

Toepassen Decision Support Framework bij interpretatie
resultaten analyses met D-Geo Flow

**De Innovatieversneller
Hoogwaterbescherming**

De Blomboogerd 1
4003 BX Tiel
Postbus 599
4001 AN Tiel

Contactpersoon
Han Knoeff

div@wsrl.nl

Datum
2022-11-25

Ons kenmerk
ons kenmerk

Uw kenmerk
Uw kenmerk

Bijlage(n)
bijlage

memo

Toepassen D-Geo Flow bij CUB

Vraag en aanpak

Met D-Geo Flow kan de veiligheidsopgave van de Lekdijk op het traject Culemborg – Beatrixsluis scherper worden bepaald. Het rekenmodel dat D-Geo Flow gebruikt is echter niet gekalibreerd. Aan De Innovatie Versneller is gevraagd hoe de resultaten moeten worden geïnterpreteerd. Met andere woorden welke veiligheidsfactoren moeten worden gehanteerd voor bepaling van kritiek verval en pipelengte bij gebruik van D-Geo Flow.

Voor het toepassen van nieuwe (niet volledig uitontwikkelde) kennis is context van de situatie van belang. Toepassen van nieuwe kennis in een specifieke situatie dient in perspectief te worden gezet met overgebleven kennisonzekerheden en de afspraken die rondom kennisonzekerheden die impliciet in de bestaande praktijk gelden. In samenwerking tussen Deltares, Kennis voor Keringen en USACE wordt een Decision Support Framework (DSF) ontwikkeld dat toepassing van nieuwe kennis in projecten ondersteunt. Een eerste versie van het DSF is als pilot gebruikt voor het beantwoorden van de vraag.

Voor beantwoording van de vraag zijn twee expert sessies georganiseerd waarbij in de eerste sessie een beeld is gevormd van de lokale situatie: Daarbij staat de vraag centraal: Wat is hier aan de hand? In de tweede sessie stond het handelingsperspectief centraal: Wat betekenen de D Geo Flow analyses voor het project CUB? Het expertteam bestond uit Bas Berbee, Casper Boon (Fugro / CUB), Silvia Bersan, Eric van der Tas (2^e sessie), Arnold van der Kraan (1^e sessie) (HDSR), Joost Pol (HKV/TU Delft), Ruben Jongejan (Adviesteam Dijkontwerp), Esther Rosenbrand, Han Knoeff en Ligaya Wopereis (1^e sessie) (Deltares).

Beschrijving situatie

De dijkversterking Culemborg Beatrixsluizen (CUB) is een van de 6 versterkingsprojecten langs de Lekdijk van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. De versterkingen zijn noodzakelijk door het afwaarderen van de primaire kering langs het Amsterdam rijnkanaal en de (bijbehorende) normwijziging. In de beoordeling, op basis van resultaten van de POV Centraal Holland is een grote veiligheidsopgave geconstateerd. Voor de bepaling van de veiligheidsopgave door piping zijn met het beschikbare grondonderzoek in de verkenningsfase analyses met de regel van Sellmeijer uitgevoerd.

Figuur 1 geeft het veiligheidsbeeld van het project CUB aan het eind van de verkenning. De figuur toont alleen het westelijke deel van deeltraject CUB, van Fort Honswijk tot aan de Beatrixsluis. Ten oosten van de fort is de pipingopgave in de verkenningsfase weggevallen wegens de aanwezigheid van een dikke deklaag. Blauw geeft de pipingopgave (STPH) aan, rood betreft een kleine hoogteopgave

(GEKB) bij Fort Honswijk, groen betreft de opgave door grasafschuiving van het binnentalud (GABI) en oranje betreft de opgave die veroorzaakt wordt door onvoldoende binnenwaartse macrostabiliteit (STBI). Daarbij moet worden opgemerkt dat, mede op basis van gevoeligheidsanalyses, aan het eind van de verkenningsfase is geconcludeerd dat de opgave nog niet stabiel is. Dit wordt nu in de planuitwerking verder uitgewerkt.



Figuur 1: Veiligheidsopgave CUB aan het eind van verkenningsfase

Inmiddels is met een nadere analyse de opgave door GABI opgelost. Ten tijde van de workshops leek de scope voor STBI ook opgelost, dit bleek later ten dele het geval te zijn. Ook lijkt het mogelijk om de pipingopgave fors te reduceren wanneer rekening wordt gehouden met de invloed van het voorland, meerlaagsheid en anisotropie.

