

Adviesrapportage Geotechniek

**Geul Bokhoven [GTM_223_L]
KRW-ZN DP-3 Wp-5.1.16
Rijkswaterstaat**

1 juni 2023 - Public

Contactpersoon

ARCADIS

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 220
3800 AE Amersfoort
Nederland

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding en doel	5
1.2	Projectomschrijving	5
1.3	Proces	6
1.4	Leeswijzer	6
2	Ontwerp	7
3	Uitgangspunten	8
3.1	Hydraulische randvoorwaarden	8
3.1.1	Polderpeilen	8
3.1.2	Waterstanden WBN	8
3.2	Geometrie	8
3.3	Bodemopbouw	9
3.3.1	Bodembeschrijving	9
3.3.2	Kwelweglengte	11
3.4	Invoerparameters Sellmeijer	11
3.4.1	Doorlatendheid k	11
3.4.2	Zandgrofheid D70	12
3.4.3	Samenvatting invoerparameters Sellmeijer berekening	13
3.4.4	Veiligheidsfactoren volgens ontwerpinstrumentarium OI2014v4	13
4	Piping analyse	15
4.1	Werkwijze	15
4.2	Resultaten pipingtoets Sellmeijer	16
4.3	Invloed maatregel op piping	17
4.3.1	Dijkpaal A878	17
4.3.2	Dijkpaal A887	18
5	Macrostabieliteit	19
5.1	Macrostabieliteit buitenwaarts (STBU)	19

4 Datum: 1 juni 2023 - Public

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Kaderrichtlijn Water: Europese afspraken om de waterkwaliteit te verbeteren

Schoon oppervlaktewater is een essentiële randvoorwaarde voor planten en dieren om te kunnen leven. Bovendien biedt het voor de mens een aantrekkelijke leefomgeving. Daartoe hebben de lidstaten van de Europese Unie in 2000 de Kaderrichtlijn Water (KRW) vastgesteld. Doel van de KRW is dat al het water in Europa in 2027 schoon en gezond is.

De KRW-richtlijn bepaalt dat de wateren een goed leefgebied moeten vormen voor de planten en dieren die er van nature thuishoren. De KRW-opgave is het verbeteren van de chemische en ecologische kwaliteit van grond- en oppervlaktewater. Dit geldt voor al het water in Nederland, waarbij Rijkswaterstaat verantwoordelijk is voor het verbeteren van de kwaliteit van het water in de grote rivieren. De KRW kent drie uitvoeringsperioden: 2009-2015; 2016-2021 en 2022-2027. Uiterlijk in 2027 moeten de doelen voor schoon en gezond water zijn gehaald of moeten op zijn minst alle maatregelen zijn genomen om dit mogelijk te maken. Bij het niet halen van de KRW-doelen kan het Europese Hof van Justitie boetes opleggen.

KRW in Nederland

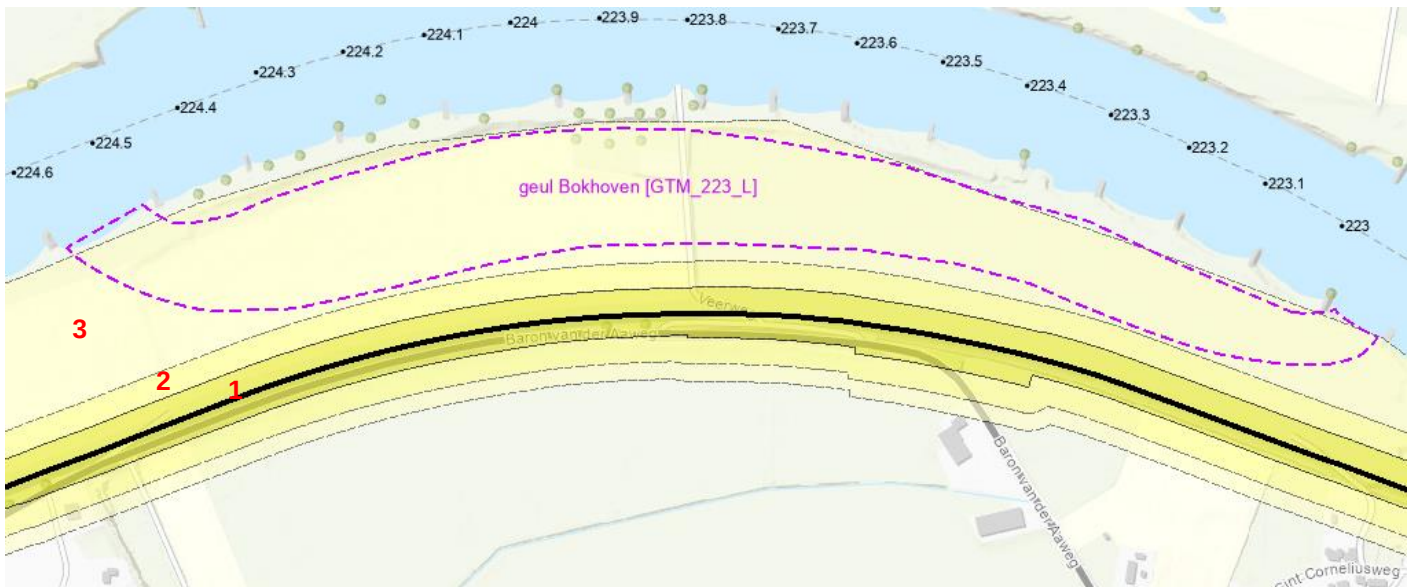
In Nederland is de minister van Infrastructuur en Waterstaat verantwoordelijk voor de uitvoering van de KRW. Om de KRW-doelstellingen te behalen werkt de minister nauw samen met andere overheden, zoals provincies, waterschappen en gemeenten. Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het verbeteren van de kwaliteit van het water in de grote rivieren, waaronder ook de Maas. Om de ecologische kwaliteit van het water in de Maas te verbeteren heeft Rijkswaterstaat het programma KRW Zuid-Nederland (KRW-ZN) opgezet. Het programma KRW-ZN bestaat uit verschillende typen maatregelen: herinrichting van oevers, uiterwaarden en beekmondingen. Hiermee kunnen verdwenen leefgebieden van waterplanten en -dieren in en langs de Maas weer zoveel mogelijk worden teruggebracht.

De maatregel betreft het aanleggen van een meestromende geul en ligt deels binnen de keurzonering van waterschap Aa en Maas. Het doel van dit onderzoek is het in beeld brengen of het ontwerp haalbaar is met betrekking tot de waterveiligheid van de waterkering en ter onderbouwing van de vergunning aanvraag naar het waterschap.

1.2 Projectomschrijving

De maatregel ligt aan de zuidelijke oever van de Maas vlak boven Bokhoven. Het maatregelgebied loopt van rivierkilometer 222.9 tot 224.6 in het voorland van normtraject 36-5, welke in beheer is van Waterschap Aa en Maas. Het maatregelgebied ligt geheel in beschermingszone B. Figuur 1 geeft een weergave van de precieze ligging van het maatregelgebied.

De maatregel bestaat uit creëren van een kwelgeul. Door het realiseren van de kwelgeul kan er een probleem ontstaan met betrekking tot de faalmechanismen macrostabiliteit en piping. Door een deel van de deklaag te ontgraven neemt de aanwezige weerstand in het voorland voor het faalmechanisme piping af, waardoor het risico op piping toeneemt. Normtraject 36-5 is tijdens de huidige beoordelingsronde afgekeurd op het faalmechanisme piping.



