

Water storage in a dike

Een onderzoek naar het bergen van water rond dijken

CTB3000-16: Bachelor Eindwerk

Paul Thönissen



Water storage in a dike

Een onderzoek naar het bergen van water rond dijken

door

Paul Thönissen

Eerste begeleider: Ir. J.R. Moll, Technische Universiteit Delft
Tweede begeleider: Dr. J.P. Aguilar-Lopez, Technische Universiteit Delft
Externe begeleider: Dhr. G. Stroucken, Waterschap Limburg
Faculteit: Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft
Projectduur: Februari 2023 – april 2023

Voorwoord

Dit rapport is het bachelor eindwerk van mij, Paul Thönissen. Het bachelor eindwerk is de afsluiting van de bachelor Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Dank ben ik verschuldigd aan ir. Roelof Moll, dr. Juan Aguilar Lopez en dhr. Geert Stroucken voor hun begeleiding tijdens dit onderzoek. Daarnaast wil ik graag ir. Lindsey Schwidder en dhr. Jean-Paul de Garde bedanken voor hun hulp bij het praktische deel van dit project.

Het onderwerp van het bachelor eindwerk is 'Water storage in a dike'. Ik heb onderzocht of het mogelijk is om bij hoogwater water op te slaan in of rondom dijken en vervolgens in tijden van droogte het water weer te gebruiken. Dit onderzoek is geïnitieerd door Waterschap Limburg.

Delft, april 2023
Paul Thönissen

Samenvatting

Het Nederlandse klimaat kent twee erg verschillende periodes: zeer natte winters en kurkdroge zomers. Door klimaatverandering zal het weer steeds extremer worden en wordt deze tegenstelling alleen maar groter (Schuttenhelm, 2020). In dit onderzoek wordt gekeken of deze twee problemen gelijktijdig opgelost kunnen worden. De onderzoeksvraag luidt: 'Kan er een systeem worden ontworpen dat rivierwater in en/of rondom dijken kan opslaan bij hoogwater en dit water weer kan vrijgeven in tijden van droogte?'

Om tot passende ontwerpen te komen is er literatuuronderzoek gedaan en zijn er interviews afgenomen met experts op het gebied van waterbouw. Deze experts zijn Ir. R. Van der Meij, werkzaam als specialist waterkeringen bij Deltares, en dhr. G. Theunissen., werkzaam als technisch manager hoogwaterbeschermingsprogramma bij Waterschap Limburg. De verschillende ontwerpen zijn met elkaar vergeleken met behulp van een multicriteria-analyse. Aanvullend hierop is er een experiment uitgevoerd bij Flood Proof Holland, een test- en onderzoekslocatie van de Technische Universiteit Delft.

De eerste mogelijke oplossing is het plaatsen van een tank in een dijk. Deze kan worden gevuld tijdens hoogwater en geleegd tijdens droogte. Dit systeem voldoet aan de twee belangrijkste eisen: wateroverlast verminderen en droogte verminderen. Toch kan dit idee niet zonder meer worden toegepast. Een dergelijke tank brengt namelijk de constructieve veiligheid van de dijk in gevaar. Daarnaast is het onzeker hoe duurzaam dit concept is en zijn maatregelen noodzakelijk om de waterkwaliteit te waarborgen.

De tweede mogelijke oplossing bestaat uit het creëren van bekkens in het achterland van dijken. Tijdens hoogwater wordt hier water opgeslagen, wat weer kan worden gebruikt gedurende droge periodes. Dit systeem is beter in het verlagen van de waterstand en het verhelpen van droogte dan de tank in de dijk. Belangrijk bij dit idee is wel dat de grond achter de waterkering in het bezit is van het waterschap. Indien dit niet het geval is, moet er een regeling worden getroffen met de eigenaar. Ten slotte is onderzocht of het bergen van water in de bodem van het achterland een uitkomst kan bieden. In de bodem blijkt zich inderdaad veel bergingsruimte te bevinden, maar tijdens zware regenval is het niet verstandig om de bodem te belasten met de infiltratie van rivierwater (Theunissen, 2023). Dit concept kan dus tijdens noodsituaties, waarbij het rivierwater extreem hoog staat, niet altijd worden gebruikt.

Vanwege de geringe tijdsduur van dit onderzoek zijn de ontwerpeisen elk slechts beperkt belicht. Vervolgonderzoek zal meer duidelijkheid moeten verschaffen op het gebied van duurzaamheid, constructieve veiligheid en waterstandsverlaging. Pas dan kunnen er definitief ontwerpen worden goed- of afgekeurd.

Inhoud

Voorwoord.....	iii
Samenvatting.....	iv
1. Inleiding.....	7
1.1 Aanleiding voor het onderzoek.....	7
1.2 Probleemanalyse.....	7
1.3 Doelstelling.....	8
1.4 Aanpak.....	8
1.5 Leeswijzer.....	8
2. Programma van Eisen.....	9
2.1 Hydraulisch effect.....	9
2.2 Constructieve veiligheid.....	9
2.3 Water management.....	9
2.4 Operationele toepasbaarheid.....	9
3. Mogelijke oplossingen.....	10
3.1 Water in de dijk.....	10
3.2 Wateropslag in achterland.....	11
3.3 Berging in bodem van achterland.....	14
4. Experiment 'lucht in de dijk'.....	16
4.1 Doel.....	16
4.2 Testopstelling.....	16
4.3 Hypothese.....	17
4.4 Resultaten.....	17
4.5 Conclusie.....	19
5. Afweging van alternatieven.....	20
5.1 Hydraulisch effect.....	20
5.2 Constructieve veiligheid.....	21
5.3 Water management.....	24
5.4 Operationele toepasbaarheid.....	25
5.5 Multicriteria-analyse.....	26
6. Conclusies en aanbevelingen.....	28
6.1 Conclusies.....	28
6.2 Aanbevelingen.....	28
Literatuur.....	29
Bijlage A: Bepaling grondwaterpeil naast waterkeringen.....	31

Bijlage B: Berekeningen experiment	32
Bijlage C: Interviews met experts	34

1. Inleiding

In dit hoofdstuk is achtergrondinformatie te vinden over dit onderzoek. De aanleiding wordt besproken en het probleem wordt nader geanalyseerd. Vervolgens wordt een doelstelling geformuleerd en komt het plan van aanpak aan bod. Ten slotte wordt de opbouw van het rapport beschreven.

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

Tijdens de overstromingen van 2021 is Limburg opgeschrikt door hevig natuurgeweld. Er zijn in Nederland geen dodelijke slachtoffers gevallen, maar dit was niet het geval in de buurlanden van Nederland. Zo zijn er in Duitsland en België respectievelijk 180 en 41 doden gevallen (Trouw, 2021). De totale geraamde materiële schade die in Nederland is veroorzaakt door de overstromingen bedraagt €383 miljoen euro (Ministerie van Justitie en Veiligheid, 2023).

De overstromingen zijn veroorzaakt door hevige regenval gedurende twee dagen. De herhalingsstijd van deze buien bedraagt ongeveer 500 jaar (Asselman & Van Heeringen, 2023). Dit was dus uitzonderlijk zware regenval, maar uit onderzoek van het KNMI (in Asselman & Van Heeringen, 2023) blijkt dat dergelijke buien ten gevolge van klimaatverandering in de toekomst een herhalingsstijd van 100 jaar zullen hebben. Dit betekent dat eenzelfde bui in de toekomst 5 keer vaker zal voorkomen dan in het heden.

Door het veranderende klimaat wordt het niet alleen natter, maar tegelijkertijd ook droger. De Nederlandse winters zijn over het algemeen erg nat, met matige maar langdurige neerslag. De zomers daarentegen worden steeds warmer en droger met slechts af en toe een extreem harde bui. Deze korte, hevige regenval kan slecht infiltreren in de ondergrond en verdampt snel. Zo zijn de Nederlandse zomers netto erg droog (Schuttenhelm, 2020).

1.2 Probleemanalyse

Er moet actie worden ondernomen om wateroverlast in de toekomst zoveel mogelijk te beperken en tegelijkertijd zijn maatregelen nodig om de zomerse watertekorten drastisch te verminderen.

Een traditionele manier om wateroverlast het hoofd te bieden is dijkverhoging. Dit blijkt echter niet altijd een toereikende oplossing te zijn. Om regenval zoals in 2021 te kunnen weerstaan, zullen sommige dijken in Limburg dusdanig moeten worden opgehoogd dat dit buitenproportioneel veel landschappelijke impact zal hebben. Zo zou midden in de Limburgse stad Valkenburg een waterkering met een hoogte van 3,5 meter moeten worden gebouwd om een overstroming zoals in 2021 te kunnen voorkomen (Asselman & Van Heeringen, 2023). Daarnaast veroorzaakt het transport van de bouwmaterialen, die nodig zijn bij het versterken van dijken, veel CO₂ uitstoot (Bijlo, 2020). Ten slotte wordt de zomerse droogte niet verholpen wanneer de dijken enkel worden verhoogd.

Gevoelsmatig zouden de twee problemen, wateroverlast en waterschaarste, perfect samen opgelost kunnen worden. Daarom zal worden onderzocht worden of de oplossing voor de wateroverlast zou kunnen liggen in het creëren van extra berging voor overtollig regenwater.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het ontwerpen van een systeem dat rivierwater in en/of rondom dijken kan opslaan bij hoogwater en dit water weer kan vrijgeven in tijden van droogte. Op deze wijze worden de problemen die optreden bij zowel hoogwater als tijdens droogte enigszins verholpen. De haalbaarheid zal worden getoetst aan de hand van verschillende aspecten:

- Hydraulisch effect (systeem verlaagt waterstand in rivier aanzienlijk);
- Constructieve veiligheid (constructieve veiligheid van dijk gewaarborgd);
- Water management (draagt bij aan verhelpen van droogte; goed verbonden met bestaande watersysteem; waterkwaliteit blijft toereikend);
- Operationele toepasbaarheid (goed toepasbare bouwmethode; toezicht en onderhoud zijn mogelijk; kosten zijn beperkt; duurzaam)

1.4 Aanpak

Het begin van het onderzoek zal voornamelijk bestaan uit literatuurstudie. Geïnspireerd door wat er al is gedaan zullen er een aantal innovatieve ideeën worden gepresenteerd. Door middel van interviews met experts uit het vakgebied krijgen deze ideeën verdere invulling. De uitgewerkte varianten worden beoordeeld door ze te toetsen aan het Programma van Eisen (PvE) en de adviezen uit de interviews te gebruiken. Daarnaast zal bij Flood Proof Holland een experiment worden uitgevoerd dat aanvullende informatie moet geven over de haalbaarheid van de plannen. Gebaseerd op het experiment en de beoordelingen van de varianten kan worden geconcludeerd wat het beste concept is. Tot slot worden aanbevelingen voor vervolgonderzoek gegeven.

1.5 Leeswijzer

Het rapport is verdeeld in 6 hoofdstukken. In hoofdstuk 1 wordt de aanleiding voor het onderzoek gegeven en wordt beschreven wat er onderzocht gaat worden. Vervolgens wordt in hoofdstuk 2 het PvE gepresenteerd. In hoofdstuk 3 worden mogelijke oplossingen besproken. Deze oplossingen zijn uitgewerkt in samenwerking met twee experts op het gebied van waterkeringen. Hun adviezen zijn te vinden in bijlage C. In hoofdstuk 4 wordt verslag gedaan van een experiment dat moet uitwijzen hoe er in een dijk gebouwd kan worden zonder dat de constructie gaat opdrijven. In hoofdstuk 5 worden de bedachte oplossingen getoetst aan het PvE en wordt met behulp van een multicriteria-analyse (MCA) duidelijk welk idee het meeste kans van slagen heeft. Ten slotte volgen in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen.

2. Programma van Eisen

De eerste stap op weg naar een oplossing is een PvE opstellen. Zodoende wordt duidelijk wat belangrijke factoren zijn waar rekening mee moet worden gehouden in de ontwerpfase. In hoofdstuk 1.3 zijn de vier belangrijkste ontwerpfacetten al benoemd. Elk van deze facetten wordt nu toegelicht aan de hand van een aantal eisen.

2.1 Hydraulisch effect

Het systeem moet in het geval van hoogwater binnen afzienbare tijd geactiveerd kunnen worden. Zo kan het watersysteem snel worden ontlast door de waterstand gedurende een lange periode te verlagen.

