

Ontwerp

INLAATCONSTRUCTIE

Bypass



Ontwerp

INLAATCONSTRUCTIE

Bypass

AFSTUDEERRAPPORT

Verantwoording

Titel	Ontwerp Inlaatconstructie Bypass
Opdrachtgever	Hogeschool Utrecht Faculteit Natuur en Techniek (FNT) Instituut voor de Gebouwde Omgeving (IGO) Opleiding Civiele Techniek
Begeleiders HU	T. v/d Linden T. Rinkema
Projectcode HU	TCIT-PR27-05
Afstudeerbedrijf	DHV B.V. Amersfoort Afdeling Waterbouw & Geotechniek
Begeleiders DHV	drs. T. Louters ir. J.H. ter Hoeven ir. M.K. Karelse
Auteurs	L.W. Blokland, id. 1172293 B.C. van Hulten, id. 1180034
Pagina's	99
Datum	juni 2007

Voorwoord

Een afstudeeropdracht kan goed worden voorbereid. Vooraf kunnen keuzes worden gemaakt die de grenzen aangeven waarbinnen het project zal worden uitgevoerd. Een uitgebreide tijdsplanning kan worden opgesteld. En toch is de praktijk vaak anders, en komen verwachtingen niet altijd uit. Maar verwachtingen kunnen ook worden overtroffen. Terugkijkend op de afgelopen periode kunnen we concluderen dat beide ervaringen zijn opgedaan. Als het gaat om de kennismaking met het ontwerpproces van waterkerende constructies, ervaring opdoen met meerdimensionale hydraulische modellen en het maken van betonberekeningen, zijn verwachtingen zeker overtroffen; we hebben een scala aan nieuwe (leer)ervaringen opgedaan. Tegelijkertijd hebben we met deze ervaringen inzicht gekregen in de breedte van het vakgebied van de waterbouw. Er blijken achteraf gezien nog veel ontwerpaspecten onbehandeld te zijn en er is nog veel te leren...

Niettemin willen we met voldoening dit afstudeerrapport aan u voorleggen. We bedanken de medewerkers van DHV en begeleiders van de Hogeschool Utrecht, die ons altijd met veel aandacht en interesse begeleid hebben.

*Wieger Blokland
Bart van Hulten*

Samenvatting

Het ontwikkelen van een voorlopig ontwerp voor een inlaatconstructie t.p.v. de toekomstige bypass bij Kampen is de hoofddoelstelling van dit afstudeerrapport. Het afstudeerproject is in opdracht van de Hogeschool Utrecht en in samenwerking met ingenieursbureau DHV B.V. uitgevoerd.

Problematiek

In de IJsseldelta vormt Kampen een knelpunt van het riviersysteem. In de toekomst kan dit gaan leiden tot wateroverlast of zelfs overstromingen over het stroomgebied van de IJssel, als door klimaatverandering hogere rivierafvoeren gaan optreden. Met de aanleg van een nieuwe rivierarm (een zogenaamde 'bypass') ten zuiden van Kampen wordt er een oplossing geboden voor deze hoogwaterproblematiek. Met de aanleg van de extra rivierarm blijft het huidige veiligheidsniveau van de dijken langs de IJssel op langere termijn voldoen.

Op het scheidingsvlak tussen de IJssel en de bypass is een waterbouwkundig kunstwerk benodigd om water uit de IJssel gecontroleerd in te kunnen laten in de bypass. Tegelijk heeft de constructie een waterkerende functie, als door storminvloeden vanaf het IJsselmeer hogere waterstanden ontstaan in de IJssel. De bypass mag dan niet inunderen.

Activiteiten

Gedurende het ontwerpproces van een (waterbouwkundige) constructie worden verschillende fasen doorlopen. Voor de inlaatconstructie van de bypass bij Kampen zijn eerst functionele eisen en randvoorwaarden opgesteld. Vervolgens is door middel van variantenanalyses een ontwerpvariant gekozen die als uitgangspunt heeft gediend voor uitwerking van het ontwerp. Met het formuleren van hydraulische en constructieve ontwerpeisen zijn de dimensies van constructie op hoofdlijnen vastgelegd.

Op hydraulisch gebied is het ontwerp verder uitgewerkt en getoetst d.m.v. het toevoegen van de inlaatconstructie aan een tweedimensionaal hydraulisch model. Met de resultaten van de modelberekeningen is bepaald of de constructie voldoet aan de hoofdeis om voldoende waterstandsverlaging in de IJssel tot stand te brengen. Naast de modelberekeningen is ook een principeontwerp voor de bodemverdediging rond de inlaatconstructie gemaakt.

Op constructief gebied heeft het brugdek (onderdeel van de inlaatconstructie) centraal gestaan. De dimensies van het dek, bestaande uit een combinatie van prefab voorgespannen betonliggers en een druklaag, zijn bepaald en getoetst op sterkte en doorbuiging. Aangezien het dek gedeeltelijk geprefabriceerd kan worden zijn er verschillende belastingsituaties van toepassing op de constructiedelen. Per situatie zijn optredende spanningen berekend. Na optimalisatie is een eindontwerp voor het dek tot stand gekomen.

Resultaten

Uit onderzoek naar de hoogwaterproblematiek blijkt de noodzaak voor een inlaatconstructie t.p.v. de bypass bij Kampen. Uit de variantenanalyses blijkt dat een reguleerbare constructie, in de vorm van een verboren inlaatwerk, de beste oplossing voor de specifieke situatie van de IJsseldelta biedt. De constructie is ontworpen als een combinatie van betonwanden met een opgelegd brugdek en landhoofden. De overspanning tussen de betonwanden bedraagt 20 meter. De betonwanden fungeren zowel als ondersteuning van het brugdek als voor stroomgeleiding. De voorgespannen prefab betonliggers overspannen tevens 20 meter. Het dek krijgt in samengestelde vorm een T-liggerprofiel, waarbij op te nemen spanningen onder elke gebruiksfase voldoen aan de eisen.

Op hydraulisch gebied heeft onderzoek bepaald dat de inlaatconstructie nabij kilometerraai 991 komt te liggen, ter plaatse van het huidige dijktracé. Het inlaatwerk zal als onvolkomen overlaat functioneren, waarbij ongeveer $670 \text{ m}^3/\text{s}$ aan IJsselwater in de bypass stroomt onder extreme condities. Dit is voldoende om de vereiste waterstandsdeling in de IJssel te realiseren. Er treden in stationaire toestand stroomsnelheden op tot twee meter per seconde. Het ontwerp van de bodembescherming is hierop gedimensioneerd.

Conclusies en aanbevelingen

Met de resultaten is een onderbouwd advies en principeontwerp voor de inlaatconstructie tot stand gekomen. Aangezien niet alle ontwerpaspecten in dezelfde mate aan de orde zijn gekomen is nader onderzoek noodzakelijk. Onzekerheid bestaat over de objectiviteit en juistheid van de resultaten van de variantenanalyses. Belangrijkste aanbeveling is het doen van uitgebreid(er) onderzoek naar de haalbaarheid van het ontwerp voor de praktijk. Het openingsproces van de constructie is namelijk cruciaal bij het toetsen van het ontwerp aan de betrouwbaarheidseisen.

Inhoudsopgave

Verantwoording	3
Voorwoord	4
Samenvatting	5
Inhoudsopgave	6
Bijlagen overzicht	7
H1 Inleiding.....	8
1.1 Projectachtergronden	9
1.2 Probleemstelling	12
1.3 Doelstelling	12
1.4 Afbakening	12
1.5 Leeswijzer	12
H2 Functionele eisen en Randvoorwaarden.....	14
2.1 Hydraulische randvoorwaarden	15
2.2 Definiëring constructie	17
2.3 Waterkerende functie	18
2.4 Landschap, natuur en cultureel erfgoed	19
2.5 Integraal waterbeheer	20
2.6 Verkeer en vervoer	21
2.7 Functioneel Programma van Eisen	21
H3 Voorkeursprincipe inlaatconstructie	23
3.1 Principevarianten.....	24
3.2 Toetsingscriteria	25
3.3 Toetsen principevarianten	29
H4 Ontwerpvarianten reguleerbare inlaatconstructie.....	31
4.1 Ontwerpproces	32
4.2 Reguleerbare inlaat – de mogelijkheden	33
4.3 Toetsen ontwerpvarianten	37
H5 Ontwerpeisen Hydraulica	40
5.1 Kerende hoogte	41
5.2 Betrouwbaarheid opening.....	42
5.3 Dimensies inlaatwerk.....	44
5.4 Ontwerpeisen bodembescherming	47
5.5 Invloedsfactoren	49
H6 Constructieve ontwerpeisen	50
6.1 Inventarisatie belastingsituaties.....	51
6.2 Inventarisatie faalmechanismen	52
6.3 Inventarisatie uitwendige belastingen.....	53
6.4 Stramien en overspanningen.....	54
H7 Hydraulisch ontwerp	56
7.1 Hydraulische modellen	57
7.2 Gebiedsschematisatie	58
7.3 Modelvarianten	58
7.4 Toetsing resultaten aan taakstelling	60
7.5 Toetsing hydraulisch PvE	60
7.6 Toetsing functioneel PvE	66
7.7 Keuze definitieve modelvariant.....	67
7.8 Ontwerp bodembescherming	67
7.9 Praktische haalbaarheid ontwerp	71
H8 Dimensioneren brugdek	74
8.1 Uitvoeringsmogelijkheden	75
8.2 Berekening betondek	75
8.3 Berekening voorspanbalken fabrieksfase.....	78
8.4 Berekening voorspanbalken gebruiksfase.....	80

8.5 Voorspanverliezen.....	83
8.6 Conclusie controle spanningen	84
8.7 Wapening	86
H9 Eindresultaat en Evaluatie.....	88
9.1 Eindresultaten	89
9.2 Evaluatie.....	94
Referenties	98

Bijlagen overzicht

<i>Bijlage nummer</i>	<i>Paragraaf</i>	<i>Titel</i>
Bijlage 1	Par. 1.1.5	Problematiek bypass
Bijlage 2	Par. 1.4	Plan van Aanpak
Bijlage 3	Par. 2.1.1	HR2001 toelichting
Bijlage 4	Par. 2.1.1	HR2001
Bijlage 5	Par. 2.1.3	Klimaatverandering
Bijlage 6	Par. 2.2.1	Constructietypen
Bijlage 7	Par. 2.3.1	Overbelastingsbenadering
Bijlage 8	Par. 2.5.2	Toelichting en relativering sluitfrequentie
Bijlage 9	Par. 3.3.1	Toelichting beoordeling MCA principevarianten
Bijlage 10	Par. 4.3.1	Toelichting beoordeling MCA ontwerpvarianten
Bijlage 11	Par. 5.1	Bijdragen kerende hoogte
Bijlage 12	Par. 5.3	Berekening koker en overlaatprincipe
Bijlage 13	Par. 6.2	Faalmechanismen
Bijlage 14	Par. 6.3.2	Veranderlijke belastingen
Bijlage 15	Par. 6.3.3	Extreme belastingen
Bijlage 16	Par. 7.2	Gebiedsschematisatie Waqua
Bijlage 17	Par. 7.2	Rekenrooster Waqua
Bijlage 18	Par. 7.3	Modelvarianten Waqua
Bijlage 19	Par. 7.3	Logboek berekeningen Waqua
Bijlage 20	Par. 7.4.1	Resultaten berekening Waqua
Bijlage 21	Par. 7.6.1	Berekeningen bodembescherming
Bijlage 22	Par. 8.1	Uitvoeringsmogelijkheden
Bijlage 23	Par. 8.2	Berekening dek in ESA Prima Win
Bijlage 24	Par. 8.3.1	Balk invoering in ESA Prima Win
Bijlage 25	Par. 8.4	Invloedslijnen
Bijlage 26	Par. 8.5	Berekening voorspanverliezen
Bijlage 27	Par. 8.6	Berekening spanningen
Bijlage 28	Logboek	Notulen, planning en takenlijst

H1

Inleiding



Ontwerp een overstroombaar poldermodel. Een beetje cryptisch geformuleerd misschien, maar het geeft de kern weer van de projectopdracht die ten grondslag ligt aan dit rapport. Het ontwerp van een constructief element staat echter nooit op zichzelf. Daarom worden in dit hoofdstuk allereerst de projectachtergronden uiteen gezet. Vervolgens zal verder worden ingezoomd op de aspecten die de kern vormen van de inhoud van het afstudeerproject.

1.1 Projectachtergronden

In deze paragraaf zal worden ingegaan op het vakgebied en de studierichting waarbinnen het afstudeerproject is uitgevoerd. De relatie van het project met bestaande ontwikkelingen komt uitgebreid aan bod, evenals de problematiek die eraan ten grondslag ligt.

1.1.1 Waterbouw

De afstudeeropdracht speelt zich af in het gebied van de (constructieve) waterbouwkunde, een vakgebied binnen de GWW sector (grond-, weg- en waterbouw). Nederland heeft veel met water. Er is in de loop der jaren veel kennis opgedaan in de waterbouwsector. Meest tot de verbeelding sprekend zijn de deltawerken in de kustgebieden. Daarnaast zijn de beteugeling van rivieren en droogleggingen van polders belangrijke voorbeelden van de toepassing van 'waterbouw' in ons land. Voor de constructieve waterbouw zijn waterkerende constructies als dijken, kades, sluizen, stuwen en gemalen kenmerkend.

1.1.2 Hogeschool Utrecht

Dit rapport is in opdracht van de Hogeschool Utrecht tot stand gekomen. Het rapport is het product van de laatste fase binnen de opleiding Civiele Techniek, namelijk het uitvoeren van een afstudeerproject. In de afstudeeropdracht zijn de afstudeerrichtingen van de studenten tot uiting gekomen, namelijk de richtingen 'waterbouwkunde' en 'constructief ontwerpen'.

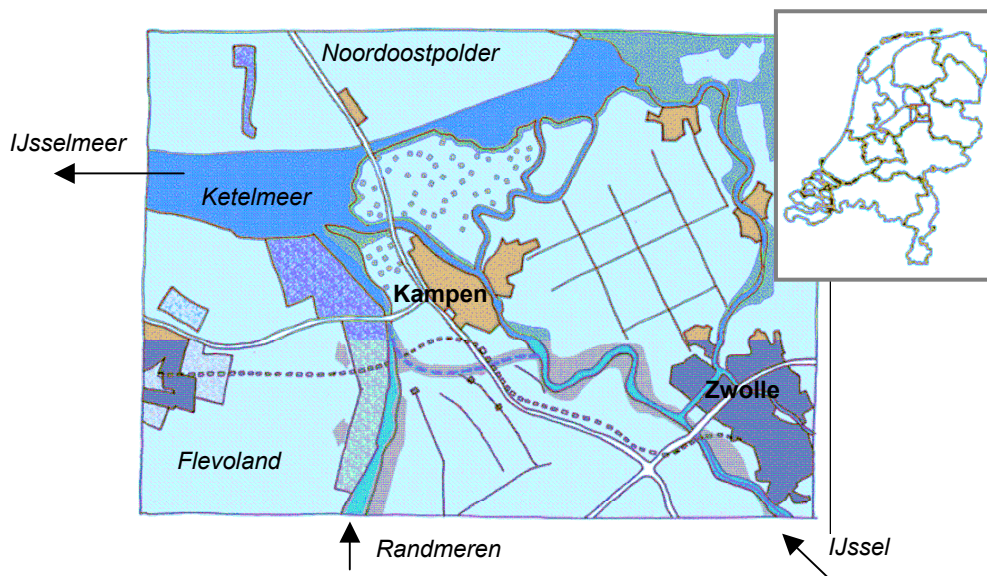
1.1.3 DHV

Het afstudeerproject is uitgevoerd bij het ingenieursbureau DHV B.V. in Amersfoort, afdeling Waterbouw & Geotechniek. DHV¹ is een groot ingenieursbureau met diverse disciplines. "Het bedrijf is uitgegroeid tot een internationale kennisorganisatie met ruim 4000 medewerkers, wereldwijd actief vanuit een netwerk van bedrijven in Europa, Azië, Afrika en Noord-Amerika", aldus vermeld op de website.

De interesse van de studenten en DHV voor het afstudeerproject komt voort uit betrokkenheid van beide partijen bij de ontwikkeling van de IJsseldelta. Paragraaf 1.1.4 gaat in op de relatie van de afstudeeropdracht met bestaande projecten.

1.1.4 Ontwikkeling IJsseldelta

De IJsseldelta is gelegen in de provincie Overijssel rondom de gemeente Kampen. Het gebied vormt een kenmerkende overgangszone tussen de IJssel en het nabijgelegen IJsselmeer.

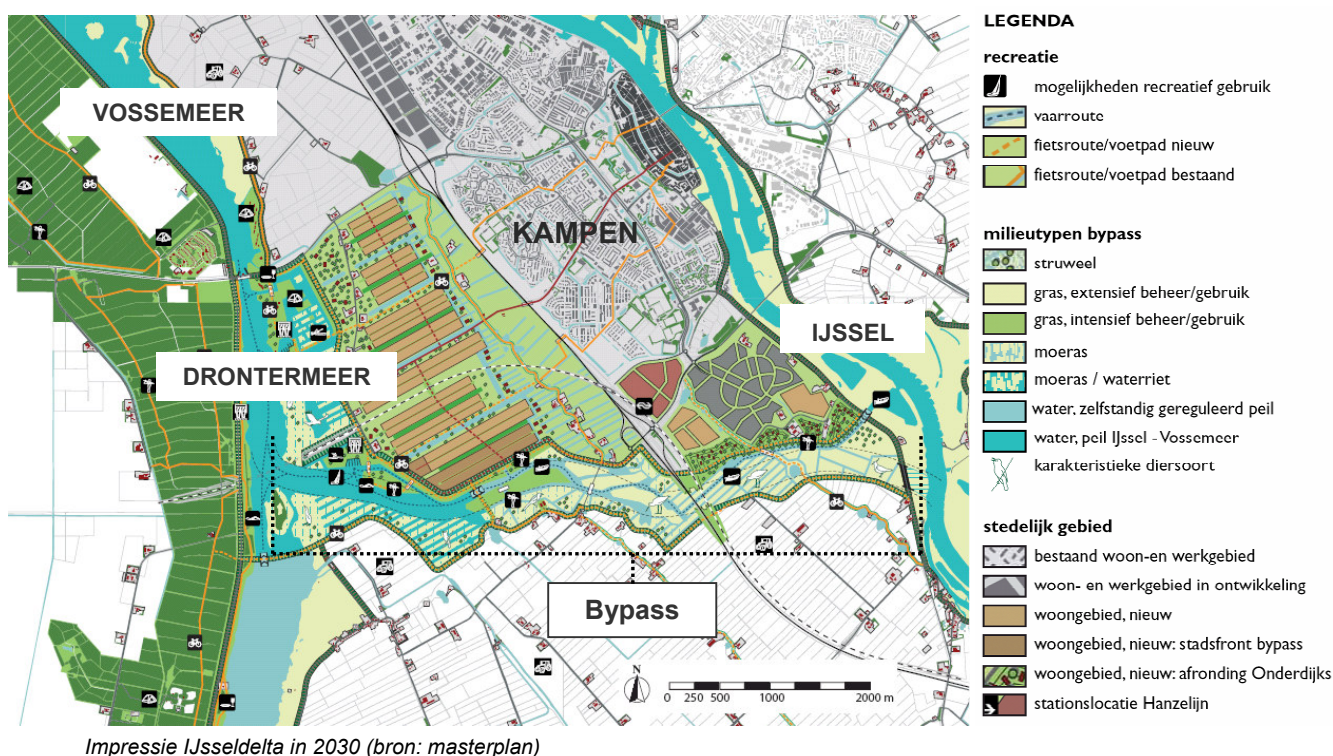


¹ Afkomstig van de namen Dwars, Heederik en Verhey

De bewoners van de IJsseldelta kunnen de komende tientallen jaren een aantal radicale veranderingen in de inrichting van de ruimtelijke omgeving tegemoet zien:

- Realisatie van een nieuwe rivierarm (bypass) als aftakking van de IJssel ten zuiden van Kampen
- Aanleg van een nieuwe spoorlijn van Lelystad naar Zwolle (Hanzelijn)
- Uitbreiding van de stad Kampen
- Aanleg van de snelweg A50 (vernieuwing bestaande N50)

De eerste aanleiding voor de planvorming en ontwikkeling van de IJsseldelta vormt de hoogwaterproblematiek in het gebied. Vanwege de ligging is de IJsseldelta namelijk kwetsbaar voor overstromingen vanaf zowel de rivierzijde als de IJsselmeerzijde. Toename van overstromingsrisico's als gevolg van klimaatverandering hebben geleid tot hogere veiligheidseisen voor de IJssel. De 'flessenhals' (sterke vernauwing) in de rivier bij Kampen blijkt daarbij van grote invloed. De lange termijn oplossing voor de hoogwaterproblematiek is een bypass ten zuiden van Kampen. Uit de keuze tot uitwerking van dit plan zijn diverse gebiedsontwikkelingsvisies voortgekomen. Samen met bestaande landelijke en provinciale projecten en beleidslijnen, zoals de beleidslijn Ruimte voor de Rivier, de Nota ruimte en de Netwerkstadvisie 2030, heeft dit uiteindelijk geresulteerd in het *Masterplan IJsseldelta*.



Het Masterplan IJsseldelta is in september 2006 gepresenteerd. Betrokken partijen zijn landelijke en provinciale overheden, overheidsdiensten en diverse marktpartijen. Het masterplan moet als leidraad dienen voor alle toekomstige ontwikkelingen in het gebied.

1.1.5 Problematiek bypass

DHV heeft onder de projectnaam 'IJsseldelta Zuid' het ruimtelijk plan met de volledig geïntegreerde bypass ontwikkeld. Het plan is gebaseerd op ruimtelijke, technische en financiële haalbaarheid. Met de ontwikkeling van een bypass ten zuiden van Kampen wordt naar verwachting een duurzame oplossing geboden voor de afvoerproblematiek. Als de bypass bij hoge rivierafvoer mee stroomt (vanaf de IJssel, via het Dronter- en Vossemeer naar het Ketelmeer) zal dat namelijk een aanzienlijke waterstandsval opleveren, zowel beneden- als bovenstrooms van Kampen.

Doel bypass

Doel van de bypass is het realiseren van een aanzienlijke verlaging van de maatgevende hoogwaterstanden² op de IJssel. Door de rivier zo meer ruimte te geven wordt de toename van overstromingsrisico's als gevolg van klimaatverandering tegengegaan. Rivierverruimende maatregelen,

² Door Rijkswaterstaat berekende waterstanden en golven (in m. t.o.v. NAP) die waterkeringen nog veilig moeten kunnen keren (=veiligheidseis).

waaronder het realiseren van een bypass valt, past binnen het landelijk beleid rond hoogwaterbescherming, opgenomen in de beleidslijn Ruimte voor de Rivier.

Het probleem van sterk toegenomen maatgevende hoogwaterstanden treedt op langs alle Rijntakken. Het Rijk zoekt de oplossing in de rivierverruiming die als een duurzaam alternatief voor dijkversterking wordt gezien. De maatregelen die uiterlijk in 2015 de wettelijk vereiste veiligheid van de dijken dienen te garanderen zijn uitgewerkt in het PKB Ruimte voor de Rivier. (bron: DHV)

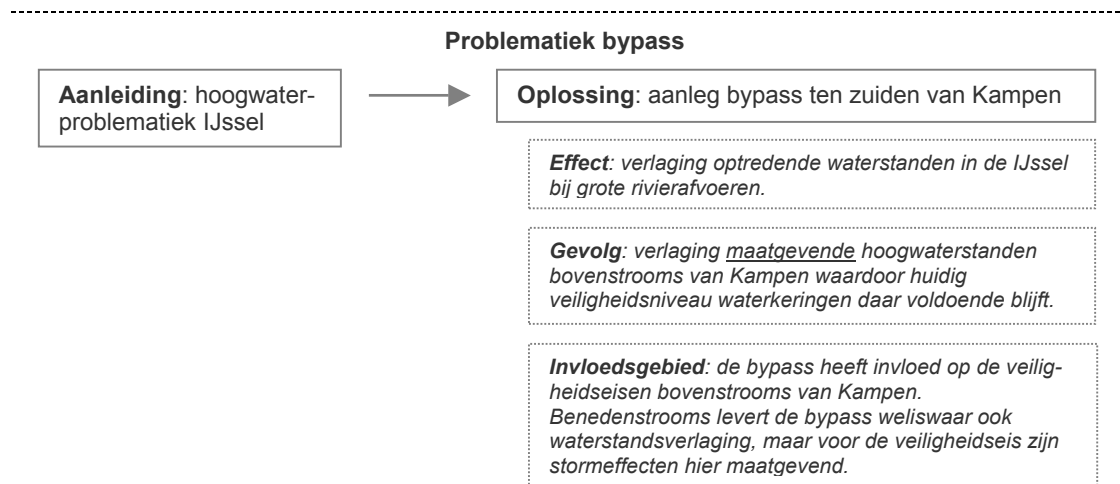
Effect bypass

Het effect van de bypass op de veiligheidseisen (maatgevende hoogwaterstanden) voor de dijken langs de IJssel is met name bovenstrooms van de bypass merkbaar (tot voorbij Zwolle). De waterstandsverlaging die naar verwachting optreedt in dit gebied heeft als gevolg dat de huidige dijken op lange termijn voldoende veiligheid blijven bieden.

De bypass heeft nauwelijks invloed op de veiligheidseisen *benedenstrooms* van Kampen. Hier is de bedreiging van stormeffecten op het IJsselmeer maatgevend. Indien harde wind uit een bepaalde richting gaat waaien, zal dit namelijk opstuwing te weeg brengen in het IJssel- en ketelmeer. Het gevolg is dat waterstanden in de IJssel over een bepaald invloedsgebied ook hoger worden. Hoogwaterstanden bij Kampen als gevolg van stormeffecten op het IJsselmeer vormen dus een andere bedreiging, waar in de toekomst wellicht ook extra maatregelen voor benodigd zijn.

Problematiek samengevat

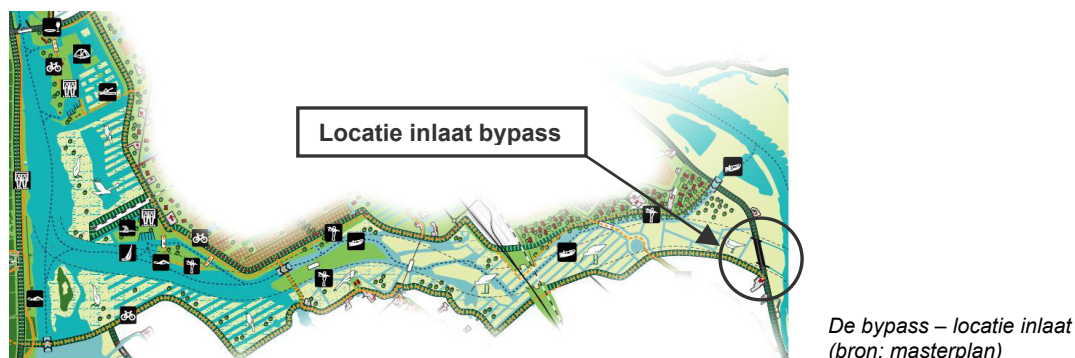
De kern van de functies en effecten van de bypass zijn in onderstaand schema opgenomen.



In bijlage 1 is de problematiek rond de bypass inhoudelijk verder uitgewerkt. In de bijlage worden hydraulische aspecten nader toegelicht, evenals de werking van de bypass onder verschillende condities.

1.1.6 Inlaatconstructie

Dit afstudeerproject richt zich binnen de ontwikkelingen van de IJsseldelta op een specifiek onderdeel van de bypass, namelijk de inlaatconstructie, die zal moeten worden gerealiseerd op het scheidingsvlak van de IJssel en de bypass. De inlaatconstructie heeft als hoofddoel het gecontroleerd inlaten van water uit de IJssel als dat nodig is. De locatie van de inlaat is gemarkeerd in onderstaande afbeelding.



De ligging van de inlaatconstructie in het invloedsgebied van de rivier en het IJsselmeer geven het kunstwerk een uniek karakter met diverse eisen en randvoorwaarden. De uitwerking van het ontwerp van de inlaatconstructie is dan ook de hoofdlijn van dit afstudeerrapport. De kern van het onderzoek is geformuleerd in de volgende paragrafen.

1.2 Probleemstelling

Het ontwerp van de inlaatconstructie van de bypass staat in dit afstudeerrapport centraal. Voor de afstudeeropdracht is de volgende hoofdprobleemstelling geformuleerd:

Welke oplossing voor de inlaatconstructie is het best toepasbaar in de toekomstige bypass bij Kampen?

1.3 Doelstelling

In het onderzoek wordt antwoord gezocht op de probleemstelling. Daarbij is de daaruit volgende doelstelling geformuleerd. Het hoofddoel van het afstudeerproject is:

Het tot stand brengen van een onderbouwd advies en principeontwerp voor de inlaatconstructie.

1.4 Afbakening

Het afstudeerproject is met name gericht op het waterbouwkundige en constructieve ontwerp van de inlaatconstructie. Andere relevante ontwerpaspecten komen niet in dezelfde mate aan bod in dit rapport. Een belangrijke afbakening voor de uitwerking van het ontwerp is hieronder geformuleerd:

Het ontwerp van de inlaatconstructie wordt uitgewerkt tot op VO+ niveau (status Voorlopig Ontwerp)

De precieze afbakening is in het plan van aanpak na te lezen. Het plan van aanpak is een projectdocument wat voorafgaande aan de uitvoering van de afstudeeropdracht is opgesteld. In [bijlage 2](#) van dit rapport is het document opgenomen.

1.5 Leeswijzer

De verslaglegging heeft tijdens de uitvoering van het afstudeerproject parallel gelopen met de werkzaamheden. Het verslag heeft dan ook de opzet van een procesbeschrijving. In het rapport worden de stappen van het ontwerpproces zoveel mogelijk chronologisch doorlopen. Voor deze opzet is gekozen om het leerproces van de auteurs zichtbaar te maken aan de lezer. Het spreekt voor zich dat deze opzet in de praktijk minder wordt toegepast, aangezien alle (tussen)stappen in het ontwerpproces voor de klant minder (of helemaal niet) interessant zijn. De indeling van het rapport wordt in de volgende alinea's beschreven.

In hoofdstuk 2 worden de functionele eisen en randvoorwaarden beschouwd die van toepassing zijn op het ontwerp van de inlaatconstructie. Dit resulteert in een functioneel programma van eisen waar het ontwerp op getoetst kan worden.

Hoofdstuk 3 staat in het teken van het kiezen van een ontwerpprincipe voor de inlaatconstructie. Drie fundamenteel verschillende mogelijkheden worden beschouwd en getoetst door middel van een multicriteria analyse, op basis van het functioneel programma van eisen.

In hoofdstuk 4 wordt een brede verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden die binnen het gekozen ontwerpprincipe bestaan. Middels een uitgebreide variantenanalyse wordt een onderbouwde keuze gemaakt voor de toe te passen constructieve uitvoering van het inlaatwerk.

De volgende stap in het ontwerpproces betreft het formuleren van hydraulische en constructieve ontwerpvoorwaarden voor de inlaatconstructie. In respectievelijk hoofdstuk 5 en 6 worden deze beschreven en toegelicht. De gevonden waarden en uitgangspunten voor het ontwerp vormen een basis en referentiekader voor verdere uitwerking.

In hoofdstuk 7 is het hydraulisch ontwerp van de constructie verder uitgewerkt. Met behulp van hydraulische modellen worden diverse modelvarianten doorgerekend. De resultaten worden geanalyseerd en vergeleken met de opgestelde ontwerpeisen. Het resulteert uiteindelijk in een onderbouwde keuze voor een hydraulische modelvariant. Deze dient als basis voor de constructieve uitwerking. Ook is een principe ontwerp voor de bodembescherming rond de inlaatconstructie in dit hoofdstuk opgenomen. De laatste paragraaf betreft een kritische beschouwing m.b.t. de haalbaarheid van de openingsprocedure van de constructie.

In hoofdstuk 8 zijn de constructieve ontwerpeisen toegepast bij het dimensioneren van een specifiek onderdeel van de inlaatconstructie. Er is voor gekozen om een belangrijk onderdeel van de constructie uit te werken. Betonberekeningen komen daarbij uitgebreid aan bod.

In hoofdstuk 9 worden de eindresultaten gepresenteerd en aanbevelingen gedaan. Tevens wordt er teruggekoppeld naar de kern van het project en worden probleem- en doelstelling geëvalueerd.

In het rapport wordt verwezen naar bijlagen. Deze zijn in een apart document samengevoegd, en zijn onderdeel van het rapport.

H2

Functionele eisen en Randvoorwaarden



Voordat er nagedacht kan worden over toe te passen constructies als oplossing voor het inlaatwerk bij Kampen is het van belang om een beeld te krijgen van de geldende eisen en randvoorwaarden. Op hydraulisch vlak betekent dit de wettelijk vastgestelde normen voor veiligheid (hydraulische randvoorwaarden) in het projectgebied. Voor waterkerende constructies in het algemeen (waartoe het te ontwerpen inlaatwerk behoort) zijn functionele eisen en randvoorwaarden van toepassing. Op deze eisen moet het ontwerp worden getoetst. Al deze aspecten hebben in dit hoofdstuk de aandacht, en dienen als achtergrond voor de variantenanalyse die in het volgende hoofdstuk is beschreven. Een belangrijke bron voor de inhoud en de structuur van dit hoofdstuk is de Leidraad Kunstwerken, een handboek bij het ontwerp van waterbouwkundige constructies, uitgegeven door de Technische Adviescommissie Water (TAW) in 2003. Het handboek is primair bedoeld als toetsingsinstrument bij het ontwerpen van waterkerende constructies.

2.1 Hydraulische randvoorwaarden

In hoofdstuk 1 is reeds verwezen naar maatgevende hoogwaterstanden en stormcondities. In bijlage 1 is ingegaan op de taakstellende eis voor de bypass. Deze aspecten staan in relatie tot de hydraulische randvoorwaarden die gelden in het IJsseldeltagebied. Hydraulische randvoorwaarden betreffen waterstanden en golven die waterkeringen nog veilig moeten kunnen keren. Deze waterstanden (in meters t.o.v. NAP) worden ook wel 'toetspeilen' of 'maatgevende hoogwaterstanden' (MHW's) genoemd. De hydraulische randvoorwaarden horen bij de wettelijk vastgestelde norm, die elke 5 jaar wordt herbeschouwd, en zijn opgenomen in het rapport 'Hydraulische Randvoorwaarden 2001'.

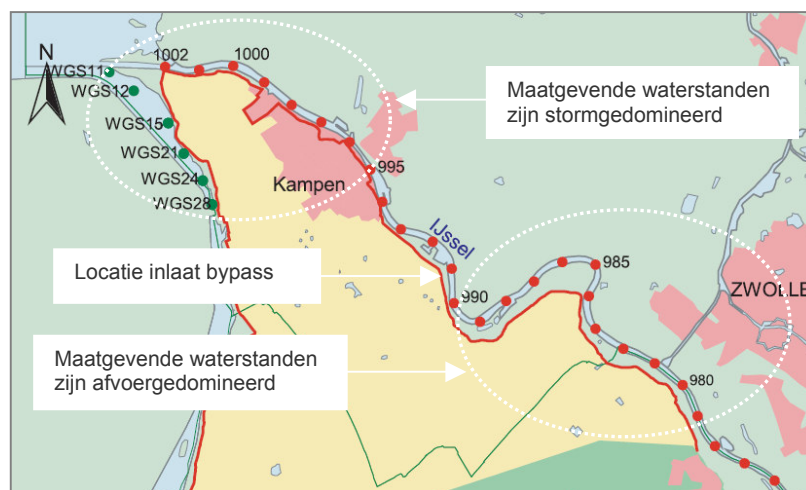
2.1.1 Situatie IJsseldelta

De IJsseldelta behoort tot dijkkringgebied 11, waar een overstromingskans van 1/2000 jaar wordt aangehouden als veiligheidseis. In de IJsseldelta kan wateroverlast optreden door zowel hoge waterstanden als gevolg van extreme rivierafvoeren, als door hoge waterstanden ten gevolge van storm op het IJsselmeer. Voor deze bedreigingen zijn de maatgevende belastingcombinaties voor het gebied bepaald:

B.G. 1 Afvoer	Een extreem hoge rivierafvoer met een normfreq. van 1/2000 per jaar ($2740 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Olst), in combinatie met een waterpeil in het Ketelmeer van NAP +1,00 m. als gevolg van enige opstuwing door wind.
B.G.2 Wind	Een extreem hoge windsnelheid met een normfreq. van 1/2000 per jaar (orkaan met potentiële windsnelheid van ruim 33 m/s , uit richting WNW), in combinatie met een rivierafvoer die 1x per jaar wordt overschreden ($900 \text{ m}^3/\text{s}$).

De invloed van deze verschijnselen verschilt per locatie. In onderstaande afbeelding zijn de gebieden weergegeven waar storm- of afvoercondities bepalend zijn voor de maatgevende hoogwaterstanden. In het tussenliggende gebied zijn beide invloeden meegenomen in de bepaling van het toetspeil. De maatgevende hoogwaterstanden kunnen dus zowel van stormcondities (B.G. Wind) als van afvoercondities (B.G. Afvoer) zijn afgeleid. Zie [bijlage 3](#) voor meer achtergronden.

De toetspeilen voor het gebied zijn berekend op diverse punten langs de rivier, die als rode stippen staan aangegeven op onderstaande afbeelding. Per punt is de maatgevende hoogwaterstand bepaald.



Afvoer- en stormdominantie in de IJsseldelta

De toekomstige inlaatconstructie is gesitueerd bij kmr 991 (zie bovenstaande afbeelding). Hier blijft storminvloed geen grote rol te spelen voor de maatgevende hoogwaterstand. Het toetspeil wordt voornamelijk bepaald door de hoogwaterafvoer. Dit betekent echter niet dat stormcondities van weinig belang zijn voor verdere uitwerking van het ontwerp van de inlaatconstructie. Het is namelijk van belang dat de bypass gesloten is bij maatgevende stormcondities (zie o.a. bijlage 1). Er mag dan geen water via de inlaat (of uitlaat) de bypass instromen.

Naast het toetspeil uit de HR2001 t.p.v. de toekomstige inlaatconstructie is hieronder ook de waterstand opgenomen die naar verwachting kan optreden nabij de inlaatconstructie, als gevolg van opstuwing door storm (bron: bijlage 3).

Randvoorwaarden - locatie inlaatwerk bypass (kmr 991):

Toetspeil afvoer: 3,6 m+ NAP	→	Toetspeil HR2001, maatgevende hoogwaterstand
Opstuwing storm: 3,1 m +NAP	→	Niet opgenomen in de HR2001, wel een waterstand die gekeerd moet kunnen worden bij stormcondities!

De inlaatconstructie moet kunnen functioneren als primaire waterkering, omdat de constructie wordt opgenomen in de bestaande dijk. Daarom zijn de hydraulische randvoorwaarden ook van toepassing op het kunstwerk. In bijlage 4 zijn alle gegevens uit de HR2001 voor de IJsseldelta opgenomen.

2.1.2 HR2001 en de taakstelling

Naast de waterkerende veiligheidseis die de HR2001 stelt aan de inlaatconstructie, geldt ook de taakstellende eis voor de bypass (zie bijlage 1). Volgens de taakstelling is de maximale waterstand die in de IJssel mag optreden **3,0 m. +NAP** (t.p.v. de geopende inlaat). Als de waterstand in de IJssel deze grens niet overschrijdt, blijft het huidige veiligheidsniveau van de waterkeringen langs de IJssel gegarandeerd (in het invloedsgebied van de bypass). Voor het hydraulisch ontwerp van de inlaatconstructie is de maximaal toelaatbare waterstand van 3,0 m +NAP dus een belangrijke ontwerpeis!

Het toetspeil afvoer uit de HR2001 geldt voor de inlaatconstructie, als waterkerende veiligheidseis. Tegelijkertijd is het doel van de inlaatconstructie om de maatgevende waterstanden die op kunnen treden, te verlagen (tot maximaal 3,0 m. +NAP nabij de inlaat). Met beide eisen moet in het ontwerp rekening worden gehouden.

2.1.3 Klimaatveranderingen en levensduur

Gedurende de levensduur van het kunstwerk kunnen hydraulische randvoorwaarden veranderen. Klimaatveranderingen kunnen daarbij van grote invloed zijn. Enkele concrete voorbeelden van mogelijke veranderingen die de waterkerende veiligheid in de loop der tijd negatief beïnvloeden, zijn:

- Het ontstaan van onvoldoende kerende hoogte als gevolg van hoogwaterstijging / bodemdaling;
- Toename van de vereiste openingsfrequentie als gevolg van hoogwaterstijging inclusief bodemdaling;

Er zijn door DHV analyses uitgevoerd³ waar toekomstige klimaatveranderingen zijn meegenomen bij het bepalen van maatgevende waterstanden. Een korte beschrijving van de uitgangspunten en conclusies zijn opgenomen in bijlage 5.

Het inlaatwerk dient ook aan het einde van zijn levensduur nog aan gestelde (waterkerings)eisen te voldoen. Daar moet in het ontwerp rekening mee worden gehouden. Voor de levensduur van een (waterkerend) kunstwerk wordt vaak 100 jaar aangenomen. Op beleidsmatige gronden en kostenafwegingen kan de keuze worden gemaakt om uit te gaan van een planperiode van 50 of zelfs 200 jaar.

Voor de inlaatconstructie van de bypass is met betrekking tot het voorgaande t.b.v. het opstellen van een functioneel programma van eisen het volgende geformuleerd:

Bij het ontwerp dient rekening te worden gehouden met mogelijke veranderingen in de waterkerende veiligheid in de planperiode. Voor de inlaatconstructie wordt uitgegaan van een levensduur van 100 jaar.