Figuur 1: Maatregelgebied (paars gearceerd) ten opzichte van de waterkering (zwart) en de keurzonering (kernzone = 1, beschermingszone = 2, beschermingszone B = 3)

1.3 Proces

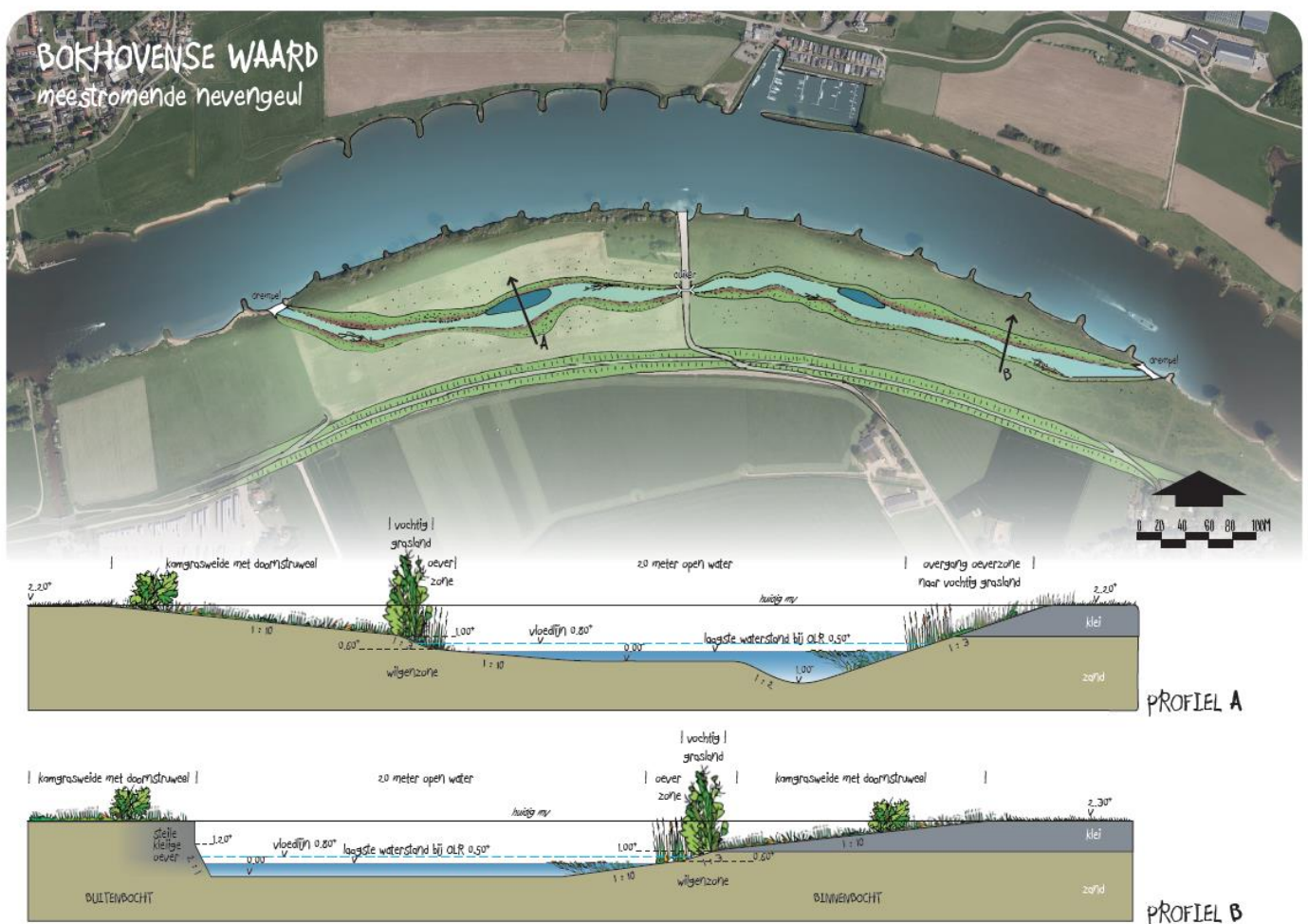
Er zijn twee contactmomenten geweest met het waterschap Aa en Maas. Het eerste contactmoment ging over de werkwijze en uitgangspunten voor KRW-maatregel Geul Bokhoven. Hierin is met name besproken dat de ervaring, opgedaan in eerdere KRW-maatregel (Boxmeerse Veld en Viltse Graaff), wordt meegenomen tijdens het onderzoek voor KRW-maatregel Geul Bokhoven. Na dit overleg heeft Arcadis het logboek ontvangen van waterschap Aa en Maas voor de beoordelingsronde (piping) van 2017 [1]. Tijdens het tweede contactmoment zijn de resultaten van de analyses besproken en waar nodig aangescherpt. Ook zijn tijdens dit overleg de voorwaarden voor vergunningverlening o.b.v. deze resultaten besproken.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt verder uitgeweid over het ontwerp van de maatregel. Hoofdstuk 3 gaat in op het grondonderzoek en de gebruikte uitgangspunten. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de piping berekeningen gepresenteerd en in hoofdstuk 5 wordt macrostabiliteit behandeld. In hoofdstuk 6 is de conclusie beschreven.

2 Ontwerp

In het maatregelgebied wordt een meestromende geul aangelegd¹. De bodem van de geul komt te liggen op een diepte NAP 0,0 m in het ondiepe gedeelte en NAP -1,0 m in het diepe gedeelte, dit is 3,2 m diep ten opzichte van het huidige maaiveld. Daarmee ligt de bodem 1,5 m onder GLG en snijdt de zandondergrond aan. Bij doorsnede A hebben de zuidelijke taluds boven de GLG een helling van 1:3 en onder GLG een helling van 1:10, het noordelijke talud heeft een helling van 1:3 zowel boven als onder GLG. Doorsnede B heeft aan de zuidelijke zijde een steile kleiige oever met een steile helling van 2:1, het noordelijke talud heeft boven GLG een helling van 1:3 en onder GLG een helling van 1:10. Er is circa 20 m open water in de breedte in de geul. In Figuur 2 is de inrichtingsschets uit fase 1 weergegeven.



Figuur 2: Inrichtingsschets Geul Bokhoven.

¹ Voor alle conditionerende onderzoeken is de onderzoeksinspanning bepaald op het ontwerp uit fase 1 (SO). Het is mogelijk dat gedurende fase 2 (van SO via SO+ naar SO++) het ontwerp van de maatregel aangepast is op basis van voortschrijdende inzichten vanuit omgeving of de uitgevoerde conditionerende onderzoeken. De onderzoeksinspanning is echter altijd dekkend voor het uiteindelijke SO++.

3 Uitgangspunten

Onderstaande uitgangspunten zijn deels gebaseerd op de WBI-beoordeling van dijktraject 36-5 door waterschap Aa en Maas [2]. Deze is uitgevoerd tijdens de landelijke beoordelingsronde met minder ervaring met de huidige rekenmethoden. De berekeningen uit de landelijke beoordelingsronde zijn niet van voldoende kwaliteit om een gedegen lokale beoordeling te doen. Voor deze rapportage is gekozen om de basisberekening van het waterschap opnieuw uit te voeren met waar nodig een aanscherping in de uitgangspunten. Op die manier kan de uitkomst vergeleken worden met de sommen van de KRW-maatregel. De gebruikte rekenmethode voor het faalmechanisme piping is Sellmeijer.

