Vlaanderen
is wetenschap

24_043_1
WL rapporten

Toetsing op hoogte Mercatorsluis

Overloop, golfoverslag, komberging en stabiliteit bodembescherming

DEPARTEMENT
MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Toetsing op hoogte Mercatorsluis

Overloop, golfoverslag, komberging en stabiliteit bodembescherming

Gruwez, V.; Verelst, K.; Vanneste, D.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen
is wetenschap

Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2025
D/2025/3241/404

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Gruwez, V.; Verelst, K.; Vanneste, D. (2025). Toetsing op hoogte Mercatorsluis: Overloop, golfoverslag, komberging en stabiliteit bodembescherming. Versie 4.0. WL Rapporten, 24_043_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, afdeling Kust	Ref.:	WL2025R24_043_1
Trefwoorden (3-5):	Overloop, Golfoverslag, Komberging, Erosiebescherming, Sluis		
Kennisdomeinen:	Kustbescherming > Kustveiligheid bij extreme stormen > Constructies in havens > Literatuur- en desktoponderzoek Waterbouwkundige constructies > Sluizen > Erosiebescherming > Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	24	Bijlagen (p.):	1
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Gruwez, V.; Verelst, K.; Vanneste, D.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanneste, D.	Getekend door:Vanneste Dieter Frans A Getekend op:2025-11-07 10:42:07 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed Vanneste Dieter Vlaamse overheid
Projectleider:	Gruwez, V.	Signed by:Gruwez Vincent Signed at:2025-11-07 11:31:50 +01:00 Reason:I approve this document Gruwez Vincent

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Bellafkih Abdelkarim Getekend op:2025-11-07 10:48:04 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed Bellafkih Abdelkarim Vlaamse overheid

Abstract

In dit advies wordt een evaluatie gemaakt van de benodigde kruinhoogte van de vloeddeuren van het benedenhoofd (zeezijde) van de Mercatorsluis vanuit standpunt kustveiligheid (1000-jarige storm + zeespiegelstijging tot 2055), rekening houdend met enerzijds de mogelijkheid van komberging in het Mercatordok en anderzijds de limieten van de bestaande bodembescherming in de sluis. Deze laatste blijken bepalend: voor peilen van de sluisdeur aan zeezijde hoger dan +7.35 mTAW kan de betonvloer weerstaan aan de berekende stroomsnelheden. Voor dit deurpeil treedt enkel golfoverslag op (geen overloop) en kan worden opgevangen door de komberging in het Mercatordok zonder de maximale waterstand van +4.50 m TAW te overschrijden, met voldoende veiligheid (extra resterende komberging) voor zowel vertrekkende van een verlaagd stilwaterpeil bij storm als vertrekkende van het streefpeil in het dok.

Verder kunnen (voor het aanbevolen deurpeil van +7.35 m TAW) de betontegels in de sluiskolk weerstaan aan de stroomsnelheden nabij de bodem die berekend worden bij overstromen van de sluisdeur aan zeezijde. Voor de sluisdeur aan dokzijde is één peil beschouwd, namelijk het peil +6.76 mTAW of het peil van de huidige sluisdeur. Geen informatie is gekend met betrekking tot de bodembescherming naast het bovenhoofd (dokzijde) van de sluis in het Mercatordok. Aan het einde van het bovenhoofd worden stroomsnelheden nabij de bodem berekend gelijk aan 0.65 m/s. Rekening houdend met het feit dat bij de berekeningen een aantal conservatieve aannames gedaan zijn, wordt geconcludeerd dat bij afwezigheid van een bodembescherming, de huidige bodem kan weerstaan aan de belasting op de bodem ten gevolge van overloop over de sluisdeur aan dokzijde.

Inhoudstafel

Abstract IV
Inhoudstafel V
Lijst van de tabellen VI
Lijst van de figuren VII
1 Inleiding 1
2 Methodologie en aannames 2
2.1 Komberging Mercatordok 2
2.2 Overloop en golfoverslag 3
2.2.1 Hydraulische randvoorwaarden 3
2.2.2 Overloop 6
2.2.3 Golfoverslag 6
2.2.4 Methode 7
2.3 Stabiliteit bodembescherming 7
3 Resultaten 12
3.1 Toetsing sluisdeurhoogte 12
3.2 Stabiliteit bodembescherming 14
4 Conclusie 22
5 Referenties 23
Bijlage 1 Resultaten toets op hoogte Mercatorsluisdeur (in tabel) B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Stilwaterpeilen en oppervlakte van het Mercatordok 3

Tabel 2 – Interpolatie van de buitengaatse hydraulische randvoorwaarden voor 2055. 4

Tabel 3 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +7.24 m TAW, afgeleid uit (Vanneste *et al.*, 2023) 5

Tabel 4 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde 17

Tabel 5 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiskolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde 18

Tabel 6 – Berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering in (Raes *et al.*, 1996) 19

Tabel 7 – Berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) 20

Tabel 8 – Dimensionering breuksteen aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) 21

Tabel 9 – Beschouwde breuksteensorteringen 21

Tabel 10 – Resultaten toets op hoogte Mercatorsluisdeur B1

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Gegevens hoogteligging Mercatorsluis en omgeving (gebaseerd op DHM Vlaanderen II)..... 1

Figuur 2 – Resultaat van de oppervlaktemeting van het Mercatordok m.b.v. ©Google Earth. 2

Figuur 3 – Waterstand bij stormopzet (De Roo *et al.*, 2021). 4

Figuur 4 – Situatie bij extreme omstandigheden 7

Figuur 5 - Schematische voorstelling van de watersprong gedurende overloop over een stuw/sluisdeur..... 8

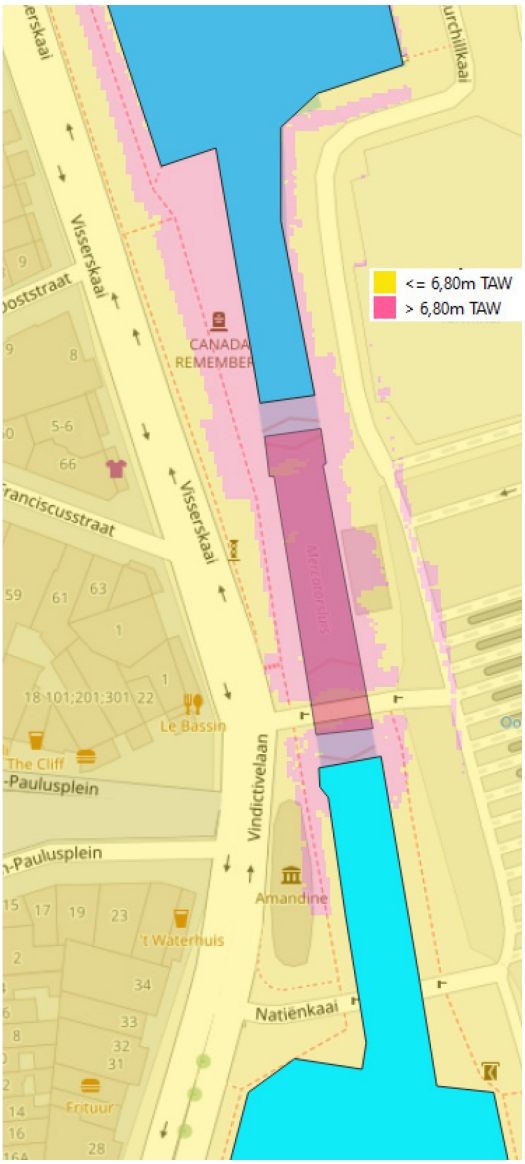
Figuur 6 – SWP in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde. 12

Figuur 7 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde. 13

Figuur 8 – Afstand tot sluisdeur van einde benedenhoofd en einde eerste betontegel in de sluiskolk (B. en Wegen. S. voor W. Ministerie van Openbare Werken, 1970) 15

1 Inleiding

Het kruinpeil van de Mercatorsluis is ca. 6,8 m TAW. Alle deuren hebben momenteel ongeveer dit niveau. Dit is echter lager dan het niveau van de 1000-jarige storm anno nu, zijnde ca. 7.0 m TAW (Vuik *et al.*, 2020).



