

Levensduur Maeslantkering

Kennisvragen beantwoorden en integreren tot restlevensduur



Levensduur Maeslantkering

Kennisvragen beantwoorden en integreren tot restlevensduur

Auteur(s)

Sam Majvis

Martijn de Jong

Esther van Baaren

Levensduur Maeslantkering

Kennisvragen beantwoorden en integreren tot restlevensduur

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat West Nederland Zuid
Contactpersoon	P. Beeldman en J. van den Broeke
Referenties	SITO PS IenW Projectplan Levensduur MLK fase 2 d.d. 4 december 2023
Trefwoorden	Stormvloedkeringen, technisch, functioneel, economisch, levensduur, knelpunten, zeespiegelstijging, sluitfrequentie, cumulatieve aantal sluitingen, beheer en onderhoud, assetmanagement

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	17-12-2024
Projectnummer	11210309-000
Document ID	11210309-000-HYE-0004
Pagina's	44
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Sam Majvis	Martijn P.C. de Jong
	Esther van Baaren	

Samenvatting

De voorkeurstrategie voor de Nederlandse Delta is het behouden van een afsluitbaar open Nieuwe Waterweg (DPRD, 2020). Zeespiegelstijging zorgt er echter voor dat deze strategie onder druk komt te staan. Een belangrijk onderdeel van het uit kunnen voeren van deze strategie is de onzekere restlevensduur van de Maeslantkering (MLK). Het Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden (DPRD) wil daarom weten of de ontwerplevensduur van 100 jaar ook onder klimaatverandering en andere toekomstige ontwikkelingen gehaald kan worden, en zo niet, welke levensduur verlengende maatregelen er mogelijk zijn. Deze studie is gericht op het beantwoorden van die vragen en draagt daarmee bij aan de actualisering van de voorkeursstrategie. In deze studie zijn de volgende aspecten ten bate van afbakening niet beschouwd: veranderingen in gebiedsinrichting en in wet- en regelgeving, en uitdagingen rondom achterstallig Beheer en Onderhoud (BenO). Ook wordt aangenomen dat onderdelen die eenvoudig te vervangen zijn niet tot einde levensduur leiden.

Uit de analyses is gebleken dat vier van de beschouwde aspecten cruciaal zijn voor de levensduur van de MLK:

1. Het vermoeiingsbudget van de stalen onderdelen en dan met name de vakwerkarmen;
2. De technische levensduur van de combiwanden (damwanden met buispalen) onder vigerende veiligheidsnormen;
3. De uitvoerbaarheid van BenO;
4. Mogelijk toenemende kosten van BenO, met name in combinatie met zeer grote investeringen.

De vakwerkarmen zijn oorspronkelijk ontworpen op het uitgangspunt van totaal 15 stormsluitingen gedurende de levensduur (2097) van de MLK. Door zeespiegelstijging kan het zo zijn dat hier eerder dan verwacht sprake van is. Zonder maatregelen is er met de KNMI'23 scenario's Laag, Hoog en de bovengrens van Hoog als uitgangspunt sprake van cumulatief 15 sluitingen binnen de beoogde levensduur van de MLK in 2091, 2076 en 2065. In de analyses ten tijde van het ontwerp zijn conservatieve aannames gemaakt, waardoor het werkelijke totale sluitbudget in de praktijk mogelijk hoger is. Het advies is om het daadwerkelijke vermoeiingsbudget (aantal resterende krachtswisselingen) te modelleren en om het budget dat resteert na elke verificatiesluiting en stormsluiting te updaten. Ook het monitoren van de vermoeiing en op termijn zo nodig verstevigen van zwakke plekken van de vakwerkarmen wordt daarom aanbevolen. Een sluitpeilverhoging van 50 cm kan het optreden van 15 sluitingen in alle scenario's tot voorbij 2097 verschuiven, maar de gevolgen hiervan voor de waterveiligheid en -overlast inclusief buitendijkse gebieden zijn niet onderzocht in de hier beschreven studie. Uit een eerdere verkenning door Deltares (Deltares, 2023e) bleek dat sluitpeilverhoging grote (economische) gevolgen kan hebben voor buitendijks gebied. Aanbeveling is dan ook om de effecten van het geleidelijk verhogen van het sluitpeil te onderzoeken.

Zonder maatregelen heeft corrosie (en daardoor een grotere kans op plooi) van de buispalen in de combiwanden langs de landhoofden een grote invloed op de levensduur van de MLK. Op basis van vigerende normen is in een parallel uitgevoerde studie bepaald dat de combiwanden, gezien vanaf 2024, nog minimaal een restlevensduur hebben van 15 jaar (Deltares, 2024b). Een aandachtspunt is dat de huidige combiwanden waarschijnlijk niet gedeeltelijk vervangbaar zijn – de daarnaast gelegen delen zouden in dat geval verzwakken. Als die ingreep noodzakelijk blijkt, zal er daarom waarschijnlijk een nieuwe constructie aangelegd moeten worden vóór de huidige combiwanden. Het vervangen van de combiwand lijkt vooralsnog niet tot einde economische levensduur te leiden.

Door zeespiegelstijging zal het alarmpeil (+1.7 m NAP) van de parkeerdokken steeds vaker bereikt worden (Trace-Kleeberg, et al., 2023). Vanwege de veiligheid mogen er dan geen werkzaamheden meer plaatsvinden in de parkeerdokken. Voor dit aspect wordt door RWS Ontwerpt al aan een technische oplossing gewerkt die ervoor kan zorgen dat er langer onderhoud gepleegd kan worden.

Indien BenO-kosten toenemen in de tijd kan – vooral in combinatie met zeer grote eenmalige investeringen aan de MLK – de situatie ontstaan dat einde economische levensduur bereikt wordt. Echter, op basis van de beschikbare kennis kan op dit moment niet geconcludeerd worden dat einde economische levensduur inderdaad bereikt gaat worden binnen de oorspronkelijk beoogde technische/functionele levensduur (dat wil zeggen 100 jaar, tot aan 2097). Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat economische levensduur sterk samenhangt met andere aspecten van levensduur: indien de levensduur van de MLK bijvoorbeeld korter wordt door einde technische levensduur van een van de keringsonderdelen, wordt ook de tijd waarbinnen een grote investering terugverdiend moet worden korter.

Volgens de huidige inzichten wordt einde levensduur van de MLK op zijn vroegst in 2040 bereikt door een te grote kans op plooiing van de buispalen in de combiwanden langs de landhoofden. Indien (door monitoring of nadere analyse) aangetoond zou worden dat de levensduur van de combiwanden langer is, bereikt de MLK op zijn vroegst (volgens de bovengrens van de KNMI'23 scenario's) in 2065 einde levensduur, in dat geval vanwege vermoeiing van de vakwerkarmen. In dit rapport zijn ook meerdere aspecten uitgewerkt die, met of zonder maatregelen, overeenkomen met een moment van einde levensduur dat later valt dan de oorspronkelijk voorziene 100 jaar. Door toevoegen van nieuwe kennis, geüpdatete scenario's van zeespiegelstijging, inzichten en (technische) oplossingen kunnen de gepresenteerde jaartallen in de toekomst verder aangescherpt worden. De gepresenteerde kritieke knelpunten zullen dan mogelijk eerder, later of net niet voorkomen binnen de oorspronkelijk beoogde levensduur van de MLK. Om deze reden is de algemene aanbeveling om de inzichten rondom de hier geïdentificeerde knelpunten, die naar verwachting de levensduur van de MLK gaan bepalen, elke 5 à 10 jaar te updaten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	De Maeslantkering	8
1.2	Restlevensduur	9
1.3	Geïdentificeerde kennisvragen	12
1.4	Projectteam	15
2	Overzicht	17
3	Integratie tot restlevensduur	23
3.1	Restlevensduur	23
3.1.1	Kwantificering van de restlevensduur	24
3.2	Knelpunten	25
3.3	Mitigerende maatregelen	28
3.3.1	Sluitpeilverhoging	30
3.4	Mogelijke adaptatiepaden	32
3.5	Conclusie	35
	Referenties	36
A	Projecties cumulatief aantal sluitingen	40
A.1	Projecties sluit- en oproepfrequenties per zichtjaar	43

1 Introductie

De aanleiding voor deze studie komt uit het Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden (DPRD). De voorkeursstrategie voor de Nederlandse Delta is om de huidige situatie en aanpak zo lang mogelijk op een geschikte manier voort te zetten. Onderdeel van deze strategie is een afsluitbaar open Nieuwe Waterweg (DPRD, 2020), maar zeespiegelstijging zorgt ervoor dat deze strategie onder druk komt te staan. Een belangrijk onderwerp voor het kunnen blijven uitvoeren van deze strategie is de onzekere restlevensduur van de Maeslantkering (MLK). Het DPRD wil daarom weten of de ontwerplevensduur van 100 jaar (dat wil zeggen tot het jaar 2097) ook onder klimaatverandering en andere toekomstige ontwikkelingen gehaald kan worden, en welke levensduur verlengende maatregelen mogelijk zijn. De voorliggende studie draagt daarmee bij aan de herijking (actualisering) van deze voorkeursstrategie.

Tijdens de eerste fase van het project Levensduur Maeslantkering is onderbouwd welke toekomstige ontwikkelingen op welke manier invloed kunnen hebben op de technische en functionele levensduur van de Maeslantkering (Deltares, 2024a). In de tweede fase (voorliggende studie) zijn een aantal kennisvragen verder uitgewerkt, waaronder ook de economische levensduur. Vervolgens zijn alle resultaten geïntegreerd en vertaald naar een benadering van de restlevensduur van de MLK. Ook worden de belangrijke openstaande kennisvragen en mogelijke levensduur verlengende maatregelen benoemd.

In de huidige studie wordt de volgende afbakening gehanteerd:

1. Afbakening tot de voorkeursstrategie van de Nederlandse Delta. De invloed van mogelijke toekomstige systeemveranderingen of besluitvorming, bijvoorbeeld de keuze voor een afgesloten Nieuwe Waterweg, blijft buiten beschouwing.
2. Afbakening tot huidig beleid en wet- en regelgeving, ook voor bijvoorbeeld buitendijkse gebieden.
3. Er wordt geen rekening gehouden met de bestaande uitdagingen van het achterstallig Beheer en Onderhoud (BenO) ('de boeggolf' (Algemene Rekenkamer, 2019)).
4. Alles wat als onderdeel van BenO opgelost kan worden, inclusief grote vervangingen, leidt niet tot einde levensduur.
5. De KNMI'23 scenario's voor zeespiegelstijging worden gebruikt: de scenario's Laag en Hoog en aanvullend de bovengrens van de bandbreedte van het scenario Hoog (in deze studie wordt hiervoor de naam 'Hoog (boven)' gebruikt).¹

Door zeespiegelstijging of andere drivers kan de belastingstatistiek die geldt voor de MLK mogelijk zo veranderen dat de kering enkel al volgens die statistiek niet meer constructief voldoet (einde technische levensduur). Om dat in detail uit te kunnen werken is een gedetailleerde statistische beschrijving van onder andere de vervalbelasting over de MLK benodigd. Dat model is op dit moment niet operationeel beschikbaar. Bovendien is het uitwerken van dat vraagstuk een grote studie op zich, die niet valt binnen de huidige opdracht aan Deltares. Mogelijke veranderingen in belastingstatistiek zijn daarom niet in deze studie meegenomen, afgezien van de (operationele) invloed van zeespiegelstijging. Vanuit dat uitgangspunt, gekeken dus vanuit de context van het object en niet vanuit de (statistiek van de) inwerkende belastingen, is door Deltares in deze rapportage een uitwerking gemaakt van

¹ In het ontwerp van de kering is een toeslag voor zeespiegelstijging meegenomen (Bouwdienst Rijkswaterstaat en Bouwkombinatie Maeslant Kering, 1989; Rijkswaterstaat, 1987). In de huidige studie wordt deze toeslag niet verder geanalyseerd en wordt enkel een interpretatie gemaakt van de sluitfrequentie van de MLK uitgaande van de KNMI'23 zeespiegelstijging scenario's.

de belangrijkste verwachte knelpunten. Er is daarbij onderbouwd waarom aspecten naar huidige verwachting wel of niet bepalend voor de levensduur van de MLK zullen zijn. Hierbij is voortgebouwd op de uitwerking en verkenning gemaakt door Deltares in de eerste fase van dit project (Deltares, 2024a), waarin de potentieel meest kritieke aspecten ('hotspots') zijn geïdentificeerd.

1.1 De Maeslantkering

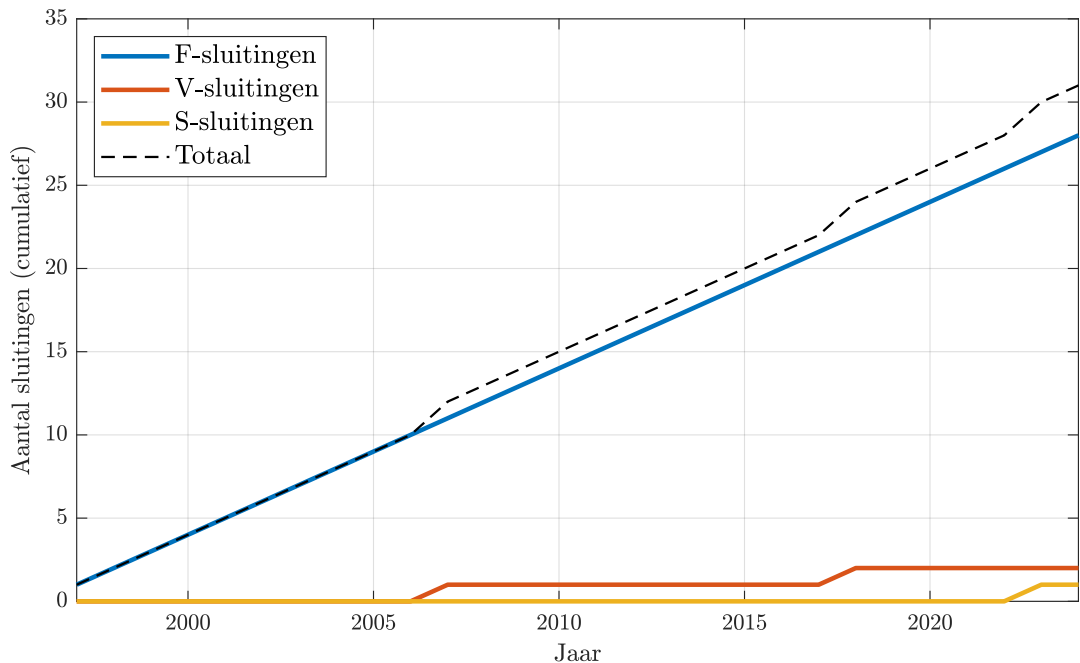
In dit rapport zal veelvuldig worden verwezen naar specifieke eigenschappen van de MLK. Een uitgebreide beschrijving van de keringsonderdelen, -functies en -inzet is beschikbaar in het rapport van de eerste fase van dit project (Deltares, 2024a). Enkele eigenschappen die essentieel zijn voor het begrip van de uitgewerkte kennisvragen worden hieronder kort herhaald.

De MLK en de Hartelkering sluiten altijd tegelijkertijd en vormen met de vaste keringen van Dijktraject 208 en 209 de Europoortkering. De MLK is een voorliggende kering, dat wil zeggen dat deze een rivier- of zeearm geheel of onder speciale omstandigheden afsluit om de kans op extreme belastingen op achterliggende keringen te reduceren. We onderscheiden drie verschillende aanleidingen voor het sluiten van de MLK (zie Figuur 1.1):

- Stormsluiting (S-Sluiting): sluiting bij een verwachte waterstand van +3.0 m NAP in Rotterdam centrum en/of +2.9 m NAP in Dordrecht;
- Functioneringsluiting (F-Sluiting): jaarlijkse proefsluiting voorafgaand aan het stormseizoen;
- Verificatiesluiting (V-Sluiting): elke zeven jaar zonder S-sluiting wordt het sluitcriterium van de MLK tijdelijk verlaagd om een oefening te kunnen doen onder stormcondities.

Naast het sluitpeil zijn er twee andere waterpeilen van belang bij de MLK:

- Het alarmpeil voor het staken van werkzaamheden in de parkeerdokken is +1.7 m NAP
- Het oproeppeil voor het operationeel team is +2.6 m NAP



Figuur 1.1: Cumulatief aantal sluitingen van de Maeslantkering per aanleiding en in totaal tot november 2024.

Figuur 1.2 geeft een overzicht van alle keringsonderdelen. In open toestand zijn de sectordeuren geparkeerd in afsluitbare parkeerdokken in de oevers. Indien de kering moet sluiten worden de parkeerdokken genivelleerd met behulp van schuiven in de dokdeuren zodat de kering begint te drijven. De dokdeuren worden vervolgens geopend zodat de kerende wanden, aangedreven door locomobielen, de vaarweg in kunnen varen. Na het uitvaren worden de sectordeuren afgezonken. Wanneer de kering volledig is afgezonken rust deze op een drempel op een diepte van -17 m NAP, en bedraagt de kerende hoogte +5 m NAP. De kerende wanden zijn ieder via een stalen vakwerkarm verbonden aan een bolscharnier, die het vanwege de bolvorm mogelijk maakt om de kering in- en uit te varen (horizontaal), af te zinken en op te drijven (verticaal).