3.1 Hydraulische randvoorwaarden

3.1.1 Polderpeilen

Tijdens de landelijke beoordelingsronde is uitgegaan van een binnendijs peil wat ongeveer gelijk is aan het maaiveld (de sloten staan vol met water) [2]. Op basis van beheerderskennis, de landelijke beoordelingsronde binnen waterschap Aa en Maas en waarnemingen van kwel wordt een waterstand op maaiveldniveau realistisch geacht. Indien er geen maatgevende afwijkende oorzaak aanwezig is in de ondergrond of het achterland, wordt het polderpeil gelijkgesteld aan het maaiveld volgens Tabel 1. Deze tabel omschrijft de gebruikte polderpeilen van de geotechnische analyses.

Tabel 1: Polderpeilen

Dijkpaal [-]	Polderpeil = maaiveldniveau [m NAP]
A878	2,30
A887	2,05

3.1.2 Waterstanden WBN

Voor KRW-maatregel Geul Bokhoven wordt een buitenwaterstand aangehouden van NAP +6,72 m. Deze waterstand is berekend door Waterschap Aa en Maas en geleverd aan Arcadis.

3.2 Geometrie

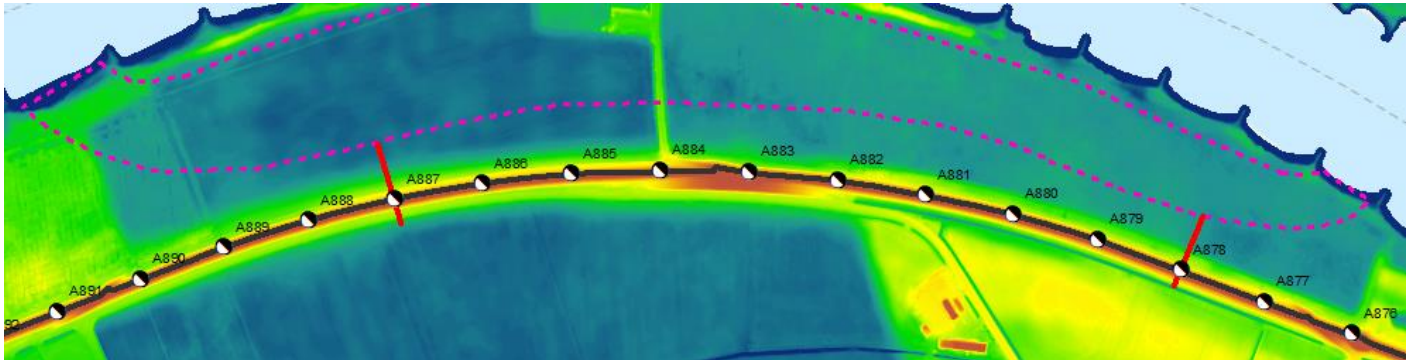
Voor het bepalen van de maatgevende geometrie is uitgegaan van de AHN4. Voor de Sellmeijer-berekeningen zijn twee doorsneden gekozen ter plaatse van dijkpaal A878 en dijkpaal A887, een bovenaanzicht van de locaties is weergegeven in Figuur 3. De profielen zijn gekozen op basis van waar de KRW-maatregel ligt ten opzichte van de waterkering en op basis van het achterland.

Dwarsprofiel A878

Bij dwarsprofiel A878 ligt de KRW-maatregel nabij de kering. Achter de kering is een greppel/teensloot aanwezig die gaat dienen als uittredepunt voor het faalmechanisme piping. Het omringende achterland ligt hoger dan dwarsprofiel A878.

Dwarsprofiel A887

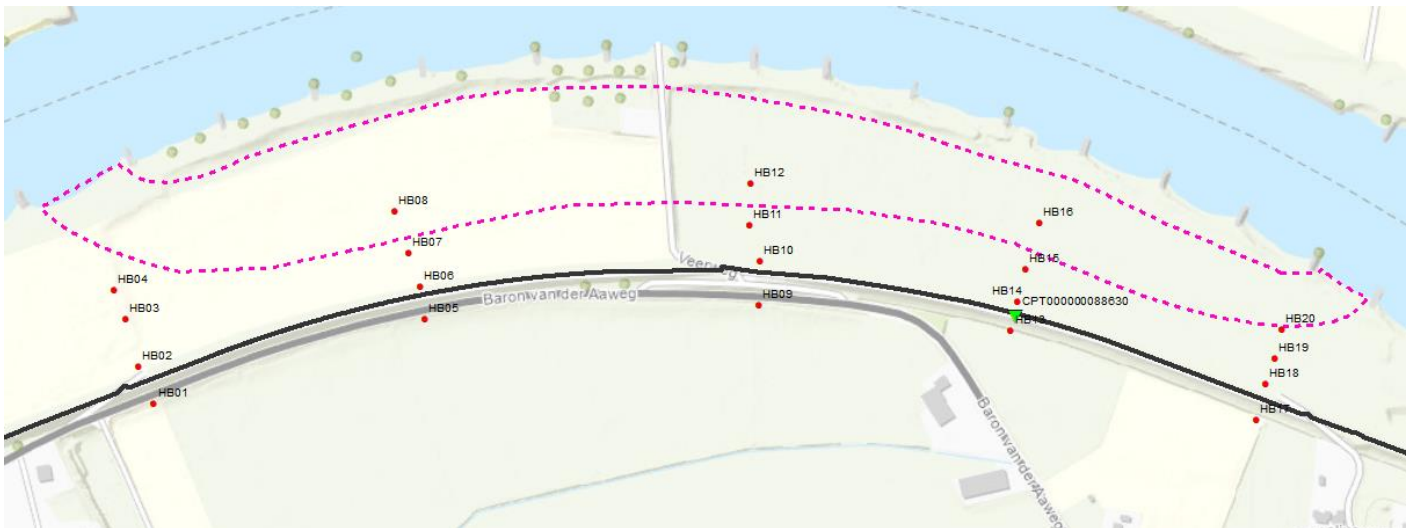
Bij dwarsprofiel A887 ligt de KRW-maatregel nabij de kering. Het achterland bij dit dwarsprofiel ligt erg laag in vergelijking met dwarsprofiel A878. Hierdoor fungeert het achterland direct achter de kering als uittredepunt voor het faalmechanisme piping.



Figuur 3: Locaties geometrieën (rood)

3.3 Bodemopbouw

Voor dit project is grondonderzoek uitgevoerd om beter inzicht te krijgen in de bodemopbouw, zie Bijlage A en Figuur 4. Dit grondonderzoek bestaat uit 20 boringen. Verder is het BRO geraadpleegd, er 1 sondering beschikbaar op de waterkering.



Figuur 4: Overzicht grondonderzoek en BRO

3.3.1 Bodembeschrijving

Vanuit het BRO is één sondering in de kruin beschikbaar. Deze sondering is vergeleken met het grondonderzoek van de KRW-maatregel.

De boringen uit het grondonderzoek van Inpijn-Blokpoel tonen een variatie in deklaagdikte, zie Tabel 2 en Figuur 5. De deklaagdikte varieert grotendeels tussen 0,0 m tot 4,5 m. In Tabel 2 is een omschrijving gegeven van de deklaag. De boringen die in de dwarsprofielen voor piping direct achter de kering bij het uittredepunt zijn gesitueerd zijn voornamelijk belangrijk, deze zijn oranje gearceerd in Tabel 2

Tabel 2: Omschrijving deklaag en deklaagdikte

Boring	Mv-niveau [m NAP]	O.k. deklaag [m NAP]	Dikte deklaag [m]	Kenmerken deklaag
HB01	3,10	2,00	1,10	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, stevig
HB02	3,70	2,00	1,70	Klei, stevig, zwak zandig.
HB03	3,20	1,30	1,90	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, stevig.