2.2 Constructieve veiligheid

Het systeem mag de sterkte, stabiliteit en standzekerheid van de dijk niet verminderen. Als blijkt dat het risico op het optreden van een faalmechanisme groter wordt door het voorgestelde ontwerp, dient het ontwerp te worden aangepast om dit risico weer te reduceren.

2.3 Water management

Droogte verhelpen

Het systeem moet grote volumes water kunnen opslaan om eventuele watertekorten te kunnen opvangen. Afhankelijk van de ernst van de droogte kan het zo zijn dat de ene vorm van watergebruik voorgaat voor de andere. Het water kan bij droogte gebruikt worden door de landbouw, maar ook voor het nathouden van de dijken om de stabiliteit ervan te waarborgen. Deze prioritering, die bepaalt welke vormen van watergebruik het meest belangrijk zijn, heet de verdringingsreeks. (Rijkswaterstaat, z.d.).

Verbinding met bestaande watersysteem

Het te ontwerpen systeem kan probleemloos worden verbonden met het bestaande watersysteem, zowel binnendijs als buitendijs.

Waterkwaliteit

De kwaliteit van het water mag niet te ver achteruitgaan gedurende de periode dat het wordt opgeslagen. Het water moet minstens bruikbaar zijn voor de landbouw.

2.4 Operationele toepasbaarheid

Bouwmethode

Het systeem is gemakkelijk inpasbaar in het huidige landschap en eenvoudig aan te leggen.

Toezicht en onderhoud

Het moet te allen tijde mogelijk zijn om toezicht te houden op het systeem en dan met name op het waterniveau, de waterkwaliteit en de veiligheid van de dijk. Indien nodig moet er ook zonder al te veel moeite onderhoud mogelijk zijn.

Kosten

De kosten die gepaard gaan met de aanleg en het onderhoud van het systeem moeten beperkt zijn en in een juiste verhouding staan met de winst aan volumes water.

Duurzaamheid

De materialen en de bouwmethode moeten duurzaam zijn. Bij de productie en het transport van de bouwmaterialen moeten zo min mogelijk broeikasgassen vrijkomen en de constructie moet minstens net zo lang meegaan als de levensduur van de dijk zelf, welke minimaal 50 jaar bedraagt (Asselman & Van Heeringen, 2023). Ten slotte moet ook het watertransport zo min mogelijk energie kosten.

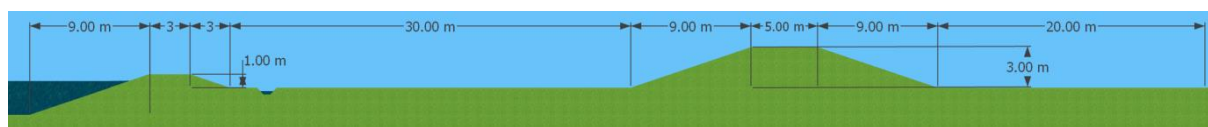
3. Mogelijke oplossingen

In dit hoofdstuk worden drie ideeën gepresenteerd, die elk een oplossing zouden kunnen vormen voor het geschetste probleem. De concepten worden elk ontworpen voor twee soorten waterkeringen, primaire waterkeringen en regionale waterkeringen. Het is namelijk mogelijk dat de verschillende concepten wel geschikt zijn voor primaire waterkeringen, maar niet voor regionale waterkeringen, of andersom.

Primaire waterkeringen beschermen Nederland tegen overstromingen vanuit de zee en de grote rivieren. Regionale waterkeringen zijn kleinere waterkeringen die het achterland beschermen langs regionale rivieren (Rijksoverheid, 2023).

Om te kunnen vergelijken hoeveel water er bij elk concept wordt opgeslagen, wordt bij beide typen waterkering een stuk dijk van 1 kilometer in lengterichting beschouwd.

Voor de primaire waterkering wordt er uitgegaan van een rivier met een zomerdijk, uiterwaard en vervolgens een winterdijk met daarachter een stuk land van 20 meter dat ook kan worden gebruikt. Zie figuur 2 (Thönissen, 2023) voor de exacte afmetingen die worden gebruikt.



Figuur 2: Dwarsdoorsnede primaire waterkering (Thönissen, 2023)

Voor de regionale waterkering wordt er uitgegaan van een rivier met enkel een schaaldijk, een dijk die direct grenst aan de rivier. Ook hier bevindt zich in het achterland een stuk land van 20 meter. Zie figuur 3 (Thönissen, 2023) voor de exacte afmetingen die worden gebruikt.



Figuur 3: Dwarsdoorsnede regionale waterkering (Thönissen, 2023)

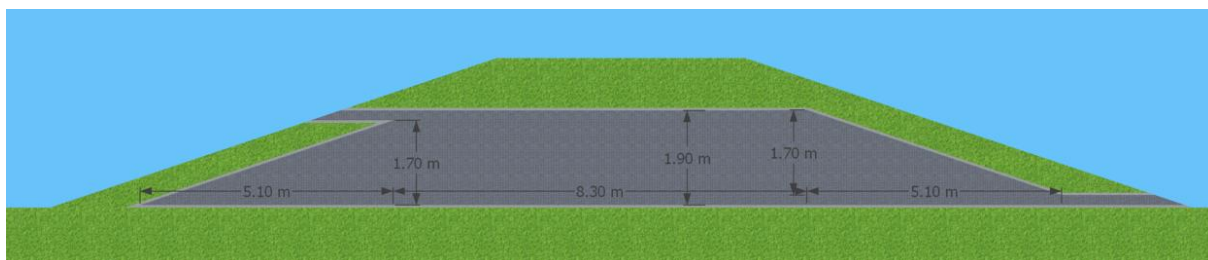
3.1 Water in de dijk

Het eerste concept is water opslaan in de dijk. Hierbij stroomt water onder natuurlijk verval de dijk in vanaf een vrij te kiezen waterniveau. In de dijk bevindt zich een grote tank die gevuld kan worden. Het water stroomt erin doordat de tank via een opening verbonden is met de rivier. Grote voorwerpen worden eruit gefilterd door een rooster dat achter de opening zit. Het water blijft vervolgens in de dijk bij hoge en normale waterstanden. In tijden van droogte kunnen vergunninghouders water afnemen uit de dijken ten behoeve van bijvoorbeeld landbouw. Het grote voordeel van deze maatregel is dat er geen extra volume wordt ingenomen door het opgeslagen water. Hierdoor kan de tank doorlopend gevuld en gelegegd worden, zonder dat daarbij de afvoer van het rivierwater en de reguliere berging van water wordt belemmerd. Om extra noodberging te creëren zou er echter wel voor gekozen kunnen worden om de tank leeg te laten tijdens de wintermaanden. Nadeel is dat bij een dergelijke situatie, met een hoog waterpeil en een lege tank, de tank kan gaan opdrijven (Verruijt, 2001). Meer hierover is te lezen in hoofdstuk 4.

Bij de primaire waterkering kan dit concept worden toegepast door in de winterdijk een tank te plaatsen onder een helling van 1:3, wat gelijk staat aan een hoek van $18,43^\circ$. De hoek van inwendige wrijving van zand varieert tussen 30° en 38° , dus er bestaat geen risico dat het zand dat rust op de

tank zal afschuiven (Jonkman et al., 2021). Er is gekozen voor de winterdijk, omdat hier een veel grotere tank in geplaatst kan worden dan in de zomerdijk. In figuur 2 (Thönissen, 2023) is zichtbaar dat een zomerdijk veel kleiner is dan een winterdijk. Als de tank boven het maaiveldniveau van het achterland moet liggen, om een uitstroom van water onder natuurlijk verval mogelijk te maken, zou de tank in de zomerdijk erg klein worden. Wanneer een tank met de afmetingen van de schets in figuur 4 (Thönissen, 2023) wordt gebruikt, kan het volgende volume worden geborgen over een lengte van 1 kilometer:

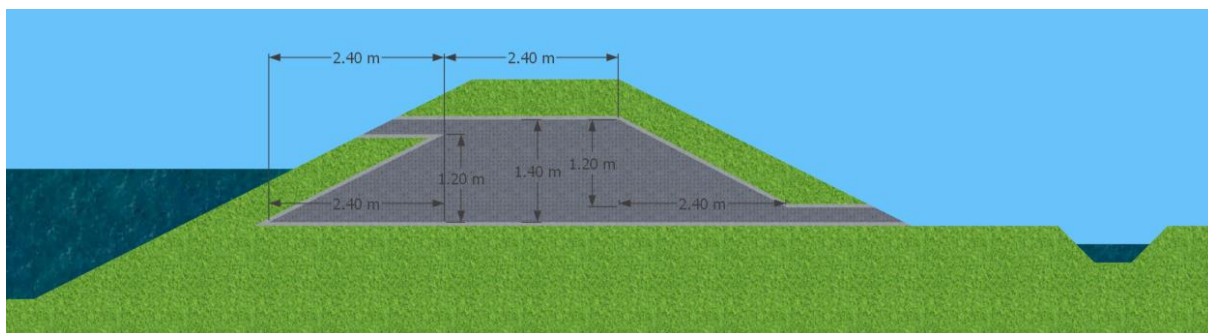
$$Volume\ berging = 1000 * \left(2 * \frac{1}{2} * 1,70 * 5,10 + 8,30 * 1,90 \right) = 24.440\ m^3$$



Figuur 4: Tank in winterdijk van primaire waterkering (Thönissen, 2023)

Bij de regionale waterkering wordt het concept op gelijke wijze toegepast, maar nu onder een helling van 1:2, wat gelijk staat aan een hoek van 26,57°. Ook in dit geval zal het zand niet afschuiven. Wanneer een tank met de afmetingen van de schets in figuur 5 (Thönissen, 2023) wordt gebruikt, kan het volgende volume worden geborgen over een lengte van 1 kilometer:

$$Volume\ berging = 1000 * \left(2 * \frac{1}{2} * 1,20 * 2,40 + 2,40 * 1,40 \right) = 6.240\ m^3$$



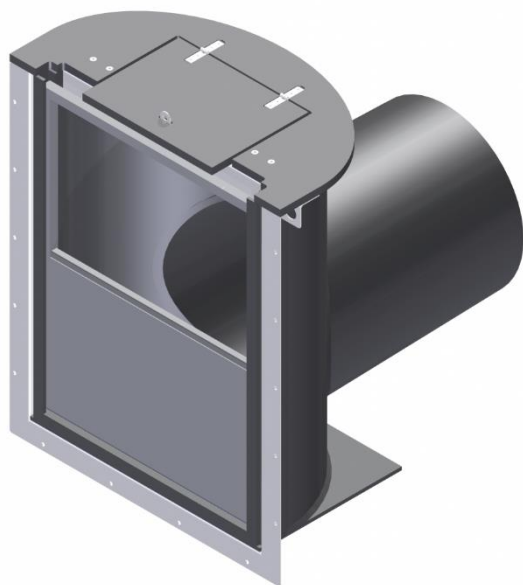
Figuur 5: Tank in regionale waterkering (Thönissen, 2023)

3.2 Wateropslag in achterland

Bij dit concept wordt er water opgeslagen in een bekken in het achterland. Regenwater dat uit het achterland richting de rivier stroomt, wordt naar het bekken geleid en daar opgeslagen. De toestroom richting het bekken kan worden gereguleerd met een KOP-KOS Overstortput, zoals zichtbaar in figuur 6 en 7 (KWT, 2023). Dit is een sluis die direct aangesloten kan worden op een duiker. Door het regenwater in dit bekken op te slaan zal bij extreme regenval de waterstand in de rivier lager zijn dan zonder de opslag. Ook kan in tijden van droogte het rivierwater worden opgeslagen om zo te voorkomen dat het afstroomt. Dit water kan over de dijk geheveld worden. Het is ook mogelijk om het rivierwater door een pijp door de dijk te laten stromen, maar er zijn strenge eisen wat betreft leidingen door waterkeringen. In de pijp zijn dan ook minimaal twee afsluiters nodig om de stroom water veilig te kunnen stoppen (Theunissen, 2023). Momenteel vinden er ook

onderzoeken plaats waarbij gecontroleerd dijksegmenten tot ontploffing worden gebracht om het rivierwater naar een geschikte locatie te leiden en zo de dijken benedenstrooms te ontlasten (Defensie, 2023). In het geval van extreem hoogwater kan het bekken zo'n opslaglocatie zijn.