Voor een nadere beschouwing van de veiligheidsopgave door piping zijn de volgende gebiedskenmerken van belang.

- De kering ligt in het bovenrivierengebied welke gekenmerkt wordt door een relatief dunne deklaag op een dikke watervoerende zandlaag. De zandlaag is niet homogeen en bestaat uit verschillende Pleistocene afzettingen waarin zich onder en naast de dijk holocene rivierafzettingen bevinden. Met (HPT) sonderingen is de heterogeniteit van de zandlagen onderzocht. Ten westen van de A27 is de deklaag dikker.
- Voor de dijk is een breed voorland aanwezig. Met boringen is de dikte van de kleilaag op het voorland onderzocht. In het voorland liggen twee voormalige zandwinputten. Na het winnen van het zand is veel fijnkorrelige grond in de

putten gestort. Dit zorgt ervoor dat de put geen direct contact heeft met het Pleistocene zand.

- Voor de dijk ligt een afgedamde arm van de Lek. De dam zorgt samen met het stuwwcomplex Hagestein voor een peilverschil in de rivier. De bodem van de arm ligt in het Pleistocene zand. Met peilbuismetingen is de weerstand van de bodem onderzocht en een intredepunt voor pipinganalyse vastgesteld.
- In het gebied ten oosten van de A27 wordt veel kwel waargenomen. In kopsloten zijn in het verleden bij hoogwater wellen aangetroffen. Na verlegging van de kering voor de uitbreiding van de Beatrixsluizen zijn ook ten westen van de A27 zandmeevoerende wellen aangetroffen.

Bepalen pipingopgave CUB

Voor bepaling van de opgave door piping met de rekenregel van Sellmeijer moet de werkelijkheid sterk worden geschematiseerd. Voor een zuivere beschouwing van de pipingopgave is het belangrijk ook de aspecten te beschouwen die niet in de rekenregel zijn meegenomen. Het Decision Support Framework (DSF) geeft hiervoor een aanpak. Daarbij worden twee stappen onderscheiden. In de eerste stap wordt vanuit het faalmechanisme (gehele faalpad tot overstromen) gekeken welke aspecten van belang zijn voor de beschouwde locatie. In de tweede stap worden deze relevante aspecten nader beschouwd in het licht van de beslissing die voorligt. Indien nodig kunnen voor de tweede stap nadere analyses worden uitgevoerd of extra gegevens worden ingewonnen.

DSF stap 1

Navolgende tabel beschrijft de aspecten die niet in de generieke WBI rekenregels voor de analyse van piping worden meegenomen. In de tabel is de relevantie van het aspect voor de situatie van CUB weergegeven.

In de figuren daarna is in een overzicht aangegeven welke aspecten van belang zijn voor het bepalen van de piping opgave. Onderscheid wordt gemaakt tussen de situatie ten westen en ten oosten van de A27. De kleuren van de teksten in de figuur geeft het effect op de overstromingskans aan: groen leidt naar verwachting tot reductie van de overstromingskans, rood tot stijging en bij geel is het effect op overstromingskans onzeker.