Figuur 1.2: De sectordeuren van de MLK in afgezonken toestand in de Nieuwe Waterweg (Deltares, 2022a).

1.2 Restlevensduur

De beoordeling van de (rest)levensduur van de MLK bestaat uit drie onderdelen (zie ook Figuur 1.3):

- Technische levensduur: voldoet de MLK aan de constructieve faalkanseis?
- Functionele levensduur: kan de MLK de functies die ervan gevraagd worden nog uitvoeren?
- Economische levensduur: is de maximale periode gedurende dat de MLK economisch verantwoord kan worden gebruikt bereikt?

Technische, functionele en economische levensduur kunnen niet volledig afzonderlijk van elkaar beschouwd worden: het bereiken van einde technische levensduur betekent vaak ook einde functionele levensduur en einde economische levensduur wordt bereikt als het verlengen van de technische levensduur niet meer economisch verantwoord uitgevoerd kan worden.



Figuur 1.3: Onderscheid tussen technische (links), functionele (midden) en economische (rechts) levensduur aan de hand van een voorbeeldbrug: gebrek aan constructieve integriteit (technisch), het niet kunnen voldoen aan eisen van de scheepvaart (functioneel), of te hoge onderhoudskosten (economisch) kunnen ervoor zorgen dat deze (voorbeeld)brug einde levensduur bereikt (KpNK, 2024d).

In de eerste fase van dit project is een overzicht gemaakt van de toekomstige externe ontwikkelingen (drivers) die van invloed kunnen zijn op de levensduur van de (constructieve) onderdelen en de uitvoerbaarheid van de functies in het watersysteem. Deze methode, het maken van een gestructureerd overzicht van alles wat er mogelijk toe doet, is in een eerdere vorm ook toegepast op de levensduur van de Hollandse IJsselkering (Deltares, 2022a; Vader, et al., 2023) en de Vervangingsopgave van de Maasstuwen (van Baaren, et al., 2023). Voor alle functie-driver en keringsonderdeel-driver combinaties is een oordeel gevormd van de relevantie van die combinatie voor de levensduur van de MLK. Het doel van het toepassen van deze methode is niet alleen het uitlichten van de kritieke aspecten, maar om ook te kunnen onderbouwen welke aspecten niet of minder relevant zijn voor het bereiken van het einde van de levensduur. Tabel 1.1 (technische levensduur) en Tabel 1.2 (functionele levensduur) geven het resultaat weer van alle onderwerpen die in de eerste fase van deze studie beschouwd zijn. Elke functie-driver en keringsonderdeel-driver combinatie heeft in deze tabellen een kleurcodering gekregen die de relevantie aanduidt voor het bepalen van de restlevensduur. De combinaties die in de huidige studie uitgelicht zijn om verder uit te diepen, zijn aangegeven met het relevante deelvraagnummer (zie Paragraaf 1.3).

De combinaties met een gestreepte arcering in Tabel 1.2 zijn geen onderdeel van de scope van de huidige studie, maar desalniettemin belangrijk voor de restlevensduur van de MLK vanuit het perspectief van het grotere watersysteem. Vragen over toekomstige realiseerbaarheid en (maatschappelijke) wenselijkheid van de benodigde dijkinvesteringen, verandering van beleid en wet- en regelgeving voor bijvoorbeeld buitendijkse gebieden en besluitvorming over systeemveranderingen met invloed op de MLK (bijvoorbeeld t.b.v. de zoetwaterbeschikbaarheid) kunnen mogelijk al tijdens de levensduur van de MLK gaan spelen maar vallen buiten de scope van deze studie. Er is in deze studie geen rekening gehouden met de bestaande uitdagingen van de 'boeggolf' aan openstaande onderhoudstaken die op dit moment bestaat.

Tabel 1.1: Technische levensduur: overzicht van alle beschouwde driver-keringsonderdeel combinaties (Deltares, 2024a). De combinaties die in de huidige studie verder uitgediept zijn, bevatten een getal overeenkomstig met het deelvraagnummer.

Potentiële drivers → Keringsonderdelen ↓	Degradatie en veroudering				Klimaatverandering en autonome processen						Socio-economische veranderingen			Veranderingen in beleid en wet- en regelgeving				
	Vermoeling	Zetting	Slijtage en schade	Corrosie en zoutinwerking	Zeespiegelstijging	Vaker voorkomen piekafvoer	Vaker voorkomen lage afvoer	Verandering temperatuur en luchtvochtigheid	Veranderingen golf- en windklimaat	Veranderingen CO ₂	Bodemdaling	Toename binnenvaartvolume	Ontwikkelingen Haven van Rotterdam	Groei bevolking en industrie	Veranderingen Waterwet	Stikstofbeleid	Nieuwe systeemeisen of -inrichting	Arbo veiligheidsnormen
Dok en dokdeur																		
Bewegingswerken	1				1													
Bolschamier																		
Fundatie		3			3													
Staalconstructies	1				1													
Ballaststelsel	Driver heeft geen invloed	Driver heeft geen invloed																
Drainagesysteem					3													
Combiwanden			3	3														
Bodembescherming		2		2														
Betonconstructies																		
Drempel																		
Besturingssysteem																		
Operatie en BenO	6				4 6													

Legenda:	Driver niet aanwezig of heeft geen invloed	Invloed driver beperkt of op te lossen binnen BenO	Invloed driver is een kennisvraag	Heeft invloed, kennisvraag wanneer en oplossingsrichtingen
----------	--	--	-----------------------------------	--

Tabel 1.2: Functionele levensduur: overzicht van alle beschouwde driver-functie combinaties (Deltares, 2024a). De combinaties die in de huidige studie verder uitgediept zijn, bevatten een getal overeenkomstig met het deelvraagnummer. Met strepen gearceerde combinaties vallen buiten de scope van de huidige studie, maar zijn desalniettemin belangrijke kennisvragen voor de MLK.

Potentiële drivers →	Degradatie en veroudering				Klimaatverandering en autonome processen						Socio-economische veranderingen			Veranderingen in beleid en wet- en regelgeving								
	Vermoeting	Zetting	Slijtage en schade	Corrosie en zoutinwerking	Zeespiegelstijging	Vaker voorkomen piekafvoer	Vaker voorkomen lage afvoer	Verandering temperatuur en luchtvochtigheid	Veranderingen golf- en windklimaat	Veranderingen CO ₂	Bodemdaling	Toename binnenvaartvolume	Ontwikkelingen Haven van Rotterdam	Groei bevolking en industrie	Veranderingen Waterwet	Slikstofbeleid	Nieuwe systeemeisen of -inrichting	Arbo veiligheidsnormen				
Functies ↓	Invloed via technische levensduur (H5)				Wel effect op de functies, niet op de MLK		Effect driver verwaarloosbaar (TL)		Driver niet aanwezig		Effect driver verwaarloosbaar		Effect driver verwaarloosbaar		Effect driver verwaarloosbaar (TL)			Effect driver verwaarloosbaar (TL)				
Waterveiligheid																						
Betrouwbaarheid sluiten									7	7												
Hogere waterstand achterland door overtopping of overstort																						
Normering																						
Snelheid dijkversterking																						
Waterberging																						
Buitendijks gebied																						
Wateroverlast																						
Scheepvaart									5	5					5	5					5	
Zoetwater-beschikbaarheid																						
Sedimenttransport																						
Biodiversiteit																						

Legenda: Driver niet aanwezig of heeft geen invloed Invloed driver beperkt of op te lossen binnen BenO Invloed driver is een kennisvraag Heeft invloed, kennisvraag wanneer en oplossingsrichtingen

1.3 Geïdentificeerde kennisvragen

In de eerste fase van dit project zijn zeven onderwerpen met openstaande kennisvragen geïdentificeerd, die vervolgens in deze tweede fase verder uitgediept zijn. De keuze voor deze specifieke deelvragen is gemaakt in overleg met het expertteam (zie Paragraaf 1.4). De driver ‘vaker voorkomen van piekafvoer’ is niet afzonderlijk beschouwd omdat wordt aangenomen dat zeespiegelstijging de dominante aanleiding is voor een S-sluiting. In dit onderzoek wordt, net als in de eerste fase, ook steeds aandacht besteed aan aspecten die uitgesloten kunnen worden als bepalend voor einde levensduur. Sommige van die onderwerpen worden regelmatig genoemd als vraag in relatie tot de levensduur van de MLK en op die manier kunnen die punten eenduidig en onderbouwd weggestreept worden. De deelonderzoeken zijn uitgevoerd door of in samenwerking met verschillende partijen. Dit betreft, naast Deltares, Havenbedrijf Rotterdam, HVR Engineering, HKV, Rijkswaterstaat en De Waterwerkers. De verschillende deelvragen, zoals genummerd in Tabel 1.1 en Tabel 1.2, worden hieronder kort toegelicht. In de technische achtergrondrapportage (Deltares, 2024c) heeft elke deelvraag een

eigen hoofdstuk (Hoofdstuk 2 tot en met 5 in Deltares (2024c)) en, indien van toepassing, een bijlage met daarin een memo of rapport geschreven door de partij(en) waar mee samengewerkt is. In dit rapport geeft Hoofdstuk 2 een overzicht van de aanpak, resultaten en aanbevelingen voortkomend uit alle deelvragen. Tot slot worden de resultaten van alle deelvragen in Hoofdstuk 3 geïntegreerd tot een overzicht van de verwachte restlevensduur van de MLK.

Deelvraag 1: Vermoeiingsbudget stalen onderdelen (Hoofdstuk 2 in Deltares (2024c))

Uitvoering: *Deltares, HVR Engineering*

In studies naar hoogwaterveiligheid wordt de invloed van drivers op de MLK vaak meegenomen vanuit het perspectief van (toenemende) sluitfrequentie. Er is vanwege materiaalmoeheid echter ook een eindigheid aan het totale aantal realiseerbare sluitingen van de MLK gedurende zijn levensduur. Omdat de staalconstructies vanwege hun omvang waarschijnlijk lastig te vervangen zijn in de beschikbare tijd in het onderhoudsseizoen en daarnaast ook erg duur zijn, kan dit aspect onder de invloed van drivers tot een vervroegd einde levensduur leiden. Hoeveel cumulatieve sluitingen de stalen onderdelen van de MLK aan kunnen is verder uitgediept in samenwerking met HVR Engineering.

Deelvraag 2: Stabiliteit bodembescherming bij overstortend debiet (Hoofdstuk 3 in Deltares (2024c))

Uitvoering: *Deltares*

Wanneer door zeespiegelstijging steeds vaker sprake zal zijn van (steeds meer) overstortend water, zou dit potentieel de bodembescherming van de MLK kunnen bereiken en aantasten. Om dit aspect uit te sluiten als bepalend voor de restlevensduur van de MLK, is gebruik gemaakt van rekenregels (Weiler et al., 2019) om de snelheden bij de bodem door overstort te vergelijken met de snelheid onder de kerende wand tijdens het afzinken. Laatstgenoemde snelheid is namelijk bepalend geweest in het ontwerp van de bodembescherming (Rijkswaterstaat, z.d.b). Door deze snelheden met elkaar te vergelijken kan een inschatting gemaakt worden van hoe de belasting door overstort zich verhoudt tot de ontwerpcondities.

Deelvraag 3: Geotechnische aspecten (Hoofdstuk 4 in Deltares (2024c))

Uitvoering: *Deltares*

Uit de beoordeling van de Europoortkering (RWS Ontwerpt, 2022) en uit gehouden interviews (Deltares, 2024a) zijn enkele geotechnische onderwerpen naar voren gekomen. De mogelijke geotechnische instabiliteit van de kering wordt veroorzaakt door een combinatie van een slecht functionerend drainagesysteem, zandverlies en corrosie van de combiwanden. De volgende onderwerpen zijn onder deze deelvraag behandeld:

- Verplaatsing van de bolscharnierfundering
- (Ongelijke) zettingen bij de landhoofden en bolscharnierfundering
- Verweking
- Niet-werkend drainagesysteem
- Corrosie en vermoeiing van de trekpalen in de parkeerdokken
- Corrosie en plooi in de buispalen van de combiwanden langs de landhoofden
- Ankeruitval
- Aanvaring

Deelvraag 4: Economische restlevensduur (Bijlage B in Deltares (2024c))

Uitvoering: *De Waterwerkers*

De economische levensduur wordt hier gedefinieerd als de maximale periode waarin de MLK economisch verantwoord kan worden ingezet. Er is sprake van einde economische levensduur

wanneer de kosten die nodig zijn om de MLK in stand te houden de kosten van een nieuwe kering overtreffen. In de uitwerking is de aannahme gemaakt dat de MLK door een identieke kering vervangen wordt. Deze aannahme is met name bedoeld als afbakening van de scope. De invloed van een eventuele andere (goedkopere of duurdere) kering zou de analyse, voor de huidige studiecontext, onnodig complex gemaakt hebben.

Deelvraag 5: Scheepvaarthinder

Uitvoering: *De Waterwerkers in opdracht van Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden (afzonderlijke studie)*

Door zeespiegelstijging gaat de sluitfrequentie van de MLK toenemen. Dit betekent voor de scheepvaart dat de Nieuwe Waterweg vaker gestremd zal zijn. Deze kennisvraag betreft de kritieke sluitfrequentie waarbij de omstandigheden voor de scheepvaart dusdanig onacceptabel worden dat er sprake is van einde functionele levensduur vanuit de functie scheepvaart. Deze kennisvraag is geen onderdeel van de voorliggende studie. Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden (DPRD) doet hier (parallel) onderzoek naar. In de integratie tot restlevensduur (Hoofdstuk 3) wordt scheepvaarthinder meegenomen op basis van fictieve kritieke sluitfrequenties. Op deze manier wordt er een beeld geschetst van het moment waarop bepaalde sluitfrequenties voor kunnen komen, zonder daar conclusies over rendabiliteit aan te verbinden.

Deelvraag 6: Uitvoerbaarheid Beheer en Onderhoud (BenO) (Hoofdstuk 5 in Deltares (2024c))

Uitvoering: *HKV (afzonderlijke studie), RWS Ontwerpt (afzonderlijke studie), Deltares*

Door zeespiegelstijging gaan het alarmpeil van +1.7 m NAP en het oproepeil +2.6 m NAP steeds vaker bereikt worden. Het bereiken van het alarmpeil komt in de huidige situatie al een enkele keer voor, maar in de toekomst zal dat steeds vaker zo zijn (Trace-Kleeberg, et al., 2023). Ook brengt het vaker inzetten van de kering onderhoud met zich mee, terwijl het onderhoudsseizoen mogelijk korter wordt. De volgende kennisvragen met betrekking tot BenO zijn daarom onderdeel van deelvraag 6:

- Wanneer wordt het huidige alarmpeil van +1.7 m NAP onhoudbaar voor het onderhoud?
- Zijn er technische maatregelen mogelijk om het alarmpeil te kunnen verhogen?
- Wanneer wordt het huidige oproepeil van +2.6 m NAP onhoudbaar voor (de capaciteit van) het operationeel team?
- Wanneer zorgt een toename in de hoeveelheid onderhoud, in combinatie met een mogelijk korter wordend onderhoudsseizoen, ervoor dat het BenO onuitvoerbaar wordt?

Deelvraag 7: Faalkansverlaging

Uitvoering: *Rijkswaterstaat*

Een door zeespiegelstijging toegenomen sluitfrequentie zorgt – bij gelijkblijvende faalkans per sluitvraag - voor een verhoogde kans op niet-sluiten per jaar. Hierdoor ontstaat een grotere opgave voor de functie waterveiligheid voor het achterliggende systeem van keringen, en zou op termijn mogelijk niet meer voldaan kunnen worden aan de eisen in de Omgevingswet (voorheen Waterwet). Eén van de potentiële maatregelen om de betrouwbaarheid van de MLK te verhogen is het verlagen van de faalkans per sluitvraag. De openstaande kennisvraag is daarmee 'Is het haalbaar om de faalkans van de MLK te verlagen, en biedt dit verlichting bij een stijgende zeespiegel?'. Deze kennisvraag is geen onderdeel van de voorliggende studie, maar wordt voor de volledigheid wel benoemd.

1.4 Projectteam

De samenstelling van het projectteam van Deltares is weergegeven in Tabel 1.3. De projectbegeleiding vanuit Rijkswaterstaat werd uitgevoerd door Pieter Beeldman (Rijkswaterstaat WNZ) en Joris van den Broeke (Rijkswaterstaat WNZ). Daarnaast heeft gedurende de uitvoering van deze studie een klankbordgroep van kennishouders en belanghebbenden zeer nuttige input en feedback gegeven. De klankbordgroep bestond uit de volgende leden: Alexander Bakker, Stefan van den Berg, Johan van den Bogaard, Rolf Bruins, Arnaud Casteleijn, Ilze Plomp – van der Sar en Joost Seesink (Rijkswaterstaat), en Marco Taal (DGWB). Door de verscheidenheid aan onderwerpen die in deze studie aan bod komen zijn verschillende, ook externe, experts aangesloten. Een overzicht van alle betrokken experts en reviewers is weergegeven in Tabel 1.4. Op verzoek van Rijkswaterstaat zijn de deelstudies die zijn uitgevoerd door andere partijen mede-gecoördineerd door Deltares. Die deelstudies zijn geen onderdeel van de inhoudelijke studie van Deltares. Om die reden heeft Deltares op die onderdelen geen interne review uitgevoerd (zie Tabel 1.4).

