NWOBE

De toets op maat op NWO-bebouwing is de gedetailleerde toets op binnenwaartse macrostabiliteit waarbij de invloed van de dijkwoning is geschematiseerd. De toets op maat is op semi-probabilistische wijze uitgevoerd in D-Stability (versie 20.1.1) door glijvlakanalyses volgens de methode LiftVan.

E.1.1 Schematisering

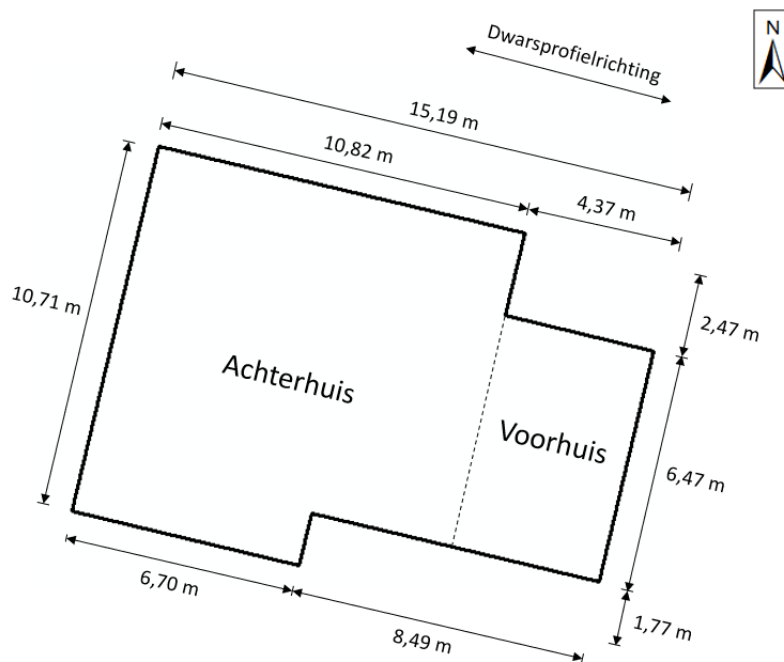
Voor de schematisering van de invloed van dijkwoning IJsseldijk 45 op het bijbehorende dijklichaam zijn de dwarsprofielen, laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam, de eigenschappen voor elke grondlaag en de hydraulische belastingen overgenomen uit de gedetailleerde toets op STBI van Onderzoeksvraag 2. De invloed van de dijkwoning op de binnenwaartse macrostabiliteit is geschematiseerd in een situatie zonder en in een situatie met gefaalde dijkwoning.

E.1.1.1 Invloed aanwezigheid dijkwoning

Zonder falen van de dijkwoning wordt de invloed geschematiseerd door de bestaande geometrie van de woning en de permanente belasting als gevolg van het eigengewicht te implementeren.

Geometrie

Alle tweedimensionale afmetingen van de dijkwoning staan in Figuur E.1.



Figuur E.1 – Tweedimensionale afmetingen dijkwoning, verkregen uit bouwtekeningen en ArcGIS.

In Figuur 4.2 is te zien dat de drempelhoogte van het achterhuis boven de ingemeten dwarsprofielen van 52-2_195 en 52-2_0195+2 ligt. Dit is deels te verklaren doordat onder de drempelhoogte nog een vloer en een eenvoudige fundering op staal liggen. Daarnaast is de drempelhoogte van het achterhuis gemeten bij de deur op $x = 219$, aan de zuidzijde, en de zijgevel loopt af tot de achtergevel (zie Figuur E.2). Hierdoor is er een hoogteverschil tussen de drempelhoogte en de onderkant van de achtergevel. Het hoogteverschil tussen de grond bij de achtergevel en bij de deur bedraagt $5,0 - 4,4 = 0,6$ meter en tussen de achtergevel en tussen de voorkant van het achterhuis

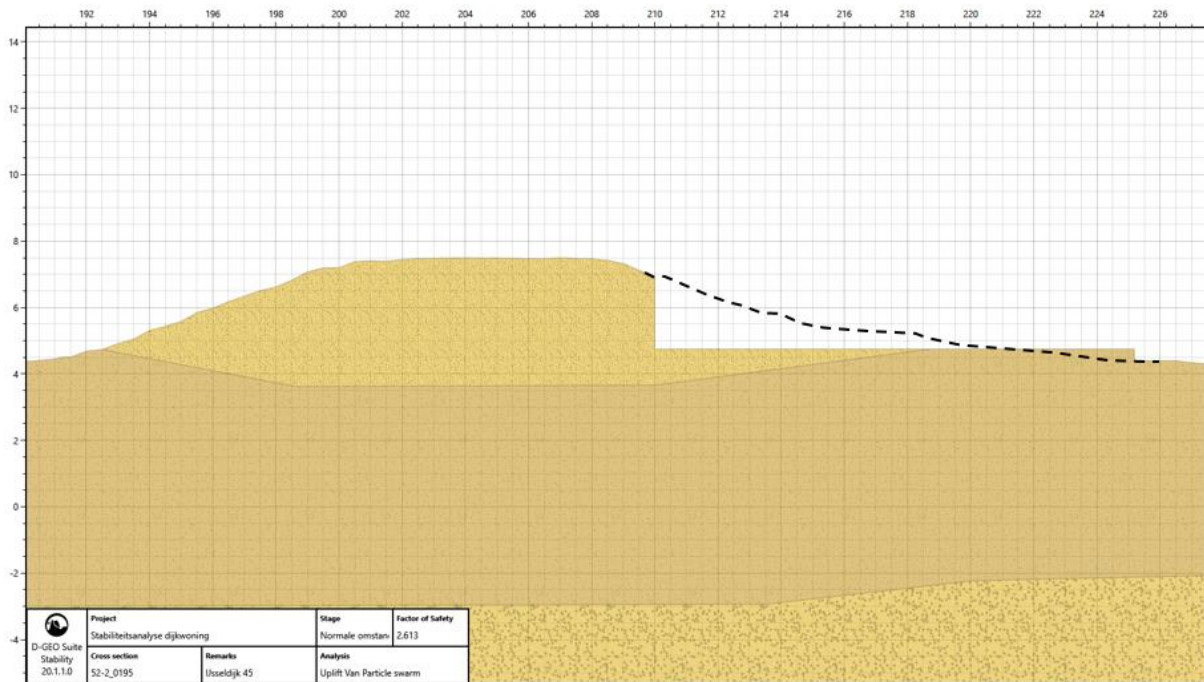
zelfs 1,0 meter. Er wordt aangenomen dat de vloerhoogte van het achterhuis niet hoger kan zijn dan de onderkant van de achtergevel (4,4 m + NAP)



Figuur E.2 – Zijgevel van IJsseldijk 45, met aflopend grondlichaam.

Na het inzien van de bouwtekening en een aantal vragen aan de bewoner is voortgekomen dat de vloer met beton is geëgaliseerd. Onder deze betonlaag is de grond aangevuld met zand. De diktes en de hoogtes van de vloer varieert, omdat er veel verhogingen in de woning aanwezig zijn. De dikte van de keldervloer is 0,42 meter (zie Bijlage C) en de hoogte van de onderkant van deze vloer is als maatgevend voor de hele woning aangenomen. Dit komt neer op een hoogte van 4,75 meter boven NAP en grofweg 2,6 meter onder de kruin.

De geometrie van de dijkwoning is geschematiseerd op het dwarsprofiel 52-2_195+2 ten noorden van de woning en op het dwarsprofiel 52-2_195 ten zuiden van de woning, omdat niet met zekerheid vast te stellen is hoe dijk onder de woning loopt en er een groot verschil zit in de faalkans tussen beide profielen. Dwarsprofiel 52-2_195+2 ligt voor een deel onder +4,75 m t.o.v. NAP ter plaatse van de woning. Dit kan er mee te maken hebben dat de dijkwoning destijds is gebouwd op een kleine verhoging, voorafgaand aan de daarna uitgevoerde dijkverzwaringen, het hoogteverschil is in de schematisering daarom opgevuld met grond in overeenstemming met de AHN-data achter de woning.



Figuur E.3 – De geometrie van de dijkwoning geschematiseerd in dwarsprofiel 52-2_0195 met de onderbroken lijn als grens voor het afwezige grondlichaam.

Uniforme belasting door eigengewicht

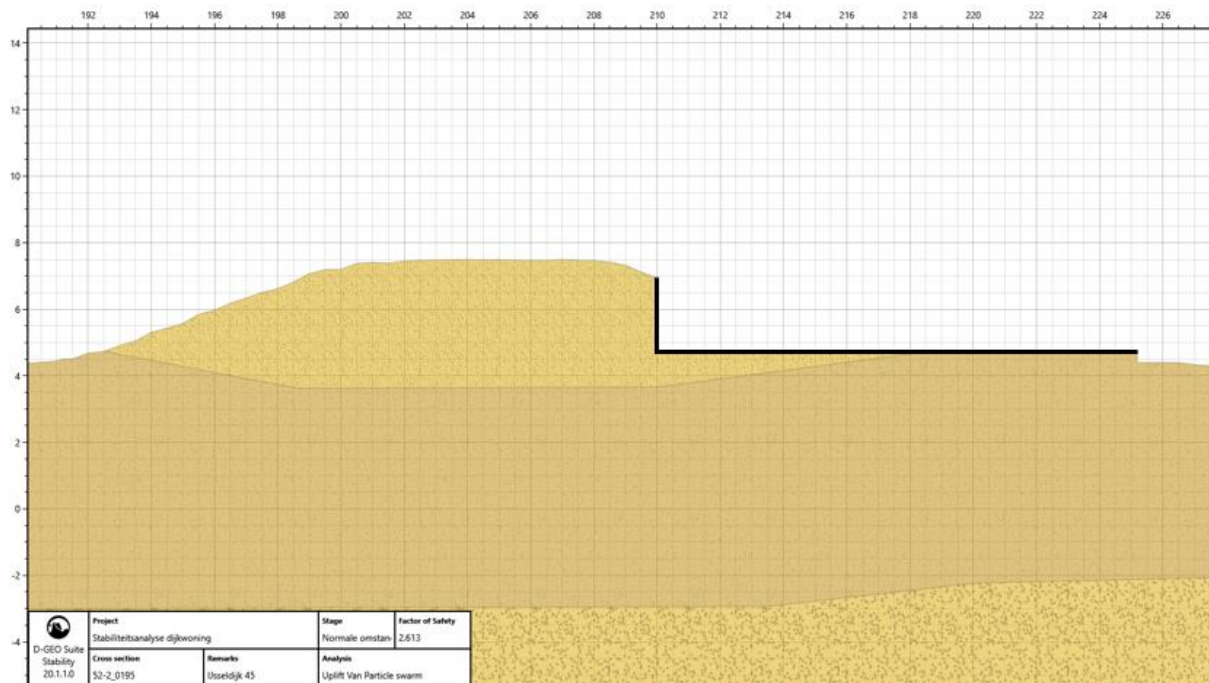
Om de belastingspreiding van de dijkwoning in rekening te brengen kan in D-Stability een spreidingshoek worden opgegeven. Voor de eigenschappen van belasting door een dijkwoning zijn geen documenten gevonden die ondersteund worden door het WBI 2017. Daarom is er voor de eigenschappen van de belasting gekeken naar verkeersbelasting. Volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen (LTVRW) bedraagt de aanbevolen spreidingshoek voor verkeersbelasting voor zand $26,6^\circ$, voor klei $18,3^\circ$ en voor veen $15,9^\circ$ (STOWA, 2015). De spreidingshoek voor de belasting in het geval van de dijkwoning in dit onderzoek is gevarieerd om de invloed op de stabiliteitsfactor te bepalen. Het verschil tussen een spreidingshoek van 0° en 45° op de stabiliteitsfactor is nihil, dit is getest onder verschillende omstandigheden met verschillende waarden voor de aanpassingspercentages van de grondsoorten. Alleen bij een extreme waarde voor de spreidingshoek (80°) is er een kleine afname in de stabiliteitsfactor (-10%) te bespeuren. Om de belastingspreiding van de dijkwoning in rekening te brengen is daarom een veilige constante spreidingshoek van 45° aangehouden.

In D-Stability kunnen voor de belasting ook aanpassingspercentages van de grondlagen worden opgegeven. Het aanpassingspercentage betreft de afname van de wateroverspanning ten opzichte van de maximale wateroverspanning (STOWA, 2015). Hoe lager het aanpassingspercentage hoe meer wateroverspanning in rekening gebracht wordt. Dit houdt in dat de stabiliteit van de dijk afneemt, naarmate het aanpassingspercentage lager is. Uit het onderzoek naar verkeersbelasting in de LTVRW volgt een aanpassingspercentage van 50% voor cohesieve grondsoorten met zware belasting ($\approx 13 \text{ kN/m}^2$) tijdens een hoogwater (STOWA, 2015). De waarden voor de aanpassingspercentages van de grondlagen zijn gevarieerd in een kleine gevoeligheidsanalyse en het dijklichaam en de toplaag blijken een significante invloed te hebben op de stabiliteitsfactor, daarom is ervoor gekozen om een conservatieve waarden aan te nemen. Voor de cohesieve grondsoorten is een aanpassingspercentage van 0% toegepast en dit wordt ook ondersteund door de Schematiseringshandleiding macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). Voor

niet-cohesieve grondsoorten is een aanpassingspercentage van 50% gehanteerd (Viehöfer & Hergarden, 2015).

Voldoende sterke constructieve elementen

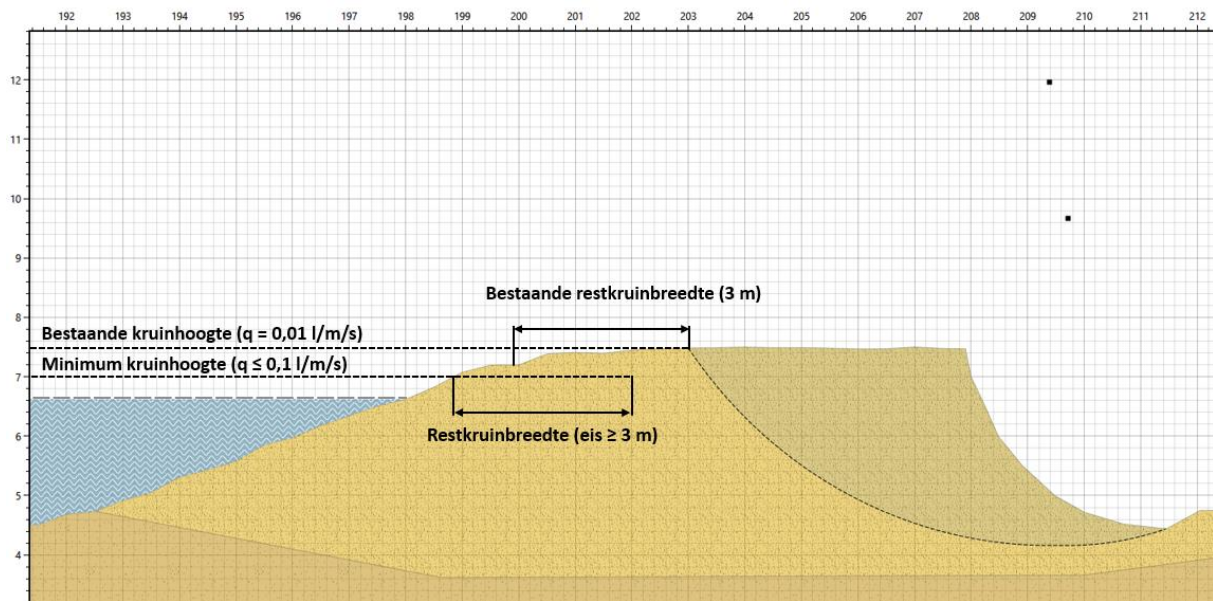
Om uit te sluiten dat de maatgevende glijcirkel door de keldermuur of fundering snijdt, is er een 'forbidden line' geschematiseerd over de keldermuur en de fundering.



Figuur E.4 - Voorbeeld van het gebruik van 'forbidden lines' op de keldermuur en vloer.

E.1.1.3 Faaldefinitie

De minimaal benodigde kruinbreedte is van toepassing bij een minimum vereiste kruinhoogte die hoort bij een overslagdebiet van 0,1 l/m/s. Het overslagdebiet bij dwarsprofiel 52-2_0195+2 bedraagt 0,01 l/m/s, dus het is een dijk met overhoogte. Voor dit geval is de 3 meter restkruinbreedte van het bestaande dwarsprofiel een conservatieve aanname (zie Figuur E.5). Mocht de stabiliteitsfactor bij een maatgevende glijcirkel binnen deze restkruinbreedte kleiner zijn dan 1,2, dan is er een mogelijkheid tot aanscherping van de daadwerkelijke minimale restkruinbreedte.