Aspect	Kennis niveau ¹	Relevantie voor CUB	
Opbarsten	1. Meenemen sterkte deklaag bij opbarsten (toename sterkte)	Laag	Alleen van toepassing ten Westen van A2
	2. Reductie belasting door meenemen tijdsafhankelijkheid grondwaterstroming	Hoog	Minder relevant door lange duur van de belasting
	3. Scherpere bepaling belasting door meenemen 3D geohydrologische aspecten van bochten in rivier.	Hoog	Kering ten oosten van A27 loopt niet langs binnen- of buitenbocht van de rivier. De kering ten westen van de A27 loopt wel in een bocht.
Terugschrijdende erosie	4. Reductie belasting door meenemen aanwezigheid voorland	Hoog	Zeer relevant omdat veel voorland aanwezig is. Intredeweerstand in dode arm van Lekdijk en zandwinputten kan daarbij worden meegenomen.
	5. Meenemen extra sterkte van fijne fractie	Hoog	Minder relevant doordat weinig fijne fractie aanwezig is.
	6. Meenemen extra sterkte uit sortering / uniformiteit zandpakket.	Laag	Minder relevant. De korrelverdelingen geven een normaal beeld van de uniformiteit.
	7. Scherper bepalen belasting door drukval (hoger of lager dan 0.3d) in opbarstkanaal.	Laag	Ten oosten van A27 niet relevant doordat er hier een dunne deklaag aanwezig is. Ten westen van de A27 waar de deklaag dikker is, is deze wel relevant.
	8. Meenemen extra sterkte heterogeniteit korrelgrootte in baan van de pijp	Laag	De korrelverdelingen geven geen aanleiding om te veronderstellen dat heterogeniteit in de baan van de pijp bij CUB anders dan anders is ²
	9. Scherper bepalen sterkte door fluctuatie van de diepte of helling van de deklaag in de baan van de pipe voor	Laag	Hier is geen informatie over. Er is geen aanleiding om te veronderstellen dat dit aspect hier speelt.
	10. Stijging belasting door 3D concentratie van stroming naar de pipe	Laag	Relevant. Bij dunnere deklagen is effect kleiner dan bij dikkere deklagen.
	11. Meenemen tijdsafhankelijkheid voor terugschrijdende erosie.	Middel	Minder relevant omdat de hoogwatergolf lang is
	12. Reductie belasting door anisotropie van doorlatendheid	Hoog	Relevant, de verticale doorlatendheid is lager dan de horizontale doorlatendheid.
	13. Scherper bepalen belasting bij meerlaagsheid watervoerend pakket	Hoog	Relevant, er is sprake van een gelaagd watervoerend zandpakket.
Vervolgproces	14. Tijdsafhankelijke stroming en duur van bezwijkproces	Laag	Minder relevant omdat de duur van de hoogwatergolf lang is.

¹ Niveau van de huidige kennis (niet het kennisniveau dat de gebruiker zou moeten hebben om het mee te kunnen nemen in de analyse).

² In het gebied van Sterke Lekdijken komt het op verschillende locaties voor dat de dijk precies langs de rand van geulafzettingen loopt volgens de paleografische kaarten en het TNO model. Dat is hier niet expliciet onderzocht.

Tabel 1: Overzicht relevantie piping aspecten voor CUB

		Kennishiveau	
		Laag	Hoog
Verwacht relatief effect op overstromingskans	Groot	10 3D concentratie van stroming naar de pipe	4 Extra weerstand voorland 13 Meerlaagsheid 12 Anisotropie
	Klein	8 Heterogeniteit van korrelgrootte in de baan van de pipe 9 Helling van de deklaag 6 Brede sortering	7 scherpere bepaling belasting door drukval 11 meenemen tijdsafhankelijkheid 5 extra weerstand fijne fractie 0 Verbeteren schematisatie rekenregels
		1 - 3 aspecten opbarsten	

Figuur 2 Relevantie aspecten piping ten oosten van A27

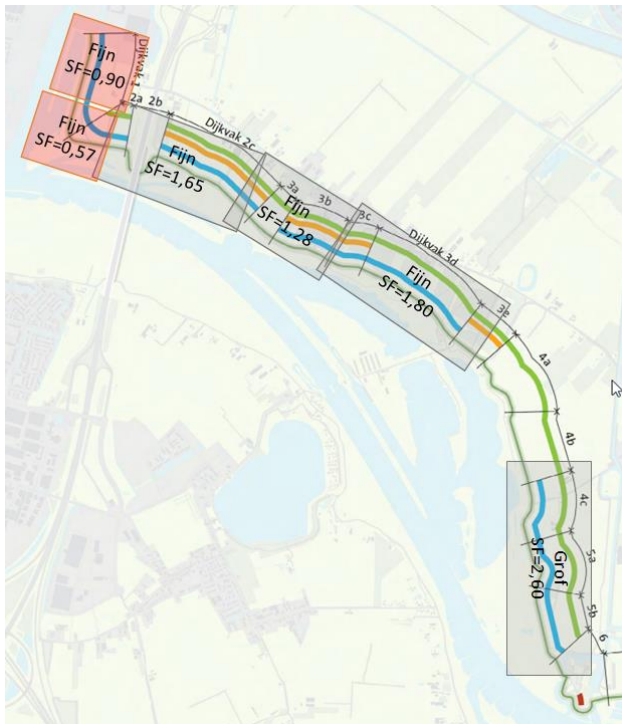
		Kennishiveau	
		Laag	Hoog
Verwacht relatief effect op overstromingskans	Groot	10 3D concentratie van stroming naar de pipe 1. Opbarsten sterke deklaag 7 scherpere bepaling belasting door drukval	4 Extra weerstand voorland 13 Meerlaagsheid 12 Anisotropie
	Klein	8 Heterogeniteit van korrelgrootte in de baan van de pipe 9 Helling van de deklaag 6 Brede sortering	11 meenemen tijdsafhankelijkheid 5 extra weerstand fijne fractie
		2 - 3 aspecten opbarsten	