Figuur 1 – Gegevens hoogteligging Mercatorsluis en omgeving (gebaseerd op DHM Vlaanderen II)

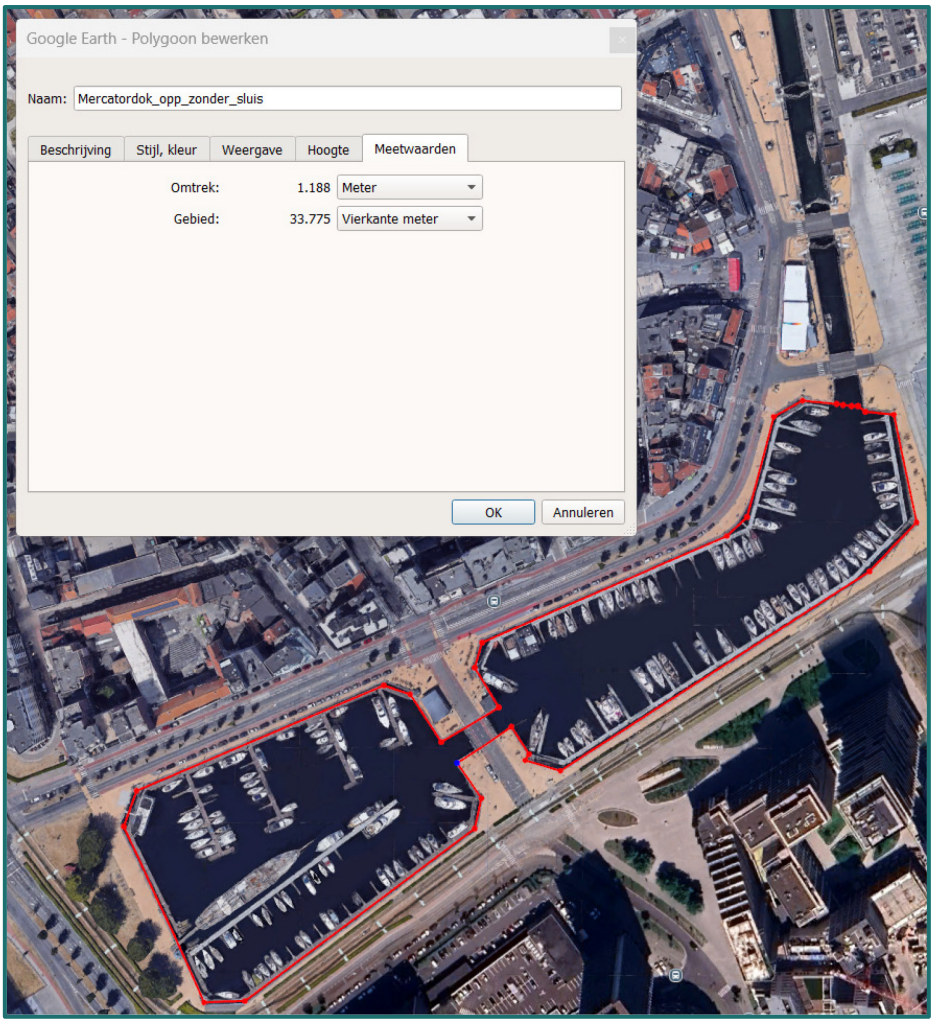
In dit advies wordt een evaluatie gemaakt van de benodigde kruinhoogte van de vloeddeuren van het benedenhoofd van de Mercatorsluis vanuit standpunt kustveiligheid (1000-jarige storm + zeespiegelstijging tot 2055), rekening houdend met enerzijds de mogelijkheid van komberging in het Mercatordok en anderzijds de limieten van de bestaande bodembescherming in de sluis.

2 Methodologie en aannames

2.1 Komberging Mercatordok

De komberging van het Mercatordok bepaalt de limiet voor het debiet dat toegelaten mag worden over de sluisdeuren van de Mercatorsluis. De komberging hang af van het stilwaterpeil (SWP) in het dok en de oppervlakte van het dok. Mogelijke startwaarden voor het SWP en het maximaal toegelaten SWP in het Mercatordok worden gegeven in Tabel 1 (comm. MDK-aKust, 05/02/2025).

De oppervlakte van het dok werd bepaald op basis van een meting in Google Earth (Mercatorsluis zelf buiten beschouwing gelaten (veilige aanname), zie Figuur 2) en wordt ondersteld constant te zijn voor elke waterstand in het dok binnen het bereik van de peilen vermeld in Tabel 1.



Figuur 2 – Resultaat van de oppervlaktemeting van het Mercatordok m.b.v. ©Google Earth.

Tabel 1 – Stilwaterpeilen en oppervlakte van het Mercatordok.

Type peil of oppervlakte	Waarde
Verlaagd peil bij storm	+3.30 m TAW
Dagelijks streefpeil	+4.00 m TAW
Max. toelaatbaar peil	+4.50 m TAW
Oppervlakte zonder sluis [m²]	33775 m²

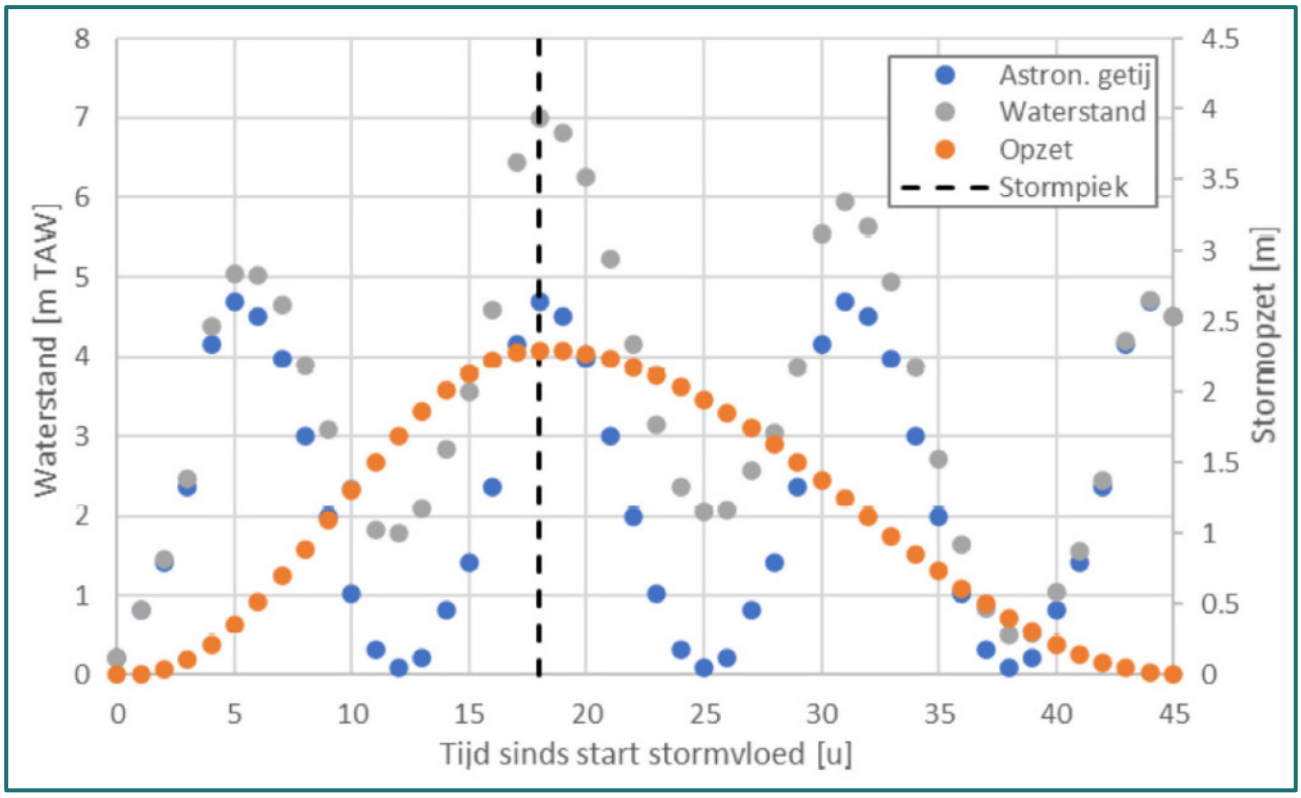
2.2 Overloop en golfoverslag

2.2.1 Hydraulische randvoorwaarden

De vooropgestelde levensduur van de nieuwe sluisdeur is 30 jaar te rekenen vanaf 2025 en de toetsing dient te gebeuren voor een storm met terugkeerperiode 1000 jaar. De referentiesituatie die dus beschouwd wordt in de berekening is een 1000-jarig (omnidirectioneel) stilwaterpeil (SWP) van +7.24 m TAW in de haven van Oostende, met inachtname van een zeespiegelstijging van +0.34 m in 2055 t.o.v. 2000, het referentiejaar zoals gebruikt in de volgende formule (Verwaest, 2011):

$$\Delta_{[m]}(t) = 0{,}001_{[m]} \cdot \left(0{,}04 \cdot (t-2000)^2 + 4 \cdot (t-2000)\right)$$ Vergelijking 1

Er wordt een duurtijd ondersteld van 2 uur voor dit stormpeil. Dit is een veilige aanname omdat het maximaal waterpeil constant ondersteld wordt gedurende deze 2 uur, terwijl in werkelijkheid de waterstand meestal lager zal zijn (Figuur 3). Een controle voor de hoogwaterstanden voor en na de piek van de storm in Figuur 3, wijst uit dat er geen tot zeer weinig (niet bepalend) golfoverslag optreedt over de sluisdeur gedurende deze hoogwaterstanden. Het is dus aanvaardbaar dat enkel de hoogwaterstand tijdens de piek van de storm wordt beschouwd in deze analyse.



Figuur 3 – Waterstand bij stormopzet (De Roo *et al.*, 2021).

De buitengaatse golfcondities ($H_{m0,o}$; $T_{p,o}$) aan de haven van Oostende horende bij het *SWP* van +7.24 m TAW werden afgeleid uit het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2020 te sectie 117 (Vuik *et al.*, 2020). Een lineaire interpolatie werd uitgevoerd tussen de randvoorwaarden gegeven voor het SWP in 2020 en de randvoorwaarden gegeven voor het SWP + 0.3 m zeespiegelstijging (ZSS), zie Tabel 2.

Tabel 2 – Interpolatie van de buitengaatse hydraulische randvoorwaarden voor 2055.

Parameter	1000j zonder ZSS	1000j met 0.24 m ZSS (2055)	1000j met 0.3 m ZSS
SWP [m TAW]	+7.00	+7.24	+7.30
$H_{m0,o}$ [m]	5.41	5.51	5.53
$T_{p,o}$ [s]	11.18	11.19	11.19

De golfcondities aan de Mercatorsluis werden bepaald op basis van de studie Probabilistische Faalkansanalyse Mercatorsluis (Vanneste *et al.*, 2023). In deze probabilistische analyse werden de directionele hydraulische randvoorwaarden aan de Mercatorsluis bepaald voor verschillende terugkeerperiode scenario's (T0, T1, T2,…, T5: TP = 1j, 10j, 100j,…, 100000j). Vanneste et al. (2023) geven de totale laagfrequente en de invallende golfcondities (golfindringing en lokaal opgewekte windgolven).