³ Memo 'Hydraulische analyse en dijkontwerp' (DHV)

2.2 Definiëring constructie

Inlaatconstructies behoren tot de waterkerende kunstwerken (=constructies) in het algemeen. Een waterkerend kunstwerk wordt aangelegd om een utilitaire kruising tot stand te brengen en vormt een onderbreking van de doorgaande primaire waterkering. De kruisingen betreffen (scheepvaart)verkeer, waterbeheersing of andere zaken zoals het doorgang verlenen aan fauna. Naast waterkerende kunstwerken zijn er ook bijzondere waterkerende constructies, waaronder constructies die deels in grond worden uitgevoerd.

2.2.1 Constructietypen

Constructies met waterkerende functie zijn verdeeld in vier constructietypen. Per type zijn eisen voor sterkte, hydraulische randvoorwaarden en faalkansen geformuleerd, vertaald vanuit de geldende veiligheidsnormen uit de Wet op de waterkering. Het gaat om eisen voor stabiliteit en sterkte van de constructie én de bijbehorende rekenwaarden voor sterkte en belastingen. Er wordt onderscheid gemaakt in vier typen constructies. Een overzicht is opgenomen in [bijlage 6](#).

De inlaatconstructie van de bypass behoort tot de eerste categorie kunstwerken:

Type I:	Constructies die volledig zelfstandig de waterkerende functie moeten vervullen.
----------------	--

Eisen voor sterkte en stabiliteit, rekenwaarden van belastingen en randvoorwaarden voor de inlaatconstructie worden dan ook bepaald voor een type I constructie, zoals dat is uitgewerkt in de Leidraad Kunstwerken.

2.2.2 Functies

Waterkerende constructies vervullen in de praktijk meerdere functies. In het ontwerpproces wordt dan ook een multifunctionele benadering toegepast. De volgende functies worden vaak vervuld door waterkerende constructies:

Functie	Omschrijving
Waterkeren	Beveiliging tegen overstroming
Behoud LNC waarden	Behoud en/of ontwikkeling van de drie aspecten: Landschap (L), Natuur (N) en Cultureel erfgoed (C) op regionaal, lokaal en dijkniveau
Integraal waterbeheer	sluizen en gemalen ten behoeve van het doorlaten van water, reguleren waterstanden, beheer waterkwaliteit
Verkeer/vervoer	utilitaire kruisingen ten behoeve van wegverkeer, scheepvaart en nutsvoorzieningen

Tabel: veel voorkomende functies

Voor de inlaatconstructie zijn bovengenoemde functies van toepassing. In de volgende paragrafen komen de functies aan bod. Dit resulteert in een functioneel programma van eisen, dat een pakket aan randvoorwaarden vormt bij uitwerking van het ontwerp van het inlaatwerk.

2.3 Waterkerende functie



'Een constructie moet zodanig worden ontworpen, gebouwd en onderhouden, dat de beoogde waterkerende functie gedurende een voorgenomen tijdsduur (planperiode) bij de geldende ontwerp- en of toetsingsnormen met voldoende betrouwbaarheid zal worden vervuld.'

(bron: Leidraad Kunstwerken)

De waterkerende veiligheidseis is de hoofdeis bij het functioneren van een waterkerende constructie, en stelt harde randvoorwaarden aan het ontwerp en beheer. Alle te onderscheiden constructieonderdelen dienen hun functie zodanig te vervullen dat de kans op falen van de gehele constructie voldoet aan de waterkerende veiligheidseis.

Voor de inlaatconstructie t.p.v. de bypass is het volgende geformuleerd:

1. De inlaatconstructie dient vanaf een te bepalen hoogwaterafvoer te openen, om daarmee de vereiste waterstandsverlaging⁴ in de IJssel teweeg te brengen d.m.v. het laten functioneren van de bypass.
2. In het geval van stijgende waterstanden als gevolg van opstuwning door storm heeft de inlaatconstructie een kerende functie, als onderdeel van de primaire waterkering.
3. De gehele constructie moet voldoen aan de waterkerende veiligheidseis voor sterkte en stabiliteit.

2.3.1 Veiligheidsbenadering

Bovenstaande eisen t.b.v. de functie waterkeren geven een beeld van de 'taken' die de constructie moet uitvoeren onder verschillende omstandigheden. Het voor 100% kunnen garanderen van veiligheid en betrouwbaarheid is in de praktijk echter onmogelijk. Wel is het mogelijk een bepaalde veiligheidsnorm te stellen, waarmee een bepaalde betrouwbaarheid kan worden geboden. In de Leidraad Kunstwerken wordt de zogenaamde *overbelastingsbenadering* toegepast, waarin faalkansen worden gesteld, gerelateerd aan de geldende veiligheidsnorm (volgens de Wet op de Waterkering). De eisen worden praktisch vertaald naar eisen ten aanzien van de kerende hoogte van de constructie, de betrouwbaarheid van het sluitwerk en de benodigde sterkte/stabiliteit. De overbelastingsbenadering wordt toegelicht in bijlage 7.

Voor de inlaatconstructie zijn op basis van de overbelastingsbenadering weer drie eisen geformuleerd, afgeleid van de voorwaarden die in de Leidraad Kunstwerken worden genoemd. De eisen zijn een concrete aanvulling op de bovengenoemde eisen 1, 2 en 3.

Aanvulling eis 1

De kans dat er ontoelaatbaar hoge waterstanden in de IJssel optreden ten gevolge van falen van het afsluitmiddel van de waterkering dient kleiner te zijn dan 1/20.000 jaar.

Aanvulling eis 2

De kans dat er een ontoelaatbaar groot instromend volume over de gesloten kering optreedt als gevolg van overlopen/overslag dient kleiner te zijn dan 1/2000 jaar (= normfrequentie voor de IJsseldelta).

Aanvulling eis 3

De kans dat het kunstwerk constructief bezwijkt bij waterstanden gelijk of kleiner dan de maatgevende hoogwaterstanden (evt. i.c.m. falend afsluitmiddel) dient kleiner te zijn dan 1/200.000 jaar.

Deze eisen zijn via analyse en berekening toetsbaar. Dit is uitgewerkt in de Leidraad Kunstwerken en wordt ook voor de inlaatconstructie toegepast, later in dit rapport. Een toelichting op de geformuleerde aanvullende eisen is gegeven in bijlage 7.

⁴ De taakstellende eis, beschreven en toegelicht in bijlage 1

2.4 Landschap, natuur en cultureel erfgoed



'Bij het ontwerpen van waterkeringen dient rekening te worden gehouden met onder andere ecologische verbindingzones, beschermde en bedreigde 'rode lijstsoorten', landschappelijke inpassing, beschermde dorps- of stadsgezichten, archeologische vindplaatsen en cultuurhistorische monumenten.'

(bron: Leidraad Kunstwerken)

LNC-waarden zijn niet altijd met objectieve beoordelingscriteria te toetsen. Over de beleving van natuur- en landschappelijke waarden kan verschillend worden gedacht. Prioriteiten zijn daarbij vaak gebiedsspecifiek. Toch is het van belang deze aspecten te beschouwen, aangezien ontwerpkeuzes voor de inlaatconstructie aanzienlijke gevolgen kunnen hebben voor de LNC-waarden die in het gebied aanwezig zijn en/of worden gerealiseerd.

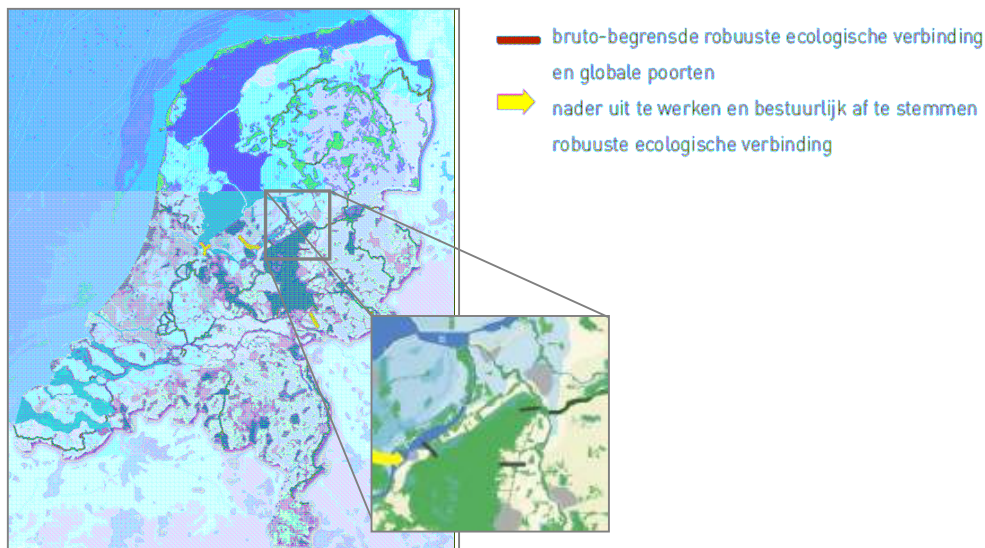
2.4.1 Landschap en cultuur

Cultureel bepaalde landschapselementen zijn vaak 'behoudenswaardig'. Bij veranderingen in het landschap, zoals de aanleg van een bypass, is een goede landschappelijke inpassing gewenst. Een waterkerende constructie kan hier een bijdrage aan leveren door een bepaalde veiligheid te bieden aan het achterland, waardoor waterkerende veiligheidsmaatregelen daar beperkt kunnen blijven. Praktisch gezien kan dit betekenen dat vereiste kruinhoogtes van dijken in het bypassgebied lager zijn. Ook de inpassing van de constructie zelf in het landschap is een belangrijk aandachtspunt.

2.4.2 Natuur

Op regionaal niveau is overheidsbeleid m.b.t. de ontwikkeling van de Ecologische Hoofdstructuur in Nederland van toepassing. De Ecologische Hoofdstructuur (EHS) is onderdeel van de Nota Ruimte, en hangt samen met de Vogel- en Habitatrichtlijn en het Europese natuurbeleidsplan 'Natura 2000'. Tezamen met nog andere bestaande wetgeving, waaronder de Natuurbeschermingswet, wordt zo invulling gegeven aan de realisatie van het 'Europees Ecologisch netwerk'. Het moet een netwerk gaan vormen van aaneengesloten gebieden waardoor flora en fauna meer kans hebben om te overleven. *(bron: Nationaal Groenfonds en Nota Ruimte)*

Een indicatief beeld van ontwikkelingsgebieden en belangrijke ecologische verbindingen in Nederland zijn opgenomen in onderstaande kaart.



PKB kaart Ecologische Hoofdstructuur *(bron: Nota Ruimte)*

Waterkerende constructies kunnen een bijdrage leveren aan de totstandkoming van de Ecologische Hoofdstructuur. Door het toepassen van bijzondere objecten als een vistrap bij een waterkerend kunstwerk kan aandacht worden gegeven aan migratie van plant- en diersoorten.

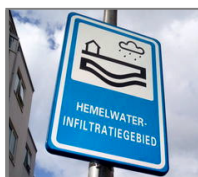
Voor de inlaatconstructie is met betrekking tot het voorgaande t.b.v. het opstellen van een functioneel programma van eisen het volgende geformuleerd:

De invloedsfeer van het inlaatwerk dient goed beschouwd te worden. Goede landschappelijke inpassing is gewenst.

Voor de IJsseldelta kan het toepassen van de inlaatconstructie de functie vervullen van het reduceren van de benodigde dijkversterkingprogramma's in het achterland, waardoor bestaande LNC-waardes behouden kunnen blijven.

Voor de inlaatconstructie is met name de barrièrewerking een aspect van aandacht, als het gaat om het leveren van een bijdrage aan de ontwikkeling van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) in Nederland. Het creëren van passagemogelijkheden voor diverse fauna is daarbij een optie.

2.5 Integraal waterbeheer



'In het integraal waterbeheer heeft een waterkering de functie van waterscheiding tussen binnen- en buitenwater. Doordat vrije afstroming wordt geblokkeerd is een aantal voorzieningen noodzakelijk om het gewenste (binnen)peil te handhaven.'

(bron: Leidraad Kunstwerken)

2.5.1 Regime

Voor het waterbeheer van de inlaatconstructie in de IJsseldelta is in het gepubliceerde masterplan reeds uitgegaan van een gesloten regime [G-O] (zie bijlage 1). Deze keuze wordt overgenomen als functionele eis voor het inlaatwerk. Wel dient daarbij te worden gerealiseerd dat daar naast voordelen ook nadelen aan verbonden zijn. Onderstaande tabel geeft kernachtig weer welke voor- en nadelen te benoemen zijn.

Gesloten beheerregime inlaatconstructie	
+	-
Het gesloten beheerregime is veiligheidsverhogend voor het achterland, waardoor minder hoge dijken kunnen worden gerealiseerd in het bypassgebied.	Een waterkerend kunstwerk is met dit regime benodigd om water onder verschillende condities te kunnen keren.
De openingstijd van het kunstwerk bij verwachte hoge rivierafvoeren is meestal enkele dagen, in tegenstelling tot stormen, die 3-6 uur van tevoren te voorspellen zijn. Het feit dat de inlaat altijd gesloten is betekent dat veiligheid tegen stormcondities continu gewaarborgd is.	Er is minder dynamiek in bypass; er stroomt geen IJsselwater door de bypass. Dit is een beperking voor de ontwikkeling van diversiteit in het deltamilieu.
Er komt weinig relatief vervuild IJsselwater in de bypass.	

Voor de inlaatconstructie is met betrekking tot het voorgaande en t.b.v. het opstellen van een functioneel programma van eisen het volgende geformuleerd:

Voor de inlaatconstructie dient een gesloten-open [G-O] beheerregime toegepast te worden waarbij aan de eisen t.b.v. de functie waterkeren wordt voldaan.

2.5.2 Openingsfrequentie

De gewenste openingsfrequentie is een belangrijke factor die veel gevolgen kan hebben voor onderhoudskosten, de indeling en gebruik van de bypass. In de beschikbare literatuur van project IJsseldelta wordt vaak uitgegaan van een frequentie van openen van eens per 500 jaar. Een toelichting op en relativering van deze eis wordt gegeven in [bijlage 8](#).

Voor de openingsfrequentie van het inlaatwerk dient uit te worden gegaan van eens per 500 jaar.

2.6 Verkeer en vervoer



'In verband met de hoge - en dus droge - ligging van een waterkering heeft deze van oudsher een verkeersfunctie. Richtlijnen hiervoor zijn gegeven in publicaties betreffende die specifieke functies. Voorbeelden hiervan zijn de Richtlijnen Vaarwegen van de Commissie Vaarwegbeheerders voor scheepvaart en de RONA-richtlijnen voor wegverkeer.'

(bron: Leidraad Kunstwerken)

De bestaande IJsseldijk nabij de toekomstige inlaatconstructie heeft een verkeersfunctie. Het is van belang dat deze functie vervuld kan blijven worden onder normale condities, om de bereikbaarheid van aangrenzend gebied te kunnen garanderen. Onder extreme weercondities kan het voorkomen dat de inlaat van de bypass functioneel wordt. Afhankelijk van (eventueel bestaande) evacuatieplannen kan het vereist zijn dat de waterkering onder die condities ook de verkeersfunctie moet vervullen.

Voor de inlaatconstructie is met betrekking tot het voorgaande t.b.v. het opstellen van een functioneel programma van eisen het volgende geformuleerd:

De huidige dijk langs de IJssel, t.p.v. de toekomstige inlaatconstructie, heeft een weg- en verkeersfunctie. Het is van belang dat deze weg bruikbaar blijft t.b.v. evacuatiemogelijkheden. Dus ook als de kering functioneel is.

Aangezien het hier om een provinciale weg, Kamperstraatweg, gaat is verkeersklasse 450 van toepassing.

Met het oog op de toekomst hoeft er niet rekening gehouden te worden met verkeers toenamen. Daarom kan de weg worden berekend met 2 rijstroken.

2.7 Functioneel Programma van Eisen

De functies van waterkeringen zijn beschouwd en er is per functie de toepassing gemaakt op de inlaatconstructie voor de bypass bij Kampen. Deze formuleringen vormen de basis van het functioneel programma van eisen, waar de te ontwerpen inlaatconstructie aan moet voldoen.

PvE	
	   
	Waterkeren LNC Waterbeheer Infrastructuur
Functie	Eis
Waterkeren	1. De inlaatconstructie dient vanaf een te bepalen hoogwaterafvoer te openen, om daarmee de vereiste waterstands-verlaging in de IJssel teweeg te brengen d.m.v. het laten functioneren van de bypass. 2. In het geval van stijgende waterstanden als gevolg van opstuwing door storm heeft de inlaatconstructie een kerende functie, als onderdeel van de primaire waterkering. 3. De gehele constructie moet voldoen aan de waterkerende veiligheidseis voor sterkte en stabiliteit. ▪ Aanvulling eis 1 De kans dat er ontoelaatbaar hoge waterstanden in de IJssel optreden <u>ten gevolge van falen van het afsluitmiddel van de waterkering</u> dient kleiner te zijn dan 1/20.000 jaar. ▪ Aanvulling eis 2 De kans dat er een ontoelaatbaar groot instromend volume over de <u>gesloten</u> kering optreedt als gevolg van <u>overlopen/overslag</u> dient kleiner

	te zijn dan 1/2000 jaar (= normfrequentie voor de IJsseldelta). ▪ Aanvulling eis 3 De kans dat het kunstwerk <u>constructief bezwijkt</u> bij waterstanden gelijk of kleiner dan de maatgevende hoogwaterstanden (evt. i.c.m. falend afsluitmiddel) dient kleiner te zijn dan 1/200.000 jaar.
LNC-waarden	▪ De invloedssfeer van het inlaatwerk dient goed beschouwd te worden. Goede landschappelijke inpassing is gewenst. ▪ Voor de IJsseldelta kan het toepassen van de inlaatconstructie de functie vervullen van het reduceren van de benodigde dijkversterkingprogramma's in het achterland, waardoor bestaande LNC-waardes behouden kunnen blijven. ▪ Voor de inlaatconstructie is met name de barrièrewerking een aspect van aandacht, als het gaat om het leveren van een bijdrage aan de ontwikkeling van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) in Nederland. Het creëren van passagemogelijkheden voor diverse fauna is daarbij een optie.
Integraal waterbeheer	▪ Voor de inlaatconstructie dient een gesloten-open [G-O] beheerregime toegepast te worden waarbij aan de eisen t.b.v. de functie waterkeren wordt voldaan. ▪ Voor de openingsfrequentie van het inlaatwerk dient uit te worden gegaan van eens per 500 jaar.
Verkeer/ vervoer	▪ De huidige dijk langs de IJssel, t.p.v. de toekomstige inlaatconstructie, heeft een weg/verkeersfunctie. Het is van belang dat deze weg bruikbaar blijft t.b.v. evacuatiemogelijkheden. Dus ook als de kering functioneel is. ▪ Aangezien het hier om een provinciale weg, Kamperstraatweg, gaat is voor verkeersklasse 450 van toepassing. ▪ Met het oog op de toekomst hoeft er niet rekening gehouden te worden met verkeerstoename. Daarom kan de weg worden berekend met 2 rijstroken.

H3

Voorkeursprincipe inlaatconstructie



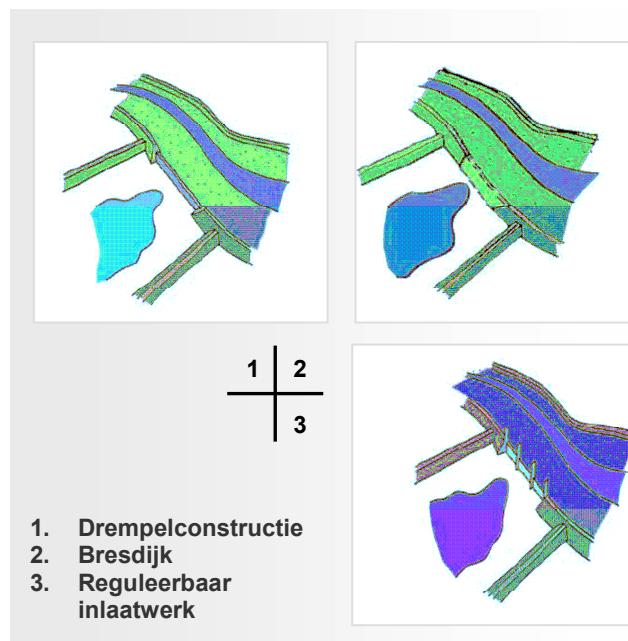
Een opblaasbare dijk of een ingewikkelde klepstuw, een simpele drempel of een verborgen inlaatwerk... mogelijkheden genoeg om water de bypass in te krijgen en/of erbuiten te houden. Of die mogelijkheden allemaal toepasbaar zijn? Dit hoofdstuk staat in het teken van een algemene verkenning. Aan de hand van het functioneel programma van eisen zal een voorkeursprincipe worden gekozen voor verdere uitwerking van het ontwerp van de inlaatconstructie.

3.1 Principevarianten

Het opgestelde functioneel programma van eisen biedt een kader aan randvoorwaarden waarbinnen het ontwerpproces van de inlaatconstructie verder kan worden uitgewerkt. Een belangrijk onderdeel van het ontwerpproces is het opstellen van varianten en de toetsing daarvan op het programma van eisen. Dat dit een wezenlijk onderdeel is van het ontwerpproces blijkt wel uit het scala van mogelijkheden die beschikbaar zijn voor toepassing als inlaatconstructie:

- | | |
|--|--------------------------|
| - Hefdeur, schuiven boven water | - Klepdeur |
| - Schuiven zakken in de bodem, zakdeur | - Balgstuw |
| - 'Opblaasbare dijk' | - Verborgen inlaatwerk |
| - Staande Segmentdeuren | - Invaren van caissons |
| - Roldeur | - Inlaatwerk met drempel |

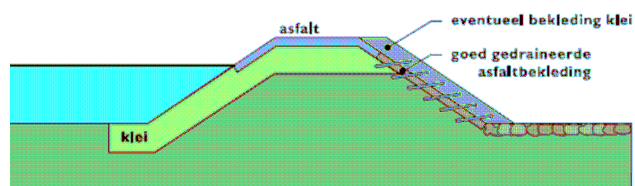
Er zijn verschillende principes met weer onderlinge variaties te onderscheiden. Zo zijn er constructies die op enige wijze bedienbaar en/of beweegbaar zijn, maar ook principes die als statisch kunstwerk functioneren. Een derde principe is het weggraven van een deel van de bestaande dijk om zo een inlatend debiet te kunnen laten optreden. Deze hoofdprincipes zijn geselecteerd om aan de hand van het functioneel programma van eisen te kunnen toetsen. Zo kan een hoofdrichting worden ingeslagen voor verdere uitwerking van de variantenanalyse.



Drie principevarianten inlaatconstructie

3.1.1. Drempel

Een drempelconstructie staat eigenlijk continu open. Het betreft een verlaagde gronddijk met bekledingen op het binnen- en buitentalud. Indien een drempelconstructie wordt toegepast voor de bypass zal het IJsselwater vanaf een bepaalde waterstand de bypass instromen.

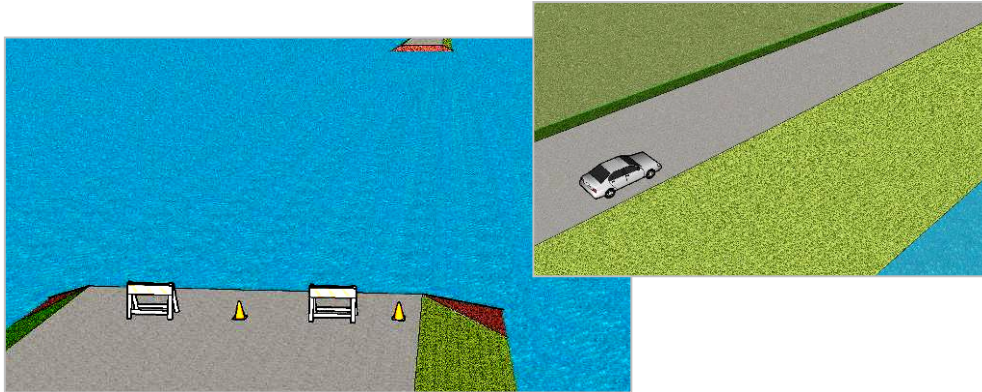


Schematische dwarsdoorsnede drempel

Onder 'normale' condities kan de drempel functioneren als verkeersweg. Als de drempel functioneel is verdwijnt deze onder de waterspiegel en ontstaat er een debiet in de bypass.

3.1.2 Bresdijk

Bij deze wijze van water inlaten wordt bij dreigende omstandigheden een initiële bres in de kruin van de dijk gemaakt, waarna verdere verdieping en verbreding van de bres als gevolg van erosie plaatsvindt. De uiteindelijke bresbreedte en –diepte is onder andere afhankelijk van de eigenschappen van de dijk.



Impressie bresdijk, onder 'normale' condities (rechts) en tijdens functioneren (links)

De kans is aanwezig dat er t.p.v. de bres een groot gat in de dijk ontstaat, met als gevolg dat een grote hoeveelheid water (mogelijk meer dan nodig om de afvoergolf af te toppen) ongecontroleerd het gebied instroomt. De dijk kan na bressen uiteraard geen verkeersfunctie meer vervullen. De lage (onderhouds)kosten en de maken dit principe toch tot een variant ter overweging.

3.1.3 Reguleerbare inlaat

Onder de hoofdcategorie reguleerbare inlaatconstructies vallen alle inlaatwerken die op enigerlei wijze gecontroleerd te sluiten of te openen zijn. Daarmee wordt onderscheid gemaakt met drempelconstructies (statische constructie) en bresdijken (in veel mindere mate controleerbaar). Enkele voorbeelden van reguleerbare inlaatwerken zijn de klepstuw, segmentdeuren, de balgstuw of een verborgen inlaatwerk. Dit laatste principe werkt via erosieprocessen en wordt daarom niet altijd als reguleerbaar gezien. Toch is de afhankelijkheid van menselijk handelen en enige mate van controle over het erosieproces kenmerken die bij een reguleerbare constructie passen. In dit rapport wordt het verborgen inlaatwerk dan ook als reguleerbaar beschouwd.

3.2 Toetsingscriteria

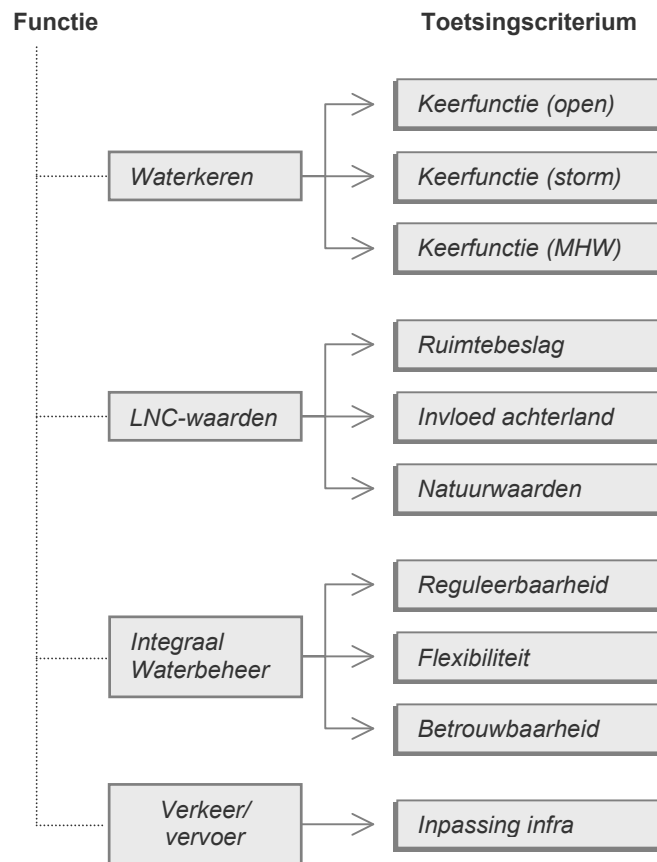
Om de drie principevarianten te kunnen toetsen aan de hand van de hoofdfuncties uit het functioneel programma van eisen, is een scala aan criteria opgesteld. Deze krijgen in een 'multicriteria analyse' een bepaalde samengestelde weegfactor, waarna de drie varianten kunnen worden getoetst en een voorkeursprincipe kan worden gekozen.

'De Multicriteria analyse is een wetenschappelijk verantwoorde methode om tussen diverse alternatieven een rationele keuze te maken. De multicriteria analyse is geëvolueerd tot een wetenschappelijke discipline die zowel bij de overheid als bij de private sector wordt aangewend voor het rationaliseren van keuzes op diverse vlakken.' (Bron: Wikipedia)

Op de volgende pagina zijnde opgestelde criteria weergegeven, gekoppeld aan de hoofdfuncties van de inlaatconstructie.

3.2.1 Criteria

Het volgende schema geeft een beeld van de hoofdfuncties met de daarbij geformuleerde criteria. In paragraaf 3.2.2 wordt een toelichting gegeven op de inhoud van de criteria en welke redenatie daarbij van toepassing is op het inlaatwerk.



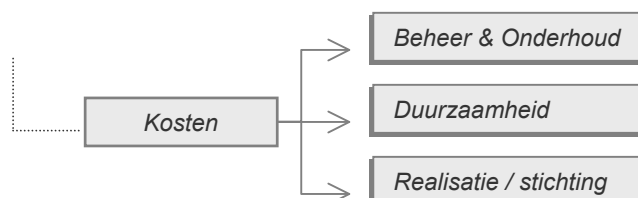
Kosten



'Tijdens het ontwerp dienen er duidelijke keuzes te worden gemaakt ten aanzien van het verwachte onderhoud van een waterkerend kunstwerk. Ook worden tijdens het ontwerp de kosten voor eventuele aanpassingen in een latere fase bepaald. Stelregel is dat een goed ontwerp zijn geld altijd weer oplevert..'

(bron: Leidraad Kunstwerken)

Kosten voor beheer & onderhoud, alsmede stichtingskosten vormen een belangrijk aandachtspunt bij het toetsen van de ontwerpvarianten. De volgende criteria zijn dan ook opgenomen in de multicriteria analyse:



3.2.2 Toelichting criteria

In onderstaand schema zijn de toetsingscriteria weergegeven met daarbij een toelichting. Per toelichting is ook de redenatie gegeven die als uitgangspunt heeft gediend bij de toetsing van de principevarianten.

Functie	Toetscriterium	Toelichting
WATERKEREN	Keerfunctie (open)	<i>De constructie moet capabel zijn om in die mate water te keren dat het gewenste instromend debiet in de bypass optreedt. Dit betreft de situatie met een functionerende inlaat.</i> Redenatie: capabel tot waterkeren = gewenst
	Keerfunctie (storm)	<i>Onder stormcondities, waarbij opstuwung vanuit het IJsselmeer en Ketelmeer optreedt met als gevolg verhoogde waterstanden langs de IJssel, dient de inlaat gesloten te zijn. Het is in deze situatie van belang dat de bypass niet inundeert.</i> Redenatie: capabel tot waterkeren = gewenst
	Keerfunctie (MHW)	<i>Onder maatgevende afvoeromstandigheden zullen hoge waterstanden optreden, zeker als de openingsprocedure van het inlaatwerk faalt. De constructie mag dan niet bezwijken.</i> Redenatie 1: het bezwijken van de constructie waardoor toch een instromend debiet optreedt niet gewenst. Redenatie 2: het zodanig dimensioneren van de constructie zodat maatgevende waterstanden kunnen worden gekeerd is meer gewenst dan een 'lagere' constructie die alleen stormpeilen kan keren. Ongecontroleerde instroom over het (falend) kunstwerk is niet gewenst en wordt daarmee voorkomen.
LNC WAARDEN	Ruimtebeslag	<i>Invloed constructie op bestaande situatie. Mogelijkheden tot landschapsinpassing.</i> Redenatie: minder invloed/goede inpassing = gewenst
	Invloed achterland	<i>Gevolgen constructie voor landschapsinrichting, met name de vereiste dijkhoogte in het achterland.</i> Redenatie: verlagende invloed dijkhoogtes = gewenst
	Natuurwaarden	<i>Invloed constructie op natuurontwikkeling, behoud en /of verder tot stand brengen Ecologische Hoofdstructuur (EHS)</i> Redenatie: bijdrage kunnen leveren = gewenst
INTEGRAAL WATERBEHEER	Reguleerbaarheid	<i>Mate van controle over open- en sluitingsprocedure</i> Redenatie: controle = gewenst
	Flexibiliteit	<i>Sluitings- en/of openingstijd (waarbij van belang is: voorspeltijd hoogwater 3-6 dagen, voorspeltijd storm 3-6 uur). Hersteltijd na functioneren. Mogelijkheden tot gedeeltelijk openen of sluiten van het inlaatwerk. Mogelijkheden tot openen/sluiten bij stromend water.</i> Redenatie 1: gesloten regime met mogelijkheid openen in 3-6 dagen = gewenst Redenatie 2: gedeeltelijk kunnen openen/sluiten = gewenst Redenatie 3: mogelijkheid tot openen/sluiten bij stromend water = gewenst

VERKEER/ VERVOER	Betrouwbaarheid	<i>Het vermogen om functies te vervullen in een bepaalde omgeving, gedurende een bepaalde periode. Bedrijfszekerheid is daarbij van belang, alsmede faalkansen en risico's voor het achterland,</i> Redenatie: eenvoudige constructie = bedrijfszekerder en beperkt risico's achterland (= gewenst)
	Inpassing infrastructuur	<i>Mogelijkheid om de bestaande infrastructuur te integreren in de constructie. Gebruiksmogelijkheden voor evacuatie doeleinden.</i> Redenatie1: kunnen handhaven bestaande infrastructuur = gewenst Redenatie 2: evacuatie doeleinden onder maatgevende condities mogelijk = gewenst
KOSTEN	Beheer& Onderhoud	<i>Energieverbruik, vervangbaarheid onderdelen, toegankelijkheid, onderhoudsfrequentie</i> Redenatie: weinig energieverbruik, lage onderhoudsfrequentie en goede toegankelijkheid= gewenst
	Duurzaamheid	<i>Planperiode levensduur constructie, mogelijkheden tot aanpassing aan veranderende veiligheidsnormen</i> Redenatie: robuustheid en mogelijkheden tot aanpassing in toekomst = gewenst
	Realisatie/stichting	<i>Kosten realisatie/stichting constructie</i> Redenatie: lage stichtingskosten = gewenst

3.2.3 Weegfactoren

Om de juiste waarde toe te kennen aan de verschillende functies die de inlaatconstructie zal vervullen, is per functie een weegfactor [%] bepaald. De criteria die onder een bepaalde functie gerangschikt zijn, hebben dus een bepaalde weegfactor. De criteria onderling worden niet verschillend meegewogen. In onderstaande tabel zijn de functies met gekozen weegfactoren en een bijbehorende toelichting opgenomen.

Functie	Weegfactor [%]	Toelichting
Waterkeren	30	<i>De functie waterkeren is essentieel voor het functioneren van de constructie als geheel. Veiligheid heeft hoge prioriteit ten opzichte van andere te vervullen functies.</i>
LNC-waarden	10	<i>Landschappelijke inpassing en mogelijkheden creëren voor het verder tot stand brengen van de Ecologische Hoofdstructuur zijn belangrijke nevenfuncties die de inlaatconstructie kan vervullen. Ten opzicht van de andere functies is de prioriteit minder hoog.</i>
Integraal Waterbeheer	20	<i>Een belangrijke functie die sterk verbonden is met de functie 'waterkeren'. Kan van grote invloed zijn op de te bieden veiligheid.</i>
Verkeer/vervoer	10	<i>Het vervullen van de verkeersfunctie en het bieden van evacuatiemogelijkheden is van belang voor de inlaatconstructie. Ten opzicht van de andere functies is de prioriteit minder hoog.</i>
Kosten	30	<i>Het kostenaspect kan een grote rol spelen bij de besluitvorming, mede vanwege de verwachting van een lage gebruiksfrequentie (1/500 jaar). Keuzes met betrekking tot beheer & onderhoud en duurzaamheid zijn daarbij van grote invloed op de kosten, zowel voor de korte als lange termijn.</i>
Totaal	100	

3.3 Toetsen principevarianten

Drie principes, een scala aan criteria om op te toetsen. In deze paragraaf de toetsing van de principevarianten middels de multicriteria analyse, met de daaruit volgende keuze voor het principe dat verder zal worden uitgewerkt.

3.3.1 Multicriteria analyse

In onderstaand schema zijn de drie principemogelijkheden voor de inlaatconstructie opgenomen. Per criterium zijn de drie varianten beoordeeld, waarbij een cijfer gegeven kan worden tussen 1 en 10. Per functie is een tussenscore gegeven, waarbij de bijbehorende weegfactor is meegerekend. Er is per variant één maal een '1' gegeven en één maal een '10' gegeven. Andere cijfers liggen tussen de drie en de acht.

Multicriteria Analyse						
	Functie	Toetsingeisen	Weegfactor	Variant		
	Waterkeren	<i>Keerfunctie (OKP)</i> <i>Keerfunctie (storm)</i> <i>Keerfunctie (MHW)</i>	30%	Drempel	Bresdijk	Reguleren
				8	4	8
				1	8	8
			3	8	8	
score	1,2	2,0	2,4			
	LNC waarden	<i>Ruimtebeslag</i> <i>Invloed achterland</i> <i>Natuurwaarden</i>	10%	7	8	5
				4	4	8
				7	3	6
			score	0,6	0,5	0,6
	Waterbeheer	<i>Reguleerbaarheid</i> <i>Flexibiliteit</i> <i>Betrouwbaarheid</i>	20%	4	3	10
				3	1	8
				8	8	5
			score	1,0	0,8	1,5
	Infrastructuur	<i>Inpassing infrastructuur</i>	10%	5	3	8
			score	0,5	0,3	0,8
	Kosten	<i>Beheer & Onderhoud</i> <i>Duurzaamheid</i> <i>Realisatie / stichting</i>	30%	10	8	1
				8	7	4
				6	10	3
			score	2,4	2,5	0,8
Totaal			100%	5,70	6,10	6,17

Een toelichting op de gegeven beoordelingen is opgenomen in [bijlage 9](#). In deze bijlage wordt per functie een toelichting gegeven op de beoordeling van de drie varianten.

3.3.2 Gevoeligheidsanalyse weegfactoren

De beoordelingen per criterium zijn met weegfactoren op prioriteit gerangschikt. De invloed van deze weegfactoren op de uitkomsten is met onderstaande analyse beoordeeld.

Variant 1: 'Groenlinks'	Waterkeren 10% LNC waarden 40% Waterbeheer 10% Infra 10% Kosten 30%
Totaal	6,20 5,87 5,70
Variant 2: 'VVD'	Waterkeren 30% LNC waarden 10% Waterbeheer 20% Infra 30% Kosten 10%
Totaal	5,10 5,03 7,23
Variant 3: 'CDA'	Waterkeren 20% LNC waarden 20% Waterbeheer 20% Infra 20% Kosten 20%
Totaal	5,60 5,40 6,53

De uitkomsten per variant geven een beeld van het effect van andere weegfactoren op de uitkomsten. Dat beleidsmatige keuzes daarbij van invloed zijn is met een knipoog verwerkt in de namen van de drie varianten voor de weegfactoren.

Uit de analyse blijkt dat de drempel op 'groen' gebied (variant 1) goed scoort. Variant 2 en 3 geven beide voorkeur aan de reguleerbare inlaat. Uitkomsten zijn dus enigszins beïnvloedbaar, afhankelijk van de prioriteit die aan de diverse functies wordt toegekend.

3.3.3 Conclusie

Als we de beoordeling van de drie varianten kernachtig moeten samenvatten, mede in het licht van het opgestelde functioneel programma van eisen, zijn de volgende conclusies te trekken:

Drempel

- +** Weinig onderhoud;
- Onvoldoende waterkerend bij stormcondities;
- PvE** Aan de waterkerende eis voor stormcondities wordt niet voldaan.

Bresdijk

- +** Lage realisatiekosten
- Weinig controle op mate van functioneren
- PvE** Aan de eisen voor waterkeren wordt (in principe) voldaan.

Reguleerbare inlaat

- +** Reguleerbaar
- Realisatie- en onderhoudskosten
- PvE** Aan de eisen voor waterkeren wordt voldaan. Ook nevenfuncties (m.n. verkeer en LNC waarden) kunnen worden vervuld.

De reguleerbare inlaatconstructie profileert zich duidelijk op de gebieden 'waterkeren' en 'waterbeheer'. Op kostengebied scoort de reguleerbare inlaat echter negatief. Niet alleen de realisatie van het werk, maar ook de jaarlijkse onderhoudskosten zullen hoger zijn dan bij de andere varianten. Deze variant laat zich dan ook omschrijven als dure variant maar wel met het beste gewenste effect en resultaat. De reguleerbare inlaat lijkt ook het best in staat om de vereiste (neven)functies te kunnen vervullen, waarmee tegemoet wordt gekomen aan het functioneel programma van eisen.

De reguleerbare constructie is het gekozen voorkeursprincipe

Het kostenaspect is een belangrijk punt ter overweging bij volgende stappen in de variantenanalyse. Het zoeken naar mogelijkheden om onderhoudskosten te verlagen kan het financiële plaatje voor de reguleerbare variant gunstiger doen uitpakken.