Boring	Mv-niveau [m NAP]	O.k. deklaag [m NAP]	Dikte deklaag [m]	Kenmerken deklaag
HB04	3,20	1,20	2,00	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, stevig, zwak grindig.
HB05	3,00	1,70	1,30	Bovenste laag klei, slap, zwak zandig. Hieronder een dunne tussenzandlaag. Vervolgens een laag klei, stevig met hieronder een laag klei, slap, sterk zandig.
HB06	4,40	3,00	1,40	Klei, stevig, zwak zandig.
HB07	2,30	2,00	0,30	Klei, stijf, zwak organisch.
HB08	2,00	0,50	1,50	Bovenste laag klei, stevig, zwak zandig. Hieronder een dunne tussenzandlaag. Vervolgens een laag klei, stijf met hieronder een laag klei, slap, sterk zandig.
HB09	3,35	1,55	1,80	Bovenste laag klei, stevig zwak zandig. Hieronder een laag klei, stevig, sterk zandig.
HB10	3,55	2,25	1,30	Klei, stevig, zwak zandig.
HB11	2,50	1,80	1,70	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, stijf gevolgd door een laag klei, slap, sterk zandig.
HB12	2,35	2,05	0,30	Klei, stevig, sterk zandig.
HB13	3,80	-0,70 (einde boring)	4,50	Klei, stevig.
HB14	3,95	2,45	1,50	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, stijf.
HB15	2,65	0,85	1,80	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, slap, sterk zandig.
HB16	2,55	n.v.t.	0	Voornamelijk zand aanwezig.
HB17	4,20	3,50	0,70	Klei, stevig, sterk zandig.
HB18	4,00	0,20	3,80	Klei, slap, zwak zandig.
HB19	2,40	0,40	2,00	Bovenste laag zand, kleiig. Hieronder een laag klei, stevig sterk zandig gevolgd door een zand tussenlaag. Hieronder een laag klei, stevig, zwak grindig.
HB20	2,40	0,90	1,50	Klei, stevig, sterk zandig.



Figuur 5: Overzicht deklaagdikte in meters per boring

3.3.2 Kwelweglengte

In deze rapportage wordt de invloed van het graven van een geul in het voorland op de waterkering onderzocht. Dit vergt een andere kijk op de kwelweglengte. Tijdens beoordelen en ontwerpen is de kortste kwelweglengte conservatief: piping treedt eerder op. Als in de huidige situatie een lange kwelweglengte in het voorland aanwezig is (of geschematiseerd), dan heeft het aantasten van het voorland door middel van de geul juist op deze locatie het grootste effect.

Het uitgangspunt tijdens de WBI-beoordeling is een voorlandlengte van maximaal 50 m, overeenkomend met de breedte van de toenmalige beschermingszone (scenario 1). De gedachte hierachter is dat de deklaag in deze zone beschermd wordt door het waterschap. Op locaties waar minder voorland aanwezig is, de geometrie de deklaag verstoord is of het grondonderzoek anders aantoont, is deze lengte aangescherpt. Op deze locatie wijst de WBI-berekening uit dat de deklaag niet volledig doorloopt in de beschermingszone; voorlandlengte is 90 m voor dijkpaal A878 en 120 m voor dijkpaal A887 (2x dijkzate dijk) (scenario 3).

Door middel van nieuw grondonderzoek van Inpijn-Blokpoel is de deklaagdikte (zie paragraaf 3.3.1) ter plaatse van de KRW-maatregel in kaart gebracht. Als de deklaag niet doorlopend is of dunner dan 1,5 m, is het aannemelijk dat de kwelweglengte ook korter is.

Indien de met grondonderzoek aangetoonde deklaag in het voorland korter is dan de voorziene afstand vanaf de buitenteen tot het maatregelgebied, heeft de maatregel geen invloed op het faalmechanisme piping, het intredepunt ligt dan al tussen de kering en het maatregelgebied. Hierdoor heeft het realiseren van de maatregelen geen invloed op piping omdat de deklaag niet aangetast wordt. Voor het inzicht van het effect is wel een Sellmeijer-berekening opgesteld.

Door middel van grondonderzoek is de deklaagdikte ter plaatse van de KRW-maatregel in kaart gebracht. Als de deklaag niet doorlopend is of dunner dan 1,5 m, is het aannemelijk dat de kwelweglengte ook korter is. Voor de Sellmeijer-berekening is daarom rekening gehouden met de onderstaande situaties:

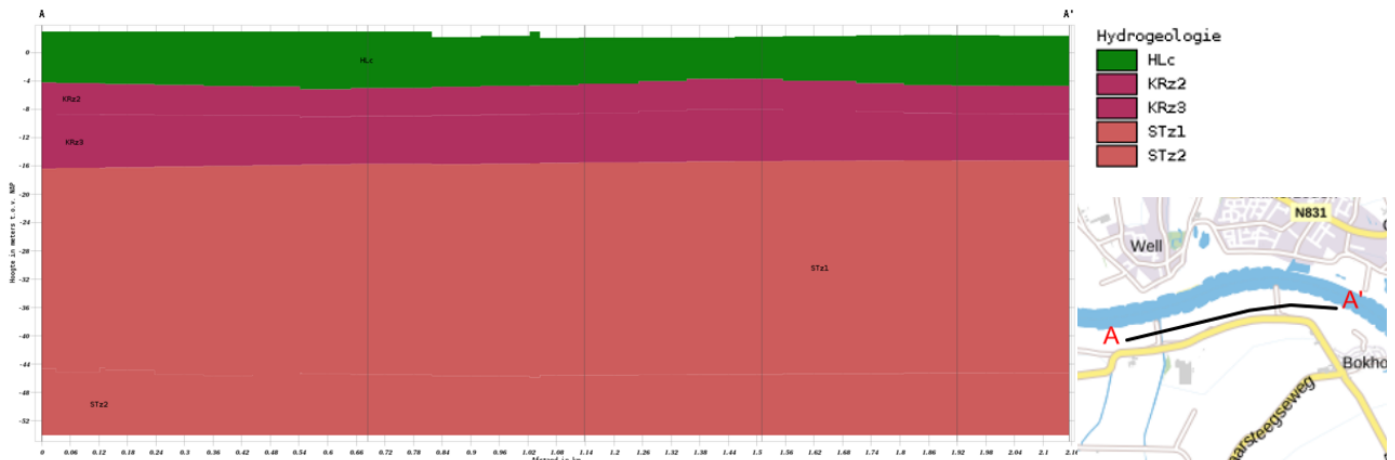
- Situatie 1 (huidig) Voorlandlengte van 100 m (huidige beschermingszone)
- Situatie 2 (huidig) Voorlandlengte van 50 m (beschermingszone ten tijde van beoordeling)
- Situatie 3 (huidig) Voorlandlengte is 90 m voor dijkpaal A878 en 120 m voor dijkpaal A887 (2x dijkzate dijk).
- Situatie 4 (KRW) Voorlandlengte van 33,0 m (tot insteek KRW-maatregel)

3.4 Invoerparameters Sellmeijer

3.4.1 Doorlatendheid k

Uit het ondergrondmodel van het BRO blijkt dat de volgende afzettingen aanwezig zijn tot minimaal NAP -50,0 m, zie ook Figuur 6:

- Formatie van Kreftenheye, tweede zandige eenheid (NAP -5,0 m tot NAP -9,0 m)
- Formatie van Kreftenheye, derde zandige eenheid (NAP -9,0 m tot NAP -16,0 m)
- Formatie van Sterksel, eerste zandige eenheid (NAP -16,0 m tot NAP -45,0 m)
- Formatie van Sterksel, tweede zandige eenheid (NAP -45,0 m tot einde ondergrondmodel NAP -50,0 m)



Figuur 6: Ondergrondmodel BRO (REGIS II v2.2)

In Tabel 3 is een weergave gegeven van de formaties, met bijbehorende doorlatendheid k . Er is geen verschil in de doorlatendheid van de formaties van Kreftenheye en formatie Sterksel, eerste zandige eenheid. De verwachting is dat de stroming die gaat plaatsvinden voornamelijk door de formatie van Kreftenheye stroomt. Omdat er geen verschil is in doorlatendheid is het gewogen gemiddelde 50,0 m/dag, met een variatiecoëfficiënt van 0,5 wordt de karakteristieke waarde dan **100,0 m/dag**. Voor de dikte van het watervoerend pakket geldt **40,0 m** na toepassing van een standaardafwijking van 0,5.