Tabel 1.3: Samenstelling projectteam Deltares.

Naam	Expertise	Rol in huidige project
Esther van Baaren	Waterbouwkundige kunstwerken	Projectleider, medeauteur
Sam Maijvis	Hydrodynamica, waterbouwkundige kunstwerken	Hoofdauteur
Martijn P.C. de Jong	Hydrodynamica, stormvloedkeringen	Expert, medeauteur
Otto Weiler	Hydrodynamica, waterbouwkundige kunstwerken	Expert
Désirée Plenker	Hydrodynamica, offshore erosiebescherming	Expert
Arne van der Hout	Hydrodynamica, nautiek	Review
Mark Post	Geotechniek	Expert, medeauteur
Piet Meijers	Geotechniek, betrokkenheid ontwerpfase Maeslantkering	Expert, medeauteur
Dirk Luger	Geotechniek, betrokkenheid ontwerpfase Maeslantkering	Review
Noor ten Harmsen van der Beek	Adaptatiepaden	Expert

Tabel 1.4: Overzicht van de betrokken expert(s), auteur(s) en reviewer per behandeld onderwerp. De hoofdstuknummers verwijzen naar de technische achtergrondrapportage (Deltares, 2024c).

H#	Onderwerp	Expert(s)	Auteur(s)	Review
1 6 7	Introductie, conclusie en integratie tot restlevensduur	Esther van Baaren, Noor ten Harmsen van der Beek, Martijn de Jong, Sam Maijvis	Esther van Baaren, Sam Maijvis	Madelief Doeleman
2	Vermoeiingsbudget stalen onderdelen	Jeroen Ligthart, Jan van Rooij en John Hessels (HVR Engineering), Martijn de Jong	Martijn de Jong	Jeroen Ligthart, Jan van Rooij (HVR Engineering)
3	Stabiliteit bodembescherming bij overstortend debiet	Otto Weiler, Désirée Plenker	Martijn de Jong, Sam Maijvis	Arne van der Hout

H#	Onderwerp	Expert(s)	Auteur(s)	Review
4	Geotechnische aspecten	Mark Post, Piet Meijers	Piet Meijers, Mark Post	Dirk Luger, Martijn de Jong
-	Economische restlevensduur	Jarl Kind (De Waterwerkers)	Jarl Kind (De Waterwerkers)	<i>n.v.t. – extern gerapporteerd</i>
-	Scheepvaarthinder	Jarl Kind (De Waterwerkers)	Jarl Kind (De Waterwerkers)	<i>n.v.t. – extern gerapporteerd</i>
5	Uitvoerbaarheid Beheer en Onderhoud	Bastiaan Kuijper (HKV), Arnaud Casteleijn (RWS PPO)	Sam Maijvis	Madelief Doeleman
-	Faalkansverlaging	Pieter Beeldman en Joris van den Broeke (Rijkswaterstaat WNZ)	<i>n.v.t. – geen hoofdstuk</i>	<i>n.v.t. – geen hoofdstuk of rapport</i>

2 Overzicht

In dit hoofdstuk wordt de aanpak, het resultaat en de aanbevelingen van alle individuele deelvragen samengevat in één tabel per deelvraag. De hoofdstuknummers verwijzen naar de hoofdstukken in de technische achtergrondrapportage (Deltares, 2024c).

Overzicht Deelvraag 1: Vermoeiingsbudget stalen onderdelen (Hoofdstuk 2 in Deltares (2024c))	
Beschrijving	Het eindige vermoeiingsbudget van de stalen delen van de MLK is in de vorige fase van deze studie als een mogelijk levensduurbepalende factor geïdentificeerd. De hypothese dat de MLK een eindig aantal sluitingen kan realiseren is nader uitgewerkt en geverifieerd.
Conclusie	Voor de vakwerkarmen is bij ontwerp uitgegaan van 15 S-sluitingen in totaal, dit kan belangrijk zijn voor einde levensduur van de Maeslantkering. De eerdere V-sluitingen vonden plaats onder vergelijkbare condities als tijdens de S-sluiting van december 2023. Dit impliceert dat ook die bij kunnen dragen aan vermoeiing van de vakwerkarmen. Als dat inderdaad het geval blijkt, dan zou de eventuele toepassing van V-sluitingen mogelijk meer strategisch afgewogen moeten worden ten opzichte van het totale sluitbudget.
Aanpak	Werksessies met HVR Engineering en literatuurstudie ontwerpdocumenten door Deltares.
Resultaat	<ul style="list-style-type: none"> • Uit de ontwerpstukken blijkt dat men voor de locomobiel is uitgegaan van 100 betrekkelijk zware stormen, overeenkomstig een 10.000 jaar herhaaltijd. • Voor de vakwerkarmen is uitgegaan 15 sluitingen in totaal: 5 S-sluitingen in de eerste 50 jaar en 10 in de tweede 50 jaar. Daarbij is een veiligheidsmarge voor vermoeiing per stalen onderdeel (per buis van het vakwerk) toegepast om de kans op falen van de constructie door vermoeiing, gegeven de 15 sluitingen als uitgangspunt, te laten voldoen aan de gestelde overall (constructieve) faalkans van de kering. • Als we aannemen dat er geen reparaties of vervangingen gedaan worden i.r.t. vermoeiing (deels gegeven de nu al grote onderhoudsopgave), dan zouden we 15 sluitingen als een cumulatief 'sluitbudget' van de MLK kunnen interpreteren voor het totaal aan S-sluitingen. Nu zitten er meerdere conservatieve aannames in de aanpak van destijds (altijd dezelfde, lange sluitduur en de zwaarste condities aanwezig tijdens gehele sluitduur), maar er zal eerst nagegaan moeten worden in hoeverre dat een groter sluitbudget zou kunnen betekenen alvorens dat aan te nemen. • Een extra complexiteit is dat de V-sluitingen mogelijk ook meetellen in het vermoeiingsbudget. De condities tijdens de V-sluiting in 2007 waren bijvoorbeeld deels vergelijkbaar met die tijdens de S-sluiting van 2023. • Het uitgangspunt van destijds dat F-sluitingen niet meetellen lijkt nog steeds op te gaan vanwege de typisch milde condities in september. In de praktijk blijken er wel andere krachtseffecten op te treden tijdens een F-sluiting dan vooraf voorzien, maar niet in de vorm van periodieke belastingen die relevant zijn voor vermoeiing.
Aanbevelingen	<ul style="list-style-type: none"> • Implementeer een meet- en monitoringsprogramma voor vermoeiing van kritieke stalen delen. • Her-evalueer de oorspronkelijke ontwerpberoeeningen van stalen delen met hedendaagse rekenmodellen. • Maak na elke V- en S-sluiting een analyse van de opgetreden condities en het totale aantal krachtswisselingen tijdens die inzet om zo de cumulatieve waarde bij te houden en af te zetten tegen het uitgangspunt van het cumulatieve budget (56322 krachtswisselingen). • Maak een plan om bewust om te gaan met het vermoeiingsbudget: wat is al gebruikt, en hoe kan je zo nodig 'sparen'? Bijvoorbeeld om meer marge over te houden in het tweede deel van de levensduur van de MLK, met naar huidige inzichten een sterkere zeespiegelstijging. • Onderzoek de mogelijkheid van vervangen van onderdelen van de vakwerkarmen, en de consequenties op beschikbaarheid en economische levensduur. • Onderzoek de mogelijkheden van (gefaseerd) verhogen van het sluitpeil.

Overzicht Deelvraag 2: Stabiliteit bodembescherming bij overstort (Hoofdstuk 3 in Deltares (2024c))

Beschrijving	Wanneer door zeespiegelstijging er steeds vaker sprake zal zijn van (steeds meer) overstortend debiet, zou de invloed daarvan potentieel de bodembescherming van de MLK kunnen bereiken en daar schade veroorzaken.
Conclusie	De hier gemaakte beknopte schatting heeft laten zien dat de snelheid bij de bodem door overstort en de sterkte van bodembescherming – uitgedrukt in welke snelheid de bodembescherming aankan – mogelijk van dezelfde orde grootte zijn. Echter, de schatting van de stroomsnelheid door overstort die nu gemaakt kon worden is waarschijnlijk aan de hoge kant, en de schatting van de sterkte van de bodembescherming aan de lage kant. In een grove interpretatie daarvan lijkt het mogelijk dat de bodembescherming tot minimaal 1 m zeespiegelstijging aankan, en vanwege de verwachte mate van conservatisme in de gemaakte schattingen waarschijnlijk meer. Indien dat inderdaad het geval zou zijn, dan zou dat betekenen dat de verwachte zeespiegelstijging (KNMI'23 scenario's) en de daaraan gekoppelde mate van overstort tot aan 2100, en daarmee tot de ontwerplevensduur van de MLK, door de bodembescherming op te vangen is.
Aanpak	Deskstudie door Deltares op basis van ontwerpdocumenten, een rekenmethode voor het bepalen van snelheden lokaal bij de bodembescherming als gevolg van overstort (Weiler et al., 2019), en een inschatting van de stabiliteit (maximaal toelaatbare stroomsnelheid nabij de bodem) van de aan de rivierzijde van de MLK aanwezige bodembescherming.
Resultaat	<ul style="list-style-type: none"> • Informatie in de oorspronkelijke ontwerpdocumenten geeft aan dat bij het ontwerp van de bodembescherming de stroomsnelheden die op kunnen treden door de spleet aanwezig onder de kerende wand (tijdens het afzinken of opdrijven) leidend zijn geweest. • Uit de berekeningen van de stroomsnelheid bij de bodem door overstort blijkt volgens de toegepaste rekenregels dat er geen superkritische stroming ('schieterend water') nabij de MLK op zal treden, vanwege de grote waterdiepte op de Nieuwe Waterweg. Dit betekent dat de overstortende straal zich redelijk goed zal verdelen over de hoogte van de waterkolom. De berekende snelheden bij de bodem als gevolg van overstort zijn echter hoog (incl. conservatieve aannames). • De hier gemaakte schatting van de maximale stroomsnelheden nabij de bodem waarbij de bodembescherming nog stabiel blijft is van dezelfde orde grootte als de bodemsnelheden zoals berekend voor overstort. De verwachting is echter dat de geschatte sterkte-capaciteit van de bodembescherming aan de lage kant is.
Aanbevelingen	<ul style="list-style-type: none"> • Preciezer uitkomsten en definitieve conclusies zouden kunnen bijvoorbeeld worden verkregen met behulp van 3D CFD berekeningen, mogelijk gevalideerd op basis van schaalmodelproeven. • Extra monitoring van de bodembescherming bij toenemende zeespiegelstijging en daardoor grote kans op overstort, met een frequentie mede afhankelijk van het eventuele optreden van een sluiting met overstort.

Overzicht Deelvraag 3: Geotechniek (Hoofdstuk 4 in Deltares (2024c))

Beschrijving	Er zijn enkele geotechnische kennisvragen m.b.t. de MLK. In deze studie zijn de volgende onderwerpen behandeld: <ul style="list-style-type: none"> • Verweking ondergrond • Ongelijke zettingen landhoofden • Verplaatsing bolscharnierfundatie bij meerdere sluitingen • Niet-werkend drainagesysteem • Corrosie en vermoeiing van de trekpalen in de parkeerdokken • Corrosie en bezwijken op plooi combiwanden • Ankeruitval (van de combiwanden) • Aanvaring
Conclusie	Corrosie van de buispalen van de combiwanden van de landhoofden is een serieus aandachtspunt dat van invloed kan zijn op de levensduur van de MLK. Uit een studie van Deltares (2024b) blijkt dat de restlevensduur van de combiwanden beperkt is (nog minimaal 15 jaar). De overige aspecten die onder deze deelvraag zijn beschouwd lijken niet doorslaggevend voor de levensduur van de MLK. Enkele daarvan zijn echter wel een aandachtspunt voor het BenO van de MLK.
Aanpak	Deskstudie door Deltares op basis van literatuur en expertinschattingen:

Overzicht Deelvraag 3: Geotechniek (Hoofdstuk 4 in Deltares (2024c))

Resultaat	<ul style="list-style-type: none"> • Plooi van de buispalen van de combiwanden van de landhoofden is een serieus aandachtspunt dat, zonder maatregelen, van grote invloed kan zijn op de levensduur van de MLK. Er zit nog minimaal 15 jaar levensduur in de combiwanden (op basis van vigerende normen en onder meerdere conservatieve aannames). Combiwanden zijn niet gedeeltelijk vervangbaar – de daarnaast gelegen delen zouden in dat geval verzwakken; de constructie haalt zijn sterkte uit het gehele samenstel van onderdelen (buizen, damwandplanken en ankers). • Slecht werkende drainage is een bekend probleem, maar heeft naar verwachting geen onacceptabele consequenties voor de levensduur. • Op dit moment zijn er geen aanwijzingen dat er problemen zijn met de kistdam die de levensduur nadelig beïnvloeden. • Op dit moment is er geen aanwijzing dat de ten tijde van ontwerp uitgevoerde analyse van aanvaringsrisico's verouderd is. Als dat wel zo blijkt te zijn, dan zou dat van invloed kunnen zijn op de kans op niet-beschikbaarheid, maar naar verwachting niet direct op de levensduur van de MLK. • Er zijn op dit moment nog geen aanwijzingen dat dit aspect niet voldoet, maar ankeruitval van de combiwanden is tijdens het ontwerp van de MLK niet expliciet beschouwd. • Alle overige beschouwde geotechnische aspecten (verweking, ongelijke zettingen, verplaatsing bolscharnierfundatie, trekpalen parkeerdok) zijn beoordeeld als niet-bepalend voor de levensduur van de MLK. Het veel voorkomende beeld van de kerende wand die na x sluitingen niet meer het parkeerdok in zou kunnen gedraaid worden door te grote verplaatsing van het bolscharnier is in de gemaakte analyses expliciet ontkracht.
Aanbevelingen	<p>Nader onderzoek is benodigd om de vooralsnog conservatief ingeschatte einde levensduur van de combiwanden van de landhoofden scherper vast te stellen. Dat kan door aanvullende metingen, berekeningen en het trekken van in het veld aangebrachte testdelen.</p>

Overzicht Deelvraag 4: Economische restlevensduur (Bijlage B in Deltares (2024c))

Beschrijving	<p>De economische levensduur is hier gedefinieerd als de maximale periode gedurende dat een productiemiddel economisch verantwoord kan worden gebruikt. De economische levensduur eindigt in deze studie als de kosten die nodig zijn om het productiemiddel in stand te houden, de kosten van een nieuwe MLK overtreffen. Aangenomen wordt dat de MLK door een identieke MLK vervangen kan worden. De vraag is wanneer einde economische levensduur zou kunnen optreden voor de MLK, en welke informatie nodig is om dat te besluiten.</p>
Conclusie	<p>De economische levensduur kan potentieel tot einde levensduur van de MLK leiden. Als de BenO kosten in de tijd niet toenemen, leidt een zeer grote (onvoorziene) eenmalige vervanging halverwege de ontwerplevensduur niet direct tot einde levensduur van de MLK (De Waterwerkers, 2024a). Als de kosten van BenO wel toenemen in de tijd (bijvoorbeeld met 1% per jaar), en er sprake is van grote eenmalige investeringen, kan dit leiden tot een vervroegde einde levensduur van de MLK (De Waterwerkers, 2024a). Dit is echter alleen een rekenvoorbeeld – er kan op dit moment niet geconcludeerd worden dat het einde van de economische levensduur al in zicht is.</p>
Aanpak	<p>Een deskstudie door De Waterwerkers, bestaande uit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verzamelen van informatie over kosten uit bestaande studies en/of het opvragen daarvan bij de beheerder. • Werksessie(s) om tot een betere inschatting te komen voor de variabele BenO kosten.
Resultaat	<ul style="list-style-type: none"> • Op basis van de beschikbare kennis en inzichten kan nu niet geconcludeerd worden dat het einde van de economische levensduur al in zicht is. In tegendeel: forse herinvesteringen in de kering (aanzienlijk hoger dan nu voorzien) halverwege de levensduur, hier als voorbeelden uitgewerkt, lijken vooralsnog economisch gezien rendabel te zijn. • De eventuele toename van BenO kosten in de tijd is onbekend, maar wel van invloed op de investeringsruimte. De onderhoudskosten voor de periode vanaf 2035 zijn hierbij gecorrigeerd voor prijsinflatie. • Het bepalen van 'einde economische levensduur' van de huidige Maeslantkering is complex om verschillende redenen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Het onderzoek naar de technische levensduur van een aantal belangrijke onderdelen, is nog niet afgerond; ○ De kosten van een vervangende Maeslantkering zijn eigenlijk nog niet goed bekend.