Deze variant levert zeer grote volumes water op, wanneer dit langs kilometers dijk zou worden toegepast. Het opgeslagen water kan in een later stadium worden gebruikt door bijvoorbeeld boeren. De stukken grond grenzend aan de dijk, die bij deze variant gebruikt worden, kunnen bijvoorbeeld in het bezit zijn van deze boeren. Zij kunnen tegen betaling worden gevraagd stukken land enkele keren paar jaar onder te laten lopen.

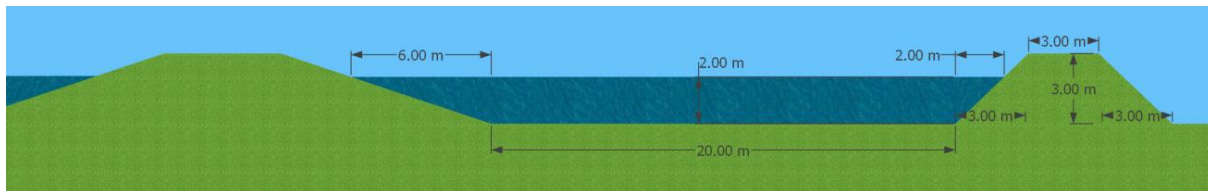


Figuur 6 & 7: KOP Overstortput (KWT, 2023)

Dit concept kan goed worden toegepast bij een primaire waterkering. Het bekken wordt niet tussen de winter- en zomerdijk geplaatst, maar in het achterland. Hier wordt een extra dijk aangelegd en tussen deze dijk en de winterdijk kan vervolgens water worden opgeslagen. Door de uiterwaarden niet aan te tasten kan de rivier nog steeds buiten haar oevers treden en blijft de afvoerfunctie van de uiterwaarden dus behouden. In stedelijke gebieden is vanwege ruimtelijke beperkingen niet altijd ruimte voor wateropslag in het achterland, dus dan zou ervoor gekozen kunnen worden om de zomerdijk te verhogen en het water vast te houden in de uiterwaarden. De uiterwaarden vervullen dan zowel een afvoerfunctie als een opslagfunctie. Het is belangrijk om op te merken dat dit multifunctionele karakter ervoor zorgt dat het moment waarop water in de uiterwaarden wordt opgeslagen zorgvuldig moet worden gekozen. Een situatie waarbij tijdens een hoogwaterpiek de uiterwaarden niet kunnen worden gebruikt om water af te voeren moet namelijk worden vermeden. Er is dan ook wettelijk bepaald dat, indien in de uiterwaarden gebouwd wordt om bijvoorbeeld het opgeslagen water te kunnen compartimenteren, afvoer en berging van het rivierwater niet mogen worden bemoeilijkt. Daarnaast mag toekomstige rivierverbreding niet worden belemmerd (Schultz van Haegen & Dekker, 2006). Het is dus verstandig om de uiterwaarden pas te laten onderlopen aan het einde van de winter, aangezien de meeste hoogwaterpieken tijdens de winter voorkomen en de bergingsmogelijkheid vooral dan noodzakelijk is (Theunissen, 2023).

Wanneer de dimensies zoals in figuur 8 (Thönissen, 2023) worden gebruikt, kan bij een primaire waterkering het volgende volume worden opgeslagen over een lengte van 1 kilometer:

$$Volume\ berging = 1000 * \left(\frac{1}{2} * 6 * 2 + \frac{1}{2} * 2 * 2 + 20 * 2 \right) = 48.000\ m^3$$

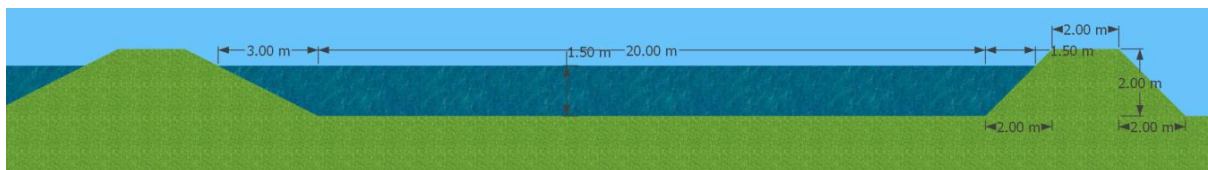


Figuur 8: Bekken in achterland van primaire waterkering (Thönissen, 2023)

Dit concept kan eveneens worden toegepast bij een regionale waterkering. Ook nu wordt een extra dijk aangelegd om een bekken te creëren. Dit bekken kan in principe ook in de winter worden gevuld, aangezien het geen rivierwater hoeft af te voeren. Echter, wanneer extra bergingsmogelijkheden nodig zijn, kan ook nu ervoor worden gekozen om pas te beginnen met bergen na de winter.

Wanneer de dimensies zoals in figuur 9 (Thönissen, 2023) worden gebruikt, kan het volgende volume worden opgeslagen over een lengte van 1 kilometer:

$$Volume\ berging = 1000 * \left(\frac{1}{2} * 3 * 1,50 + \frac{1}{2} * 2 * 2 + 20 * 1,5 \right) = 34.250\ m^3$$



Figuur 9: Bekken in achterland van regionale waterkering (Thönissen, 2023)

Wanneer het water op de zojuist beschreven wijze wordt opgeslagen, zal een deel verdampen. Om te kunnen kwantificeren om hoeveel water dit gaat, wordt de Makkink referentieverdamping gebruikt. Er wordt van uitgegaan dat wordt begonnen met het bergen van water vanaf april, aan het begin van de lente, en dat het water eind juni wegens droogte wordt gebruikt. In tabel 1 (Hooghart & Lablans, 1988) is zichtbaar hoeveel water per decade (een derde van een maand) verdampt volgens Makkink. In april t/m juni zal volgens tabel 1 dus verdampen:

$$Verdampt\ water = 3 * 17,78 + 3 * 26,44 + 3 * 29,43 = 220,95\ mm$$

Gemiddeld valt er in deze maanden in totaal 150 millimeter neerslag (KNMI, 2022), waardoor het netto verlies aan water neerkomt op ongeveer 71 millimeter, wat erg weinig is vergeleken met de hoeveelheid water die kan worden opgeslagen bij deze variant.

Een andere manier waarop water verloren kan gaan is dat het wegzakt en afstroomt via de bodem. Wanneer de bodem bestaat uit veen of klei zal dit geen probleem vormen, maar wanneer de bodem uit zand bestaat wel, aangezien dit zeer doorlatend is (Verruijt, 2001). In het laatste geval kan de bodem van het bekken worden afgedekt met een zeil om waterverlies te voorkomen.

Ten slotte kan, in het geval van waterverlies door verdamping of het wegzakken van water in de bodem, ook nog extra water in het bekken worden geleid om het verlies te compenseren.

3 landstations	E_r (mm decade ⁻¹)	E_o (mm decade ⁻¹)	E_o/E_r -	Decade	Gladgestreken waarde	R
april	17.78	23.16	1.30	I	1.30	0.945
				II	1.30	
				III	1.30	
mei	26.44	34.29	1.30	I	1.30	0.971
				II	1.30	
				III	1.30	
juni	29.43	38.93	1.32	I	1.31	0.97
				II	1.31	
				III	1.31	
juli	29.81	37.79	1.27	I	1.29	0.971
				II	1.27	
				III	1.24	
augustus	26.47	31.49	1.19	I	1.21	0.948
				II	1.19	
				III	1.18	
september	16.62	19.45	1.17	I	1.17	0.867
				II	1.17	
				III	1.17	

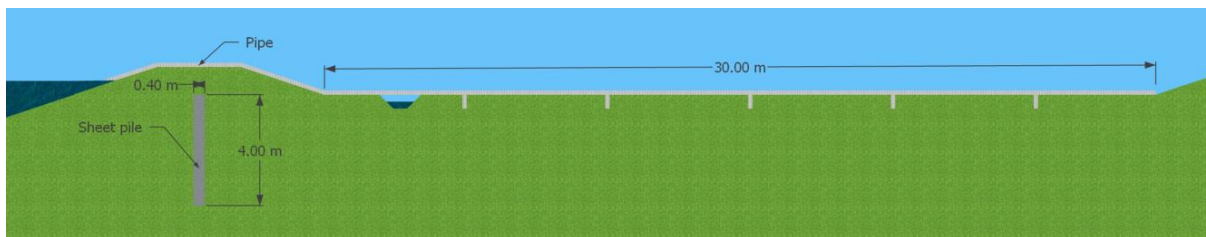
Tabel 1: Makking referentieverdamping (Hooghart & Lablans, 1988)

3.3 Berging in bodem van achterland

Bij dit concept wordt het achterland gebruikt als 'groene berging'. Dit is een simpele en goedkope maatregel. Rivierwater wordt hierbij overgeheveld naar het achterland en daar geïnfiltreerd in de bodem. Dit concept is niet op elke locatie even geschikt. De bodem dient zo te zijn opgebouwd dat het water kan worden opgeslagen in bijvoorbeeld een zandlaag met daaronder een slecht doorlatende laag (zoals klei) die verticale stroming verhindert (Verruijt, 2001). Door damwanden te plaatsen die reiken tot deze slecht doorlatende grondlaag wordt ook horizontale stroming voorkomen (Rijkswaterstaat, 2021). Vanwege klimaatverandering zijn de bodems de laatste jaren steeds verder uitgedroogd (Philip & Kew, 2022), dus extra berging in de grond is zeer wenselijk. Deze variant is vooral nuttig om in tijden van droogte de geringe hoeveelheid rivierwater toch te laten infiltreren en het zo te behouden. Ook tijdens periodes van matige neerslag kan het water worden opgeslagen in de bodem om het tijdens droogte weer te kunnen gebruiken. Tijdens extreem zware regenval kan rivierwater niet snel genoeg infiltreren in het achterland en zal het wegstromen richting bebouwde gebieden. In een dergelijke situatie is water verplaatsen naar het achterland dan ook geen effectieve methode om de waterstand in de rivier te verlagen (Theunissen, 2023). Wanneer er wel bewust water wordt geïnfiltreerd in de bodem, moet worden opgemerkt dat de opslag ten koste gaat van de opslagcapaciteit tijdens toekomstige extreme neerslag. Net als bij de opslag van rivierwater in de uiterwaarden, besproken in hoofdstuk 3.2, betekent dit dat het opslaan van water in het winterseizoen af te raden is.

Zoals in figuur 10 (Thönissen, 2023) te zien is, zal het water bij de primaire waterkering in tijden van droogte vanuit de rivier worden overgeheveld naar de uiterwaarden en niet naar het achterland achter de winterdijk. De uiterwaarden zullen immers toch droog staan als het waterpeil laag is. Om te kunnen bepalen hoeveel water er ongeveer kan worden opgeslagen, worden metingen van grondwaterstanden van de uiterwaarden van de Maas, Rijn en Waal gebruikt. Zie bijlage A voor meer informatie hierover. Uit de metingen komt naar voren dat de waterstand in de uiterwaarden gemiddeld 1,73 meter onder het maaiveld staat. Er wordt nu van uitgegaan dat de grond tot 1,73 meter onder het maaiveld volledig bestaat uit zand. De porositeit van zand in Nederland varieert, maar bedraagt gemiddeld 38% (Olsthoorn, 1977). Wanneer 1 kilometer dijk wordt beschouwd, kan dus het volgende volume worden geborgen in de bodem van de uiterwaarden:

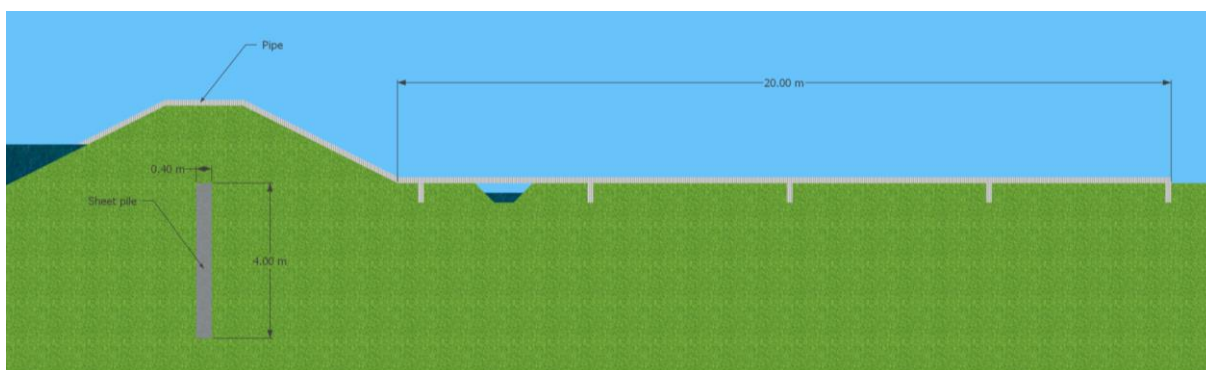
$$\text{Volume berging} = 1000 * 30 * 1,73 * 0,38 = 19.722 \text{ m}^3$$



Figuur 10: Berging in bodem bij primaire waterkering (Thönissen, 2023)

Bij de regionale waterkering wordt in principe hetzelfde gedaan, alleen wordt het water nu in de bodem van het achterland opgeslagen en niet in de bodem van de uiterwaarden. Zie figuur 11 (Thönissen, 2023) ter illustratie. Bij de bepaling van de grondwaterstanden in de bodem achter een schaarlijk worden metingen van grondwaterstanden in de buurt van de Vecht, Geul en Overijsselse Vecht gebruikt. In bijlage A is hier meer informatie over te vinden. Gemiddeld blijkt de freatische lijn 2,33 meter onder het maaiveld te staan. Ook nu wordt uitgegaan van een bodem die volledig uit zand bestaat. Als deze vorm van berging langs 1 kilometer dijk zou worden toegepast, zou het volgende volume water kunnen worden opgeslagen:

$$\text{Volume berging} = 1000 * 20 * 2,33 * 0,38 = 17.708 \text{ m}^3$$



Figuur 11: Berging in bodem bij regionale waterkering (Thönissen, 2023)

Evenals bij de variant waarbij water wordt opgeslagen in een bekken naast de rivier, kan er water verloren gaan door verdamping. 71 millimeter verdamping is echter ook bij deze variant relatief weinig.