Tabel 3: Doorlatendheid k per formatie BRO REGIS II v2.2

Formatie [-]	Dikte laag [m]	Doorlatendheid k [m/dag]
Kreftenheye, eerste zandige eenheid	4,0	50,0
Kreftenheye, tweede zandige eenheid	7,0	50,0
Sterksel, eerste zandige eenheid	29,0	50,0
Sterksel, tweede zandige eenheid	5,0 (tot einde ondergrondmodel)	100,0

Doorlatendheid k voor gevoeligheidsanalyse

Voor een gevoeligheidsanalyse is gebruik gemaakt van de doorlatendheid zoals deze is opgenomen in het WBI. Daarbij is een k -waarde van 44 m/dag toegepast voor STPH. Deze is overgenomen in de gevoeligheidsberekening, zie paragraaf 4.2. De dikte van het watervoerend pakket is ook overgenomen uit de WBI-beoordeling [1].

3.4.2 Zandgrofheid D70

De waarde van de D70 is overgenomen uit de beoordeling van waterschap Aa en Maas [1]. Voor normtraject 36-5 zijn 19 korrelverdelingen uitgevoerd. De korrelverdelingen zijn net onder de afdekkende laag genomen om zo een representatief mogelijk beeld te geven voor de gevoeligheid van piping. In Tabel 4 zijn de D70-waarden uit het grondonderzoek van normtraject 36-5 weergegeven.

Tabel 4: D70-waarden uit grondonderzoek in normvak 36-5 [1]

Segment	Monsters	Gemiddelde D70 [m/d]	Stdev [m/d]	Var. coëff [-]
36001	4	308	101	0,33
36003_1	2	256	67	0,26
36003_2	7	295	130	0,44
36003_3	3	270	135	0,50

36004	3	348	222	0,64
Alle proeven	19	281	107	0,38

De gemiddelde waarde uit het onderzoek sluit redelijk goed aan bij de default waarden uit het SOS, zoals weergegeven in

Tabel 5: D70 in het SOS per segment van traject 36-5 [1]

Segment	D70 [μm]
36001	280
36002	280
36003	280
36004	280

Omdat de gemiddelden uit het verrichte onderzoek goed overeenkomen met de default waarden wordt voor alle segmenten een gemiddelde D70 van 280 μm aangehouden.

3.4.3 Samenvatting invoerparameters Sellmeijer berekening

In Tabel 6 is een overzicht gegeven van de invoerparameters voor de Sellmeijer-berekening, die in de voorgaande paragrafen zijn bepaald. In Tabel 7 zijn de invoerparameters voor de gevoeligheidsberekening weergegeven, met een wijziging in de doorlatendheid k en dikte van het watervoerend pakket D .

Tabel 6: Invoerparameters Sellmeijer berekening

Parameter	Karakteristieke waarde	Eenheid
Volumiek gewicht deklaag	17,35	kN/m ³
k (doorlatendheid)	50,00	m/dag
D (dikte watervoerend pakket)	40,00	m
D70 (Zandgrofheid)	280,0	μm

Tabel 7: Invoerparameters gevoeligheidsanalyse Sellmeijer berekening volgens WBI2017 (Riskeer)

Parameter	Karakteristieke waarde	Eenheid
Volumiek gewicht deklaag	17,35	kN/m ³
k (doorlatendheid) [gewogen gem. van $k \cdot D$]	44,0	m/dag
D (dikte watervoerend pakket)	42,0	m
D70 (Zandgrofheid)	280	μm

3.4.4 Veiligheidsfactoren volgens ontwerpinstrumentarium OI2014v4

De controle op piping vindt plaats door het optredende verval over de waterkering ΔH te vergelijken met het kritieke verval $\Delta H_{c,p}$ (Sellmeijer-berekening, zie paragraaf 4.1). Bij het bepalen van het kritieke verval (en hiermee de benodigde kwelweglengte) dienen de volgende veiligheidsfactoren te worden toegepast op het kritieke verval:

γ_{pip}	Veiligheidsfactor voor het deelfaalmecanisme piping, deze is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis $\beta_{eis,dsn}$.
----------------	--

$\gamma_{b,p}$ Partiële factor voor onzekerheid over de grondopbouw en de water(over)spanningen (schematiseringsfactor) bij het deelfaalmechanisme piping.

De benodigde veiligheidsfactor γ_{pip} wordt bepaald door middel van de onderstaande formule:

$$\gamma_{pip} = 1,04 \cdot e^{(0,37\beta_{eis,dsn} - 0,43\beta_{max})}$$

Waarin:

γ_{pip} Veiligheidsfactor voor het deelfaalmechanisme piping (-)
 $\beta_{eis,dsn}$ Geëiste betrouwbaarheidsindex voor de doorsnede (-)
 β_{max} Betrouwbaarheidsindex behorend bij de maximaal toelaatbare overstromingskans P_{max} (-): $\beta_{max} = -\Phi(P_{max})$

In bijlage A van OI2014v4 [3] is een overzicht gegeven van de aan te houden waarde van de veiligheidsfactor γ_{pip} per dijktraject. Voor dijktraject 36-5 geldt voor γ_{pip} het volgende:

$$\gamma_{pip} = 1,35$$

Voor $\gamma_{b,p}$ (schematiseringsfactor) is gekozen om een waarde van 1,2 in te vullen. In de omgeving is wel grondonderzoek gedaan, maar er is een onzekerheid over de deklaagdikte en in welke mate de deklaag daadwerkelijk aanwezig is. Daarom is gekozen voor een relatief conservatieve schematiseringsfactor.

De gekozen veiligheidsfactoren staan weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8: Veiligheidsfactoren voor faalmechanisme piping volgens OI2014v4 [3]

Veiligheidsfactoren	Waarde
γ_{pip}	1,35
$\gamma_{b,p}$	1,20

4 Piping analyse

In dit hoofdstuk wordt en nader ingegaan op het faalmechanisme piping.

4.1 Werkwijze

Er worden Sellmeijer-berekeningen uitgevoerd voor vier verschillende situaties per dijkpaal, de situaties zijn:

- Situatie 1 (huidig): voorlandlengte is 100 m (huidige beschermingszone).
- Situatie 2 (huidig): voorlandlengte is 50 m (beschermingszone ten tijde van beoordeling).
- Situatie 3 (huidig): voorlandlengte is 90 m voor dijkpaal A878 en 120 m voor dijkpaal A887 (2x dijkzate dijk).
- Situatie 4 (KRW): voorlandlengte is de afstand van de BUT tot de insteek KRW-maatregel (33,0 m).