Overzicht Deelvraag 4: Economische restlevensduur (Bijlage B in Deltares (2024c))

Aanbevelingen	<ul style="list-style-type: none"> • Inschatting verbeteren van wanneer welke grote (eenmalige) kosten optreden. <ul style="list-style-type: none"> ◦ Een belangrijk aandachtspunt hierbij is de samenhang met de inzetbaarheid van de kering: indien geïnvesteerd wordt in een groot onderdeel (bijvoorbeeld vervanging), is de kering mogelijk voor langere tijd niet inzetbaar. • Inschatting verbeteren voor de ontwikkeling van BenO kosten in de tijd (zowel verleden als toekomst). • Houdt rekening met de invloed van andere levensduurbepalende aspecten. Indien de technische levensduur van een bepaald onderdeel er bijvoorbeeld voor zorgt dat de levensduur van de MLK ingekort wordt, wordt de tijd waarin een grote investeringen terug moet worden verdiend korter en treedt mogelijk eerder einde economische levensduur op. Merk op dat vanwege een minimale terugverdiendtijd van een investering dit ook kan betekenen dat einde levensduur verder naar voren schuift dan bijvoorbeeld het moment van einde technische levensduur.
----------------------	---

Overzicht Deelvraag 5: Scheepvaarthinder

Beschrijving	Kan zeespiegelstijging – binnen de levensduur van de MLK – leiden tot een beslismoment voor de haven van Rotterdam of voor einde functionele levensduur van de MLK?
Conclusie	Het bepalen welke sluitfrequentie acceptabel is, is van bestuurlijke en beleidsmatige aard (De Waterwerkers, 2024b). Eén tot drie keer per jaar sluiten lijkt voor de scheepvaart acceptabel, tien keer per jaar is veel maar wellicht ook nog geen economisch knelpunt (P. Neefjes, persoonlijke communicatie, september 2024). Een sluitfrequentie van tien keer per jaar treedt pas na 2100 op in alle beschouwde scenario's.
Aanpak	De Waterwerkers heeft voor dit onderwerp twee vragen uitgewerkt in opdracht van het Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden (De Waterwerkers, 2024b): <ol style="list-style-type: none"> 1. Wat zijn de kosten voor de scheepvaart en bedrijven als gevolg van het sluiten van de Europoortkering? 2. Is er een methodiek voorhanden om te bepalen welke sluitfrequentie van de Europoortkering per jaar wel of niet acceptabel is?
Resultaat	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rondom de kosten van het sluiten van de Europoortkering voor de scheepvaart en bedrijven zit veel onzekerheid. Daarnaast is het zo dat bij het ramen van de kosten door het sluiten van de Europoortkering onder stormcondities nog onvoldoende onderscheid gemaakt kan worden gemaakt tussen de kosten die toegewezen moeten worden aan het sluiten, of aan de storm. De totale geraamde kosten zijn berekend op €1.7 tot €5.3 miljoen per sluiting. Hierin zijn enkele niet-kwantificeerbare extra kosten buiten beschouwing gelaten, namelijk: congestie op de vaarwegen en vertraging in de afhandeling na een sluiting, mogelijke inhaalkosten na een sluiting, (on)betrouwbaarheidskosten, kosten voor bedrijven door vertraging aan- en afvoer na een sluiting, en imagooverlies. 2. Het bepalen welke sluitfrequentie acceptabel is, is van bestuurlijke en beleidsmatige aard en valt buiten de reikwijdte van het onderzoek van De Waterwerkers. Er zijn instrumenten beschikbaar om een dergelijk oordeel te ondersteunen, zoals een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA), het duidingskader/ de impactanalyse die ook gebruikt wordt in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, en een benchmark van de toegang van verschillende havens waarmee Rotterdam concurreert.
Aanbevelingen	<ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek, monitor en evalueer de gevolgen van zware stormen en van de sluiting van de Europoortkering voor de scheepvaart, de haven en het havenbedrijfsleven. • Ontwikkel een probabilistische benadering, waarbij onder verschillende stormcondities, met en zonder het sluiten van de Europoortkering, de gevolgen voor de scheepvaart en haven inzichtelijk wordt gemaakt. • Ontwikkel nieuwe kentallen voor de waardering van (on-)betrouwbaarheid in reistijden. • Houd ontwikkelingen in concurrerende havens op het gebied van toegankelijkheid nauwlettend in de gaten. • Ga de mogelijkheden na om specifiek de stremmingduur van een sluiting van de Europoortkering te verkorten.

Overzicht Deelvraag 6: Uitvoerbaarheid Beheer en Onderhoud (Hoofdstuk 5 in Deltares (2024c))

Beschrijving	<ul style="list-style-type: none"> Door zeespiegelstijging zal het alarmpeil (+1.7 m NAP) van de parkeerdokken steeds vaker bereikt worden. Vanwege veiligheidseisen mogen er dan geen werkzaamheden meer plaatsvinden in de parkeerdokken. Dit komt in de huidige situatie al een enkele keer voor, maar in de toekomst zal dat steeds vaker het geval zijn (Trace-Kleeberg, et al., 2023). Wanneer wordt dit een knelpunt voor het (inplannen van het) onderhoud van de MLK? Door zeespiegelstijging zal het oproepeil voor het operationeel team (+2.6 m NAP) vaker bereikt worden. Wanneer wordt dit een knelpunt voor het operationeel team? Het is (nog) niet uit te sluiten dat het onderhoudsseizoen door klimaatverandering mogelijk korter zal worden, zeker gecombineerd met een toenemende onderhoudsvraag kan dit voor knelpunten zorgen.
Conclusie	Het in de toekomst steeds vaker voorkomen van het alarmpeil is een groot aandachtspunt voor de MLK, maar er wordt door RWS Ontwerpt al aan een technische oplossing gewerkt (zie Figuur 5.3 in Deltares (2024c)). Het oproepeil zal naar verwachting niet tot einde levensduur leiden, maar oplossingen zijn wel nodig. Het oproepeil zou verhoogd kunnen worden door de maatregel sluitpeilverhoging, maar de gevolgen van die maatregel moeten nader verkend worden. Voor de toenemende onderhoudsvraag, in een mogelijk korter wordend onderhoudsseizoen, kan risico gestuurd BenO overwogen worden.
Aanpak	<ul style="list-style-type: none"> Opstellen frequentielijnen voor alarm- en oproepeil (HKV). Ontwerp technische maatregel (afzonderlijk onderzoek door RWS Ontwerpt). Interpretatie frequentielijnen in de context van zeespiegelstijging en het toepassen van maatregelen (Deltares).
Resultaat	<ul style="list-style-type: none"> RWS Ontwerpt heeft een relatief eenvoudige en betaalbare oplossing bedacht waardoor het alarmpeil verhoogd kan worden tot +2.6 m NAP. Het gaat daarbij om tijdelijk in te zetten barrières rondom het parkeerdok, in combinatie met het aanpassen van de kerende hoogte van de dokdeur. Daardoor blijft BenO in de parkeerdokken ook op langere termijn mogelijk. Het oproepeil gaat vaker voorkomen door zeespiegelstijging, onbekend is wanneer dit daadwerkelijk een onoplosbaar probleem gaan worden. Verhogen van het sluitpeil, wat toegepast kan worden voor andere knelpunten die te maken hebben met het cumulatieve aantal sluitingen of sluitfrequentie, heeft ook (positieve) gevolgen voor het oproepeil, wat dan hoger zou kunnen zijn. Voor knelpunten door een mogelijke afname van de duur van het huidige onderhoudsseizoen in combinatie met toenemende onderhoudsvraag wordt door RWS gekeken naar jaarrond (risico gestuurd) BenO.
Aanbevelingen	<ul style="list-style-type: none"> De beheerder kan in overleg met RWS Ontwerpt de door hen geschikt bevonden oplossingen voor het vaker optreden van het alarmpeil toepassen. Het implementeren van efficiënte maatregelen, en daardoor kunnen het verhogen van het alarmpeil, is op korte termijn nuttig voor het veilig uit blijven voeren van BenO. Werk de mogelijkheden voor jaarrond BenO van de MLK uit.

Overzicht Deelvraag 7: Faalkansverlaging

Beschrijving	Bij een gelijkblijvende faalkans zorgt klimaatverandering ervoor dat de kans op hoge waterstanden achter de kering toeneemt. Kan verbetering van de veiligheid/faalkansverlaging van de Maeslantkering deze kans verminderen?
Conclusie	<p>Er zijn twee mogelijkheden om de veiligheid achter de kering te verbeteren:</p> <ol style="list-style-type: none"> Maatregelen nemen aan de kering die de faalkans verbeteren. Het kunnen meenemen van gedeeltelijk falen (partieel functioneren) in de berekening van de hydraulische belastingen. <p>Vanwege de samenhang met andere aspecten van de kering is er geen eenvoudig oordeel 'wel' of 'niet' te geven over de invloed op de restlevensduur van de MLK van dit aspect.</p>
Aanpak	Samenvatting door Rijkswaterstaat van eerder uitgevoerd onderzoek:

Overzicht Deelvraag 7: Faalkansverlaging

Resultaat	<ul style="list-style-type: none">• Rijkswaterstaat gaat er in deze studie vanuit dat de faalkans per sluiting niet verandert.• Door zeespiegelstijging verandert wel de inzetfrequentie. Daardoor verandert de faalkans per jaar wel (niet berekend). Dit heeft invloed op de functionele prestatie van de MLK voor de functie waterveiligheid.• Dit kan opgelost worden in het systeem (bijvoorbeeld hogere dijken: buiten scope van deze studie).• Ook kan gekeken worden hoe de Maeslantkering er aan kan bijdragen:<ul style="list-style-type: none">○ Effect partieel functioneren meenemen (o.a. sluiten van 1 van de deuren) (HKV, 2012). In dat onderzoek was de inschatting dat het toetspeil 28cm verlaagd zou kunnen worden door partieel functioneren mee te nemen (in scenario met zeespiegelstijging van 35 cm).○ Fysieke maatregelen om de faalkans per sluiting te verlagen (bv. verbeteren locomobiel) (HKV, 2012).○ Verhogen betrouwbaarheid besturingssoftware (RWS programma (Betrouwbare Industriële Automatisering Stormvloedkeringen (BIK))).○ Het combineren van het meenemen van partieel functioneren met de andere maatregel(en) geeft nauwelijks meerwaarde.
Aanbevelingen	Voordat de hier geschetste maatregelen als kansrijke maatregelen benoemd worden, is eerst nog een toets nodig op (organisatorische) uitvoerbaarheid.

3 Integratie tot restlevensduur

In dit hoofdstuk worden de conclusies van alle deelvragen geïntegreerd tot één overzicht van de levensduur van de Maeslantkering (MLK).

3.1 Restlevensduur

Tabel 3.1 geeft per beschouwd onderwerp aan of het van belang is voor de restlevensduur van de MLK. Een belangrijke opmerking hierbij is dat een 'nee' voor de restlevensduur niet betekent dat het aspect niet van belang is in het BenO, en daar mogelijk zelfs cruciaal kan zijn. Deelvraag 7: 'Faalkansverlaging' heeft geen regel in deze tabel omdat deze als dusdanig complex (dat wil zeggen afhankelijk van andere aspecten) wordt beschouwd dat daar geen eenvoudig oordeel 'ja' of 'nee' over gegeven kan worden.

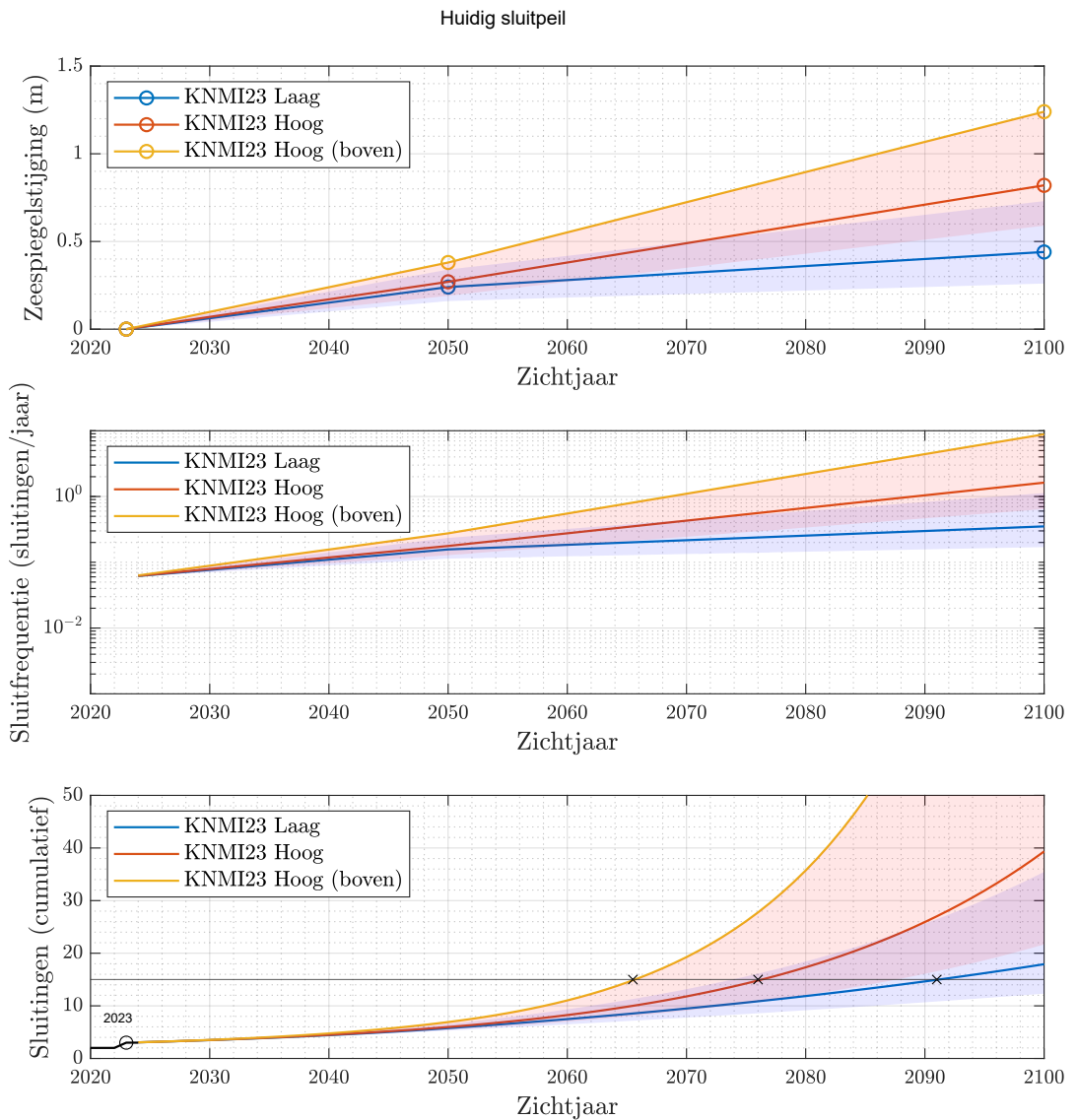
Tabel 3.1: Relevantie van de verschillende beschouwde onderwerpen voor BenO en einde levensduur van de MLK, aangeduid door 'ja' (bepalend), 'nee' (niet bepalend) of 'onderzoek' (aanvullende analyses aanbevolen).

Onderwerp	Bepalend voor de restlevensduur	Oplossing op dit moment al voorhanden
Deelvraag 1: Vermoeiingsbudget stalen onderdelen		
Vermoeiing vakwerkarmen	Ja	Onderzoek
Vermoeiing locomobiel	Nee	n.v.t.
Deelvraag 2: Stabiliteit van de bodembescherming bij overstort		
Bezwijken bodembescherming door overstortend debiet	Nee	n.v.t.
Deelvraag 3: Geotechniek		
Verweking ondergrond	Nee	n.v.t.
Ongelijke zettingen landhoofden	Nee	n.v.t.
Verplaatsing bolscharnierfundatie bij meerdere sluitingen	Nee	n.v.t.
Niet-werkend drainagesysteem	Nee	n.v.t.
Corrosie en vermoeiing trekpalen in de parkeerdokken	Nee	n.v.t.
Corrosie en kans op bezwijken combiwanden op plooi	Ja	Onderzoek
Ankeruitval	Onderzoek	
Risico van aanvaring	Nee	n.v.t.
Deelvraag 4: Economische restlevensduur		
Economische restlevensduur (kosten en baten)	Ja*	Onderzoek
Deelvraag 5: Scheepvaarthinder		
(Economisch) kritische sluitfrequentie	Nee	n.v.t.
Deelvraag 6: Uitvoerbaarheid Beheer en Onderhoud		
Vaker voorkomen alarmpeil	Ja	Ja
Vaker voorkomen oproeppel	Nee	n.v.t.
Meer onderhoud in een mogelijk korter onderhoudsseizoen	Onderzoek	

* Er is sprake van einde economische levensduur als de kosten van BenO (onvoorzien) teveel toenemen in de tijd, of indien er (eenmalige) onacceptabel (niet terugverdienbaar) hoge kosten gemaakt moeten worden. Ook indien de levensduur van de MLK korter wordt als gevolg van een verkorte levensduur ten gevolge van een ander aspect, omdat de periode waarbinnen investeringen terugverdiend moet worden dan korter is.