H4

Ontwerpvarianten reguleerbare inlaatconstructie

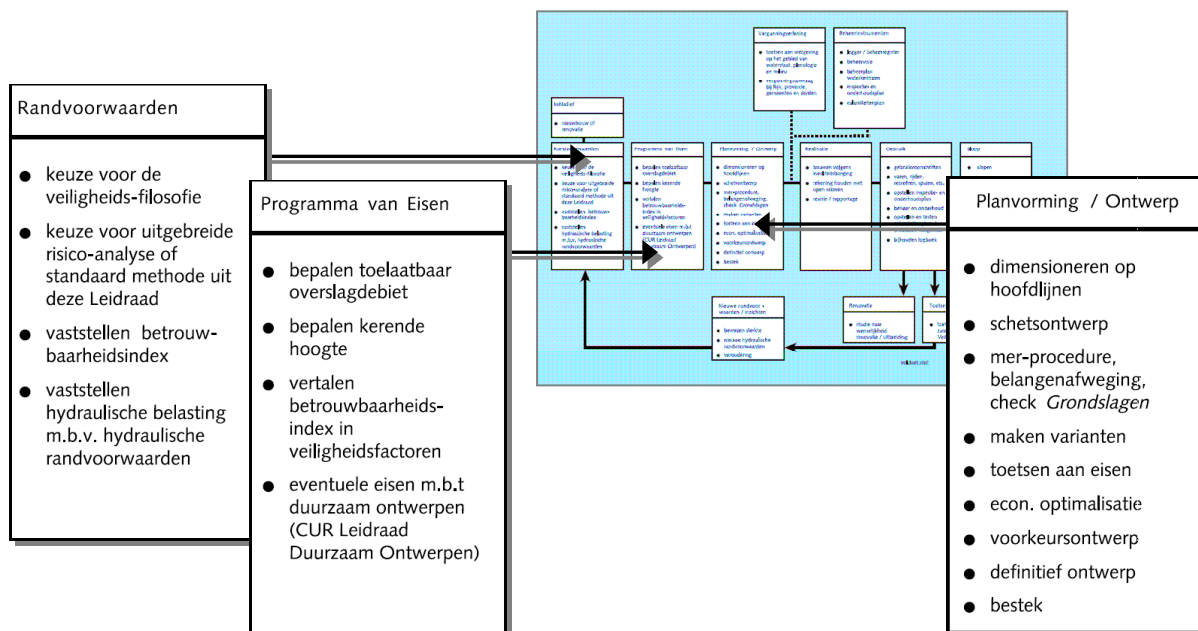


Controle hebben en houden bij oncontroleerbare weersomstandigheden. Een reguleerbare constructie lijkt de meeste potentie te hebben om aan deze eis te voldoen. In dit hoofdstuk zullen de mogelijkheden binnen het voorkeursprincipe worden beschouwd en beoordeeld, om zo tot een definitieve ontwerpvariant te komen. Maar eerst een inventarisatie van de stand van zaken in het ontwerpproces.

4.1 Ontwerpproces

Het ontwerpen van een kunstwerk is een veelomvattend proces, afhankelijk van de complexiteit van het kunstwerk. Veelal is het ook een cyclisch proces, waarbij sommige stappen meerdere malen doorlopen worden, hetgeen uiteindelijk leidt tot een optimaal ontwerp. Dat laatste is ook van toepassing op het ontwerp van de inlaatconstructie voor de bypass. Nu een voorkeursprincipe is gekozen, kunnen de varianten *binnen* het voorkeursprincipe worden beschouwd.

In de Leidraad Kunstwerken is een onderstaand schema opgenomen waarin de beheercyclus van een waterkering is opgenomen. De beheercyclus start met de initiatieffase en eindigt met 'slopen'. Het schema geeft inzicht in de stappen die reeds zijn gezet in het ontwerp van de inlaatconstructie, alsmede de nog te doorlopen fasen.



Realisatie- en beheerproces waterkering (Bron: Leidraad Kunstwerken)

Voor het ontwerpproces van de inlaatconstructie is te constateren dat in voorgaande hoofdstukken reeds een verkenning heeft plaatsgevonden op verschillende gebieden. Randvoorwaarden zijn beschouwd, een functioneel programma van eisen is opgesteld en er is een voorkeursprincipe gekozen aan de hand van het variantenonderzoek.

In de volgende paragrafen worden een aantal stappen uit het ontwerpproces opnieuw doorlopen om zo tot een definitieve keuze te komen voor de te ontwerpen inlaat. Bij verdere uitwerking van het voorkeursalternatief tot een voorlopig ontwerp zullen constructieve en hydraulische ontwerpeisen worden bepaald waarin punten uit bovenstaand schema (met name het blok 'programma van eisen') worden uitgewerkt.

4.2 Reguleerbare inlaat – de mogelijkheden

De reguleerbare inlaat is gekozen als voorkeursprincipe voor het inlaatwerk. Het spectrum aan mogelijkheden voor reguleerbare inlaatconstructies is onder te verdelen verschillende categorieën, op basis van de wijze waarop de constructie functioneert. In onderstaand schema zijn de mogelijkheden op een rij gezet.

Functioneren	Toelichting
<i>Verticale translatie</i>	
Hefdeur	De hefdeur is een vlakke deur die in gesloten toestand de opening loodrecht afsluit. De deur kan zowel één- als tweezijdig kerend worden uitgevoerd.
Schuiven	Dit alternatief betreffen schuiven die verticaal op en neer bewegen. In het geval dat de inlaat open staat bevinden de schuiven zich boven water. De schuiven kunnen worden verplaatst door hydraulische cilinders.
Schuiven zakken in bodem, zakdeur	Zelfde principe als voorgaande. Het enige verschil is dat in geopende toestand de schuiven in de bodemconstructie worden opgenomen.
Poirée stuw	Bij een Poirée stuw staan stalen poten in het water (jukken). Tegen deze jukken zijn schuiven geplaatst. Deze schuiven worden bij openen/sluiten één voor één door een portaalkraan opgehesen (of neergelaten).
Schotbalken	Dit alternatief lijkt op de Poirée stuw met als verschil dat de schuiven niet als een geheel naar boven worden getild maar is opgedeeld in balken.
<i>Horizontale translatie</i>	
Roldeur	De roldeur is een vlakke deur die in gesloten toestand de doorvaart loodrecht afsluit en de vervalbelasting direct naar de (sluis)wanden afdraagt. Bij openen beweegt de deur in horizontale richting naar de deurkas.
<i>Rotatie om verticale as</i>	
Puntdeur	Puntdeuren zijn vlakke deuren die in gesloten toestand tegen elkaar steunen en dan een stompe hoek vormen. De deuren draaien om een verticale as in de deurenkasten.
Staande segmentdeuren	Staande segmentdeuren zijn in het horizontale vlak gebogen deuren met armen door het draaipunt. Aan beide wanden van de kering staat een dergelijke deur opgesteld met draaipunten aan de wanden (vergelijk de Maeslantkering).
<i>Rotatie om horizontale as</i>	
Segmentdeuren	Een segmentdeur is een deur met in het verticale vlak gezien een cirkelsegment. Aan de zijkanen van de deur bij de wanden van de kering zijn korte armen aangebracht die door de scharnierpunten gaan die samenvallen met het middelpunt van de cirkel.
Klepdeur	Een klepdeur is een vlakke deur met de draaiingsas aan de bodem. In gesloten stand met een vervalbelasting rust de deur tegen de sponningen in de sluiswanden, in geopende stand draait de deur weg in een sleuf in de bodem.
“Garagedeur”	Hetzelfde als klepdeur van met als enige verschil dat de draaiingsas zich boven water bevindt.
<i>Overige alternatieven</i>	
Balgstuw	De balgstuw bestaat uit balgen van rubberdoek (of geotextiel) die zich, als extreem hoog water op komst is, vullen met water en/of lucht
Invaren caissons	Drijvende doosvormige elementen worden wanneer nodig uit een nabij de waterkering gelegen dok gevaren en afgezonken in het ‘gat’ wat de kering tot stand brengt.
Verborgten inlaatwerk	Een inlaatwerk bestaande uit een betonnen constructie, met een aantal openingen, die in de dijk is opgenomen. Deze doorstroom openingen zijn gevuld met makkelijk erodeerbaar materiaal. Bij een bepaalde maatgevende afvoer wordt een bres in de dijk gemaakt waarna door instromend water de openingen worden schoon gespoeld.

Dutchdam delta principe	De Dutchdam is een uitklapbare waterkering die tijdelijk kan worden ingezet bij hoog water of permanent kan worden geïnstalleerd in kaden (-muren) langs rivieren met overstromingsrisico's.
--------------------------------	--

Afgeleid van bron: scope waterbouwkundige kunstwerken, DHV

De genoemde alternatieven vallen weliswaar onder reguleerbare inlaatwerken, maar ze voldoen niet allen aan het opgestelde functioneel programma van eisen en/of zijn bij voorbaat ongeschikt voor de inlaatconstructie in de bypass. Enkele varianten worden daarom niet verder beschouwd:

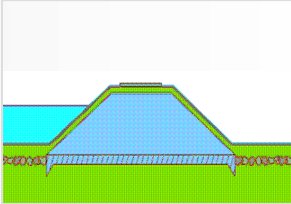
Niet verder te beschouwen	Toelichting
Schotbalken	Omslachtige openingsprocedure, waterdichtheid onzeker bij lange levensduur
Puntdeur	Sluiten bij stromend water niet/beperkt mogelijk
Staande segmentdeuren	Te grote dimensies om in te kunnen passen (grote benodigde deurkassen)
Roldeur	Te grote dimensies om in te kunnen passen in landschap (inkassing, deur)
Invaren caissons	Omslachtig, bedrijfszekerheid laag, voldoet niet aan principe Gesloten-Open
Balgstuw	Matig toepasbaar als continu gesloten kering (vandalismegevoelig, onderhoud?)
Dutchdam delta	Kerende hoogte te klein, te sluiten bij storm (sluitingstijd 3-6 uur, is niet gewenst)

Varianten die de eerste toets der kritiek doorstaan zijn de hefdeur en deurprincipes met draaiing om horizontale as. Ook diverse varianten met schuiven en het verborgen inlaatwerk moeten worden beschouwd. Om het variantenonderzoek enigszins hanteerbaar te houden zijn de 8 overgebleven varianten in vier principes verdeeld. Uit deze vier principes zal het definitieve type inlaatwerk worden gekozen:





1	2	3
		4



1. hefdeurprincipe
2. Poirée stuw
3. Horizontale deur
4. Verborgen inlaatwerk

4.2.1 Hefdeurprincipe

De hefdeur is een vlakke deur die in gesloten toestand de doorvaartopening loodrecht afsluit. De deur kan zowel één- als tweezijdig kerend worden uitgevoerd. De geopende stand wordt bereikt door de deur verticaal omhoog te laten bewegen langs geleidingen in heftorens die aan weerszijden staan. De deur wordt uitgebalanceerd met contra gewichten. De goede inspectie- en onderhoudsmogelijkheden en de geringe gevoeligheid voor vuil en ijs zijn de voordelen. Als nadelen zijn op te merken de gecompliceerde deur geleidingen en bewegingswerken, de dure heftorens en de horizonvervuiling. De hefdeur is toegepast bij grote vervallen of bij beperkte bouwruimte.

Schuiven

Onder het hefdeurprincipe vallen naast vlakke keerdeuren ook constructies met schuiven die verticaal op en neer bewegen. In het geval dat de inlaat open staat bevinden de schuiven zich boven water. De schuiven kunnen worden verplaatst door hydraulische cilinders.

Afmetingen

De afmetingen van de toe te passen schuiven / deuren zijn beperkt en hangen samen met de mogelijkheden van de bewegingswerken. Ter indicatie is te vermelden dat de Oosterscheldekering

schuiven heeft met een breedte van 45 meter, variërend in hoogte van 6 tot 12 meter. Voor de kering bij de Hollandse IJssel geldt dat deze deuren heeft van 81,20 meter breed en 11,50 m hoog. Technisch gezien is dus heel wat mogelijk.

4.2.2 Poirée stuw

Schuiven die één voor één door een (al dan niet computergestuurde) portaalkraan op te hijsen of neer te laten. Dat is het principe van een Poirée stuw. Bij een Poirée stuw staan stalen poten in het water (jukken). Tegen deze jukken zijn schuiven geplaatst.

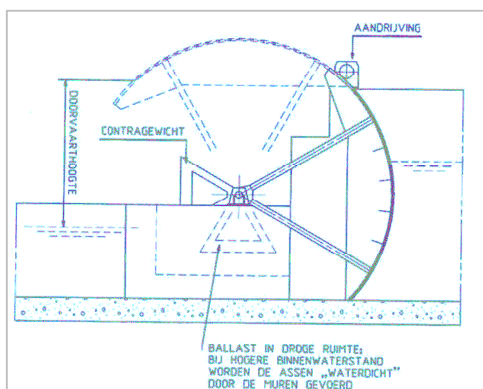


*Poirée stuw in Linne (l) en de poirée stuw te Roermond tijdens trekken schuiven m.b.v. de portaalkraan (r)
bron: www.binnenvaartinbeeld.com*

Op de jukken liggen platte stalen bruggdelen, zodat er een complete brug ontstaat. Over deze bruggdelen kan een kraan rijden waarmee de schuiven getrokken of gezet worden (zie foto). Telkens als een brugdeel wordt verwijderd blijft er een los juk staan. Onder aan zo'n juk zit een soort scharnier waardoor het juk kan omkantelen en plat op de bodem komt te liggen. Als alles klaar is liggen de jukken als omgevallen dominostenen op de bodem en is de rest van de stuw opgeslagen in een loods nabij het inlaatwerk. Met dit alternatief worden de hydraulische cilinders bespaard en is er minder horizonvervuiling.

4.2.3 Horizontale deur

Onder horizontale deuren valt het garage- en klepdeurprincipe, alsmede verschillende vormen van segmentdeuren. Dit laatste type is vaak toegepast bij waterkerende constructies. Een segmentdeur is een deur met in het verticale vlak gezien een cirkelsegment. Aan de zijken van de deur bij de sluiswanden zijn korte armen aangebracht die door de scharnierpunten gaan die samenvallen met het middelpunt van de cirkel.



Horizontale segmentdeur

‘De verlengde armen hebben aan de tegenovergesteld zijde van de deur contragewichten. De draaipunten bevinden zich ongeveer halverwege de waterdiepte. Hoewel de verval- belasting over de deur naar de draaipunten toe wordt geleid en de deur uitgebalanceerd is, moet door het verschil in opdrijvende kracht bij de diverse standen toch een vrij zwaar bewegingswerk ingezet worden. De segmentdeur draait voor de geopende stand naar beneden in een sleuf in de bodem of in een woelkamer of naar boven. Voordelen zijn het lichte bewegingswerk en de korte, ondiepe deurkassen. Nadelen zijn de aanzienlijke krachten op de scharnieren, de gevoeligheid voor vuil en slib in de sleuf en de diepe sleuf (15% van de overspanningslengte). Toepassing is zinnig bij weinig bouwruimte. Een breedte van circa 20 meter (dwars op dijk) is benodigd.’

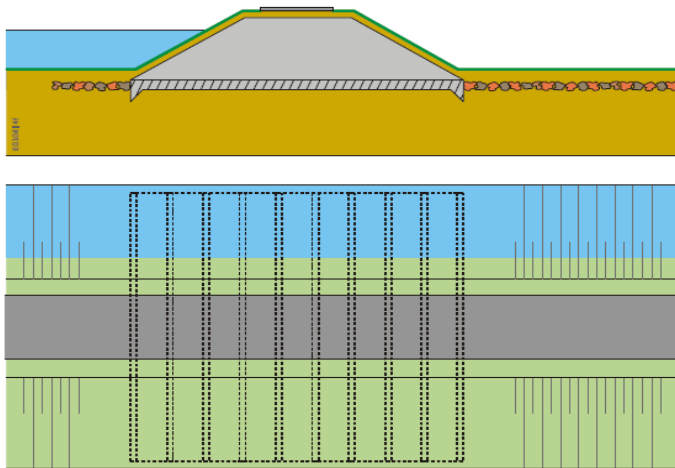
Bron: scope waterbouwkundige kunstwerken, DHV

Segmentdeuren zonder contragewichten komen ook voor. Bij deze deur ontbreekt dus het contragewicht en de deur heeft langere armen (vergelijk de spuisluis in het Haringvliet). Deze deur vindt voornamelijk toepassing in het bovenhoofd van sluisen met een zeer hoog verval in combinatie met een woelkamer.

4.2.4 Verborgene inlaatwerk

Het verborgen inlaatwerk bestaat uit in de dijk ingebouwde doorstroomopeningen, die gevuld zijn met makkelijk erodeerbaar materiaal. Bij een maatgevende afvoer wordt in de kruin van de dijk een initiële bres gegraven (of op andere wijze een bres gemaakt) waarna door de instroom de constructie snel schoonspoelt. Door een indeling in secties ontstaat er een zekere flexibiliteit bij inzet van de inlaat door de 'actieve' breedte af te stemmen op de geschatte benodigde inlaatcapaciteit. De extra controle over de werking van het grondlichaam t.o.v. de bresdijk, in combinatie met de toepassing van constructieve elementen, heeft voor dit rapport tot gevolg dat het verborgen inlaatwerk tot een reguleerbare constructie wordt gerekend.

Onderstaande schets geeft het principe weer van een verborgen inlaat met het niveau van de inlaat gelijk aan de hoogte van de teen van de dijk. De bovenste figuur betreft een dwarsdoorsnede van de dijk met daarin aangegeven een bodembescherming aan de polderzijde en rivierzijde van de inlaatconstructie. Het onderste figuur geeft een bovenaanzicht van de dijk, waarbij de inlaatconstructie is opgedeeld in een aantal segmenten, welke onderling gescheiden zijn door een verticale wand.



Schets principe verborgen inlaatwerk. Bron: dossier VenW: 'Toelichting aanvullend deskundigenoordeel noodoverloopgebieden'(aug. 2003)

Afhankelijk van te maken keuzes m.b.t. stroomsnelheden, bodembescherming etc. zijn de afmetingen te bepalen. De lengte kan wellicht variëren van 100 tot 200 meter. De hoogte van het doorstroomoppervlak hangt daarmee samen.

4.3 Toetsen ontwerpvarianten

Het opgestelde functioneel programma van eisen (zie paragraaf 2.7) is van toepassing op de vier behandelde ontwerpvarianten. Voor het toetsen van de vier varianten worden dezelfde toetsingsmethode, weegfactoren en toetsingscriteria gebruikt als in hoofdstuk 3.

4.3.1 Multicriteria analyse en toelichtingen

In onderstaand schema zijn de vier principe oplossingen voor een reguleerbaar inlaatwerk opgenomen. Per criterium is elke variant beoordeeld, waarbij een cijfer gegeven kan worden tussen 1 en 10. Per functie is een tussenscore gegeven, waarbij de bijbehorende weegfactor is meegerekend. Er is per variant één maal een '1' gegeven en één maal een '10' gegeven.

Multicriteria Analyse

Functie		Toetsingeisen	Weegfactor	Variant			
				Hefdeur	Poirée	Hor. deur	Verborgen
	Waterkeren	Keerfunctie (OKP)	30%	8	10	8	7
		Keerfunctie (storm)		8	7	8	7
		Keerfunctie (MHW)		8	7	8	7
			score	2,4	2,4	2,4	2,1
	LNC-waarden	Ruimtebeslag	10%	6	7	7	10
		Invloed achterland		8	8	8	8
		Natuurwaarden		6	7	7	8
			score	0,7	0,7	0,7	0,9
	Waterbeheer	Reguleerbaarheid	20%	10	8	10	1
		Flexibiliteit		8	6	8	6
		Betrouwbaarheid		7	6	7	7
			score	1,7	1,3	1,7	0,9
	Infrastructuur	Inpassing infra	10%	8	1	8	9
			score	0,8	0,1	0,8	0,9
	Kosten	Beheer & Onderhoud	30%	6	5	6	7
		Duurzaamheid		6	5	6	7
		Realisatie / stichting		1	7	1	8
			score	1,3	1,7	1,3	2,2
Totaal			100%	6,83	6,27	6,90	7,00

Een toelichting op de gegeven beoordelingen is opgenomen in bijlage 10. In deze bijlage wordt per functie een toelichting gegeven op de beoordeling van de varianten.

4.3.2 Gevoeligheidsanalyse weegfactoren

De beoordelingen per criterium zijn met weegfactoren op prioriteit gerangschikt. De invloed van deze weegfactoren op de uitkomsten is met onderstaande analyse beoordeeld.

Variant 1: 'Groenlinks'	Waterkeren 10% LNC waarden 40% Waterbeheer 10% Infra 10% Kosten 30%				
	Totaal	6,40	6,20	6,67	7,73
Variant 2: 'VVD'	Waterkeren 30% LNC waarden 10% Waterbeheer 20% Infra 30% Kosten 10%				
	Totaal	7,57	5,33	7,63	7,33
Variant 3: 'CDA'	Waterkeren 20% LNC waarden 20% Waterbeheer 20% Infra 20% Kosten 20%				
	Totaal	7,07	5,73	7,20	7,33

De uitkomsten per variant geven een beeld van het effect van andere weegfactoren op de uitkomsten. Variant 2 geeft een afwijkende uitkomst t.o.v. de andere varianten. Oorzaak is het kostenaspect dat

voor 'de VVD' minder zwaar is meegerekend. Ook hier liggen uitkomsten dicht bij elkaar, waardoor het resultaat sterk beïnvloedbaar is. Ter indicatie zijn hieronder enkele vragen opgenomen die op kunnen komen bij analyse van de uitkomsten:

- Is de verborgen inlaat kostentechnisch werkelijk veel voordeliger dan andere varianten?
- Is de onzekerheid over het beheersen van open- en sluitprocedures van de verborgen inlaat te verkopen aan 'de klant', ook als de totale score hoog uitvalt?

4.3.3 Conclusie

Als we de beoordeling van de vier ontwerpvarianten kernachtig moeten samenvatten, mede in het licht van het opgestelde functioneel programma van eisen, zijn de volgende conclusies te trekken:

Hefdeur

- + Robuust, veel controle over werking
- Dure constructie, relatief veel onderhoud benodigd; moeilijk inpasbaar in landschap
- PvE** Voldoet aan hoofdeisen, mindere prestaties op gebied van nevenfuncties

Poirée

- + Relatief lichte constructie met goede prestaties, relatief lage kosten voor realisatie
- Relatief faalgevoelige constructie, duurzaamheid is te betwijfelen, weinig mogelijkheden tot inpassing verkeersfunctie
- PvE** Aan de eisen voor waterkeren wordt voldaan. Het vervullen van nevenfuncties lijkt in eerste instantie minder goed mogelijk, met name op gebied van infrastructuur.

Horizontale deur

- + Robuust, veel controle over werking
- Dure constructie, relatief veel onderhoud benodigd
- PvE** Aan de eisen voor waterkeren wordt voldaan. Ook nevenfuncties kunnen worden vervuld.

Verborgene inlaat

- + Zeer goed in te passen in landschap, goede mogelijkheden infrastructuur, relatief lage realisatiekosten
- In theorie een reguleerbare constructie, maar open- en sluitingsprocedure lijkt relatief lastig. Onzekerheid over openen en sluiten (ook bij stromend water).
- PvE** Aan de eisen voor waterkeren wordt voldaan. Ook nevenfuncties (m.n. verkeer en LNC waarden) kunnen worden vervuld.

De variant met horizontale (segment)deuren en de verborgen inlaat scoren het hoogst in de multicriteria analyse. Beoordelingen liggen dicht bij elkaar. Enige subjectiviteit is niet te vermijden. Uit de beoordeling blijkt dat geen van de beschouwde principes absoluut uit te sluiten is. Met de gemaakte overwegingen krijgt het verborgen inlaatwerk uiteindelijk wel de hoogste score, waarmee een keuze is gemaakt voor het vervolg van het ontwerpproces:

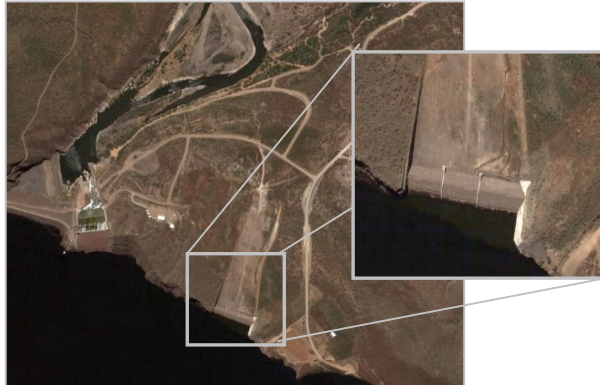
De verborgen inlaat is de gekozen ontwerpvariant

In de volgende paragraaf wordt nader ingegaan op de keuze om deze ontwerpvariant verder uit te werken. Ook wordt ingegaan op bestaande situaties waarin de verborgen inlaat is toegepast.

4.3.4 Verantwoording keuze

De verborgen inlaat is relatief weinig toegepast. Zowel in binnen- als buitenland is er nog weinig ervaring met de toepassing ervan in de praktijk. Voorbeelden zijn wel te vinden in Amerika, waar erodeerbare keringen worden toegepast om extra spuicapaciteit te creëren bij grote waterreservoirs. Een voorbeeld is de Horseshoe dam in Arizona (US). Een uitgebreide studie⁵ naar deze erodeerbare kering ging aan de realisatie vooraf. Een schaalmodel werd gemaakt en getest, waarbij het optredende debiet en erosieverschijnselen werden geanalyseerd.

Opgemerkt moet worden is dat de optredende debieten grofweg een factor 10 groter zijn dan in de situatie van de IJsseldelta. Dat zal van invloed zijn op het verloop van het erosieproces. Uiteindelijk is de Horseshoe dam, bestaande uit twee verticale wanden met tussenliggende grondsecties ook gerealiseerd (zie afbeelding Google Earth).



Bovenaanzicht Horseshoe dam (bron: Google Earth)

Werking Horseshoe dam

De drie grondsecties zijn aangelegd met verschillende hoogtes. De laagste grondmoot gaat het eerst overlopen bij stijgende waterstanden. Erosie treedt op, geïnitieerd door een plaatselijke verlaging in de grondmoot, waardoor de sectie schoonspoelt. Als waterstanden verder stijgen volgen de andere twee grondmooten.

In Nederland is de verborgen inlaat actueel als mogelijke oplossing voor noodoverloopgebieden (NOG's). Onderstaande citaten, die betrekking hebben op de toepassing van het verborgen inlaatwerk in noodoverloopgebieden, komen uit een rapport van het ministerie van Verkeer & Waterstaat.

'Een verborgen overlaat heeft als voordeel dat bij gelijkblijvend maximaal debiet deze compact kan worden gedimensioneerd (afhankelijk van de hoogte van de drempel; uiterste geval zelfs gelijk aan de breedte van een inlaatwerk met schuiven). Door een indeling in secties ontstaat er een zekere flexibiliteit bij inzet van de inlaat door de 'actieve' breedte af te stemmen op de geschatte benodigde inlaatcapaciteit. De constructie is ook relatief goedkoop, in ieder geval goedkoper dan een schuivenconstructie.'

'Een gecontroleerde inundatie kan het best worden gerealiseerd door middel van de zogenaamde verborgen inlaat. Deze is goedkoop, biedt de meeste flexibiliteit, is onzichtbaar en afsluiten van de inlaat lijkt op eenvoudige wijze en in korte tijd realiseerbaar.'

Bron: dossier: Toelichting aanvullend deskundigenoordeel noodoverloopgebieden (VenW)

Op basis bovenstaande informatie is te concluderen dat er nog wel onzekerheden zijn wat betreft de haalbaarheid van de gekozen ontwerpvariant. Het gebrek aan ervaring is daarbij misschien wel de grootste 'drempel' die genomen moet worden. Voor dit afstudeerproject betekent die situatie dat er nog diverse vrijheden in het ontwerp en uitvoering zijn. Daarom is het ook interessant om die optie nader te beschouwen, ondanks de vele vraagtekens.

Vanwege de ontwerprijheid die er nog bestaat binnen de gekozen ontwerpvariant is in deze paragraaf nog niet inhoudelijk ingegaan op de haalbaarheid van de werking van de inlaatconstructie. Later in het rapport wordt daarop teruggekomen.

⁵ Hydraulic model study of Horseshoe dam fuse plug auxiliary spillway - U.S. department of the interior - Denver

H5

Ontwerpeisen Hydraulica



Nu een definitieve ontwerpvariant is gekozen kan een volgende stap in het ontwerpproces worden gemaakt. In hoofdstuk 2 van dit rapport zijn de hydraulische randvoorwaarden en functionele eisen bepaald en opgesteld. Dit pakket biedt een scala aan punten waar de constructie op getoetst moet worden. Om deze toetsing te kunnen uitvoeren zal voor het waterkerend vermogen de vertaalslag naar ontwerpeisen moeten worden gemaakt. Op hydraulisch gebied betekent dit het bepalen van de kerende hoogte van de constructie en het open keerpeil (OKP) in samenhang met de faalkans van het sluitwerk. Aansluitend op deze ontwerpeisen kunnen indicaties worden gegeven voor de benodigde afmetingen van de constructie en de daarbij te verwachten stromingsverschijnselen. Daaruit kunnen vervolgens weer voorwaarden voor de toe te passen bodembescherming worden bepaald.

5.1 Kerende hoogte

De fysieke bovengrens van een waterkerende constructie bepaalt de waarde van de *kerende hoogte* van het kunstwerk. In hoofdstuk 2 zijn functionele eisen geformuleerd, gerelateerd aan de functie 'waterkeren', die betrekking hebben op de kerende hoogte van de constructie:

Aanvulling eis 2:

De kans dat er een ontoelaatbaar groot instromend volume over de gesloten kering optreedt als gevolg van overlopen/overslag dient kleiner te zijn dan 1/2000 jaar (= normfrequentie voor de IJsseldelta).

Bron: hoofdstuk 2

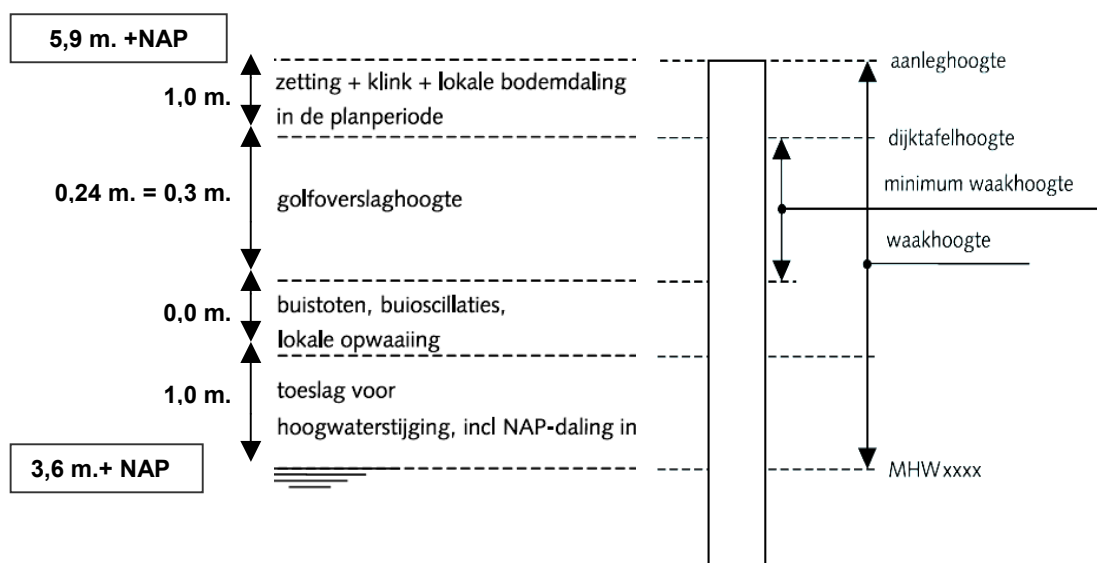
Met het bepalen van de kerende hoogte van de constructie wordt een vertaling gemaakt van bovenstaande randvoorwaarde naar een ontwerphoogte. De volgende randvoorwaarden zijn opgesteld:

- De kerende hoogte van de constructie moet bepaald worden bij waterstanden die onder maatgevende afvoercondities kunnen optreden. Voor de bypass geldt het toetspeil (MHW) op kmr 991: **3,6 m +NAP**.
- Alleen golfoverslag is toegestaan (golfoverloop niet). Aangenomen is een maximaal toelaatbaar optredend debiet over de kering (als gevolg van overslag) van **1 l/s/m¹**. Met deze eis kan de golfoverslaghoogte worden bepaald.

Naast het ontwerppeil (MHW) en de toeslag voor golfoverslag zijn nog andere factoren van toepassing die bijdragen aan de benodigde kerende hoogte van de constructie:

- hoogwaterstijging over de planperiode (100 jaar)
- bui-oscillaties, buistoten en seiches
- lokaal verwachte bodemdaling over de planperiode
- verwachte kruindaling door zetting van de ondergrond over de planperiode, na oplevering

De invloed van alle factoren en de vertaling ervan naar de situatie in de IJsseldelta is opgenomen in [bijlage 11](#). Uiteindelijk zijn alle bijdragen aan de kerende hoogte in een figuur weer te geven, zodat een beeld ontstaat van de benodigde kerende hoogte van de constructie:



Volgens bovenstaande figuur blijkt dus een kerende hoogte van **5,9 meter +NAP** benodigd, een toeslag van 2,3 meter bovenop het toetspeil. Daarbij is uitgegaan van aannames over de verlangde levensduur en de daarmee samenhangende bodemdaling en MHW stijging.

Een omgevingsaspect is de kerende hoogte van de dijken rond de inlaatconstructie. Uit beschikbare gegevens⁶ blijkt dat de kruinhoogte van de dijken rond de toekomstige inlaatconstructie ongeveer **4,6 m. +NAP** bedraagt.

Het is de vraag of het te ontwerpen kunstwerk een kerende hoogte moet krijgen die groter is dan de omliggende waterkeringen. Praktisch gezien kan dit problemen geven met infrastructuur en de aansluiting van de constructie en grondlichaam op de naastgelegen dijken. Wat de veiligheid betreft biedt de extra kerende hoogte geen meerwaarde, aangezien de omliggende dijken een lagere kruinhoogte hebben. Een derde punt is dat het verhogen van de kerende hoogte in de toekomst bij het verborgen inlaatwerk naar verwachting goed mogelijk is, aangezien de constructie in een (ophoogbare) grondrijk is opgenomen. Wel dient zetting te worden beschouwd in de bouwfase. Conclusie:

De vereiste kerende hoogte van de waterkering, waarin de inlaatconstructie is geïntegreerd bedraagt 4,6 meter + NAP.

Opmerking 1: (primaire) zetting is in deze hoogte niet opgenomen. Met behulp van specifieke bodem- en grondgegevens kan de verwachte zetting worden berekend. Dit kan invloed hebben op de vereiste aanleghoogte.

Opmerking 2: in bijlage 5 wordt ingegaan op effecten van toenemende rivierafvoer en meerpeilen als gevolg van klimaatverandering. In de vereiste kerende hoogte is een factor voor hoogwaterstijging opgenomen. Daarmee wordt tevens voldoende hoogte gecreëerd om onder stormcondities water te kunnen blijven keren.

5.2 Betrouwbaarheid opening

Bij hoge rivierafvoeren moet het inlaatwerk geopend worden zodat de waterstanden in de IJssel voldoende laag blijven waardoor er wordt voldaan aan de taakstelling. Het faalmechanisme wat bij deze situatie kan optreden is dat de openingsprocedure faalt, om wat voor reden ook.

In hoofdstuk 2 is dit faalmechanisme reeds beschouwd, waarbij de vertaalslag is gemaakt naar de situatie in de IJsseldelta. De volgende eis m.b.t. de betrouwbaarheid van sluiting is geformuleerd:

Aanvulling eis 1

De kans dat er ontoelaatbaar hoge waterstanden in de IJssel optreden ten gevolge van falen van het afsluitmiddel van de waterkering dient kleiner te zijn dan 1/20.000 jaar.

Bron: hoofdstuk 2

Voor het toetsen van de inlaatconstructie op deze eis zijn twee aspecten van belang, die in relatie tot elkaar staan bij het bepalen van de faalkanseis:

1. *De dimensies van het kunstwerk, waardoor een bepaald debiet over de kering kan optreden.*
2. *De verwachte openingsfrequentie van het kunstwerk*

Deze twee aspecten komen samen in de volgende formule, waarin de 'faalkanseis' wordt bepaald:

$P_{fa} = P_{ns} \cdot n_j < 0,1 \times \text{norm}$	met:	P_{fa} = kans op falen van het kunstwerk ten gevolge van falend afsluitmiddel [1/jaar] P_{ns} = kans op falen van het openingsproces [1/vraag] n_j = $N\{V_{open} > V_{toel ns}\}$ = frequentie van overschrijding van het toelaatbaar instroomvolume bij een geopend kunstwerk [vragen/jaar] norm = de ontwerp- of normfrequentie zoals vastgelegd in de Wet op de waterkering: 1/2000 voor de IJsseldelta [1/jaar]
--	------	--

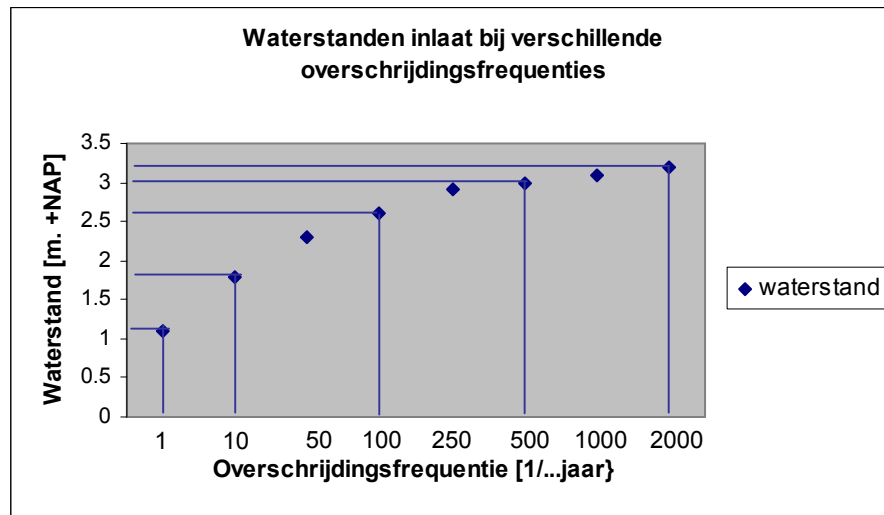
Een belangrijke term die bepalend is voor het vereiste debiet in de bypass is het *open keerpeil* (OKP). Voor de IJsseldelta heeft het open keerpeil de volgende betekenis: 'Het open keerpeil (OKP) is de kritieke waterstand voor het geopende kunstwerk waarbij nog wordt voldaan aan de taakstelling.' In de volgende subparagrafen wordt het open keerpeil en de openingsfrequentie bepaald, om daarmee de formule te kunnen toepassen.

⁶ Rapport: 'Waterbouwkundige Kunstwerken Bypass - Technische scope, een inventarisatie' (DHV)

5.2.1 Bepaling OKP - overschrijdingsfrequentie

Voor het bepalen van het open keerpeil is één situatie maatgevend, namelijk de situatie met maatgevende afvoercondities in de IJssel. De bestaande configuratie van de bypass is doorgerekend⁷, waarbij een debiet van 500-750 m³/s bleek nodig te zijn om te voldoen aan de taakstelling. De bijbehorende waterstandsverlaging bij de inlaat is bepaald op 0,6 meter t.o.v. het geldende toetspeil (3,6 m +NAP). Daarmee komt het open keerpeil op **3,0 m. +NAP**. De overschrijdingsfrequentie van deze waterstand is bepaald op 1/500 jaar (zie ook bijlage 8 voor toelichting en relativering).

In onderstaande grafiek zijn maatgevende waterstanden per frequentie weergegeven. Gegevens zijn afgeleid van bijlage 8 en geven een indicatie van de waterstanden die bij de inlaat optreden:



Het OKP bij maatgevende afvoercondities bedraagt 3,0 m. +NAP. De Overschrijdingsfrequentie van het OKP is naar verwachting 1/500 jaar

Opmerking: in de Leidraad kunstwerken wordt het te bepalen open keerpeil gereduceerd met factoren voor bodemdaling, MHW stijging, zetting etc., zoals ook is meegenomen bij het bepalen van de kerende hoogte van het kunstwerk. Aangezien het open keerpeil in de situatie voor de IJsseldelta samenhangt met het optredende debiet (indirecte hoofdeis!) in de bypass, worden de genoemde factoren niet meegenomen voor het bepalen van het open keerpeil. In de toekomst, als MHW condities wellicht veranderen, kunnen andere maatregelen worden genomen om daarmee het gewenste debiet te kunnen krijgen. Te denken is aan het overdimensioneren van het inlaatwerk, zodat in de toekomst meer spuicapaciteit beschikbaar is.

Met bovenstaande gegevens m.b.t. de overschrijdingsfrequentie kan de *openingsfrequentie* n_j worden bepaald:

$$n_j = 1/500 \text{ jaar} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ vragen per jaar}$$

5.2.2 Toepassing formule faalkanseis

Het waterkerende kunstwerk faalt als de buitenwaterstand hoger is dan het OKP en het afsluitmiddel niet werkt. De kans dat deze situatie optreedt is geformuleerd als P_{ns} (= kans op falen van het sluitproces [1/vraag]).