Sellmeijer-berekening (terugschrijdende erosie) volgens Schematiseringshandleiding Piping [4]

De grenstoestandsfunctie voor piping is een vergelijking van het kritieke verval H_c [m] (weerstand) en het daadwerkelijke aanwezige stijghoogteverschil:

$$Z_p = m_p \Delta H_c - (h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})$$

Met r_c als reductiefactor voor de weerstand in de deklaag bij het uittredepunt ($r_c = 0,3$) en de modelfactor m_p . Voor de beoordeling wordt het kritieke verval ΔH_c gebaseerd op het in 2011 aangepaste model van Sellmeijer, uitgedrukt in de verhouding van kritieke verval ΔH_c en kwelweglengte L [m], de dikte van het watervoerend pakket en andere eigenschappen van het zandpakket.

$$\frac{\Delta H_c}{L} = F_{\text{resistance}} F_{\text{scale}} F_{\text{geometry}}$$

Met:

$$F_{\text{resistance}} = \eta \frac{\gamma_{\text{sub.particles}}}{\gamma_{\text{water}}} \tan \theta$$

$$F_{\text{scale}} = \frac{d_{70.m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70.m}} \right)^{0,4}, \quad \kappa = \frac{v_{\text{water}}}{g} k$$

$$F_{\text{geometry}} = 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} + 0,04} \left(\frac{D}{L} \right)^{-1}$$

Waarin:

L	Kwelweglengte van in- tot uittredepunt: $L = x_{exit} - x_{entry}$ [m].
$\gamma_{\text{sub.particles}}$	Volume gewicht van zandkorrels onder water (= 16,5) [kN/m ³].
η	Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (= 0,25) [-].
d_{70}	70-percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping-gevoelige laag [m].
k	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m ²].
k	Darcy doorlatendheid [m/s].
ν	Kinematische viscositeit van water (voor grondwater van 10° Celsius: $1,33 \cdot 10^{-6}$)
g	Zwaartekrachtversnelling (= 9,81) [m/s ²].
D	Dikte van de zandlaag [m].
$d_{70.m}$	Referentie d_{70} -waarde (= $2,08 \cdot 10^{-4}$) [m].
θ	Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel (= 37) [°].

4.2 Resultaten pipingtoets Sellmeijer

De resultaten de Sellmeijer-berekening zijn weergegeven in Tabel 9. De resultaten zijn voldoende als aan de volgende voorwaarde wordt voldaan:

$$\frac{\Delta H_{crit}}{\gamma_{pip} \gamma_{b,p}} \geq \Delta H$$

Waarin:

ΔH_{crit}	Kritische verval.
γ_{pip}	Veiligheidsfactor voor het deelfaalmecanisme piping, deze is afhankelijk van de gestelde betrouwbaarheidseis $\beta_{eis,dsn}$.
$\gamma_{b,p}$	Partiële factor voor onzekerheid over de grondopbouw en de water(over)spanningen (schematiseringsfactor) bij het deelfaalmecanisme piping.
ΔH	Optredend verval.

Een oordeel groter dan 1,0 betekent dat de aangepaste Sellmeijer berekening voldoet.

Uit de resultaten blijkt dat bij beide dijkpalen het faalmecanisme piping ruimschoots niet voldoet. Er is te weinig theoretische kwelweglengte aanwezig om tot het oordeel voldoende te komen. De KRW-situatie scoort het slechtst.

Tabel 9: Resultaten Sellmeijer-berekening

Dijkpaal	Situatie	Voorlandlengte vanaf BUT [m]	Theoretische kwelweglengte [m]	ΔH_{crit}	$\Delta H_{rep-0,3*d}$	Oordeel
A878	1	100	145	3,03	4,29	0,71
A878	2	50	95	2,10	4,29	0,49
A878	3	90	135	2,85	4,29	0,66
A878	KRW	40	85	1,90	4,29	0,44
A887	1	100	160	3,31	4,57	0,73
A887	2	50	110	2,38	4,57	0,55
A887	3	120	180	3,68	4,57	0,81
A887	KRW	33	93	2,06	4,57	0,45

Uit Tabel 10 blijkt dat de minimaal benodigde kwelweglengte waarbij piping voldoet varieert per dijkpaal. Voor dijkpaal A878 is de minimale benodigde kwelweglengte 227 m en voor dijkpaal A887 is de minimaal benodigde kwelweglengte 235 m.

Tabel 10: Minimaal benodigde kwelweglengte

Dijkpaal	Minimaal benodigde kwelweglengte vanaf uittredepunt achterland [m]	Minimaal benodigde kwelweglengte vanaf BUT [m]	ΔH_{crit}	$\Delta H_{rep-0,3*d}$	Oordeel
A878	215	170	4,52	4,52	1,00
A887	230	170	4,66	4,66	1,00

Gevoeligheidsberekening

Er is een gevoeligheidsberekening uitgevoerd waarin de doorlatendheid en dikte van het watervoerend pakket zijn gebaseerd op de WBI-beoordeling van waterschap Aa en Maas (Tabel 7). In Tabel 11 zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weergegeven. Voor de beoordeling van het faalmechanisme piping wordt uitgegaan van een zo lokaal mogelijke benadering, zoals weergegeven in Tabel 9.

Tabel 11: Resultaten gevoeligheidsanalyse Sellmeijer-berekening

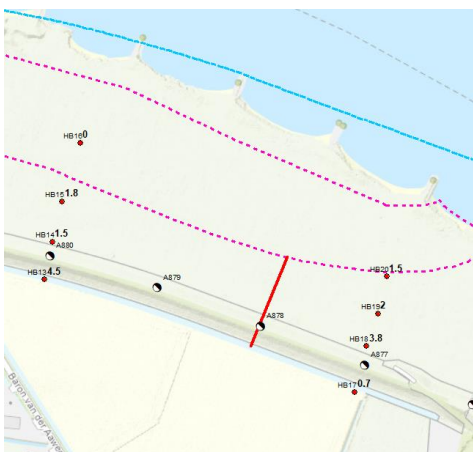
Dijkpaal	Situatie	Voorlandlengte vanaf BUT [m]	Theoretische kwelweglengte [m]	ΔH_{crit}	$\Delta H_{rep-0,3*d}$	Oordeel
A878	1	100	145	3,95	4,29	0,94
A878	2	50	95	2,73	4,29	0,68
A878	3	90	135	3,70	4,29	0,86
A878	KRW	40	85	2,48	4,29	0,59
A887	1	100	160	4,30	4,57	0,92
A887	2	50	110	3,10	4,57	0,64
A887	3	120	180	4,78	4,57	1,05
A887	KRW	33	93	2,68	4,57	0,58

4.3 Invloed maatregel op piping

4.3.1 Dijkpaal A878

Voor dit dwarsprofiel is gekeken naar de totale kwelweglengte van intredepunt tot uitredepunt achter de kering. De boring HB20 ligt op de rand van het KRW-maatregelgebied. De deklaagdikte bij HB20 is circa 1,5 m dik. Bij een ontgraving in het voorland wordt deze deklaagdikte minder, wat een negatieve invloed heeft op het faalmechanisme piping.