3.1.1 Kwantificering van de restlevensduur

Om de restlevensduur van de MLK te kwantificeren is gebruikt gemaakt van de KNMI'23 scenario's 'Laag', 'Hoog' (KNMI, 2023) en de bovenbandbreedte van 'Hoog', deze noemen we 'Hoog (boven)'. Hierbij is voor alle scenario's aangenomen dat tussen nu en de zichtjaren 2050 en 2100 steeds een lineaire toename zal plaatsvinden. Vervolgens is de relatie tussen zeespiegelstijging en de sluitfrequentie van de Europoortkering, zoals berekend met behulp van Hydra-NL en gerapporteerd in Deltares (2018b), bepaald welke sluitfrequentie hoort bij iedere mate van zeespiegelstijging (en zichtjaar). Tot slot zijn die sluitfrequenties gebruikt om tot het cumulatieve aantal S-sluitingen te komen door de sluitfrequenties per jaar bij elkaar op te tellen (integreren). Een overzicht van de resultaten van deze berekeningen is weergegeven in Figuur 3.1. Met behulp van deze berekeningen kunnen de geïdentificeerde knelpunten, die veelal optreden bij een bepaalde sluitfrequentie of een cumulatieve hoeveelheid sluitingen, aan een jaartal verbonden worden. De V-sluitingen van 2007 en 2018 vonden plaats onder stormachtige condities en hebben daarom mogelijk al een deel van het vermoeiingsbudget verbruikt. Indien dat inderdaad het geval zal blijken te zijn, en als dat in het algemeen zal opgaan voor V-sluitingen, dan is het in de toekomst waarschijnlijk niet langer wenselijk om veel V-sluitingen uit te voeren. Of in ieder geval zal er dan erg bewust mee omgegaan moeten worden. In Figuur 3.1 is de projectie van het cumulatieve aantal sluitingen daarom geredeneerd vanaf 3 sluitingen in totaal in 2024. Deze zelfde projectie is volledigheidshalve ook exclusief de V-sluitingen opgenomen in Bijlage A.



Figuur 3.1: Bovenste paneel: zeespiegelstijging in KNMI'23 scenario's 'Laag' (blauw) en 'Hoog' (rood) (KNMI, 2023); middelste paneel: momentane sluitfrequentie op basis van Hydra-NL berekeningen (Deltares, 2018b) en onderste paneel: het resulterende cumulatieve aantal sluitingen van de MLK bij het huidige sluitpeil van +3.0 m NAP in Rotterdam en/of +2.9 m NAP in Dordrecht. Het werkelijke aantal sluitingen is in het onderste paneel weergegeven in zwart.

3.2 Knelpunten

In deze studie wordt aangenomen dat veel aspecten opgelost kunnen worden als onderdeel van BenO. Er is in deze studie geen rekening gehouden met de bestaande uitdagingen van de 'boeggolf'. Ook wordt in deze studie ten bate van studie-afbakening aangenomen dat systeemkenmerken (bijvoorbeeld gedreven door zoetwatertekort) en beleid en wet- en regelgeving (bijvoorbeeld ten aanzien van buitendijks gebied) niet veranderen en dat de voor zeespiegelstijging benodigde dijkversterkingen gerealiseerd worden. Onder deze aannames zijn de onderstaande aspecten mogelijk relevant voor de restlevensduur van de MLK.

- 1. Vaker bereiken van het alarmpeil** door de stijgende zeespiegel. In de huidige situatie wordt het alarmpeil enkele keren per jaar bereikt. Dit wordt ingeschat als werkbaar maar niet wenselijk. Dit kan als indicator worden gebruikt voor dit knelpunt.

2. **Te grote kans op bezwijken van de combiwanden**, door corrosie van staal. Dit proces treedt ook op zonder zeespiegelstijging. Er zit nog minimaal 15 jaar levensduur in de combiwanden (op basis van vigerende normen en vooralsnog conservatieve aannames). Het jaartal 2040 wordt in deze analyse gezien als mogelijk einde levensduur MLK. Combiwanden in de configuratie zoals toegepast bij de MLK zijn niet gedeeltelijk vervangbaar.
3. **Economische restlevensduur**, door toename BenO-kosten in de tijd en/of zeer grote investeringen. Als de BenO-kosten in de tijd niet toenemen, leidt een zeer grote (onvoorziene) eenmalige vervanging (bijvoorbeeld) halverwege de ontwerplevensduur niet direct tot einde levensduur van de MLK. Als de kosten van BenO wel toenemen in de tijd kan er op termijn sprake zijn van economische einde levensduur. In de analyse is de voorbeeldberekening 'toename BenO-kosten met 1% per jaar' opgenomen. In dat voorbeeld groeien de jaarlijkse BenO-kosten van 2.5% in 2024 naar 5.0% in 2096 (percentages ten opzichte van aanlegkosten MLK), en is – zonder zeer grote eenmalige investeringen tijdens de levensduur – in 2084 sprake van einde economische levensduur. Dit (voorbeeld) jaartal is gebruikt in de verder analyse. Ook indien sprake is van grote eenmalige investeringen, kan dit leiden tot een vervroegde einde levensduur van de MLK.
4. De **vermoeiing van de vakwerkarmen**, veroorzaakt door het cumulatief aantal S-sluitingen. Bij het ontwerp van de MLK is een totaal van 15 S-sluitingen als uitgangspunt voor vermoeiingscapaciteit van de vakwerkarmen gehanteerd. Door zeespiegelstijging neemt het cumulatief aantal S-sluitingen sneller toe. De condities van de eerdere V-sluitingen (in 2007 en 2018) dragen waarschijnlijk ook al bij aan de vermoeiing van de vakwerkarmen. Het cumulatief aantal van 15 S-sluitingen, inclusief de tot nu toe opgetreden S- én V-sluitingen, wordt in deze analyse gebruikt als mogelijk moment voor bereiken einde levensduur van de MLK. Dit wordt naar verwachting bereikt rond 2090 (KNMI'23 Laag), 2075 (KNMI'23 Hoog) en 2065 (KNMI'23 Hoog (boven)). Er zit echter veel onzekerheid of dit daadwerkelijk tot einde levensduur leidt: bij het ontwerp is rekening gehouden met een veiligheidsmarge, is rekening gehouden met altijd dezelfde redelijke lange sluitduur onder zware condities en door monitoren en BenO kunnen defecten waarschijnlijk tijdig opgespoord en opgelost worden. Er zal eerst goed onderbouwd nagegaan moeten worden of een groter aantal sluitingen mogelijk is, alvorens dat aan te nemen. In de hier gemaakte interpretatie is verder aangenomen dat vanaf nu geen (dusdanig belastende) V-sluitingen meer plaatsvinden.
5. Het uitgangspunt dat de **oorspronkelijk beoogde technische levensduur (ontwerplevensduur) 100 jaar** is. Op basis van bouwjaar 1997 zou volgens dit uitgangspunt in 2097 einde technische levensduur op kunnen treden.
6. **Vaker bereiken van het oerpeil** door zeespiegelstijging. Vanaf 2075 kan het oerpeil (+2.6 m NAP) meer dan 10 keer per jaar voorkomen (KNMI'23 Hoog (boven)). Het is nog niet bekend bij welke frequentie dit knelpunt optreedt. In de huidige analyse zijn de frequenties 10, 30 en 180 keer per jaar als potentiële knelpunten beschouwd.
7. Het bereiken van een **kritische sluitfrequentie voor scheepvaart** valt naar verwachting buiten de oorspronkelijk beoogde restlevensduur van de MLK maar hebben we voor de volledigheid opgenomen in deze analyse. De werkelijke kritische sluitfrequentie is onbekend, en om die reden is hier ter illustratie gerekend met een sluitfrequentie van 3 sluitingen per jaar. Een sluitfrequentie van 3 sluitingen per jaar wordt pas na 2100 bereikt voor KNMI'23 Laag en Hoog, dus voorbij de oorspronkelijke

ontwerplevensduur van de MLK (tot 2097). Voor KNMI'23 Hoog (boven) zal een sluitfrequentie van 3 sluitingen per jaar rond 2085 voorkomen.

- 8. Meer onderhoud gecombineerd met een korter onderhoudsseizoen.** Door het vaker voorkomen van het alarmpeil en door eventueel toenemend onderhoud zal meer gevraagd gaan worden aan het BenO-team van de MLK en hun aannemers. Dit, en een eventueel korter onderhoudsseizoen, is niet verder kwantitatief uitgewerkt.

Bovenstaande knelpunten zijn in Tabel 3.2 vertaald naar jaartallen aan de hand van de KNMI'23 scenario's Laag, Hoog en Hoog (boven). Scenario Hoog (boven) wordt hier weergegeven om het worst-case scenario binnen de KNMI'23 scenario's te representeren. Merk op dat de jaartallen een indicatie geven van het moment waarop mogelijk (nieuwe) uitdagingen ontstaan – er wordt hiermee niet bedoeld dat in dat jaar direct einde levensduur optreedt.

Tabel 3.2: Knelpunten die mogelijk bepalend zijn voor de restlevensduur van de MLK. Per knelpunt is aangegeven welke aspect einde technische (T), economische (E) of functionele (F) levensduur indiceert. De indicator peilfrequentie kan betrekking hebben op het sluit- (S), alarm- (A) of oproeppcil (O). Het jaartal waarin de knelpunten naar huidige inschatting optreden is bepaald aan de hand van KNMI'23 scenario's Laag, Hoog en Hoog (boven).

#	Technisch (T), economisch (E) of functioneel (F) knelpunt	Indicator voor knelpunt			Jaartal bij KNMI'23 scenario		
		Zeespiegelstijging	Peilfrequentie	Cumulatieve sluitingen	Laag	Hoog	Hoog (boven)
1	Alarmpeil 2x per onderhoudsseizoen (T)		2 (A)		2024		
2	Kans op bezwijking van de combiwanden overschrijdt de vigerende normen (T)				≥2040		
3a	Constante BenO kosten, geen grote herinvestering gedurende de levensduur (E)				2096		
3b	Stijging BenO kosten van 1% per jaar, geen grote herinvestering gedurende de levensduur (E)				2084		
4	Vermoeiing staal vakwerkarmen (T)			15	2091	2076	2065
5	Ontwerp-levensduur (T)				2097		
6a	Toename oproeppcil-frequentie (T)	80 cm	10 (O)		≥2100	2098	2075
6b		100 cm	30 (O)		≥2100	≥2100	2086
6c		135 cm	180 (O)		≥2100	≥2100	≥2100
7a	Scheepvaarthinder door toegenomen sluitfrequentie (F)	70 cm	1 (S)		≥2100	2090	2068
7b		100 cm	3 (S)		≥2100	≥2100	2086
7c		>124 cm	10 (S)		≥2100	≥2100	≥2100
8	Toename inzet BenO team en/of korter onderhoudsseizoen (T)	Nog niet onderbouwd of en wanneer dit plaatsvindt.					

3.3 Mitigerende maatregelen

Gerichte en effectieve levensduur verlengende maatregelen kunnen de knelpunten (Paragraaf 3.2) waarschijnlijk voor een groot deel compenseren. De driver met de grootste invloed op de levensduur van de MLK is, conform algemene verwachting, zeespiegelstijging. De knelpunten die hierdoor beïnvloed worden (1, 4, 6, 7 en 8, zie Tabel 3.2) hebben allemaal iets te maken met het voorkomen van een bepaalde waterstand: het sluit-, alarm- of oproeppcil. De mitigerende maatregel sluitpeilverhoging heeft invloed op meerdere knelpunten. Gezien de onzekerheid over de zeespiegelstijging, is die aanpassing daarmee waarschijnlijk het meest invloedrijk en effectief. Om die reden wordt juist het effect van die maatregel op einde levensduur van de MLK hier nader uitgewerkt in Paragraaf 3.3.1. De mogelijkheid dat er een nieuwe kering gebouwd wordt die in de toekomst samen zal werken met de MLK, waardoor minder (zware) eisen hoeven te worden gesteld aan de MLK, is niet nader beschouwd.

De volgende levensduur verlengende maatregelen zijn in de huidige studie beschouwd:

- A. **Verhoging van het alarmpeil tot +2.3 m NAP** door het toepassen van een technische oplossing, bijvoorbeeld die van RWS Ontwerpt (zie Figuur 5.3 in Deltares (2024c)). In de scenario's Laag en Hoog verschuift het knelpunt door deze oplossing tot na 2100, en daarmee tot voorbij de oorspronkelijk beoogde levensduur van de MLK. In het scenario Hoog (boven) treedt het verschoven knelpunt op rond 2085.
- B. Er wordt een **oplossing gevonden voor het voldoende verkleinen van de kans op plooi van de buispalen van de combiwand van de landhoofden**. De huidige combiwanden zijn niet gedeeltelijk vervangbaar – de daarnaast gelegen delen zouden in dat geval te veel verzwakken. Er moet daarom een nieuwe constructie aangelegd worden, waarschijnlijk vóór de huidige combiwanden, indien dat acceptabel is in relatie tot scheepvaart-eisen en een minimale vaarbreedte. Indien een nieuwe constructie gebouwd zal worden, wordt in deze studie de aannahme gemaakt dat deze zeker tot na 2097 voldoet en daarmee niet bepalend zal zijn voor de levensduur van de MLK. Er is voor dit knelpunt sprake van een verandering in wet- en regelgeving sinds de aanleg van de kering: de vigerende veiligheidsnormen van de combiwanden zijn strenger dan de normen die golden ten tijde van ontwerp. Andere mogelijke oplossingen dan het plaatsen van een nieuwe constructie zijn het accepteren van de destijds geldige ontwerp-normen (beleidskeuze) en nieuwe inzichten over sterkte. Hoe lang deze maatregelen – indien toepasbaar gebleken – effectief zouden zijn is onbekend.
- C. De **toename van BenO kosten valt mee** of men slaagt er in die actief beperkt te houden.
- D. Er wordt een manier gevonden om **strategisch om te gaan met het eindige vermoeiingsbudget van de vakwerkarmen**. Deze maatregel kan op verschillende manieren ingevuld worden: nieuwe inzichten kunnen leiden tot nieuwe kennis over de vermoeiing van de stalen delen van de MLK, wellicht zijn kleine lokale herstelwerkzaamheden mogelijk of is 1-op-1 vervanging van de van grotere keringsdelen (een zeer grote ingreep) mogelijk. Indien herstel of vervanging ertoe leidt dat er, bovenop het al verbruikte budget, nog eens 15 cumulatieve sluitingen plaats kunnen vinden, verschuift dit knelpunt tot na 2100, tot 2093 of tot 2077 voor de scenario's Laag, Hoog en Hoog (boven).
- E. E1. Een **sluitpeilverhoging van 50 cm toepassen in 2030**. Hierdoor worden de knelpunten die te maken hebben met vermoeiing, het oproeppcil en scheepvaarthinder verschoven tot na 2100 (zie Paragraaf 3.3.1, Figuur 3.2). Daarmee zijn die aspecten in dat geval niet meer bepalend voor de levensduur van de MLK.

E2. Een **sluitpeilverhoging van 50 cm toepassen in 2050**. Hierdoor wordt het knelpunt vermoeiing verschoven tot rond 2098, en worden de knelpunten die te maken hebben met het oproeppel en scheepvaarthinder verschoven tot na 2100 (zie Paragraaf 3.3.1, Figuur 3.3).

Het onderzoeken van de gevolgen van een aangepast sluitpeil van de MLK voor de waterveiligheid en/of -overlast in het achterliggende gebied was geen onderdeel van deze studie maar is wel belangrijk om in kaart te brengen voordat een dergelijke beslissing kan worden gemaakt. Uit een eerdere verkenning bleek dat een verhoogd sluitpeil een niet-verwaarloosbare invloed heeft op de waterveiligheid (Deltares, 2023e).

- F. Er wordt een **oplossing gevonden voor het** meer dan 10 keer per jaar (F1) of 30 keer per jaar (F2), **voorkomen van het oproeppel**.
- G. **Het havenbedrijf accepteert een sluitfrequentie tot aan 10 keer per jaar**. Deze sluitfrequentie treedt, zonder toepassing van andere maatregelen, in alle hier beschouwde scenario's naar verwachting op na 2100.
- H. Door een **uitbreiding van het operationeel team** kunnen de capaciteitsproblemen die zouden kunnen ontstaan door toenemend BenO en/of het vaker optreden van het oproeppel (+2.6 m NAP) verholpen worden. De invloed van een dergelijke uitbreiding is binnen de context van de hier beschreven studie niet verder vertaald naar het potentiële effect daarvan op de levensduur van de MLK.

En als levensduur verlengende maatregelen niet (meer) mogelijk zijn:

- I. Een nieuwe kering (of ander type kunstwerk) aanleggen of het (water)systeem anders inrichten zodat de MLK niet langer benodigd is.

Bovenstaande maatregelen zijn in Tabel 3.3 vertaald naar geschatte en indicatieve jaartallen aan de hand van de KNMI'23 scenario's Laag, Hoog en Hoog (boven).

Tabel 3.3: Maatregelen die het optreden van de knelpunten verhelfen of naar later opschuiven in de tijd. De indicator peilfrequentie kan betrekking hebben op het sluit- (S), alarm- (A) of oproeppel (O). Het indicatieve jaartal waarin het uitgestelde knelpunt optreedt is geschat aan de hand van KNMI'23 scenario's Laag, Hoog en Hoog (boven).