Voor de golfindringing werden eerst uit deze resultaten de scenario's geïdentificeerd die het meest corresponderen met het SWP hier in beschouwing (+7.24 m TAW), zie Tabel 3. Hieruit werden de golfindringingscoëfficienten bepaald voor de totale laagfrequente (f < 0.05 Hz; $K_{d,lf}$) en de invallende wind-deining golven (f > 0.05 Hz; $K_{d,wd}$):

$$K_{d,lf} = \frac{H_{m0,lf,tot}}{H_{m0,o}}$$ Vergelijking 2

$$K_{d,wd} = \frac{H_{m0,wd,inv}}{H_{m0,o}}$$ Vergelijking 3

De totale laagfrequente ($H_{m0,lf,tot}$) en invallende wind-deining ($H_{m0,wd,inv}$) golfcondities aan de deur van de Mercatorsluis werden vervolgens bekomen door toepassing van deze K_d-waarden op de buitengaatse golfcondities bepaald in Tabel 2 (zie resultaten in Tabel 3). Voor de lokaal opgewekte windgolven werden de inkomende lokaal opgewekte golfcondities ($H_{m0,log,inv,T3}$) weerhouden uit de studie van Vanneste et al. (2023) voor scenario T3 (TP = 1000j). Een superpositie van deze invallende lokaal opgewekte windgolven en invallende wind-deining werd uitgevoerd om te komen tot de invallende golfcondities ($H_{m0,wd+log,inv}$) aan de deur van de Mercatorsluis. Uit Tabel 3 blijkt dat golfrichting N voor de meest nadelige golfindringing tot aan de Mecatorsluis zorgt. Deze golfcondities worden dan ook weerhouden voor de verdere golfoverslagberekeningen.

Tabel 3 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +7.24 m TAW, afgeleid uit (Vanneste *et al.*, 2023).

Richting	Terugkeer-periode scenario	SWP [m TAW]	$K_{d,lf}$ [-]	$K_{d,wd}$ [-]	$H_{m0,lf,tot}$ [m]	$H_{m0,wd,inv,T3}$ [m]	$H_{m0,log,inv,T3}$ [m]	$H_{m0,wd+log,inv}$ [m]
W	T5 (2020)	+7.26	0.003	0.016	0.04	0.09	0.16	0.18
WNW	T4 (2050)	+7.18	0.017	0.080	0.19	0.44	0.21	0.49
NW	T4 (2050)	+7.19	0.018	0.081	0.20	0.44	0.2	0.49
-37°N	T4 (2050)	+7.26	0.016	0.056	0.17	0.31	0.22	0.38
NNW	T4 (2020)	+7.16	0.015	0.050	0.17	0.27	0.24	0.36
N	T4 (2050)	+7.19	0.021	0.078	0.23	0.43	0.24	0.49
NNO	T5 (2020)	+7.19	0.008	0.025	0.09	0.14	0.23	0.27

Omdat het SWP een omnidirectionele waarde betreft, wordt voor de overloop- en overslagberekeningen enkel de hoogste golfconditie weerhouden in Tabel 3 (richting N). Het effect van de laagfrequente golven wordt in rekening gebracht in het SWP, als volgt:

SWP_berekening = [7.24 + (Hm0,lf,tot / 2)] m TAW = +7.35 m TAW

Dit is een veilige aanname omdat het effect van laagfrequente golven in theorie ongeveer evenveel en even lang het SWP peil laat toenemen als afnemen voor een constant SWP. Het is ook een veiligere aanname om de lange golfwerking in het SWP in rekening te brengen dan in de inkomende golfenergie.

2.2.2 Overloop

Het overloopdebiet over een stuw kan worden berekend op basis van (Bos, 1989):

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{\frac{2}{3} g} \left(-R_{c,o}\right)^{1.5}$$ Vergelijking 4

Met:

- q het overloopdebiet per meter breedte [m³/s/m]
- C_d de debietcoëfficiënt [-]
- $R_{c,o}$ de negatieve vrijboord bij overloop (= sluisdeur kruinniveau [m TAW] - SWP [m TAW]) ($R_{c,o} \leq 0$) [m]
- g de valversnelling =9.81 m/s²

De EurOtop handleiding stelt ook een formule voor de berekening van overloop voor. Een controle wijst uit dat vergelijkbare resultaten worden bekomen met beide formules voor het huidige geval. De waarde van de debietcoëfficiënt C_d in Vegelijking 4 hangt af van het type stuw. Voor breed gekruinde stuwen ($-R_{c,o}/W \leq 1.45$) geldt:

$$C_d = 0.93 + 0.10 \frac{-R_{c,o}}{W}$$ Vergelijking 5

Met:

- W de dikte van de stuw of sluisdeur [m]

De dikte van de sluisdeur, werd bepaald op basis van het as-built plan van de deur (Besix, 2022) en bedraagt W = 0.63 m. In deze studie komt enkel de situatie van een breed gekruinde stuw voor en is Vergelijking 5 dus toepasbaar.

2.2.3 Golfoverslag

Het gemiddelde golfoverslagdebiet over een verticale wand wordt berekend volgens de EurOtop handleiding (EurOtop, 2018):

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = 0.054 \cdot exp\left[-\left(2.12 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1.3}\right]$$ Vergelijking 6

Met:

- q het gemiddelde golfoverslagdebiet per meter breedte [m³/s/m]
- H_{m0} de invallende spectrale significante golfhoogte [m]
- R_c de positieve vrijboord van de sluisdeurkruin ($R_c \geq 0$) [m]

Dit is de probabilistische formule die dient gebruikt te worden bij ontwerp en toetsing.

2.2.4 Methode

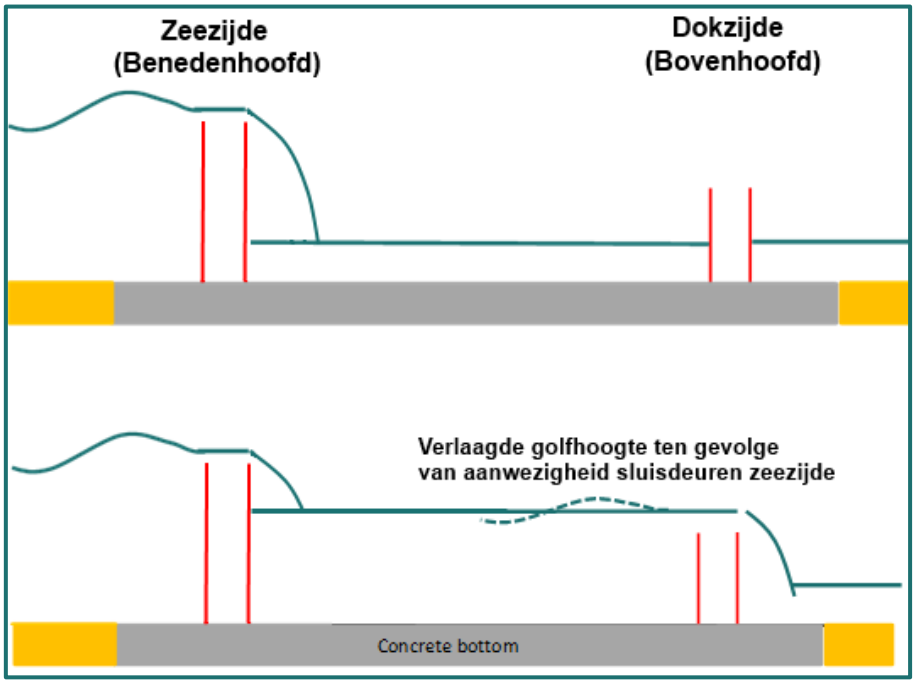
De toetsing van de hoogte van de sluisdeur van het benedenhoofd van de Mercatorsluis start met de berekening van het overloop- en golfoverslagdebiet, en samen te tellen tot het totaal debiet over de deur. Het totaal overstroomde watervolume over de sluisdeur wordt bepaald door het totaal debiet te vermenigvuldigen met de totale overloopbreedte *B* van de deuren (*B* = 2 x 7.52 m = 15.04 m; de breedte van een deurhelft is 7.52 m op basis van het as-built plan van Besix (2022)) en de duurtijd van 2 uur (paragraaf 2.2.1). In het totaal debiet dat in het Mercatordok terecht komt, wordt ook rekening gehouden met het gemiddelde overslagdebiet over de stormmuren grenzend aan de sluisdeur (*q* = 0.4 l/s/m in zone 5 volgens Willems en Suzuki (2020) over een totale stormmuurlengte van 50 m).

Het resulterende totaal overstroomde volume moet kleiner zijn dan de kombergingscapaciteit van het Mercatordok om overstroming over de kaaimuren van het Mercatordok te vermijden. Of alternatief, het SWP in het Mercatordok mag het maximum toegelaten peil van +4.50 m TAW (Tabel 1) niet overschrijden.

De deurhoogte wordt verhoogd in stappen van 0.25 m om een beeld te krijgen van de reductie in totaal overstromingsvolume i.f.v. de toename in deurkruinpeil.