Figuur E.5 – Denkbeeldige zonering van de 'Restbreedte-bij-Overhoogte'-methode uit het TRAS tegen de toegepaste zonering.

E.1.2 Toetsoordeel

Voor het toetsoordeel van de situatie met dijkwoning is dezelfde methode gebruikt als bij Onderzoeksvraag 2, zie Bijlage D.4.2 Toetsoordeel.

Verder is er binnen het WBI 2017 nog een partiële veiligheidsfactor die gekoppeld is aan de faalkanseis, de schadefactor. De schadefactor zal meestal niet worden toegepast voor semi-probabilistische berekeningen, omdat de binnenwaartse macrostabiliteit vaak moet voldoen aan een faalkanseis (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016). In het geval van secundaire afschuivingen bij het falen van de dijkwoning speelt de schadefactor echter wel een rol.

De schadefactor kan worden berekend uit de faalkanseis. Daarvoor dient eerst de geëiste betrouwbaarheidsindex te worden bepaald aan de hand van onderstaande formule (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016):

$$\beta_{eis;dsn} = -\Phi^{-1}(P_{eis;dsn}) \quad (2)$$

Waarin:

- $\beta_{eis;dsn}$ Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede [-];
- $P_{eis;dsn}$ Faalkanseis voor binnenwaartse macrostabiliteit per doorsnede [1/jaar];
- Φ Standaard cumulatieve normale verdeling [-].

Met deze gegevens kan vervolgens de schadefactor worden berekend met onderstaande formule:

$$\gamma_n = 0,15 * \beta_{eis;dsn} + 0,41 \quad (3)$$

Waarin:

- γ_n Schadefactor voor het faalmechanisme macrostabiliteit [-].

In Tabel E.1 staan de waarden voor de parameters en de uitkomsten van de formules (2) en (3) gegeven.

Tabel E.1 – Parameters en uitkomsten formules (2) en (3).

Symbol	Waarde	Eenheid
$P_{eis;sig;dsn}$	1/1.280.879	[1/jaar]
$P_{eis;ond;dsn}$	1/426.960	[1/jaar]
$\beta_{eis;sig;dsn}$	4,803	[-]
$\beta_{eis;ond;dsn}$	4,578	[-]
$\gamma_{n;sig}$	1,13	[-]
$\gamma_{n;ond}$	1,10	[-]

Voor de 'Restbreedte-bij-Overhoogte'-methode uit het TRAS speelt de vereiste stabiliteitsfactor (γ_s) een rol (Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2009). Dit is het product van de partiële veiligheidsfactoren.

$$\gamma_s = \gamma_b * \gamma_d * \gamma_m * \gamma_n \quad (4)$$

Waarin:

- γ_s Vereiste stabiliteitsfactor [-];
- γ_b Schematiseringsfactor [-];
- γ_d Modelfactor [-];
- γ_m Materiaalfactor [-];
- γ_n Schadefactor [-].

Symbol	Waarde	Eenheid
$\gamma_{s;sig}$	1,20	[-]
$\gamma_{s;ond}$	1,16	[-]

BIJLAGE F: RESULTATEN ONDERZOEKSVRAAG 4

F.1 GEVOELIGHEIDSANALYSE

F.1.1 Uniforme belasting

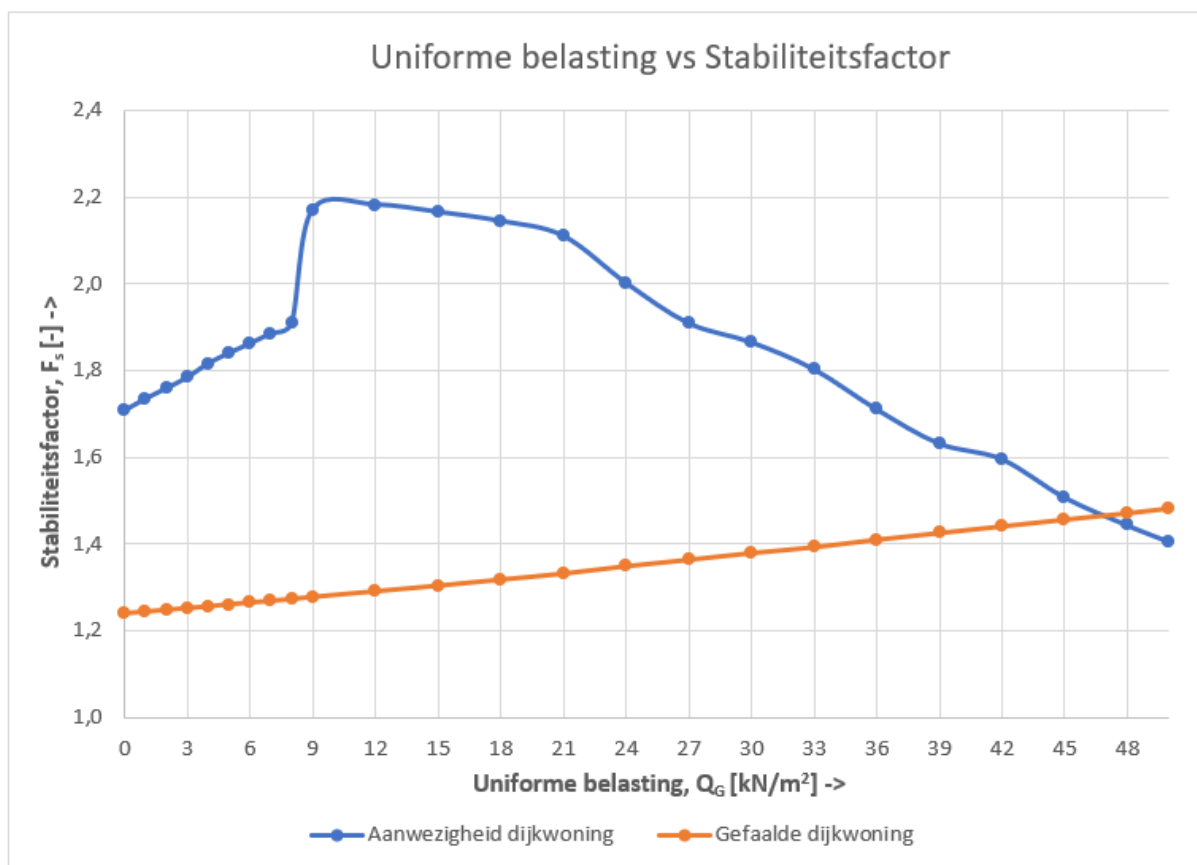
Voor de uniforme belasting als gevolg van het eigen gewicht van de dijkwoning is een aanname gemaakt, omdat niet met zekerheid kan worden vastgesteld wat het daadwerkelijke gewicht is. Door de invloed van de uniforme belasting (Q_G) op de stabiliteitsfactor (F_s) te bepalen kan worden vastgesteld of deze aanname geoptimaliseerd dient te worden. Als de stabiliteitsfactor heel gevoelig is voor de uniforme belasting zal het eigen gewicht van de dijkwoning gedetailleerder bepaald moeten worden.

De onzekerheid in de uniforme belasting heeft betrekking op de grootte en de verdeling over de dijkwoning. Er is aangenomen dat de grootte van de uniforme belasting 13 kN/m² bedraagt en gelijkmatig is verdeeld over de dijkwoning.

F.1.1.1 Grootte

Om meer inzicht te krijgen in de invloed in variatie van de uniforme belasting is voor de volledigheid de waarde gevarieerd tussen de 0 kN/m² en de 50 kN/m², met intervallen van 3 kN/m². Bij waarden waar de stabiliteitsfactor een sprong maakt zijn kleinere intervallen gekozen.

Q_G [kN/m ²]	Aanwezigheid F_s [-]	Falen F_s [-]
0	1,708	1,239
1	1,735	1,243
2	1,759	1,247
3	1,784	1,251
4	1,816	1,255
5	1,840	1,260
6	1,862	1,264
7	1,885	1,268
8	1,909	1,272
9	2,170	1,277
12	2,182	1,290
15	2,165	1,303
18	2,144	1,317
21	2,110	1,331
24	2,002	1,348
27	1,909	1,363
30	1,865	1,379
33	1,803	1,392
36	1,711	1,410
39	1,632	1,425
42	1,596	1,441
45	1,508	1,456
48	1,444	1,471
50	1,406	1,482

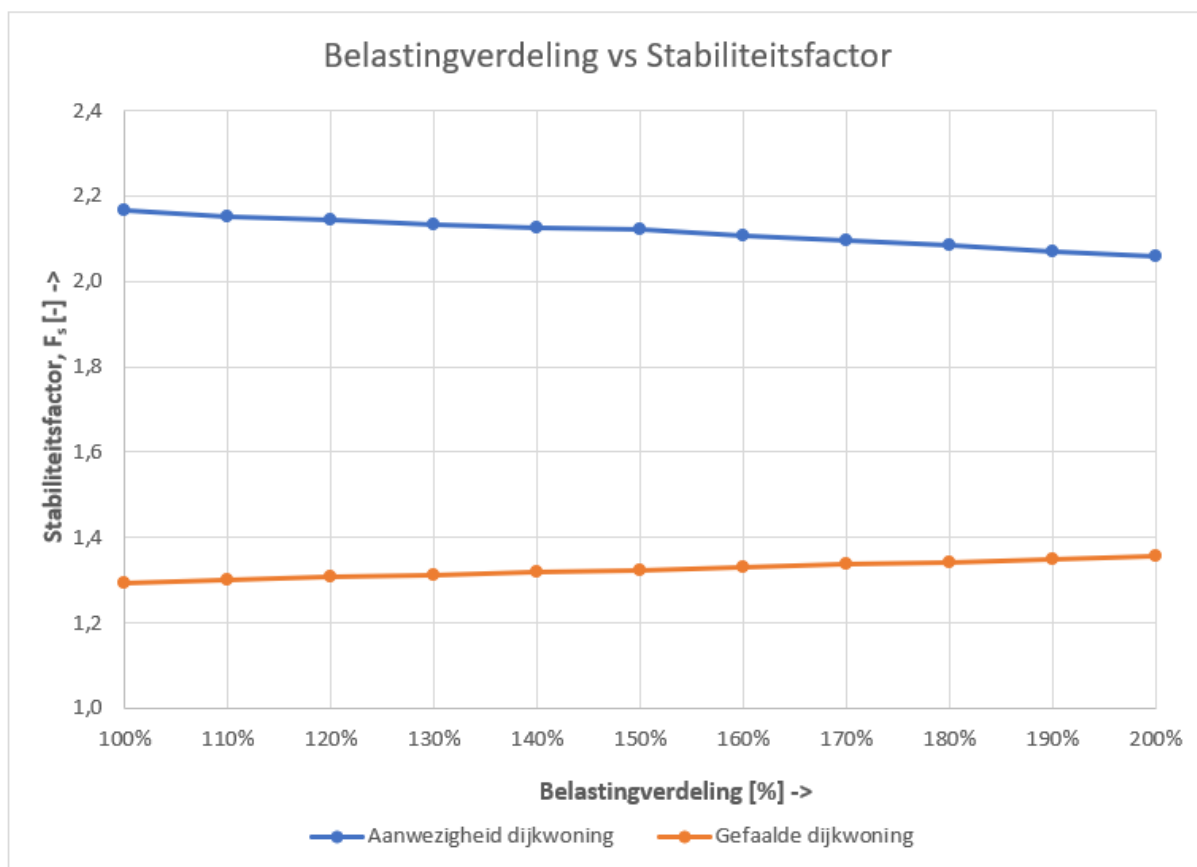


Figuur F.1 – Verloop van de stabiliteitsfactor bij verschillende waarden voor het eigen gewicht van de dijkwoning.

F.1.1.2 Verdeling voorhuis/achterhuis

De verdeling van de uniforme belasting tussen het voorhuis en achterhuis is gevarieerd op basis van percentages van het voorhuis ten opzichte van het achterhuis. De uniforme belasting van het achterhuis heeft, bij elke variatie in de uniforme belasting van het voorhuis, een constante waarde van 13 kN/m². De waarde van 13 kN/m² is aangehouden omdat uit de gevoeligheidsanalyse voor uniforme belasting bleek dat het verschil in stabiliteitsfactor tussen 10 kN/m² en 20 kN/m² verwaarloosbaar klein is.

Achterhuis Q_G [kN/m ²]	Voorhuis Q_G [kN/m ²]	Belasting-verdeling [%]	Aanwezigheid F_s [-]	Falen F_s [-]
13	13	0%	2,165	1,294
13	14,3	10%	2,153	1,300
13	15,6	20%	2,143	1,306
13	16,9	30%	2,134	1,312
13	18,2	40%	2,127	1,318
13	19,5	50%	2,120	1,324
13	20,8	60%	2,108	1,330
13	22,1	70%	2,097	1,336
13	23,4	80%	2,085	1,342
13	24,7	90%	2,071	1,348
13	26	100%	2,057	1,355



Figuur F.2 – Verloop van de stabiliteitsfactor bij verschillende verdelingen van de belasting tussen voor- en achterhuis.

F.1.2 Dijkmateriaal

De schematisering van de zanddijk gebeurt voor de drie situaties waarbij alle andere variabelen gelijk zijn met de bestaande situatie: de nulsituatie, aanwezigheid dijkwoning en gefaalde dijkwoning. De nulsituatie betreft in deze de situatie zonder dijkwoning, oftewel dwarsprofiel 52-2_0195 met een kleidijk of zanddijk. Bij een zanddijk zijn niet alleen de grondeigenschappen anders dan bij een kleidijk, ook het verloop van het freatisch vlak en de stijghoogtelijn zullen verschillend zijn.

Het grondgedrag van de zanddijk is hetzelfde als voor de bestaande situatie. Voor de grondeigenschappen zijn echter andere waarden toegekend. Deze waarden staan in Tabel F.1.

Tabel F.1 - Grondeigenschappen zanddijk.

Grondsoort	Beschrijving	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'	Φ' (μ σ)	S (μ σ)	M (μ σ)	POP (μ σ)
Dijkmateriaal zand	Zandig dijkmateriaal	19,5	20,1	0	32 1,98	-	-	-

Bij de zanddijk is in de schematisering uitgegaan van een kleiafdekking. De freatische lijn ter plaatse van het intredepunt van de buitenwaterstand in het dijklichaam verloopt loodrecht naar beneden tot een hoogte van $0,5 \cdot h$ onder de waterstand bij de signaleringswaarde. Dit komt neer op 5,5 meter boven NAP, deze is echter iets gecorrigeerd met vergelijkbare situaties uit dijktraject 52-1 tot een hoogte van 1,0 meter onder de waterstand (= 5,65 m + NAP). De freatische lijn neemt daarna lineair

af tot een hoogte van $0,25 \cdot h$ boven het maaiveld ter hoogte van de binnenteen. De overige freatische lijn is hetzelfde als de bestaande situatie met kleidijk. De stijghoogtelijn verloopt hetzelfde als bij een kleidijk op een samendrukbare ondergrond.

F.1.3 Ondergrond

Voor de ondergrond worden zand en een samendrukbare ondergrond toegepast, dit gebeurt voor zowel de kleidijk als de zanddijk. Dit levert vier geohydrologische situaties op.

F.1.3.1 Samendrukbare ondergrond

Humeuze klei en veen zijn maatgevende cohesieve grondsoorten. De bestaande toplaag heeft een dikte tussen de 5,0 en 6,0 meter, deze cohesieve grondsoorten komen in het gebied van dijktraject 52-2 echter niet in deze hoedanigheid voor. Humeuze klei en veen is maar op een aantal locaties aanwezig, waarbij 2,5 meter de maximale dikte voor humeuze klei en 1,0 meter de maximale dikte voor veen lijkt te zijn. Humeuze klei en veen worden gecombineerd tot een 3,5 meter dikke laag humeuze klei met daarboven toplaag van kleiig zand met een dikte tussen de 1,0 m en 2,0 m. Daaronder bevindt zich het watervoerende zandpakket.



Figuur F.3 – Samendrukbare ondergrond.

Het grondgedrag van zowel de humeuze klei is hetzelfde als voor de bestaande situatie. Voor de grondeigenschappen zijn echter andere waarden toegekend. Deze waarden staan in Tabel F.2.

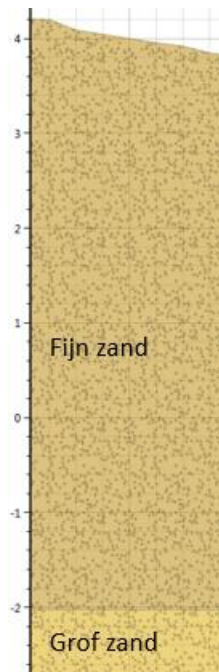
Tabel F.2 – Grondeigenschappen van de samendrukbare ondergrond.