Nota bene, zand heeft een hogere porositeit en is veel beter doorlatend dan klei. Klei komt veel voor in de Nederlandse bodem, dus hoeveel water daadwerkelijk in de bodem kan worden opgeslagen is sterk locatieafhankelijk (Verruijt, 2001).

4. Experiment 'lucht in de dijk'

In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van een test die moet uitwijzen onder welke omstandigheden een tank in een dijk gaat opdrijven. Bij het aanleggen van een ondergrondse constructie kan dit namelijk voorkomen. Het fenomeen treedt op wanneer de effectieve spanning onder de constructie nul is. De grond verliest dan zijn inwendige samenhang en is niet meer in staat spanningen over te brengen (Verruijt, 2001).

4.1 Doel

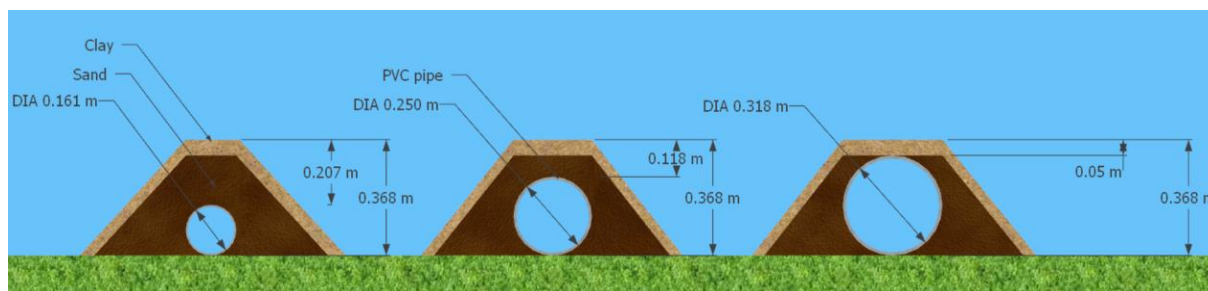
Het experiment wordt uitgevoerd op het terrein van Flood Proof Holland, een test- en onderzoekslocatie van de Technische Universiteit Delft (Technische Universiteit Delft, z.d.). Er wordt getest of een tank in een dijk gaat opdrijven wanneer er zich enkel lucht in de tank bevindt bij een hoge waterstand. Dit kan namelijk voorkomen wanneer in de winter wordt gewacht met het laten vollopen van de tank om de opslagfunctie van de tank te behouden voor een noodsituatie. Om zo'n situatie na te bootsen worden lege tanks van verschillende groottes in dijken geplaatst en vervolgens wordt gekeken bij welke verhouding lucht/gronddekking de tanks gaan opdrijven.

4.2 Testopstelling

Bij de test worden in een bassin drie even grote dijken naast elkaar aangelegd. In de dijken zijn afgesloten PVC-buizen van 1 meter lengte geplaatst die fungeren als tank. De buizen hebben verschillende afmetingen, zodat de dijken verschillende verhoudingen tussen de hoeveelheid lucht en hoeveelheid grond kennen en de dijken niet allen hetzelfde zullen reageren. De dijk bestaat uit zand en een laag klei aan het oppervlak. In tabel 2 is een overzicht met de kenmerken van de dijken zichtbaar.

	Dijk 1	Dijk 2	Dijk 3
Hoogte dijk	368	368	368
Uitwendige diameter buis	161	250	318
Randdikte PVC-buis	6	9	10
Dekking zand	157	68	0
Dekking klei	50	50	50

Tabel 2: Afmetingen dijken (in millimeter)



Figuur 12: Tekening van testopstelling (Thönissen, 2023)

Water stroomt vanaf de linkerkant het bassin in. Wanneer het waterpeil hoog genoeg staat zal het over de linker dijk stromen en zodoende ook de middelste dijk en vervolgens de rechterdijk bereiken. Dan kan worden vastgesteld of de tanks in de dijken gaan opdrijven. In figuur 12 (Thönissen, 2023) is een tekening van de testopstelling te zien met bijbehorende dimensies. In figuur 13 (Thönissen, 2023) is zichtbaar hoe dit er in de praktijk uitziet.



Figuur 13: Testopstelling (Thönissen, 2023)

4.3 Hypothese

Voordat de test is uitgevoerd, is berekend of de tanks zullen opdrijven. Deze berekeningen zijn terug te vinden in bijlage B. Hieruit is gebleken dat de gemiddelde effectieve spanning onder de tank in de linker dijk 1,24 kPa is. De verwachting is dat deze tank niet zal opdrijven tijdens het experiment. De gemiddelde effectieve spanning onder de tank in de middelste dijk is -0,12 kPa. Deze tank zou kunnen opdrijven, maar door de wrijving en adhesie van de grond rondom de tank die ontstaat bij het omhoog bewegen van de tank is het ook mogelijk dat deze tank niet opdrijft (Verruijt, 2001). De gemiddelde effectieve spanning onder de tank in de rechterdijk bedraagt -1,22 kPa. De verwachting is dat deze tank wel zal opdrijven.

4.4 Resultaten

De resultaten van het experiment kwamen grotendeels overeen met de hypothese. Toen het stuk land links van de dijk met de kleinste tank onder water kwam te staan, gebeurde er zoals verwacht niets. Dit is zichtbaar in figuur 14 (Thönissen, 2023). Het gewicht van de tank en de deklaag boven de tank was veel groter dan de opwaartse waterdruk onder de tank. Daarna stroomde het water over de linker dijk en kwam het stuk land tussen de linker dijk en de middelste dijk ook onder water te staan, zoals te zien is in figuur 15 (Thönissen, 2023). Ook in deze situatie dreef de tank in de dijk niet op. Zoals in de hypothese is vermeld (zie hoofdstuk 4.3) had dit bij de middelste dijk wel gekund, maar de zand en klei rondom de tank leverden net genoeg weerstand om opdrijven te voorkomen. Vervolgens gebeurde er iets onverwachts; toen het water over de middelste dijk naar de rechter dijk stroomde begon het binnentalud van de middelste dijk te eroderen. Vermoedelijk was de dikte van de kleilaag niet voldoende om erosie te kunnen voorkomen. Figuur 16 (Thönissen, 2023) laat zien dat de dijk hierna gedeeltelijk is doorgebroken. Toen het water de kruinhoogte van de rechter dijk had bereikt, duurde het niet lang voordat de grote tank in de rechter dijk ging opdrijven. De opwaartse waterdruk was hier veel groter dan het gewicht van de tank en de deklaag samen. De tank schoot dan ook vrij krachtig omhoog en stroomde direct weg. Op hetzelfde moment bewoog de tank in de middelste dijk omhoog. Doordat de dijk precies naast de tank was bezweken, viel er een gedeelte van de adhesie en wrijving van het dijklichaam weg en dreef ook deze tank op. Dit is te zien in figuur 17 (Thönissen, 2023).



Figuur 14: Water bereikt linker dijk (Thönissen, 2023)



Figuur 15: Water bereikt middelste dijk (Thönissen, 2023)



Figuur 16: Middelste dijk bezwijkt gedeeltelijk en water stroomt naar rechter dijk (Thönissen, 2023)



Figuur 17: Tanks in middelste en rechter dijk drijven op (Thönissen, 2023)

4.5 Conclusie

Het is duidelijk dat opdrijven een reëel gevaar vormt wanneer een tank in een dijk wordt geplaatst. Wanneer de gehele zandkern wordt vervangen door een tank zal de tank zeker opdrijven en ook wanneer er een laag zand bovenop de tank ligt is er nog altijd een reële kans op opdrijven. Het is dus van vitaal belang dat bij het ontwerpen van een dergelijke constructie een evenwicht wordt gewaarborgd tussen enerzijds het gewicht van de tank en de grond boven de tank en anderzijds de opwaartse waterdruk bij eventueel hoogwater.

Een tweede mogelijkheid waarmee opdrijven kan worden voorkomen, naast het toevoegen van extra gronddekking, is het verankeren van de tank. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan door een betonnen plaat onder de tank te plaatsen die met kabels wordt verbonden met de tank, of door een betonnen gewicht bovenop de tank te plaatsen (United States Environmental Protection Agency, 2010).

Wanneer er geen voorzorgsmaatregelen zijn getroffen, zoals verankering of voldoende dekking, zal er bij hoogwater dus een groot risico bestaan op opdrijven. Om opdrijven dan toch nog te kunnen voorkomen, moeten er noodmaatregelen worden getroffen. Er zou dan voor gekozen kunnen worden om de tank toch (deels) vol te laten lopen, ondanks dat dit ten koste gaat van de opslagfunctie van de tank bij nóg hoger water. Daarnaast kan de dijk tijdelijk van extra gewicht worden voorzien, door bijvoorbeeld zandzakken op de kruin te plaatsen (United States Environmental Protection Agency, 2010).

5. Afweging van alternatieven

In dit hoofdstuk zullen de bedachte systemen die zijn gepresenteerd in hoofdstuk 3 worden beoordeeld met behulp van het PvE uit hoofdstuk 2. De MCA zal vervolgens uitwijzen welke variant over het algemeen het meest geschikt is.

5.1 Hydraulisch effect

Allereerst zullen de verschillende bedachte oplossingen worden beoordeeld op hun vermogen om het bestaande watersysteem (snel) te kunnen ontlasten door de waterstand te verlagen. Om te kunnen beoordelen hoe effectief de varianten dit kunnen, worden de volumes water die kunnen worden opgeslagen langs 50 kilometer dijk vergeleken met de hoeveelheid water die normaal door rivieren stroomt. Er is gekozen voor een lengte van 50 kilometer, zodat kan worden beoordeeld of de varianten effect hebben wanneer ze op grote schaal worden toegepast. Om de prestaties van de varianten te kunnen vergelijken, zal worden berekend hoe lang ze elk de waterstand met 10 centimeter kunnen verlagen. De hoogwaterpiek bij de overstromingen in Limburg in 2021 duurde ongeveer twee dagen (Asselman & Van Heeringen, 2023). Dit gegeven kan in het achterhoofd worden gehouden bij het beoordelen van de varianten.

Om de primaire waterkering te beoordelen wordt het debiet en de waterdiepte van de Rijn gebruikt. Het gemiddelde debiet van de Rijn bedraagt 2200 m³/s (Rijksoverheid, 2023) en de waterdiepte van de Boven-Rijn bij Lobith bedraagt ongeveer 4 meter (Rijkswaterstaat, 2023).