Figuur 3 Relevantie aspecten piping ten westen van A27

DSF stap 2

De relevante aspecten weerstand voorland, meerlaagsheid en anisotropie kunnen met D-Geo Flow worden geanalyseerd. Voor 3D aspecten (rondom de pipe, niet te verwarren met regionale geohydrologie) en het in rekening brengen van de dikte en sterkte van de deklaag zijn geen rekenmodellen beschikbaar. Deze aspecten kunnen alleen kwalitatief worden beschouwd in het licht van de beslisvraag die voorligt.

In figuur 4 zijn de resultaten van D-Geo Flow berekeningen weergegeven. Het betreffen analyses waarmee rekening is gehouden met de aanwezigheid van voorland, hydraulische weestand van de bodem van de zandwinput en Lekarmen en heterogeniteit van de bodem (anisotropie, meerlaagsheid). Daarbij is van grof (conservatieve veilige schematisatie) naar fijn (scherpere verwachte schematisatie) gewerkt.



Figuur 4: Resultaten D-Geo Flow

In figuur 4 wordt de relatieve evenwichtsfactor (kritiek verval D-Geo Flow / benodigd kritiek verval) per vak gegeven. In het benodigde kritieke verval is rekening gehouden met de standaard schadefactor en schematiseringsfactor (grof of fijn, afhankelijk van vak).

Op een vak ten noordwesten van de A27 na, zijn de evenwichtsfactoren ruim groter of kleiner dan 1. De veiligheidsfactoren die voor de regel van Sellmeijer zijn afgeleid, kunnen op basis van de volgende redenering ook worden gebruikt bij de (gevoeligheids)analyses met D-Geo Flow.

- D-Geo Flow en de rekenregel geven bij dezelfde schematisatie vergelijkbare kritieke vervallen. Uit een bureaustudie die binnen Kennis voor keringen is uitgevoerd, volgt dat er geen aanleiding is te veronderstellen dat de relatieve bijdrage van onzekerheden in D-Geo Flow anders is dan in de rekenregel.
- De impact van anisotropie, meerlaagsheid, voor- en achterland op de veiligheidsfactoren is niet exact vastgesteld. Wanneer wordt gerekend met

karacteristieke waarden van intredeweerstand van het voorland, anisotropie en doorlatendheden van zandlagen (bij meerlaagsheid), blijkt uit Kennis voor Keringen onderzoek, dat geen extra veiligheidsfactoren nodig zijn. De onzekerheid van deze aspecten is minder dominant dan de onzekerheid van de doorlatendheid en zullen bij nadere validatie niet leiden tot andere veiligheidsfactoren.

Daarbij wordt opgemerkt dat het niet bekend is hoe goed het model de werkelijkheid voorspelt wanneer de effecten van anisotropie, meerlaagsheid, voor- en achterland worden meegenomen in de berekening. Op dit moment is er geen aanleiding om een andere modelfactor toe te passen omdat:

- Genoemde aspecten vooral een verbetering zijn van de grondwaterstroming. Er is veel ervaring met en vertrouwen in de voorspellingen van grondwaterstromingsmodellen.
- De invloed van 3D aspecten heeft een groter effect op de modelonzekerheid.
- De modelonzekerheid is naar verwachting veel kleiner dan de onzekerheid van de parameter bepaling.

Voor het gebied ten oosten van de A27 kan worden geconcludeerd dat zonder 3D effecten geen pipingopgave bestaat. De gevonden evenwichtsfactoren zijn hier zo groot (ruim hoger dan 1).

De impact van 3D effecten op deze conclusie is onbekend. Met de huidige kennis kan geen uitspraak worden gedaan (niet volledig worden uitgesloten) of er in de toekomst een opgave door 3D effecten ontstaat. De inzichten rondom 3D effecten zijn onvoldoende concreet om de bestaande praktijk (negotiated knowledge) aan te passen. Er is geen aanleiding om in deze situatie, waarbij er geen andere veiligheidsopgaven zijn, maatregelen te nemen om potentiële opgave door 3D effecten te beheersen.