Grondsoort	Beschrijving	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'	Φ' (μ σ)	S (μ σ)	M (μ σ)	POP (μ σ)
H_Ro_k&h	Klei, humeus	14,9	15,2	-	15 0,93	0,29 0,019	0,9 0,02	24 4,68
H_Ro_z&k_z	Zand, kleiig en siltig	18	20	0	32 1,38	-	-	-

Bij de klei- en zanddijk is het verloop van de freatische lijn bij humeuze klei met kleiig zand als ondergrond hetzelfde als bij de bestaande ondergrond. De stijghoogtelijn zal echter iets hoger komen te liggen.

F.1.3.2 Zand als ondergrond

Bij deze ondergrond gaat het om fijn zand dat in het Pleistoceen door de wind is afgezet. Het zand vormt een doorlatende toplaag. Voor het zand zijn gedraineerde eigenschappen toegekend. De grondeigenschappen van het zand staan in Tabel F.3.



Figuur F.4 – Zand als ondergrond.

Tabel F.3 – Grondeigenschappen van de fijn zandige windafzettingen.

Grondsoort	Beschrijving	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'	Φ' (μ σ)	S (μ σ)	M (μ σ)	POP (μ σ)
P_Wdz_zf	Zand, fijn, los gepakt	18	20	0	30 0,93	-	-	-

Doordat zand een doorlatende toplaag vormt, zal het waterspanningsverloop ook anders zijn. Bij een kleidijk verloopt de freatische lijn hetzelfde als in de nulsituatie. De freatische lijn bij een zanddijk op zand verloopt bij het binnendringen van het buitentalud lineair omlaag naar de binnenteen, waar hij vervolgens hetzelfde verloop heeft als de nulsituatie.

De stijghoogte verloopt in beide gevallen hydrostatisch ten opzichte van de freatische lijn, alleen door consolidatie aan de onderzijde van de kleidijk zal de waterspanning hier toenemen. Ter hoogte van de buitenteen neemt de stijghoogte lineair af tot aan de binnenteen. Bij de binnenteen is de stijghoogte weer hydrostatisch ten opzichte van de freatische lijn (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004).

F.1.4 Geometrie dijkwoning

F.1.4.1 Kelderdiepte

De vertaalslag naar dwarsprofiel 52-2_0195 wordt uiteindelijk gemaakt door de kelderdieptes ten opzichte van de kruinhoogte bij IJsseldijk 45 uit te drukken. Dit is gedaan voor zes van de acht potentieel maatgevende dijkwoningen, waarbij locatie van de woning vergelijkbaar is met die van

IJsseldijk 45. Ze staan allen op de binnenkruin bij het aangrenzende dijklichaam. De resultaten staan in Tabel F.4.

Tabel F.4 – Het bepalen van de kelderdieptes ten opzichte van bijbehorende kruinhoogte en de kruinhoogte bij IJsseldijk 45.

Locatie	Keldervloer- hoogte [m + NAP]	Kruinhoogte [m + NAP]	Kelderdiepte t.o.v. kruin ⁸ [m]	Kelderdiepte t.o.v. kruin bij IJsseldijk 45 ⁹ [m]
IJsseldijk 19	5,59	7,92	1,62	2,75
IJsseldijk 21	5,04	7,73	2,17	3,11
IJsseldijk 43	5,47	7,48	1,60	2,43
IJsseldijk 45	5,07	7,40	2,00	2,75
IJsseldijk 51	4,00	7,25	2,95	3,67
IJsseldijk 83	4,13	7,12	2,61	3,41

Uit Tabel F.4 blijkt dat 2,43 meter de minst diepe kelder en 3,67 de meest diepe kelder is. Er is voor gekozen om de kelderdiepte te variëren binnen het bereik van 2,15 m en 3,65 m met intervallen van 0,5 m, dit gebeurt binnen de bestaande kelder van IJsseldijk 45 in een vast dwarsprofiel (52-2_0195).

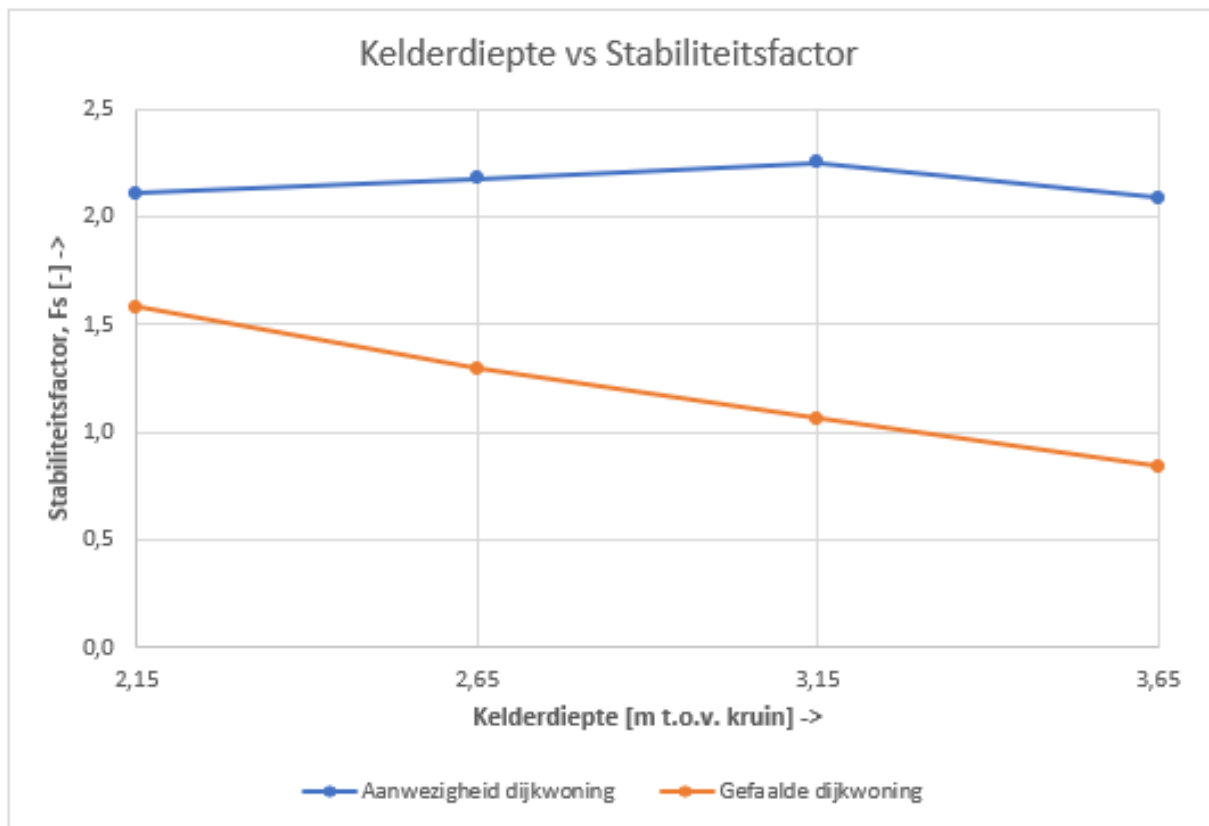
Tabel F.5 – Stabiliteitsfactoren bij verschillende kelderdieptes voor de twee situaties.

Kelderdiepte [m t.o.v. kruinhoogte]	Aanwezigheid dijkwoning Stabiliteitsfactor, F_s [-]	Gefaalde dijkwoning Stabiliteitsfactor, F_s [-]
2,15	2,109	1,580
2,65	2,176	1,294
3,15	2,251	1,064
3,65	2,087	0,842

De kelderdiepte uit Tabel F.5 zijn ook geplot tegen de bijbehorende stabiliteitsfactoren in Figuur F.5.

⁸ Kelderdiepte t.o.v. kruin [m] = Kruinhoogte [m+ NAP] - Keldervloerhoogte [m + NAP] - 0,42 [m]

⁹ Kelderdiepte t.o.v. kruinhoogte IJsseldijk 45 [m + NAP] = 7,40 [m + NAP] - Kelderdiepte t.o.v. kruin [m]



Figuur F.5 – Stabiliteitsfactor bij verschillende kelderdieptes t.o.v. kruinhoogte bij IJsseldijk 45.

F.1.4.2 Kelderbreedte

De breedte van de kelder is gedefinieerd als de afstand loodrecht op het dwarsprofiel en kan niet worden meegenomen in D-Stability vanwege het tweedimensionale model, maar zal wel degelijk een invloed hebben aangezien een glijvlak een 3D-effect is. Het is aannemelijk dat een kelder met een breedte van bijvoorbeeld 2,0 meter minder tot geen invloed heeft in vergelijking met een kelder met een breedte van 8,0 meter.

F.1.4.3 Locatie

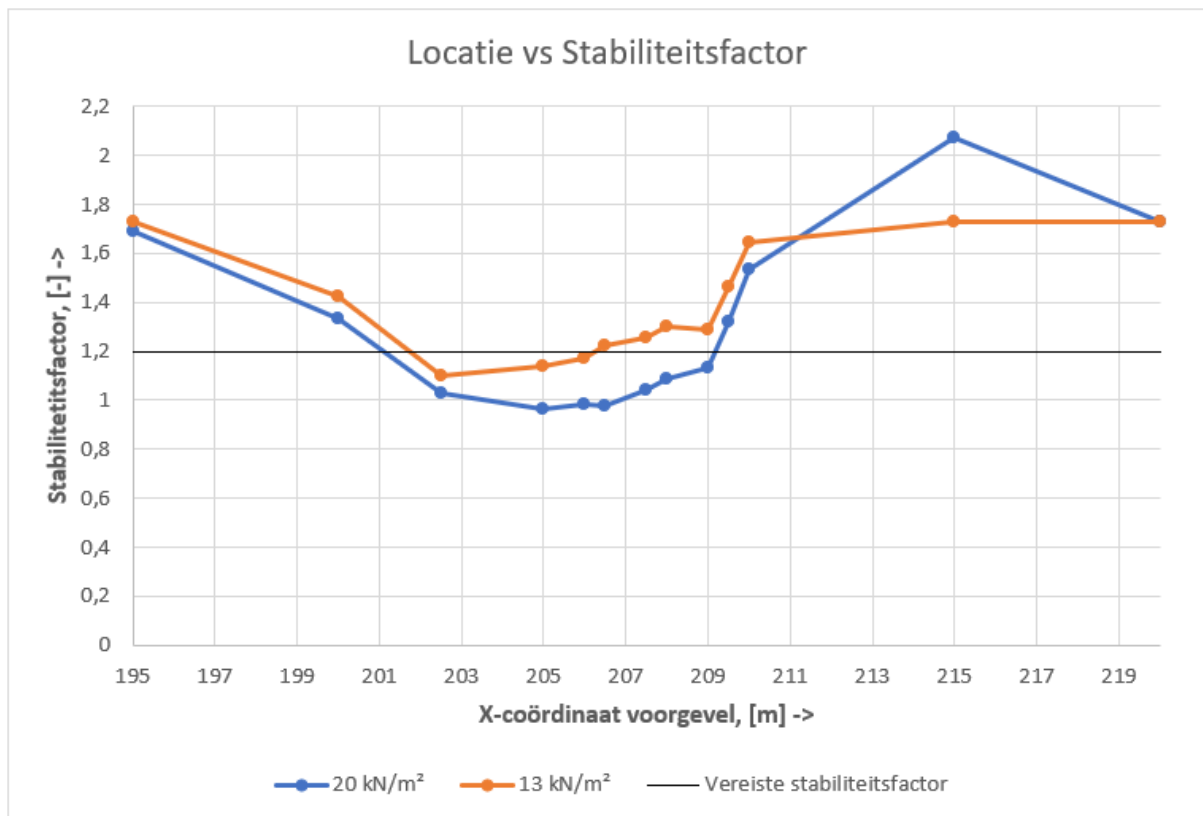
Voor de invloed van de locatie van een dijkwoning op de binnenwaartse stabiliteit zijn een aantal simplificaties en aannames gemaakt. Allereerst wordt voor de invloed van de locatie alleen gekeken naar de belasting op het dijklichaam. De dijkwoning is met een lengte van 10,0 meter op en niet in het grondlichaam geschematiseerd. Bij een woning op het dijklichaam is er geen verschil tussen een intacte en gefaalde staat. Voor de belasting is een waarde van 20 kN/m² aangenomen, met een spreidingshoek van 45°. De nulsituatie zonder belasting heeft een stabiliteitsfactor van 1,728.

Tabel F.6 – Stabiliteitsfactor bij verschillende locaties van een dijkwoning óp het dijklichaam.

x-coördinaat voorgevel [m]	x-coördinaat achtergevel [m]	Stabiliteitsfactor bij 20 kN/m ² [-]	Vershil t.o.v. nulsituatie (1,728)	Stabiliteitsfactor bij 13 kN/m ² [-]	Vershil t.o.v. nulsituatie (1,728)
195	205	1,688	-2%	1,728	0%
200	210	1,335	-23%	1,423	-18%
202,5	212,5	1,028	-41%	1,103	-36%
205	215	0,962	-44%	1,142	-34%

206	216	0,981	-43%	1,172	-32%
206,5	216,5	0,98	-43%	1,224	-29%
207,5	217,5	1,045	-40%	1,258	-27%
208	218	1,085	-37%	1,299	-25%
209	219	1,131	-35%	1,288	-25%
209,5	219,5	1,321	-24%	1,461	-15%
210	220	1,533	-11%	1,643	-5%
215	225	2,072	20%	1,729	0%
220	230	1,728	0%	1,728	0%

De stabiliteitsfactoren bij de verschillende locaties worden uitgezet tegen de x-coördinaat van de voorgevel, waarbij de achtergevel van de woning zich 10,0 m verder binnenwaarts bevindt (Figuur F.6).



Figuur F.6 – Invloed van de locatie van een dijkwoning, met voorgevel als x-coördinaat en 10 m lengte, op de stabiliteitsfactor.

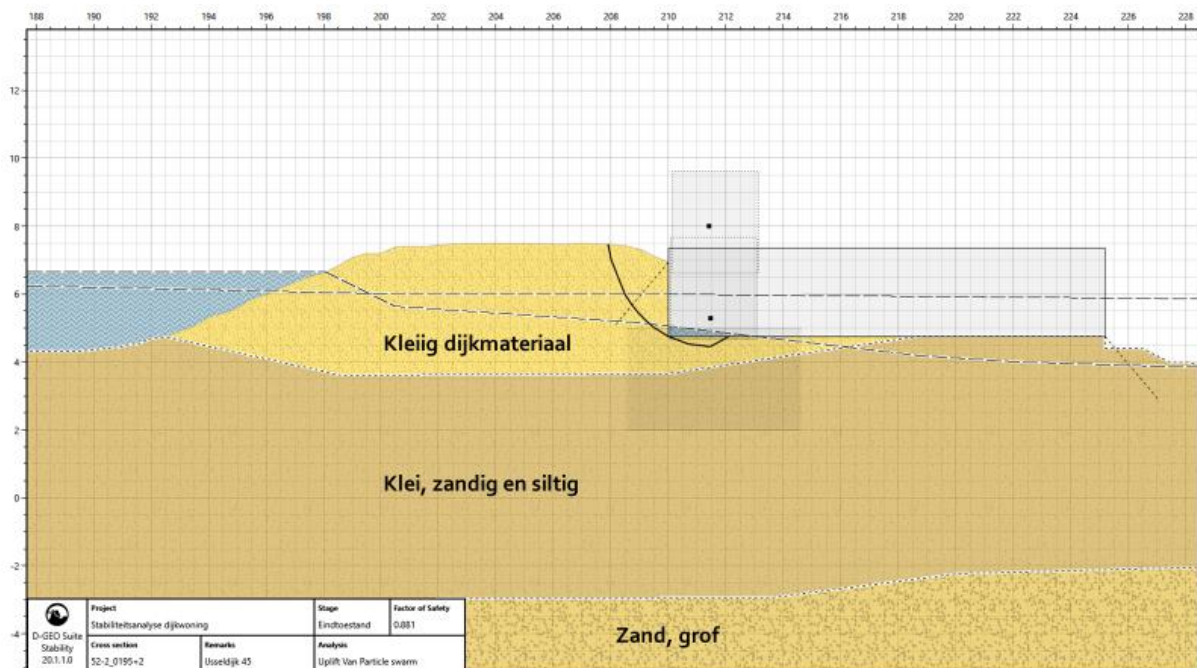
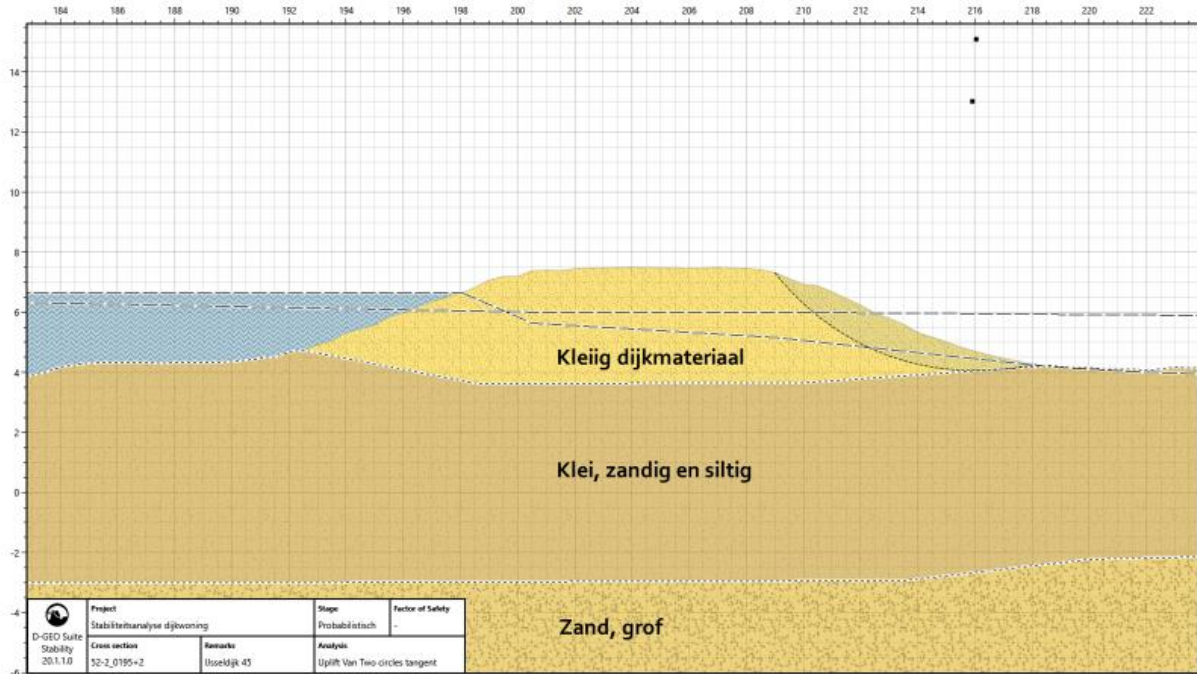
F.1.4.4 Onvoldoende sterke vloer