Per 10 centimeter waterdiepte stroomt dus het volgende debiet door de Rijn:

$$\text{Debiet per 10 cm diepte in de Rijn} = \frac{0,1}{4,0} * 2200 = 55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Voor de regionale waterkering wordt het debiet vergeleken met de Roer. Het debiet van de Roer bedraagt gemiddeld 23 m³/s (De Mars, 2013). De diepte varieert tussen 1,2 meter en 4,0 meter (Geraeds, 2000). Derhalve wordt een diepte van 2,6 meter gebruikt. Het debiet per 10 centimeter waterdiepte in de Roer bedraagt dan:

$$\text{Debiet per 10 cm diepte in de Roer} = \frac{0,1}{2,6} * 23 \approx 0,88 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nota bene, doordat rivieren een heterogeen stroomprofiel hebben, verschilt de hoeveelheid wateropslag die benodigd is om de waterstand te verlagen bij een gemiddelde afvoer en een hoogwaterpiek. De tijdsduur die gewonnen wordt door het water op te slaan, wordt nu enkel berekend om de varianten te kunnen vergelijken. Het valt te betwijfelen in hoeverre de berekende tijdsduur van alle varianten realistisch is.

5.1.1 Water in de dijk

Zoals in hoofdstuk 3.1 is berekend, kan er door een tank te plaatsen in een primaire waterkering langs 1 kilometer dijk 24.440 m³ water opgeslagen worden. Wanneer deze variant wordt toegepast over een lengte van 50 kilometer, kan de waterstand met 10 centimeter worden verlaagd gedurende ruim zes uur:

$$\text{Gewonnen tijd} = \frac{24.440 * 50}{55} \approx 22.218 \text{ s} \approx 6 \text{ uur}$$

Bij de regionale waterkering kan ongeveer 6.240 m³ worden opgeslagen per kilometer dijk. De waterstand kan hierdoor zelfs met 10 centimeter worden verlaagd voor ruim vier dagen:

$$\text{Gewonnen tijd} = \frac{6.240 * 50}{0,88} \approx 354.545 \text{ s} \approx 98 \text{ uur}$$

Deze variant kan dus uitstekend kleinere rivieren ontlasten bij hoogwater, maar is minder effectief bij grote rivieren.

5.1.2 Wateropslag in achterland

Bij het opslaan van water in een bekken in het achterland kan bij een primaire waterkering 48.000 m³ water per kilometer dijk worden opgeslagen. Deze variant kan de waterstand met 10 centimeter verlagen voor 12 uur:

$$\text{Gewonnen tijd} = \frac{48.000 * 50}{55} \approx 43.636 \text{ s} \approx 12 \text{ uur}$$

Bij een regionale waterkering kan er per kilometer dijk 34.250 m³ water worden opgeslagen. Deze berging kan de waterstand ruim drie weken met 10 centimeter verlagen:

$$\text{Gewonnen tijd} = \frac{34.250 * 50}{0,88} \approx 1.946.022 \text{ s} \approx 541 \text{ uur}$$

Ook deze variant kan de waterstand voortreffelijk verlagen bij kleine rivieren. Bij grotere rivieren scoort deze variant beduidend minder dan bij regionale rivieren, maar niet slecht.

5.1.3 Berging in bodem van achterland

Wanneer er water in de bodem wordt opgeslagen, kan bij een primaire waterkering 19.722 m³ water per kilometer worden opgeslagen. Dit leidt tot een verlaging van de waterstand van 10 centimeter gedurende ongeveer 5 uur:

$$\text{Gewonnen tijd} = \frac{19.722 * 50}{55} \approx 17.929 \text{ s} \approx 5 \text{ uur}$$

Bij een regionale waterkering kan de bodem per kilometer dijk 17.708 m³ water bergen. Hierdoor kan de waterstand met 10 centimeter worden verlaagd voor ongeveer 12 dagen:

$$\text{Gewonnen tijd} = \frac{17.708 * 50}{0,88} \approx 1.000.136 \text{ s} \approx 279 \text{ uur}$$

Ook in dit geval kan de opslag bij een regionale waterkering uitstekend de rivier ontlasten en is de wateropslag minder effectief bij een primaire waterkering. Zoals benoemd in hoofdstuk 3.3 is deze variant vooral geschikt om water op te slaan in de zomer, maar niet om een rivier te ontlasten tijdens hoogwater. Hoogwater gaat doorgaans gepaard met hevige regenval en de bodem zal moeite hebben om tegelijkertijd zowel rivier- als regenwater op te slaan. Daarom zegt de gewonnen tijd nu minder dan bij de twee andere varianten.

Het is nu overigens duidelijk geworden dat, ongeacht het ontwerp, het creëren van extra berging voor rivierwater substantieel meer effect heeft op het verlagen van de waterstand van regionale rivieren dan op het verlagen van de waterstand van grote rivieren. Bij regionale rivieren is de hoeveelheid water die wordt opgeslagen relatief veel groter in verhouding tot de rivierafvoer.

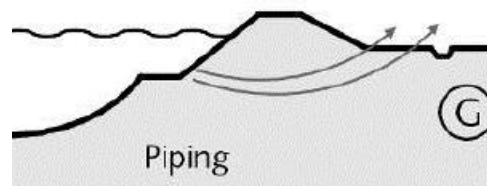
5.2 Constructieve veiligheid

De constructieve veiligheid van de dijk mag nooit in het geding komen. De faalmechanismen die worden geacht te kunnen voorkomen door de voorgestelde ontwerpen zullen nu eerst worden beschreven en vervolgens wordt per variant beoordeeld hoe groot het risico op falen is.

5.2.1 Faalmechanismen

Onderloopsheid

Een belangrijk faalmechanisme bij dijken is onderloopsheid. Bij onderloopsheid (ook wel piping genoemd) ontstaat er een ondergrondse waterstroom waarbij gronddeeltjes worden geërodeerd. Dit kan uiteindelijk leiden tot het bezwijken van de dijk. Het optreden van piping hangt af van het verval over de waterkering en de bodemopbouw (Förster et al., 2012).



Figuur 18: Onderloopsheid (Jonkman et al., 2021)

De controleregel voor onderloopsheid van Sellmeijer (in Förster et al., 2012) luidt:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \frac{\Delta H_c}{\gamma}$$

waarin: ΔH_c [m] = kritiek verval

ΔH [m] = verval over grondconstructie

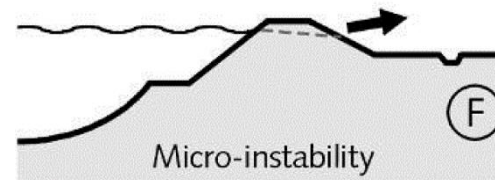
d [m] = dikte van de afdekkende laag

γ [-] = veiligheidsfactor

Micro-instabiliteit

Een ander faalmechanisme dat gecontroleerd dient te worden is micro-instabiliteit.

Dit faalmechanisme wordt veroorzaakt door kwelwater dat ervoor zorgt dat het binnentalud instabiel wordt. Het binnentalud bestaat doorgaans uit een kleilaag, die door dit kwelwater kan afschuiven. Wanneer het binnentalud bestaat uit een doorlatende laag, zoals zand, zal er interne erosie optreden. Wanneer deze interne erosie niet wordt gestopt, kan het uiteindelijk de stabiliteit van de hele dijk in gevaar brengen (Jonkman et al., 2021).

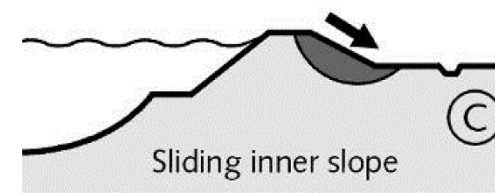


Figuur 19: Micro-instabiliteit (Jonkman et al., 2021)

Macro-stabiliteit

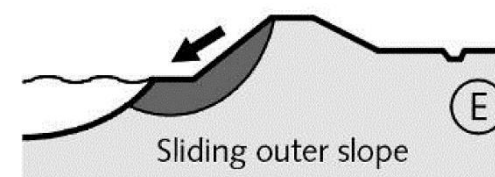
Ten slotte is het waarborgen van de macro-stabiliteit een belangrijk aandachtspunt. De drie faalmechanismen die kunnen optreden wanneer de macro-stabiliteit niet in orde is, zijn het afschuiven van het binnentalud, het afschuiven van het buitentalud en het horizontaal schuiven van de gehele dijk.

Het afschuiven van het binnentalud wordt veroorzaakt door langdurig hoogwater. De dijk raakt dan verzadigd met water en in het binnentalud neemt de effectieve spanning en de schuifweerstand van de grond af. Hierdoor kan het binnentalud afschuiven (Jonkman et al., 2021).



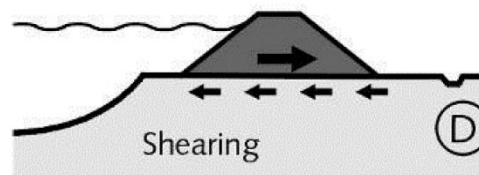
Figuur 20: Afschuiven binnentalud (Jonkman et al., 2021)

Het afschuiven van het buitentalud wordt op min of meer dezelfde wijze veroorzaakt. De dijk raakt verzadigd bij hoogwater en de waterdruk in de grond neemt toe, maar nu zakt het waterpeil in de rivier plotseling en valt de horizontale druk vanuit de rivier weg. Hierdoor kan het buitentalud afschuiven. Doordat het waterpeil laag staat bij dit faalmechanisme, heeft het doorgaans minder ernstige gevolgen dan het afschuiven van het binnentalud (Jonkman et al., 2021).



Figuur 21: Afschuiven buitentalud (Jonkman et al., 2021)

Horizontaal schuiven van het dijklichaam wordt veroorzaakt door de horizontale druk van rivierwater tegen het buitentalud van de dijk. Belangrijke factoren hierbij zijn het gewicht van de dijk en de schuifsterkte van de bodem onder de dijk. Hoe lichter de dijk en hoe minder de bodem in staat is om schuifspanning te leveren, hoe groter de kans dat dit faalmechanisme optreedt. Het is een probleem dat vaak optreedt tijdens droge zomers, aangezien de dijk dan droger wordt en het gewicht hierdoor afneemt (Jonkman et al., 2021).



Figuur 22: Horizontaal schuiven dijklichaam (Jonkman et al., 2021)

5.2.2 Water in de dijk

Onderloopsheid

De verwachting is dat de freatische lijn in de dijk niet substantieel verandert door de aanwezigheid van de tank. Het grondwaterpeil aan de binnendijkse zijde wordt niet beïnvloed door de aanwezigheid van een tank in de dijk en het verval daarmee ook niet. Ter voorkoming van onderloopsheid mag de tank mag uitsluitend op staal worden gefundeerd. Wanneer er op palen zou worden gefundeerd kan er een 'tunnel' onder de dijk ontstaan, waar kwelwater doorheen kan stromen. Deze tunnel ontstaat doordat er zetting van de grond onder de dijk optreedt, terwijl de tank door de paalfundering op zijn plek blijft (Voorendt, 2023).

Micro-instabiliteit

De micro-stabiliteit van de dijk wordt niet beïnvloed door de aanwezigheid van de tank. De freatische lijn blijft vrijwel intact vergeleken met een situatie zonder tank (Voorendt, 2023). Wanneer de zandkern van de dijk wordt vervangen door een tank zou de micro-stabiliteit zelfs kunnen verbeteren, doordat er minder waterdruk van binnenuit op de kleibekleding werkt.

Macro-instabiliteit

Het risico op het afschuiven van het binnen- en buitentalud van een dijk met een tank erin zal niet veel afwijken ten opzichte van een reguliere dijk. Echter, het risico op het horizontaal schuiven van het dijklichaam neemt aanzienlijk toe bij deze variant. Het gewicht van de dijk halveert namelijk bijna wanneer de gehele zandkern wordt vervangen door een tank met water. In dit geval zou enkel de kleibekleding van de dijk intact blijven. Nat zand heeft een volumetrisch gewicht van 20 kN/m^3 , terwijl water heeft een volumetrisch gewicht heeft van slechts 10 kN/m^3 (Verruijt, 2001). Wanneer de tank leeg is wordt het risico op schuiven nog groter; dan is er sprake van een 'holle' dijk. De horizontale waterdruk vanuit de rivier kan de dijk dan eenvoudig aan het schuiven brengen.