Formule: $P_{fa} = P_{ns} \cdot n_j < 0,1 \times \text{norm}$

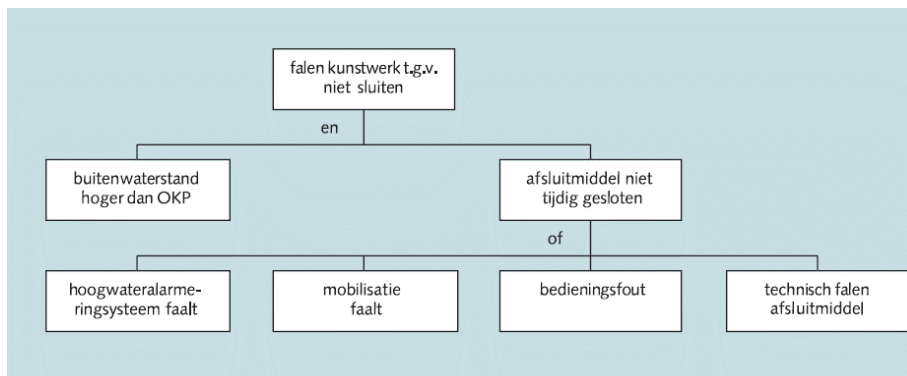
Met de bepaalde waarden voor de openingsfrequentie en de minimale veiligheidseis, kan de toegestane kans op niet openen worden bepaald:

$$P_{ns} \cdot 2 \cdot 10^{-3} < 1/20.000 (= 5 \cdot 10^{-5}) \rightarrow P_{ns} = 0,025 = 1/40 \text{ vragen}$$

Bovenstaande eis betekent dat tenminste 39 van de 40 keer het kunstwerk moet openen, waarmee dus een kans op falen van eens in de 40 keer wordt geaccepteerd. Het is dus van belang een zodanige betrouwbaarheid 'in te bouwen' in het ontwerp dat aan de faalkanseis wordt voldaan.

⁷ Modelberekeningen DHV, resultaten opgenomen in rapport 'Technische scope bypass IJsseldelta'

De betrouwbaarheid van een kunstwerk (wat betreft de openingsprocedure) wordt getoetst door het analyseren van subsystemen. De factoren zijn in onderstaande foutenboom weergegeven:



Foutenboom voor niet sluiten (bron: Leidraad Kunstwerken)

Opmerking: deze foutenboom heeft als uitgangspunt dat het kunstwerk niet sluit. Voor de IJsseldelta geldt het uitgangspunt dat het kunstwerk niet opent.

In de Leidraad kunstwerken is per subsysteem een standaardfoutenboom opgesteld. Aan elk van de vier subsystemen is een vragenlijst gekoppeld, die ingaan op praktische zaken m.b.t. automatisering, beheer, procedures, de invloed van menselijk handelen, etc. Daarmee worden indicatief kansen bepaald op het ontstaan van bijvoorbeeld communicatieproblemen, onduidelijkheden over taakopvatting, verantwoordelijkheidsproblemen, etc.

Via beantwoording van de vragen uit de Leidraad Kunstwerken en het bijhouden van de daarmee samenhangende score, wordt een maat voor betrouwbaarheid per onderdeel van de sluitprocedure verkregen. Uiteindelijk resulteert dat in een kansschatting: P_{ns} . In dit afstudeerrapport is ervoor gekozen om geen uitgebreide aandacht te geven aan deze materie. In het ontwerp van de inlaatconstructie wordt de betrouwbaarheid uiteraard wel meegenomen, maar de toetsing erop aan de hand van de beschreven procedure zal niet worden uitgevoerd.

5.2.3 Conclusie

Het open keerpeil is afgeleid van de taakstellende eis voor de IJsseldelta. De bijbehorende normfrequentie is daarbij tevens de (maatgevende) openingsfrequentie voor de openingsprocedure. Daaruit volgt dat het sluitwerk aan een betrouwbaarheidseis van eens per 40 vragen moet voldoen. Toetsing van het ontwerp op deze eis zal niet worden gedaan in dit afstudeerrapport.

5.3 Dimensies inlaatwerk

In vorige paragrafen zijn enkele hydraulische ontwerpparameters bepaald. Deze zijn van belang bij het dimensioneren van het inlaatwerk. De functie van het inlaatwerk is zowel waterkerend als watervoerend. In geopende toestand dient het inlaatwerk een debiet in de bypass te genereren. Voor het benodigd debiet wordt uitgegaan van de bestaande berekeningen die zijn gemaakt aan de hand van de taakstelling. In bijlage 1 is hier al naar verwezen:

Afhankelijk van het ontwerp van de bypass is een afvoer door de bypass van 500 tot 750 m³/s noodzakelijk om aan de taakstelling te voldoen.

Dit benodigde debiet stelt eisen aan de dimensies van het inlaatwerk. Belangrijk daarbij is dat er meerdere factoren van invloed zijn op het benodigde debiet. De waterstandsverlaging in de IJssel vormt immers de hoofdeis (taakstelling), waarvan het in te laten debiet kan worden afgeleid! In paragraaf 5.5 wordt nader ingegaan op de invloed van de omgevingsfactoren op het benodigde debiet.

In het rapport 'Scope waterbouwkundige kunstwerken' van DHV komen de dimensies van het inlaatwerk voor de bypass aan bod. Het volgende wordt daarover gezegd:

(...) Uit eerdere berekeningen is gebleken dat de benodigde dimensies van de inlaat sterk samenhangen met de vormgeving van de totale bypass. In algemeen geldt dat de bypass een breedte dient te krijgen van 300 tot 500 meter (afhankelijk van beheer/vegetatie). Het is echter zeer wel mogelijk om lokaal vernauwingen aan te brengen zolang er ook maar ruimere gebieden in de bypass opgenomen zijn. In zekere mate geldt een zelfde redenering voor het inlaatwerk.

(De volgende opties zijn beschouwd)

- Optie a: een zeer smalle inlaat kan gekozen worden indien de uiterwaard en de inlaat voldoende diep afgegraven worden. Deze optie is alleen mogelijk bij een systeem dat onder normale condities gesloten is (een dergelijke lage drempel i.c.m. een gedeeltelijk open systeem is niet toegestaan als gevolg van de beperkte onttrekkingsmogelijkheden van IJsselwater). Uit eerdere analyse bleek overigens dat een smalle inlaat financieel niet altijd aantrekkelijker hoeft te zijn doordat de kerende hoogte en dus de diktes van het keermiddel groter zullen worden.
- Optie b: als er gekozen wordt voor beperkte afgravingen in de bypass (beperkte geul en afgraven hogere delen) en een uitgekiend natuurbeheersplan (vegetatie toelaten in stromingsluwe gebieden) dan kan volstaan worden met een breedte van ca 200 m.
- Optie c: in het geval gekozen wordt om geen vergravingen uit te voeren in het gebied van de bypass en er ook relatief veel vegetatie wordt toegestaan dan lijkt een breedte van 400 m noodzakelijk.

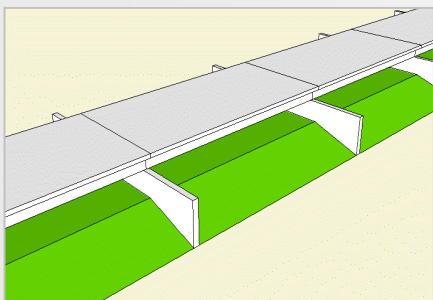
In het rapport van DHV is verder uitgegaan van optie b, de variant met een breedte van 200 meter en een drempelhoogte van 1 m +NAP. In dit afstudeerrapport, waarin reeds de keuze is gemaakt voor het type inlaatwerk wordt als (voorlopige) ontwerpeis tevens uitgegaan van een benodigde breedte van 200 meter. Als onderbouwing van die keuze zijn de volgende argumenten geformuleerd:

- De kosten van een verborgen inlaatwerk zijn relatief laag vanwege de eenvoudige constructie. Dit voordeel zal minder worden indien de constructie compacter en dus veel zwaarder moet worden geconstrueerd. Het is ook de vraag of het principe van erodeerbare grond nog (veilig) toepasbaar is.
- Met het creëren van een stroomoppervlak in de orde grootte van een paar honderd vierkante meter zullen stroomsnelheden niet te groot worden, wat gunstig is voor benodigde bodembescherming.
- De verwachting is dat de effecten van beperkte afgravingen in het gebied opweegt tegen de keuze om het inlaatwerk een breedte van 400 meter te geven. Kostentechnisch lijkt dit een goede keuze. Daarnaast zal het beheer van het kunstwerk (onderhoud, procedure openen/sluiten) beter te handhaven zijn indien de constructie een relatief beperkte lengte heeft. Een derde punt van aandacht is de mogelijkheid tot (landschappelijke) inpassing van een lijnvormige constructie. Bij een relatief kortere constructie zal dat naar verwachting eenvoudiger zijn.

De breedte van het inlaatwerk dient +/- 200 meter te zijn.

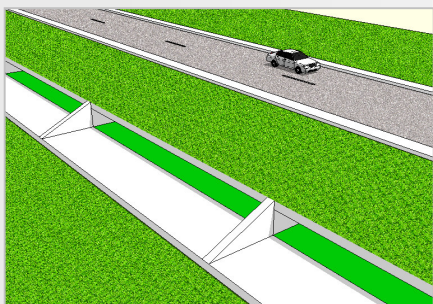
Naast de breedte is ook de aanleghoogte en het doorstroomoppervlak van belang. Deze zijn weliswaar afhankelijk van diverse omgevingsfactoren, maar ook de constructieve uitvoering hangt er mee samen. Binnen het verborgen inlaatwerk zijn er namelijk nog variaties denkbaar. In dit afstudeerrapport zijn twee opties nader beschouwd: een verborgen inlaat die via een overlaatprincipe functioneert en een verborgen inlaat die als koker/duiker ingepast is in de dijk. Impressies van beide constructies zijn hieronder weergegeven:

Overlaatprincipe inlaatconstructie



Een drempel in het landschap, verdeeld in secties door betonwanden. De weg is als brugdek opgelegd op de wanden. Tussen de drempel en de weg wordt grond aangebracht, zodat een dijklichaam ontstaat die water kan keren. Indien nodig kan de grond (deels) weggegraven worden, om zo instroom tot stand te brengen.

Kokerprincipe inlaatconstructie



Een duikerconstructie, ingepast in de dijk, gevuld met erodeerbaar materiaal. Onder normale condities gesloten. Bij hoogwater kan het erosieproces op gang worden geholpen, waarna instroom door de duiker gaat plaatsvinden.

Indien het water via het overlaatprincipe stroomt stelt dit naar verwachting ander eisen aan dimensies etc. dan wanneer er via een kokerconstructie hydraulisch transport plaatsvindt. Daarom zullen beide principes op hydraulisch vlak worden beschouwd.

5.3.1 Berekening dimensies inlaatwerk - kokerprincipe

Aan de hand van enkele aannames is via hydraulische berekeningen een indicatie gegeven van de te verwachten dimensies van de constructie, volgens de uitvoering als een duiker/koker. De volledige berekening is, inclusief toelichting, opgenomen in [bijlage 12](#).

Berekening dimensies kunstwerk - kokerprincipe

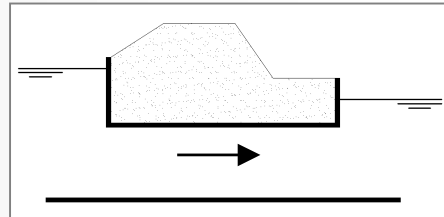
Uitgangspunten:

- Optredend debiet onder MHW condities: 700 m³/s
- Benedenstroomse waterstand: 2,7 m. +NAP
- Maximale waterstand buiten kunstwerk: 3,0 m. +NAP (Open Keerpeil)
- Bodem en o.k. kunstwerk: 0,0 m t.o.v. NAP
- Lengte kunstwerk: 20 m.
- ζ_{tot} = de som van verliescoëfficiënten = 1,19

Formule: $q_v = m \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H_{\text{tot}}}$

Resultaten:

- $A_{\text{benodigd}} = 310 \text{ m}^2$ *Dit is het benodigde doorstroomoppervlak*
- $\Delta H = 0,3 \text{ m}$. *Dit is het energieverlies, globaal overeenkomend met het verval over het kunstwerk.*
- $v = 2,3 \text{ m/s}$ *Deze stroomsnelheid treedt op in het kunstwerk bij een debiet van 700 m³/s.*
- $v_c = 3,27 \text{ m/s}$ *v_c = kritische snelheid. $v < v_c$, dus schietend water zal niet optreden*



5.3.2 berekening dimensies inlaatwerk – onvolkomen overlaatprincipe

Aan de hand van enkele aannames is via hydraulische berekeningen een indicatie gegeven van de te verwachten dimensies van de constructie, volgens de uitvoering als onvolkomen overlaat. De volledige berekening, inclusief toelichting, is opgenomen in [bijlage 12](#).

Berekening dimensies kunstwerk – onvolkomen overlaatprincipe

Uitgangspunten:

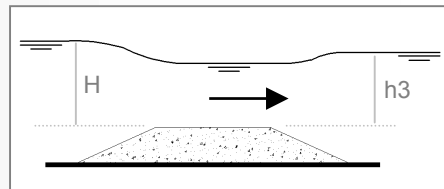
- Optredende stromingsverschijnselen volgens principe onvolkomen overlaat
- Breedte kunstwerk: 200 m.
- Debiet onder MHW condities: 700 m³/s
- Waterstand buiten kunstwerk: max. 3,0 m + NAP (OKP)
- Bodem en o.k. kunstwerk: 0,0 m t.o.v. NAP
- ζ_{tot} = de som van verliescoëfficiënten = 0,73
- benedenwaterstand $h_3 = 2,7 \text{ m}$.

Formule: $q_v = c_{ol} \times b \times h_3 \times \sqrt{2g \cdot (H - h_3)}$

Resultaten:

- $H = 1,5 - 2,8 \text{ m}$. *De buitenwaterstand, afhankelijk van keuze kruinhoogte*
- kruinhoogte = 0,0 - 1,5 m. +NAP *Peilmaat van de kruinhoogte (meerdere opties mogelijk volgens berekening)*
- $v = 1,4 - 2,4 \text{ m/s}$ *Optredende stroomsnelheid boven overlaat*

Opmerking: de ontwikkeling van de boven- en benedenstroomse waterstand is van meer variabelen afhankelijk dan in de berekening is opgenomen, maar tegelijkertijd bepalend voor het optredend debiet. De berekening geeft wel een goede indicatie van de benodigde dimensies.



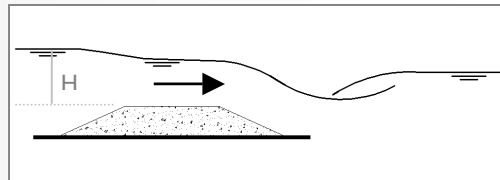
5.3.3 Berekening dimensies kunstwerk – volkomen overlaatprincipe

Aan de hand van enkele aannames is via hydraulische berekeningen een indicatie gegeven van de te verwachten debieten die op kunnen treden als het kunstwerk (tijdelijk) als volkomen overlaat gaat functioneren. Dit kan bij de beginfase van instroom optreden. De volledige berekening, inclusief toelichting, is opgenomen in [bijlage 12](#).

Berekening dimensies kunstwerk – volkomen overlaatprincipe

Uitgangspunten:

- Optredende stromingsverschijnselen volgens principe volkomen overlaat
- Breedte kunstwerk: 200 m.
- Optredend debiet onder MHW condities: ?
- Waterstand buiten kunstwerk: 3,0 m + NAP (OKP)
- Bodemhoogte: 0,0 m t.o.v. NAP
- ζ tot = de som van verliescoëfficiënten = 0,73



Formule: $Q = c_v \times b \times H^{3/2}$

Resultaten:

$$\rightarrow c_v = 1,72 \times 1,17 = 2,01$$

Dit betreft de afvoercoëfficiënt

$$\rightarrow q_v = 596-2089 \text{ m}^3/\text{s}$$

Het optredend debiet, afhankelijk van de kruinhoogte (0,0 – 1,7 m. +NAP)

Opmerking: het debiet wordt bij een volkomen overlaat niet geremd door de benedenstroomse waterstand. Uitgaande van een bovenstroomse waterstand van 3,0 m. +NAP (OKP) treden dan debieten op, afhankelijk van de kruinhoogte. De resultaten geven een indicatie van het stroombeeld dat over een bepaalde instroomperiode kan optreden, als de bypass nog niet gevuld is en zich dus geen benedenwaterstand heeft ingesteld. Dit kan bepalend zijn voor het ontwerp van bodembescherming.

5.3.4 Conclusies

Indicatief zijn benodigde dimensies voor het inlaatwerk bepaald. Als we de drie berekeningen vergelijken zijn de volgende opmerkingen van belang:

- De drie berekende stroombeelden kunnen theoretisch alledrie optreden, afhankelijk van de uitvoering van de constructie en de fase van instroom (beginfase tot evenwichtssituatie). Wellicht kunnen hydraulische modellen daar voorspellingen over doen.
- De stromingsweerstand per constructie is af te leiden van de afvoercoëfficiënt. Deze is het laagst bij het kokerprincipe, hoger bij de onvolkomen overlaat en nog groter voor de volkomen overlaat.
- Bij de berekening van de volkomen en onvolkomen overlaat lijkt de invloed van de drempelhoogte over een range van 0,0 tot 1,5 m. +NAP klein, aangezien extra opstuwing bovenstrooms het benodigde verval geeft. Hieruit kan men concluderen om dan maar voor een drempel te kiezen van 1,5 m. + NAP, zodat de hoeveelheid weg te graven grond van de verborgen inlaat zo klein mogelijk blijft. In werkelijkheid is de bypass slechts een onderdeel van het watersysteem, en zal het water de weg van de minste weerstand kiezen. In dat geval zal een verhoging van de kruin dus wel een negatief effect hebben op de afvoer. Wellicht kan uit hydraulische modelberekeningen blijken welke stroomsnelheden (en daarmee het stroombeeld) zal optreden.

5.4 Ontwerpeisen bodembescherming

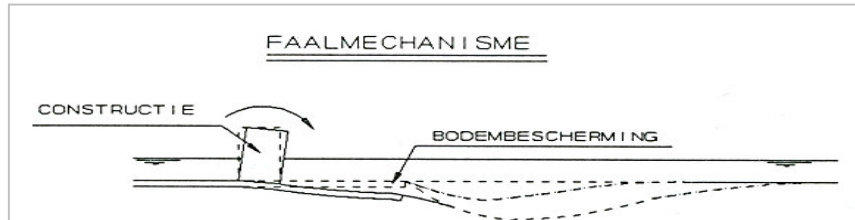
Bodemverdediging is een essentieel onderdeel bij het ontwerp van waterbouwkundige kunstwerken. De functie van bodemverdediging is daarbij het zodanig vastleggen van de bodem rond het kunstwerk dat eventuele ontgrondingen het kunstwerk zelf niet bedreigen. Voor bodembescherming zijn diverse constructietypen beschikbaar, maar bodemverdedigingen die zijn opgebouwd uit losgestorte lagen granulaire materiaal worden het meest toegepast. Dit type zal ook in dit rapport als basis dienen. Als leidraad bij het ontwerp is een handleiding voor het ontwerp van bodemverdedigingen gebruikt⁸.

Om gedurende de planperiode aan de primaire functies te kunnen voldoen worden aan de bodemverdediging algemene eisen van functionele en technische aard gesteld. Deze eisen hebben betrekking op afmetingen, stabiliteit, verticale opbouw, flexibiliteit, faalkans en levensduur. Daarnaast kunnen omgevingseisen (scheepvaart, milieu, uitvoering, onderhoud) van toepassing zijn.

⁸ Handleiding voor het ontwerpen van granulaire bodemverdedigingen achter tweedimensionale uitstromingsconstructies, Bouwdienst Rijkswaterstaat / DWW (febr. 1995)

5.4.1 Horizontale afmetingen

De bodemverdediging moet zodanige afmetingen krijgen dat als gevolg van optredende ontgrondingen aan de rand van die bodemverdediging, geen bedreiging ontstaat voor de constructie zelf (m.b.t. de grondmechanische instabiliteit). De lengtebepaling van de bodemverdediging is dan ook sterk gerelateerd aan instabiliteit van de 'ontgrondingskuil' die optreedt achter de bodemverdediging. De stabiliteit van de waterbouwkundige constructie mag niet bedreigd worden.



Faalmechanisme voor bodembescherming

Bij het ontwerp van dimensies (lengte, breedte) van de bodemverdediging dienen de volgende aspecten (in de aangegeven volgorde) te worden beschouwd:

1. Bepalen van bezwijkmechanisme dat op kan treden
2. Ontgrondingsproces bekijken ter bepaling diepte ontgrondingskuil die kan ontstaan
3. Berekenen inscharingslengte (parameters: diepte ontgrondingskuil en steilheid aanzethelling)
4. Bepalen minimaal benodigde lengte bodembescherming

5.4.2 Dimensies top laag

De stabiliteit van de top laag van de bodemverdediging moet gewaarborgd zijn. Belangrijk is dat de optredende hydraulische belastingen, waaronder overtrekkende stroming en golfbelasting, kunnen worden opgenomen.

Het dimensioneren van de (granulaire) top laag bestaat met name uit het bepalen van de benodigde steengrootte. Daarbij kan het verloop van de benodigde steengrootte variëren t.o.v. de afstand tot de constructie.

Bij het dimensioneren van de top laag dienen de volgende aspecten aan bod te komen, in de weergegeven volgorde:

1. Bepalen van de dichtheid en steendiameter aan de hand van stabiliteitsrelaties
2. Analyseer optredende stromingsverschijnselen
3. Bepaal het theoretisch verloop van de benodigde steenbestorting over de afstand x tot de constructie.
4. Vertaling theoretisch verloop naar praktisch ontwerp

5.4.3 Verticale opbouw

De verticale opbouw van bodemverdediging dient zodanig te zijn dat onder de optredende belastingen geen of nauwelijks transport van bodemmateriaal optreedt. Voor een uit meerdere lagen opgebouwde bodembescherming betekent dit dat er eisen worden gesteld aan de korrelverdeling per filterlaag en de verhouding van korreldiameters van de lagen onderling. De functie van het filter is primair het voorkomen van erosie van basismateriaal door de top laag van de bodemverdediging. Secundair heeft het filter de functie van waterafvoer, om daarmee drukopbouw in het filter te voorkomen.

De volgende aspecten dienen te worden beschouwd bij het ontwerp van de verticale opbouw van de bodemverdediging:

1. Grensvlakstabiliteit. Bepalen van een juiste verhouding van korrelgroottes voor de verschillende filterlagen, met als doel dat er geen/weinig basismateriaal wordt uitgespoeld.
2. Interne stabiliteit. Per filterlaag moet de interne stabiliteit gewaarborgd zijn. Een bredere korrelverdeling geeft daarbij een grotere kans op stabiliteit.
3. Waterdoorlatendheid. De verhouding van korrelgroottes van het filtermateriaal moet zodanig zijn dat waterafvoer mogelijk is.

5.4.4 Overige eisen

Naast de hierboven uitgewerkte eisen zijn er nog eisen te formuleren met betrekking tot faalkans, levensduur, scheepvaart (eventueel), milieu, uitvoering, onderhoud, etc. Deze eisen worden in dit afstudeerrapport niet beschouwd.

5.5 Invloedsfactoren

Voor verschillende aspecten van het ontwerp zijn ontwerpeisen te formuleren. In dit hoofdstuk zijn belangrijke onderdelen behandeld, betrekking hebbend op de hydraulische aspecten. Een essentieel onderdeel is het bepalen van de dimensies van het kunstwerk. De invloedsfactoren van de omgeving van het kunstwerk zijn daarbij beperkt opgenomen. Het ontwerpen van de inlaat via hydraulische ontwerpformules is dan ook niet volledig. In deze paragraaf worden kort de belangrijkste factoren behandeld die van invloed kunnen zijn op het functioneren van de constructie. Deze invloeden kunnen worden meegenomen bij het modelleren van het watersysteem.

5.5.1 Hoek van inval – stroomrichting

Stroomlijnen in de rivier geven een beeld van de richting waarin de watermassa als geheel zich beweegt. Deze 'natuurlijke' route die het water aflegt heeft in deze omgeving de minste weerstand. Indien de inlaatconstructie toegevoegd wordt aan het watersysteem zullen stroomlijnen veranderen. Het is denkbaar dat de hoek waarin de inlaat is gelegen ten opzichte van de stromingsrichting invloed heeft op de weerstand die het water heeft bij het passeren van de constructie. Minder weerstand zou daarbij tot 'efficiënter gebruik' kunnen leiden.

5.5.2 Configuratie bypass/uiteerwaarden

Het bypassgebied achter de inlaat en de uiterwaarden van de IJssel aan de andere zijde kunnen op verschillende vlakken bepalend zijn voor de werking van de inlaat. Bij berekeningen van DHV zijn de volgende uitgangspunten gebruikt als configuratie van de bypass:

- Groene deel bypass is begroeid met 'droge ruigte' (met bijbehorende maat voor ruigheid)
- Doorstroomopening van knoop en brug van ca 135 - 150 meter. (kruising A50/Hanzelijn met bypass)
- Breedte van de watergeul (t.b.v. recreatievaart) ca. 50-60 meter, een diepte van -2 m NAP

Om aan de taakstelling te kunnen voldoen zijn de volgende aanpassingen gepleegd:

- Maaiveldverlaging tot NAP +1,0 m in de uiterwaard nabij de inlaat, verlaging tot NAP +0.5 m voor eerste stukje in de bypass.
- De inlaat heeft een breedte van 200 m.
- Langs de oostoever van het Drontermeer wordt een gedeelte van de bestaande dijk verlaagd naar 0,25m. +NAP (voor het creëren van natte gebieden)
- Ter plekke van de inlaat wordt de ruigheid verlaagd, er wordt uitgegaan van verruigd grasland in plaats van droge ruigte.

Bron: Hydraulische analyse en dijkontwerp (memo DHV)

Bij de aanpassingen die in bovenstaand tekstvak worden genoemd komen de volgende invloedsfactoren naar voren:

- Vegetatie; het type vegetatie heeft invloed op de 'ruigheid' van het landschap. Dit heeft weer gevolgen voor de stroming van het water door de bypass.
- Vergravingen; met het ontgraven van uiterwaarden kan eenvoudigweg meer ruimte voor de rivier worden gecreëerd, waardoor de inlaatconstructie beter zal functioneren.

5.5.3 Overige invloeden

De locatie van de constructie langs de rivier kan ook een belangrijke invloed hebben op de 'prestaties'. Zo zal de invloed van de inlaatconstructie op maatgevende waterstanden toenemen als de inlaat verder bovenstrooms wordt gesitueerd. Het verval is dan groter aangezien waterstanden oplopen in de bovenstroomse richting (verhanglijn). De invloed van het kunstwerk zal dan ook verder bovenstrooms te merken zijn.

De plaatselijke geometrie van het landschap kan ook invloed hebben op de effecten die optreden. Bij een vernauwing in de rivier zal het effect van de inlaat groter zijn dan ter plaatse van een verwijding in het stroomprofiel. Bij de locatiekeuze is dit een punt van aandacht. Ook bepaalde objecten in het landschap (kribben, 'drempels' in het landschap) kunnen invloed hebben op de waterstroming. Vaak kunnen deze invloed in hydraulische modellen worden geschematiseerd.

H6

Constructieve ontwerpeisen



Nu een definitieve ontwerpvariant is gekozen kan een volgende stap in het ontwerpproces worden gemaakt. Het concretiseren van de functionele eisen naar constructieve ontwerpeisen staat in dit hoofdstuk centraal. Zo worden de grootte van de belastingen bepaald, de belastingssituaties en de belastingcombinaties. Globaal zullen benodigde afmetingen worden bepaald, en de vertaling van de constructie naar een mechanisch model.

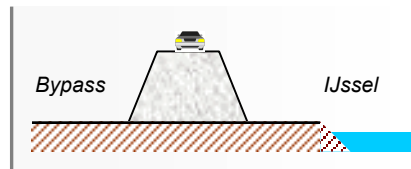
6.1 Inventarisatie belastingssituaties

Gedurende de levensduur van de constructie kunnen verschillende belastingssituaties optreden. Dit betreft bijvoorbeeld diverse waterstanden (maatgevend hoog- en laagwater), maar ook situaties van groot onderhoud en de bouwphase. De volgende belastingssituaties zijn van belang en van toepassing op de inlaatconstructie van de bypass in de IJsseldelta:

- a) De nulsituatie
- b) Maatgevende afvoercondities
- c) Maatgevende laagwaterstanden
- d) Maatgevende stormcondities
- e) Situatie niet openen

A) De nulsituatie – waterstand IJssel ~rond NAP

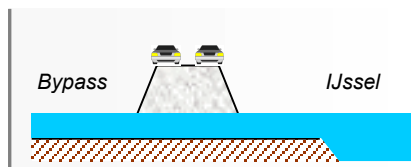
Dit is de situatie die de meeste dagen per jaar voorkomt. De waterstand schommelt rond 0,0 m. t.o.v. NAP. Dit zijn omstandigheden waarin het inlaatwerk evt. gebouwd zal worden. Ook groot onderhoud valt binnen deze situatie.



Nulsituatie

B) Maatgevende afvoercondities – bypass functioneert

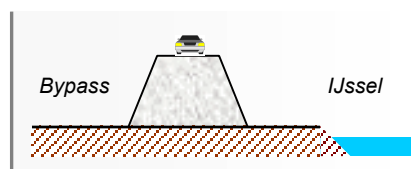
Bij (dreigend) maatgevende afvoercondities moet het inlaatwerk gaan functioneren. De duur van het functioneren is afhankelijk van de afvoer die uiteindelijk optreedt. De functionerende inlaat heeft de taak om de waterstanden die optreden in de IJssel binnen de grens van de taakstelling (3,0 m. + NAP bij de inlaat) te houden, zodat veiligheid gewaarborgd blijft. De verkeersfunctie moet blijven voldoen in verband met extreme situatie van de rivier. Aan de eis van evacuatie moet worden voldaan.



Maatgevende afvoercondities

C) Maatgevend laagwater

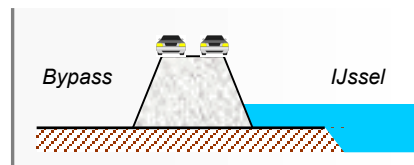
Uit bestaande afvoergegevens van de IJssel blijkt bij minimale afvoeren ($\pm 800 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith) de waterstand in de IJssel nabij de inlaat te kunnen dalen tot ongeveer 0,2 m. -/- NAP. In deze situatie kunnen zettingen juist optreden als gevolg van een laag grondwaterpeil. De situatie wordt daarom beschouwd.



Maatgevend laagwater

D) maatgevende stormcondities

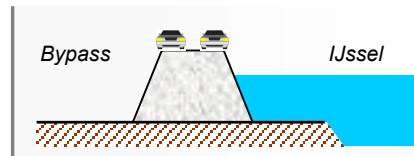
Het gesloten regime is in deze situatie van toepassing. Doordat de Roggebotsluis gesloten is, mag de bypass niet vollopen. Het waterpeil in de IJssel kan als gevolg van opstuwung een hoogte krijgen van 3,1 m. +NAP nabij de inlaat. De verkeersfunctie moet blijven voldoen in verband met extreme weersomstandigheden. Aan de eis van evacuatie moet voldaan worden.



Maatgevende stormcondities

E) Situatie niet openen – constructie blijft gesloten

Indien de constructie niet opent zal het water in theorie kunnen stijgen tot toetspeilhoogte, wat voor de inlaat een waterstand van +3,60 m NAP betekent. De verkeersfunctie moet ook dan blijven voldoen in verband met extreme weersomstandigheden. Aan de eis van evacuatie moet voldaan worden.



Falend afsluitmiddel

Deze situaties zijn van belang en kunnen maatgevend zijn voor bepaalde faalmechanismen die kunnen optreden. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de faalmechanismen die van toepassing zijn.

6.2 Inventarisatie faalmechanismen

Voor waterkerende kunstwerken zijn er drie hoofdoorzaken die tot een vorm van falen kunnen leiden, namelijk 'overlopen/overslag' waardoor de waterkerende functie faalt, een ongewenst debiet als gevolg van het falen van het sluitmiddel, of het bezwijken van (delen van) de constructie vanwege gebrek aan sterkte en/of stabiliteit.

- Onder falen wordt verstaan het niet meer kunnen vervullen van één of meer essentiële functies.
- Bezwijken vindt plaats als ten gevolge van evenwichtsverlies grote vervormingen ontstaan.

Bron: Dictaat HU - IGO/241 Waterkeringen

In hoofdstuk 5 zijn de ontwerpeisen bepaald die ten grondslag liggen van de eerste twee genoemde vormen van falen. In eerste instantie zullen wel alle faalmechanismen worden beschouwd. Aangezien de constructie ingepast zal worden in een (bestaand) grondlichaam, zullen faalmechanismen met betrekking tot dijklichamen ook worden beschouwd, naast de faalmechanismen die op het kunstwerk als object van toepassing zijn. Vervolgens wordt de toepassing gemaakt op de constructie zelf.

Een compleet overzicht van faalmechanismen is opgenomen in [bijlage 13](#).

Niet alle beschouwde faalmechanismen zijn van toepassing op de inlaatconstructie. In onderstaand overzicht is een selectie gemaakt.

Faalmechanismen inlaatconstructie			
Oorzaak falen	Faalmechanisme	Bijbehorende maatg. B.C.	Opmerkingen
Gebrek kerende hoogte	- Overlopen - Overslag	MHW condities + falend afsluitmiddel	Behandeld in H6 (bepalen vereiste kerende hoogte)
Falend afsluitmiddel	- Overlopen - Overslag	MHW condities	Behandeld in H6 (bepalen OKP + n_j)
Gebrek aan sterkte	- Constructief bezwijken door breuk - Constructief bezwijken door aanvaring	MHW condities (evt. i.c.m. falend afsluitmiddel)	Ook delen van de constructie toetsen op sterkte.
Gebrek aan stabiliteit	- Erosie - Zetting - Piping - Onder- en achterloopsheid	MHW + funct. Inlaat Maatg. Laagwater	Verschiedende verschijnselen te toetsen m.b.v. berekeningen.

6.3 Inventarisatie uitwendige belastingen

Voor elke situatie zal moeten worden bepaald welke belastingen er kunnen optreden. In hoofdstuk 2 van dit rapport zijn de hydraulische randvoorwaarden en functionele eisen bepaald en opgesteld. Dit pakket biedt een scala aan punten waar de constructie op getoetst moet worden. Om deze toetsing te kunnen uitvoeren zal voor het waterkerend vermogen de vertaalslag naar ontwerpeisen moeten worden gemaakt. Op constructief gebied staat daarbij de (top)eis centraal:

De inlaatconstructie valt onder type I, waarmee geldt: $P\{\text{bezwijken} \mid h \leq MHW\} < 0,01 \times \text{norm}$. In het functioneel programma van eisen is reeds bepaald dat de kans op bezwijken daarmee kleiner moet zijn dan 1/200.000.

In de volgende paragrafen worden de verschillende belastingsituaties beschouwd en gekoppeld aan bijbehorende faalmechanismen. Ontwerpeisen kunnen daaruit worden geformuleerd.

6.3.1 Permanente belastingen

Permanente belastingen zijn belastingen die gedurende de referentieperiode slechts beperkt in grootte variëren, of belastingen waarvan de grootte tot een limiet nadert.

Bron: Leidraad Kunstwerken

Belasting	Factor
Eigen gewicht	(1,35 of 1,2 of 1,0 of 0,9) F _{rep}
Gronddruk	(1,2 of 1,0 of 0,9) F _{rep}
Grondwaterdruk	(1,2 of 1,0 of 0,9) F _{rep}

Een permanente belasting ten gevolge van het eigen gewicht wordt in rekening gebracht met een belastingfactor $\gamma = 1,20$ (belastend) als het eigen gewicht de enige belastingbron is. Indien de permanente belasting in combinatie met andere belastingen wordt beschouwd, wordt een factor $\gamma = 1,2$ (belastend) in rekening te worden gebracht. Indien de belasting gunstig (ontlastend) werkt, dient in alle genoemde gevallen een factor $\gamma = 0,9$ te worden gehanteerd.

6.3.2 Veranderlijke belasting

Veranderlijke belastingen zijn belastingen die gedurende de gehele referentieperiode niet altijd aanwezig zijn, of belastingen waarvan de verandering als functie van de tijd niet meer verwaarloosbaar klein is in vergelijking tot het gemiddelde.

Bron: Leidraad Kunstwerken

Belasting	Factor
Waterstanden	1,25 F _{norm}
Windgolven	Niet van toepassing
Stroming	1,30 F ₅₀
Scheepsgolven	Niet van toepassing
Troskrachten	Niet van toepassing
Windbelasting	Niet van toepassing
Temperatuur	Niet van toepassing
Verkeersbelasting	1,50 F _{representatief}

Een toelichting op de invloed van veranderlijke belastingen is opgenomen in [bijlage 14](#).

6.3.3 Extreme belasting

Calamiteiten zijn gebeurtenissen die met een relatief kleine kans kunnen voorkomen en direct of indirect leiden tot het optreden van bijzondere belastingen.

Bron: Leidraad Kunstwerken

Indien de kans op een calamiteit voldoende klein is (kleiner dan de toelaatbare kans op constructief bezwijken van het kunstwerk van orde grootte 1/100 maal de normfrequentie) hoeft er met deze bijzondere belastingen niet expliciet rekening te worden gehouden.

Indien dit niet het geval is, dient hier bij de controle van de kans op constructief bezwijken wel rekening mee te worden gehouden. Voor de inlaatconstructie zijn bijzondere belastingen niet bij het ontwerp betrokken. Zie onderstaande tabel.

Belasting	Controle
Aanvaring	Niet van toepassing
Aardbeving	Niet van toepassing
Explosie	Niet van toepassing
IJs	Niet van toepassing
Vandalisme/sabotage	Niet van toepassing

Een toelichting op de invloed van extreme belastingen is opgenomen in [bijlage 15](#).

6.4 Stramien en overspanningen

In hoofdstuk 5 zijn hydraulische ontwerpeisen opgesteld. Bij het opstellen van constructieve ontwerpeisen hebben de hydraulische ontwerpeisen als basis gediend. De volgende waarden zijn aangehouden:

Benodigd stroomoppervlak	= 300 m ²
Benodigde (inwendige) hoogte	= 1,5 m
Benodigde breedte	= 200 m
Bovenkant brugdek	= 4,60 m +NAP
Maximale constructiehoogte	= 1,50 m
Wegbreedte	= 10 m

Gegevens uit hoofdstuk 5

De inlaatconstructie krijgt een grote lengte in verhouding tot de breedte van het kunstwerk. Bij zowel het overlaat- als kokerprincipe bestaat de constructie uit secties. Het aantal secties, en daarmee de stramienmaten van de constructie, dienen te worden bepaald. Er zijn veel mogelijkheden. Daarom is ervoor gekozen om beperkingen te stellen en de mogelijk goed met elkaar te laten verschillen. Zo is beschouwd:

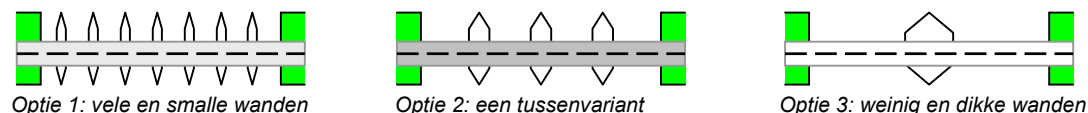
- Duiker met een overspanning van 40 m met 4 wanden
- Duiker met een overspanning van 20 m met 9 wanden
- Duiker met een overspanning van 10 m met 19 wanden
- Duiker met een overspanning van 5 m met 39 wanden

Voor de uiteindelijke keuze zijn de volgende punten van belang:

1. Doorstroming
2. Constructie grootte
3. Uitvoering

6.4.1 Doorstroming

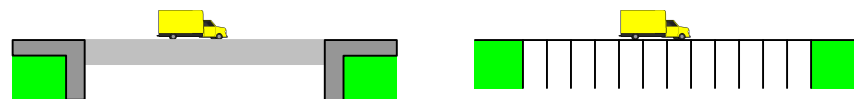
In het algemeen geldt dat het gewenst is om de doorstroming zo min mogelijk te hinderen. Er zijn drie varianten opgesteld voor de verdeling van de wanden over de constructielengte:



gewenst is om het aantal verstoringen te beperken

6.4.2. Constructiegrootte

Een grotere stramienlengte heeft als consequentie dat de constructie zwaarder zal worden. De belasting zal moeten worden gedragen en indien deze verdeeld kan worden over kleine constructie, is dat gunstig te noemen.



gewenst is een slanke constructie

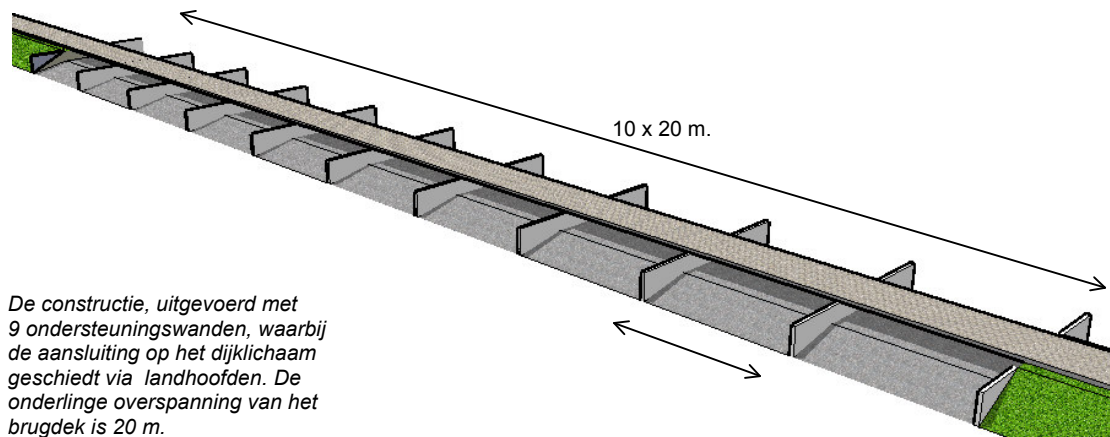
6.4.3 Uitvoeringsaspecten

Het ontwerp van de inlaatconstructie wordt in dit rapport uitgewerkt tot VO + niveau. Een uitgebreid onderzoek naar het uitvoeringsproces en fasering komt dan ook niet aan de orde. Er is echter voor de vorm van constructie wel degelijk rekening te houden met het uitvoeringsaspect. Voor de variant met de kleine en vele wanden geldt dat er meer tijd en geld gaat zitten in de uitvoering. Immers zullen er meerdere wanden gemaakt moeten worden, waarbij geldt dat elke wand zijn eigen opbouwproces kent. Te stellen is:

gewenst is om het aantal wanden te beperken

6.4.4 Conclusie

In het licht van de gemaakte afwegingen is een uiteindelijke keuze gemaakt voor de verdeling van de stramien over de constructielengte. Uitgaande van een lengte van 200 m¹, is tot een verdeling gekomen van 10 secties van 20 meter. Onderstaande afbeelding toont die verdeling, toegepast op het overlaatprincipe.