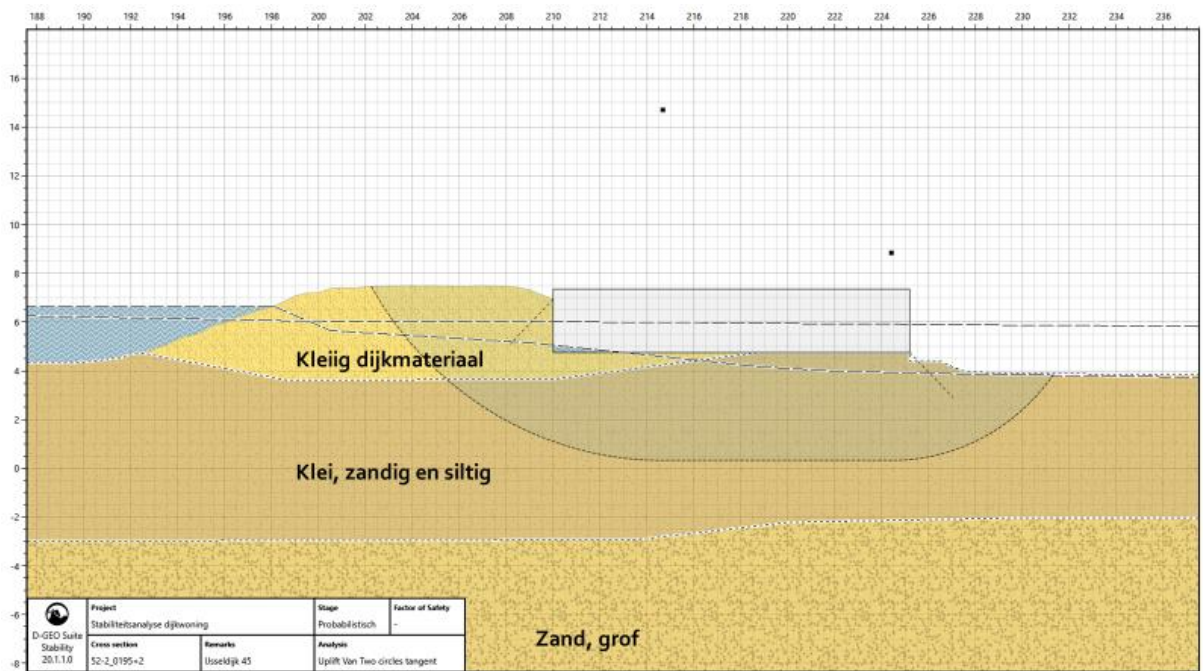
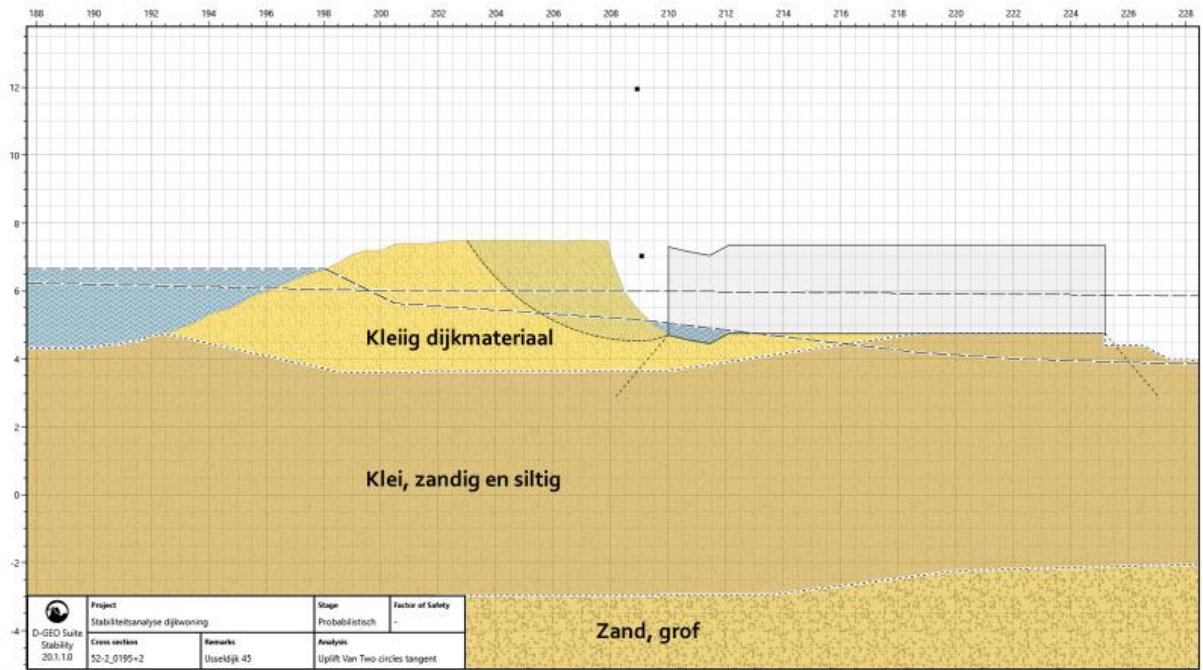
Er zullen ook dijkwoningen zijn waarbij de ondervloer niet uit beton bestaat, maar uit hout met daaronder zand. Dit geldt met name voor oude woningen en was voor deze woning voor de verbouwing ook het geval. Een houten ondervloer kan aanzienlijk minder weerstand bieden tegen hogere spanningen, waardoor deze mogelijk kwetsbaarder is voor maatgevende glijvlakken.

De zijgevels zouden in dit geval wel extra stevigheid bieden door de schuifweerstand te verhogen, dit kan echter niet geschematiseerd worden maar is zeker noemenswaardig.

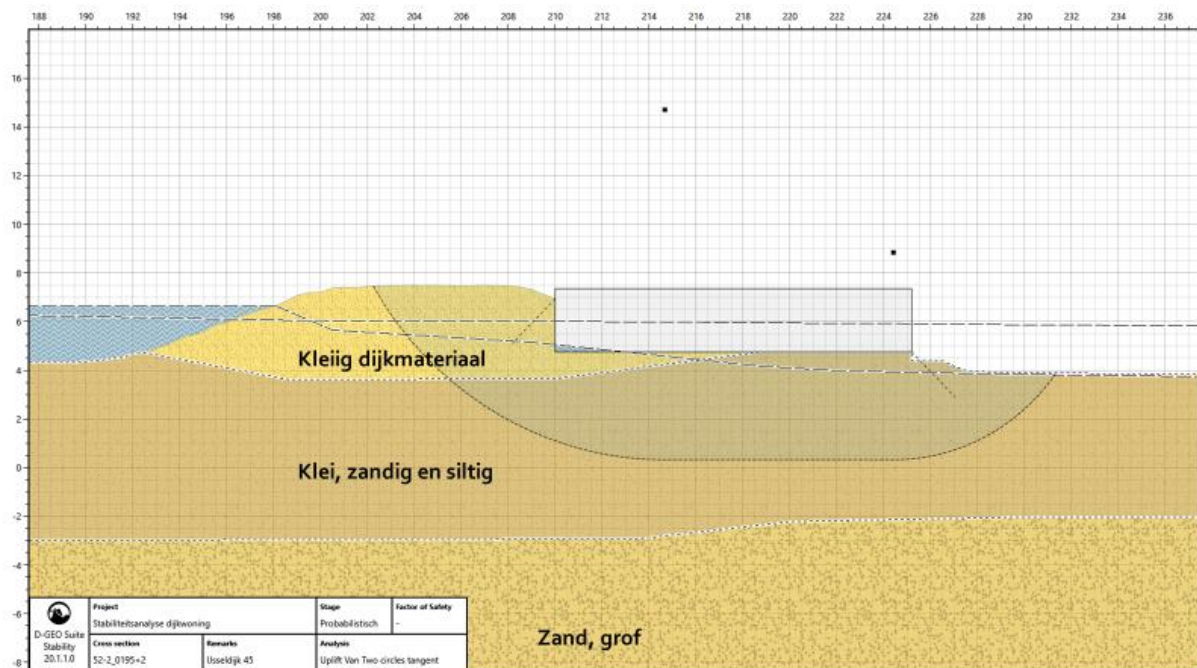
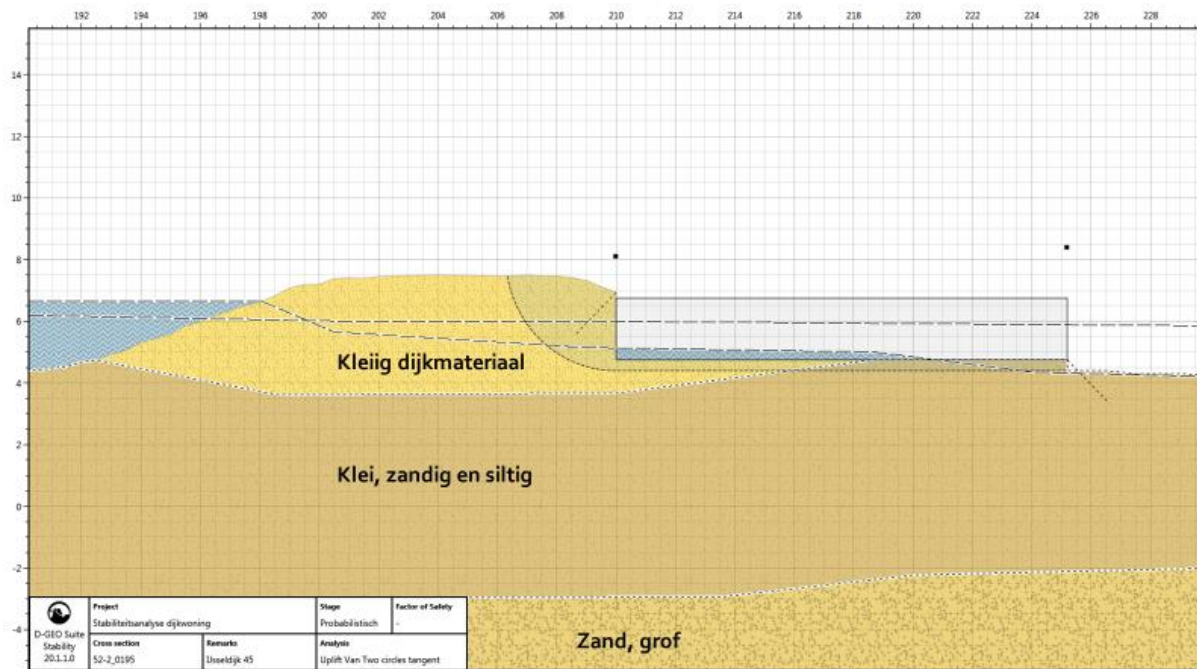
BIJLAGE G: RESULTATEN D-STABILITY

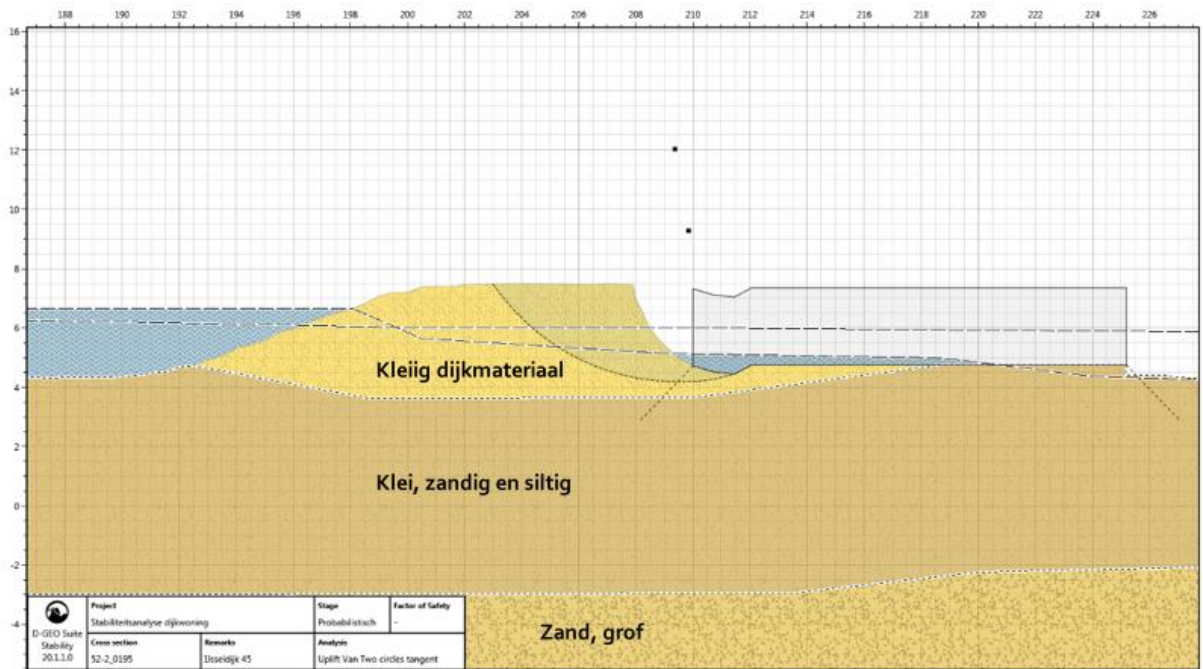
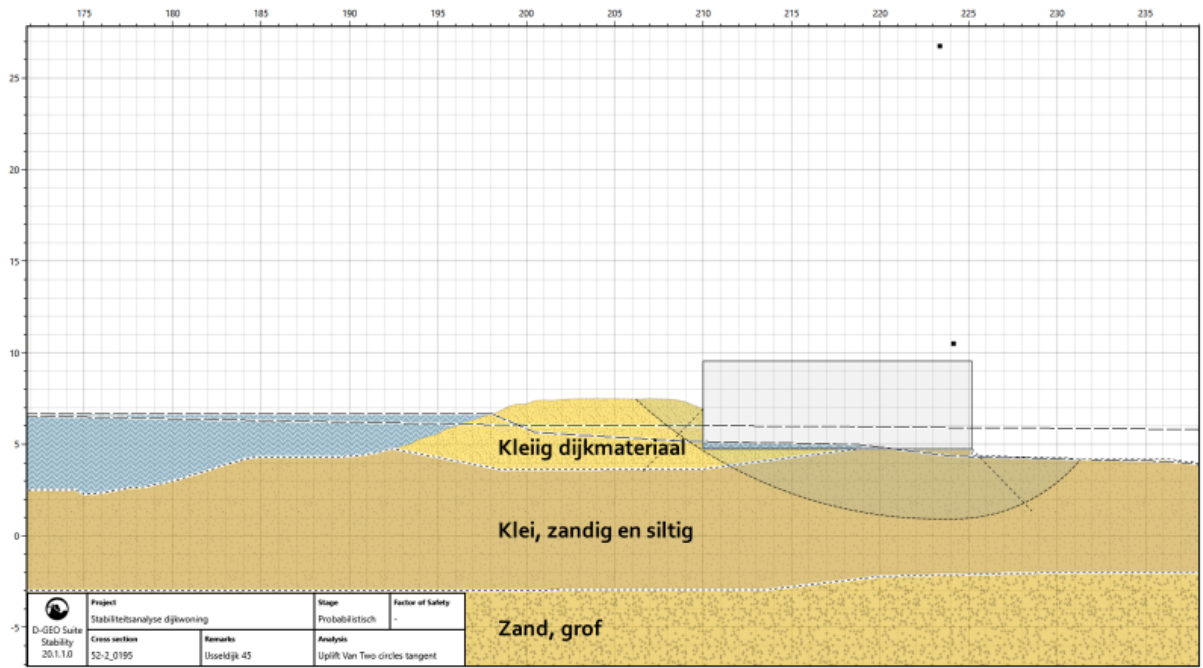
7.5 BESTAANDE SITUATIE