Opdrijven

Tot slot is er bij deze variant het risico dat de tank gaat opdrijven. Hierbij is de opwaartse kracht onder een constructie, ten gevolge van de waterdruk, groter dan het gewicht van de tank en de grond erboven. Tijdens het experiment, dat is besproken in hoofdstuk 4, is gebleken dat dit faalmechanisme inderdaad zal optreden wanneer er onvoldoende voorzorgsmaatregelen worden getroffen.

5.2.3 Wateropslag in achterland

Onderloopsheid

De parameters uit de controleregulering van Sellmeijer die veranderen door het toepassen van deze variant zijn het verval over de dijk en het kritieke verval. Beide veranderen in gunstige zin; door het nieuwe bekken wordt de grondwaterstand hoger en het verval kleiner en door een damwand onder de dijk te plaatsen wordt de kwelweg groter en het kritieke verval groter. De kans dat onderloopsheid optreedt wordt dus kleiner door het toepassen van deze variant.

Micro-instabiliteit

Ook bij dit faalmechanisme werkt het bekken gunstig; de waterdruk van het bekken voorkomt dat het binnentalud instabiel wordt door waterdruk vanuit de dijk.

Macro-instabiliteit

Macro-instabiliteit kan wel een probleem vormen bij deze variant. Wanneer de rivierwaterstand laag is, maar het bekken helemaal gevuld is, zal de waterstand in de dijk erg hoog zijn. De waterdruk kan er dan voor zorgen dat het buitentalud gaat afschuiven. Daarnaast kan, wanneer het bekken wordt geleegd, het plotseling wegvallen van het water aan de binnendijkse zijde ervoor zorgen dat het binnentalud gaat afschuiven. Het risico op het horizontaal schuiven van het gehele dijklichaam wordt wel kleiner door het bekken; tijdens droge zomers zorgt het bekken ervoor dat de dijk nat blijft en genoeg gewicht behoudt om niet te gaan schuiven. Al met al zorgt het bekken er wel voor dat er meer risicovolle situaties kunnen ontstaan die de macro-stabiliteit van de dijk in gevaar brengen.

5.2.4 Berging in bodem van achterland**Onderloopsheid**

Evenals bij de opslag van water in een bekken zal bij deze variant het verval over de dijk in gunstige zin veranderen. Doordat er meer water wordt opgeslagen in de bodem wordt het verval over de dijk kleiner. Daarnaast zal de damwand onder de dijk de kwelweg vergoten, wat de kans dat onderloopsheid optreedt ook verkleint.

Micro-instabiliteit

Door het opslaan van water in de bodem zal naar verwachting de freatische lijn in de dijk iets stijgen en wordt het risico op micro-instabiliteit groter. Om de interne erosie te voorkomen zouden echter maatregelen kunnen worden getroffen. Zo heeft onderzoek aangetoond dat biodiversiteit op dijken ervoor zorgt dat er minder erosie optreedt. De diepe wortels van planten maken de dijk namelijk sterker (Helsen et al., 2018).

Macro-instabiliteit

Door de berging in de bodem blijft de grondwaterstand in de dijk hoog wanneer het waterpeil in de rivier zakt. De macro-stabiliteit van het binnen-en buitentalud zal dus zeker verminderen wanneer er water in de bodem wordt opgeslagen. Het horizontaal schuiven van de dijk zal juist minder snel voorkomen door het toegenomen gewicht ten gevolge van de hogere waterstand.

5.3 Water management

De belangrijkste eis die in deze paragraaf wordt behandeld is dat de varianten zomers een bijdrage moeten leveren aan droogtebestrijding. Daarnaast moeten ze probleemloos kunnen worden verbonden met het bestaande watersysteem. Ten slotte mag de langdurige opslag er niet voor zorgen dat de waterkwaliteit te veel achteruit gaat.

5.3.1 Water in de dijk

In hoofdstuk 3.1 is berekend dat er over een lengte van 1 kilometer 24.440 m³ en 6.240 m³ water kan worden opgeslagen in tanks in respectievelijk een primaire en regionale waterkering. Ter referentie: Een gemiddeld landbouwbedrijf gebruikt 6.620 m³ water per jaar (Van der Meer, 2022). Wanneer deze variant op grote schaal wordt toegepast kunnen dus veel boeren worden voorzien in hun jaarlijkse vraag naar water. Er kan vaker en daardoor meer water kunnen worden opgeslagen wanneer de tank dieper in de grond zou worden geplaatst. Een nadeel hiervan is dat het concept er duurder van wordt en dat onderhoud verder bemoeilijkt wordt (Van der Meij, 2023). Doordat de tank in de dijk geplaatst wordt, wordt de afvoer van de rivier verder niet belemmerd. Water kan onder vrij verval in de tank stromen en in de zomer eruit worden gepompt.

De waterkwaliteit is bij deze variant wel een punt van aandacht. Doordat het water stilstaat komt er niet op natuurlijke wijze genoeg zuurstof in het water, wat van vitaal belang is voor het op peil houden van de waterkwaliteit (Rijksoverheid, 2023). Er moet dus actief zuurstof worden geïnjecteerd in het opgeslagen water om de kwaliteit te behouden.

5.3.2 *Wateropslag in achterland*

In hoofdstuk 3.2 bleek dat bij de primaire en regionale waterkering respectievelijk 48.000 m³ en 34.250 m³ water kan worden opgeslagen over 1 kilometer lengte in een bekken naast de rivier. Dit zijn aanzienlijk grotere volumes dan bij de eerste variant. Het bekken kan overigens eenvoudig worden verbonden met het bestaande watersysteem. Tijdens hoogwater wordt water vanuit beekjes naar het bekken geleid en hier opgeslagen voor drogere periodes. Doordat het water in de open lucht wordt opgeslagen is de waterkwaliteit geen punt van zorg. Door weersomstandigheden zoals wind en regenval zal het water op natuurlijke wijze van zuurstof worden voorzien (Verdonschot, 2021). Als aanvulling hierop kunnen waterplanten zorgen voor extra zuurstofaanvoer.

5.3.3 *Berging in bodem van achterland*

In hoofdstuk 3.3 is berekend dat er over een lengte van 1 kilometer 19.722 m³ en 17.708 m³ water kan worden opgeslagen in een zandbodem bij respectievelijk een primaire en regionale waterkering. Zoals eerder al is benoemd is het zeer afhankelijk van de grondsamenstelling hoeveel water er daadwerkelijk kan worden opgeslagen in de bodem. Er is een doorlatende laag nodig met daaronder een ondoorlatende laag, zoals klei (Verruijt, 2001). Deze variant is erg eenvoudig inpasbaar in de al bestaande watersystemen. Het rivierwater kan door middel van leidingen over de waterkering worden geheveld naar het achterland, waar het infiltreert in de bodem en weer omhoog kan worden gepompt in tijden van droogte. De waterkwaliteit blijft voldoende wanneer het water wordt opgeslagen in de bodem. Hoe langer het wordt opgeslagen, hoe beter de kwaliteit zelfs wordt (RIVM, z.d.).

5.4 Operationele toepasbaarheid

Het laatste ontwerp criterium is dat de varianten operationeel mogelijk moeten zijn. Dit houdt in dat de bouw van de varianten redelijk eenvoudig moet kunnen worden uitgevoerd en dat de varianten goed in het landschap passen. Toezicht en onderhoud van de bouwwerken moet ook mogelijk zijn en de kosten moeten in een juiste verhouding staan met de volumes water die kunnen worden gewonnen. Ten slotte moeten de varianten zo duurzaam mogelijk zijn.

5.4.1 *Water in de dijk*

De bouw van deze variant is veruit het lastigst uitvoerbaar. Naast het feit dat de veiligheid van de dijk in gevaar wordt gebracht door een tank in de dijk te plaatsen en dat de bouw zeer arbeidsintensief zal zijn, is het ook lastig om onderhoud te plegen aan een ondergronds bouwwerk als deze. Een groot voordeel van deze variant is dat hij erg ruimte-efficiënt is. Het volume binnenin een dijk wordt nu multifunctioneel gebruikt. Door de complexe techniek die nodig is bij de bouw en het vele onderhoud dat is vereist, is dit een erg dure oplossing (Theunissen, 2023). Vanwege de complexiteit is het dan ook verstandig om de tank enkel in nieuwe dijken te plaatsen. Wanneer deze variant toch in bestaande dijken wordt toegepast, zal het rivierwater tijdens de bouw gekeerd moeten worden door een tijdelijke waterkering, zoals een damwand (Voorendt, 2023). Het wordt ook lastig om een dijk met een tank erin duurzamer te maken dan een reguliere dijk. Bij de bouw van dijken wordt gestreefd naar het gebruikmaken van zoveel mogelijk gebiedseigen grond, waardoor reguliere dijken al goed scoren op het gebied van duurzaamheid (Waterschap Limburg, z.d.). Door de productie en het transport van de tank zal deze variant waarschijnlijk op het gebied van duurzaamheid niet goed scoren. Vervolgonderzoek zal echter moeten uitwijzen of dit daadwerkelijk het geval is.

5.4.2 *Wateropslag in achterland*

Deze variant is technisch gezien goed uitvoerbaar. Er moet een extra waterkering worden aangelegd om een bekken te creëren en het binnentalud van de bestaande waterkering moet wellicht versterkt worden, aangezien er normaliter geen water staat in het achterland. Dit zijn echter maatregelen die geen obstakel zullen vormen. De ruimtelijke inpassing verdient extra aandacht bij dit concept. Wanneer het stuk grond achter de dijk van het waterschap is, kan het water hier zonder probleem worden opgeslagen, maar wanneer het in privébezit is zal dit lastig worden. In zo'n geval zal de eigenaar van de grond waarschijnlijk een vergoeding vragen om zijn land beschikbaar te stellen. Het onderhoud van het systeem is overigens goed mogelijk, dit zal weinig afwijken van normaal dijkonderhoud. Ten slotte moet er worden gestreefd naar het gebruik van gebiedseigen grond om de extra dijk aan te leggen. Dan wordt het een betaalbaar concept dat ook nog eens duurzaam is.

5.4.3 *Berging in bodem van achterland*

Wanneer het water in de bodem achter de dijk wordt opgeslagen moet er een damwand onder de dijk worden geplaatst die voorkomt dat het water horizontaal wegstroomt en er moeten leidingen worden aangelegd die het water overhevelen vanuit de rivier naar het achterland. Dit maakt deze variant bouwtechnisch ingewikkelder dan het bekken in het achterland, maar nog altijd een stuk eenvoudiger dan de tank in de dijk. Dit concept scoort goed op het gebied van toezicht en onderhoud. Er treden op dit gebied geen moeilijkheden op door de applicatie van deze variant. Dit concept is naar alle waarschijnlijkheid het minst duur, maar er kan ook slechts beperkt water worden opgeslagen en hij is het minst geschikt om de waterstand in de rivier te verlagen. Dit idee is minder duurzaam dan het bekken in het achterland, aangezien daar voornamelijk natuurlijke bouwmaterialen kunnen worden gebruikt. Afhankelijk van de materiaalkeuze voor de damwand en de leidingen kan deze variant toch ook behoorlijk duurzaam zijn.

5.5 Multicriteria-analyse

Nu de verschillende concepten zijn beoordeeld aan de hand van het Programma van Eisen, kunnen er conclusies worden getrokken over hoe geschikt ze zijn. Dit zal in deze paragraaf worden gedaan met behulp van een MCA. Er is voor een MCA gekozen omdat dit een simpele, toegankelijke manier is om ontwerpen te beoordelen en hierbij goed zichtbaar is op welke onderdelen een ontwerp wel of niet goed scoort. Eerst wordt de manier waarop er beoordeeld toegelicht en daarna volgt de beoordeling.