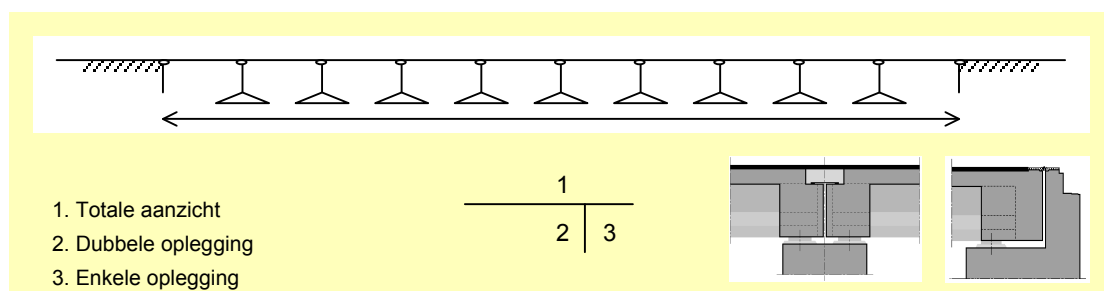


6.4.5 Schematisatie mechanica model

Verticale belastingen van het brugdek kunnen worden opgenomen door de tussenwanden. Deze dienen te worden gedimensioneerd op de belastingen die op kunnen treden. Voor de tussenwanden zullen ook hydraulische belastingen daarbij een rol spelen.

Horizontale krachten dienen ook door de tussenwanden en de 'landhoofden' te worden opgenomen. Uitgaande van een brugdek bestaande uit (prefab) betonliggers per sectie zullen horizontale krachten (in lengterichting) moeten worden opgenomen door de tussenwanden. Dit heeft als consequentie dat deze momentvast opgelegd moeten worden. Een andere optie is om horizontale krachten af te dragen naar de landhoofden. In dat geval dienen landhoofden zwaarder te worden geconstrueerd, maar de tussenwanden kunnen als scharnierend worden beschouwd.

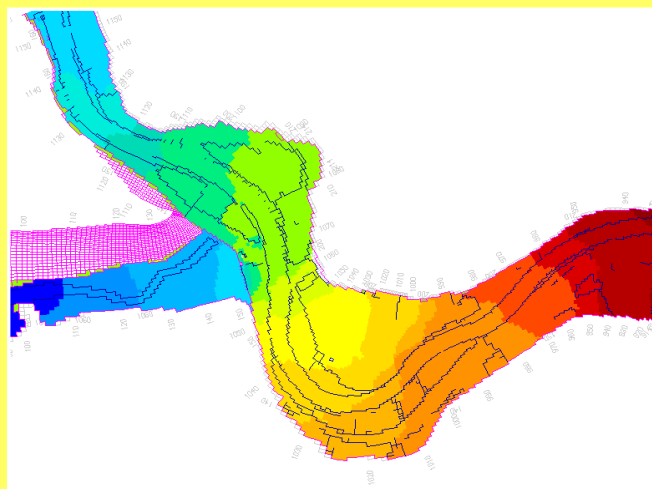
Uiteindelijk is het volgende mechanica model als basis aangenomen voor verdere uitwerking van het constructief ontwerp:



Schematisering brugdek

H7

Hydraulisch ontwerp



In hoofdstuk 5 zijn hydraulische ontwerpeisen opgesteld. Enkele hydraulische ontwerpberekeningen zijn gemaakt die een indicatie geven van benodigde dimensies en stromingsverschijnselen die op kunnen treden. In dit hoofdstuk komen twee aspecten van het hydraulisch ontwerp aan bod. Ten eerste zal via modelberekeningen verder worden ingegaan op de stromingsverschijnselen die naar verwachting op gaan treden over de inlaatconstructie. Via gevoeligheidsanalyses kunnen invloeden van verschillende factoren op de waterstandsdeling in de IJssel worden bepaald. Het hydraulisch ontwerp van de inlaat kan hierdoor verder worden uitgewerkt. Aansluitend zal in dit hoofdstuk ingegaan worden op de benodigde bodembescherming rond de inlaatconstructie.

7.1 Hydraulische modellen

Het analyseren van stromingsverschijnselen bij een overlaat is goed mogelijk met behulp van theorieën uit de vloeistofmechanica. Enkele principeberekeningen zijn gemaakt in hoofdstuk 5. In de praktijk zijn omgevingsfactoren sterk bepalend voor de werkelijk optredende verschijnselen. Te denken valt aan bodemruwheden (vegetatie), bodemhoogtes, de aanstroming naar de constructie, enz. Om de invloed van deze factoren mee te kunnen nemen in de berekening zijn hydraulische modellen ontwikkeld, die veel rekenwerk uit handen nemen. Daardoor is het in relatief korte tijd mogelijk om nauwkeurige voorspellingen te kunnen doen.

7.1.1 Keuze model

Er zijn diverse hydraulische modelprogramma's beschikbaar voor het schematiseren en doorrekenen van watersystemen. Een belangrijk onderscheid tussen modellen is het aantal dimensies waarin gerekend wordt. Twee voorbeelden van modellen zijn hieronder kort toegelicht.

Duflow

Duflow is een 1-dimensionaal waterbewegings- en waterkwaliteitspakket voor niet-stationaire stromingen, zoals afvoergolven en getijbewegingen. Een model in Duflow is opgebouwd uit watergangen die verbonden zijn in knooppunten. Met deze watergangen en extra objecten zoals overlatten, duikers en riooloverstorten, kan men in Duflow een volledig watersysteem schematiseren. Duflow rekent waterbewegingen in 1-dimensie door. Dichtheidsstromingen en bochteffecten kunnen hierdoor niet worden gesimuleerd.

Waqua

WAQUA is het waterbewegingmodel in 2 dimensies van Rijkswaterstaat waarmee waterloopkundige processen in meren, rivieren, zeeën en estuaria kunnen worden gesimuleerd. Met WAQUA worden waterstanden, waterstromingen en concentraties van opgeloste stoffen berekend in open wateren. De variatie van de waterstroming en concentraties opgeloste stoffen in de lengte (x-as) en breedte (y-as) van een volume worden door WAQUA gesimuleerd, dit is een 2D (tweedimensionale horizontale) benadering. Een gebiedsschematisatie vormt de basis bij het uitvoeren van de waterloopkundige simulatie.

In dit afstudeerrapport zijn berekeningen uitgevoerd met Waqua. Gebiedsschematisatie is met dit 2D programma nauwkeuriger op te zetten dan met Duflow. Dat is de belangrijkste reden om verder te werken met Waqua, aangezien veranderingen van omgevingsfactoren (zie par. 5.5) invloed hebben op de stromingsverschijnselen die werkelijk zullen optreden.

7.1.2 Doelstelling modelonderzoek

Voor project IJsseldelta, waar DHV nauw bij betrokken is, zijn ook Waqua modellen ontwikkeld. Met de uitkomsten van Waqua zijn uitspraken gedaan over te verwachten optredende waterstanden, stroomsnelheden en het benodigd debiet in de bypass.

De gebiedsschematisatie en het ontwerp van de bypass zoals gebruikt door DHV, is als input gebruikt voor het onderzoek van dit afstudeerrapport. Binnen het bestaande Waqua model zijn wijzigingen uitgevoerd in de directe omgeving van de inlaatconstructie.

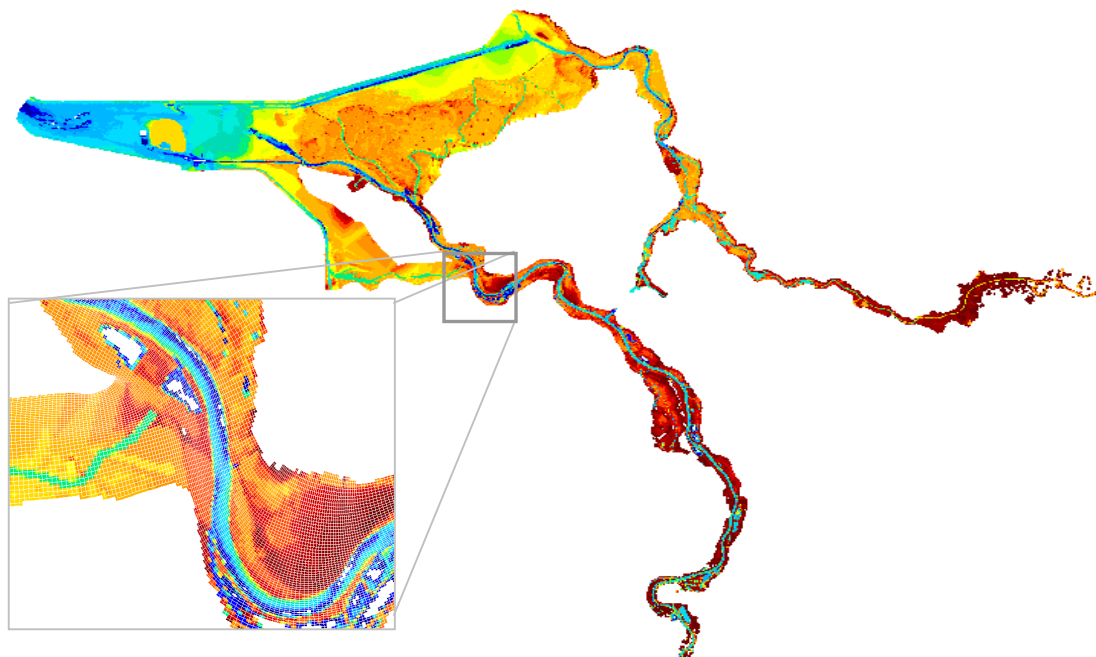
Mede in het licht van de geformuleerde ontwerpeisen in hoofdstuk 5 wordt verwacht dat met behulp van Waqua meer duidelijkheid kan worden verkregen over de werkelijk optredende stromingsverschijnselen bij het overlaat- en kokerprincipe. Daarnaast zal er naar verwachting meer inzicht ontstaan in de invloed van diverse factoren op de werking van de inlaat (bodemhoogte, dimensies inlaat). Het doel van het onderzoek is dan ook tweeledig:

1. De haalbaarheid van de twee stromingsprincipes toetsen
2. De invloed van factoren op de werking van de inlaat analyseren

Allereerst zal de gebiedsschematisatie en ingevoerde modelvarianten in Waqua worden toegelicht. Vervolgens zullen onderzoeksresultaten worden gepresenteerd en onderbouwd.

7.2 Gebiedsschematisatie

Gebiedsgegevens van de Vecht- en IJsseldelta zijn in een database beschikbaar voor Waqua. In onderstaande afbeelding is het gebied weergegeven waarbinnen het model werkzaam is. Het gebied is opgebouwd uit een raster (rekenrooster). Per roosterpunt zijn gegevens bekend over bodemhoogte, ruwheid, etc. De grenzen van het gebied zijn in het model bepaald door middel van het plaatsen van 'schotten' (oneindig hoge afscherming) op het raster. Naast gegevens over bodemhoogte en ruwheid zijn in het gebied ook overlaten gebruikt als schematisatie van kribben en hoogteverschillen in het landschap. Door het toekennen van kleuren aan waarden voor bodemhoogte, stroomsnelheden of debiet kunnen afbeeldingen zoals hieronder worden gegenereerd.

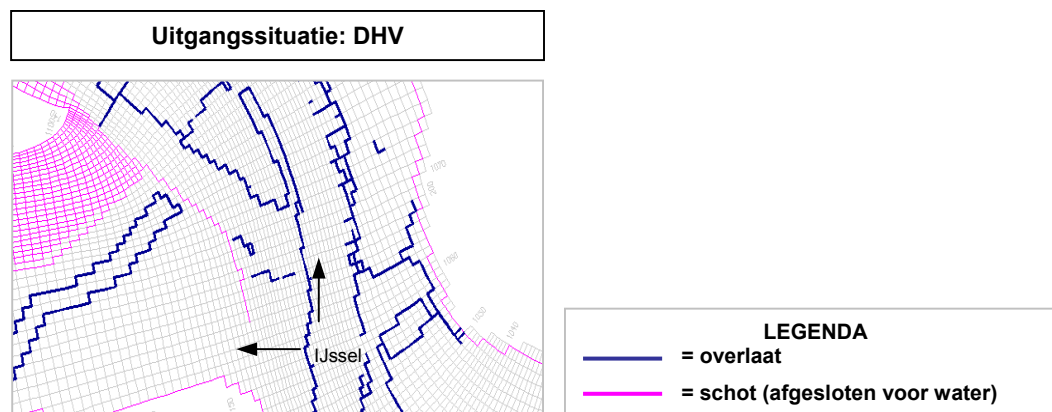


Gebiedsschematisatie Waqua

De gegevens voor het gebied direct rond de inlaat zijn opgenomen in [bijlage 16](#). In de bijlage zijn bodemhoogtes en de locatie van de inlaatconstructie opgenomen. In [bijlage 17](#) worden kort de achtergronden van de opzet van de gebiedsschematisatie en de werking van het rooster toegelicht.

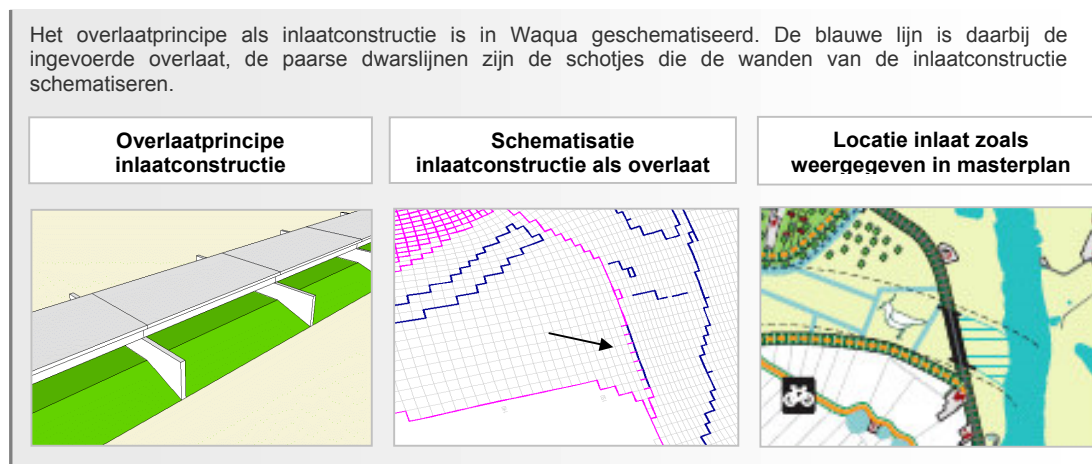
7.3 Modelvarianten

Om het onderzoeksproces te kunnen beheersen is een logboek aangemaakt waarin de referentiesituatie is opgenomen als basis voor de varianten die zijn gemaakt. De referentiesituatie betreft de bestaande modelvariant, die door DHV is doorgerekend. In deze modelvariant van DHV is het inlaatwerk niet als constructie geschematiseerd. Wel is een instroomopening aangebracht die qua breedte ongeveer overeenkomt met de lengte van het kunstwerk, namelijk +/- 225 meter. Onderstaande afbeelding uit Waqua geeft een beeld van de situering van de inlaat in de modelvariant van DHV. Deze dient als uitgangssituatie voor het onderzoek.

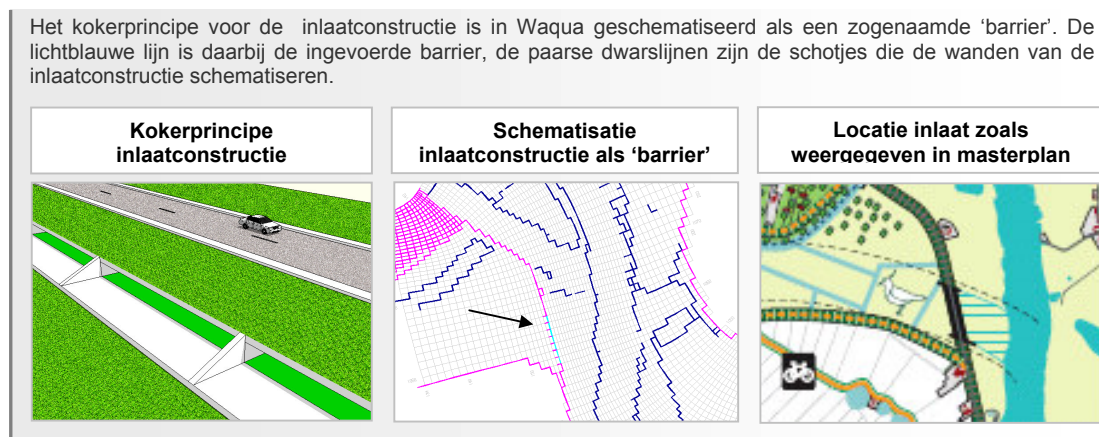


In de afbeelding zijn de contouren van het gebied rond de inlaat af te leiden (paarse lijnen). Naast de inlaatconstructie zijn ook andere overgangen in het landschap als overlaten geschematiseerd (hoogtes variabel). De overgang van de uiterwaarden naar het zomerbed van de rivier is goed te onderscheiden.

De twee ontwerpprincipes (koker en overlaat) zijn in Waqua geschematiseerd. Binnen deze twee principes zijn ook diverse varianten opgesteld, met als doel om enkele gevoeligheidsanalyses te kunnen uitvoeren. Hieronder is de toepassing van het ontwerpprincipe van de *overlaat* in Waqua kort toegelicht.



De inlaatconstructie als duiker/koker is het tweede principe dat in Waqua is geschematiseerd. Hieronder een korte toelichting.



In totaal zijn er zeven modelvarianten opgesteld:

Variant	Naamgeving	Invoercode Waqua
Variant 1:	overlaat 1,5 m.+NAP	wbov
Variant 2:	overlaat 1,5 m.+NAP diagonaal	wbov2
Variant 3:	overlaat 1,0 m.+NAP	wbov3
Variant 4:	overlaat 2,0 m.+NAP	wbov4
Variant 5:	overlaat 1,0 m.+NAP benedenstrooms	wbov5
Variant 6:	koker 1,0-2,5 m.+NAP	wbov6
Variant 7:	koker 1,0-1,5 m.+NAP	wbov7

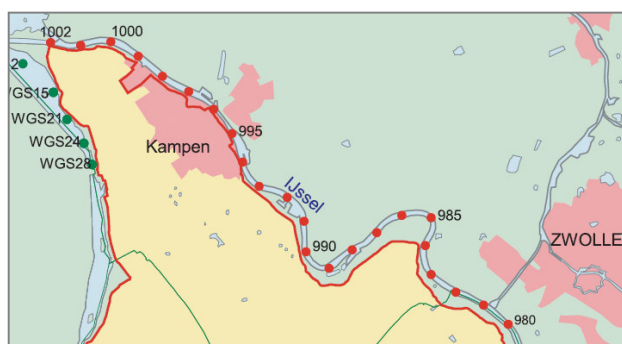
De zeven modelvarianten die op basis van variant DHV zijn opgesteld, zijn beschreven in [bijlage 18](#). Het logboek met gegevens m.b.t. de invoer in Waqua is opgenomen in [bijlage 19](#).

7.4 Toetsing resultaten aan taakstelling

De belangrijkste eis m.b.t. de waterkerende functie van de inlaat is het voldoen aan de **taakstelling**, toegelicht in bijlage 1. De waterstandsdeling die per variant wordt gerealiseerd is te toetsen aan deze taakstellende eis. In deze paragraaf worden de door Waqua gegenereerde waterstanden vergeleken met de taakstelling, om zo een selectie te kunnen maken van varianten die voldoende waterstandsverlaging opleveren.

7.4.1 Werkwijze

Voor het uitvoeren van de toetsing is een Excel bestand aangemaakt. De berekende waterstanden per variant over kilometterraai 975-1002 langs de IJssel zijn ingevoerd. De waterstanden zijn vergeleken met een bestaande referentielijn. Daaruit volgt de waterstandsdeling over het invloedsgebied. Per variant is de waterstandsdeling vergeleken met de taakstelling. Hieruit volgt of de betreffende variant voldoet aan de minimale eisen.



Gebiedsoverzicht – kilometterraaien

In bijlage 20 zijn de uitkomsten per variant weergegeven en toegelicht. Invloedsfactoren worden daarbij in beschouwing genomen.

7.4.2 Conclusie

Uit de resultaten van de zeven modelvarianten blijkt dat er drie goed voldoen aan de taakstelling, namelijk **variant 2**, **variant 3** en **variant 6**. De varianten 4, 5 en 7 voldoen duidelijk niet aan de taakstelling. De varianten 2 en 3 werken volgens het overlaatprincipe, variant 6 betreft het duikerprincipe. Het belangrijkste verschil tussen de varianten 2 en 3 is de ligging ten opzichte van de stroomrichting van de IJssel. Variant 6 betreft een variant met het kokerprincipe; de doorstroomhoogte is beperkt van 1,00-2,50 m. +NAP. Welke variant uiteindelijk de voorkeur zal krijgen voor verdere uitwerking zal in de volgende paragrafen worden bepaald.

7.5 Toetsing hydraulisch PvE

De drie varianten uit Waqua voldoen aan de taakstellende eis en zijn daarmee mogelijk geschikt voor toepassing in de praktijk. In deze paragraaf zullen de drie ontwerpprincipes op hydraulisch vlak nader worden beschouwd en beoordeeld op basis van de opgestelde hydraulische ontwerp-eisen.

7.5.1 Kerende hoogte en betrouwbaarheid opening

Aan de gestelde eisen voor kerende hoogte kan worden voldaan bij de drie modelvarianten. Indien het overlaatprincipe wordt toegepast zullen de dimensies op de eisen voor kerende hoogte kunnen worden afgestemd. Praktisch betekent dit een bepaalde constructiehoogte voor de aan te leggen wegconstructie boven de overlaat. Als de inlaatconstructie als duiker zal worden uitgevoerd, betekent de eis voor kerende hoogte dat het grondlichaam boven de duiker bepaalde afmetingen dient te krijgen. Dit is naar verwachting goed te realiseren.

Ontwerpeisen met betrekking tot de betrouwbaarheid van het openingsproces zijn niet aan bod gekomen in het ontwerpproces van dit afstudeerrapport. Wel is het open keerpeil als eis voor de maximaal optredende waterstand aangehouden.

7.5.2 Dimensies inlaatwerk

De lengte van het inlaatwerk is in Waqua ingevoerd als een rij overlaten in de gridfile. De lengte is dan ook afhankelijk van de gridlengte. Uiteindelijk is voor alle varianten een lengte van 250 m¹. aangehouden.

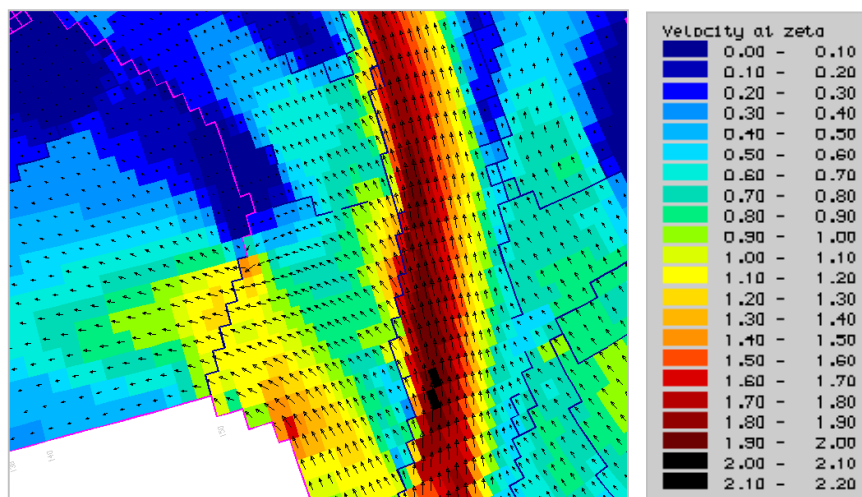
7.5.3 Stromingsverschijnselen variant 2 en 3

Met de uitgevoerde handberekeningen (hoofdstuk 5) is de inlaatconstructie zowel als onvolkomen en volkomen overlaat beschouwd. Welk stroomprincipe uiteindelijk zal optreden is naar verwachting beter te bepalen m.b.v. de resultaten in Waqua, aangezien gebiedsfactoren een belangrijke rol kunnen spelen bij de stromingsverschijnselen die zich zullen ontwikkelen.

Voor variant 2 en 3 (beide volgens overlaatprincipe geschematiseerd) zijn in Waqua visualisaties gemaakt die een beeld geven van de optredende stroomsnelheden rond de inlaatconstructie.

Variant 2 - stroomsnelheden

Stroomsnelheden die optreden nabij de inlaat bij variant 2 zijn gevisualiseerd in onderstaande afbeelding.

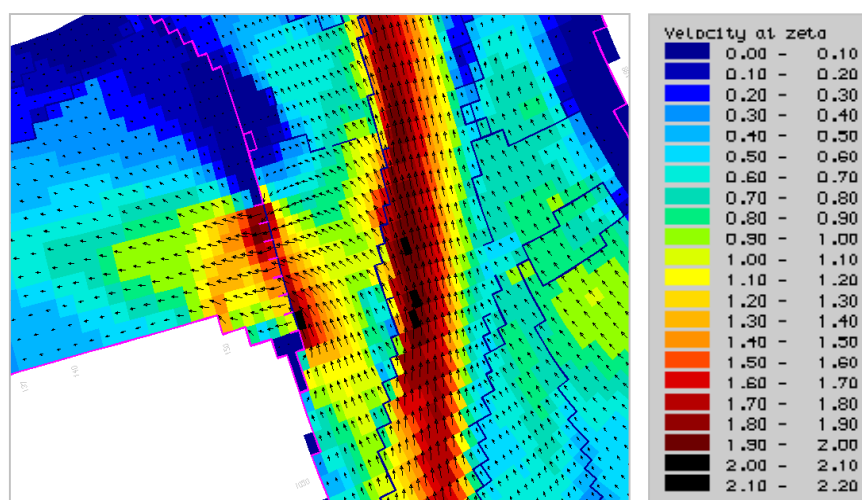


Stroomsnelheden nabij de inlaat (variant 2)

Aflezen van waarden geeft dat er stroomsnelheden bij de inlaat optreden (in de evenwichtssituatie!) in de range van 1,0 tot 1,3 m/s. Het is echter te verwachten dat in de beginfase van instroom schietend water zal optreden. Dit is een belangrijk gegeven bij het ontwerp van de bodemverdediging. De stroomsnelheden zijn bij deze variant redelijk gelijkmatig verdeeld over de breedte van de inlaatconstructie.

Variant 3 - stroomsnelheden

Stroomsnelheden die optreden nabij de inlaat bij variant 3 verschillen per locatie. In onderstaande afbeelding is dit gevisualiseerd. De grootste stroomsnelheden treden op aan de buitenzijde van de inlaat bovenstrooms en aan de binnenzijde benedenstrooms. Daaruit is af te leiden dat de debietverdeling over de lengte van de inlaat ook verschillend zal zijn.



Stroomsnelheden nabij de inlaat (variant 3)

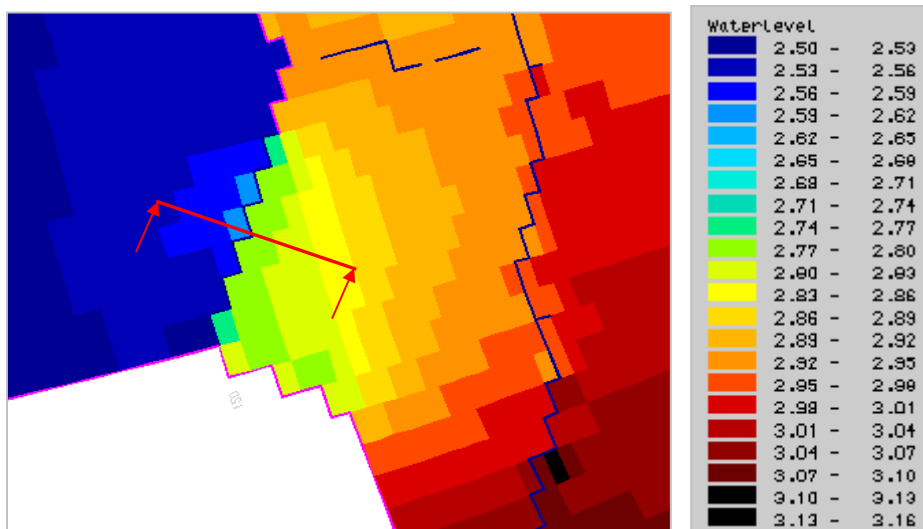
Aflezen van waardes geeft dat er stroomsnelheden bij de inlaat optreden (in de evenwichtssituatie!) in de range van 1,2 tot 2,0 m/s. Het is echter te verwachten dat in de beginfase van instroom schietend water zal optreden. Dit is een belangrijk gegeven bij het ontwerp van de bodemverdediging.

Optredend Stroomprincipe

Volgens Waqua zijn de optredende stroomsnelheden rond de inlaat maximaal 2,0 m/s in de evenwichtssituatie. Deze stroomsnelheid is nog ruim beneden de kritische stroomsnelheid, die bij de inlaat rond 3 m/s zal liggen. Schietend water zal in de evenwichtssituatie (als de benedenwaterstand in de bypass zich heeft ingesteld) dus niet optreden. Daaruit is af te leiden dat de inlaat hoofdzakelijk als onvolkomen overlaat zal functioneren. Dat komt overeen met de aannames uit de handberekeningen.

Variant 2 - waterstanden

De waterstanden die zich over de inlaatconstructie bij variant 2 instellen zijn gevisualiseerd in onderstaande afbeelding, die in Waqua is gegenereerd.

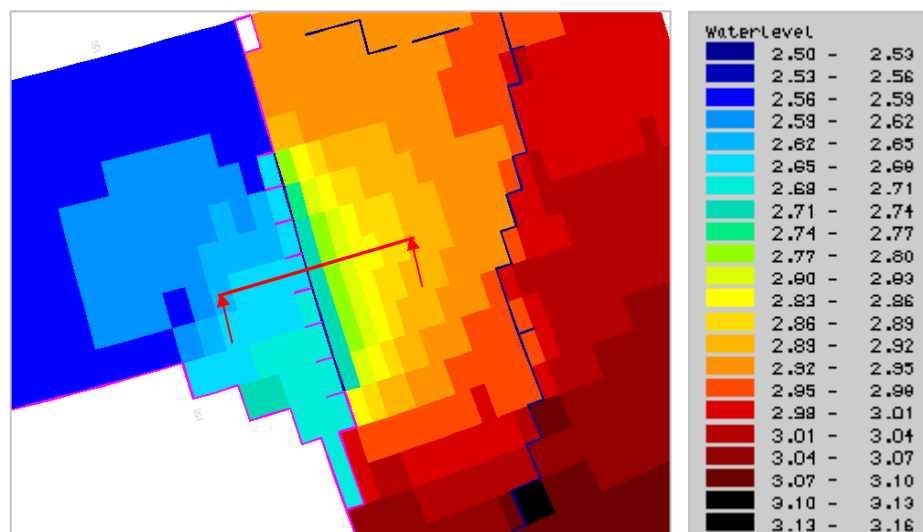


Waterstanden nabij de inlaat (variant 2)

Indien waterstanden worden afgelezen volgens de rode lijn in bovenstaande afbeelding, blijkt dat er zo'n 0,4 m. verval optreedt over het kunstwerk, gemeten over een afstand van +/- 180 m. Direct bij de overlaat treden volgens Waqua waterstanden op in de range van 2,56 – 2,80 m. +NAP, dus een verval van zo'n 0,2-0,3 m.

Variant 3 - waterstanden

De waterstanden die zich over de inlaatconstructie bij variant 3 instellen zijn gevisualiseerd in onderstaande afbeelding, die in Waqua is gegenereerd.



Waterstanden nabij de inlaat (variant 3)

Indien waterstanden worden afgelezen volgens de rode lijn in bovenstaande afbeelding, blijkt dat er zo'n 0,3 m. verval optreedt over het kunstwerk, gemeten over een afstand van +/- 180 m. Direct bij de overlaat treden volgens Waqua waterstanden op in de range van 2,55 – 2,74 m. +NAP, dus een verval van ongeveer 0,2 m.

VERGELIJK HANDBEREKENINGEN

In hoofdstuk 5 is de overlaat beschouwd als volkomen en onvolkomen. In Waqua lijkt het onvolkomen overlaatprincipe op te treden. Kernachtig geeft Waqua de volgende resultaten voor variant 2 en 3:

Variant 2

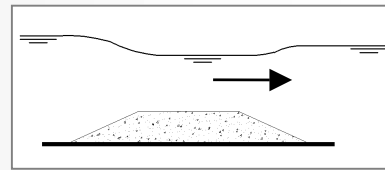
- Maaiveld 1,0 m. +NAP
- Kruinhoogte = 1,5 m. +NAP
- Breedte = 250 m.
- Debiet = 674 m³/s
- Stroomsnelheid = 1,0 – 1,3 m/s
- Verval over kunstwerk = 0,2 – 0,3 m.

Variant 3

- Maaiveld 1,0 m. +NAP
- Kruinhoogte = 1,0 m. +NAP
- Breedte = 250 m.
- Debiet = 670 m³/s
- Stroomsnelheid = 1,2 – 2,0 m/s
- Verval over kunstwerk = 0,2 m.

Onvolkomen overlaat handberekening

- Maaiveld 0,0 m. t.o.v. NAP
- Kruinhoogte = 0,0 – 1,5 m. +NAP
- Breedte = 200 m.
- Debiet = 700 m³/s
- Stroomsnelheid = 1,4 – 2,4 m/s
- Verval over kunstwerk = 0,1 – 0,3 m.



Vergelijk variant 2 met handberekening

Wat opvalt is dat de optredende stroomsnelheid in Waqua kleiner is dan bij de handberekening, terwijl het debiet nagenoeg gelijk is. Oorzaak hiervoor kan zijn dat de invloed van bodemruwheid op de stroming, wat een remmend effect heeft, meespeelt. De extra breedte (250 m¹ t.o.v. 200 m¹.) compenseert deze verliezen. Door het extra stroomoppervlak wordt alsnog de gewenste waterstandsdeling (met bijbehorend debiet) gehaald. Het verval over de constructie komt aardig overeen met de handberekening.

Vergelijk variant 3 met variant 2

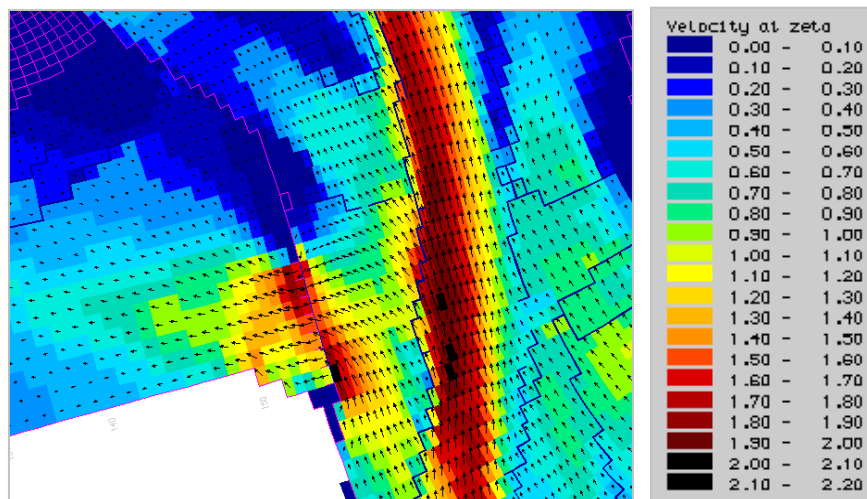
Het stroombeeld is bij variant 3 minder homogeen dan bij variant 2. De debietverdeling verloopt sterk over de breedte van de inlaat. Met plaatselijk hogere stroomsnelheden neemt ook de weerstand t.g.v. bodemruwheid toe. Door de lagere kruinhoogte wordt bij deze variant toch voldaan aan de taakstelling. Het verschil in ligging ten opzichte van rivier heeft bij deze varianten een belangrijke invloed op de optredende effecten.

7.5.4 Stromingsverschijnselen variant 6

De inlaatconstructie voor variant 6 is in Waqua als barriër ingevoerd, om daarmee het duikerprincipe te kunnen toetsen in het model. De uitkomsten kunnen worden vergeleken met de handberekeningen voor een kokerconstructie, zoals uitgevoerd in hoofdstuk 5.

Variant 6 - stroomsnelheden

Stroomsnelheden die optreden nabij de inlaat bij variant 6 verschillen per locatie. In onderstaande afbeelding is dit gevisualiseerd. De grootste stroomsnelheden treden op aan de buitenzijde van de inlaat bovenstrooms en aan de binnenzijde benedenstrooms.

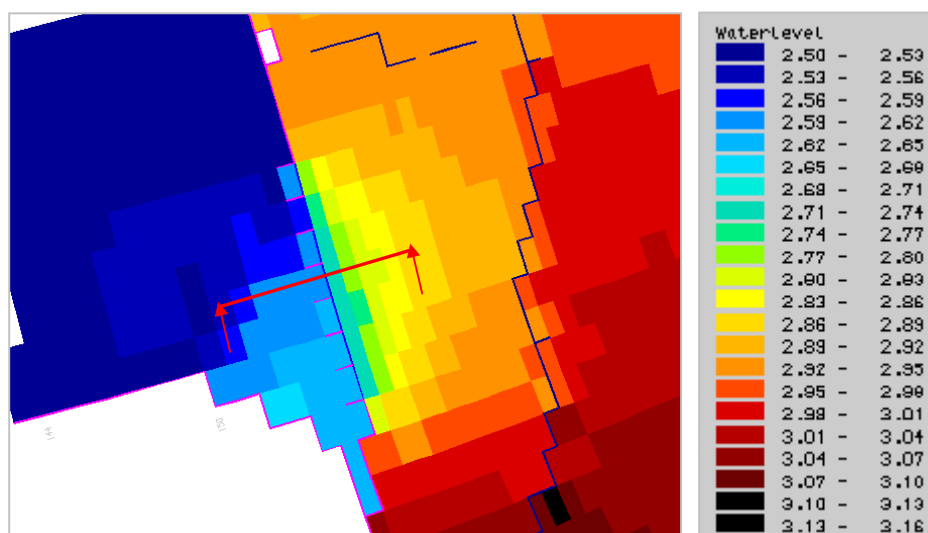


Stroomsnelheden nabij de inlaat (variant 6)

Aflezen van waarden geeft dat er stroomsnelheden bij de inlaat optreden (in de evenwichtssituatie!) in de range van 1,2 tot 2,0 m/s. Het is echter te verwachten dat in de beginfase van instroom schietend water zal optreden. Dit is een belangrijk gegeven bij het ontwerp van de bodemverdediging.

Variant 6 - waterstanden

De waterstanden die zich over de inlaatconstructie bij variant 6 instellen zijn gevisualiseerd in onderstaande afbeelding, die in Waqua is gegenereerd.



Waterstanden nabij de inlaat (variant 6)

Indien waterstanden worden afgelezen volgens de rode lijn in bovenstaande afbeelding, blijkt dat er zo'n 0,3 m. verval optreedt over het kunstwerk, gemeten over een afstand van +/- 180 m. Direct bij de overlaat treden volgens Waqua waterstanden op in de range van 2,62 – 2,77 m. +NAP, dus een verval van 0,1 - 0,2 m.

VERGELIJK HANDBEREKENINGEN

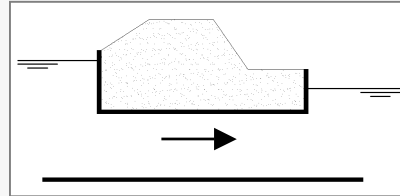
In hoofdstuk 5 is de overlaat beschouwd als koker. In Waqua is de koker als barriër geschematiseerd. Kernachtig geeft Waqua de volgende resultaten voor variant 6:

Variant 6

- Onderkant koker = 1,0 m. +NAP (maaiveld)
- Bovenkant koker = 2,5 m. +NAP
- Breedte = 250 m.
- Debiet = 655 m³/s
- Stroomsnelheid = 1,2 – 2,0 m/s
- Waterstanden buiten kunstwerk; 2,6 – 2,8 m. +NAP
- Verval over kunstwerk = 0,1 – 0,2 m.

Kokerprincipe handberekening

- Onderkant koker = 0,0 m. +NAP (maaiveld)
- Bovenkant koker = 1,5 m. +NAP
- Breedte = 200 m.
- Debiet = 700 m³/s
- Waterstand benedenstrooms: 2,7 m. +NAP
- Stroomsnelheid = 2,3 m/s
- Waterstanden buiten kunstwerk: 3,0 m. +NAP
- Verval over kunstwerk = 0,3 m.