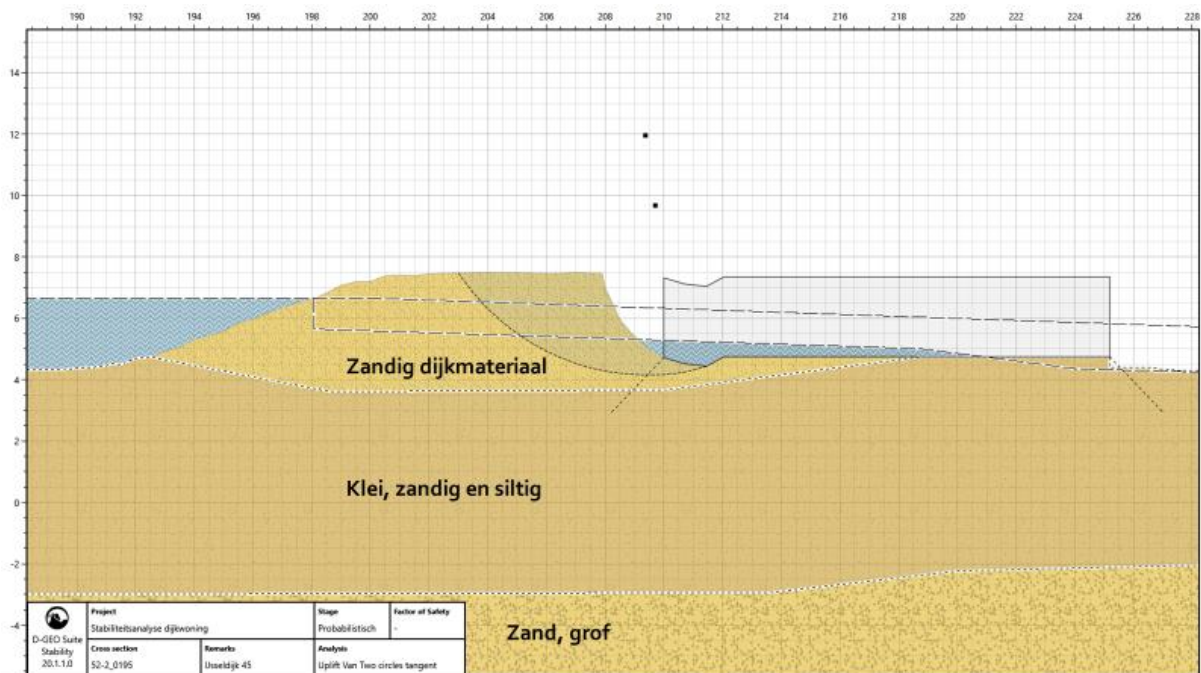
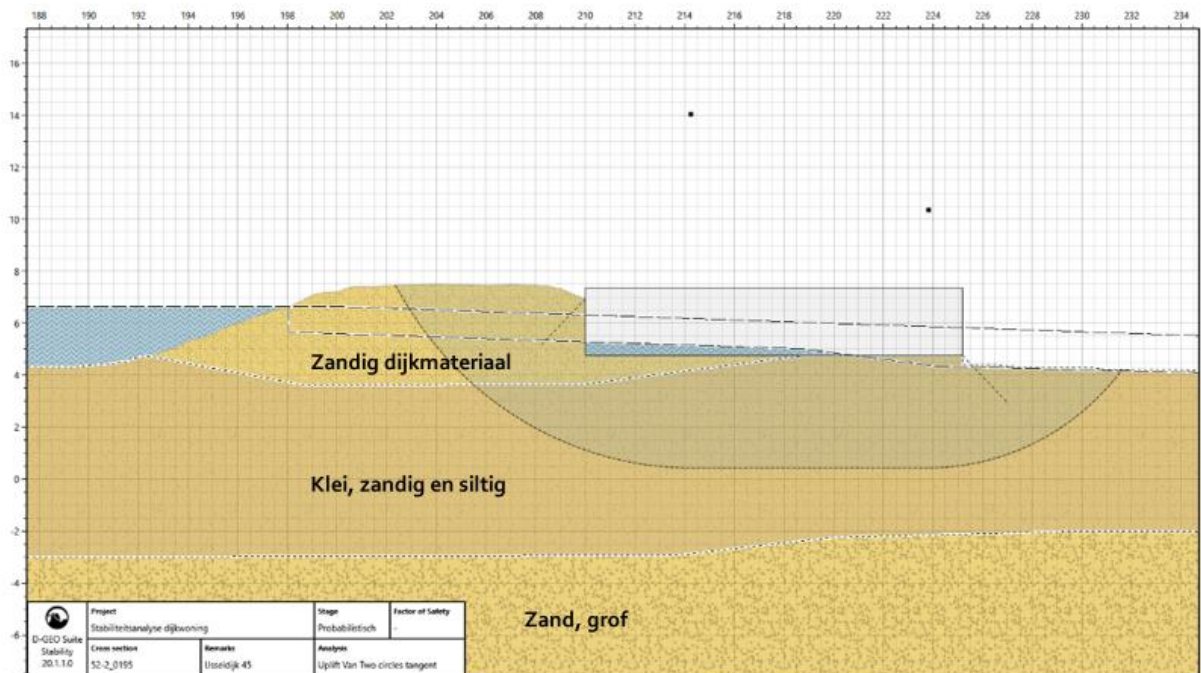


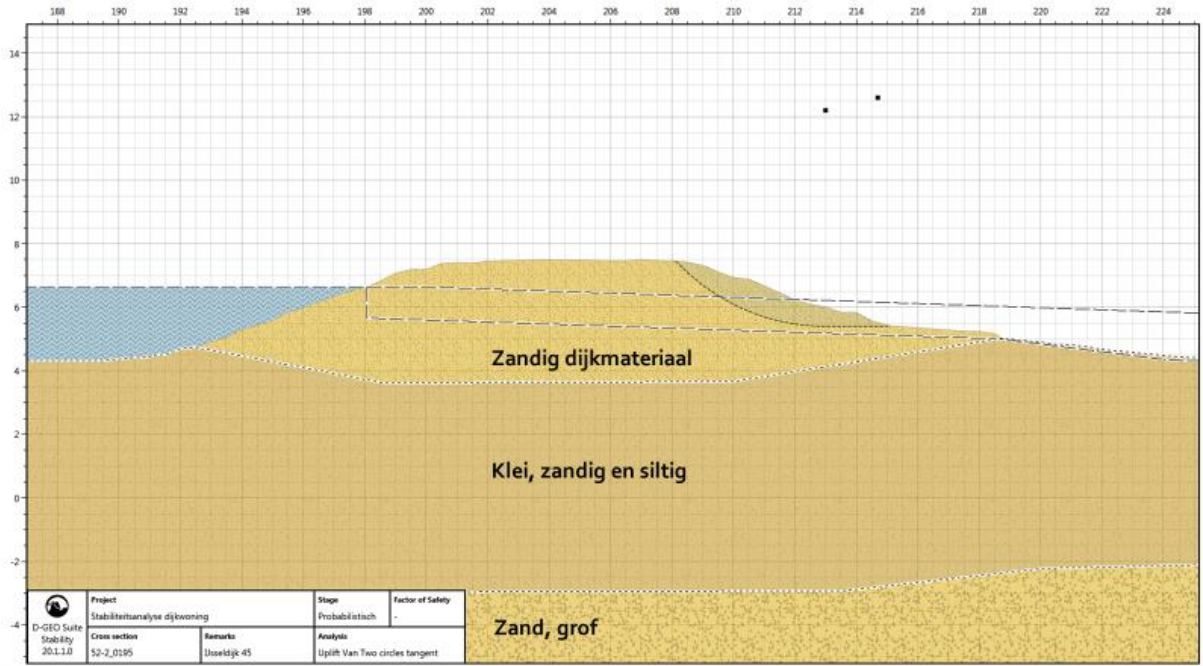
7.6 UNIFORME BELASTING



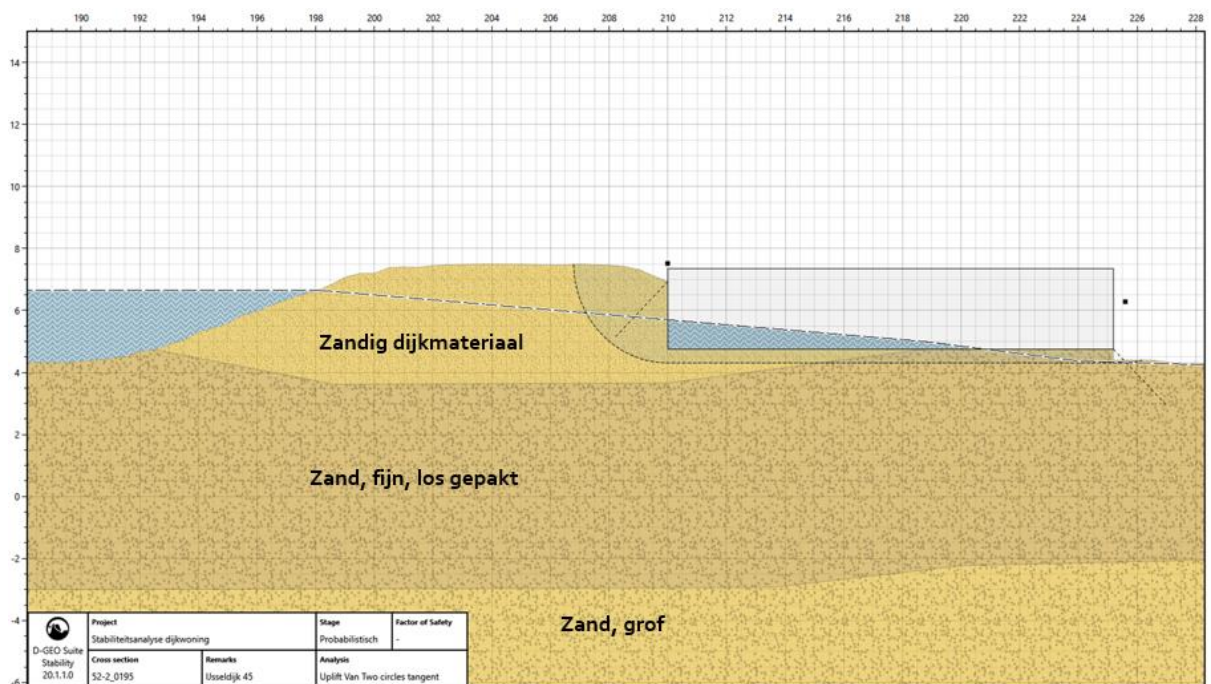
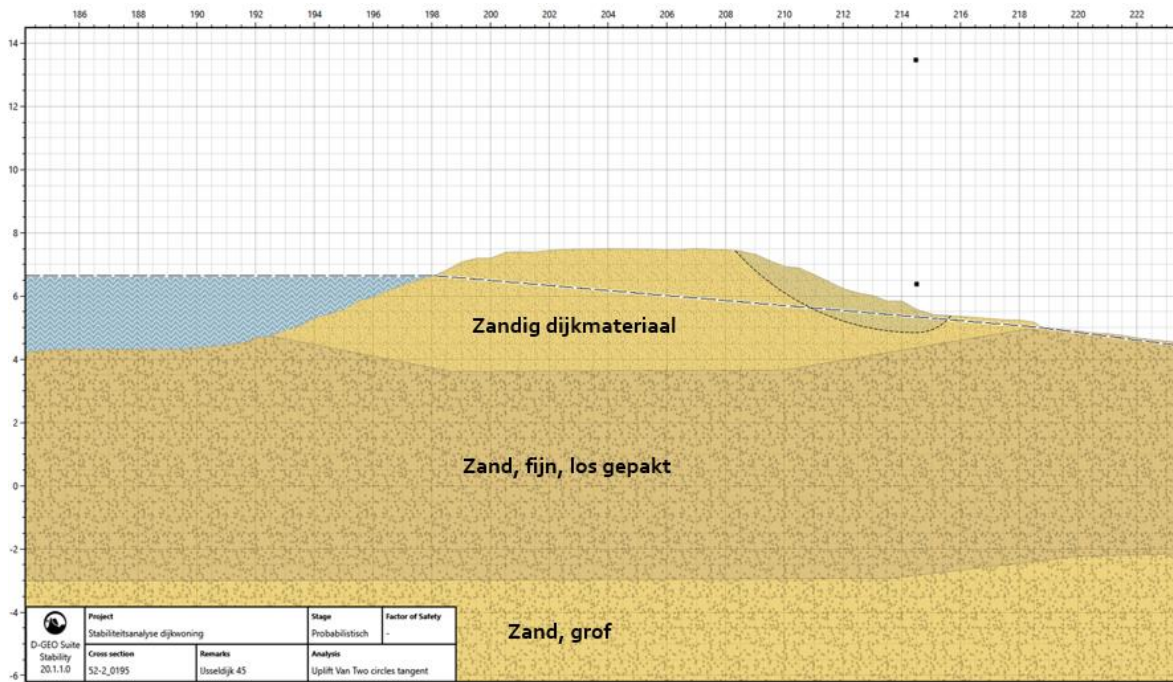