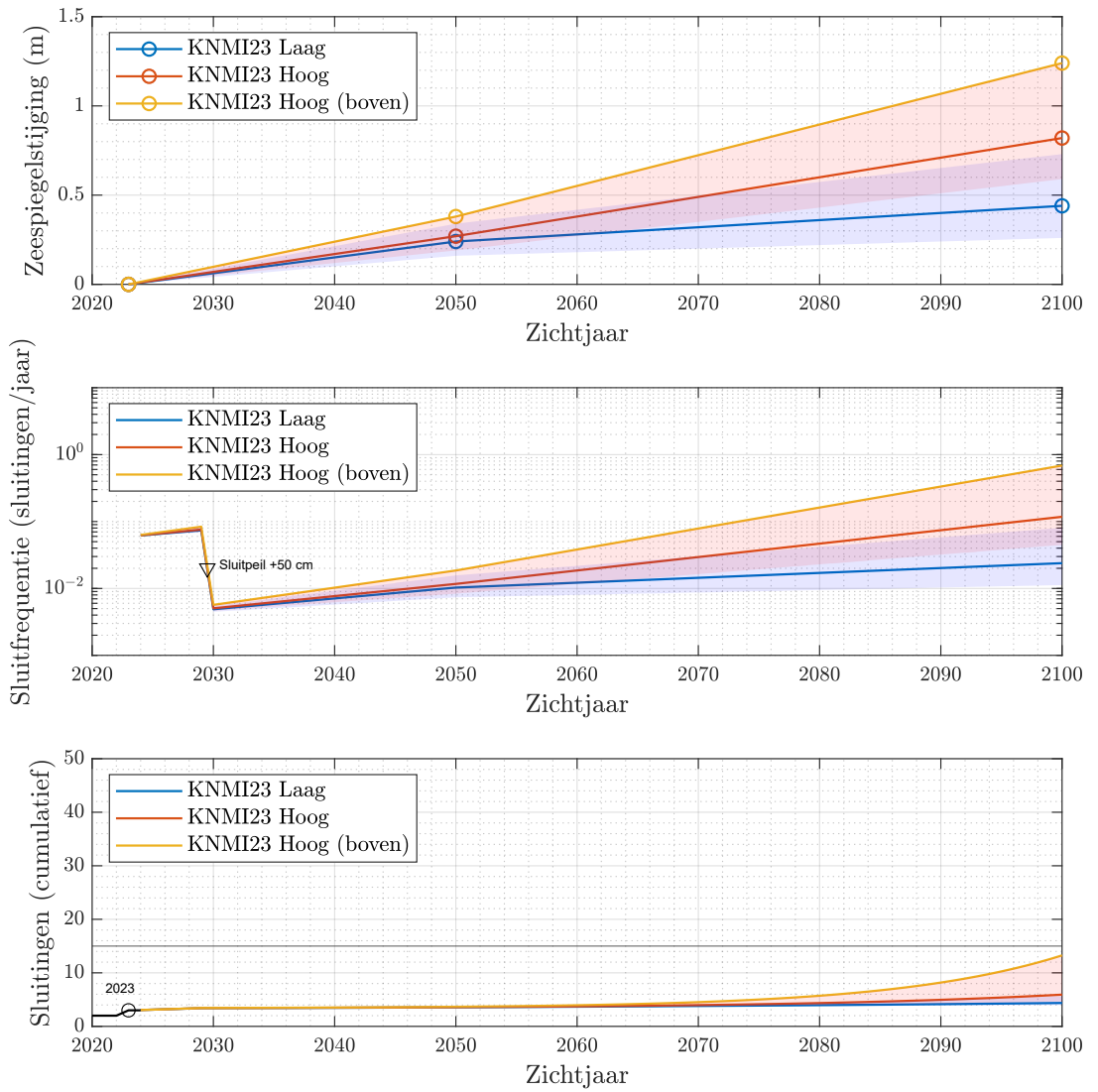
#	Maatregel	Indicator			Jaartal		
		Zeespiegelstijging	Peilfrequentie	Cumulatieve sluitingen	Laag	Hoog	Hoog (boven)
A	Verhoging alarmpeil tot +2.3 m NAP m.b.v. technische oplossing (#6)	60 cm	2 (A)		≥2100	≥2100	2085
B	Nieuwe inzichten en oplossing voor combiwand (#2)				≥2097		
C	Toename BenO kosten valt mee (#3b)						
D1	Nieuwe inzichten op oplossing vermoeiing vakwerkarmen (#4)						

#	Maatregel	Indicator			Jaartal		
		Zeespiegelstijging	Peil-frequentie	Cumulatieve sluitingen	Laag	Hoog	Hoog (boven)
D2	Volledige revisie vakwerkarmen (#4)			30	≥2100	2093	2077
E1	Sluitpeil +50 cm in 2030 → Vermoeiing (#4) → Oproeppeil (#6) → Scheepvaarthinder (#7)		10 (O) 3 (S)	15		≥2100 ≥2100 ≥2100	
E2	Sluitpeil +50 cm in 2050 → Vermoeiing (#4) → Oproeppeil (#6) → Scheepvaarthinder (#7)		10 (O) 3 (S)	15		2098 ≥2100 ≥2100	
F1	Oplossing >10 keer/jaar oproeppeil (#6a)						
F2	Oplossing >30 keer/jaar oproeppeil (#6b)						
G	Acceptatie 10x per jaar sluiten door scheepvaartsector (#7)		10 (S)			≥2100	
H	Uitbreiding operationeel team (#)	<i>Invloed op levensduur niet ingeschat</i>					
I	Nieuwe kering of nieuw systeem						

3.3.1 Sluitpeilverhoging

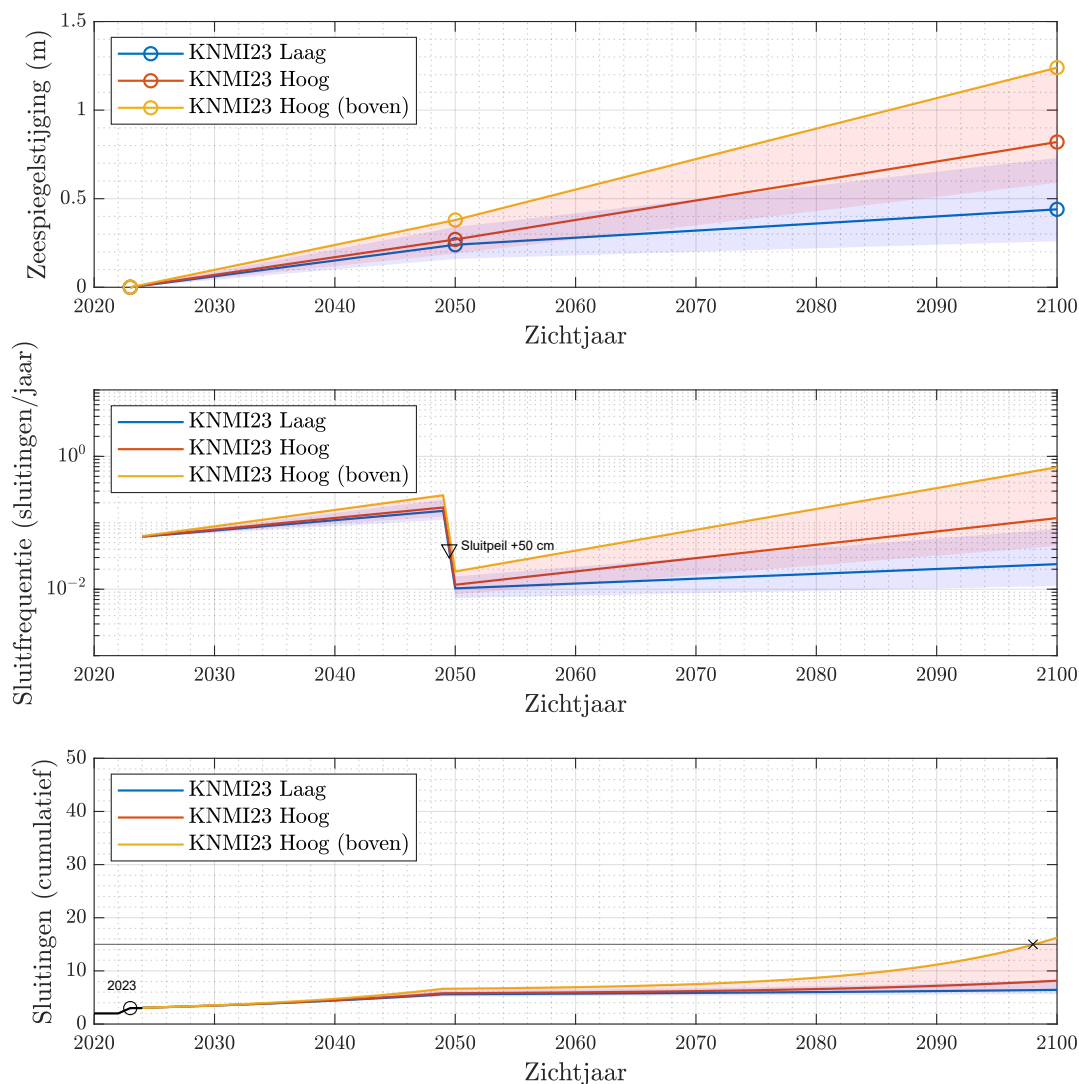
Om de gevolgen van de maatregel sluitpeilverhoging te analyseren zijn de berekeningen van het cumulatieve aantal S-sluitingen herhaald voor een sluitpeilverhoging van 50 cm vanaf 2030 (Figuur 3.2) en vanaf 2050 (Figuur 3.3). Hiervoor geldt: hoe eerder een sluitpeilverhoging plaatsvindt, hoe langer de levensduur van de MLK. Wanneer de sluitpeilverhoging namelijk pas in 2050 wordt toegepast, is er nog net binnen de levensduur sprake van 15 cumulatieve sluitingen in Hoog (boven). Bij het toepassen in 2030 wordt dit voorbij het jaar 2100 geschoven. De projecties van het cumulatieve aantal sluitingen zijn ook hier geredeneerd vanuit 3 sluitingen in totaal in 2024, en de versies exclusief de V-sluitingen zijn wederom opgenomen in Bijlage A. In deze studie wordt alleen het effect van een sluitpeilverhoging van 50 cm weergegeven. Aanbevolen wordt om de invloed van sluitpeilverhoging in kleinere stappen (bijvoorbeeld meegroeien met de zeespiegelstijging) in de tijd te onderzoeken, bekeken vanuit de samenhang met het systeem. De gevolgen van de maatregel sluitpeilverhoging voor de waterveiligheid en/of -overlast (inclusief de buitendijkse gebieden) zijn namelijk een belangrijk aandachtspunt, maar zijn geen onderdeel van de huidige studie. Uit een eerdere verkenning door Deltares (Deltares, 2023e) bleek dat sluitpeilverhoging grote (economische) gevolgen kan hebben voor buitendijks gebied en dat daardoor ook mogelijk, afhankelijk van de locatie en al aanwezige dijkhoogtes, een grote(re) dijkversterkingsopgave ontstaat. Het is daarom niet vanzelfsprekend dat deze maatregel in de praktijk rechtstreeks toegepast kan worden. Daarnaast dient ook opgemerkt te worden dat de weergegeven berekeningen slechts projecties zijn. Door analyse en modellering van het werkelijke (resterende) vermoeiingsbudget, of bijvoorbeeld door acceptatie van een lagere constructieve faalkanseis, kunnen deze knelpunten verschuiven in de tijd.

Sluitpeil +50 cm (vanaf 2030)



Figuur 3.2: Bovenste paneel: zeespiegelstijging in KNMI'23 scenario's 'Laag' (blauw) en 'Hoog' (rood) (KNMI, 2023); middelste paneel: sluitfrequentie op basis van Hydra-NL berekeningen (Deltares, 2018b) en onderste paneel: het resulterende cumulatieve aantal sluitingen van de MLK bij een verhoogd sluitpeil van +3.5 m NAP in Rotterdam en/of +3.4 m NAP in Dordrecht vanaf 2030. Het werkelijke aantal sluitingen tot nu toe is in het onderste paneel weergegeven in zwart.

Sluitpeil +50 cm (vanaf 2050)

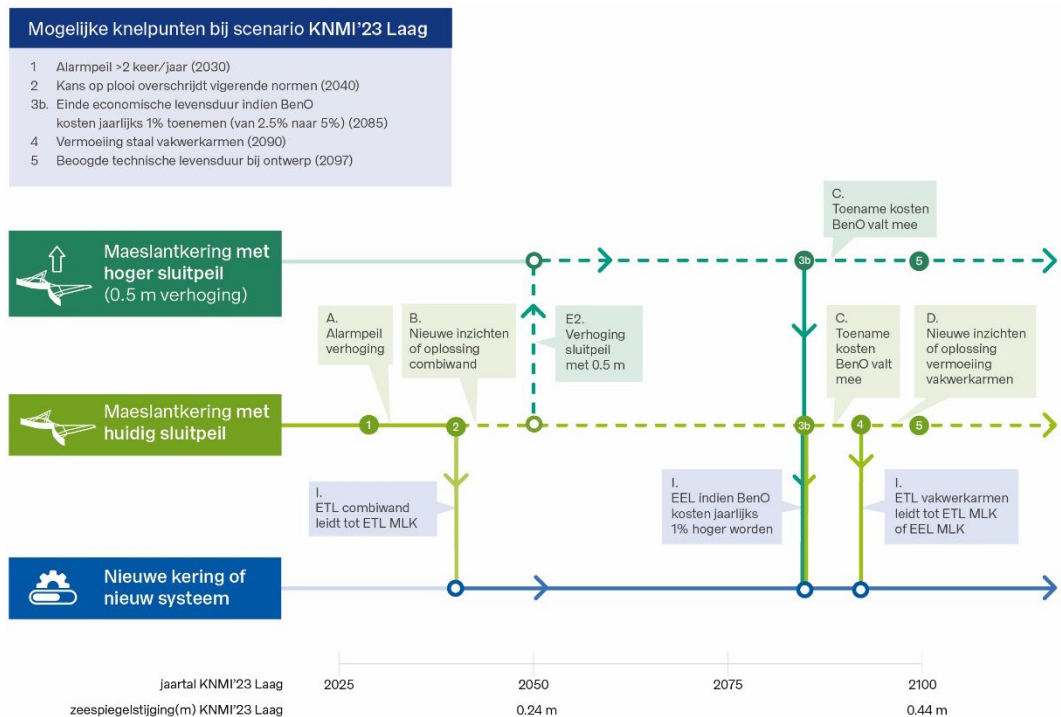


Figuur 3.3: Bovenste paneel: zeespiegelstijging in KNMI'23 scenario's 'Laag' (blauw) en 'Hoog' (rood) (KNMI, 2023), middelste paneel: sluitfrequentie op basis van Hydra-NL berekeningen (Deltares, 2018b) en onderste paneel: het resulterende cumulatieve aantal sluitingen van de MLK bij een verhoogd sluitpeil van +3.5 m NAP in Rotterdam en/of +3.4 m NAP in Dordrecht vanaf 2050. Het werkelijke aantal sluitingen is in het onderste paneel weergegeven in zwart.

3.4 Mogelijke adaptatiepaden

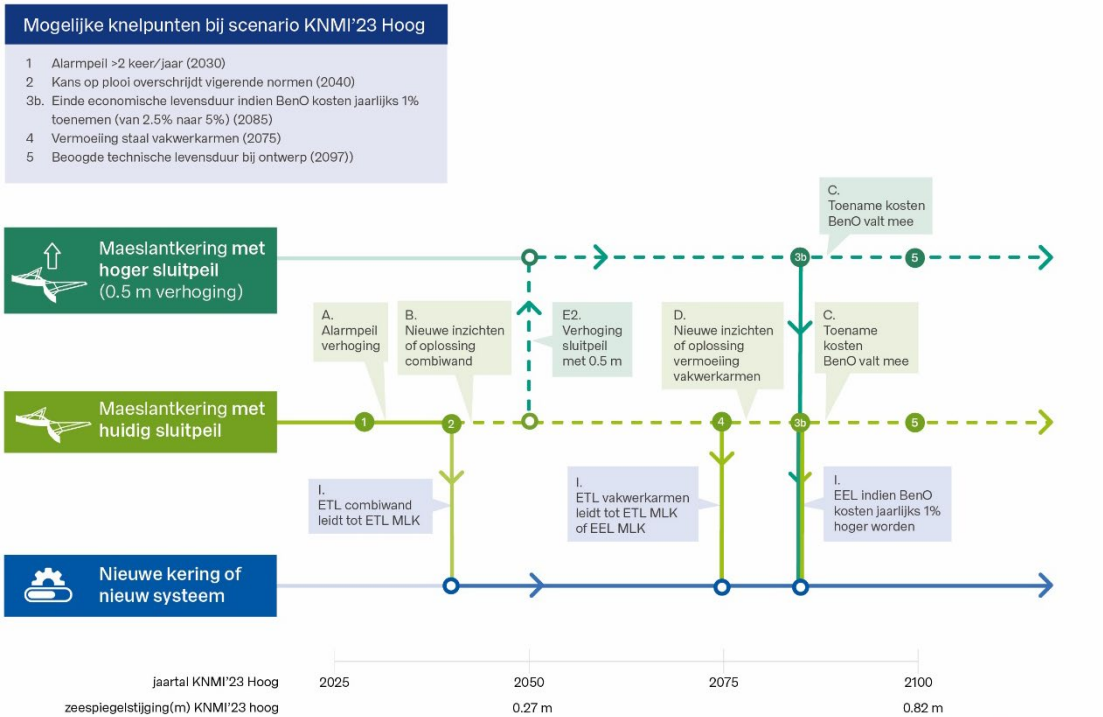
De uiteindelijke restlevensduur van de MLK hangt af van diverse onzekerheden waarop men geen invloed heeft. Er zijn echter gerichte (beheers)keuzes die op korte of lange termijn gemaakt moeten of kunnen worden, waardoor de restlevensduur van de MLK verlengd zou kunnen worden. In de onderstaande figuren zijn enkele mogelijke adaptatiepaden uitgewerkt volgens de Dynamic Adaptive Pathway Planning method (DAPP) (Haasnoot et al., 2013; 2019). Met deze methode kunnen knelpunten en mogelijke oplossingen overzichtelijk in de tijd worden weergegeven. Het 'huidige' pad naar einde levensduur is in Figuur 3.4 tot en met Figuur 3.6 weergegeven met **lichtgroen**. De beslismomenten op de paden zijn op het verwachte moment van voorkomen weergegeven met rondjes. Het specifieke knelpunt dat een beslismoment veroorzaakt is genummerd (op basis van Tabel 3.2) in de rondjes. De genomen maatregelen staan in tekstvakjes weergegeven na elk knelpunt. Daar waar een oplossing nog niet bekend is, maar op termijn wel realistisch te verwachten is, gaat het pad gestreept verder.