2.3 Stabiliteit bodembescherming

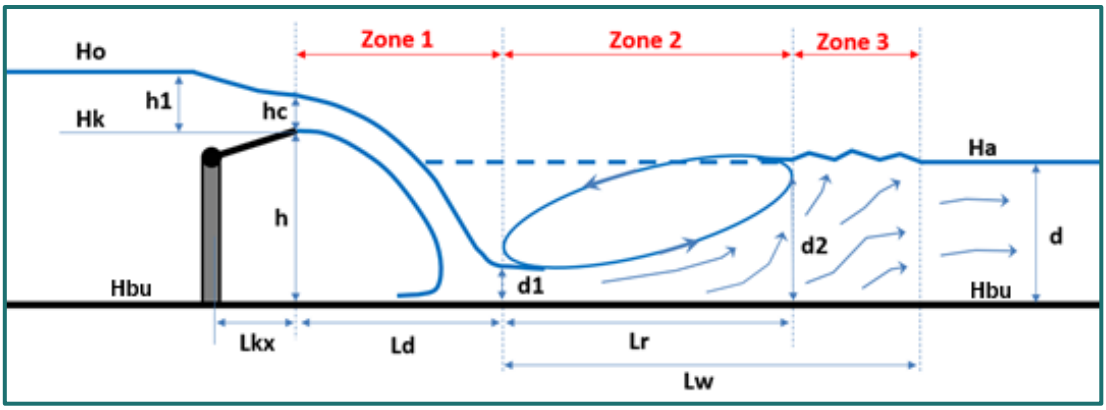
Tijdens extreme omstandigheden zullen zowel de eb- en vloeddeuren aan zeezijde als aan dokzijde gesloten zijn. Ten gevolge van overloop of golfoverslag doet zich eerst overloop over de sluisdeuren aan zeezijde voor. Na een tijdje is de sluiskolk volledig gevuld en doet zich overloop over de sluisdeuren aan dokzijde voor. Ten gevolge van de verhoging van de sluisdeur aan dokzijde doet zich in de sluiskolk een verlaagde golfhoogte voor. Deze situatie is voorgesteld in Figuur 4. Deze 2D vereenvoudiging beschouwt geen overloop over de zijwanden van de sluiskolk.



Figuur 4 – Situatie bij extreme omstandigheden

Tijdens de overloop botst de straal die over de sluisdeur valt op de bodem stroomafwaarts van de sluisdeur. Afhankelijk van het waterpeil in de sluiskolk of in het Mercatordok wordt stroomafwaarts van de plaats waar de straal de bodem raakt een watersprong gevormd. Voor de controle van de stabiliteit van de bodembescherming wordt de locatie van het botsen van de straal op de sluisbodem berekend, worden de lengte van de watersprong en de stroomsnelheden nabij de bodem op deze locaties bepaald. Deze stroomsnelheden worden vergeleken met de maximaal toelaatbare stroomsnelheid van de aanwezige bodembescherming.

Overloop over een sluisdeur kan worden gekarakteriseerd als de overloop over een stuw, waarbij de hoogte van de stuw gelijk is aan het bovenste peil van de sluisdeur. Figuur 5 geeft een schematische weergave van de watersprong stroomafwaarts van de stuw, samen met de symbolen die voor de verschillende parameters in dit hoofdstuk worden gebruikt.



Figuur 5 - Schematische voorstelling van de watersprong gedurende overloop over een stuw/sluisdeur

Figuur 5 toont volgende 3 zones die voorkomen bij het ontstaan van een watersprong:

1. Vallende straal (L_d): Dit gebied bevindt zich tussen het opwaartse uiteinde van de stuw/sluisdeur en de plaats waar vallende straal de bodem raakt. Op de plaats waar de straal de bodem raakt, wordt de waterdiepte aangeduid met d_1 en wordt een horizontale stroming met hoge stroomsnelheden nabij de bodem gegenereerd.
2. De roller (L_r): De roller bevindt zich tussen de plaats waar de vallende straal de bodem raakt en de plaats waar de evenwichtsdiepte d_2 wordt bereikt. In dit gebied worden, samen met een retourstroom dicht bij het oppervlak, hoge snelheden dicht bij de bodem gegenereerd.
3. Einde van de watersprong (L_w - L_r): Dit gebied bevindt zich tussen het einde van de roller en de plaats waar de stroming gelijkmatig verdeeld is over de waterkolom.

In paragraaf 2.2 is de methodologie vermeld voor de berekening van het debiet ten gevolge van overloop of golfoverslag over de sluisdeur. Aan de hand van dit debiet wordt de lengte van de vallende straal L_d, de waterdiepte d_1 op de plaats waar de vallende straal op de bodem botst, de evenwichtsdiepte d_2 als volgt berekend volgens Chanson (2002) en Rand (1955):

$$\frac{L_D}{h} = 2.171\left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.525} \text{ (Chanson, 2002)}$$

$$\frac{d_1}{h} = 0.54\left(\frac{d_c}{h}\right)^{1.275} \text{ (Rand, 1955)}$$

$$\frac{d_1}{h} = 0.625\left(\frac{d_c}{h}\right)^{1.326} \text{ (Chanson, 2002)}$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66\left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.81} \text{ (Rand, 1955)}$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.565 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.809} \text{ (Chanson, 2002)}$$

Met:

-	L_D	Lengte vallende straal	[m]
-	d_c	Kritische waterdiepte ($d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
-	q	Debiet per eenheidsbreedte	[m²/s]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s²)	[m/s²]
-	h	Valhoogte (= H_k - $H_{b,u}$)	[m]
-	H_k	Kruinpeil overlaat/bovenste peil sluisdeur	[mTAW]
-	$H_{b,u}$	Bodempeil sluiskolk	[mTAW]
-	d_1	Waterdiepte ter plaatse van vallende straal	[m]
-	d_2	Evenwichtswaterdiepte	[m]

Uit de resultaten van de controle van de stabiliteit van de bodembescherming, zie paragraaf 3.2, volgt dat de evenwichtswaterdiepte beduidend lager is dan de waterdiepte in de sluiskolk. Bijgevolg ontstaat een verdronken watersprong. Bij een verdronken watersprong kan de lengte van de roller van de watersprong worden berekend aan de hand van de volgende formuleringen uit Vischer & Hager (1995) en Wu & Rajaratnam (1995):

$$\frac{L_w}{d_2} = 6.1 + 4.9\, S_j$$

$$S_j = \frac{d}{d_2} - 1$$

Met:

-	L_w	Lengte van de roller van de watersprong	[m]
-	d_2	Evenwichtswaterdiepte	[m]
-	d	Afwaartse waterdiepte	[m]

Ter plaatse van de locatie waar de vallende straal de bodem raakt, worden de hoogste stroomsnelheden nabij de bodem gegenereerd. Op deze locatie aan het begin van de watersprong is de hoogte van de vallende straal gelijk aan de waterdiepte d_1. Ter plaatse van het einde van de watersprong is de waterdiepte gelijk aan de evenwichtswaterdiepte d_2. Uit eenvoud wordt in deze studie voor tussenliggende locaties de waterdiepte lineair geïnterpoleerd tussen de waterdiepte aan het begin en deze aan het einde van de watersprong. Aan het einde van de watersprong is een uniform stromingspatroon aanwezig. Bij een uniform stromingspatroon kan de stroomsnelheid worden berekend als het debiet per eenheidsbreedte gedeeld door de waterdiepte. Uit eenvoud wordt ook voor de locatie aan het begin van de watersprong en de tussenliggende locaties een uniforme stroming verondersteld in de zone tussen de roller van de watersprong en de bodem. Voor deze locaties wordt de stroomsnelheid nabij de bodem bijgevolg ook berekend als het debiet per eenheidsbreedte gedeeld door de waterdiepte tussen de roller en de bodem.

Bij bovenstaande formuleringen wordt opgemerkt dat de formuleringen voor de bepaling van de waterdiepte d_1 op de plaats waar de vallende straal op de bodem botst en de evenwichtsdiepte d_2 zijn formuleringen die afgeleid zijn voor een vrije watersprong. Echter uit de resultaten van de controle van de stabiliteit van de bodembescherming, zie paragraaf 3.2, volgt dat een sterk verdronken watersprong ontstaat. Hierdoor zullen in werkelijkheid lagere stroomsnelheden aan de bodem berekend worden. Het water dat de sluisdeur overstroomt valt namelijk in een bak water met een waterdiepte van minimaal 6.66 m. Voor een sterk verdronken watersprong zijn de auteurs van dit advies echter geen formules bekend om voor de locatie waar de vallende straal de bodem raakt de hoogte van de straal boven de bodem te bepalen. Bij de bepaling van de lengte van de (verdronken) watersprong is wel rekening gehouden met de verdrinkingsgraad van de watersprong.