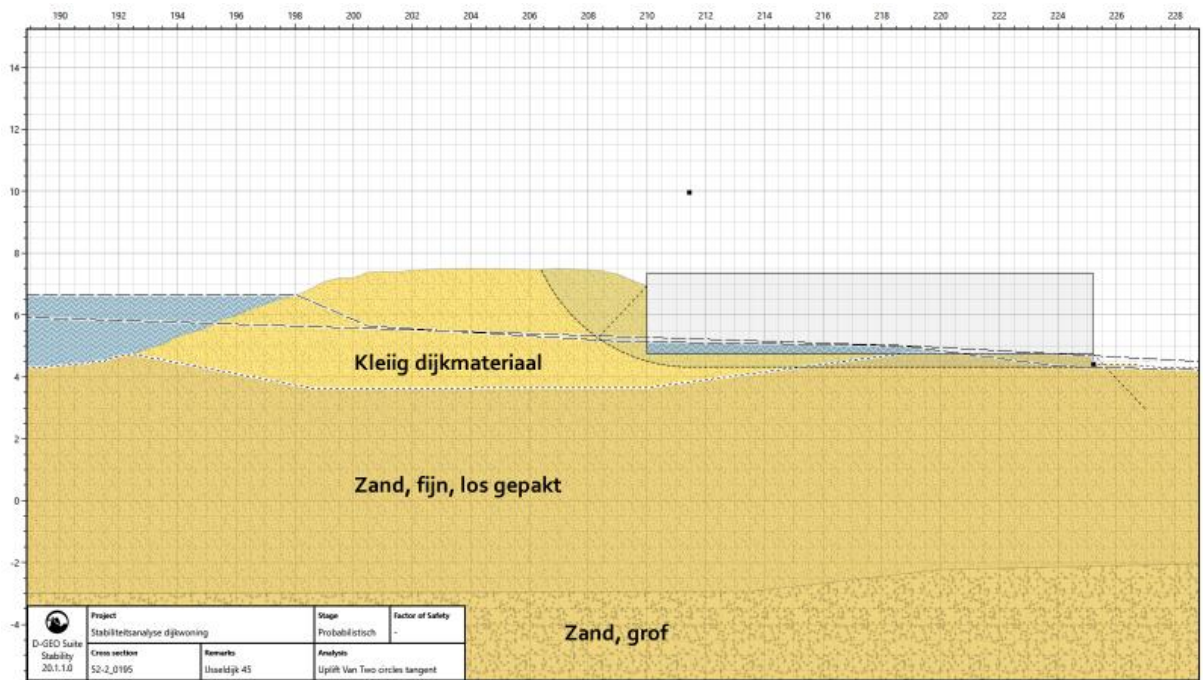
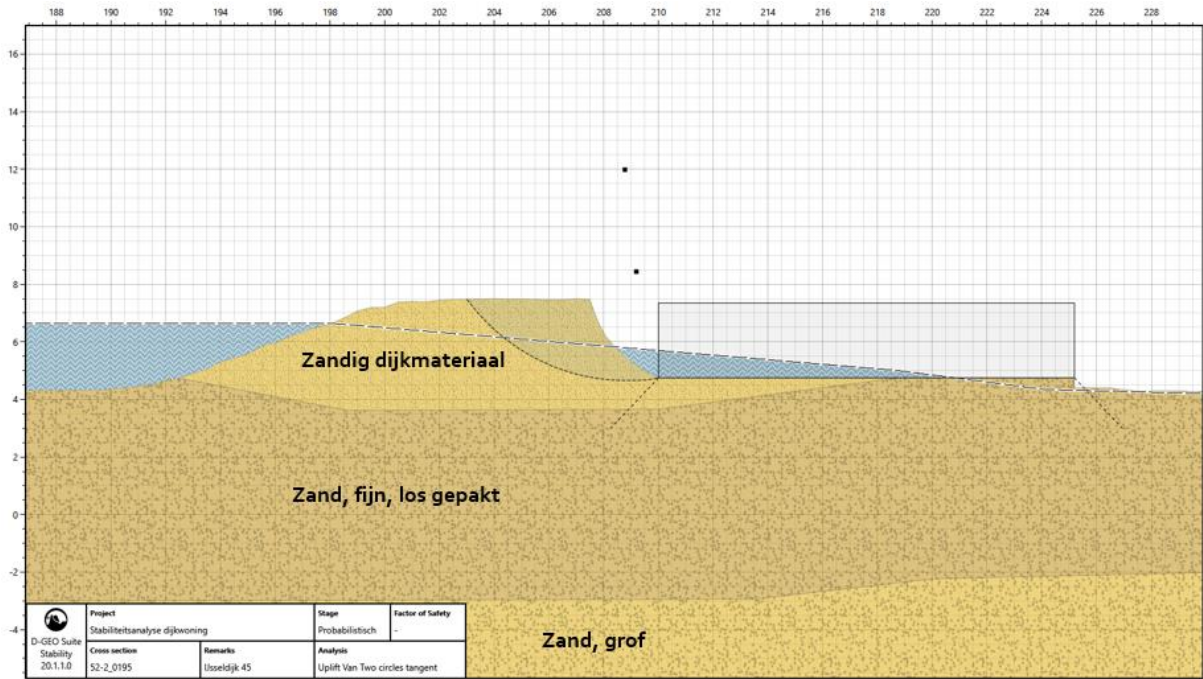
7.7 DIJKMATERIAAL

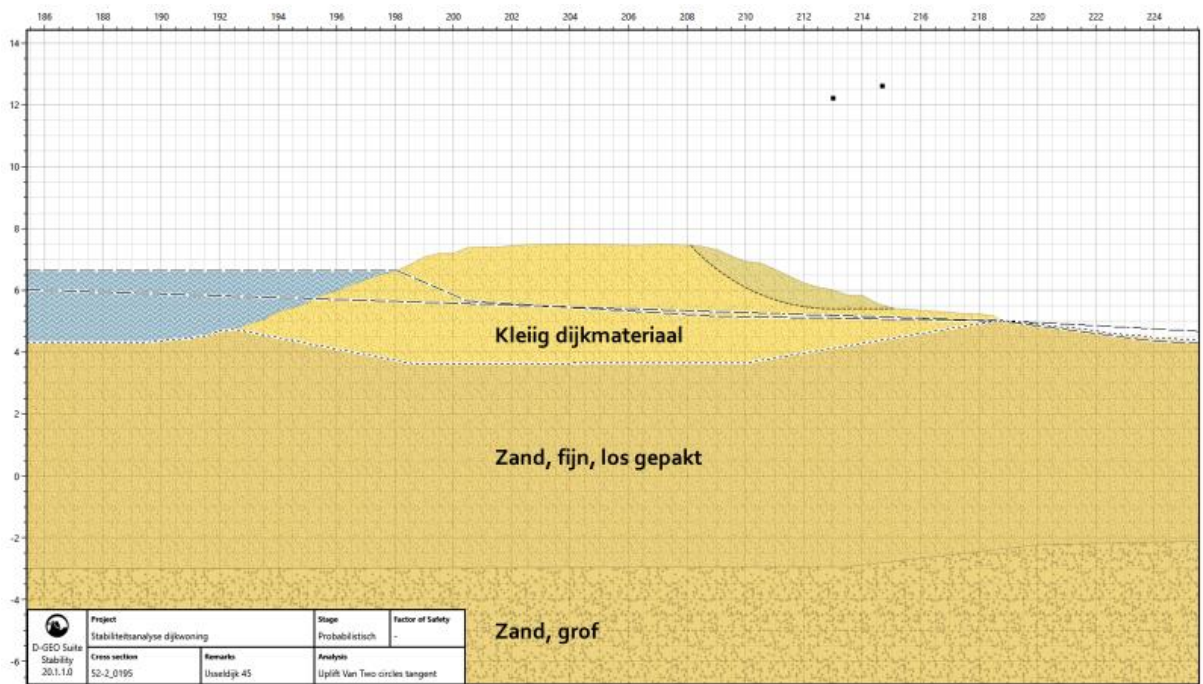
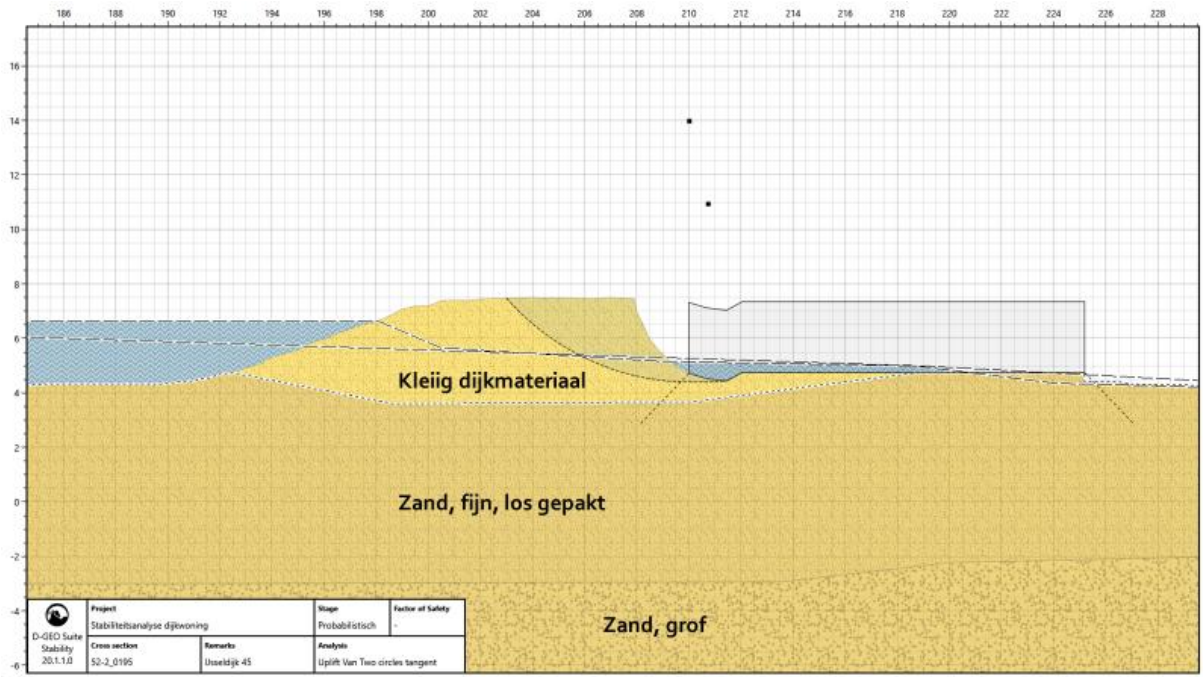


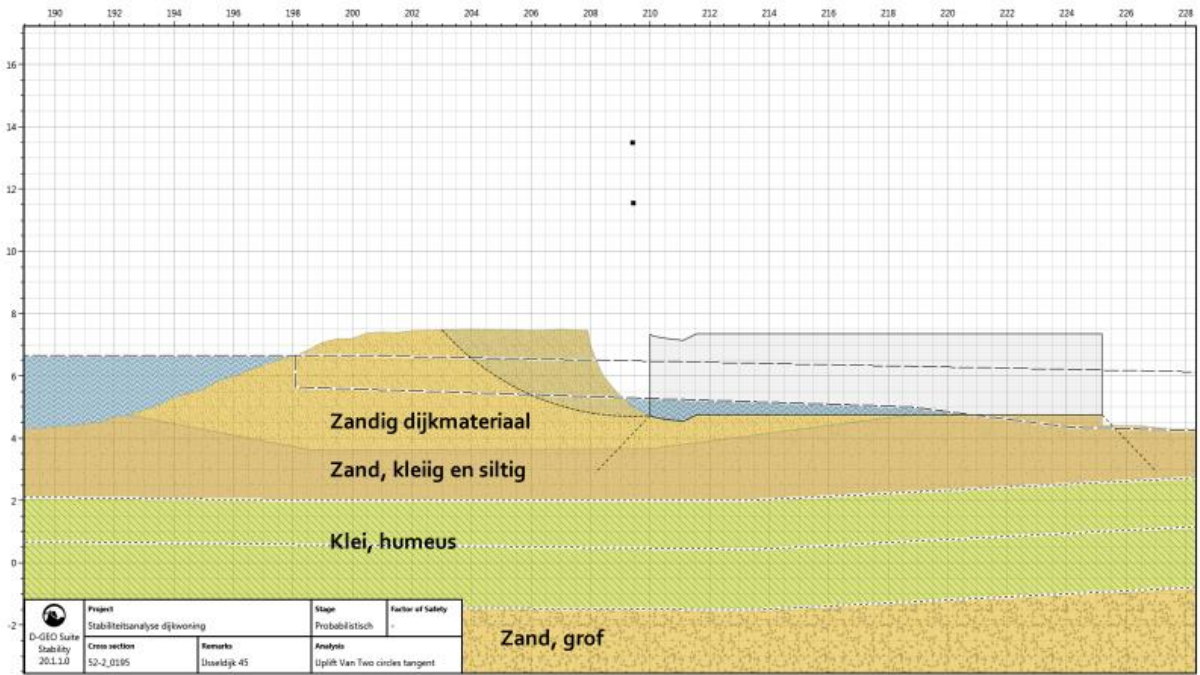
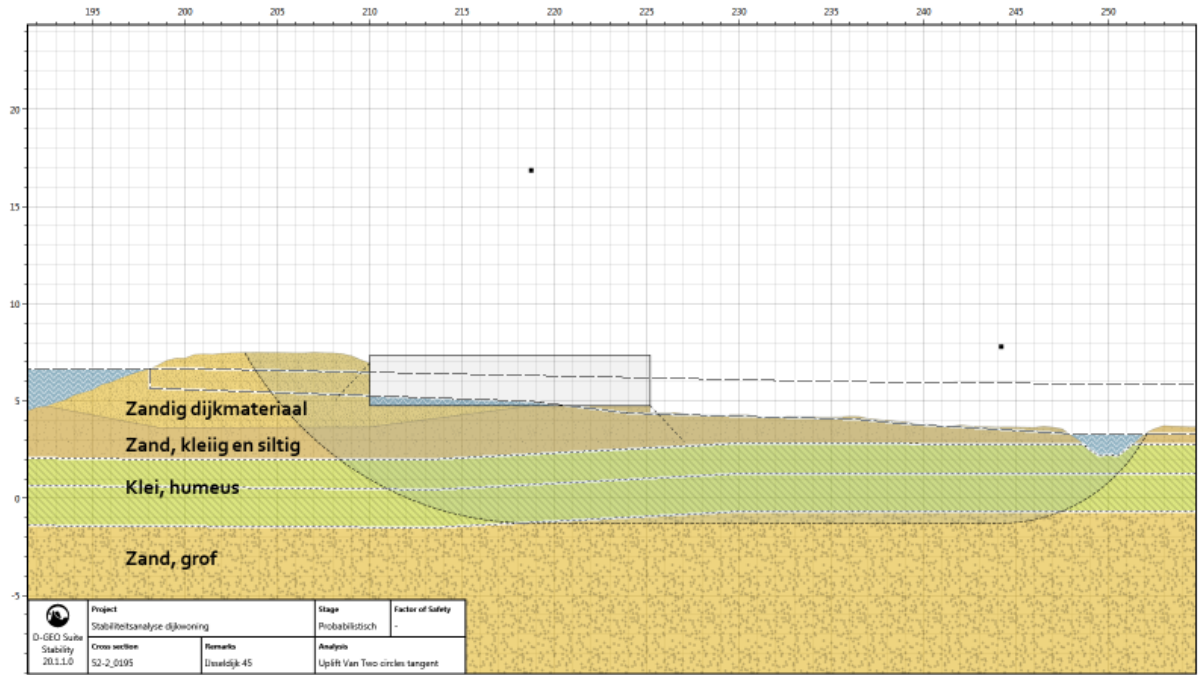


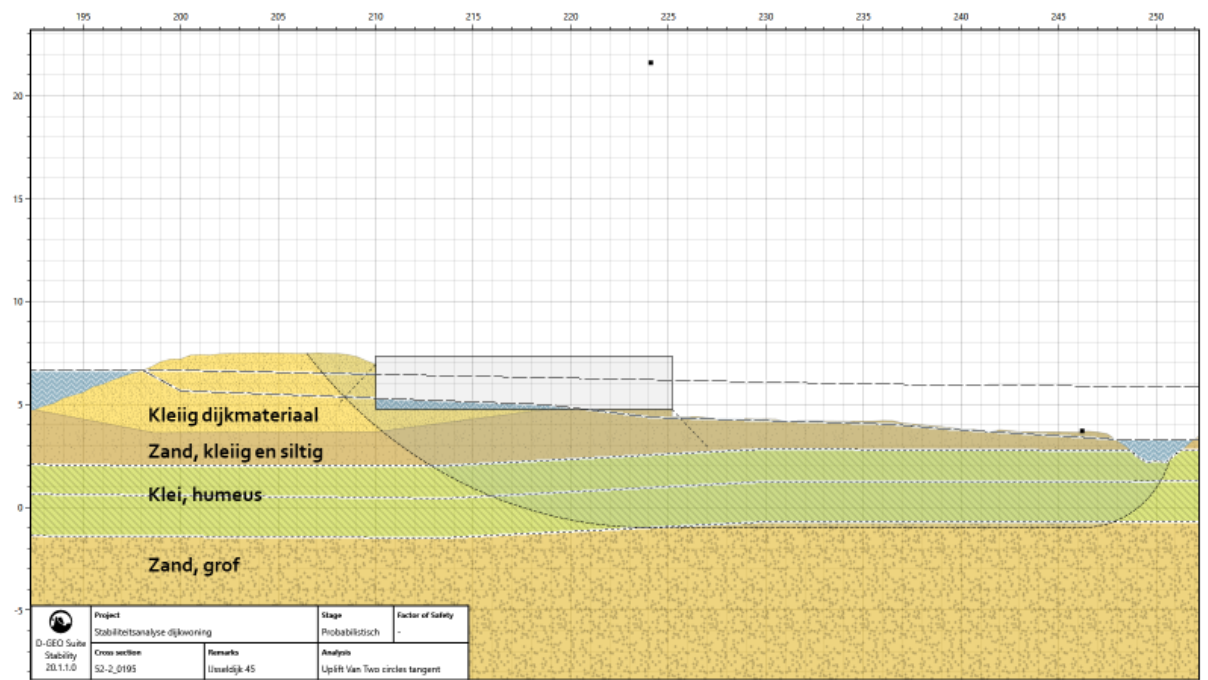
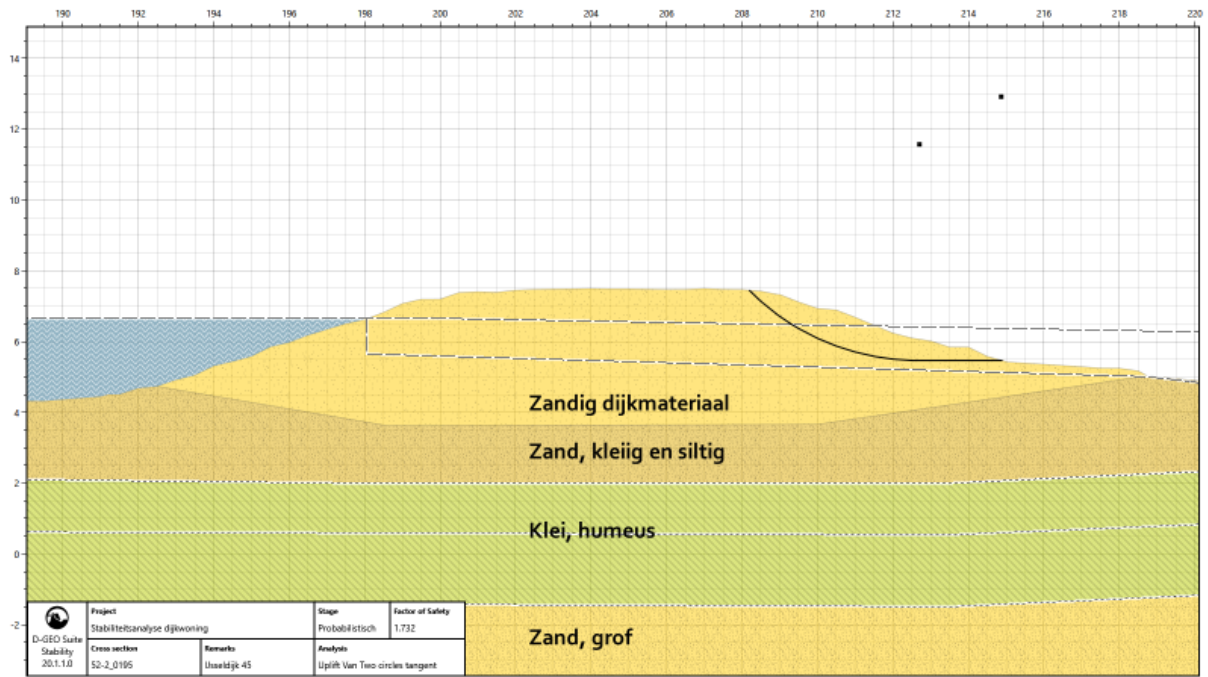
7.8 ONDERGROND