Uit de Sellmeijer analyse blijkt dat bij dijkpaal A878 (zie Figuur 7) de minimaal benodigde kwelweglengte circa 215 m is vanaf het uitredepunt in het achterland direct achter de kering. Met deze lengte ligt het intredepunt in de Maas. Er is dus al een bestaand piping tekort. Met graven van de geul wordt het intredepunt richting de waterkering verplaatst, hiermee wordt het oordeel nog slechter. Met het aanbrengen van weerstand onder de maatregel, in de vorm van een kleilaag, kan dit tekort weggenomen worden.



Figuur 7: Minimaal benodigde kwelweglengte dwarsprofiel A878 vanaf uitredepunt achterland (blauw) ten opzichte van het maatregelgebied (paars)

4.3.2 Dijkpaal A887

Voor dit dwarsprofiel (zie Figuur 8) is gekeken naar de totale kwelweglengte van intredepunt tot uittredepunt achter de kering. De boring HB07 ligt op de rand van het KRW-maatregelgebied. De deklaagdikte bij HB07 is circa 0,3 m dik. De deklaagdikte bij deze boring is te gering om eventueel intreden uit te sluiten en fungeert hierdoor als intredepunt. In het KRW-maatregelgebied ligt boring HB08, uit deze boring blijkt dat hier een deklaag aanwezig is van circa 1,5 m. Bij een ontgraving in het KRW-maatregelgebied wordt de deklaag weggegraven waardoor dit ook als intredepunt zal fungeren, de maatregel heeft invloed op het faalmechanisme piping.

Uit de Sellmeijer analyse blijkt dat de minimaal benodigde theoretische kwelweglengte circa 230 m is vanaf het uittredepunt in het achterland direct achter de kering. Met deze lengte ligt het intredepunt in het KRW-maatregelgebied aan de oever zijde. Bij het graven van de geul wordt weerstand weggenomen die bijdraagt aan het tegen gaan van piping. Door het aanbrengen van een kleilaag onder de maatregel kan er voldoende weerstand teruggebracht worden.



Figuur 8: Minimaal benodigde kwelweglengte dwarsprofiel A887 vanaf uittredepunt achterland (blauw) ten opzichte van het maatregelgebied (paars)

5 Macrostabiliteit

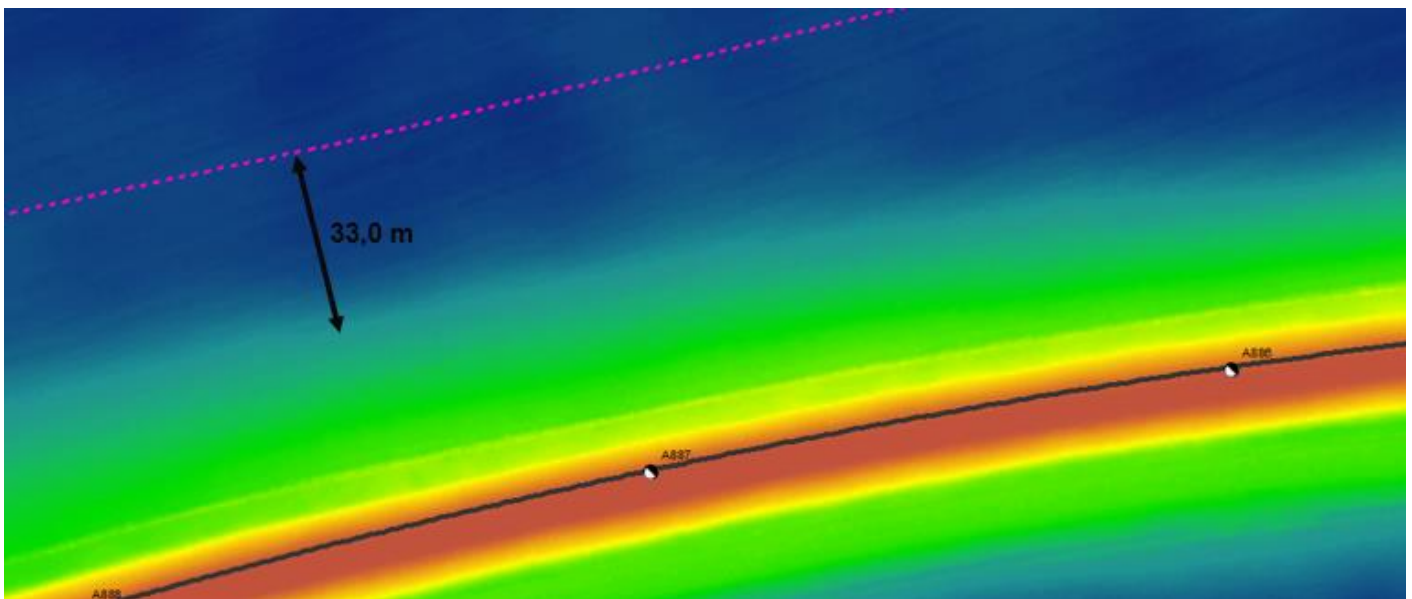
5.1 Macrostabiliteit buitenwaarts (STBU)

De rand van het maatregelgebied ligt op minimaal op circa 33,0 m vanaf buitenteen, zie Figuur 9. Het maatregelgebied ligt in beschermingszone B. Beschermingszone A is van belang voor de stabiliteit van de kering. Zo is de invloedszone van macrostabiliteit opgenomen in deze zone, een vergraving in beschermingszone A heeft invloed op de macrostabiliteit. De KRW-maatregel ligt hier buiten.

Uit de NEN3651 [5] volgt de vuistregel dat de lengte van de stabiliteitszone van de dijk niet meer is dan 4x de dijkhoogte. Het hoogteverschil van maaiveld in het voorland tot de kruin van het dijklichaam is circa 4,5 m. Hierdoor is de lengte van de stabiliteitszone 18,0 m. De afstand van KRW-maatregel tot buitenteen dijk is circa 33,0 m. Hiermee valt de KRW-maatregel buiten de stabiliteitszone, waardoor de KRW-maatregel geen invloed heeft op het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts.

Tabel 12: Beoordeling stabiliteitszone buitenwaarts

Dijkhoogte [m NAP]	mv-niveau voorland [m NAP]	Hoogteverschil [m]	4 * hoogteverschil [m]	Afstand BUT tot KRW-maatregel [m]
6,55	2,05	4,50	18,0	33,0



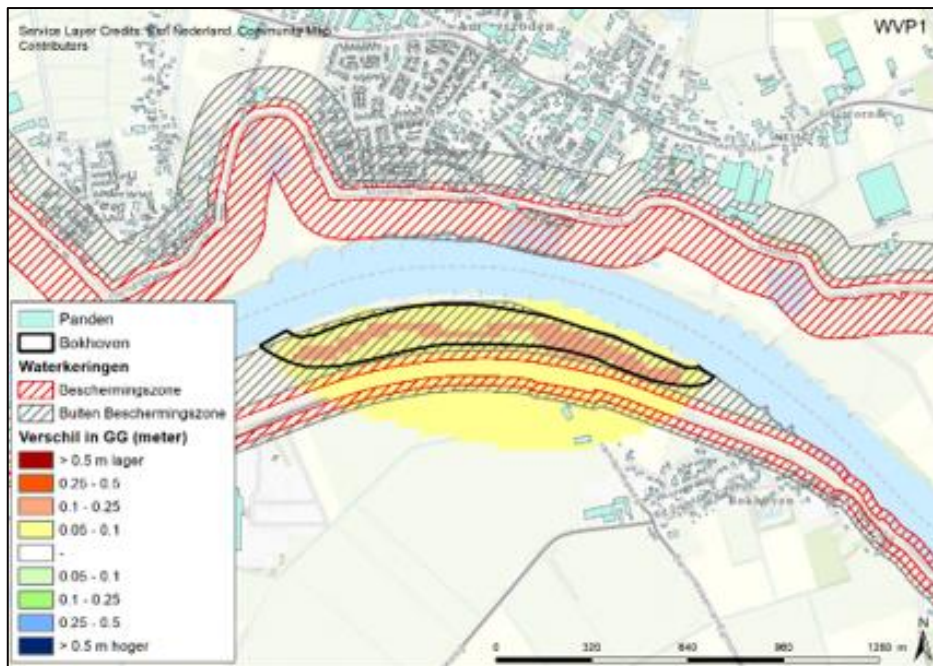
Figuur 9: Afstand buitenteen tot KRW-maatregel (paars)

Uit de bovenstaande controle volgt dat het realiseren van de KRW-maatregel geen directe invloed heeft op het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts STBU.