Daarna wordt de berekende stroomsnelheid aan de bodem vergeleken met de maximale stroomsnelheid waaraan de bodembescherming in de sluiskolk kan weerstaan. In de sluiskolk zijn betontegels aanwezig met een breedte van 4.17 m en een lengte van 4.15 m (B. en Wegen. D. der K. Ministerie van Openbare Werken, 1973). Enkel de eerste betontegels naast het opwaarts bovenhoofd hebben een lengte van 4.23 m. Voor de bepaling van de stroomsnelheid waaraan deze tegels kunnen weerstaan, kunnen deze beschouwd worden als een plaatbekleding. Algemeen kan de dikte van een plaatbekleding onder invloed van lift ten gevolge van stroming berekend worden door het eigengewicht de plaat gelijk te stellen aan de liftkracht ten gevolge van de stroomsnelheid boven de bodembescherming (PIANC rapport 180; (MarCom Working Group 180, 2015)):

$$\frac{\rho_w C_L\, u_b^2}{2} = (\rho_s - \rho_w) g d$$

Of:

$$d = \frac{C_L\, u_b^2}{2 g \Delta}$$

met:

–	u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
–	C_L	Liftcoëfficiënt	[-]
–	ρ_s	Dichtheid plaatbekleding	[kg/m³]
–	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m³)	[kg/m³]
–	Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
–	g	Valversnelling (= 9.81 m/s²)	[m/s²]
–	d	Dikte plaatbekleding	[m]

De moeilijkheid bij het gebruik van deze formulering bestaat in de bepaling van de liftcoëfficiënt. (Raes *et al.*, 1996) vermelden voor bodembescherming bestaande uit flexibele matrassen (gevuld met breuksteen) een analoge formulering, waarbij een liftcoëfficiënt van 0.5 beschouwd wordt voor doorgaande delen en een liftcoëfficiënt van 1.0 voor hoeken en overgangen. In dit advies wordt een waarde 0.5 voor de liftcoëfficiënt van doorgaande delen van de plaatbekleding beschouwd. Wat de dichtheid van de plaatbekleding betreft wordt deze in deze studie gelijkgesteld aan de dichtheid van ongewapend beton (2400 kg/m³).

Een plaatbekleding kan ook gedimensioneerd worden aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998):

$$\Delta\, d = 0.035\, \frac{\Phi}{\Psi}\, \frac{K_T\, K_H}{K_S}\, \frac{u_{cr}^2}{2g}$$

Of:

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{\Delta\, d\, 2g\, \Psi\, K_S}{0.035\, \Phi\, K_T\, K_H}}$$

met:

-	d	Dikte plaatbekleding	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid beton	[kg/m³]
-	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m³)	[kg/m³]
-	K_T	Turbulentiefactor	[-]
-	K_h	Diepte – (of snelheidsprofiel) factor (K_h = 1)	[-]
-	K_s	Hellingfactor	[-]

$K_s = 1$ voor een vlakke bodem

-	ψ	Kritische schuifspanningsparameter	[-]
-	Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming	[-]
-	u_{cr}	Dieptegemiddelde stroomsnelheid	[m/s]

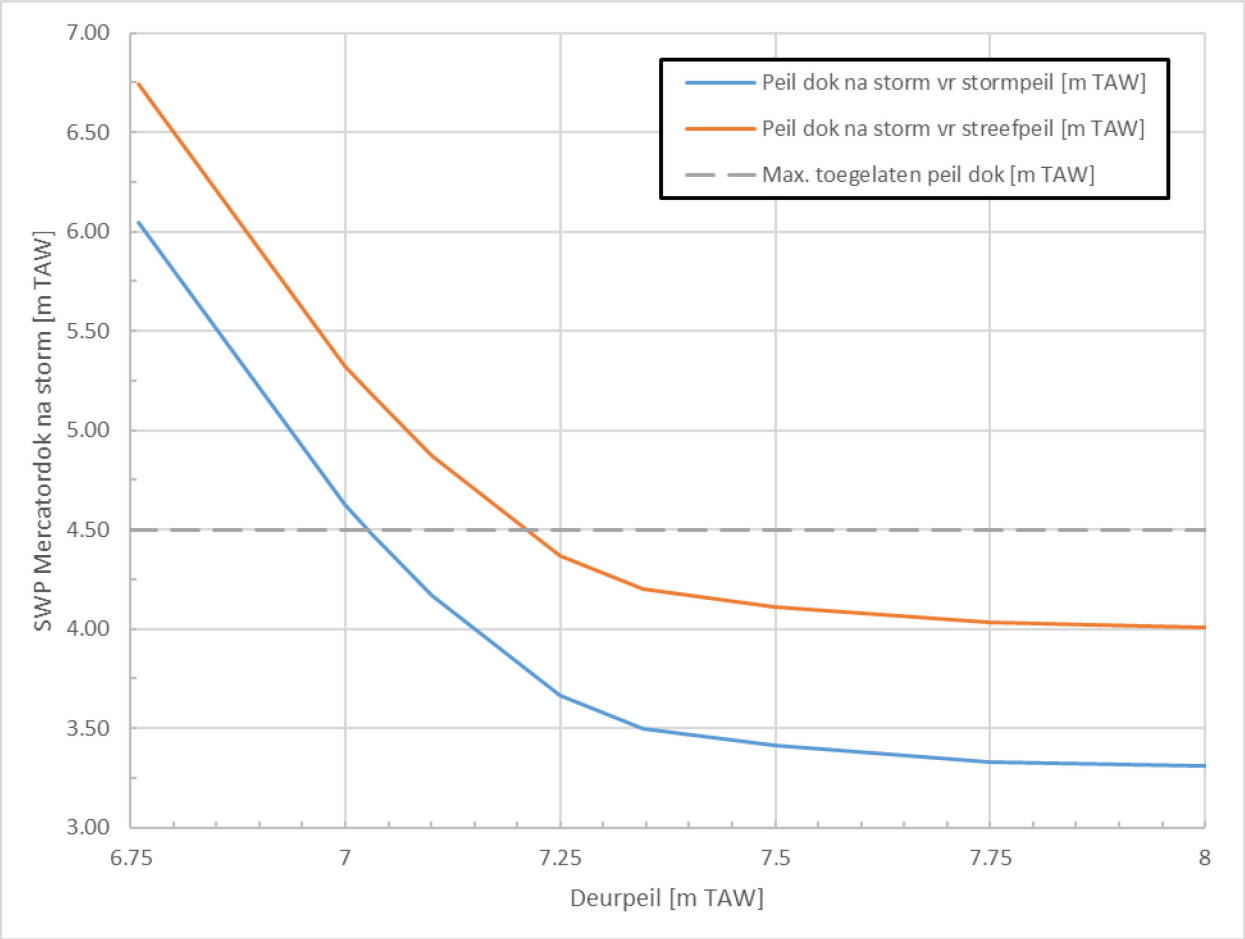
Hierbij worden voor de volgende parameters specifieke waarden toegepast:

- Normaal gezien is de formulering volgens Pilarczyk enkel toepasbaar indien een dieptegemiddelde stroomsnelheid gekend is. Indien een bodemnabije stroomsnelheid gekend is, beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) aan om een waarde 1.0 toe te passen voor de diepte – (of snelheidsprofiel) factor K_h.
- De waarde voor de kritische schuifspanningsparameter ψ wordt voor een plaatbekleding gelijk genomen aan 0.070 in plaats van 0.035 voor breuksteen.
- Wat betreft de waarde voor de stabiliteitsfactor Ø voor de stroming, vermelden (Raes *et al.*, 1996) dat voor de dimensionering van blokkenmatten of matrassen om praktische redenen in de formulering volgens Pilarczyk de parameter ϕ = 0.50 dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en ϕ = 1.00 voor hoeken en overgangen. PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat ϕ = 0.50 à 0.75 dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en ϕ = 0.75 à 1.00 voor hoeken en overgangen. In dit rapport worden conservatief de waarde ϕ = 0.75 beschouwd voor doorgaande delen van een plaatbekleding.
- Voor de dichtheid van de plaatbekleding wordt de dichtheid van ongewapend beton toegepast (2400 kg/m³).
- De turbulentiefactor K_t wordt gelijk aan 2.0 beschouwd. Deze waarde komt volgens PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) overeen met de waarde voor hoge turbulentie (zoals in watersprongen).