**Vergelijk variant 6 met handberekening**

De invloed van de 'bovengrens' van het kunstwerk op de stroming blijft beperkt bij variant 6 aangezien de optredende waterstanden niet veel hoger zijn dan 2,5 m. +NAP. In vergelijking met de handberekening zijn er enkele verschillen aan te wijzen. Zo verschilt het debiet en de breedte van het kunstwerk. Indien de Waqua-waarde voor het debiet in de handberekening worden ingevoerd blijkt doorstroomoppervlak van 290 m² benodigd. Het feit dat bij variant 6 juist een groter doorstroomoppervlak (375 m²) benodigd is voor de taakstelling, is te verklaren door de gebiedsfactoren (zie par. 5.5) die in het model een rol spelen. De opstuwung zal in werkelijkheid namelijk begrensd zijn tot een bepaalde hoogte, waarna het water via de IJssel makkelijker zal afvloeien (weg van minste weerstand). Het grotere doorstroomoppervlak van de inlaat compenseert het kleinere optredende verval, waardoor alsnog voldoende water de bypass bereikt, en aan de taakstelling wordt voldaan.

7.5.5 Conclusie

De drie modelvarianten zijn op hoofdlijnen getoetst aan de hydraulische ontwerpisen. De vergelijking is gemaakt met de handberekeningen. Daaruit blijkt dat de handberekeningen in vergelijking met de modelresultaten en 'positievere' benadering hebben, aangezien gebiedsfactoren niet volledig worden meegenomen in de ontwerpformules. Globaal zijn de resultaten uit hydraulische modellen wel te toetsen m.b.v. de ontwerpformules uit de vloeistofmechanica.

Als de drie modelvarianten worden beschouwd, zijn er enkele samenvattende opmerkingen te maken:

- Bij variant 2 en 3 lijkt het onvolkomen overlaatprincipe op te treden.
- Het stroombeeld van variant 2 is homogener t.o.v. variant 3. Een homogeen stroombeeld is gewenst t.b.v. erosiebestrijding.
- Het kokerprincipe heeft resultaten die vergelijkbaar zijn met variant 3. Beide stroomprincipes zijn toepasbaar en voldoen aan hydraulische ontwerpisen.

De resultaten met betrekking tot de Waqua modellen zijn geanalyseerd en beoordeeld. Voor de drie modelvarianten is m.b.t. de toetsing aan de hydraulische ontwerpisen te concluderen dat **zowel variant 2, variant 3 als variant 6 voldoen** aan de gestelde hydraulische ontwerpisen. Als alleen de hydraulische aspecten worden beschouwd is variant 2 de beste oplossing.

In de volgende paragraaf worden de drie modelvarianten getoetst aan het functioneel programma van eisen, zoals opgesteld in hoofdstuk 4. Aan de hand van die resultaten zal een definitieve variant worden gekozen.

7.6 Toetsing functioneel PvE

De verborgen inlaatconstructie is reeds beoordeeld en in hoofdstuk 4 getoetst aan het functioneel programma van eisen. Met de gevoeligheidsanalyses in Waqua zijn binnen het principe van de verborgen overlaat echter nog drie varianten ontstaan:

Variant 2	Een overlaatconstructie in combinatie met erodeerbare grondkering, nieuw aangelegd onder een gunstige hoek t.o.v. de stroomrichting.
Variant 3	Een overlaatconstructie in combinatie met erodeerbare grondkering, ingepast in het huidige dijktracé.
Variant 6	Een kokerconstructie, gevuld met erodeerbaar materiaal, ingepast in het huidige dijkprofiel.

Aan de hand van het opgestelde functioneel programma van eisen zijn de drie modelvarianten uit Waqua op hoofd- en nevenfuncties beoordeeld. Onderstaande tabel bevat de argumentatie per functie voor de varianten 2, 3 en 6.

PvE						
		Waterkeren	LNC	Waterbeheer	Infrastructuur	Kosten
Functie	Toelichting					
Waterkeren	Alledrie de varianten kunnen voldoen aan de eisen die voor de functie waterkeren zijn gesteld. Beide stroomprincipes kunnen zodanig worden gedimensioneerd dat de gewenste waterstandsaling kan optreden onder maatgevende afvoercondities en water kan worden gekeerd onder stormcondities.					
LNC-waarden	Landschappelijke inpassing is gezien de huidige situatie het meest gewaarborgd met de varianten 3 en 6. Variant 2 vereist een omlegging van de waterkering, wat gevolgen heeft voor het landschappelijk beeld. Dit is niet per definitie negatief, maar de gevolgen van de ingrepen in het landschap zijn bij variant 2 het grootst.					
Integraal waterbeheer	Het overlaatprincipe i.c.m. een erodeerbare gronddijk is gevoelsmatig beter toepasbaar dan een met erodeerbaar materiaal gevulde duiker. Het is de verwachting dat het erosieproces makkelijker in gang wordt gezet en beter/betrouwbaarder te controleren is bij variant 2 en 3 (minder weerstand, van bovenaf bereikbaar voor ontgraving).					
Verkeer/vervoer	Het continueren van de verkeersfunctie die het huidig dijktracé heeft, zal het beste mogelijk zijn voor de varianten 3 en 6. Deze zijn gesitueerd in het huidige dijktracé. Indien variant 2 ten uitvoer zou worden gebracht, betekent dit dat wegomlegging zal moeten plaatsvinden.					
Kosten	Een kostenraming voor de drie varianten is niet gemaakt. Wel lijkt het aannemelijk dat variant 2 de meeste kosten met zich meebrengt, zeker als het wegtracé het nieuwe dijktracé zal volgen. Voor variant 3 en 6 is het lastiger te beoordelen welke variant duurder zal uitvallen. Zonder nader onderzoek is daar niet met zekerheid over te oordelen.					

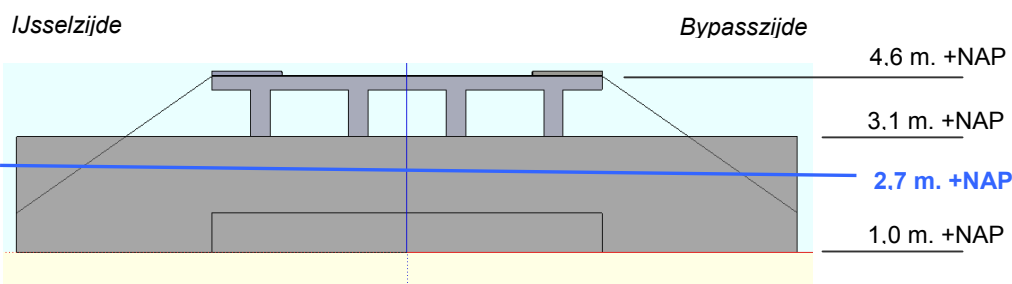
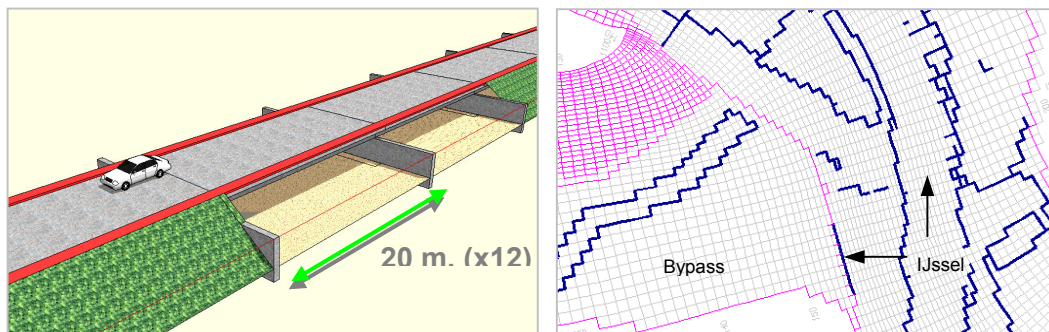
Op basis van bovenstaande beschouwing is **variant 3** als beste optie beoordeeld. De volgende argumentatie is daarbij gegeven (op basis toetsing functioneel PvE):

- De functie waterkeren kan worden vervuld, in samenwerking met huidig dijktracé.
- Landschappelijke inpassing is goed mogelijk, weinig verstoring van het huidige landschap.
- Het overlaatprincipe met erodeerbaar grondlichaam heeft naar verwachting meer kans van slagen dan een gevulde duiker. De bereikbaarheid is beter, de inwendige weerstand van de grond is naar verwachting kleiner.
- Het continueren van de verkeersfunctie is naar verwachting goed mogelijk bij variant 3
- Ten opzichte van het duikerconcept lijkt variant 3 kostentechnisch voordeliger. Constructief is daarbij de afwezigheid van een constructievloer (en bijbehorende kwelschermen!) een belangrijke factor. Eerlijkheidshalve dient te worden gezegd dat er ook onzekerheid bestaat m.b.t. de consequenties van het toepassen van een wanden-dek constructie met landhoofden.

7.7 Keuze definitieve modelvariant

Met een toetsing van de drie 'hydraulische modelvarianten' op het functioneel programma van eisen zijn de ontwerpen in een breder licht beoordeeld. Eigenlijk is nader onderzoek naar erosieprocessen en kosten van belang om de varianten beter te kunnen beoordelen op haalbaarheid. In dit afstudeerrapport is ervoor gekozen om de variant 3 verder constructief uit te werken:

MODELVARIANT 3 dient als uitgangspunt bij het constructief ontwerp van de inlaatconstructie.



Kenmerken:

Ontwerpprincipe: verborgen inlaatwerk, overlaatprincipe
 Lengte overlaat: 250 m¹
 Sectiebreedte: 20 m. (+/- 12 secties)
 Kruinhoogte overlaat: 1,0 m. +NAP (maaiveld)
 Situering: nabij kmr 991
 Optredend debiet: 670 m³/s (bron: bijlage 20)

7.8 Ontwerp bodembescherming

Uit modelberekeningen met Waqua is gebleken dat modelvariant wbov3 goed voldoet aan de taakstellende eis en inpasbaar is in het huidige landschap. Deze modelvariant dient dan ook als basis voor het ontwerp van de bodembescherming rond de inlaat.

Voor het ontwerp van de toe te passen bodembescherming rond de inlaat zal het volgende plan worden doorlopen om tot een voorontwerp te komen:

Lengtebepaling → Dimensioneren toplaag → Bepaling verticale opbouw → Voorontwerp

In hoofdstuk 5, waar ontwerpeisen aan bod zijn gekomen, is reeds gesteld dat voor de inlaatconstructie een volledig granulaire bodemverdediging zal worden toegepast. Dit type kenmerkt zich door:

- Het grote aantal mogelijkheden voor de toepassing van verschillende steendiameters
- Het continue karakter (geen interne aansluitingen/overgangen)
- Grote mate van flexibiliteit (het kunnen volgen van optredende zettingen in de ondergrond)
- Relatief eenvoudig te realiseren aansluitingen
- Grote levensduur (veelal >100 jaar)
- Relatief grote constructiehoogte, zeker bij meerdere filterlagen
- Beperkte toepassing in ondiep water met grote stroomsnelheden
- Beperkte toepassing in situaties met overstortende straal.

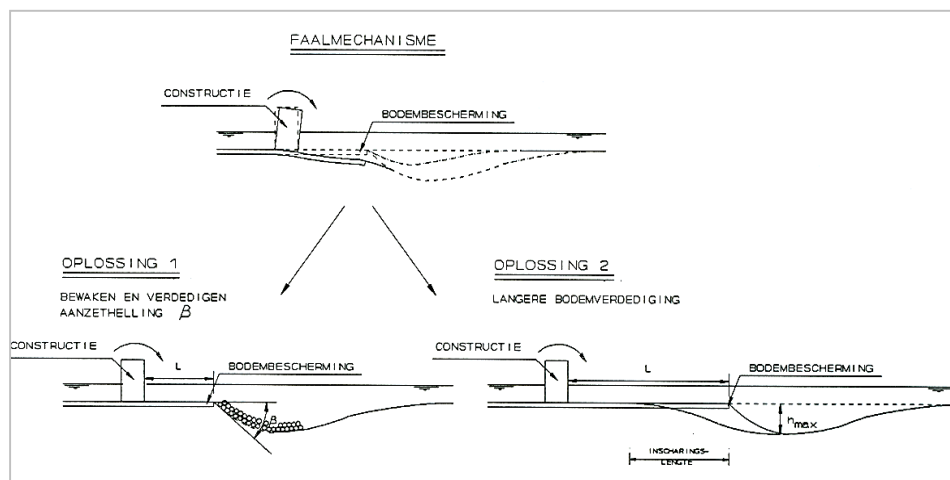
7.8.1 Lengtebepaling

Bij het ontwerp van dimensies (lengte, breedte) van de bodemverdediging dienen de volgende aspecten (in de aangegeven volgorde) te worden beschouwd:

1. Bepalen van bezwijkmechanisme dat op kan treden
2. Ontgrondingsproces bekijken ter bepaling diepte ontgrondingskuil die kan ontstaan
3. Berekenen inscharingslengte (parameters: diepte ontgrondingskuil en steilheid aanzethelling)
4. Bepalen minimaal benodigde lengte bodembescherming

Bezwijkmechanisme

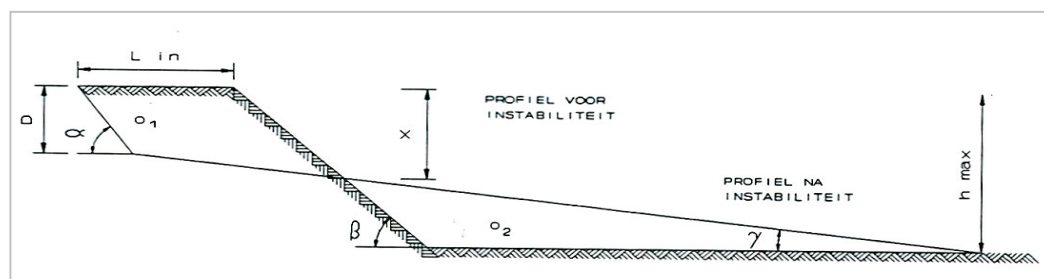
Er zijn twee bezwijkmechanismen die mogelijk op kunnen treden, namelijk zettingsvloeiing en/of afschuiving. Deze bezwijkmechanismen kunnen worden ingeleid door geotechnische instabiliteit aan de rand van de bodemverdediging, als gevolg van een diepe en/of steile ontgrondingskuil, die ontstaat als gevolg van erosie. Het is dus van belang dat de bodemverdediging zo ver wordt doorgezet achter de constructie dat een eventuele instabiliteit geen bedreiging vormt en de mate van ontgraving wordt gereduceerd, of dat de ontgrondingskuil wordt beschermd zodat de helling ervan te controleren is. In onderstaande afbeelding zijn beide oplossingen weergegeven.



Oplossingen t.b.v. voorkomen instabiliteit constructie (bron: Handleiding ontwerp bodemverdedigingen)

Inscharingslengte

De helling na het optreden van het bezwijkmechanisme bepaalt de horizontale afmetingen van de bodembescherming. De lengte van de bodembescherming dient groter te zijn dan de lengte van de 'inscharing' na stabiliteit. Zie onderstaande figuur.



Berekeningsprincipe inscharingslengte

Voor de berekening zijn de aangereikte formules uit de handleiding⁹ gevolgd. De volgende uitgangspunten hebben bij de berekening gediend:

- Stroomsnelheid: 2.0 m/s
- Belastingduur: 8 uur
- Waterdiepte: 1.7 m.
- Kritische stroomsnelheid bodemmateriaal: 1.0 m/s (kleigrond)
- Chézy ruwheid aarde: $50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- Chézy ruwheid bodemverdediging: $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- Faalmechanisme dat mogelijk kan optreden: zettingsvloeiing (afschuiving n.v.t.)

⁹ Handleiding ontwerp bodemverdedigingen, doc. Nr. BOD-R-95002 – RWS/DWW (febr. 1995)

De overige aangenomen en berekende waarden die in formules zijn gebruikt, zijn opgenomen in bijlage 21, waar de volledige berekening (spreadsheet) terug te vinden is. Uiteindelijk zijn de volgende resultaten gevonden:

Ontwerprelatie		$L_{bod} \geq L_{in}$	Waarde	Waterdiepte	Stroomsnelheid [m/s]
invoer	$L_{bod} =$	lengte bodembesch. [m]	5	1.7	1.9
uitvoer	$L_{in} =$	inscharingslengte	4.7		
uitvoer	$h_{max} =$	berekende kuildiepte	1.7		
uitvoer	$t1 =$	Tijdsduur [uren]	8		

Uit de berekening volgt dat de inscharingslengte 4.7 m. zal zijn. Indien de bodembescherming tot **5 meter** zal worden doorgezet achter de constructie geeft dit voldoende veiligheid voor het inlaatwerk.

Opmerkingen:

- Volgens de handleiding kan zettingsvloeiing pas optreden indien de kuildiepte groter is dan 5 meter. Volgens de formule kan de kuildiepte maximaal gelijk worden aan de waterdiepte, dus dit faalmechanisme zal zeer waarschijnlijk niet optreden.
- Er zijn enkele gebiedsgebonden variabelen aangenomen in de berekeningen. In het meest ongunstige geval kan de benodigde lengte van de bodembescherming toenemen tot zo'n 8 meter, of in het meest gunstige geval afnemen naar +/- 4 meter. Nauwkeuriger locatieonderzoek is hiervoor benodigd.
- Stroomsnelheid is een factor van grote invloed in de berekening. Indien een minder veilige waarde aangenomen wordt, heeft dit veel invloed op de benodigde lengte van de bodemverdediging (ter indicatie: indien $v=1.5$ m/s, dan $L_{in} = 2.6$ m.)
- Stroomsnelheden van 2 m/s treden ook op vòòr de inlaatconstructie (zie 7.5.3). Het is aannemelijk om daar ook bodembescherming toe te passen. In de praktijk komt dit echter niet vaak voor. De hydraulische belasting is ook lager omdat hevige turbulentie pas ontstaat *achter* het betreffende kunstwerk.

7.8.2 Dimensies toplaag

De toplaag van de bodembescherming, bestaande uit gestorte steen, dient te worden gedimensioneerd. De plaats van zwaarste aanval en het verloop van de benodigde steengrootte met toenemende afstand vanaf de constructie, het lengte-effect, is daarbij van belang.

Voor de inlaatconstructie is een lengte van 5 meter berekend waarover bodemverdediging benodigd is. Over deze relatief korte strook zullen stroomsnelheden niet veel variëren. Het is dan ook niet nodig om de steengrootte in deze situatie te variëren over de afstand tot de inlaat. Ook uitvoeringstechnisch gezien heeft dit voordelen.

Om benodigde sterkte van de stenen te kunnen bepalen aan de hand van optredende belastingen zijn er diverse stabiliteitsrelaties ontwikkeld. Een veel toegepaste formule is die van Pilarczyk:

$$\text{Formule: } \Delta \cdot D_n = \Phi_c \cdot K_h \cdot K_t \cdot (0.035 / \Psi) \cdot (U^2 / 2g)$$

Δ	= Relatieve dichtheid van de stenen [-]
D_n	= Nominale diameter van stenen [m]
Φ_c	= Stabiliteitsfactor voor stroom
K_h	= Snelheidsprofielfactor [-]
K_t	= Turbulentiefactor [-]
Ψ	= kritieke Shields parameter [-]
U	= verticaal gemiddelde stroomsnelheid [m/s]
g	= versnelling t.g.v. de zwaartekracht [m/s ²]

In de berekening wordt het product van de dichtheid van het steenmateriaal en de diameter van de stenen in verband gebracht met de verticaal gemiddelde stroomsnelheid, met daarbij diverse gebiedsgebonden factoren (plaatselijk turbulentie, snelheidsprofiel, stroming). De formule moet via iteraties worden opgelost, aangezien binnen de formule kruisverwijzingen zijn opgenomen.

Voor verschillende stroomsnelheden is de benodigde toplaag bepaald, om daarmee een beeld te krijgen van de invloed van de stroomsnelheid op de benodigde bodemverdediging.

U [m/s]	1.0	1.5	2.0	2.5
D_n [m]	0.03	0.12	0.29	0.46
Steensortering	30/80 mm.	80/200 mm.	10-60 kg.	60-300 kg.

Uitgaande van een maatgevende stroomsnelheid van 2.0 m/s blijkt een steensortering van 10-60 kg. noodzakelijk. Hierbij is de Chézy waarde in de berekening begrensd op $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (ondergrens). Dit lijkt een redelijke oplossing als toepassing voor bodemverdediging. De volledige berekening is opgenomen in [bijlage 21](#).

Opmerkingen:

- In de berekening is uitgegaan van hoge turbulentie en zwaar aangevallen/stroomhappende randen.
- De Chézy waarde dient in de berekening iteratief te worden bepaald (hangt samen met steendiameter). Er is een (realistische) ondergrens aangehouden van $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en een bovengrens van $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.
- De berekende waarden voor D_n tonen de invloed aan van toenemende stroomsnelheden op de benodigde steensortering.

7.8.3 Verticale opbouw bodemverdediging

Om erosie van de bodem onder de bodemverdediging te voorkomen dient een filterconstructie te worden toegepast. Het filter, bestaande uit één of meerdere granulaire lagen, heeft als functie het voorkomen van erosie van basismateriaal door de toplaag van de bodemverdediging. Drukopbouw onder het filter dient daarbij te worden voorkomen (waterafvoerende functie).

Eenvoudig gezegd dienen de onderliggende steenlagen dus te voorkomen dat zand/kleideeltjes losgewoeld worden en wegspoelen. Er zijn twee hoofdtypen filters die worden toegepast, namelijk geometrisch dichte – en geometrisch open filters. Bij het geometrisch dichte filter worden steensorteringen zo gekozen dat er fysiek geen uittreding van onderliggende lagen kan plaatsvinden. Bij het geometrisch open filter is uittreding fysiek wel mogelijk, maar dit wordt tegengegaan door het toepassen van dikkere filterlagen, waardoor de benodigde energie voor uittreding groter wordt. Bij een juiste dimensionering zijn de hydraulische belastingen niet groot genoeg om filtermateriaal te laten uittreden.

Voor de bodemverdediging van de inlaatconstructie zijn relatief eenvoudige ontwerpregels gebruikt om een indicatie te geven van de benodigde filterlagen. De methode uit de 'Handleiding ontwerp bodemverdedigingen' gaat dieper in op de optredende hydraulische belastingen, maar deze methode niet gebruikt.

Ontwerprichtlijnen (bron: zie¹⁰)

- $d_{15} \text{ bovenlaag} / d_{85} \text{ onderlaag} \leq 5$
- $5 \leq (d_{50} \text{ bovenlaag} / d_{50} \text{ onderlaag}) \leq 60$
- $5 \leq (d_{15} \text{ bovenlaag} / d_{15} \text{ onderlaag}) \leq 40$
- Minimale laagdikte:
Grindzand: 10 cm.
Grind: 20 cm.
Steen 1-2 x d_{90}

Gegevens

- Basismateriaal: klei/siltgrond: $d_{50} = 0.02 \text{ mm.}$, $d_{15} = 0.01$, $d_{85} = 0.03$ (aanname)
- Toplaag: $d_{50} = 320 \text{ mm.}$, $d_{15} = 200 \text{ mm.}$, $d_{85} = 280 \text{ mm.}$

Berekening

1^e filterlaag

$$\begin{aligned}
 200 / d_{85} \text{ onderlaag} &\leq 5 && \rightarrow d_{85} \text{ onderlaag} \geq 40 \text{ mm.} \\
 5 \leq (320 / d_{50} \text{ onderlaag}) &\leq 60 && \rightarrow 5 \text{ mm.} < d_{50} \text{ onderlaag} < 64 \text{ mm.} \\
 5 \leq (200 / d_{15} \text{ onderlaag}) &\leq 40 && \rightarrow 5 \text{ mm.} < d_{15} \text{ onderlaag} < 40 \text{ mm.} \\
 &&& \rightarrow \text{Grindlaag} \geq 20 \text{ cm. (} d_{15} = 9 \text{ mm, } d_{50} = 18 \text{ mm, } d_{85} = 37 \text{ mm)}
 \end{aligned}$$

2^e filterlaag

$$\begin{aligned}
 9 / d_{85} \text{ onderlaag} &\leq 5 && \rightarrow d_{85} \text{ onderlaag} \geq 2 \text{ mm.} \\
 5 \leq (18 / d_{50} \text{ onderlaag}) &\leq 60 && \rightarrow 0.3 \text{ mm.} < d_{50} \text{ onderlaag} < 3.6 \text{ mm.} \\
 5 \leq (9 / d_{15} \text{ onderlaag}) &\leq 40 && \rightarrow 0.23 \text{ mm.} < d_{15} \text{ onderlaag} < 1.8 \text{ mm.} \\
 &&& \rightarrow \text{Grindzandlaag} \geq 10 \text{ cm. (} d_{15} = 0.7 \text{ mm, } d_{50} = 1 \text{ mm, } d_{85} = 1.7 \text{ mm)}
 \end{aligned}$$

¹⁰ Toegepaste vloeistofmechanica, H2.17 (Nortier en de Koning, 1996)

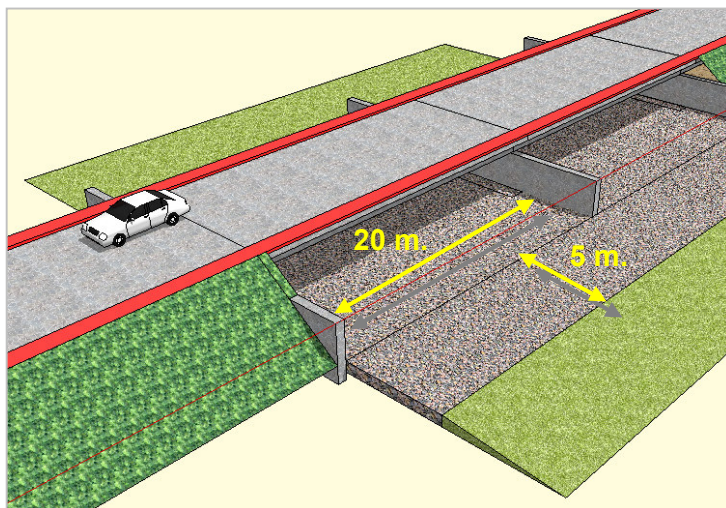
Een derde filterlaag is niet nodig bij de aangenomen gegevens. Samen met de toplaag en het bodemmateriaal zijn dus in totaal vier lagen te onderscheiden:



Bovenstaande schematisatie geeft een indicatie van de opbouw van de bodemverdediging die benodigd is om een waterdoorlatend, maar korrel dicht lagenpakket te krijgen. De laagdikte is indicatief; indien een dubbele laag stortsteen wordt toegepast (is soms gebruikelijk) zal de filterlaagdikte toenemen.

7.8.4 Voorlopig ontwerp bodemverdediging

In voorgaande paragrafen is de benodigde lengte en opbouw van de bodemverdediging bepaald. Toegepast in het 3D ontwerp ontstaat het volgende beeld van de bodembescherming rond de inlaatconstructie:



Schematisering bodembescherming inlaat

Belangrijk aspect is de bodemverdediging onder het wegdek. Deze is in de afbeelding op dezelfde wijze weergegeven als de strook van 5 meter achter de constructie. Omdat de inlaatconstructie geen 'vloer' heeft, zal een vorm van bodemverdediging noodzakelijk zijn. In dit ontwerp is uitgegaan van dezelfde opbouw als de strook achter het kunstwerk. Wellicht dat aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn rond de dwarswanden, aangezien hier bijzondere belastingen kunnen optreden.

Een ander aandachtspunt bij eventuele verdere uitwerking van het ontwerp betreft het onderzoek naar de effecten van hoge waterstanden (stormcondities) op de waterkerende functie van het grondlichaam. Met name de aansluiting van de grond op de wanden en de bodembescherming dient te worden beschouwd, met het oog op het faalmechanisme 'piping'.

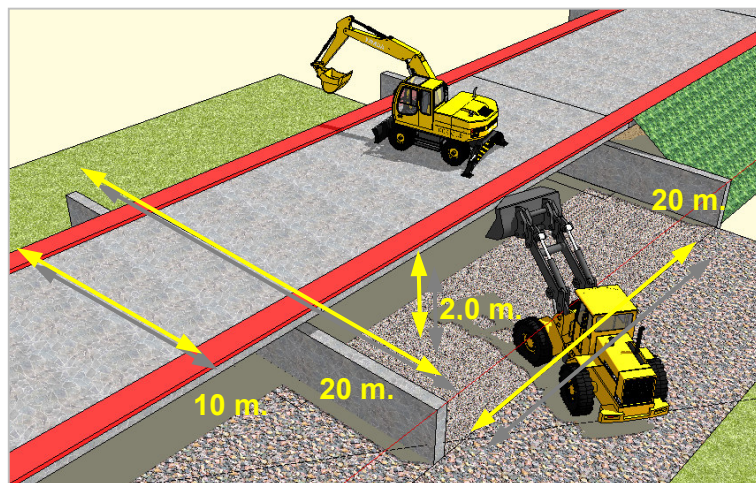
7.9 Praktische haalbaarheid ontwerp

In hoofdstuk 4 is de verborgen inlaat gekozen als ontwerpvariant. In dat ontwerp stadium is er voor gekozen om de praktische haalbaarheid van die keuze nog niet uitgebreid te beschouwen, aangezien er nog veel ontwerp vrijheden waren. Vervolgens is het ontwerp proces verder voortgezet met het opstellen van hydraulische en constructieve eisen. In dit hoofdstuk is op basis van functionele en hydraulische ontwerp eisen en de uitkomsten van Waqua modellen het ontwerp verder uitgewerkt.

Nu er meer bekend is over de dimensies en constructieve uitvoering van het verborgen inlaatwerk, zullen de beheeraspecten nader worden beschouwd en toegelicht.

7.9.1 Werkwijze

Indien maatgevende hoogwaterstanden gaan optreden in de IJssel, dient de bypass in werking te treden. Drie tot zes dagen van tevoren is de afvoergolf te voorspellen. Het is van belang dat er in die tijd initiële bressen in de dijk worden gemaakt, om het erosieproces op gang te brengen. Onderstaande gegevens geven een indicatie van de werking en de hoeveelheden:



Impressie

- Extreme afvoercondities -

Werkwijze

Per sectie initiële bressen graven in de dijk (buitenzijde) m.b.v. graafmachines.

Hoeveelheden

Per sectie +/- 640 m³ erosiemateriaal (combinatie zand + klei)

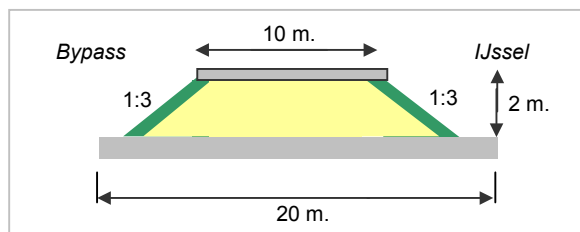
Tijdsduur ontgraven

Uitgangspunt: 1 uur ontgravingstijd per sectie. Totale tijd afhankelijk van beschikbaar materieel.

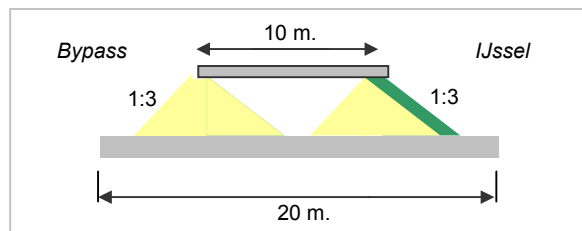
De verwachting is dat door het graven van een gat in het dijklichaam, er een instabiliteit ontstaat die in combinatie met de hoge waterstanden tot gevolg heeft dat er water gaat stromen in de bypass. Als gevolg van bresgroei kan het dijklichaam in een aantal uren volledig uitgespoeld zijn, waardoor het vereiste debiet in de bypass kan optreden.

7.9.2 Dijkprofiel

Van cruciaal belang voor het functioneren van de inlaat is een goed verloop van het openingsproces. Het dijkprofiel dient zo te moeten worden gedimensioneerd dat erosieprocessen zullen optreden. Overdimensionering van de dijk is in deze situatie dus niet gewenst. Het volgende dijkprofiel wordt beschouwd:



Het getoonde dijkprofiel bestaat uit een buitenlaag van klei (+/- 1 m.) en een kern van zand. Zand wordt veel toegepast als kern van dijklichamen en heeft gunstige eigenschappen t.b.v. erosie. Het is echter mogelijk dat dit dijkprofiel bovengedimensioneerd is gezien de optredende hydraulische belastingen. De kans bestaat dat het erosieproces dan niet op zal treden met de voorgestelde werkwijze. Een alternatief betreft het opdelen van het dijklichaam in twee delen:



Met bovenstaande configuratie is de dijk aan de IJsselszijde gedimensioneerd op de mogelijk optredende belastingen. Voldoende waterkerend vermogen wordt geboden. Indien extreme

afvoercondities optreden is het graven van een bres door de kleilaag voldoende om het erosieproces op gang te brengen. Aan de binnenzijde van de kering is een zanddijk opgenomen die dient als afsluiting van de binnenzijde van de kering. Als bijkomende eigenschap heeft de dijk de functie om de inlaatconstructie te 'verbergen', wat ten gunste is van het behoud van landschappelijke waarden.

In dit afstudeerrapport zijn geotechnische aspecten niet beschouwd. Het is dan ook nog niet duidelijk welke dimensies en dijkopbouw benodigd zijn voor voldoende waterkerend vermogen.

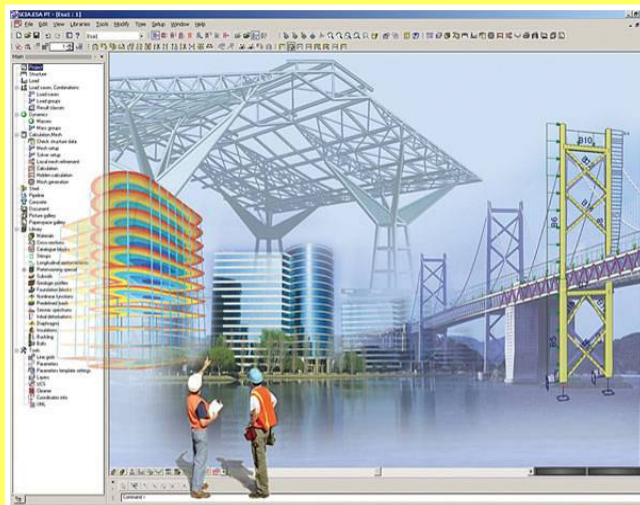
7.9.4 Conclusie

Nader onderzoek naar de praktische haalbaarheid van de openingsprocedure is noodzakelijk om de betrouwbaarheid van het kunstwerk te kunnen garanderen. De benodigde dimensies van het dijkprofiel dienen te worden berekend en er zal meer duidelijkheid moeten komen over het verloop van het erosieproces, met name de ontwikkeling van bresgroei in de dijk.

Met nader onderzoek zal er ook meer zekerheid moeten komen over de betrouwbaarheid van het kunstwerk. De faalkans van openen (in H5 bepaald op 1/40 vragen) is op de constructie van toepassing als toetsingseis. Om de kans van falen te bepalen zal moeten worden gekeken naar o.a. de kans dat geen voldoende materieel aanwezig is, de kans dat er niet gewerkt kan worden vanaf het wegdek, de kans op een falend waarschuwingssysteem, enz. Daar is in dit rapport niet uitgebreid op ingegaan.

Belangrijk aandachtspunt is dat de constructie naar verwachting 1/500 jaar (= bijna nooit) zal functioneren. Het op touw zetten van een ontgravingsoperatie zoals beschreven is dan ook een gebeurtenis die misschien 1 keer in de levensduur van het inlaatwerk voorkomt. In dat geval weegt een dergelijke eenmalige actie misschien wel op tegen een dure en onderhoudsgevoelige constructie met mechanisch te openen deuren of schuiven.

Dimensioneren brugdek



Het brugdek is een belangrijk onderdeel van het constructief ontwerp van de inlaatconstructie. In dit hoofdstuk worden de dimensies van het brugdek, bestaande uit betonliggers en een druklaag, bepaald. Bij het dimensioneren is het productieproces van belang bij het bepalen van maatgevende belastingen. Deze kunnen per productiefase verschillend zijn. Eerst zullen uitvoeringsmogelijkheden aan bod komen, waarna een keuze daarin zal worden gemaakt. Vervolgens worden de maatgevende belastingen per fase bepaald. Een goede schematisering is daarbij van belang om het juiste krachterspel te bepalen. Dan volgt het proces van dimensioneren, waarbij eerst m.b.v. vuistregels dimensies worden aangenomen, om die vervolgens te toetsen en het ontwerp eventueel verder te optimaliseren.

8.1 Uitvoeringsmogelijkheden

In hoofdstuk 6 zijn constructieve eisen opgesteld. Daarbij is uitgegaan van een aantal secties van 20 meter die samen de constructiebreedte vormen. Aangezien de overspanninglengte meer dan acht meter bedraagt, zal er een voorgespannen constructie moeten komen. Hierbij kunnen prefab profielen gebruikt worden. Er zijn een aantal mogelijkheden van uitvoeren:

- Een volledig voorgespannen dek laten aanleveren door een prefab betonfabriek
- Voorgespannen prefab liggers gebruiken in combinatie met een gestort dek
- De constructie volledig in het werk maken met nagetrokken voorspanning

Alle opties worden beschouwd in [bijlage 22](#) - uitvoeringsmogelijkheden

Gekozen constructie: optie B - voorgespannen prefab liggers in combinatie met een gestort dek

8.1.1 Productiefase

Bij de gekozen optie B nemen de liggers de krachten van de belastingen en het dek op. Het dek zorgt voor een berijdbare constructie. De geprefabriceerde liggers worden naar de bouwlocatie vervoerd. Na plaatsing kan het dek gestort worden.



Prefab voorgespannen balken met daarop een gestort dek

8.1.2 Gebruiksfase

In deze fase het dek wordt gestort en vormt samen een geheel met de balken. Belastingen die optreden: representatieve belastingen en karakteristieke belasting.

Voordelen	Relatief kort uitvoeringsproces
Nadelen	Liggers zullen zwaarder geconstrueerd worden aangezien het dek in de productiefase nog niet aanwezig is en daardoor geen (druk)kracht kan opnemen

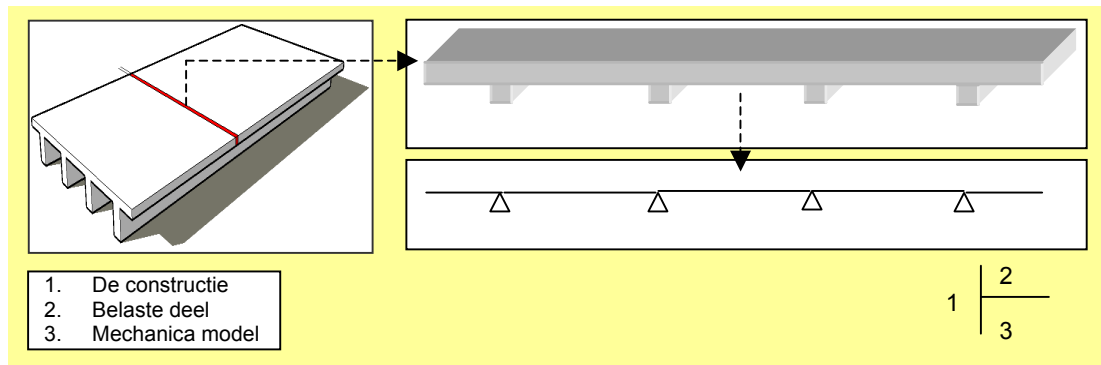
8.2 Berekening betondek

Met het gekozen bouwproces kunnen de definitieve belastingen worden bepaald. Er wordt gestart met het berekenen van de dikte van het dek. Belangrijke factoren om de dikte te bepalen zijn de momenten en de dwarskrachten die kunnen optreden. Vanuit de voorgespannen balken zullen beugels uitsteken die voor de samenwerking tussen het dek en de balken zorgen. Hierdoor kunnen in het dek geen beugels komen. Anders zal er te veel wapening op elkaar te komen. Een constructieve eis geldt daardoor:

- Dek dient als druklaag voor de onderliggende voorgespannen balken → hoge betonkwaliteit
- In het dek zal langswapening komen te liggen voor de te op te nemen momenten.
- Het beton in het dek moet zelf de ontstane dwarskracht kunnen opnemen.
- Milieuklasse 2 'vochtig milieu' → de dekking (c) 35 mm en voor de hulpwapening is $\phi 10$ gekozen. Waardoor $h - d = 45$ mm.

8.2.1. Schematisering

De belasting die het dek moet kunnen dragen, is in NEN 6788 vastgesteld. De puntlasten van de verkeersbelasting worden opgenomen door het dek en de balken. Deze zullen als een geheel werken. Voor het uitrekenen van de dekdikte wordt een andere schematisering toegepast.



Het dek wordt beschouwd als een balk van 240 mm breed met een lengte (de wegbreedte) van 10m en 4 gecentreerde ondersteuning (balken)

Toelichting

- De puntlasten van de banden hebben een loopvlaklengte van 240 mm en een breedte van 2,50 m.
- Alleen het belaste deel van de constructie wordt beschouwd. Naast gelegen (onbelaste) delen werken in de praktijk positief mee. De juiste schematisering wordt wel in ESA Prima Win ingevoerd.
- Deze berekening geeft alleen een idee van de dekdikte.