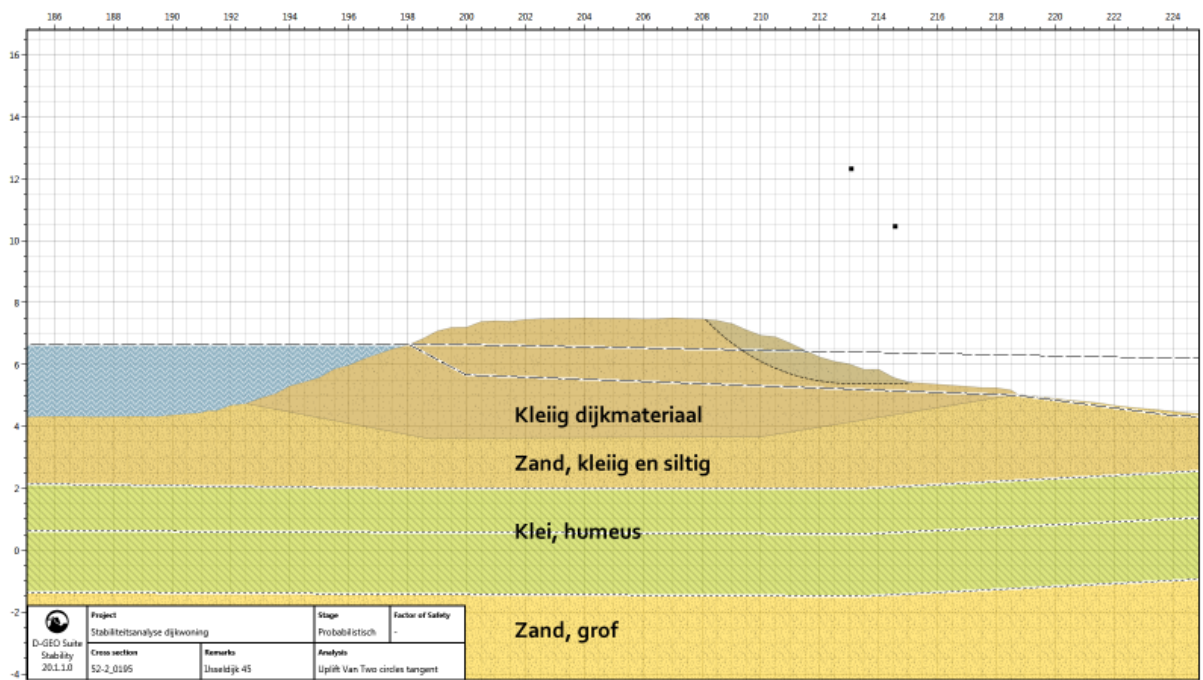
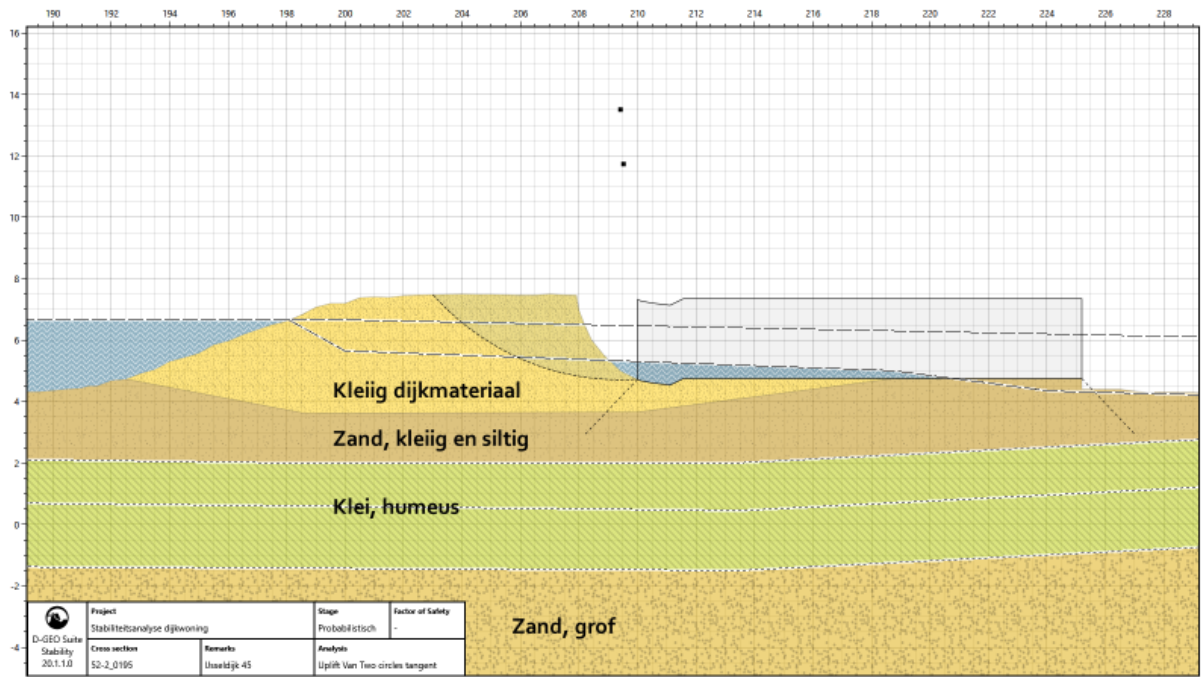






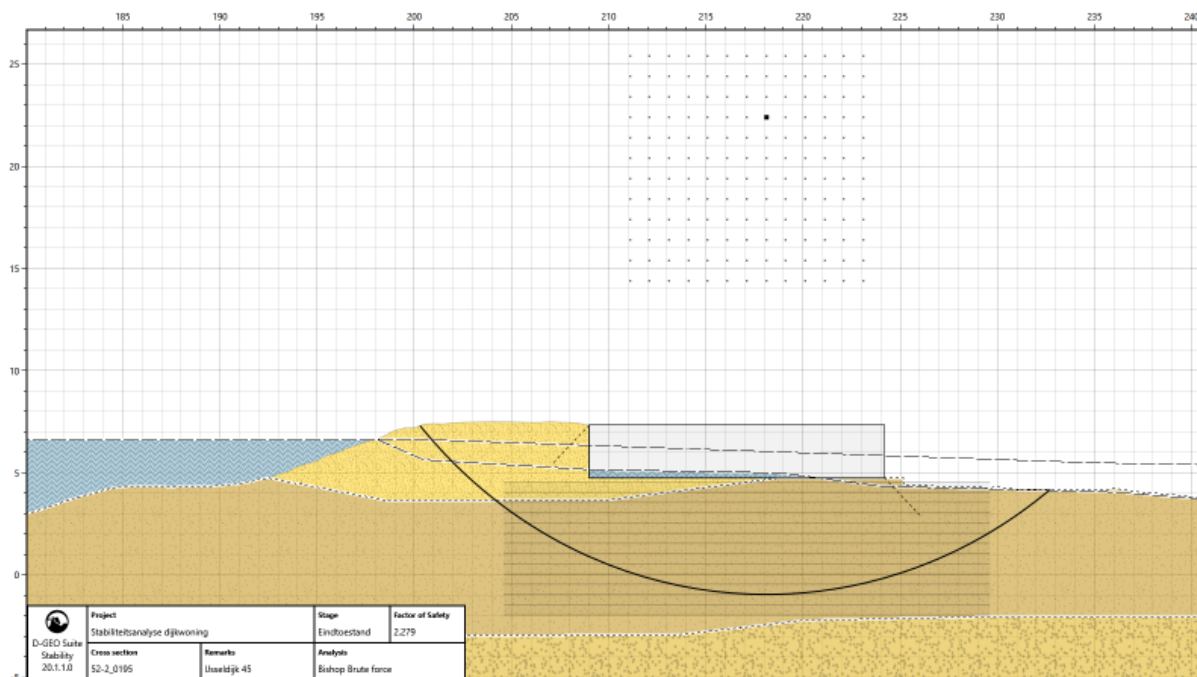
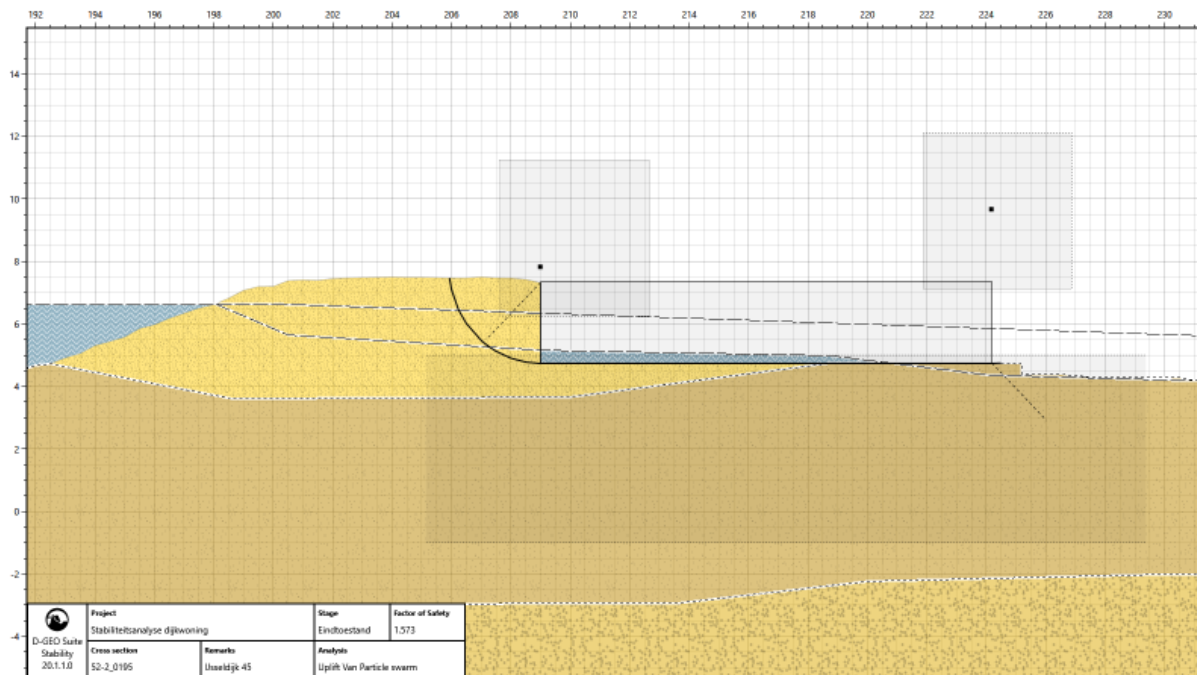