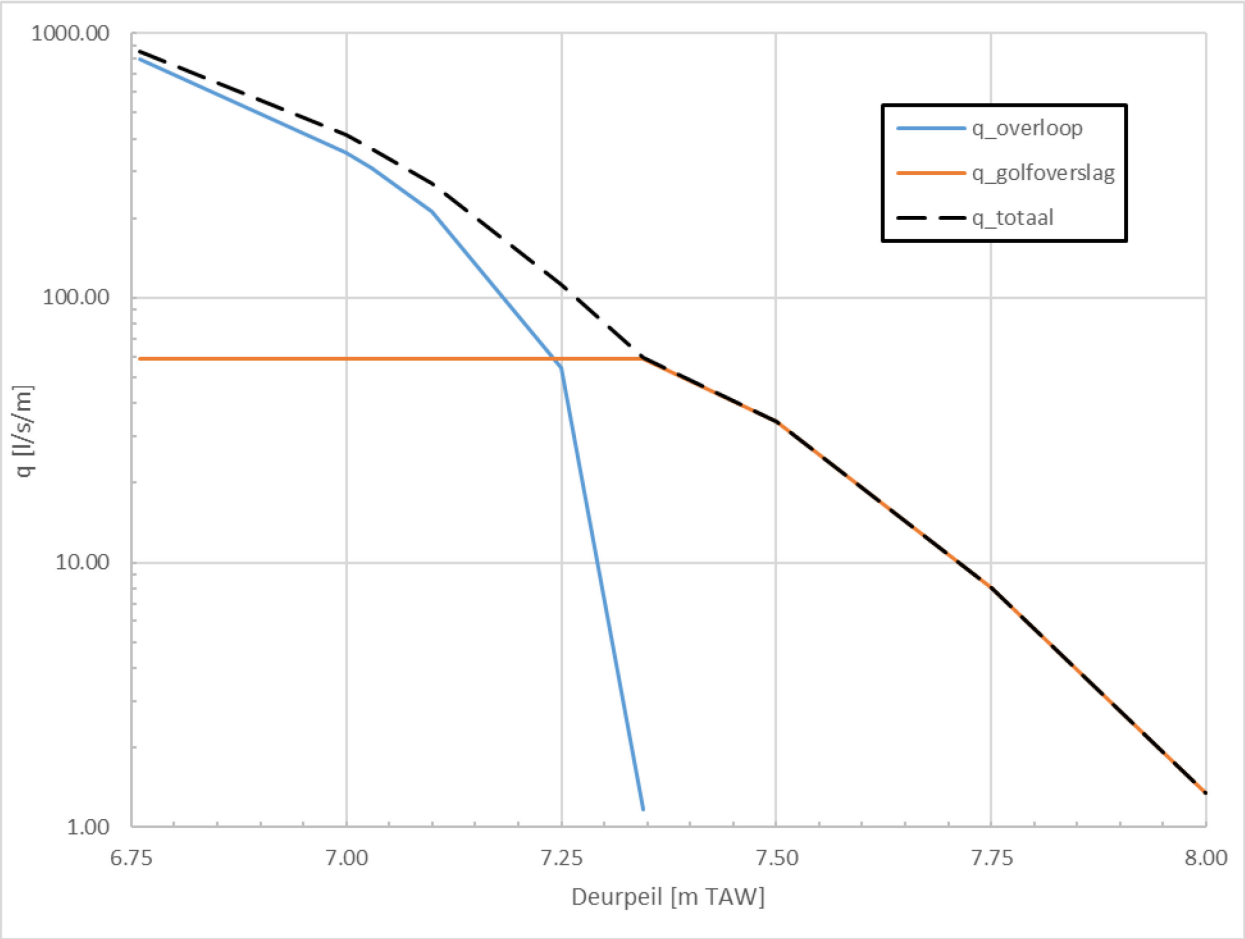
3 Resultaten

3.1 Toetsing sluisdeurhoogte

Uit het resultaat in Figuur 6 (zie ook Tabel 10 in Bijlage 1) blijkt dat het huidige deurpeil van +6.76 m TAW onvoldoende hoog is: het SWP in het Mercatordok stijgt (virtueel) tot 2.25 m boven het maximaal toegelaten peil van +4.50 m TAW (kombergingscriterium). Een minimaal deurpeil van +7.10 m TAW is noodzakelijk om aan het kombergingscriterium te voldoen voor het verlaagde peil in het Mercatordok bij storm (+3.3 m TAW). Een minimaal deurpeil van +7.25 m TAW is noodzakelijk om aan het kombergingscriterium te voldoen voor het normale streefpeil in het Mercatordok (+4.00 m TAW). Voor een deurpeil van +7.35 m TAW (= SWP zeezijde) treedt geen overloop meer op en dus enkel golfoverslag (Figuur 7). Voor dit deurpeil mag de duurtijd van het storm SWP toenemen van 2 uur naar 12 uur (voor het verlaagde peil van +3.30 mTAW in het Mercatordok) of naar 5 uur (voor het normaal streefpeil van +4.00 mTAW in het Mercatordok), zodat er voor dit deurpeil voldoende veiligheid aanwezig is wat betreft de duurtijd van het storm SWP.



Figuur 6 – SWP in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde.



Figuur 7 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde.

3.2 Stabiliteit bodembescherming

De controle van de stabiliteit van de bodembescherming wordt zowel uitgevoerd voor de sluisdeur aan zeezijde als voor de sluisdeur aan dokzijde. Voor de sluisdeur aan zeezijde volgt uit paragraaf 3.1 een minimaal mogelijk peil van de sluisdeur gelijk aan +7.10 m TAW en een maximaal mogelijk peil gelijk aan +7.75 mTAW. Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt één peil beschouwd, namelijk het peil +6.76 mTAW of het peil van de huidige sluisdeur.

Bij de laagste waarde van het peil van de sluisdeur aan zeezijde bedraagt de verhouding debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 80 %/20 %, bij de hoogste waarde van het peil van de sluisdeur doet zich enkel golfoverslag voor en geen overloop (Figuur 7). Voor de controle van de stabiliteit van de bodembescherming in de sluiskolk wordt naast dit minimaal en maximaal mogelijk peil van de sluisdeur (+7.10 mTAW en +7.75 mTAW) voor de zeezijde ook twee tussenliggende waarden beschouwd, namelijk +7.25 mTAW en +7.35 mTAW. Bij een peil van de sluisdeur gelijk aan +7.25 mTAW, respectievelijk +7.35 mTAW, bedraagt de verhouding debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 50 %/50 %, respectievelijk 3 % / 97 %.

Door het feit dat de sluisdeur aan zeezijde verhoogd wordt, wordt de sluiskolk gevuld door overloop en overslag over de sluisdeur aan zeezijde. Na verloop van tijd doet zich overloop over de sluisdeur aan dokzijde voor (overloop over de zijwanden van de sluiskolk wordt niet beschouwd). De golfhoogte in de sluiskolk is gedempt door de beperkte strijklengte. Hierdoor is het debiet ten gevolge van golfoverslag over de sluisdeur aan dokzijde verwaarloosbaar ten opzichte van het debiet ten gevolge van overloop. Het SWP in de sluiskolk tijdens de overloop over de sluisdeur aan dokzijde is beperkt hoger dan het peil van de sluisdeur. Echter een exacte waarde is hiervoor niet gekend en is moeilijk te bepalen. Voor de controle van de erosiebescherming in het Mercatordok wordt hiervoor arbitrair een 0.10 m hoger waterpeil in de sluiskolk beschouwd.

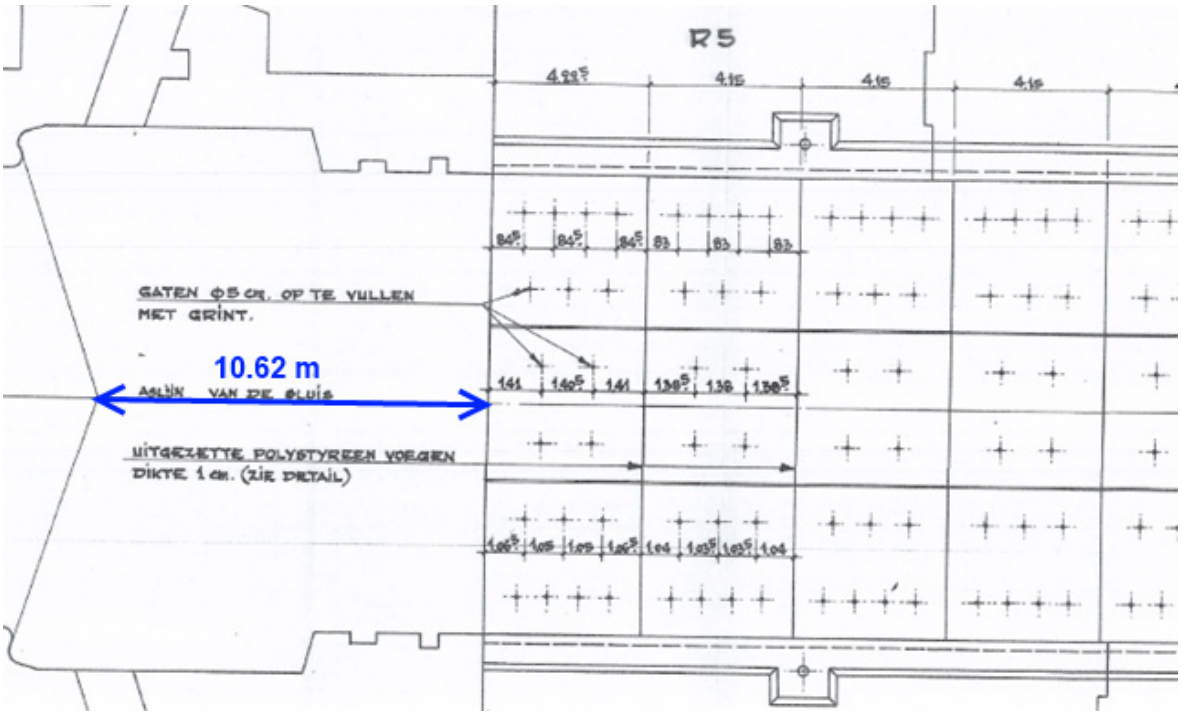
Zoals vermeld in paragraaf 2.3 valt het water dat de sluisdeur overstroomt ten gevolge van golfoverslag en/of overloop vooreerst op het beton van het benedenhoofd van de sluiskolk. In de sluiskolk ontstaat dan een watersprong samen met een jet nabij de bodem die zich in hoogte uitspreidt in de richting van het bovenhoofd van de sluiskolk. Voor de verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor het peil van de sluisdeur aan dokzijde wordt vooreerst aan de hand van de formuleringen uit paragraaf 2.3 de waterdiepte d_1 aan het begin van de watersprong, de evenwichtswaterdiepte d_2 en de lengte van de watersprong berekend. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 4. Voor de waterpeilen aan zeezijde, waarbij zich zowel overloop als golfoverslag voordoet is de berekening uitgevoerd voor het totale overloopdebiet, i.e. de som van het debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag, en anderzijds enkel voor het debiet ten gevolge van overloop. De berekening is op deze wijze uitgevoerd, aangezien de stroming ten gevolge van overloop een eerder constante stroming in de tijd is (gedurende periode van 2 uur). Golfoverslag vertoont meer variatie in de tijd, aangezien het golfoverslagdebiet berekend wordt voor een gemiddelde golfhoogte en de werkelijke golfhoogte een variatie vertoont rond deze gemiddelde golfhoogte.