5.5.1 *Beoordelingsmethodiek*

De vier criteria waarop de ontwerpen worden beoordeeld zijn:

- Hydraulisch effect
- Constructieve veiligheid
- Water management
- Operationele toepasbaarheid

De onderlinge zwaarte van de criteria wordt bepaald door de criteria in een matrix tegen elkaar af te wegen. Wanneer het criterium in de linker kolom belangrijker is dan het criterium in de bovenste rij, wordt er in de gezamenlijke cel een 1 geplaatst. Wanneer het criterium in de bovenste rij belangrijker is dan het criterium in de linker kolom, wordt er in de gezamenlijke cel een 0 geplaatst. Wanneer beide criteria even belangrijk zijn, wordt in beide gezamenlijke cellen een 1 geplaatst. Door vervolgens de waardes in horizontale richting op te tellen is in de rechter kolom te zien hoe belangrijk elk van de criteria is (Hertogh et al., 2019). In tabel 3 is de onderlinge zwaarte te zien.

		a	b	c	d	Totaal
Hydraulisch effect	a		0	0	1	1
Constructieve veiligheid	b	1		1	1	3
Water management	c	1	0		1	2
Operationele toepasbaarheid	d	0	0	0		0

Tabel 3: Onderlinge zwaarte criteria

In tabel 3 is te zien dat het criterium operationele toepasbaarheid niet heeft gescoord bij het onderling afwegen van de criteria, wat zou betekenen dat dit criterium niet moet worden gebruikt in de beoordeling. Het criterium moet echter wel degelijk worden meegenomen in de beoordeling van de ontwerpen. Om hiervoor te zorgen krijgt dit criterium een zwaarte ter waarde van 1. Om het verschil met de andere criteria toch zichtbaar te maken, worden de totale waarden van deze criteria verdubbeld. Nu de onderlinge zwaarte van de criteria is bepaald kan de weegfactor van elk criterium worden berekend (Hertogh et al., 2019). Deze weegfactoren zijn zichtbaar in tabel 4.

	Zwaarte	Weegfactor
Hydraulisch effect	2	2/13 = 0,15
Constructieve veiligheid	6	6/13 = 0,46
Water management	4	4/13 = 0,31
Operationele toepasbaarheid	1	1/13 = 0,08
$\Sigma = 13$		$\Sigma = 1$

Tabel 4: Weegfactoren criteria

5.5.2 Waardering varianten

De volgende stap is het daadwerkelijk beoordelen van de varianten per criterium. Per criterium wordt er een score toegekend tussen 1 en 10, waarbij 1 zeer slecht is en 10 perfect. De scores worden toegekend op basis van paragraaf 5.1 tot en met paragraaf 5.4. De score die een variant krijgt voor elk criterium wordt vermenigvuldigd met de bijbehorende weegfactor (vergroot met factor 100). De gewogen scores van elk criterium kunnen hierna worden opgeteld om zo een totaalscore per variant te verkrijgen (Hertogh et al., 2019).

	WF	Water in de dijk		Wateropslag in achterland		Berging in bodem van achterland	
		Score	SC*WF	Score	SC*WF	Score	SC*WF
Hydraulisch effect	15	5	60	7	90	2	30
Constructieve veiligheid	46	3	138	8	346	5	230
Water management	31	3	93	7	217	4	124
Operationele toepasbaarheid	8	4	32	5	48	5	40
Totaal			323		653		424

Tabel 5: Score per variant

Tabel 5 laat zien dat de variant 'wateropslag in achterland' beduidend beter voldoet aan het PvE dan de twee overige varianten. Dit ontwerp scoort op alle onderdelen gemiddeld tot goed. Verder is te zien dat de berging in de bodem van het achterland beter scoort dan de tank in de dijk. De berging in de bodem scoort op alle onderdelen gemiddeld, behalve op 'hydraulisch effect'. Hier scoort deze variant erg slecht. De tank in de dijk scoort vooral slecht op de onderdelen 'constructieve veiligheid' en 'water management', terwijl deze twee het zwaarst meewegen.

6. Conclusies en aanbevelingen

Het doel van dit onderzoek was het ontwerpen van een systeem dat rivierwater in en/of rondom dijken kan opslaan bij hoogwater en dit water weer kan vrijgeven in tijden van droogte. In dit hoofdstuk zal er gereflecteerd worden op de vraag in hoeverre dit doel is bereikt en op welke aspecten de focus moet liggen bij eventueel vervolgonderzoek.

6.1 Conclusies

De drie concepten die in dit rapport zijn besproken voldoen allemaal deels aan de eisen die in hoofdstuk 2 zijn geformuleerd.

Het plaatsen van een tank in de dijk is een ruimte-efficiënt idee en het zorgt voor extra beschikbaar water tijdens droge periodes. Daarnaast kan de opslag van rivierwater de waterstand in de rivier verlagen tijdens hoogwater, zij het beperkt. Deze variant kent echter een aantal grote obstakels. De constructieve veiligheid van de dijk komt in gevaar zonder aanvullende maatregelen, de waterkwaliteit van het opgeslagen water moet actief op peil worden gehouden en ten slotte is het onzeker hoe duurzaam dit concept is.

Het creëren van een bekken naast de rivier is een idee dat zowel de droogte kan verhelpen als de waterstand kan verlagen bij hoogwater. Deze variant scoort op beide onderdelen het beste van de drie gepresenteerde varianten. Het is echter de vraag hoeveel de waterstandsverlaging in werkelijkheid bedraagt, aangezien er in dit onderzoek een versimpelde methode is gebruikt om deze verlaging te berekenen. Daarnaast is bij dit idee medewerking nodig van externe partijen, indien het land achter de dijk niet in het bezit van de gemeente of het waterschap is.

Het opslaan van water in de bodem van het achterland is geschikt om water op te slaan voor droge periodes, maar het is minder geschikt om tijdens extreem hoogwater de waterstand te verlagen. Hoogwater zal doorgaans gepaard gaan met hevige regenval en het is niet verstandig om de bodem dan ook nog te belasten met rivierwater dat moet infiltreren (Theunissen, 2023).

Indien gewenst is dat waterstandsverlaging en droogtebestrijding daadwerkelijk gecombineerd worden, zijn een tank in de dijk en een bekken in het achterland de enige geschikte concepten. Op dit moment krijgt het bekken in het achterland de voorkeur boven de tank in de dijk. Bij het laatstgenoemde concept zijn er meer obstakels die overwonnen moeten worden voordat het een goede oplossing voor het probleem kan vormen.

6.2 Aanbevelingen

Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen hoe de aanleg van een tank in een dijk toch een geschikte oplossing kan vormen. De materiaalkeuze zal doorslaggevend zijn in de duurzaamheid van deze variant. Er zullen maatregelen moeten worden genomen om de veiligheid van de dijk te waarborgen. De ideale diepte onder de grond en de ideale grootte van de tank moeten worden onderzocht, terwijl de kosten en winst aan water niet uit het oog mogen worden verloren.

Wat betreft het bekken in het achterland, is het belangrijk dat er onderzocht wordt hoe het bezit van de grond achter een dijk verdeeld is in Nederland. Mocht deze grond veel in privébezit zijn, moet de afweging worden gemaakt of de kosten om dit land te kunnen gebruiken wel opwegen tegen het water dat kan worden opgeslagen.

Verder moet er, ongeacht de variant, onderzocht worden wat de berging van rivierwater voor invloed heeft op de waterstand. In dit rapport is dit slechts zeer simplistisch berekend.

Literatuur

- Asselman, N., & Van Heeringen, K.-J. (2023). *Een watersysteemanalyse - wat leren*. Deltares.
- Bijlo, E. (2020, Oktober 30). De stille opmars van een prijskaartje aan CO2. *Trouw*.
- De Mars, H. (2013, Juni). De Roer, een getemde wildebras. *Natuurhistorisch Maandblad*, pp. 105-110.
- Defensie. (2023, Maart 1). *defensie.nl*. Opgehaald van <https://www.defensie.nl/actueel/nieuws/2023/03/01/proefdijk-opgeblazen-in-marnewaard>
- Förster, U., Van den Ham, G., Calle, E., & Kruse, G. (2012). *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. Deltares.
- Geraeds, R. (2000). *Waarnemingen van de Gaffellibel (Ophiogomphus cecilia) langs de Roer*.
- Helsen, K., Vannoppen, W., Poesen, J., & Honnay, O. (2018). *Inzetten van planten-diversiteit tegen dijkerosie*. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- Hertogh, M., Bosch-Rekvelde, M., & Houwing, E. (2019). *Dictaat CTB1220 Integraal Ontwerp en Beheer*. TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft.
- Hooghart, J., & Lablans, W. (1988). *Van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen*. De Bilt: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Jonkman, S., Jorissen, R., Schweckendiek, T., & Van den Bos, J. (2021). *Flood Defences*. TU Delft, Department of Hydraulic Engineering, Delft.
- KNMI. (2022). *knmi.nl*. Opgehaald van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/>
- Ministerie van Justitie en Veiligheid. (2023). *Afhandeling schade wateroverlast juli 2021*. Den Haag.
- Olsthoorn, T. (1977). *In Nederlandse zandformaties zijn het doorstroomde en het totale porievolume aan elkaar gelijk*.
- Philip, S., & Kew, S. (2022, Oktober 5). *knmi.nl*. Opgehaald van <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/droge-zomer-op-noordelijk-halfmond-waarschijnlijker-door-klimaatverandering>
- Polyfluor Plastics. (sd). *polyfluor.nl*. Opgehaald van <https://www.polyfluor.nl/assets/files/soortelijke-massa-kunststoffen.pdf>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (sd). *Het grondwatersysteem*. Opgehaald van [rivm.nl: https://www.rivm.nl/landelijk-meetnet-grondwaterkwaliteit/grondwatersysteem](https://www.rivm.nl/landelijk-meetnet-grondwaterkwaliteit/grondwatersysteem)
- Rijksoverheid. (2023). *helpdeskwater.nl*. Opgehaald van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/crisismanagement/begrippen/toelichting/afvoer/>
- Rijksoverheid. (2023). *helpdeskwater.nl*. Opgehaald van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/regionale/>
- Rijksoverheid. (2023). *helpdeskwater.nl*. Opgehaald van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/>

- Rijksoverheid. (2023). *Monitoring van het zuurstofgehalte in rivierwater*. Opgehaald van [helpdeskwater.nl](https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/monitoring/gegevensinwinning/chemisch-fysisch/zuurstof/):
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/monitoring/gegevensinwinning/chemisch-fysisch/zuurstof/>
- Rijkswaterstaat. (2021). *Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2023, Maart 23). Lobith, Gelderland , Nederland.
- Rijkswaterstaat. (2023). *Boven-Rijn*. Opgehaald van [rijkswaterstaat.nl](https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/boven-rijn):
<https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/boven-rijn>
- Rijkswaterstaat. (sd). *infomil.nl*. Opgehaald van <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/thema-s/watertekort/verdringingsreeks/>
- Schinkel, F. (2021). *Hoe een kabeltje van 7 millimeter door een dijk bij Kampen voor 32.000 euro en een rechtszaak zorgt*. Algemeen Dagblad, Kampen.
- Schult van Haegen, M., & Dekker, S. (2006). *Beleidslijn grote rivieren*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Schuttenhelm, R. (2020, Juli 13). *decorrespondent.nl*. Opgehaald van <https://decorrespondent.nl/11315/de-zomer-van-de-21ste-eeuw-is-grillig-heter-droger-en-natter-dan-ooit/17522240451760-4ff2c962>
- Technische Universiteit Delft. (sd). *tudelft.nl*. Opgehaald van <https://www.tudelft.nl/innovatie-impact/innovation-projects/flood-proof-holland>
- Theunissen, G. (2023, Februari 27). (P. Thönissen, Interviewer)
- TNO. (sd). *dinoloket.nl*. Opgehaald van <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>
- Trouw. (2021, juli 2021). Opgehaald van [trouw.nl](https://www.trouw.nl/binnenland/zo-verliep-de-watersnoodramp-die-niemand-had-zien-aankomen~bd413dee/): <https://www.trouw.nl/binnenland/zo-verliep-de-watersnoodramp-die-niemand-had-zien-aankomen~bd413dee/>
- United States Environmental Protection Agency. (2010). *Underground Storage Tank Flood Guide*. Solid Waste And Emergency Response, Washington D.C.
- Van der Meer, R. (2022). *Watergebruik in de land- en tuinbouw, 2020*. Wageningen: Wageningen University & Research.
- Van der Meij, R. (2023, Februari 23). (P. Thönissen, Interviewer)
- Verdonschot, R. (2021). *Hydromorfologie en connectiviteit*. Wageningen Environmental, Wageningen.
- Verruijt, A. (2001). *Grondmechanica*. Technische Universiteit Delft, Civiele Techniek, Delft.
- Voorendt, M. (2023, 22 Maart). (P. Thönissen, Interviewer)
- Voorendt, M. (2023). *Manual Hydraulic Structures*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Waterschap Limburg. (sd). *Dijkversterking met Gebiedseigen Grond*. Opgehaald van [waterschaplimburg.nl](https://www.waterschaplimburg.nl/projectinformatie/landingspagina/dijkversterking-gebiedseigen-grond/):
<https://www.waterschaplimburg.nl/projectinformatie/landingspagina/dijkversterking-gebiedseigen-grond/>

Bijlage A: Bepaling grondwaterpeil naast waterkeringen

In deze bijlage worden representatieve waterstanden berekend voor het land naast primaire en regionale waterkeringen. Hierbij moet worden opgemerkt dat waterstanden sterk afhangen van de bodemopbouw (Asselman & Van Heeringen). Door verschillende waterkeringen te beschouwen wordt gepoogd een reële gemiddelde waarde te verkrijgen.