8.2.2. Gegevens dek

Lengte overspanning (ℓ)	2.500 mm
Loopvlaklengte (b)	240 mm
Dikte betondek (h)	350 mm
Dikte asfaltaag (h)	100 mm
Nuttige hoogte beton (d)	305 mm
Aantal balken / steunpunten	4 stuks

Gekozen beton	B65
Druksterkte (f'_b)	39 N/mm ²
Treksterkte ($f'_{b,m}$)	4,3 N/mm ²
Elasticiteitsmodulus (E'_b)	38.500 N/mm ²
Gekozen betonstaal	FeB500
Treksterkte ($f_s = f'_s$)	435 N/mm ²

8.2.3. Belastingen

Permanente belasting

Asfaltaag	Dik	100mm	0,55 kN/m
Bovenste betonlaag dek	Dik	350mm	2,10 kN/m
Extra onderdelen		10 %	0,27 kN/m +
Totaal			2,92 kN/m

Veranderlijke belastingen

Verkeersbelasting	gelijkmatig	3kN/m ²	0,72kN/m
	aslasten	150kN	60,00kN/m +
Totaal			60,72kN/m

8.2.4. Berekening van de momenten

De constructie betreft een veelzijdige oplegging. Met de rekenlengte = 2.500 mm. Voor het maatgevende moment is aangenomen dat zowel onder als boven $M = 0,100 q \ell^2$. Bron Briedé tabel 8.29.

Optredende externe momenten

M_d	Rekenwaarde UGT	1,2 PB + 1,5 VB	59,11	KNm
M_{mon}	Momentane moment	1,0 PB + 0,6 VB	24,59	KNm
M_{rep}	Rekenwaarde BGT	1,0 PB + 1,0 VB	39,77	kNm
M_g	Eigen gewicht	1,0 PB	1,82	KNm

Het scheurmoment

M_r	Korte belasting	$M_r = 1,4 f_{br} W$	5,375	KNm
M_{rt}	Langdurige belasting	$M_{rt} = 1,2 f_{br} W$	36,87	KNm
f_{br}	Gem. buigsterkte	$f_{br} = (1,6 - h) f_{bm}$	31,61	N/mm ²

Voor het wapeningspercentage geldt $k \times \omega_o = M_d / (f_b \times b \times d^2) = 59,11 / (39 \times 0,24 \times 0,305^2) = 67,89$.

Waarmee volgt volgens Briedé tabel 8.35, een wapeningspercentage van $k \times \omega_o = 7,058$

Met $k = f'_s / f'_b = 435 / 39 = 11,15$

Waardoor $\omega_o = 7,058 / 11,15 = 0,638 \%$. Waarmee $A_{staal} = 536 \text{ mm}^2$ per 240 mm dek. Dus per meter $A_{staal} = 654 / 0,24 = 2.233 \text{ mm}^2$ waardoor gekozen:

Gekozen wapening $\varnothing 20 - 125$ met ($A_{staal} = 2.513 \text{ mm}^2$ en $\omega_o = 0,72\%$)

8.2.5. Berekening van de doorbuiging

Doorbuiging berekening equivalente buigstijfheid (α methode)

$$U_{\text{eind}} = U_{\text{tot}} = \frac{5}{48} \times \frac{M_{\text{rep}} \ell^2}{\alpha EI}$$

Alle componenten zijn bekend in deze formule behalve α . Daarvoor gelden de volgende regels.:

→ Indien $M_{\text{rep}} \leq M_{rt}$ dan geldt:

1. $\alpha = 1 / (1 + \frac{3}{4} \varphi)$ Voor de waarde van φ Briedé tabel 8.48.

→ Indien $M_{\text{rep}} > M_{rt}$ de grootste waarde aanhouden van:

1. $\alpha = 0,27 \sqrt{\omega_o}$
2. $\alpha = \alpha_1 - 0,1 \frac{\sum M_{\text{mon}}}{\sum M_{\text{rep}}}$

Voor α geldt dat $M_{\text{rep}} = 39,77 > M_{rt} = 36,87$ waardoor:

1. $\alpha = 0,27 \sqrt{\omega_o} = 0,27 \sqrt{0,638} = 0,216$
2. $\alpha = \alpha_1 - 0,1 \frac{\sum M_{\text{mon}}}{\sum M_{\text{rep}}} = \alpha_1 = 0,32$ en $\alpha = 0,32 - 0,1 \frac{24,59}{39,77} = 0,258$

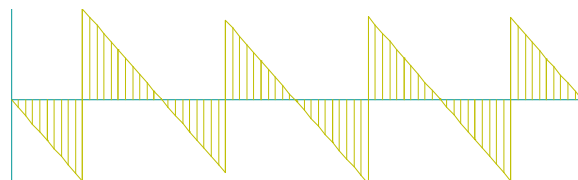
Met $\alpha EI = 0,258 \times 38.500 \times (1/12 \times 240 \times 350^3) = 8.523 \text{ kNm}^2$

$U_{\text{tot}} = 1 \times 39,57 \times 2,500^2 / (48 \times 5.744) = 3,04 \text{ mm}$.

$U_{\text{toelaatbaar}} = 1/250 \times l = 10,00 \text{ mm}$.

8.2.6. Berekening van de dwarskracht

Voor de dwarskracht geldt het volgende figuur voor het verloop van de dwarskrachtenlijn.

Dwarskrachtlijn

Dwarskrachtenlijn voor de ligger zoals geschematiseerd in paragraaf 8.2.1 met constante q -last [kN/m]
Met op de y -as de dwarskracht en op de x -as de locatie van de ligger.

Voor τ_{max} geldt: $F / (b \times d)$ en voor F_{max} ligt net iets naast de oplegging waardoor geldt $F_{\text{max}} = \frac{1}{2} q \times l = \frac{1}{2} \times (1,2 \times 2,59 + 1,5 \times 60,72) \times 2.500 = 117,7 \text{ kN}$. De meewerkende breedte is door spreiding $(240 + 210) = 450 \text{ mm}$. Al met al geldt hierdoor $\tau_{\text{max}} = 117.700 / (450 \times 305) = 0,858 \text{ N/mm}^2$. De toegestane schuifspanning is $0,86 \text{ N/mm}^2$ waarmee geldt $\tau_1 / \tau_d = 0,997 < 1,000$. De constructie voldoet dus maar net. Voor de berekening van de dwarskrachtspanning is een te veilige benadering gebruikt. Deze houdt namelijk geen rekening met aanliggende (niet belast met de zware puntlasten) constructieonderdelen. Deze berekening zal anders worden ingevoerd in ESA Prima Win.

8.2.7. Conclusies handberekening

- Te veilige schematisatie, er wordt geen rekening gehouden met de (onbelast) naastgelegen dek
- Antwoord op de vraag betreffende de dikte van het dek is zeer redelijk
- Wapening in het dek $\varnothing 20 - 125$ met ($A_{\text{staal}} = 2513 \text{ mm}^2$ en $\omega_o = 0,72\%$)
- Dwarskrachten kunnen maar net worden opgenomen door het beton zelf. ($\tau_1 / \tau_d = 0,997$)
- Mogelijk wel in een andere schematisering wanneer het dek als een geheel wordt beschouwd.

Zie bijlage 23 voor de invoering van het model in ESA Prima Win.

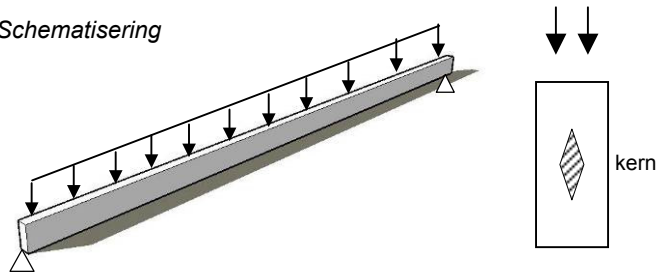
8.2.8. Conclusies na invoering in ESA Prima Win

- Resultaten ESA Prima Win komen zeer goed overeen met de handberekening.
- Maximale moment is ongeveer 1,5 groter t.o.v. de handberekening. Dit is te verklaren doordat de puntlast als één punt in het midden is geschematiseerd en niet als een q-last die gelijkmatig is verdeeld.
- De waarden van de momenten en dwarskrachten ontstaan ongeveer voor 90% door puntlasten.
- De schematisering in ESA Prima Win laat de puntlasten goed afvloeien.
- Gekozen wapening (zowel boven als onder) $\varnothing 12 - 150$ met ($A_{\text{staal}} = 754 \text{ mm}^2$ en $\omega_o = 0,247\%$)
- Dwarskrachten kunnen goed worden opgenomen door het beton zelf. ($\tau_1 / \tau_d = 0,68$)
- Vervormingen zijn veel minder omdat de constructie goed gebruikt maakt van de meewerkende breedte.

8.3 Berekening voorspanbalken fabrieksfase

Het dek is berekend en de overige gegevens kunnen nu bepaald worden. In deze fase worden de balken gefabriceerd in de fabriek. Na productie kunnen ze worden vervoerd worden en op de juiste locatie worden afgeleverd. Belastingen die optreden: enkel eigen gewicht van de balk.

8.3.1 Schematisering



8.3.2 Technische gegevens balk

Lengte overspanning (ℓ)	20.000 mm
Hoogte balk (h)	1.200 mm
Breedte balk (b)	500 mm
Aantal steunpunten	2 stuks
Doorsnede beton (A)	600.000 mm ²
Weerstandsmoment (W)	1,200E+08 mm ³
Traagheidsmoment (I)	7,200E+10 mm ⁴

Gekozen beton	B65
Druksterkte (f_b)	39 N/mm ²
Treksterkte ($f_{b,m}$)	4,3 N/mm ²
Elasticiteitsmodulus (E_b)	38.500 N/mm ²
Gekozen betonstaal	FeB500
Treksterkte ($f_s = f'_s$)	435 N/mm ²

8.3.3. Belastingen

Het betreft de fabrieksfase waardoor alleen eigen gewicht en volledige voorspankracht F_{po} van toepassing is. De voorspankracht is nog onbekend en kan een berekening worden opgelost. Voor het eigen gewicht geldt:

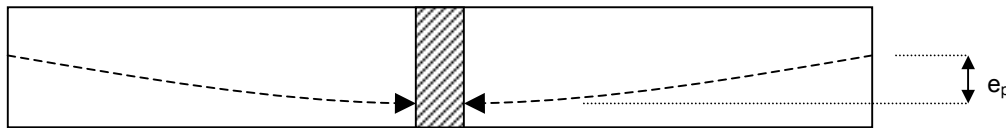
$$\text{Eigen gewicht } q = 14,40 \text{ kN/m} \rightarrow M_{eg} = 1/8 q \ell^2 = 1/8 \times 14,40 \times 20^2 = 720 \text{ kNm} = 720 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Voor de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt uitgegaan van de volgende maximale spanningen: (1) Er mag geen trekspanning voorkomen in de constructie zodat geldt: betontrekspanning: $\sigma \leq 0 \text{ N/mm}^2$ (volledig voorgespannen beton). (2) Voor de betondrukspanning geldt, volgens artikel 8.1.7. van NEN 6720, dat $\sigma' \leq f'_{bt} \mapsto 0,75f'_b \Rightarrow \sigma'_{bi} \leq 0,75 \times 39 = 29,25 \text{ N/mm}^2$

Eis $0,00 \text{ N/mm}^2 > \text{optredende spanning in } x > -29,25 \text{ N/mm}^2$ (met x willekeurig in de constructie)

8.3.4. Berekening

Bij een excentriciteit e_p in de middendoorsnede geldt voor de spanningen, ten gevolge van de voorspanning, de volgende figuur.



Ligging van de voorspankrachten

Voor de spanning aan de bovenzijde, met uitsluitend het eigen gewicht q_{eg} en de volledige voorspankracht F_{pi} direct na het spannen, geldt:

$$\sigma_{bb} = -\frac{F_{pi}}{A_b} + \frac{F_{pi} \times e_p}{W} - \frac{M_{eg}}{W} \leq 0 \text{ N/mm}^2$$

Aan de onderzijde treedt de grootste drukspanning op. Waardoor geldt:

$$\sigma_{bo} = -\frac{F_{pi}}{A_b} - \frac{F_{pi} \times e_p}{W} + \frac{M_{eg}}{W} \geq -29,25 \text{ N/mm}^2$$

Voor de maximale kracht F_{pi} , kunnen deze vergelijkingen worden opgeteld, waardoor e geëlimineerd is.

$$\sigma_b = -\frac{2F_{pi}}{A_b} \geq -29,25 \Rightarrow F_{pi} \leq 8.775 \text{ kN}$$

Voor de maximale waarde voor e_p zal het verschil tussen deze vergelijking moeten worden bepaald. Na invoeren van de waarde van F_{pi} volgt e_p .

$$\sigma_o = 2 \frac{F_{pi} \times e_p}{W} - 2 \frac{M_{eg}}{W} \geq 29,25 \Rightarrow e \leq (29,25 + 2 \frac{720 \times 10^6}{1,200 \times 10^8}) \times \frac{1}{2} \times \frac{1,200 \times 10^8}{8,775 \times 10^6} = 285 \text{ mm}$$

Gekozen voorspanning

$$F_{po} = 8.100 \text{ kN}$$

$$e_p = 290 \text{ mm} \text{ (~10\% meer excentriciteit waardoor er ~10\% minder voorspankracht nodig is)}$$

8.3.5 Invoeren in ESA Prima Win

De balk wordt in ESA Prima Win geschematiseerd eveneens als een ligger op twee steunpunten. Zie bijlage 24.

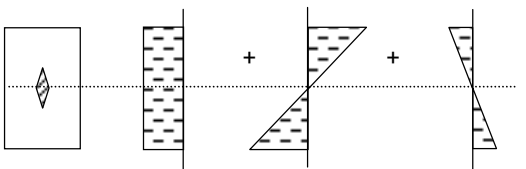
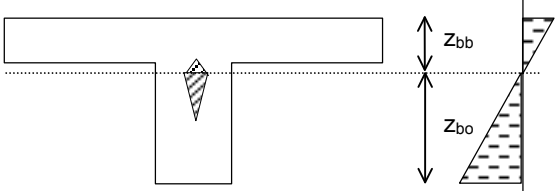
8.4 Berekening voorspanbalken gebruiksfase

De balk wordt voorgespannen op het werk aangeleverd. De voorspankracht werkt dan alleen maar op de balk. Het dek dient als druklaag indien de maatgevende belastingen gevallen optreden.

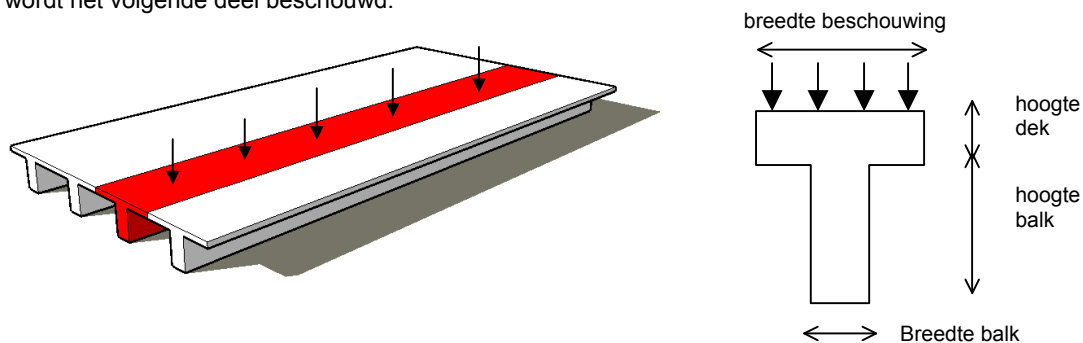
Doordat het twee apart samengestelde constructies zijn, kunnen de liggers niet worden ingevoerd in ESA Prima Win.

8.4.1. Schematisering

De schematisering is niet anders dan in de fabrieksfase, de ligger op twee steunpunten opgelegd. Echter wat wel verschilt is de afvloeiing van de krachten. Zo werkt de voorspankracht alleen op de balk en zal de veranderlijke belasting door de hele constructie gedragen worden. Daarom geldt het onderstaand schema.

Fase 1 fabrieksfase	Fase 2 gebruiksfase
- Voorgespannen balk - Eigen gewicht balk wordt opgenomen door balk profiel - Voorspankracht werkt allen in de balk	- Voorgespannen balk met gestorte druklaag - Eigen gewicht dek en asfalt wordt opgenomen door T-profiel - Veranderlijke belastingen wordt opgenomen door T-profiel
	
Doorsnede balk $\sigma = \frac{F_{pi}}{A_{balk}}$ $\sigma = \frac{F_{pi} \times e_p}{W_{balk}}$ $\sigma = \frac{M_{eg;balk}}{W_{balk}}$	Doorsnede T-profiel $\sigma = \frac{(M_{eg;dek} + M_{ver.bel.}) \times e}{I_{totaal}}$

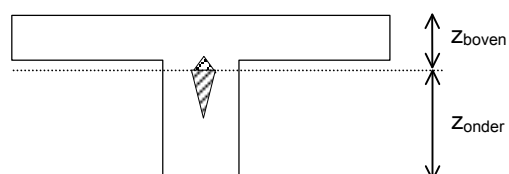
Voor beide constructie onderdelen geldt de eis van de maximale spanningen. Voor de berekening wordt het volgende deel beschouwd:



8.4.2. Dimensies - Technische gegevens balk

Dimensies

Lengte overspanning (ℓ)	20.000 mm
Hoogte balk (h_b)	1.200 mm
Breedte balk (b_b)	500 mm
Hoogte dek (h_d)	350 mm
Breedte beschouwing (b_d)	2.500 mm
Aantal steunpunten	2 stuks



Technische gegevens

Totale betonoppervlak	1.475.000 mm ²
Z _{beton boven}	490,3 mm
Z _{beton onder}	1.059,7 mm
Traagheidsmoment boven (I _b)	9,589E+10 mm ⁴
Traagheidsmoment onder (I _o)	1,988E+11 mm ⁴
Traagheidsmoment totaal (I _{tot})	2,947E+11 mm ⁴
Weerstandsmoment onder (W _o)	6,011E+08 mm ³
Weerstandsmoment onder (W _b)	2,781E+08 mm ³

$$Z_y = \frac{A_1 \times z_1 + A_2 \times z_2 + A_n \times z_n}{\Sigma A}$$

$$I_x = \left(\frac{1}{12} \times b_x \times h_x^3 \right) + (A_x \times z_x^2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{M \times \frac{1}{2} h}{\frac{1}{12} \times b \times h^3} = \frac{M \times e}{I_{\text{totaal}}}$$

8.4.3. Belastingen

Het betreft de gebruiksfase waarbij de maximale belastingen ontstaan. De normen vanuit de NEN zijn als volgt geschreven: permanente belasting x 1,2 en veranderlijke belasting x 1,5

De constructie betreft een ligger met twee steunpunten. Hierdoor kan er berekend worden met een stramien met de rekenbreedte = 20 m. Voor het maatgevende moment is te berekenen met $M = 1/8 q \ell^2$. Bron: Briedé tabel 8.29

Permanente belasting

Asfaltlaag	Doorsnede	2.500 x 100mm ²	5,75kN/m
Bovenste betonlaag dek	Oppervlak	2.500 x 350mm ²	21,88kN/m
Extra onderdelen		10 %	2,45kN/m +
Totaal			30,39kN/m

Veranderlijke belastingen

Verkeersbelasting	Gelijkmatig 3 kN/m ²	7,50 kN/m
Puntlasten door aslasten d	De spanningen, dwarskrachten en momenten die ontstaan door de puntlasten worden uitgerekend in bijlage 25 - invloedslijnen.	

M _{P.B.}	Eigen gewicht balk	q = 14,40kN/m*	→ 1/8ql ² = 720kNm	x 1,20	864 kNm
M _{P.B.}	Eigen gewicht dek	q = 30,39kN/m	→ 1/8ql ² = 1.348kNm	x 1,20	1.617 kNm
M _{V.B.}	Ver. Bel. (gelijkmatig)	q = 7,5kN/m	→ 1/8ql ² = 375kNm	x 1,50	563 kNm
M _{punt}	Door puntlasten		1.875kNm	x 1,50	2.813 kNm +
M_{tot}	Totaal				5.857 kNm

* Waarde uit paragraaf 8.3.3.

8.4.4 Berekening dwarskrachtwapening in de balk

De maatgevende dwarskracht is met de volgende berekening te bepalen:

Maximale dwarskracht (net naast de oplegging)

Voor de q-lasten geldt:

q eg balk	= 14,40 x 1,20	= 17,28 kN/m
q eg dek	= 30,39 x 1,20	= 36,47 kN/m
q ver. bel.	= 7,50 x 1,50	= 11,25 kN/m +
Totaal		65,00 kN/m

Verder zijn er drie puntlasten van elk 1,5 x 150 = 225 kN. Deze krachten hebben respectievelijk 1,0 2,0 en 6,0 meter afstand van de oplegging.

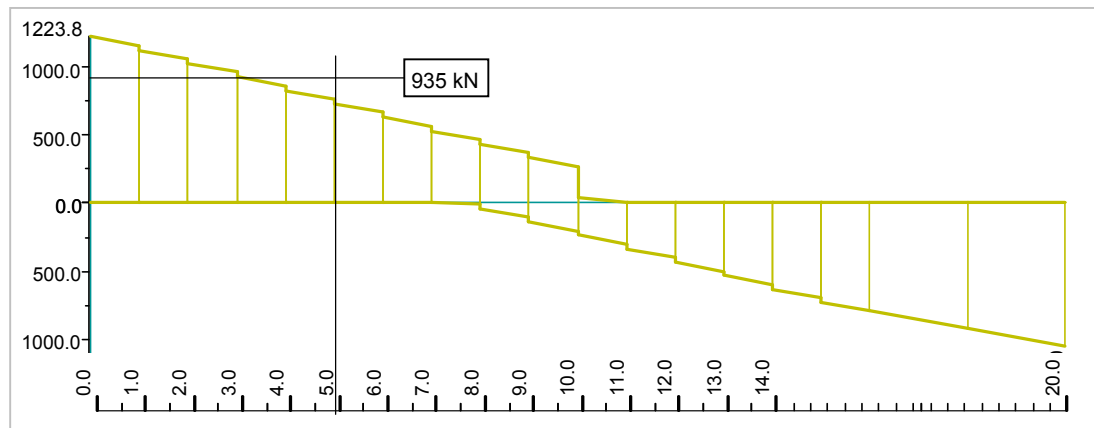
Voor de maximale waarde van de dwarskracht geldt de oplegreactie in het steunpunt. Deze is

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\Sigma M_A = -F_B \times 20 + \frac{1}{2} \times 65,00 \times 20 + 19 \times 225 + 18 \times 225 + 14 \times 225 = 0$$

$$\rightarrow F_B = 1.224 \text{ kN}$$

De maatgevende dwarskracht is ook te berekenen met ESA Prima Win. De volgende dwarskrachtenlijn is gegenereerd:



Maatgevende dwarskrachten lijn met een 'mobile load'.

Met op de y-as de dwarskracht [kN] en op de x-as de locatie in de constructie [m]

Toelichting grafiek

De puntlasten van de assen zijn bewegelijk en kunnen overal op de brug staan. Indien deze in het midden staan zal dat voor een groot moment zorgen. Indien deze lasten richting een steunpunt komen zal dat ter plekke een grote dwarskracht opleveren. In ESA Prima Win zijn de puntlasten als een 'mobile load' ingevoerd. De overige lasten, eigen gewicht en veranderlijke belasting, zijn als een gelijkmatige belasting ingevoerd. De grafiek toont niet de dwarskracht lijn per situatie maar geeft de meest extreme waardes weer.

Berekening beugels in de balk

Voor $\tau_{\max}$ geldt: $F / (b \times d)$ en voor $F_{\max}$ ligt net iets naast de oplegging waardoor geldt $F_{\max} = 1223,8$ kN. Er geldt:

$$\tau_d = \frac{F}{b \times d} = \frac{1223,8 \times 10^3}{500 \times 1.505} = 1,63 \text{ N/mm}^2 \text{ voor het beton geldt dat: } \tau_{\text{eigen}} = 0,86 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\text{benodigd}} = 1,63 - 0,86 = 0,77 \text{ N/mm}^2 \text{ gekozen beugels: bgls } \emptyset 10 - 150 \text{ (met } \tau = 0,82 \text{ N/mm}^2)$$

Om overal deze beugels toe te passen is niet nodig, want zoals in de grafiek te zien is, is er in het midden minder dwarskracht. Smallere beugels of een ruimere hart op hart afstand zou kunnen worden toegepast. Om praktische redenen wordt er gezocht naar een punt gezocht waarbij dezelfde beugeldikte wordt gebruikt en de h.o.h. afstand twee maal ruimer is.

Locatie waar twee maal minder beugels ook voldoet

$$\tau_{\text{benodigd}} = 0,77 / 2 = \tau_d - 0,86 \rightarrow \tau_x = 0,77 / 2 + 0,86 = 1,24 \text{ N/mm}^2$$

Hiermee is F te bepalen met $F = \tau_x \times b \times d = 1,24 \times 500 \times 1.505 = 935$ kN.

Uit de grafiek te lezen $\rightarrow$ op $l = 3,1$ m vanaf het steunpunt. Om zekerheids- en praktische redenen is gekozen de beugels $\emptyset 10 - 100$ tot $l = 5,0$ m (kwart van constructie) te laten door lopen.

Dus in het gebied $5,0 \text{ m} < l < 15,0 \text{ m}$ liggen de beugels $\emptyset 10 - 300$.

Verder is vanuit de grafiek te lezen dat de maatgevende dwarskracht minimaal ~ 500 kN is. Waardoor geldt dat $\tau_{\text{minimaal}} = 1,0 \text{ N/mm}^2 > \tau_{\text{eigen}}$. Het toepassen van beugelwapening is benodigd over de gehele lengte. Voor het totale beeld van de wapening in de balk, zie het figuur in de conclusie.

8.5 Voorspanverliezen

Tijdens en na het voorspannen van een betonnen constructie gaat een deel van de voorspanning verloren als gevolg van onmiddellijk en vertraagd optredende verliezen. Ter compensatie van deze verliezen dient de aan te brengen voorspankracht groter te worden. In deze paragraaf worden de verliezen bepaald.

Gegevens

Voorspankracht (F)	8.200 kN
Aanvangsspanning staal	1.350 N/mm ²
Benodigd staal	6.889 mm ²
Aangenomen systeem Dywidag met A _s =	6.969 mm ²

De onmiddellijke optredende verliezen zijn onder andere:

1. De wrijving in de spankanalen bij nagerekt voorspanstaal en een gebogen of geknikt kabelverloop,
2. De intrekking in de verankering
3. De elastische verkorting tijdens of na het aanbrengen van de voorspankracht

Tot de vertraagd optredende verliezen behoort:

1. de kruipverkorting van beton,
2. de krimpverkorting van beton,
3. de relaxatie van het voorspanstaal

Waarmee geldt: $F_{pw} = F_{po} - \Delta F_{pi} - \Delta F_{pw}$

Met

- F_{pw} werkvoorspankracht ($t \rightarrow \infty$)
 F_{po} voorspankracht tijdens het spannen
 ΔF_{pi} de som van de onmiddellijke optredende verliezen
 ΔF_{pw} de som van de vertraagd optredende verliezen

Zie bijlage 26 voor de berekening van de voorspanverliezen.

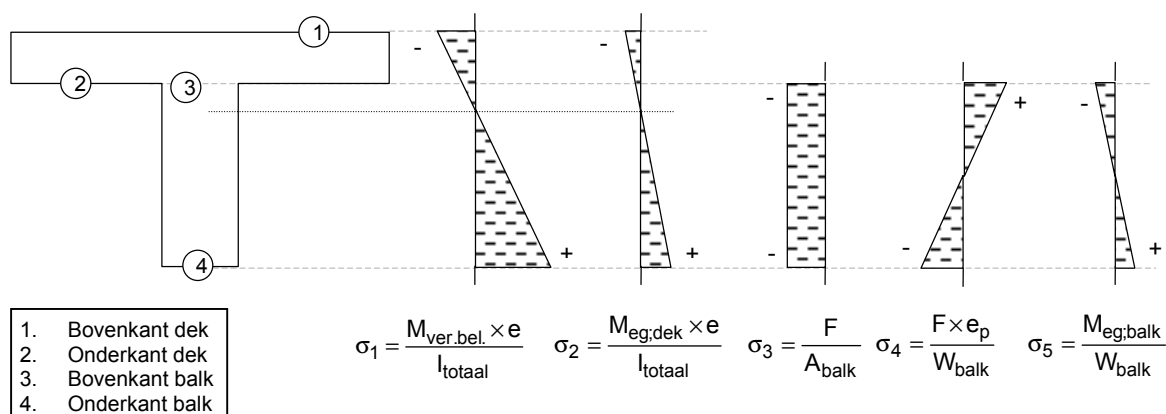
Conclusies:

- Voorspankracht tijdens het spannen $F_{po} = 8.200$ kN
- Werkvoorspankracht $F_{pw} = 8.200 - 1.640 = 6.560$ kN
- De som van de onmiddellijke optredende verliezen $\Delta F_{pi} = 128,7$ kN
- De som van de vertraagd optredende verliezen $\Delta F_{pw} = 1.510,9$ kN
- Waarmee het totale verlies op 20,1% komt.
- Gekozen staal Dywidag voorspansysteem met strengen (type 6809)
- Met vier maal negen draden van diameter 15,7 mm. Technisch: 4 x 9 Ø 15,7

8.6 Conclusie controle spanningen

Algemeen geldt:

- **Fase 1: Balk tijdens de productiefase ($t = 0$)**
 - Met de gegevens A, W en M_{eg} van de balk.
 - σ_3 en σ_4 de volledige voorspankracht F_{po} (zonder verliezen)
 - σ_5 uitsluitend het eigen gewicht q_{eg} opgenomen door het balk profiel.
- **Fase 2: De balken zijn geplaatst het dek is gestort ($t = 1$)**
 - $\sigma_1 = 0$ want de veranderlijke belastingen zijn nog niet van toepassing.
 - σ_2 het eigen gewicht het dek en overige permanente belastingen opgenomen door het T-profiel.
 - σ_3 en σ_4 de aanvangsspanning F_{pi} (alleen onmiddellijke verliezen zijn opgetreden)
 - σ_5 het eigen gewicht van de balk opgenomen door het balkprofiel.
- **Fase 2+: Gebruiksfase met maatgevende belasting combinatie ($t = \infty$)**
 - σ_1 de veranderlijke belastingen de factor 1,50 opgenomen door het T-profiel.
 - σ_2 het eigen gewicht het dek en overige permanente belastingen (x 1,20) opgenomen door het T-profiel.
 - σ_3 en σ_4 de werkvoorspanning F_{pw} (alle verliezen zijn opgetreden)
 - σ_5 het eigen gewicht van de balk (x 1,20) opgenomen door het balkprofiel.



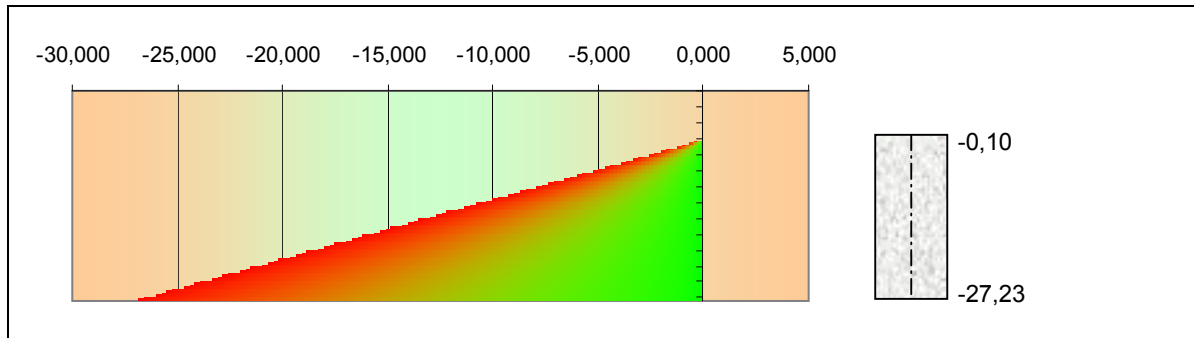
De spanningen zijn berekend in [bijlage 27 – berekeningen spanningen](#). In de tabel hieronder zijn de waarden weergegeven.

Spanningen bovenzijde	Fase 1		Fase 2		Fase 2+	
$\sigma_1 = M_{vb} \cdot e / I_{totaal}$					σ_1	-5,61
$\sigma_2 = M_{eg;dek} \cdot e / I_{totaal}$			σ_2	-2,53	σ_2	-3,03
$\sigma_3 = F / A_{balk}$	σ_3	-13,67	σ_3	-13,46	σ_3	-10,93
$\sigma_4 = F \times e / W_{balk}$	σ_4	19,82	σ_4	19,52	σ_4	15,85
$\sigma_5 = M_{eg;balk} / W_{balk}$	σ_5	-6,25	σ_5	-6,25	σ_5	-7,50
1. Spanning bovenkant dek			σ_2	-2,53	$\Sigma \sigma_{1+2}$	-8,65
2. Spanning onderkant dek			$\sigma_{2;lokaal}$	-0,72	$\Sigma \sigma_{1+2;lokaal}$	-2,47
3. Spanning bovenkant balk	$\Sigma \sigma_{3+4+5}$	-0,10	$\Sigma \sigma_{2+3+4+5}$	-0,92	$\Sigma \sigma_{1+2+3+4+5}$	-2,58

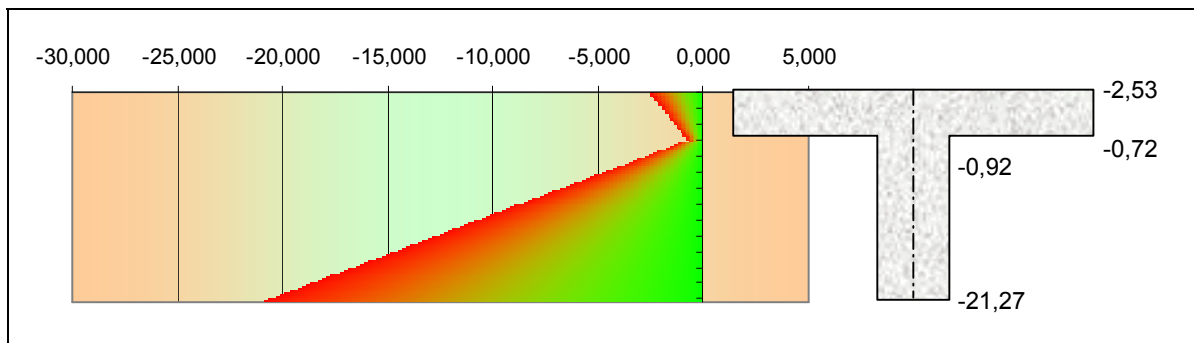
Spanningen onderzijde	Fase 1		Fase 2		Fase 2+	
$M_{vb} / W_{ligger}; onder$					σ_1	12,13
$M_{eg;dek} / W_{ligger}; onder$			σ_2	5,46	σ_2	6,56
F / A_{balk}	σ_3	-13,67	σ_3	-13,46	σ_3	-10,93
$F \times e / W_{balk}$	σ_4	-19,82	σ_4	-19,52	σ_4	-15,85
$M_{eg;balk} / W_{balk}$	σ_5	6,25	σ_5	6,25	σ_5	7,50
4. Spanning onderkant balk	$\Sigma \sigma_{3+4+5}$	-27,23	$\Sigma \sigma_{2+3+4+5}$	-21,27	$\Sigma \sigma_{1+2+3+4+5}$	-0,59

Alle waarden zijn spanningen (σ) in N/mm^2

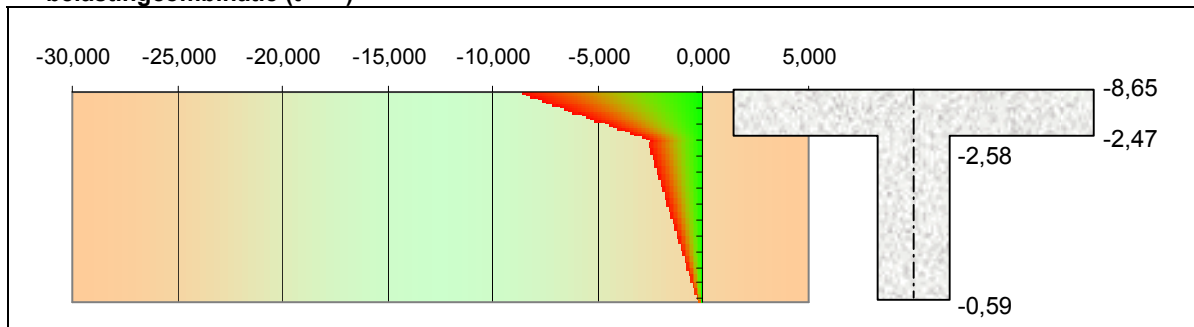
Fase 1: Balk tijdens de productiefase ($t = 0$)



Fase 2: De balken zijn geplaatst het dek is gestort ($t = 1$)



Fase 2+: Gebruiksphase met maatgevende belastingcombinatie ($t = \infty$)

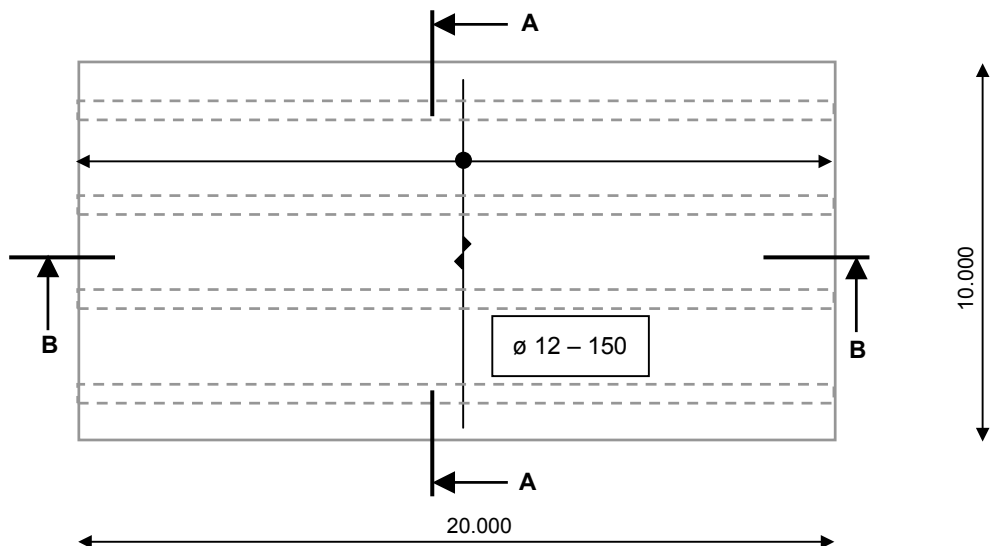


Eis $0,00 \text{ N/mm}^2 > \text{optredende spanning in } x > -29,25 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{voldoet}$

8.7 Wapening

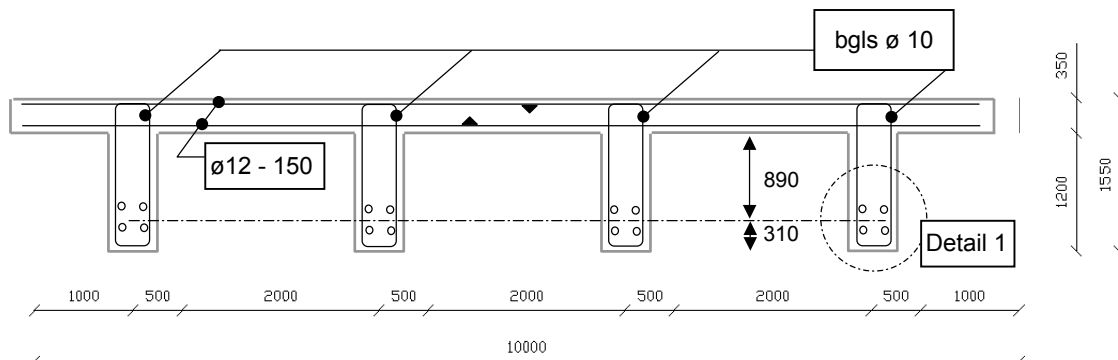
Nu alle berekeningen zijn voltooid, kunnen alle resultaten betreffende de wapening getekend worden. Daartoe worden drie tekeningen gemaakt: een bovenaanzicht, een dwarsdoorsnede in de richting van de overspanning en een dwarsdoorsnede haaks op de overspanning.

Te beginnen bij de wapening in het dek. Aangezien dit een bovenaanzicht is, zijn de kijkrichtingen van de doorsnedes aangegeven. In het dek komt alleen wapening dwars op de hoofdoverspanning te liggen.



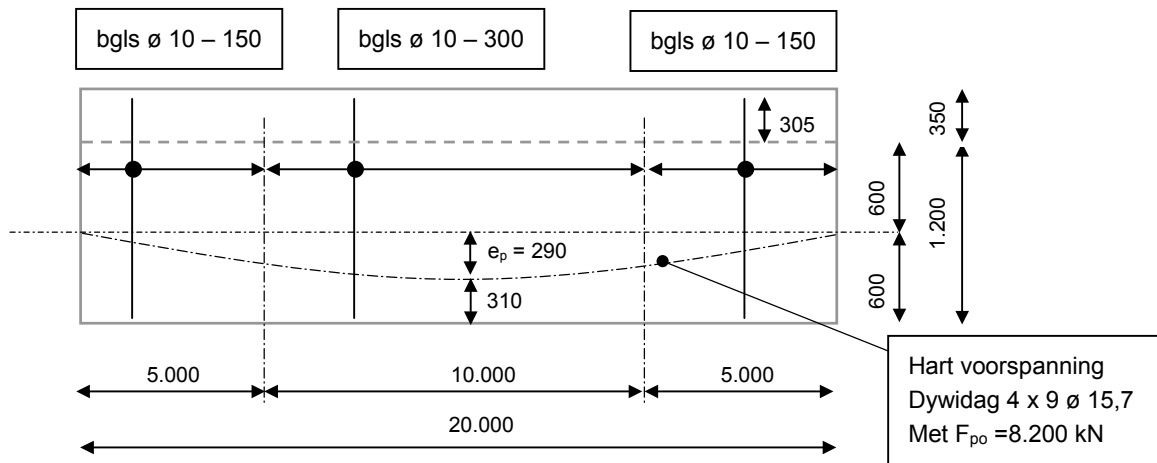
Bovenaanzicht van dek (schaal 1:200) - niet getekend: de beugelwapening, daarvoor zie doorsnede B-B)

In doorsnede A-A is het mogelijk om zowel de hoogteligging van de voorspankabels, dekwapening en beugelwapening te tekenen. Hierbij moet opgemerkt worden dat de beugelwapening in het gebied van doorsnede A-A om de 300 mm is, in tegenstelling tot de opleggingen, waar de beugelwapening om de 150 mm komt te liggen. Voor verdere uitwerking zie doorsnede B-B.