Afhankelijk van het beschouwde klimaatscenario (elk in een eigen figuur), komen er specifieke jaartallen op het pad waarin een keuze gemaakt moet worden. Alternatieve paden, dat wil zeggen paden met een grootschalige maatregel, die ingeslagen kunnen worden (met een verticale stap) zijn het verhogen van het sluitpeil (0.5 m in dit voorbeeld, weergegeven in **donkergroen**), en het bouwen van een nieuwe kering of het invoeren van grootschalige systeemmaatregelen (weergegeven in **blauw**). De **blauwe** lijn start al eerder (weergegeven als semi-transparant) dan het moment waarop het eerste knelpunt op het huidige pad (**lichtgroen**) ontstaat. Dit is op deze manier weergegeven omdat ook andere aanleidingen, zoals grootschalige aanpassingen in het watersysteem (buiten de scope van deze studie), ertoe kunnen leiden dat er voor een andere kering of systeem gekozen wordt. In deze weergaven wordt ervan uitgegaan dat een technische maatregel, zoals die uitgewerkt voor de dokken door RWS Ontwerpt (zie Figuur 5.3 in Deltares (2024c)), wordt toegepast om het alarmpeil te verhogen. Ook wordt aangenomen dat er een manier van omgang wordt gevonden voor het vaker optreden van het oproeppel (voor het operationeel team) en een hoge sluitfrequentie (voor de scheepvaart).



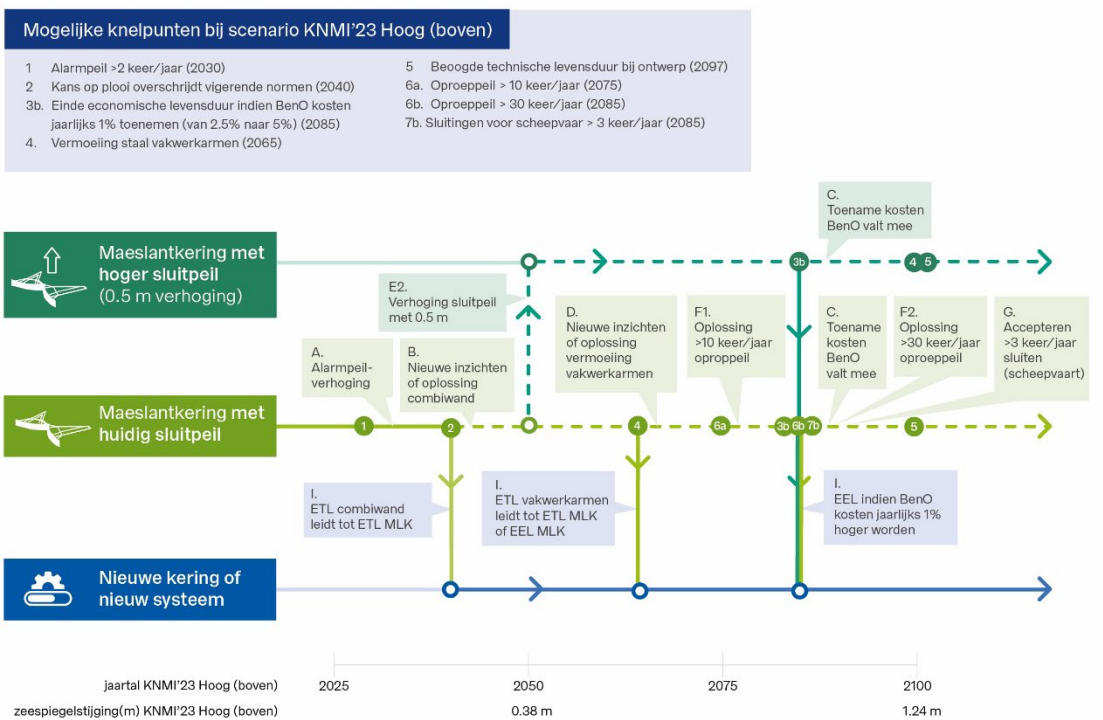
Deltares

Figuur 3.4: Mogelijke adaptatiepaden voor KNMI'23 scenario 'Laag'.



Deltares

Figuur 3.5: Mogelijke adaptatiepaden voor KNMI'23 scenario 'Hoog'.



Deltares

Figuur 3.6: Mogelijke adaptatiepaden voor KNMI'23 scenario 'Hoog (boven)'.

3.5 Conclusie

Uit de uitgevoerde analyses is gebleken dat vier van de beschouwde aspecten cruciaal zijn voor de levensduur van de MLK:

1. Het vermoeiingsbudget van de stalen onderdelen, en dan met name de vakwerkarmen;
2. De technische levensduur van de combiwanden onder de vigerende veiligheidsnormen;
3. De uitvoerbaarheid van het BenO bij een verhoogde alarmpeilfrequentie;
4. Mogelijk toenemende kosten van BenO, met name in combinatie met zeer grote investeringen.

Nieuwe inzichten kunnen ertoe leiden dat de gepresenteerde geschatte jaartallen aangescherpt kunnen worden. Sommige knelpunten zullen dan mogelijk eerder, later of net niet voorkomen binnen de beoogde levensduur van de MLK. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Het vergroten van de kennis van de verschillende mechanismes die tot einde levensduur kunnen leiden;
- De mate van zeespiegelstijging die daadwerkelijk op zal treden en de snelheid waarmee dat zal optreden en/of geüpdatete klimaatscenario's;
- Het ontwerpen of ontwikkelen van nieuwe (technische) oplossingen;
- Keuze voor een geheel of gedeeltelijk andere gebiedsinrichting of (water)systeeminrichting.

Daarom wordt aanbevolen om de identificatie van knelpunten in relatie tot de levensduur van de MLK, en hun mogelijke oplossingen, elke 5 à 10 jaar te updaten.

Referenties

- Algemene Rekenkamer. (2019). *Resultaten verantwoordingsonderzoek 2018 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (XII). Rapport bij het jaarverslag.*
- Bouwdienst Rijkswaterstaat. (1995). *Evaluatie SVKW - natte werken.*
- Bouwdienst Rijkswaterstaat en Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1989). *Overeenkomst bouw stormvloedkering Nieuwe Waterweg. C9753.*
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1991). *Grondverbeteringsput zuid.* Rapport N-05-0013, rev. 1.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1992a). *Berekeningsmethode vermoeiing vakwerk.* A-13-0021.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1992b). *Berekeningen vakwerkarmen vermoeiing.* S-02-0050-2.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1992c). *Vergelijking 2D- en 3D zuigkrachten en stab. lijnen.* A-07-0013.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1993a). *Krachten TD-stang voor levensduur beschouwing.* A-13-0029.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1993b). *Aanvaringsrisiko.* Rapport A-11-0006, rev. 2.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1993c). *Korrosiebeschouwing.* Rapport D-05-0008, rev. 4.
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1995a). *Doopceel Kistdam landhoofd Noord.* Rapport D-05-0118, rev. 4 (as built).
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1995b). *Parkeerdok (noord), palen dokvloer.* Tekening D-07-2202, rev. 5 (as built).
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1996). *Parkeerdok (zuid), dokvloer onderwaterbeton.* Tekening D-07-3337, rev. 2 (as built).
- Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1997). *Vermoeiingsanalyse overgangsstukken van vakwerk aan kerende wand.* S-03-0456-1.
- De Waterwerkers. (2024a). *Inzicht einde economische levensduur Maeslantkering.* Definitief, versie 1 oktober 2024.
- De Waterwerkers. (2024b). *Kosten sluiten Maeslantkering voor de haven en scheepvaart.* Definitief, versie 30 september 2024.
- De Winter, R., Sterl, A., & Ruessink, B. (2013). Wind extremes in the North Sea Basin under climate change: An ensemble study of 12 CMIP5 GCMs. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 1601-1612.
- De Winter, R., Sterl, A., de Vries, J., Weber, S., & Ruessink, G. (2012). The effect of climate change on extreme waves in front of the Dutch coast. *Ocean Dynamics*, 62, 1139-1152.
- Deltares. (2015a). *Beoordeling constructie sterkte gk constructies MLK.* 1220895-000-GEO-0008 (memo).
- Deltares. (2015b). *Expert-interpretatie invloed verdieping Nieuwe Waterweg op Maeslantkering.* Memo 1221262-000-HYE-0002.
- Deltares. (2016a). *Analyse geïdentificeerde risico's grondkerende constructies MLK uit Stap 1.* 1220895-001-GEO-0007 (memo).
- Deltares. (2016b). *Risico sessie grondkerende constructies Maeslantkering.* 1220895-001-GEO-0008 (memo).
- Deltares. (2017). *Toelaatbare bovenbelasting terreinen Maeslantkering.* 1120895-001-GEO-0004.
- Deltares. (2018a). *Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning.* 1202230-005-0002.
- Deltares. (2018b). *Verkenning naar de effecten van extreme zeespiegelstijging in de regio Rijnmond-Drechtsteden.*

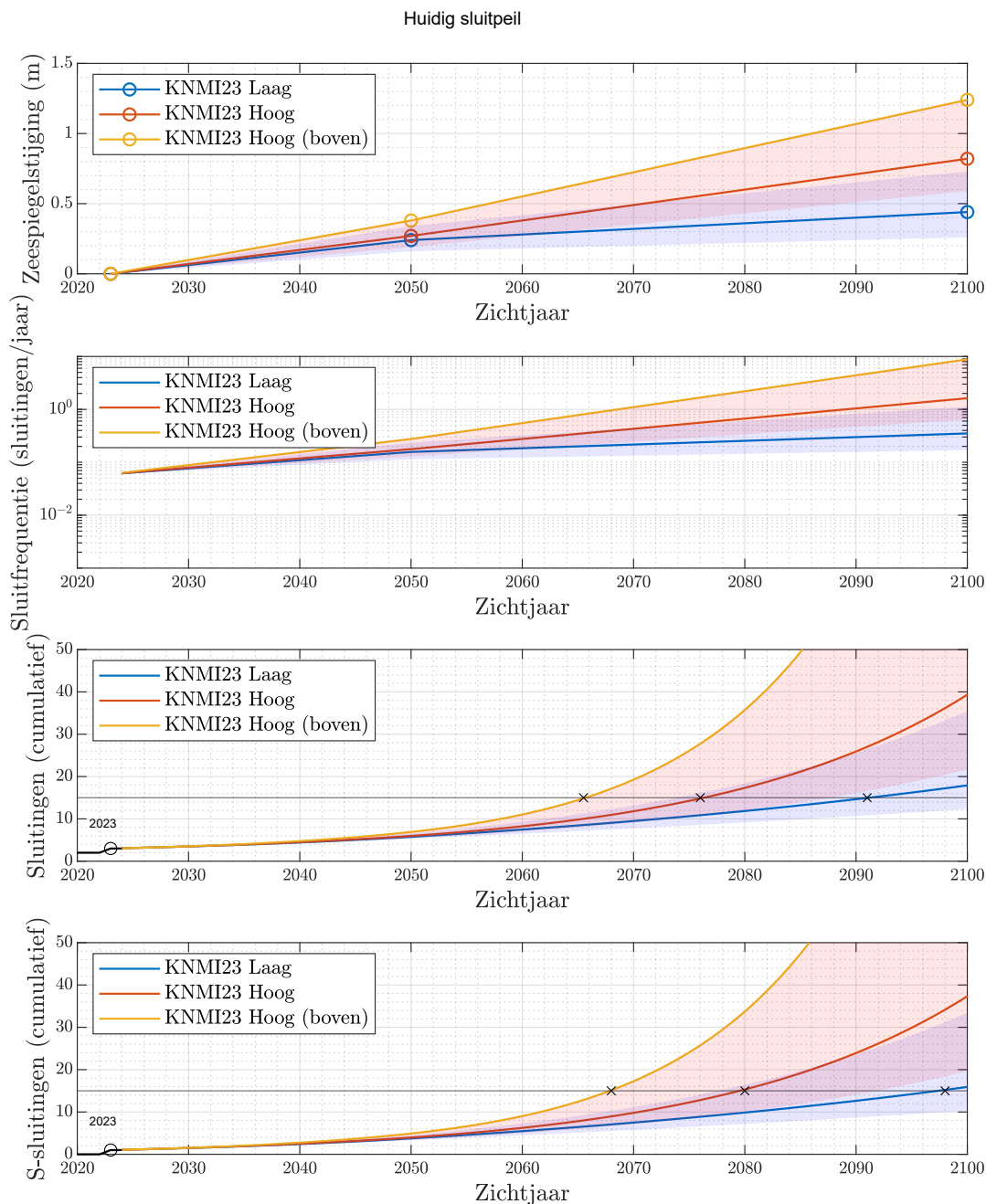
- Deltares. (2018c). *Analyse peilbuismetingen Maeslantkering*. 1220895-004-GEO-0002.
- Deltares. (2019a). *SOBEK3-model waterstanden nabij de Maeslantkering Modelleerrapport t.b.v. TA-WSTD*. 1230119-000-HYE-0025.
- Deltares. (2019b). *WANDA-model en momentenbalans van de Maeslantkering - Modelleerrapport t.b.v. TA-EW*. 1230119-000-HYE-0024.
- Deltares. (2019c). *Plooi gevoeligheid buispalen grondkerende constructies Maeslantkering*. 1220895-006-GEO-0006.
- Deltares. (2022a). *Kennisbasis stormvloedkeringen - Overzicht kennis en ervaring Deltares + vooruitblik in relatie tot klimaatverandering*. 11206882-015-HYE-0001.
- Deltares. (2022a). *Raamwerk beslismomenten VenR Stormvloedkeringen - Gecombineerde functionele en technische prestatie en economische afweging met case Hollandsche IJsselkering*. 11206063-000-HYE-0002.
- Deltares. (2022e). *Haalbaarheid jaarrond onderhoud - Verkenning van methodieken en oplossingsrichtingen voor onderhoudsknelpunten bij stormvloedkeringen*. 11208034-012-ZWS-0001.
- Deltares. (2023e). *Verkenning sluitpeilverhoging Maeslantkering in onderhoudscontext - Overzicht en verkenning van kennisvragen en oplossingsrichtingen voor onderhoud aan stormvloedkeringen*. 11209262-013-ZWS-0002.
- Deltares. (2024a). *Levensduur Maeslantkering - Identificeren knelpunten en potentiële levensduur-verlengende maatregelen*. 11209283-000-HYE-0001 v1.0.
- Deltares. (2024b). *Restlevensduur grondkerende constructies Maeslantkering, Faalkansanalyse snede LHN2A*. 1220895-004-GEO-0010 v0.3.
- Deltares. (2024c). *Technische Achtergrondrapportage Levensduur Maeslantkering*. 11210309-000-HYE-0003_v1.0.
- DPRD. (2020). *Voorkeursstrategie Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden*. Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden.
- Fugro. (2009). *Rapport betreffende grondonderzoek kathodische bescherming Maeslantkering te Hoek van Holland*. Opdrachtnummer 1009-0012-000.
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & Ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), 485-498.
- Haasnoot, M., Warren, A., & Kwakkel, J. H. (2019). Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP). *Decision Making under Deep Uncertainty*, 71-92.
- HKV & Deltares. (2022). *Zeespiegelstijging in ontwerpnormen stormvloedkeringen - Inventarisatie van zeespiegelstijging in ontwerpnormen van de Oosterscheldekering en de Maeslantkering*. PR2695.80.
- HKV. (2012). *Onderzoek naar verbetering van de veiligheid die de Maeslantkering biedt*.
- HKV. (2024). *Overschrijdingsfrequentielijn waterstand Maeslantkering in de zomerperiode (memo)*. 4696.30.
- HVR Engineering. (2024). *Analyse stormsluiting december 2023*. Rapport nr. 081R039M021-Rev.1.
- Hydraudyne. (1994). *Load variations for the drive system*. 2-001440A4.
- Kleiberg, T., Tieleman, O., Versluis, M., Kortlever, W., ten Oever, E., & Hofland, B. (2022). A novel design method for wave-induced fatigue of flood gates. *Journal of Coastal and Hydraulic Structures*, 2(17).
- KNMI. (2023). *KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland (gebruikersrapport)*.
- KP ZSS. (2023a). *Systeemanalyse waterveiligheid - Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied*. Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor II, Auteurs: HKV, Witteveen+Bos & IV-Infra.
- KpNK. (2024d). *Bepalen van Functionele Prestaties - Stap 4 in de Iteratieve Werkwijze*. 11207401-009-HYE-0005.
- Meijers, P., & Elkadi, A. (2023). Modelling the generation of cyclically induced excess pore pressures below a GBF. *Proceedings of 9th International SUT OSIG Conference "Innovative Geotechnologies for Energy Transition", London, England, 1573-1580*.