Primaire waterkeringen

Om te bepalen wat een representatieve grondwaterstand is in een uiterwaard van een primaire waterkering, worden 6 grondwaterstanden van de uiterwaarden van de Rijn, Maas en Waal gebruikt. Hier wordt vervolgens het gemiddelde van genomen.

Rivier	Gemiddelde grondwaterstand onder maaiveld (centimeter)	Locatie (Rijksdriehoekskoördinaten)
Waal	180	153870, 425302
Waal	160	138930, 425570
Maas	50	130099, 413868
Maas	250	169460, 426890
Rijn	150	194040, 440510
Rijn	250	164620, 442620

Tabel 6: Waterstanden in uiterwaarden van primaire waterkeringen (TNO, z.d.)

$$\text{Gem. grondwaterstand onder maaiveld} = \frac{180 + 160 + 50 + 250 + 150 + 250}{6} \approx 173 \text{ cm}$$

Regionale waterkeringen

Om een gebruikelijke waterstand in de buurt van een regionale waterkering te bepalen, worden 6 grondwaterstanden van de stukken land net achter de schaar dijken van de Vecht, Geul en Overijsselse Vecht gebruikt en hiervan wordt het gemiddelde genomen.

Rivier	Gemiddelde grondwaterstand onder maaiveld (centimeter)	Locatie (Rijksdriehoekskoördinaten)
Vecht	110	132550, 480470
Vecht	185	130426, 475047
Geul	400	177622, 323661
Geul	330	192760, 308775
Overijsselse Vecht	220	237677, 508119
Overijsselse Vecht	150	234261, 503370

Tabel 7: Waterstanden achter schaar dijken van regionale waterkeringen (TNO, z.d.)

$$\text{Gem. grondwaterstand onder maaiveld} = \frac{110 + 185 + 400 + 330 + 220 + 150}{6} \approx 233 \text{ cm}$$

Bijlage B: Berekeningen experiment

De formule om de gemiddelde effectieve spanning onder een cirkelvormige pijp die bedekt ligt onder een laag grond te berekenen luidt (Verruijt, 2001):

$$\sigma' = (\gamma - \gamma_w) \left[d + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) * R \right] + (\gamma_p - \gamma_w) * \pi R / 2$$

waarin: σ' [kPa] = gemiddelde effectieve spanning onder de pijp

γ [kN/m³] = nat volumegewicht van zand/klei = 20 kN/m³

γ_w [kN/m³] = volumegewicht van water = 10 kN/m³

d [m] = gronddekking

R [m] = straal van de pijp

γ_p [kN/m³] = gemiddeld volumegewicht van de pijp (inclusief inhoud)

Het volumetrisch gewicht van de dekkende grondlaag γ bedraagt in alle gevallen 20 kN/m³, of het nu om natte klei, nat zand of om een combinatie van beide gaat. Beide grondsoorten hebben namelijk hetzelfde volumetrisch gewicht (Verruijt, 2001).

Het gemiddeld volumegewicht van de pijp γ_p wordt berekend met de volgende formule:

$$\gamma_p = \frac{2\pi R t}{\pi R^2} * \gamma_{pvc}$$

waarin: t = randdikte buis

γ_{pvc} = volumegewicht van PVC = 14 kN/m³ (Polyfluor Plastics, z.d.)

Zoals in bovenstaande formule zichtbaar is, dient in de bepaling van het volumetrisch gewicht van de pijp de verhouding tussen het oppervlak van de randen en het totale oppervlak van de buis te worden berekend.

Aan de hand van bovenstaande formules zal nu voor elke dijk de gemiddelde effectieve spanning onder de tank worden berekend.

Dijk 1

De dijk met de kleinste tank kent de volgende eigenschappen:

$d = 0,207$ m

$R = 0,0805$ m

$t = 0,006$

$$\gamma_p = \frac{2\pi * 0,0805 * 0,006}{\pi * 0,0805^2} * 14 = 2,09 \text{ kN/m}^3$$

De gemiddelde effectieve spanning bedraagt dan:

$$\sigma' = (20 - 10) \left[0,207 + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) * 0,0805 \right] + (2,09 - 10) * \pi * 0,0805 / 2$$

$$\sigma' = 1,24 \text{ kPa}$$

Dijk 2

De dijk met de middelgrote tank kent de volgende eigenschappen:

$d = 0,118$ m

$R = 0,125$ m

$t = 0,009$

$$\gamma_p = \frac{2\pi * 0,125 * 0,009}{\pi * 0,125^2} * 14 = 2,02 \text{ kN/m}^3$$

De gemiddelde effectieve spanning bedraagt dan:

$$\sigma' = (20 - 10) \left[0,118 + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) * 0,125 \right] + (2,02 - 10) * \pi * 0,125/2$$

$$\sigma' = -0,12 \text{ kPa}$$

Dijk 3

De dijk met de grootste tank kent de volgende eigenschappen:

$$d = 0,05 \text{ m}$$

$$R = 0,0,159 \text{ m}$$

$$t = 0,010 \text{ m}$$

$$\gamma_p = \frac{2\pi * 0,159 * 0,010}{\pi * 0,159^2} * 14 = 1,76 \text{ kN/m}^3$$

De gemiddelde effectieve spanning bedraagt dan:

$$\sigma' = (20 - 10) \left[0,05 + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) * 0,159 \right] + (1,76 - 10) * \pi * 0,159/2$$

$$\sigma' = -1,22 \text{ kPa}$$

Bijlage C: Interviews met experts

Om tot ontwerpen te komen die kans van slagen hebben, is het belangrijk dat er experts meedenken over het vraagstuk. Zodoende hebben er twee interviews plaatsgevonden, welke nu behandeld zullen worden.

Ir. R. Van der Meij

Ir. R. Van der Meij is specialist waterkeringen bij Deltares in Delft. Na het opstellen van de twee varianten uit hoofdstuk 3.1 en hoofdstuk 3.2 heeft hij aangegeven waar eventuele pijnpunten kunnen liggen bij de bedachte oplossingen. Daarnaast heeft hij advies gegeven met betrekking tot het zoeken naar nieuwe oplossingen. Per variant volgt nu een overzicht met zijn opmerkingen:

Water in de dijk

Voordelen:

- De dijk wordt wellicht wat sterker met constructie erin.
- Het water opslaan in de dijk zorgt ervoor dat de waterstand bij kleine rivieren een paar centimeter lager is bij hoogwater.

Nadelen:

- Constructies in en op dijken zijn niet wenselijk vanuit veiligheidsoogpunt. Wanneer waterleidingen door een dijk gaan zorgt dit voor grote veiligheidsrisico's.
- Het onderhoud wordt aanzienlijk duurder met een constructie in een dijk. Naast het beoordelen van de grond moet je in het geval van een constructie in een dijk rekening houden met veel meer mogelijke problemen.
- Het is een inefficiënte manier van bergen: de tank loopt misschien maar één keer per jaar vol. Dit zou vaker gebeuren als je hem dieper zou plaatsen, maar hier wordt het ook duurder van en het maakt het toezicht ingewikkelder.
- Er kan misschien één keer per jaar slechts zo'n 6 m³ per strekkende meter dijk worden geborgen. Dit is erg weinig, zeker wanneer het zou worden toegepast bij een grote rivier. De Rijn, bijvoorbeeld, heeft een gemiddeld debiet van 2200 m³/s (Rijksoverheid, 2023).

Als slotadvies zei ir. Van der Meij:

'Als je water in tanks opslaat, zou ik dat niet binnen maar buiten de waterkering doen. Daar wordt het een factor 100 goedkoper van wordt. Water is natuurlijk wel wat waard, maar het is ook weer geen goud.'

Wateropslag in achterland

Aanvankelijk bestond het tweede concept uit een tank die in de binnenberm van de dijk zou liggen, welke bij hoogwater gevuld kon worden met water uit de rivier. De opmerkingen van ir. Van der Meij gaan dus over een verouderde variant.

Voordelen:

- Extra gewicht in de berm werkt gunstig t.b.v. stabiliteit.
- De omwonenden zullen dit idee steunen.
- Voorkomt onderloopsheid doordat de kwelweg wat langer wordt.

Nadelen:

- Het is een dure oplossing. Dit zou rond de 5 miljoen euro per kilometer kosten om het aan te leggen en het tevens een gunstige functie te laten uitvoeren. Het moet zeer multifunctioneel zijn wil het financieel de moeite waard zijn.
- Een dergelijke tank zou echter elke 10 jaar onderhoud nodig hebben.

- Het is lastig om het water in de tank te krijgen. Leidingen door/onder de dijk zijn onwenselijk en leidingen boven de dijk vereisen pompen om het water naar de andere kant van de dijk te transporteren.

Berging in bodem achterland

Ir. R. Van der Meij heeft aangegeven dat de oplossing meer ligt in de berging in de grond van het achterland. Tijdens het interview haalde ir. R. Van der Meij de overstromingen in Limburg aan en zei hierover het volgende:

‘Tijdens de overstromingen in 2021 is extreem veel regen gevallen. Echter, veel van dit water is eerst geborgen in de grond voordat het is afgevoerd richting de rivieren. Als de grond minder water had geborgen dan was er veel hoger water geweest en was er echt een vreselijke ramp gebeurd. Het is dus heel belangrijk dat het water de grond in gaat.’

Gebaseerd op dit advies is de variant uit hoofdstuk 3.3 opgesteld.

Dhr. G. Theunissen

De tweede geïnterviewde specialist is dhr. G. Theunissen. Hij is technisch manager hoogwaterbeschermingsprogramma bij Waterschap Limburg. Ook hij heeft advies gegeven over de verschillende varianten uit hoofdstuk 3.

Water in de dijk

Voordelen:

- Effectief om bij kleine beekjes de waterstand aanzienlijk te verlagen.

Nadelen:

- Winst aan watervolumes is gering.
- Ingewikkeld om water te compartimenteren.
- Bouw en onderhoud vereisen complexe techniek.
- Lastig om deze variant duurzamer te maken dan traditionele dijken. Dijken worden doorgaans gebouwd met gebiedseigen grond en zijn daardoor relatief duurzaam. Het produceren en plaatsen van de tank zal veel uitstoot veroorzaken.
- Dure oplossing.
- Rond de dijk zullen veel kabels moeten worden aangelegd om het systeem te laten werken, of er moet een automatisch systeem worden gebouwd.

Naar aanleiding van dit interview is besloten om de tank van deze variant trapeziumvormig te maken. Dhr. Theunissen adviseerde om dit te doen, zodat de grond van de dijk niet afschuift.

Wateropslag in achterland

Het advies met betrekking tot dit concept is om het water niet op te slaan in een tank, maar om een bekken te maken naast de rivier en dit af te stuwen en zo een stuwmeer naast de dijk te creëren. Dit is vanuit esthetisch oogpunt wenselijker, het levert grotere volumes water op en daarnaast zullen de bouw en het onderhoud ook eenvoudiger zijn. Bovendien kan in dit bekken worden gerecreëerd, mits de waterkwaliteit op peil wordt gehouden.

Het bekken zou gevuld kunnen worden vanuit de rivier, maar tijdens hoogwater zal het bekken naar alle waarschijnlijkheid al gevuld kunnen worden door het vele regenwater. De focus moet liggen op het afvoeren van het regenwater naar het bekken voordat het de rivier bereikt.

Naar aanleiding van dit advies is het bekken in het achterland uit hoofdstuk 3.2 tot stand gekomen. In plaats van een tank wordt nu een meer natuurlijke opslag gebruikt in de vorm van een bekken.

Berging in bodem van achterland

Dhr. Theunissen merkte op dat het tijdens regenval onwenselijk is om water naar het achterland te leiden. De infiltratiecapaciteit is namelijk snel bereikt en het water blijft vervolgens aan het oppervlak staan. Deze variant zou echter wel een manier kunnen zijn om in tijden van droogte water langer vast te houden, door het dan vanuit de rivier naar het achterland te brengen.