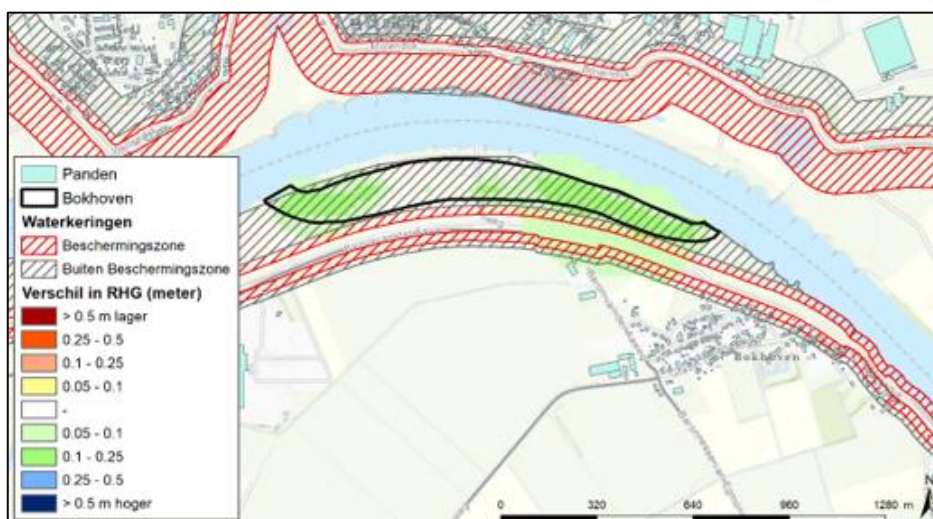
5.2 Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)

Voor deze analyse is alleen een gemiddelde en T10 situatie doorgerekend. Toch is deze analyse voldoende indicatief voor hogere waterstanden omdat deze conservatief berekend is: in het geohydrologisch model is het gehele maatregelgebied afgegraven. De invloed van de geul op de stijghoogte is met een geohydrologische analyse onderzocht [6].

Uit deze studie blijkt dat er effecten zijn op de stijghoogte ter plaatse van de waterkering. In de gemiddelde afvoersituatie verdroogt het gebied; de stijghoogte wordt circa 5 tot 10 cm lager in het watervoerend pakket (Figuur 10). In de T10 situatie is er een minimale verhoging van 5 tot 10 cm ter plaatse van de geul (Figuur 11). Deze verhoging loopt in het oosten door tot voorbij de buitenteen.



Figuur 10: Effecten van de geul op de stijghoogtes in een gemiddelde afvoersituatie in de zomer (watervoerend pakket)



Figuur 11: Effecten van de geul op de stijghoogtes tijdens een T10 waterstand op de Maas (watervoerend pakket)

Er is een invloed op de stijghoogte, en daarmee ook op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. Het aanbrengen van een 1 m dikke kleilaag zoals voorgesteld in de rapportage Verkennend onderzoek water [6] kan deze effecten mitigeren.

5.3 Invloed maatregel op macrostabiliteit

De afstand van de KRW-maatregel tot de waterkering maakt dat de invloed op macrostabiliteit buitenwaarts STBU verwaarloosbaar is. Op macrostabiliteit binnenwaarts zijn er wel effecten zichtbaar. Deze effecten kunnen gemitigeerd worden met het toepassen van een 1m dikke kleilaag [6].

Voor beide faalmechanismen is uitgegaan van het afgraven van het gehele maatregelgebied als conservatieve benadering.

6 Conclusie

6.1 Conclusie

De KRW-maatregel heeft invloed op het faalmechanisme piping. De minimaal benodigde kwelweglengte vanaf buitenteen bedraagt bij dijkpaal A878 170 m, waar een lengte van 40 m aanwezig is. Bij dijkpaal A887 bedraagt de minimaal benodigde kwelweglengte vanaf de buitenteen 170 m, waar een lengte van 33 m aanwezig is. Voor nadere toelichting zie Figuur 12.



Figuur 12: Minimaal benodigde kwelweglengte (blauw) ten opzichte van maatregelgebied

De KRW-maatregel ligt op 33 m afstand van het dijklichaam vandaan. Dit valt buiten de invloedzone van macrostabiliteit buitenwaarts. Hierdoor heeft de KRW-maatregel geen invloed op de buitenwaartse macrostabiliteit.

6.2 Aanbevelingen

Zonder mitigerende maatregelen heeft de KRW ingreep een negatief effect op piping, en daarmee op de waterveiligheid. De mitigerende maatregel die genomen moet worden om tot een vergunbaar ontwerp te komen is het aanbrengen van weerstand onder de KRW-ingreep. Een kleipakket van minimaal 1,00 meter dikte aanbrengen onder de geulbodem voldoet, dit wordt verder toegelicht door berekeningen die zijn opgenomen in de geohydrologische rapportage [6].

7 Referenties

- [1] Waterschap Aa en Maas, *Logboek beoordelingsspoor STPH normtraject 36-5*.
- [2] Waterschap Aa en Maas, *Rapportage Veiligheidsbeoordeling 36-5*, mei 2020.
- [3] RWS-WVL, *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen (OI2014v4)*, 2017.
- [4] RWS-WVL, „Schematiseringshandleiding Piping v4,” Ministerie van I&W, 2021.
- [5] NEN, *NEN 361 (nl) - NEN3651:2020 (nl) - Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatwerken, NEN, 1 januari 2020*.
- [6] Arcadis, *5.1.2 KRW-Zuid Nederland Verkennend Onderzoek Water Geul Bokhoven*, 13 maart 2023.

Bijlage A Grondonderzoek KRW deelproject 3: Bokhoven

Deze bijlage is separaat opgenomen.

Colofon

ADVIESRAPPORTAGE GEOTECHNIEK
GEUL BOKHOVEN [GTM_223_L]
KRW-ZN DP-3 WP-5.1.16

KLANT
Rijkswaterstaat

AUTEUR
Arcadis

DATUM
1 juni 2023

STATUS
Definitief

Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende ontwerp- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij helpen onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Wij zijn met 36.000 mensen actief die in ruim zeventig landen meer dan €4,2 miljard aan omzet genereren. Wij helpen UN-Habitat met onze mensen, die kennis en expertise leveren om de moeilijke leefomstandigheden te verbeteren in gebieden die lijden onder de gevolgen van klimaatverandering.

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 220
3800 AE Amersfoort
Nederland

T +31 (0)88 4261 261

Arcadis. Improving quality of life

Volg ons op



[Arcadis](https://www.linkedin.com/company/arcadis)



[arcadis_nl](https://twitter.com/arcadis_nl)



[ArcadisNetherlands](https://www.facebook.com/ArcadisNetherlands)