- Meijers, P., & Luger, H. (2012). On the modelling of wave induced liquefaction, taking into account the effect of preshearing. *Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece*.
- MOS. (2014a). *Grondonderzoek Maeslantkering te Hoek van Holland*. Kenmerk R1402716-RH_1.
- MOS. (2014b). *Grondonderzoek Maeslantkering te Hoek van Holland*. Kenmerk R1402716-RH_2.
- Rajaratnam, N., & Chamani, M. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.
- Rijkswaterstaat. (1987). *Toetsingsplan Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, Nota 1: Analyse alternatieven Stormvloedkering Nieuwe Waterweg*.
- Rijkswaterstaat. (2022b). *Vervanging en Renovatie. Prognoserapport 2022. Prognose voor de periode 2023 tot en met 2050*.
- Rijkswaterstaat en Bouwkombinatie Maeslant Kering. (1999). *R/FLOW Simulatie SVKW - Integrale simulatie van het benedenrivierengebied met de Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, inclusief beslis-, besturings- en ballastsysteem, alsmede het effect van seiches*. A-10-5090.
- Rijkswaterstaat. (z.d.a). *Basisdocumentatie Maeslantkering - Basismodule 2 v.3.0*. M00-ALG-02-NL.
- Rijkswaterstaat. (z.d.b). *Basisdocumentatie Maeslantkering - Handboek 5: Civiel, terreinen & rivier v3.0*. M00-ALG-07-NL.
- Rijkswaterstaat. (z.d.c). *Basisdocumentatie Maeslantkering - Handboek 1: Dok en Dokdeur v3.0*. M00-ALG-03-NL.
- RWS Ontwerpt. (2022). *Beoordeling Europoortkering I Dijktraject 208*.
- Schiereck, G. J. (2004). *Introduction to bed, bank and shore protection*. Delft University Press.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands - A manual for practical applications*. Thomas Telford Publications.
- Trace-Kleeberg, S., Haigh, I., Walraven, M., & Gourvenec, S. (2023). How should storm surge barrier maintenance strategies be changed in light of sea-level rise? A case study. *Coastal Engineering*, 184.
- Vader, H., Bakker, A. M., Jonkman, S. N., Van den Boomen, M., Van Baaren, E. S., & Diermanse, F. L. (2023). A framework for assessing the remaining life of storm surge barriers. *Structure and Infrastructure Engineering*. doi:10.1080/15732479.2023.2177874
- van Baaren, E. S., Bredeveld, J., ten Harmsen van der Beek, N. J., O'Mahoney, T., Kramer, N., Berger, H., & Barneveld, A. (2023). Framework functional performance hydraulic structures. *Eighth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Milan, Italy, July 2-6, 2023*.
- Van der Weijden, J. (2022). *Tangential load and trim behaviour: Analysis of the Maeslant Barrier under seaward flow*. MSc Thesis.
- Weiler, O., Verhaart, F., Nogueira, H., & O'Mahoney, T. (2019). Hydraulic loads on bottom constructions behind a storm surge barrier or weir: development of a rapid assessment method. *Conference paper Smart Rivers 2019 in Lyon, France*.
- WL | Delft Hydraulics. (1989a). *Maeslant Kering - Onderzoek in een sectiemodel betreffende: stabiliteit top laag bodemverdediging, drukken op betonnen drempel, drukken in filter onder drempel*. Verslag modelonderzoek Q0958.
- WL | Delft Hydraulics. (1989b). *Discharge relations for hydraulic structures and head losses from different components*. Q0953.
- WL | Delft Hydraulics. (1989c). *Maeslant Kering - Onderzoek naar het responsiegedrag van de sectordeuren in een overzichtsmodeel*. Q0969.
- WL | Delft Hydraulics. (1990a). *Maeslant Kering - vervolgonderzoek naar responsiegedrag van de sectordeuren in een overzichtsmodeel*. Verslag modelonderzoek Q1140.

- WL | Delft Hydraulics. (1990b). *Maeslant Kering. Responsieonderzoek Sectordeuren - Onderzoek gericht op verbetering van de vormgeving van de Sectordeuren*. Q1190.
- WL | Delft Hydraulics. (1992a). *Maeslant Kering - Notities betreffende de stabiliteit van het stortebed en alternatieve drempelontwerpen t.p.v. labyrint en dokingangen*. Q1146-1.
- WL | Delft Hydraulics. (1992b). *Vervolgonderzoek naar de stabiliteit van de toplaag van de bodemverdediging, in een overzichtsmode*l. Q1146-2a.
- WL | Delft Hydraulics. (1992c). *Maeslant Kering - Notities betreffende de stabiliteit van het stortebed en alternatieve drempelontwerpen t.p.v. labyrint en dokingangen*. Q1146-2b.
- WL | Delft Hydraulics. (1992d). *Aanvullend onderzoek naar de stabiliteit van het stortebed t.p.v. het talud en t.p.v. het labyrint*. Q1278.30.

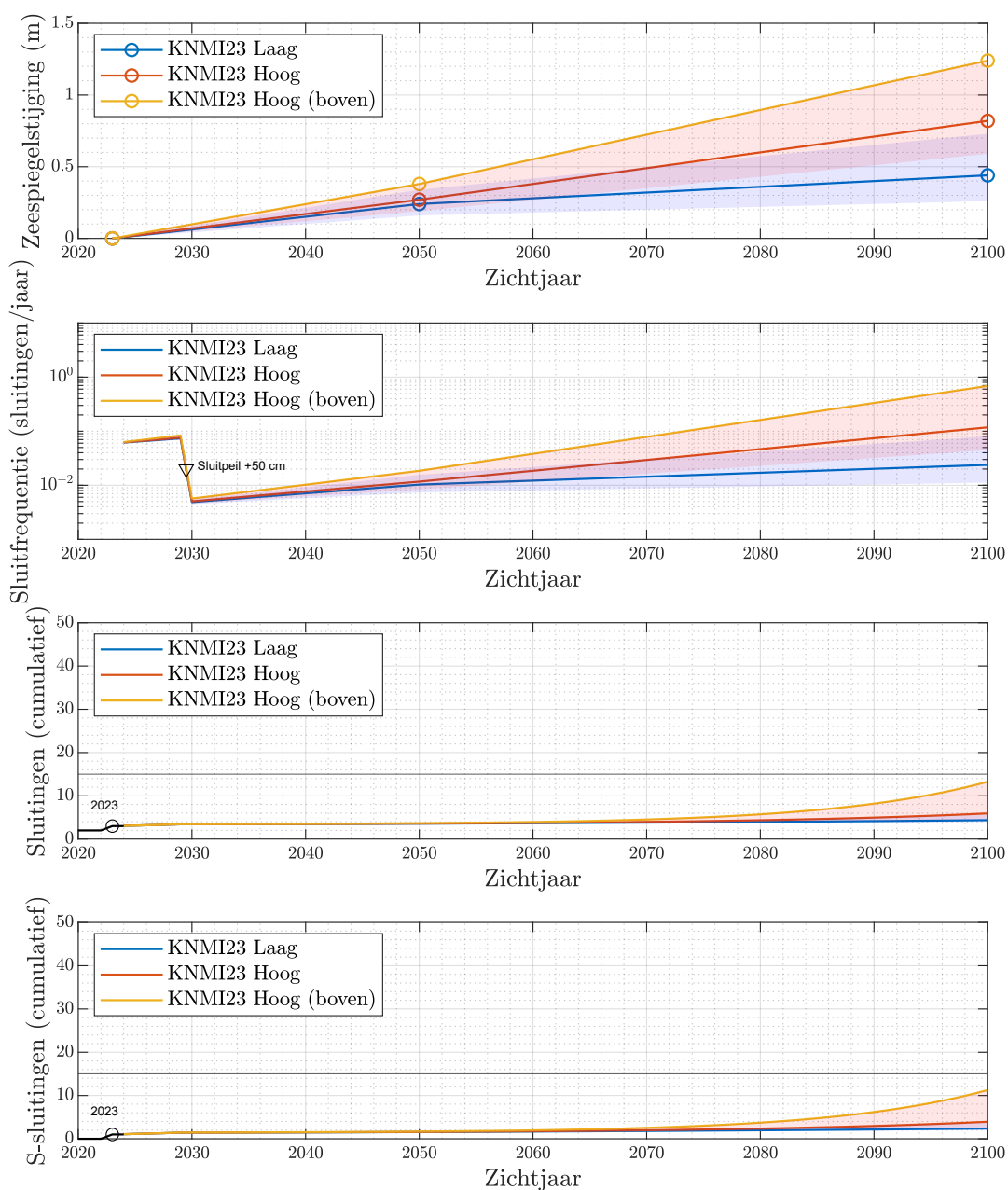
A Projecties cumulatief aantal sluitingen

In de gemaakte projecties van het cumulatieve aantal sluitingen (zie Hoofdstuk 3) is uitgegaan van 3 sluitingen tot nu toe: 2 V-sluitingen in 2007 en 2018 en 1 S-sluiting in 2023. De mate waarin V-sluitingen (in vergelijking met S-sluitingen) bijdragen aan het uitputten van het vermoeingsbudget van de vakwerkarmen (zie Hoofdstuk 2 in Deltares (2024c)) is nog niet bekend. Om die reden zijn volledigheidshalve in deze bijlage ook de projecties exclusief V-sluitingen weergegeven. De aanpak van deze berekeningen is beschreven in Paragraaf 3.1.1.



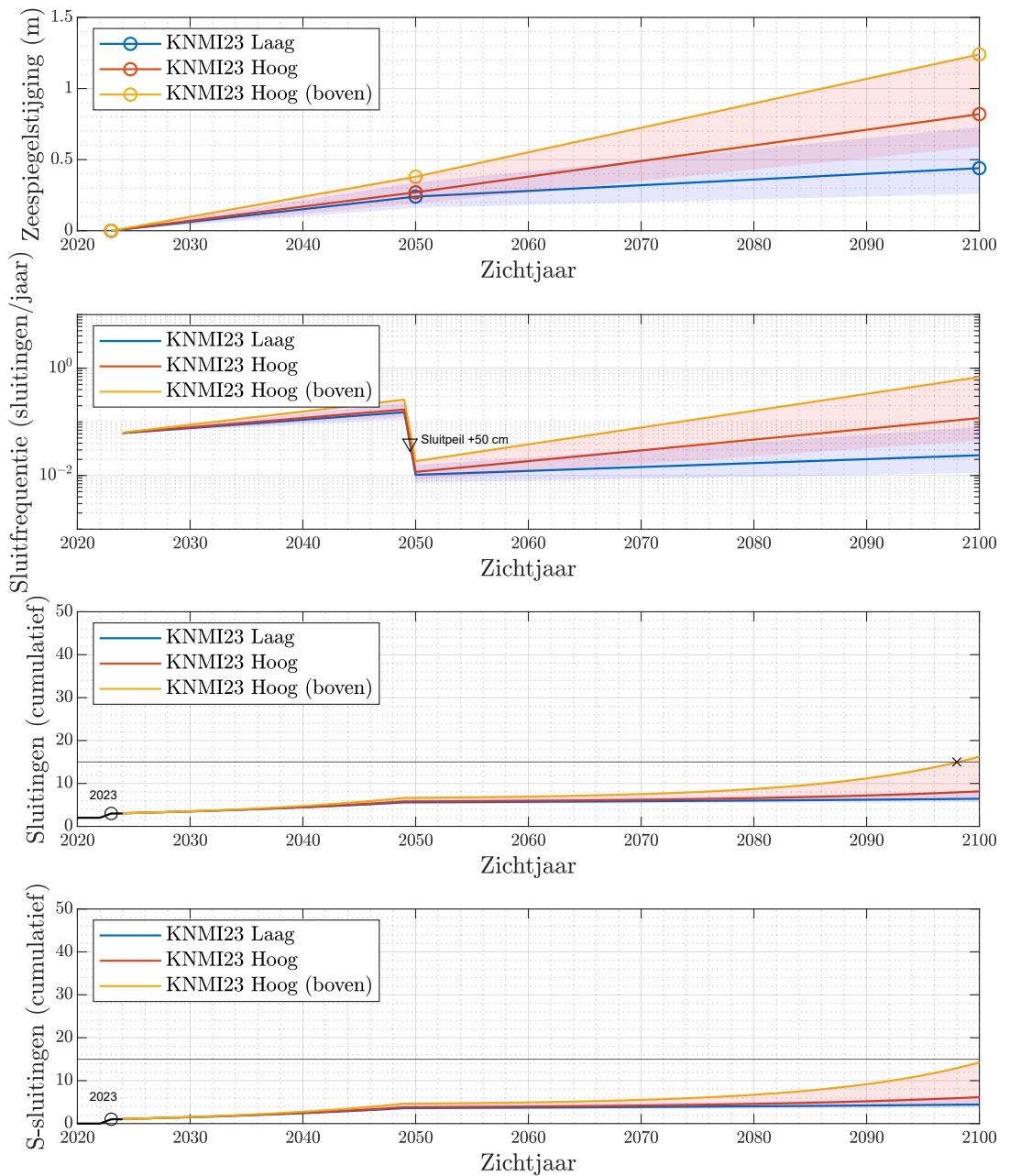
Figuur A.1: Figuur 3.1 (huidig sluitpeil) met een extra paneel (onder) dat de projectie (in kleur per scenario) van het cumulatieve aantal sluitingen weergeeft indien geredeneerd wordt vanuit één sluiting tot nu toe (in zwart).

Sluitpeil +50 cm (vanaf 2030)



Figuur A.2: Figuur 3.2 (sluitpeilverhoging 50 cm in 2030) met een extra paneel (onder) dat de projectie (in kleur per scenario) van het cumulatieve aantal sluitingen weergeeft indien geredeneerd wordt vanuit één sluiting tot nu toe (in zwart).

Sluitpeil +50 cm (vanaf 2050)



Figuur A.3: Figuur 3.3 (sluitpeilverhoging 50 cm in 2050) met een extra paneel (onder) dat de projectie (in kleur) van het cumulatieve aantal sluitingen weergeeft indien geredeneerd wordt vanuit één sluiting tot nu toe (in zwart).

A.1 Projecties sluit- en oproepfrequenties per zichtjaar

Als aanvulling op Figuur A.1 tot en met Figuur A.3 wordt in Tabel A.1 de sluit- en oproepfrequentie weergegeven in enkele zichtjaren binnen de gehanteerde zeespiegelstijging scenario's. De zeespiegelstijging die per zichtjaar en per scenario wordt weergegeven is gebaseerd op de KNMI'23 klimaatscenario's (KNMI, 2023). Om tot waarden voor de zichtjaren 2040, 2060 en 2080 te komen is in de berekeningen aangenomen dat de zeespiegel lineair stijgt tussen de gegeven zichtjaren 2050 en 2100. De sluitfrequenties zijn bepaald aan de hand van de Hydra-NL berekeningen uit Deltares (2018a). De overschrijdingsfrequentielijnen waaruit de oproepfrequenties zijn bepaald zijn gemaakt door HKV voor de huidige situatie (HKV, 2024). De weergegeven oproepfrequenties die bij een bepaalde mate van zeespiegelstijging horen zijn verkregen door die frequentielijnen op te schuiven. Deze aanpak wordt in meer detail beschreven in Paragraaf 5.2 van Deltares (2024c).

Tabel A.1: Zeespiegelstijging (KNMI, 2023) en sluit- (Deltares, 2018a) en oproepfrequentie (HKV, 2024) voor enkele zichtjaren in de gehanteerde scenario's.

Scenario	Parameter	Zichtjaar			
		2040	2060	2080	2100
Laag	Zeespiegelstijging	15 cm	28 cm	36 cm	44 cm
	Sluitfrequentie (per jaar)	0.11	0.18	0.25	0.35
	Oproepfrequentie (per jaar)	0.45	0.80	1.10	1.50
Hoog	Zeespiegelstijging	17 cm	38 cm	60 cm	82 cm
	Sluitfrequentie (per jaar)	0.12	0.28	0.67	1.62
	Oproepfrequentie (per jaar)	0.50	1.25	3.25	10
Hoog (boven)	Zeespiegelstijging	24 cm	55 cm	90 cm	124 cm
	Sluitfrequentie (per jaar)	0.16	0.55	2.21	8.83
	Oproepfrequentie (per jaar)	0.65	2.50	18	110

Deltares is an independent institute for applied research in the field of water and subsurface. Throughout the world, we work on smart solutions for people, environment and society.

Deltares

www.deltares.nl