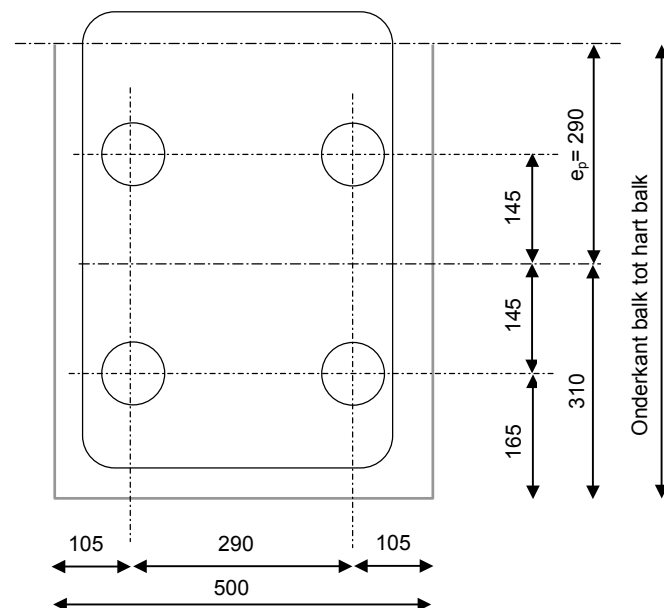
Doorsnede A-A (schaal 1:75) - hart op hart afstand van de beugels zijn per gebied verschillend.

In doorsnede B-B zijn de beugels en het hart van de voorspanning getekend. Hierin is het parabolische verloop van de voorspankabels goed te zien. Verder zijn de beugels getekend, deze zorgen voor de aanhechting tussen het dek en de balken.



Doorsnede B-B (zijaanzicht met schaal 1:200)

In detail 1 zijn de onderlinge afstanden van de voorspankabels getekend.



Detail 1 Ligging voorspankabels (schaal 1:10)

H9

Eindresultaat en Evaluatie



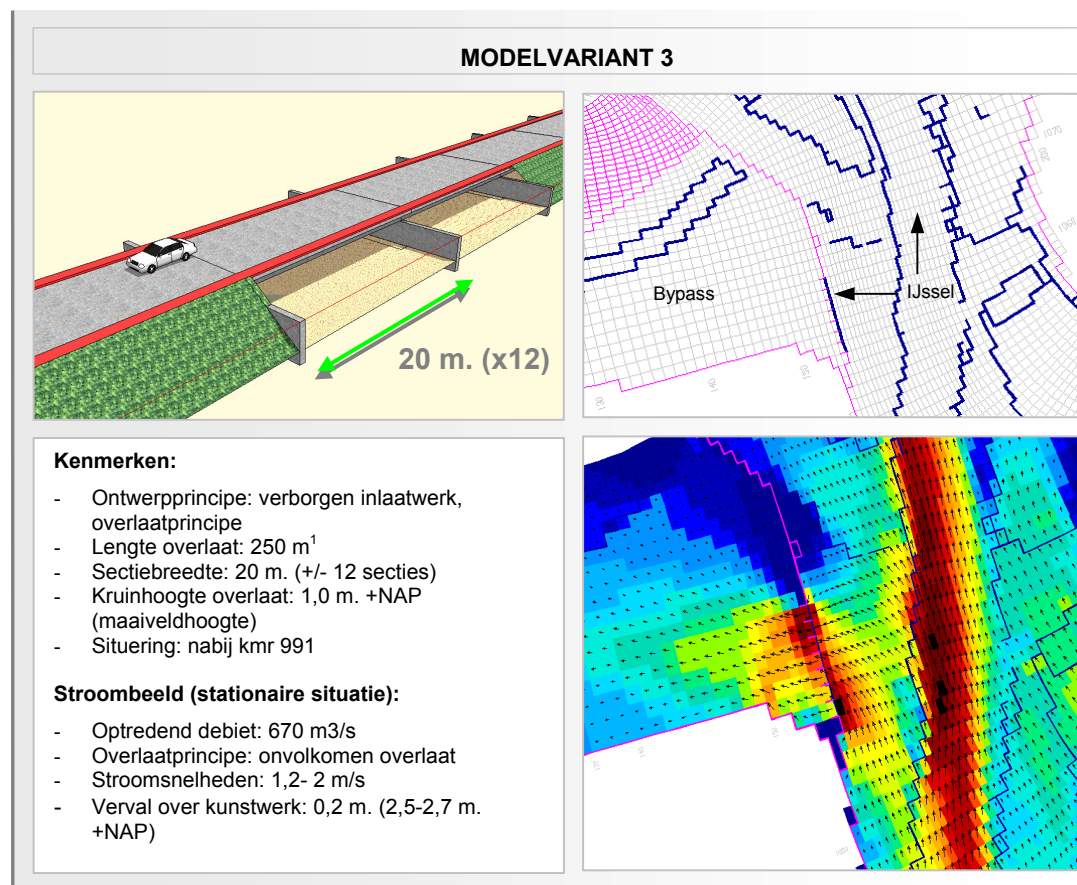
In dit laatste hoofdstuk van het afstudeerrapport wordt het eindresultaat gepresenteerd van het ontwerp van de inlaatconstructie. Naast een overzicht van de resultaten en visualisaties zal er ook kritisch worden beschouwd welke waarde aan de resultaten moet worden toegekend. Ook worden aanbevelingen gedaan die betrekking hebben op een eventueel vervolg van het ontwerpproces. Het tweede deel van dit hoofdstuk bevat een uitgebreide evaluatie van het project. De projectresultaten zullen worden getoetst aan de geformuleerde probleem- en doelstelling. Ook het verloop van het ontwerpproces zal worden geëvalueerd.

9.1 Eindresultaten

Volgend uit de opgestelde constructieve en hydraulische ontwerpisen is het ontwerp van de inlaatconstructie stap voor stap verder uitgewerkt. Op enkele ontwerpaspecten is meer nadruk gelegd, te weten de modelberekeningen in Waqua, het ontwerp van bodembescherming en de constructieve uitwerking van het dek. In de volgende subparagrafen worden de eindresultaten in combinatie met visualisaties uiteengezet.

9.1.1 Stroombeeld

Uit de diverse hydraulische modelvarianten die in Waqua zijn doorgerekend is uiteindelijk modelvariant 3 gekozen:



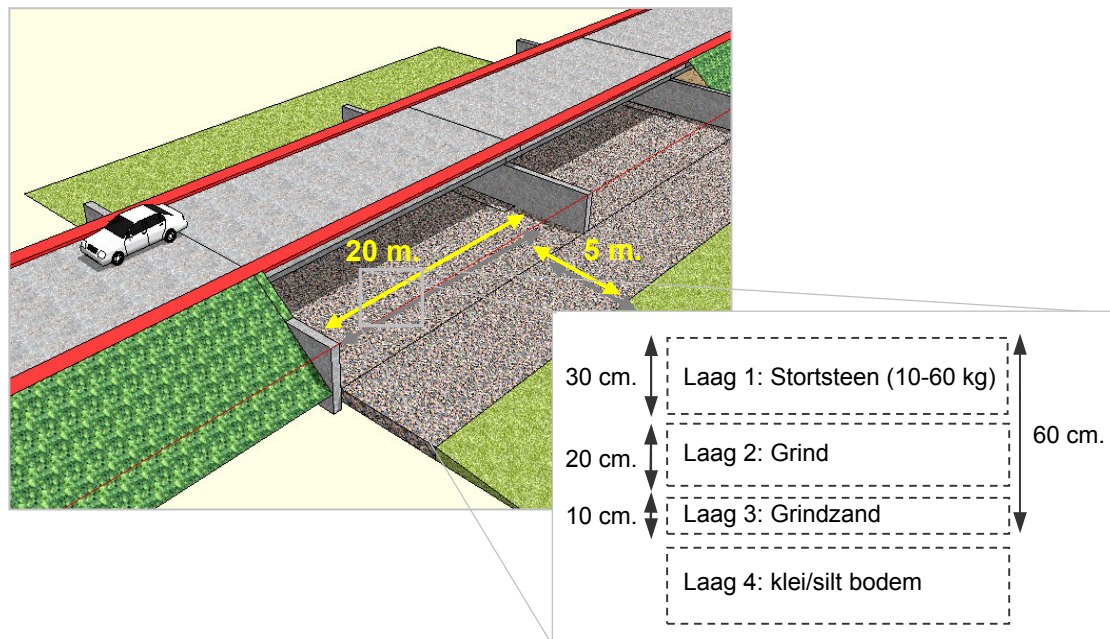
Waardering resultaten

De configuratie van het Waqua model die voor het variantenonderzoek als uitgangspunt heeft gediend, is gelijk aan het model dat voor onderzoek van DHV is gebruikt. De waardering van de resultaten kan daarom in principe gelijk worden gesteld aan de waarde die DHV hecht aan de uitkomsten.

Een opmerking is wel op zijn plaats als het gaat om de schematisering van de inlaatconstructie. Dit blijft een benadering van de werkelijkheid. Zo komt het aantal schotjes in Waqua niet overeen met het werkelijke aantal verticale wanden die toegepast zijn in het ontwerp. In de praktijk zal dit extra weerstand geven voor de stroming.

9.1.2 Bodembescherming

Voor de inlaatconstructie is het voorlopig ontwerp van de bodemverdediging uitgewerkt. Uitgangspunt is geweest om een volledig granulaire bodembescherming toe te passen. De kern van de resultaten zijn hieronder weergegeven:



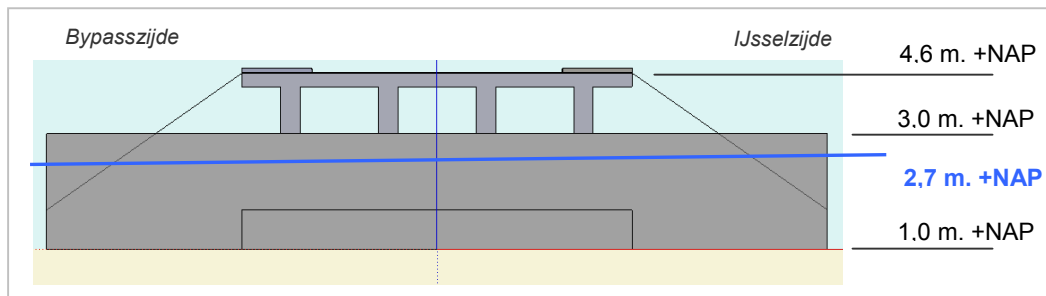
Waardering resultaten

Voor het ontwerp van de bodembescherming is een handleiding van Rijkswaterstaat gevolgd. Voor de lengtebepaling en het dimensioneren van de toplaag is de handleiding gevolgd.

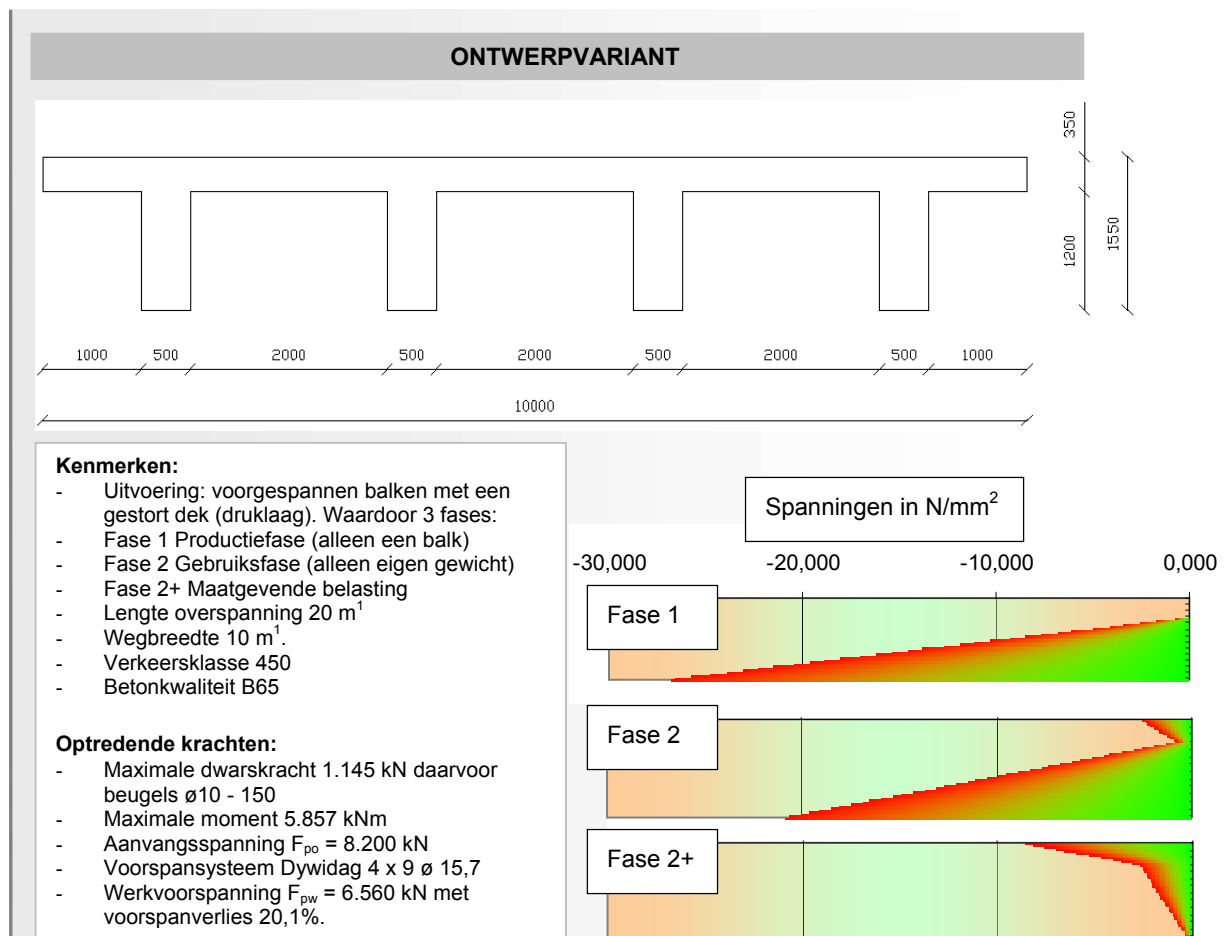
Opmerkingen:

- In de handleiding worden uitgebreide formules toegepast, waarin gebiedsgebonden factoren kunnen worden verwerkt. Voor een aantal factoren zijn waardes aangenomen die wellicht niet geheel overeenkomen met de werkelijkheid. Nader onderzoek kan dit uitwijzen. De resultaten van de huidige berekeningen zijn indicatief.
- Voor de stroomsnelheid over de constructie is de maximale waarde van de stationaire stromingstoestand aangenomen. Dit lijkt een redelijke aanname, maar het is nog van belang om te onderzoeken welke stromingsverschijnselen optreden voordat deze toestand is bereikt. Indien hogere stroomsnelheden optreden in de beginfase, kan een zwaardere bodembescherming benodigd zijn.
- Voor het berekenen van de verticale opbouw van de bodemverdediging zijn vuistregels toegepast. Deze geven een goede indicatie, maar voor een kwalitatief goed definitief ontwerp zijn nauwkeuriger berekeningen noodzakelijk.
- Er is aangenomen dat de bodembescherming in de constructie gelijk is als achter de inlaat. Dit is een goede benadering, maar met name rond de wanden kunnen de hydraulische belastingen anders zijn. Dit dient nader te worden beschouwd.
- De aansluiting van de bodembescherming op de constructie is een punt van aandacht. Met name het effect van piping kan een ongewenst gevolg zijn van de aanwezigheid van bodembescherming over de breedte van de inlaat. In gesloten situatie zou dit wellicht kunnen optreden, indien er water tegen de dijk staat.

9.1.3 Constructief ontwerp dek - dimensies



Doorsnede totaalbeeld



Waardering resultaten

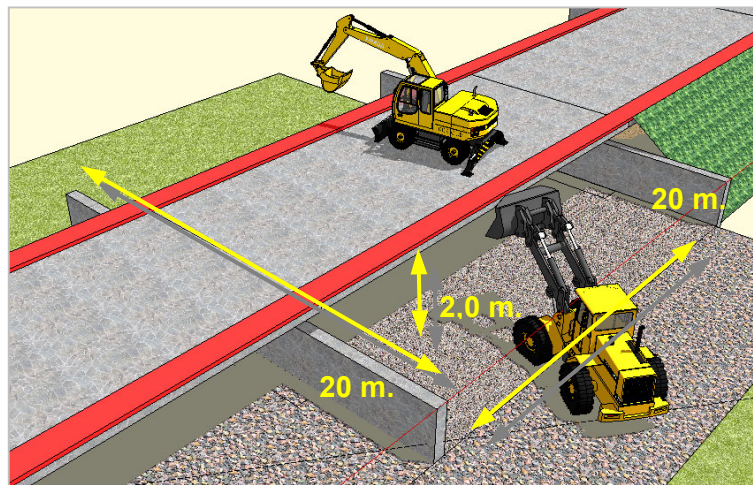
Voor het ontwerp van het betonnen dek is een handleiding van Hogeschool Utrecht gevolgd. Voor de verder uitwerking zijn resultaten met ESA Prima Win gecontroleerd

Opmerkingen:

- De constructie bestaat een balk en een dek. Hierdoor kan het niet als een geheel worden ingevoerd in ESA Prima Win.
- Een praktische uitwerking is niet meegenomen in het ontwerp. Denk hierbij aan bekisting, hulpwapening, hijs-elementen, etc. Dit zijn aspecten die passen in het 'Definitief Ontwerp'.
- Aangenomen is dat de wanden horizontale krachten kunnen opnemen. Dit zal niet voor veel problemen zorgen aangezien de hoogte-breedte verhouding zeer positief is (hoogte van 2,0 m en een breedte van 0,5 m).
- Oplegpunten kunnen nog worden uitgewerkt. Goed mogelijk hiervoor is een standaardoplegging.
- Constructief gezien is er alleen naar het dek gekeken. Fundering, geotechnische aspecten, wanden en stabiliteit van de constructie zal in een latere fase moeten worden uitgezocht.

9.1.4 Openingsprocedure

In het rapport is kort aandacht gegeven aan de haalbaarheid van het ontwerp in de praktijksituatie als de openingsprocedure in gang moet worden gezet. De volgende werkwijze is voorgesteld en onderbouwd:



- Extreme afvoercondities -

Werkwijze

Per sectie initiële bressen graven in de dijk (buitenzijde) m.b.v. graafmachines.

Hoeveelheden

Per sectie +/- 640 m³ erosiemateriaal (combinatie zand + klei)

Tijdsduur ontgraven

Uitgangspunt: 1 uur ontgravingstijd per sectie.
Totale tijd afhankelijk van beschikbaar materieel.

Waardering resultaten

Het slagen van het openingsproces is cruciaal voor het functioneren van de inlaat indien noodzakelijk. Indien het openingsproces een goede kans van slagen heeft, komt dit de betrouwbaarheid van de constructie ten goede. Uit de onderstaande opmerkingen komt naar voren dat er nog veel onderzoek nodig is naar de haalbaarheid van de constructie.

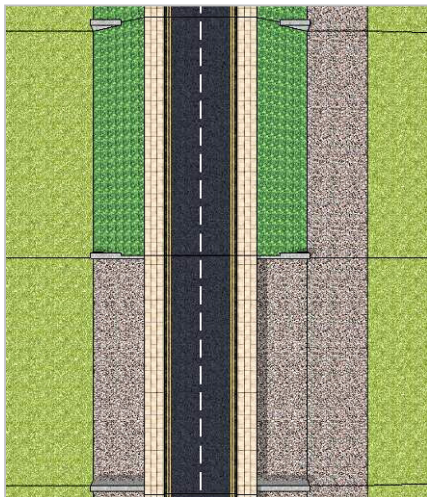
Opmerkingen:

- Voor het bepalen van de benodigde ontgravingstijd en zijn grove aannames gedaan om een eerste indruk te krijgen van de situatie. Nader onderzoek is noodzakelijk. Wel is te verwachten dat het maken van bressen per sectie binnen enkele dagen te realiseren is. Wel belangrijk aandachtspunt is het kunnen garanderen van de veiligheid van ontgraven.
- Hoe de bresgroei zich in werkelijkheid zal ontwikkelen is nog onderwerp van studie. Het onduidelijk of de bresgroei zich blijft ontwikkelen, ook als er al een waterstand achter het kunstwerk is ingesteld. Verder zijn er veel factoren die invloed hebben op het verloop van het erosieproces. De kracht van het water mag echter niet worden onderschat.
- Vanwege de benodigde tijd voor ontgraven is het noodzakelijk dat er een goed waarschuwingssysteem is, dat met enige nauwkeurigheid kan voorspellen of het openen van de inlaat noodzakelijk is. Bij het falen van dit systeem is het denkbaar dat de inlaatconstructie niet tijdig te openen is. Dit risico heeft invloed op de betrouwbaarheid van de constructie.

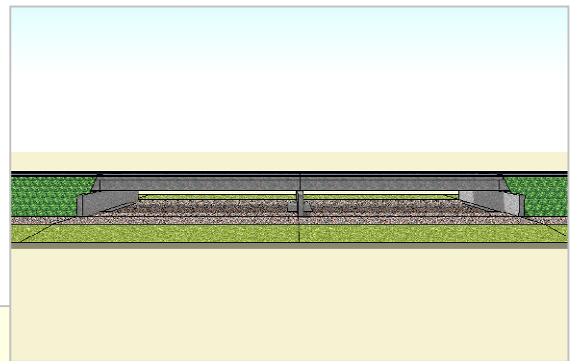
9.1.5 Impressie eindbeeld

De dimensionering van de constructie heeft in fasen plaatsgevonden, aangezien er zowel op hydraulisch als constructief vlak eisen voor zijn opgesteld tijdens het ontwerpproces. Uiteindelijk is de constructie als geheel in een 3D tekenprogramma ingevoerd. De diverse aanzichten geven een beeld van de dimensies en verhoudingen, en bieden voldoende detailniveau voor het de ontwerpstatus VO+ (voorlopig ontwerp).

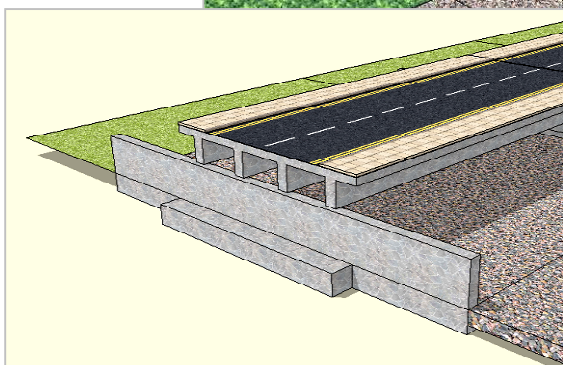
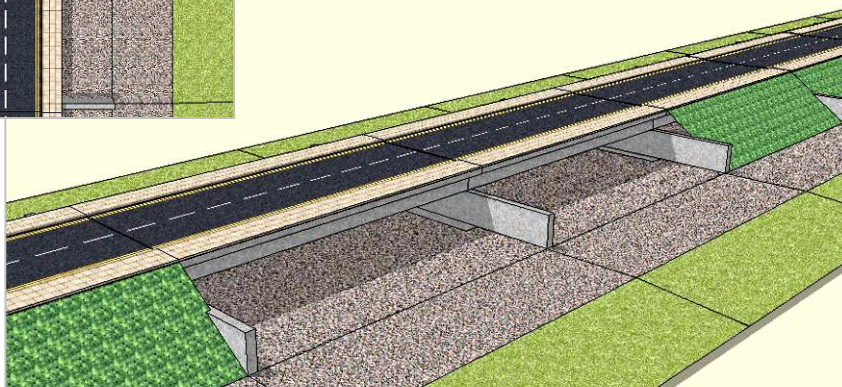
EINDRESULTAAT



Bovenaanzicht



Vooraanzicht



Betonvorm



Erosie grondsecties geïnitieerd d.m.v. graafwerkzaamheden

9.2 Evaluatie

In deze paragraaf zal het project worden geëvalueerd. Er zal worden teruggekeken op het verloop van het ontwerpproces, de samenwerking en begeleiding, de onderwerpen die uiteindelijk wel en niet aan bod zijn gekomen en de leerervaringen die zijn opgedaan. Ook zal de probleem- en doelstelling van het project teruggekoppeld worden. Tenslotte zullen aanbevelingen worden gedaan.

9.2.1 Verloop ontwerpproces

Het ontwerpproces van een (waterbouwkundige) constructie kent verschillende fasen. In hoofdstuk 4 is een schema opgenomen waarin de belangrijkste stappen staan vermeld. In het afstudeerproject is ervoor gekozen om het ontwerp uit te werken tot VO+ niveau (voorlopig ontwerp). Daartoe behoort het dimensioneren van de constructie op hoofdlijnen en het maken van een schetsontwerp. Een set aan randvoorwaarden en een programma van eisen dienen als achtergronden bij het formuleren van de ontwerpeisen.

Terugkijkend op de afstudeerperiode kan worden geconcludeerd dat de genoemde aspecten die behoren tot het definiëren van een voorlopig ontwerp aan de orde zijn gekomen. Daarbij moet worden opgemerkt dat enkele aspecten binnen het ontwerp meer aandacht hebben gekregen dan anderen. Reden hiervoor is het feit dat de afstudeerdifferentiatie verwerkt is binnen het project. Op waterbouwgebied is het hydraulisch ontwerp nader uitgewerkt, op constructief vlak is verder ingegaan op het ontwerp van het 'brugdek'. Onderwerpen die niet of minder aan de orde zijn gekomen betreffen het funderingsvraagstuk, het toetsen van sterkte/stabiliteit van de gehele constructie en het verder ingaan op faalmechanismen als piping. Helaas was de tijd hiervoor te kort om daar verder op in te gaan.

9.2.2 Samenwerking en begeleiding

In de planning van het afstudeerproject is er vanuit gegaan dat de eerste fasen meer samenwerking zouden vragen dan de rest van de periode. Dit is inderdaad het geval geweest. De eerste weken, waarin naast een algemene beschouwing ook het functioneel programma van eisen is opgesteld, is er veel samengewerkt. Door het opsplitsen van (deel)taken is de samenwerking nuttig geweest.

De tweede periode is de samenwerking afgenomen. Bij het opstellen van het constructief en hydraulisch programma van eisen konden de taken al duidelijk worden verdeeld, al was de input van beide onderzoeken toen nog van invloed op de uitgangspunten van het ontwerp. Dat was soms lastig, aangezien niet al het onderzoek parallel heeft gelopen.

De laatste weken is er duidelijk invulling gegeven aan de afstudeerdifferentiatie. Werkzaamheden zijn in deze periode nagenoeg onafhankelijk van elkaar uitgevoerd. Door de totaal verschillende onderwerpen was dit goed mogelijk, zonder het gevaar dat resultaten uiteindelijk met elkaar in botsing zouden komen.

De begeleiding vanuit DHV is goed geweest. Er is meer dan voldoende materiaal aangereikt om te gebruiken voor de uitwerking van het onderzoek. Ook zijn er regelmatig tips en aanwijzingen gegeven die goed toepasbaar waren. Regelmatig zijn er zeer nuttige voortgangsbesprekingen gevoerd. Ook de hulp van diverse andere collega's bij DHV was zeer nuttig. Over het algemeen was de bereidheid om te helpen groot en was men geïnteresseerd om mee te kijken met ons proces.

Vanuit school zijn tijdens de afstudeerperiode enkele voortgangsgesprekken gevoerd. Aangezien er geen bijzondere problemen zijn opgetreden, is de begeleiding in zekere zin beperkt gebleven. De ontmoetingen zijn echter zeker zinvol geweest; zowel inhoudelijk als op het gebied van leesbaarheid zijn belangrijke verbeteringen voorgesteld.

9.2.3 Evaluatie probleem- en doelstelling

De kern van de inhoud van het afstudeerproject is geformuleerd in de probleem- en doelstelling. In deze paragraaf worden beide geëvalueerd.

Probleemstelling:

Welke oplossing voor de inlaatconstructie is het best toepasbaar in de toekomstige bypass bij Kampen?

Deze vraag heeft absoluut centraal gestaan gedurende het verloop van het ontwerpproces. Om het antwoord te kunnen onderbouwen is eerst de problematiek in kaart gebracht en zijn er vervolgens randvoorwaarden en eisen opgesteld. Vervolgens hebben twee uitgebreide variantenanalyses geleid tot een keuze van een ontwerpvariant. Daarna heeft het ontwerp verder vorm gekregen na uitgebreider onderzoek naar de hydraulische aspecten en constructieve dimensionering.

Uiteindelijk heeft het onderzoek geleid naar de keuze voor een **waterbouwkundige inlaatconstructie**, ontworpen vanuit het principe van het **verborgen inlaatwerk**. De waterkerende veiligheidseisen, de hydraulische eisen voor de watervoerende situatie, gecombineerd met de vereiste weg-/verkeersfunctie, hebben uiteindelijk geleid tot deze keuze voor een constructieve uitvoering, bestaande uit **weg te graven grondsecties**, gescheiden door **verticale betonwanden** en een opgelegd **brugdek**. De wanden dienen daarbij zowel als ondersteuning van het brugdek, als voor stroomgeleiding. In geopende toestand kan de constructie tot **670 m³/s** afvoeren, waardoor **voldoende waterstandsdeling** in de IJssel wordt gehaald.

EVALUATIE

Er kan worden geconcludeerd dat er een antwoord is gegeven op de hoofdvraag die in de probleemstelling is geformuleerd. De vraag kan gesteld worden of het ontwerp kwalitatief goed onderbouwd is. Een tweede vraag die opkomt is of het maatschappelijk draagvlak voldoende zal zijn voor de geboden oplossing.

1. *Is het ontwerp kwalitatief goed onderbouwd?*

Het ontwerpproces kent verschillende fasen. Per fase kunnen uitspraken worden gedaan over de kwaliteit en volledigheid van de uitgevoerde activiteiten. Belangrijke stappen in het ontwerpproces zijn:

- Onderzoek problematiek;
- Opstellen van eisen en randvoorwaarden;
- Uitvoeren van variantenanalyses;
- Toepassing uitkomst variantenanalyse op situatie

Problematiek

De problematiek van de IJsseldelta is duidelijk naar voren gekomen en tijdens de afstudeerperiode. Het feit dat het project de aandacht heeft en zeer waarschijnlijk uitgevoerd gaat worden, geeft aan dat de problematiek serieus wordt genomen. Het nut en de noodzaak van de bypass kan dan ook goed worden onderbouwd, evenals de noodzaak van het toepassen van een waterbouwkundige constructie. Dit vanwege de unieke situatie in de IJsseldelta, waar zowel afvoer- als storminvloeden aanwezig zijn.

Opgestelde eisen en randvoorwaarden

Voor het opstellen van functionele eisen is de Leidraad Kunstwerken als richtlijn gevolgd. De gevolgde procedure heeft dus een officieel karakter. Opmerking daarbij is dat de belangen van verschillende groepen (landschappelijke waarden, evacuatiedoeleinden) aangenomen zijn. Wel zijn bestaande bronnen gebruikt om een beeld van de aanwezige belangen.

De hydraulische Randvoorwaarden 2001 zijn gebruikt voor het bepalen van hydraulische ontwerpeisen. Opmerking daarbij het feit dat naar verwachting binnenkort nieuwe hydraulische randvoorwaarden zullen worden gepubliceerd. Dit betekent wellicht dat er ook andere eisen van toepassing worden op de inlaatconstructie. Dat kan gevolgen hebben voor de benodigde capaciteit van het ontwerp.

Variantenanalyse

Voor het uitvoeren van variantenonderzoek is gebruik gemaakt van de Multi Criteria Analyse (MCA). Met deze analyse is de waarde van de te beoordelen criteria aan te geven. Ondanks de relatief uitgebreide beoordeling blijft het een instrument wat te bespelen is. Het toekennen van cijfers aan bepaalde criteria blijft uiteindelijk een mening. Verschillende uitkomsten met hetzelfde beoordelingsinstrument zijn dus mogelijk; 100% objectiviteit is niet mogelijk.

Meer toegespitst op de keuzes voor een reguleerbare constructie en vervolgens het verborgen inlaatwerk zijn de volgende opmerkingen te plaatsen:

- De eis voor een reguleerbare constructie komt voort uit de combinatie van storm- en afvoercondities die effect hebben op de waterstanden in de IJssel. De eis voor de inlaatconstructie om water te kunnen keren onder stormcondities komt voort uit de eis dat de bypass niet als badkuip mag vollopen. Indien dit beleid anders wordt benaderd (acceptatie van hogere dijken in de bypass) vervalt de waterkerende eis voor de inlaatconstructie. Een eenvoudiger constructie, zoals een plaatselijk verlaagd dijklichaam, kan dan voldoende zijn. Hier is het afwegen van belangen de manier om tot een keuze te komen.

- Er zijn twijfels bij het toekennen van het predikaat 'reguleerbaar' aan de verborgen inlaat. De werking moet weliswaar van buitenaf geïnitieerd worden en is enigszins controleerbaar, maar het openingsproces is veel minder goed te beheersen dan bij andere constructies die 'reguleerbaar' zijn.
- De gunstige score in de categorie 'kosten' is doorslaggevend geweest voor de hoge beoordeling het verborgen inlaatwerk, ten opzichte van andere varianten. Dit lijkt een juiste beoordeling, maar een onderzoek naar de werkelijke kosten in vergelijking met de andere opties is niet uitgevoerd. Dit is wel noodzakelijk om deze score goed te kunnen onderbouwen.

Ontwerp voor bypass

Voor een aantal ontwerpeisen (kerende hoogte, betrouwbaarheid opening) is de Leidraad Kunstwerken gevolgd. Verder is het ontwerp uitgewerkt op enkele hydraulische en constructieve aspecten.

Hydraulisch ontwerp

Voor de inlaatconstructie zijn handberekeningen gemaakt waarbij indicatief dimensies zijn bepaald. Vervolgens zijn met het Waqua model modelvarianten doorgerekend. Uiteindelijk is op basis van een uitgebreide beoordeling een modelvariant gekozen. Met de gevolgde procedure zijn naar verwachting realistische resultaten verkregen die een goed beeld geven van de technische haalbaarheid van het ontwerp. In paragraaf 9.1 zijn de specifieke resultaten m.b.t. de stromingsverschijnselen rond het inlaatwerk, alsook het ontwerp van de bodembescherming en de openingsprocedure, reeds beoordeeld.

Constructief ontwerp

De constructieve uitwerking van het ontwerp is met name toegespitst geweest op het dimensioneren van het brugdek. Daarbij hebben de geldende normen als ontwerprichtlijn gediend. Naar verwachting kan dit ontwerp goed en efficiënt worden toegepast op de inlaatconstructie. Door de keuze om het ontwerp op hoger niveau uit te werken hebben andere aspecten minder nadruk gekregen. Met name het funderingsvraagstuk en stabiliteitseisen zijn niet uitgebreid beschouwd. Deze onderwerpen zijn van belang om het voorlopig ontwerp beter en vollediger te kunnen onderbouwen.

2. Is er voldoende maatschappelijk draagvlak voor de geboden oplossing?

Deze vraag is moeilijk te beantwoorden maar tegelijk van cruciaal belang om van ontwerp tot realisatie te komen. Gezien de huidige plannen voor de IJsseldelta is er steeds meer draagvlak voor het aanleggen van een bypass. Voor de beoordeling van het ontwerp van de inlaatconstructie zullen (rijks)overheden hoofdzakelijk inspraak hebben. Gezien de verwachte lage gebruiksfrequentie en de huidige onzekerheid van functioneren zal het nut en de noodzaak van de inlaatconstructie zeker kritisch worden beoordeeld.

Doelstelling

Het tot stand brengen van een onderbouwd advies en principeontwerp voor de inlaatconstructie.

Met het in 9.1 gepresenteerde eindbeeld is een principeontwerp voor de inlaatconstructie gegeven. Dit rapport vormt de onderbouwing voor het ontwerp. Een evaluatie op de onderbouwing is gegeven als toelichting op het antwoord van de probleemstelling.

9.2.4 Aanbevelingen

Met de eindresultaten is een onderbouwd advies en principeontwerp voor de inlaatconstructie tot stand gekomen. Een ontwerp is echter nooit af. Daarom worden in deze paragraaf aanbevelingen gedaan die een voorzet geven bij de mogelijk volgende stappen in het ontwerpproces.

Aanbevelingen - klimaatverandering

- Klimaatveranderingen zijn actueel. De afvoerdeling van de grote rivieren in Nederland staat ter discussie. Er wordt geopperd om in de toekomst een hoger percentage van de totale waterafvoer via de IJssel te laten afvloeien. Het is aan te bevelen deze ontwikkelingen mee te nemen in de verdere besluitvorming rond de ontwikkeling van de IJsseldelta, waar de bypass onderdeel van uitmaakt.

Aanbevelingen – variantenanalyse

- Onzekerheid bestaat over de objectiviteit en juistheid van de resultaten van de variantenanalyses. Het is aan te bevelen om de waarderingen die worden toegekend beter te onderbouwen middels uit te voeren onderzoek naar bijvoorbeeld de benodigde financiële middelen.

Aanbevelingen – ontwerp

- Niet alle ontwerpaspecten die behoren tot een voorlopig ontwerp van een waterbouwkundige constructie zijn aan bod gekomen. Het is aan te bevelen om het funderingsvraagstuk, stabiliteitsvoorwaarden en faalmechanismen als piping nader te onderzoeken.
- Een belangrijke aanbeveling betreft de onderbouwing van de haalbaarheid van het openingsproces van het inlaatwerk. Er zijn nog veel vragen omtrent de ontwikkeling van bresgroei in dijklichamen. Ook de te volgen procedure en het op te stellen veiligheidsplan dient de aandacht te krijgen. Het is van cruciaal belang om een goed beeld te krijgen van het openingsproces bij het kunnen toetsen van de constructie op betrouwbaarheid.

Referenties

Boeken

<i>Titel</i>	<i>Auteur</i>	<i>druk</i>
Toegepaste vloeistofmechanica (over) Spannend staal – Basisboek	Nortier en de Koning W.H. Verburg	3 ^e
Constructieel gewapend beton	ing. R. Sagel, ing. A.J. van Dongen	1 ^e
De betoegelde rivier	Wilfred ten Brinke.	1 ^e
Helder rapporteren	Peter Nederhoed	7 ^e
Tabellen voor de waterbouwkunde	Ir. K.J. Briedé en Ir R. Blok	8 ^e
Projectmanagement	Roel Grit	3 ^e
Toegepaste Mechanica	Ir. Welleman	juni-01
Betontechnologie	Ing. C. Souwerbren	10 ^e
Voorgespannen Beton	Prof. Dr. Ir. J.C. Walraven en ir J.C. Galjaard	1997

Dictaten en rapporten

<i>Titel</i>	<i>Auteur</i>	<i>Nummer</i>
Betonconstructies	Ir. A.B. Winkel	Nr. 285
Lineair-elastische berekening van een betonskelet	Ir. A.B. Winkel	Nr. 290
Grondmechanica Fund. Techniek 1	U. Valkenier	Nr. 235
Geotechniek Bijzondere Onderwerpen	U. Valkenier	Nr. 236
Technische scope bypass IJsseldelta	Uitgebracht door DHV	
Scope waterbouwkundige kunstwerken	Uitgebracht door DHV	
Waterkeringen	T. Rinkema	Nr. 241
Hydraulische Randvoorwaarden 2001	Ministerie V&W	1 ^e 2001
Onderbouwing Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het Benedenrivierengebied	Ministerie V&W - RIZA rapport	2002.017
Onderbouwing Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor de IJsseldelta	Ministerie V&W - RIZA rapport	2002.018
De veiligheid van primaire waterkeringen in Nederland	Ministerie V&W	1 ^e 2004
Leidraad Kunstwerken	TAW	1 ^e 2003
Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken	TAW	1 ^e 1985
Technisch rapport Waterkerende Grondconstructies	TAW	1 ^e 2001
Technisch rapport Asfalt voor waterkeren	TAW	1 ^e 2002
Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies	TAW	1 ^e 1997
Leidraad Toetsen op veiligheid	TAW	1 ^e 1999

Nota Ruimte	Ministeries LNV, V en W, EZ, VROM	deel 4
Toelichting aanvullend deskundigenoordeel noodoverloopgebieden	Ministerie V&W	2003
Dubbele berging: mogelijk, gewenst?	Ministerie V&W - RIZA rapport	2004.007

Personen

<i>Persoon</i>	<i>Functie</i>
Teunis Louters	Afdelingshoofd DHV
Joost ter Hoeven	Projectleider DHV
Martijn Karelse	Projectleider DHV
Arnaud Casteleijn	Projectingenieur DHV
Tom van der Linden	Docent HU
Theo Rinkema	Docent HU