Voor het gebied ten westen van de A27 geldt dat de opgave in het noordelijke vak mogelijk verdwijnt wanneer rekening wordt gehouden met de sterkte van de deklaag en de aanwezige hydraulische weerstand voor de kering. Hier is namelijk bij de aanleg van de Voorhaven een kleilaag weggebaggerd. Gezien de ontgravingsdiepte zijn daar nog restanten van aanwezig waarvan het niet aannemelijk is dat ze bij een hoogwatergolf zal eroderen. In de voorhaven worden immers geen hoge stroomsnelheden verwacht bij hoogwater. In het zuidelijke vak, met een dunnere deklaag, zal een pipingopgave blijven bestaan. Hier moet een afweging worden gemaakt of het doelmatig is om de opgave voor het noordelijk vak scherper te bepalen. Bij deze afweging spelen twee aspecten een rol:

- Kosten – baten afweging: Vergelijking van de kosten van dijkversterking zonder extra onderzoek met de kosten van dijkversterking met onderzoek. In het tweede geval is er een kans dat de dijkversterking door het nader onderzoek goedkoper wordt. In het tweede geval dient ook rekening te worden gehouden met een verhoogd risico en/of de extra kosten die vanuit de calamiteitenorganisatie voor het beheersen van waterveiligheid gemaakt moeten worden zolang de dijk nog niet op orde is.
- Maatschappelijke afweging: Leidt uitstel van de maatregel tot extra of minder overlast in de omgeving? Wat betekent langere onzekerheid over veiligheidsopgave? Heeft uitstel invloed op (bestuurlijke) afspraken met gebiedspartners? Enzovoort.

Uiteindelijk gaat het om een afweging van voor en nadelen van het uitstellen van een maatregel gegeven onderzoek

	meer onderzoek en beslissing over maatregel uitstellen	Maatregel treffen, Geen nader onderzoek
Voordeel	Mogelijke kostenbesparing en reductie overlast omgeving wanneer maatregel niet nodig is.	Helderheid voor omgeving en gebiedspartners.
Nadeel	Langere onzekerheid over veiligheidsopgave. Hoger risico gedurende de uitsteltijd dan wanneer direct een maatregel wordt getroffen	Mogelijk onterechte investering

Tabel 1 Afweging voor nader onderzoek: algemene beschouwing

Voor het project CUB zijn de afwegingen voor nader onderzoek in Tabel 2 weergegeven.

	meer onderzoek en beslissing over maatregel uitstellen	Maatregel treffen, Geen nader onderzoek
Voordeel	De mogelijkheid voor reductie van de opgave, overlast voor de omgeving en kostenbesparing door meer onderzoek is hier beperkt. Om achterloopsheid te voorkomen moet de maatregel die in het zuidelijke vak nodig is een stuk worden doorgezet in het noordelijke vak.	De voorziene maatregel, heavescherm, maakt een einde aan de kennisonzekerheden voor terugschrijdende erosie en opbarsten (3D effecten en sterkte deklaag)
Nadeel	Er zijn zandmeevoerende wellen in het noordelijke vak zijn waargenomen, waardoor onzekerheid over veiligheidsopgave serieus moet worden genomen	De meerkosten ten opzichte van de totale projectkosten zijn relatief beperkt

Tabel 2 Afweging uitstel en nader onderzoek voor project-CUB gebied ten westen van A2

Voor het gebied ten westen van de A27 kan worden geconcludeerd dat er veel argumenten voor het nemen van de maatregel zijn.

Conclusie en aanbevelingen

Om nieuwe kennis mee te nemen in de analyse van de veiligheidsopgave door piping voor het project CUB is een aanpak met een DSF (decision support framework) toegepast in twee werksessies. In deze aanpak wordt de relevantie van nieuwe kennis op basis van locatie specifieke kenmerken bepaald, en worden zowel kwalitatieve als kwantitatieve aspecten meegewogen voor de uiteindelijke beslissing.

Voor dit project is op basis van de ondergrondkenmerken onderscheidt gemaakt in twee delen: het deel ten westen en het deel ten oosten van de A27.