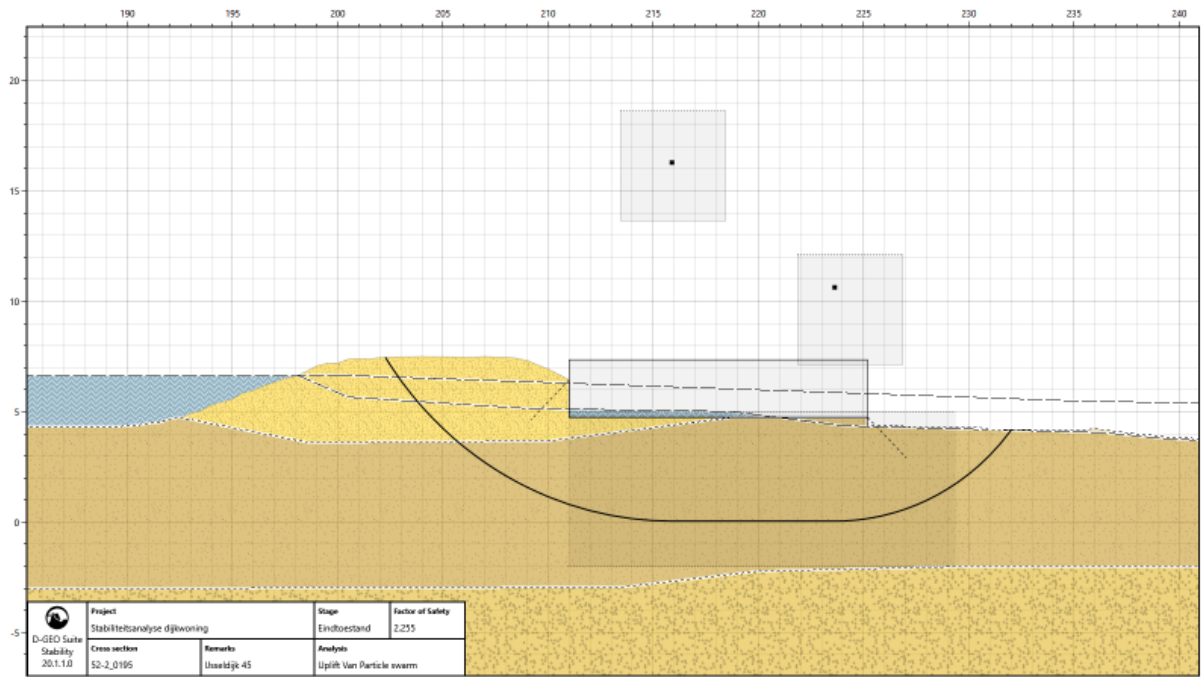




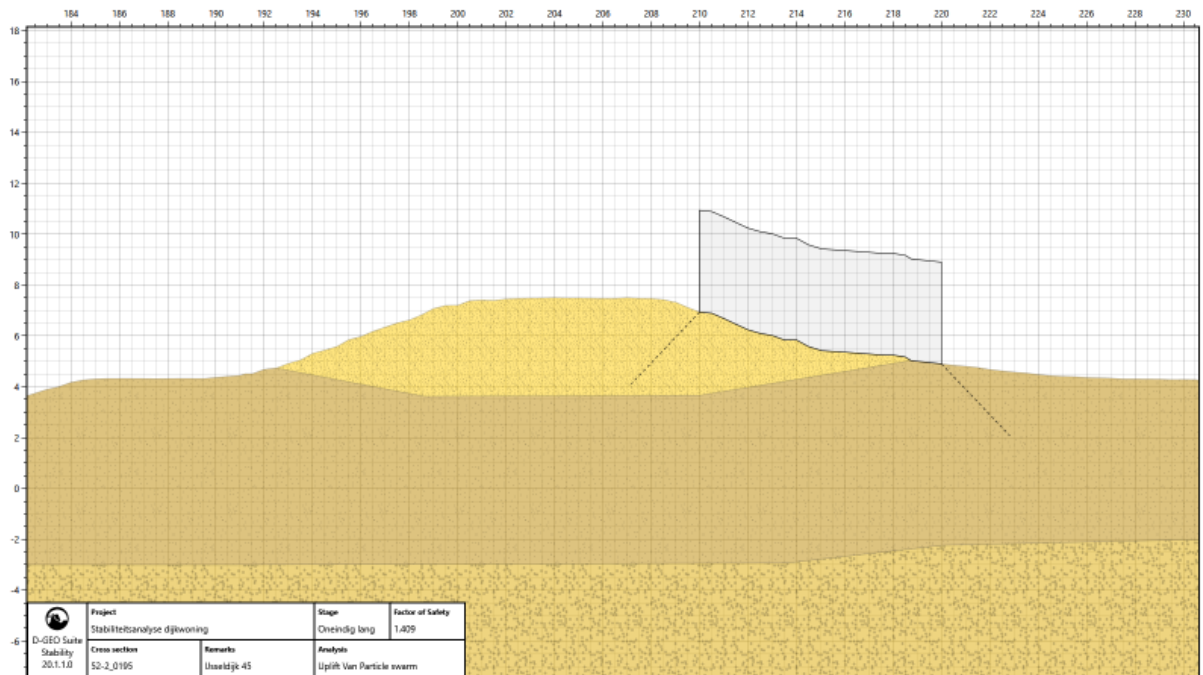
7.9 'ONREALISTISCH' GLIJVLAK

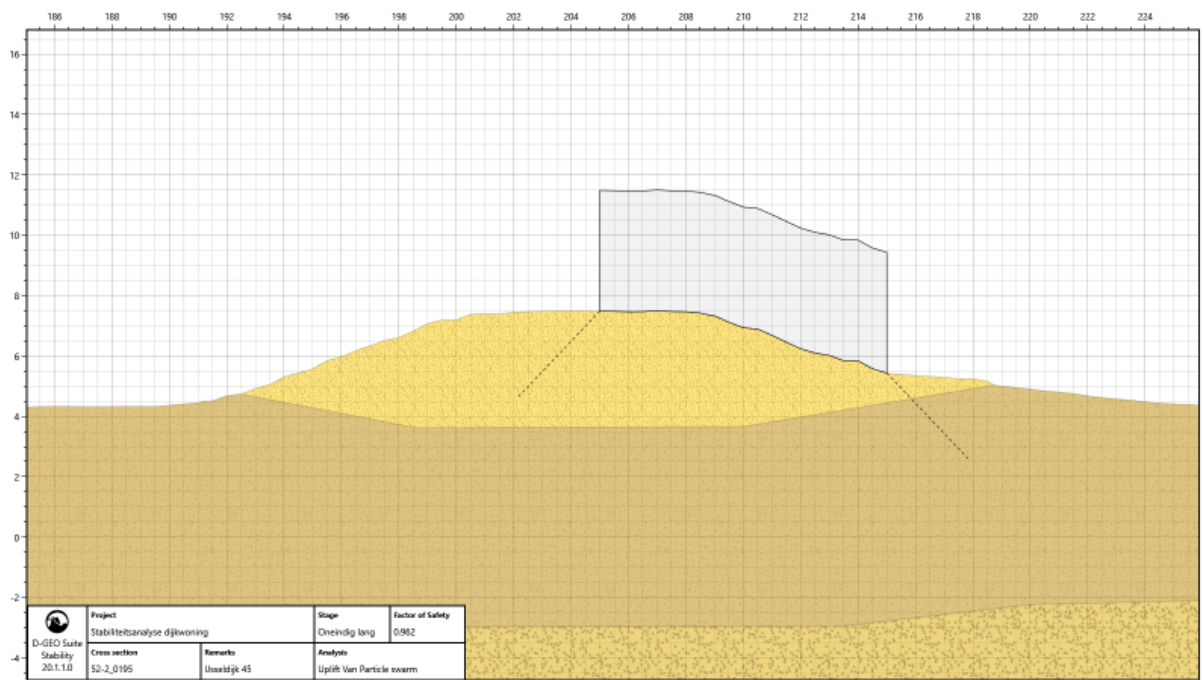
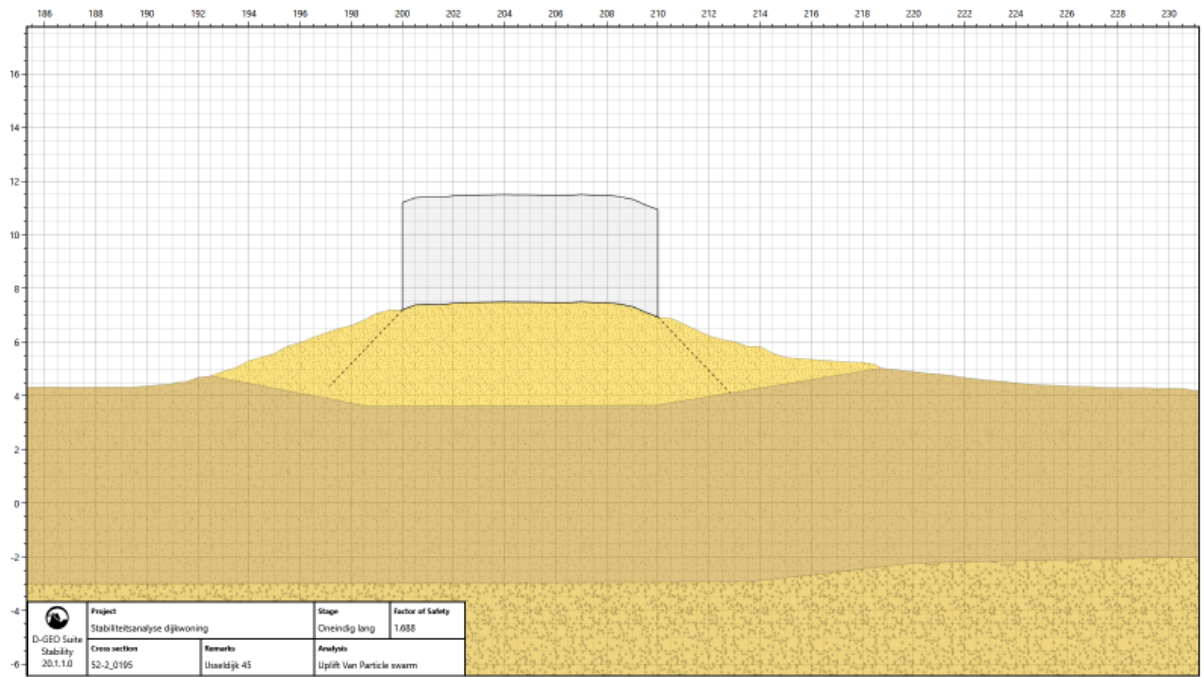
De eerste afbeelding lijkt een onrealistisch glijvlak, deze is vervolgens met de Bishop methode berekend. Dat glijvlak staat in de afbeelding eronder.

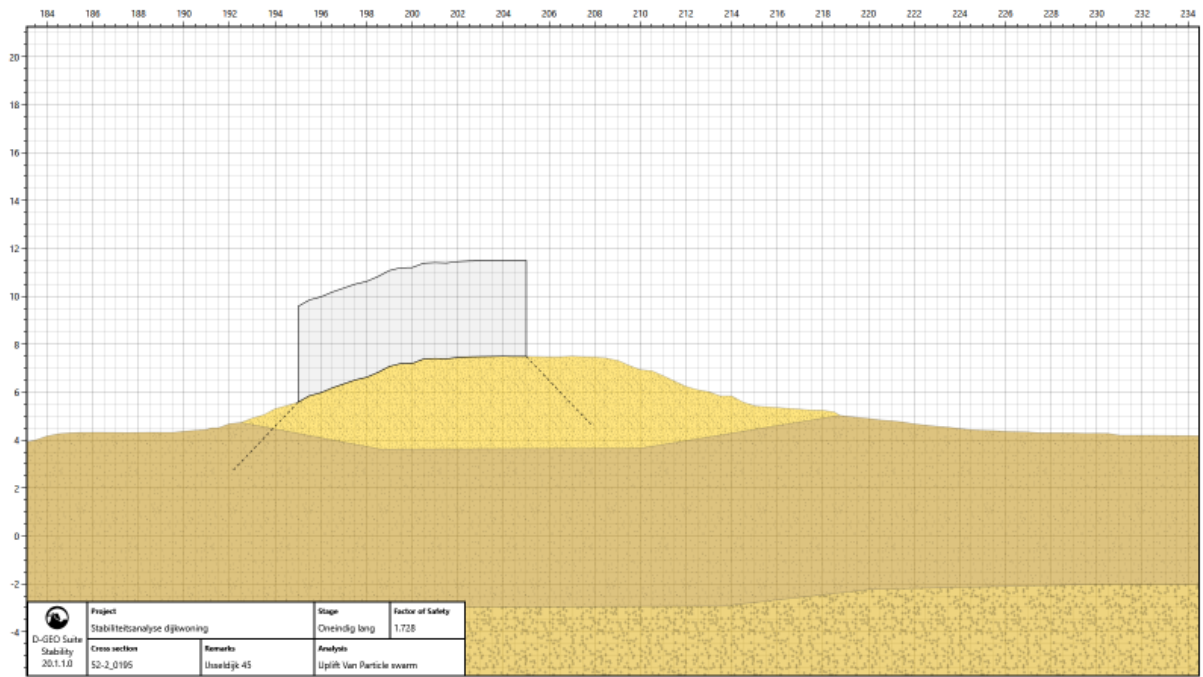




7.10 LOCATIE







BIJLAGE H: SAMENVATTING DOORLOPEN METHODIEK

Voor het vertalen van de resultaten uit de gevoeligheidsanalyse op de pilotstabiliteitsbeoordeling van de maatgevende dijkwoninglocatie naar een methode voor het beoordelen van de stabiliteit ter plaatse van dijkwoningen, wordt eerst beschreven welke methode tot dusver is gebruikt en bij welke voorwaarden het resultaat toepasbaar is op andere dijkwoninglocaties. Vervolgens kan gekeken worden hoe de stabiliteit beoordeeld kan worden bij dijkwoninglocaties, die niet voldoen aan de toepassingsvoorwaarden.

1. Er is van grof naar fijn gewerkt. Van alle dijkwoningen binnen dijktraject 52-2 zijn middels een analyse in ArcGIS de criteria uit de eenvoudige toets voor NWO-bebouwing meegenomen (conform WBI 2017). Met het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) is op basis van de grootte van de woning, het bouwjaar, de afstand tot de kruin en de hoogte en breedte van de kruin een eerste selectie gemaakt. Deze selectie dijkwoningen zijn vervolgens vergeleken op de aanwezigheid van een kelder en de bijbehorende keldervloerhoogte om tot een beperkte selectie van acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties te komen.
2. Van deze acht potentieel maatgevende dijkwoninglocaties zijn vervolgens de bijbehorende dwarsprofielen tegen elkaar geplot en kritisch geanalyseerd. De kenmerken van de dwarsprofielen waar naar gekeken is zijn achtereenvolgend:
 - a. Hoogteverschil tussen de kruin en het achterland (verval);
 - b. Kruinbreedte;
 - c. Kruinhoogte;
 - d. Waterstand bij de norm;
 - e. Aanwezigheid van teensloot en/of berm.
3. Op grond van deze informatie is er een maatgevende dijkwoninglocatie gekozen: IJsseldijk 45. De reden voor deze keuze is gebaseerd op het relatief grote verval, de kleine kruinbreedte en het kleinste verschil tussen de kruinhoogte en de waterstand bij de norm. Van de dijkwoningen die op de binnenkruin staan is deze locatie degene met de kleinste kruinbreedte. Van deze dijkwoning zijn vervolgens gedetailleerde gegevens verzameld.
4. Deze dijkwoninglocatie is vervolgens met de gedetailleerde toets op STBI en de toets op maat NWObe doorgerekend in D-Stability, in conformiteit met het WBI 2017. Aan de hand van drie situaties: nulsituatie, aanwezigheid dijkwoning en gefaalde dijkwoning; is getracht de invloed van de dijkwoning op de binnenwaartse stabiliteit van de IJsseldijk in kaart te brengen. Daarnaast is de onzekerheid in de uitkomst door middel van een gevoeligheidsanalyse toegeschreven aan de onzekerheid in de eigenschappen, en waar nodig geoptimaliseerd. Vervolgens zijn in een uitgebreide gevoeligheidsanalyse alle mogelijk maatgevende eigenschappen van dijkwoninglocaties binnen dijktraject 52-2 gevarieerd binnen de bestaande geometrie van de maatgevende dijkwoninglocatie.
5. Om op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse een methode te ontwikkelen zullen ze eerst kort samengevat worden. De nulsituatie is de situatie zonder dijkwoning. In de situatie met dijkwoning is er een ontgroning geschematiseerd, omdat de dijkwoning zich in het grondlichaam bevindt (kelder). Bij de aanwezigheid van de dijkwoning wordt geacht dat al haar constructieve elementen voldoende sterkte hebben. Dit heeft ertoe geleid dat:

- a. De binnenwaartse macrostabiliteit ter plaatse van de dijkwoning wordt versterkt in de gevallen met een zandig en siltige klei en zand als ondergrond, de gemiddelde verandering in stabiliteitsfactor bedraagt van +23%.
- b. De binnenwaartse macrostabiliteit ter plaatse van de dijkwoning wordt verzwakt in het geval van een top laag met kleiig zand en humeuze klei met gemiddeld -12%.
- c. De dijkwoning bij een eigen gewicht van meer dan 36 kN/m² een negatieve invloed heeft op de stabiliteit in de bestaande situatie.
- d. De kelderdiepte een verwaarloosbare invloed heeft op de stabiliteit van de dijk.

Als een dijkwoning een ondiepe fundering heeft en zich niet in het grondlichaam, maar op het grondlichaam, bevindt, heeft dit de volgende effecten:

- a. De negatieve invloed van een dijkwoning op de stabiliteit wordt groter naarmate deze zich meer op de kruin bevindt en een groter eigen gewicht heeft.
- b. Er is een positief effect op stabiliteit als een dijkwoning zich laag op het talud bevindt.

Bij de gefaalde dijkwoning in het grondlichaam wordt conservatief aangenomen dat al haar constructieve elementen zijn bezweken en verdwenen. Dit heeft als gevolg dat:

- a. De dijkwoning bij de locatie op de binnenkruinlijn bij elke grondopbouw een negatieve invloed zal hebben, met gemiddeld -25%.
- b. De kelderdiepte bij de binnenkruin een significant negatieve invloed heeft op de stabiliteit, een verandering van -38% bij een verlaging van 0,5 m en mogelijk falen tot gevolg. Bij een verlaging van de kelderdiepte met 1 m verliest de dijk zijn waterkerende functie.

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat bij de conservatief geschematiseerde maatgevende dijkwoninglocatie, er zowel positieve als negatieve effecten kunnen voordoen. In veel gevallen waarbij er een negatief effect werd waargenomen resulteerde dit vervolgens alsnog in een toetsoordeel dat ruim voldoet aan de signaleringswaarde (I_v). In de gevallen waarbij de maatgevende dijkwoning echt tot falen van de dijk heeft geleid is, is bij een gefaalde kelder dieper dan 3,15 meter onder de binnenkruinlijn. Ook een dijkwoning met een ondiepe fundering en meer dan 20 kN/m² eigen gewicht dat op de binnenkruin staat, waarbij minder dan 10 meter kruinbreedte overblijft.

6. Het enige dat in de gevoeligheidsanalyse constant is gebleven is de geometrie van de dijk. Het kan gesteld worden dat het resultaat van de stabiliteitsbeoordeling bij de maatgevende dijkwoninglocatie IJsseldijk 45 van toepassing is om een toetsoordeel te geven dat aan de faalkanseis voldoet, wanneer de geometrie van de dijk bij een andere dijkwoninglocatie over meer sterkte beschikt. Er zijn echter nog een aantal toepassingsvoorwaarden waaraan de dijkwoninglocatie moet voldoen:
 - a. Het overslagdebiet ter plaatse van de locatie is niet groter dan 0,1 l/m/s;
 - b. Bij een dijkwoning dat op de binnenkruin staat, moet minimaal 10 meter kruinbreedte overblijven.
 - c. Bij een dijkwoning dat op de binnenkruin staat, waarbij 10 meter kruinbreedte overblijft:
 - i. Is het eigen gewicht van een dijkwoning zonder kelder niet groter dan 20 kN/m² (drie verdiepingen volgens (Jongorius, 2016) en twee verdiepingen volgens (Witteveen+Bos, 2014)),

- ii. Of heeft een dijkwoning een maximale kelderdiepte van 3,15 meter onder de kruin.
- 7. Voor een dijkwoninglocatie die over minder sterkte beschikt dan de maatgevende dijkwoninglocatie kan vervolgens dezelfde methode voor de toets op maat worden doorlopen. De methode start in dat geval bij stap 4. Om snel inzicht te krijgen over de sterkte van de dijk, kunnen de desbetreffende dwarsprofielen in een Excel-werkblad naast elkaar geplot worden, nadat ze zijn geschaald op de waterstand bij de norm.