- Voor het gebied ten oosten van de A27 kan worden geconcludeerd dat zonder 3D effecten geen pipingopgave bestaat.

De met D-Geo Flow gevonden evenwichtsfactoren zijn hier groot (ruim hoger dan 1). Op een vak ten noordwesten van de A27 na, zijn de evenwichtsfactoren ruim groter of kleiner dan 1. De veiligheidsfactoren die voor de regel van Sellmeijer zijn afgeleid, kunnen ook worden gebruikt bij de (gevoeligheids)analyses met D-Geo Flow omdat D-Geo Flow en de rekenregel bij dezelfde schematisatie vergelijkbare kritieke vervallen geven *en* er geen aanleiding is te veronderstellen dat de relatieve bijdrage van onzekerheden in D-Geo Flow anders is dan in de rekenregel. Wanneer wordt gerekend met karakteristieke waarden van intredeweerstand van het voorland, anisotropie en doorlatendheden van zandlagen (bij meerlaagsheid), blijkt uit Kennis voor Keringen onderzoek, dat geen extra veiligheidsfactoren nodig zijn. De onzekerheid van deze aspecten is minder dominant dan de onzekerheid van de doorlatendheid en zullen bij nadere validatie niet leiden tot andere veiligheidsfactoren.

Er is geen aanleiding om in deze situatie, waarbij er geen andere veiligheidsopgaven zijn, maatregelen te nemen om potentiële opgave door 3D effecten te beheersen

- Voor het gebied ten westen van de A27 kan worden geconcludeerd dat in het zuidelijk vak een maatregel nodig is. Voor het noordelijke vak zijn er veel argumenten om de versterking tegelijk met het zuidelijk vak uit te voeren.

Deze aanpak werkt volgens deelnemers van de workshop verhelderend omdat deze zowel positieve als negatieve aspecten en effecten met een hoog en met een laag kennisniveau op een gestructureerde manier in beeld brengt.

Een laag kennisniveau voor aspecten die een hoge relevantie kunnen hebben voor een specifieke situatie kan verontrustend werken. Voor effecten met een potentieel grote invloed op de overstromingskans met een hoog kennisniveau wordt de suggestie gedaan om op basis van ervaring in projecten nader uit te werken hoe groot de effecten in specifieke situaties kunnen zijn.

Voor effecten met een potentieel grote invloed op de overstromingskans met laag kennisniveau wordt aanbevolen om indicatieve bandbreedtes van de invloed af te leiden, en om handelingsperspectieven uit te werken. Mogelijke handelingsperspectieven:

1. als de onzekerheid groot is maar redelijkerwijs niet te reduceren, dan zou je die onzekerheid een plaats kunnen geven in de (probabilistische) analyse, zoals we ook met onzekerheden over bijv. laagopbouw, ondergrondparameters, waterstand en de voorspelkracht van modellen doen.
2. als de onzekerheid groot is maar er nog onderzoeken lopen waardoor redelijkerwijs is te verwachten dat de onzekerheid op afzienbare termijn veel kleiner zal worden, ligt het voor de hand om in scenario's denken en per geval bedenken wat een wijs besluit is: wachten of nu al handelen. Dit handelingsperspectief is bij CUB uitgewerkt.
3. Als de onzekerheid groot is maar er geen tijd is voor nader onderzoek kan ook worden gedacht aan maatregelen die minder invloed ondervinden van de onzekerheid, of deze juist uitsluiten, zoals de toepassing van een heavescherm ten westen van de A27 onafhankelijk is voor (de onzekerheid van) 3D effecten.

Colofon:

Vraagsteller(s): Bas Berbee (Fugro), Silvia Bersan (HDSR)

Project: Culemborg-Beatrixsluis (CUB)

Waterschap: HDSR

Auteur(s): Esther Rosenbrand en Han Knoeff (DIV)

Kwaliteitsborging: Maurits van Dijk (DIV)

Deelnemers werksessies: Bas Berbee, Casper Boon (Fugro / CUB), Silvia Bersan, Eric van der Tas (2^e sessie), Arnold van der Kraan (1^e sessie) (HDSR), Joost Pol (HKV/TU Delft), Ruben Jongejan (Adviesteam Dijkontwerp), Esther Rosenbrand, Han Knoeff, Ligaya Wopereis (1^e sessie) (Deltares). Deelnemers hebben meegekeken met de opgestelde Memo.