Voor de sluisdeur aan zeezijde volgt uit Tabel 4 dat bij het peil +7.10 m TAW en het beschouwen van het totale debiet, i.e. de som van het debiet ten gevolge van overloop en dit ten gevolge van golfoverslag de waterdiepte d_1 aan het begin van de watersprong gelijk is aan 0.04 m. De waterdiepte in de jet neemt aan het einde van de watersprong toe tot 0.65 m à 0.69 m (waterdiepte d_2). De lengte van de verdronken watersprong bedraagt 33.5 m. Bij hogere peilen van de sluisdeur aan zeezijde nemen de waterdieptes d_1 aan het begin van de watersprong de d_2 aan het einde van de watersprong af, bv. bij een peil +7.75 mTAW tot een verwaarloosbare waterdiepte d_1 van enkele millimeter en een waterdiepte d_2 gelijk aan 0.10 m. De locatie waar de vallende straal neerkomt op de bodem van de sluiskolk neemt af van 2.80 m voorbij de sluisdeur bij een peil +7.10 mTAW tot 0.84 m bij een peil 7.75 mTAW. Bij een peil +7.10 mTAW van de sluisdeur aan zeezijde heeft het beschouwen van enkel overloop een zeer beperkte invloed op de berekende waterdieptes en de lengte van de watersprong, omwille van het lage aandeel golfoverslag in het totale debiet.

Bij hogere peilen van de sluisdeur aan zeezijde neemt het aandeel overloop af en het aandeel golfoverslag in het totale debiet toe, waardoor bij het beschouwen van enkel overloop de berekende waterdieptes en de lengte van de watersprong klein worden. Voor alle beschouwde peilen van de sluisdeur aan zeezijde worden hoge verdrinkingsgraden van de watersprong berekend, variërend tussen 8.7 en 149.0. Dit zijn waarden die beduidend hoger liggen dan de waarden vermeld in Wu & Rajaratnam (1995).

Voor de sluisdeur aan dokzijde worden bij een waterpeil in de kolk 0.10 m hoger dan de sluisdeur waterdieptes d_1 aan het begin van de watersprong, respectievelijk d_2 aan het einde van de watersprong berekend gelijk aan 0.01 m, respectievelijk 0.28 m. De vallende straal komt neer op 1.54 m verwijderd van de sluisdeur. De verdrinkingsgraad van de watersprong bedraagt 23, wat nog beduidend hoger is dan de waarden vermeld in Wu & Rajaratnam (1995).

Aan de hand van de berekende waterdieptes d_1 aan het begin van de watersprong en waterdiepte d_2 aan het einde van de watersprong wordt voor een aantal afstanden tot de sluisdeur de stroomsnelheid nabij de bodem berekend. Deze wordt, zoals vermeld in paragraaf 2.3, berekend door het debiet per eenheidsbreedte te delen door de waterdiepte op deze locatie. Voor de sluisdeur aan zeezijde wordt de stroomsnelheid nabij de bodem op deze wijze berekend voor de locatie waar de vallende straal neerkomt op de bodem van de sluiskolk en voor de locatie aan het einde van de watersprong. Daarnaast wordt de berekening ook uitgevoerd voor de locatie aan het einde van het benedenhoofd van de sluiskolk, waar het begin is van de vloer in de sluiskolk uit betontegels en voor de locatie aan het einde van de eerste betontegel. Deze twee laatste locaties bevinden zich op respectievelijk 10.62 m en 14.92 m verwijderd van de sluisdeur (zie ook Figuur 8). Hierbij moet opgemerkt worden dat conservatief de kortste afstand tot de sluisdeur is beschouwd, namelijk de afstand tot de punt van de puntdeuren. In werkelijkheid zal het water eerder zijdelings richting de sluiskolkmuur de sluisdeuren overstromen. Voor de sluisdeur dokzijde wordt de locatie waar de vallende straal neerkomt op de bodem beschouwd, de locatie aan het einde van de watersprong en de locatie aan het einde van het bovenhoofd van de sluiskolk (of dus aan het begin van de bodem van het Mercatordok). Aangezien geen info gekend is met betrekking tot de bodembescherming naast het bovenhoofd in het Mercatordok, worden geen tussenliggende andere afstanden beschouwd voor de sluisdeur aan dokzijde.



Figuur 8 – Afstand tot sluisdeur van einde benedenhoofd en einde eerste betontegel in de sluiskolk
(B. en Wegen. S. voor W. Ministerie van Openbare Werken, 1970)

De resultaten van de berekening van de stroomsnelheid nabij de bodem voor deze locaties worden zowel voor de sluisdeur aan zeezijde als voor de sluisdeur aan dokzijde gegeven in Tabel 5. Voor de sluisdeur aan zeezijde volgt uit deze tabel dat de vallende straal op de sluiskolkbodem neerkomt op een afstand tussen 0.50 m en 2.80 m van de sluisdeur. Deze locatie bevindt zich op de betonvloer van het benedenhoofd. Ter plaatse van deze locatie wordt voor een peil van de sluisdeur op +7.10 mTAW een stroomsnelheid berekend die varieert tussen 7.9 m/s (enkel overloop) tot 8.1 m/s (overloop en golfoverslag). Voor een peil van de sluisdeur gelijk aan +7.25 mTAW, respectievelijk +7.35 mTAW wordt een stroomsnelheid berekend die varieert tussen 6.8 m/s (enkel overloop) en 7.4 m/s (overloop en golfoverslag), respectievelijk 4.5 m/s (enkel overloop) en 6.9 m/s (overloop en golfoverslag). Voor een peil van de sluisdeur gelijk aan +7.75 mTAW wordt een stroomsnelheid nabij de bodem berekend gelijk aan 5.5 m/s. Ter plaatse van het einde van het benedenhoofd neemt de stroomsnelheid aan de bodem reeds af naar waarden die variëren tussen 0.1 m/s en 1.5 m/s. Daarna doet zich een verdere verlaging van de stroomsnelheid nabij de bodem voor tot waarden die variëren tussen 0.1 m/s en 1.1 m/s aan het einde van de eerste betontegel en waarden die kleiner zijn dan 0.4 m/s ter plaatse van het einde van de watersprong. Voor de sluisdeur aan dokzijde komt de vallende straal neer op de bodem van het bovenhoofd op ca. 1.5 m verwijderd van de sluisdeur. Op deze locatie wordt een stroomsnelheid nabij de bodem berekend van 6.6 m/s. Daarna neemt de berekende stroomsnelheid nabij de bodem af naar 0.65 m/s aan het einde van het bovenhoofd en 0.2 m/s ter plaatse van het einde van de watersprong.

Tabel 4 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde

Parameter	Symbool	Eenheid	Sluisdeur zeezijde							Sluisdeur dokzijde
			Deurhoogte +7.10 mTAW		Deurhoogte +7.25 mTAW		Deurhoogte +7.35 mTAW		Deurhoogte +7.75 mTAW	Deurhoogte +6.76 mTAW
			Overloop en overslag	Enkel overloop	Overloop en overslag	Enkel overloop	Overloop en overslag	Enkel overloop	Enkel overslag	Enkel overloop
Waterstand opwaarts	H_u	mTAW	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	7.35	6.86
Waterstand afwaarts	H_d	mTAW	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
Kruinpeil	**H_K**	**mTAW**	**7.10**	**7.10**	**7.25**	**7.25**	**7.35**	**7.35**	**7.75**	**6.76**
Waterhoogte boven kruin	h_1	mTAW	0.25	0.25	0.10	0.10	0.00	0.00	-0.40	0.00
Bodempeil	H_{bu}/H_{bd}	mTAW	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33
Waterdiepte afwaarts	d	mTAW	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66
Debiet per eenheidsbreedte	**q**	**$m^3/s/m$**	**0.270**	**0.217**	**0.113**	**0.057**	**0.060**	**0.002**	**0.008**	**0.051**
Kritische waterdiepte	d_c	m	0.20	0.17	0.11	0.07	0.07	0.01	0.02	0.06
Hoogte van de val	h	m	10.43	10.43	10.58	10.58	10.68	10.68	11.08	10.09
Verhouding d_c/h	d_c/h	-	0.019	0.016	0.010	0.007	0.007	0.001	0.002	0.006
Lengte vallende straal	**L_d**	**m**	**2.80**	**2.60**	**2.08**	**1.64**	**1.67**	**0.48**	**0.84**	**1.54**
Waterdiepte d_1 volgens Rand (1995)	**$d_{1,rand}$**	**m**	**0.035**	**0.029**	**0.017**	**0.009**	**0.010**	**< 0.001**	**0.002**	**0.009**
Waterdiepte d_1 volgens Chanson (2002)	**$d_{1,chanson}$**	**m**	**0.033**	**0.027**	**0.015**	**0.008**	**0.009**	**< 0.001**	**0.001**	**0.008**
Waterdiepte d_2 volgens Rand (1995)	**$d_{2,rand}$**	**m**	**0.690**	**0.613**	**0.432**	**0.298**	**0.307**	**0.044**	**0.104**	**0.279**
Waterdiepte d_2 volgens Chanson (2002)	**$d_{2,chanson}$**	**m**	**0.653**	**0.580**	**0.409**	**0.282**	**0.291**	**0.042**	**0.099**	**0.264**
Verdrinkingsgraad watersprong	S_j	-	8.65	9.86	14.42	21.34	20.71	148.77	62.95	22.89
Lengte watersprong	**L_w**	**m**	**33.5**	**33.4**	**33.2**	**33.0**	**33.0**	**32.7**	**32.8**	**32.97**

Tabel 5 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiskolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde

Locatie	Parameter	Eenheid	Sluisdeur zeezijde							Sluisdeur dokzijde
			Deurhoogte +7.10 mTAW		Deurhoogte +7.25 mTAW		Deurhoogte +7.35 mTAW		Deurhoogte +7.75mTAW	Deurhoogte +6.76 mTAW
			Overloop en overslag	Enkel overloop	Overloop en overslag	Enkel overloop	Overloop en overslag	Overloop en overslag	Enkel overloop	Enkel overloop
Debiet per eenheidsbreedte		**m²/s**	0.270	0.217	0.113	0.057	0.060	0.002	0.008	0.051
Locatie vallende straal	**Afstand tot sluisdeur**	**m**	**2.80**	**2.60**	**2.08**	**1.64**	**1.67**	**0.48**	**0.84**	**1.54**
	Waterdiepte	**m**	0.033	0.027	0.015	0.008	0.009	< 0.001	0.001	0.008
	Stroomsnelheid	**m/s**	**8.10**	**7.90**	**7.35**	**6.79**	**6.85**	**4.52**	**5.49**	**6.60**
Einde benedenhoofd/ bovenhoofd	**Afstand tot sluisdeur**	**m**	**10.62**	**10.62**	**10.62**	**10.62**	**10.62**	**10.62**	**10.62**	**10.62**
	Waterdiepte	**m**	0.162	0.146	0.106	0.075	0.077	0.012	0.031	0.078
	Stroomsnelheid	**m/s**	**1.66**	**1.49**	**1.07**	**0.76**	**0.78**	**0.14**	**0.26**	**0.65**
Einde eerste betontegel	**Afstand tot sluisdeur**	**m**	**14.95**	**14.95**	**14.95**	**14.95**	**14.95**	**14.95**	**14.95**	**n.v.t.**
	Waterdiepte	**m**	0.234	0.210	0.151	0.107	0.110	0.017	0.043	**n.v.t.**
	Stroomsnelheid	**m/s**	**1.16**	**1.03**	**0.75**	**0.53**	**0.54**	**0.10**	**0.18**	**n.v.t.**
Einde watersprong	**Afstand tot sluisdeur**	**m**	**36.27**	**35.97**	**35.23**	**34.63**	**34.67**	**33.17**	**33.60**	**34.51**
	Waterdiepte	**m**	0.653	0.580	0.409	0.282	0.291	0.042	0.099	0.264
	Stroomsnelheid	**m/s**	**0.41**	**0.37**	**0.28**	**0.20**	**0.21**	**0.04**	**0.08**	**0.19**

n.v.t. = niet van toepassing

Om de stabiliteit van de bodembescherming na te gaan is de berekende stroomsnelheid aan de bodem vergeleken met de maximale stroomsnelheid waaraan de bodembescherming in de sluiskolk kan weerstaan. Voorbij de sluisdeur aan zeezijde, respectievelijk dokzijde strekt de vloer van het benedenhoofd, respectievelijk het bovenhoofd zich uit over een afstand van 10.6 m. De vloer bestaat uit een betonplaat. Algemeen kan beton weerstaan aan stroomsnelheden tot 6 à 7 m/s. Voor de omloopriolen van de Nieuwe sluizen van het Panamakanaal is een maximale stroomsnelheid tot 8 m/s aangehouden. Echter hierbij werden wel specifieke betonsamenstellingen toegepast. Hieruit volgt dat voor peilen van de sluisdeur aan zeezijde hoger dan +7.35 mTAW de betonvloer kan weerstaan aan de berekende stroomsnelheden. Bij lagere peilen van de sluisdeur aan zeezijde worden stroomsnelheden tot 8.1 m/s bij een peil +7.10 mTAW aan zeezijde berekend. Deze stroomsnelheden zijn hoger dan de maximaal toelaatbare waarden. Zoals reeds vermeld in paragraaf 2.3 worden formuleringen toegepast voor een vrije watersprong, terwijl in werkelijkheid een sterk verdronken watersprong voorkomt. Het water dat de sluisdeur overstroomt valt in een bak water met minimale diepte 6.66 m. Dit kan aanleiding geven tot verlaging van de berekende stroomsnelheden nabij de bodem. Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt een stroomsnelheid nabij de bodem berekend gelijk aan 6.6 m/s, wat juist gelijk is aan de toelaatbare stroomsnelheid voor de betonvloer van het bovenhoofd.

De betontegels in de sluiskolk hebben een dikte van 0.25 m. Tabel 6, respectievelijk Tabel 7 geven de resultaten van de berekening van de maximaal toelaatbare stroomsnelheid voor deze betontegels op basis van de formuleringen in (Raes *et al.*, 1996), respectievelijk de formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998). Uit deze tabellen volgt dat de betontegels kunnen weerstaan aan maximale stroomsnelheden van 3.0 m/s à 3.7 m/s. De hoogste stroomsnelheden nabij de bodem doen zich voor ter plaatse van de overgang tussen het benedenhoofd en de sluiskolkvloer uit betontegels. Op deze locatie werden stroomsnelheden berekend die variëren tussen 0.1 m/s en 1.5 m/s. Deze stroomsnelheden zijn lager dan de maximaal toelaatbare stroomsnelheden voor de betontegels in de sluiskolk.

Tabel 6 – Berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering in (Raes *et al.*, 1996)

Parameter	**Symbool**	**Eenheid**	**Waarde**
Dikte betontegel	**d**	**m**	**0.25**
Lift coëfficiënt	**C_l**	**-**	0.50
Dichtheid beton	**r_b**	**kg/m³**	2400
Dichtheid water	**r_w**	**kg/m³**	1000
Relatieve dichtheid beton	**Dr**	**-**	1.4
Valversnelling	**g**	**m/s²**	9.81
Stroomsnelheid	**U**	**m/s**	3.71

Tabel 7 – Berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998)

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde
Dikte betontegel	**d**	**m**	0.25
Dichtheid beton	**r_b**	**kg/m³**	2400
Dichtheid water	**r_w**	**kg/m³**	1000
Relatieve dichtheid beton	**Dr**	**-**	1.4
Kritische schuifspanningsparameter	**Ψ**	**-**	0.070
Stabiliteitsfactor voor stroming	Φ	**-**	0.75
Turbulentiefactor	**K_t**	**-**	2.0
Diepte- of snelheidsprofielfactor	**K_h**	**-**	1.0
Hellingsfactor	**K_s**	**-**	1.0
Valversnelling	**g**	**m/s²**	9.81
Stroomsnelheid	**U**	**m/s**	3.03

Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt aan het einde van het bovenhoofd een stroomsnelheid nabij de bodem berekend van 0.65 m/s. Het is echter niet gekend of in het Mercatordok naast de sluiskolk een bodembescherming aanwezig is. Vermoedelijk is deze wel aanwezig. Bij afwezigheid van een bodembescherming in het Mercatordok zou de bodem bestaan uit zand of eventueel klei. Rijkswaterstaat (1999) vermeldt voor zand een maximaal toelaatbare stroomsnelheid van 0.30 m/s en voor klei een maximaal toelaatbare stroomsnelheid die varieert tussen 0.40 m/s voor zandige klei en 1.2 m/s voor vaste klei. De waarden voor zand en zandige klei zijn juist lager dan de berekende waarde van de stroomsnelheid nabij de bodem van 0.65 m/s, de waarde voor vaste klei is hoger dan de berekende stroomsnelheid. Voor deze stroomsnelheid kan een dimensionering van breuksteen uitgevoerd worden aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk, zie paragraaf 2.3. Echter dient nu een waarde 0.035 voor de kritische schuifspannings-parameter Ψ, een relatieve dichtheid voor breuksteen gelijk aan 1.65, een waarde gelijk aan 1.0 voor de Stabiliteitsfactor voor stroming Φ toegepast te worden. Het resultaat van deze dimensionering is gegeven in Tabel 8. Uit deze tabel volgt een mediaan nominale breuksteendiameter D_{n50} gelijk aan 0.03 m. De mediaan nominale breuksteendiameter D_{n50} kan omgerekend worden naar een gemiddeld breuksteengewicht M_{50} ($M_{50} = \rho_s\,(D_{n50})^3$ met ρ_s=2650 kg/m³). Dit geeft een gemiddeld breuksteengewicht lager dan 0.1 kg. Op basis van het berekende gemiddeld breuksteengewicht wordt een breuksteensortering geselecteerd op basis van de verschillende klassen voor breuksteen uit de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 (BIN, 2002). Tabel 9 geeft een overzicht van de in deze norm beschouwde klassen voor breuksteen. Hieruit volgt dat de benodigde breuksteensortering beduidend kleiner is dan kleinste sortering 5-40 kg. Rekening houdend met het feit dat bij de berekeningen een aantal conservatieve aannames gedaan zijn (formuleringen zijn toegepast voor een vrije watersprong, terwijl in werkelijkheid een sterk verdronken watersprong voorkomt: het water dat de sluisdeur overstroomt valt in een bak water met minimale diepte 6.66 m), kan bijgevolg gesteld worden dat geen bodembescherming nodig is om te weerstaan aan de belasting op de bodem ten gevolge van overloop over de sluisdeur aan dokzijde.

Tabel 8 – Dimensionering breuksteen aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998)

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde
Stroomsnelheid	**U**	**m/s**	0.65
Dichtheid beton	**r_b**	**kg/m³**	2650
Dichtheid water	**r_w**	**kg/m³**	1000
Relatieve dichtheid beton	**Dr**	**-**	1.65
Kritische schuifspanningsparameter	**Ψ**	**-**	0.035
Stabiliteitsfactor voor stroming	**Φ**	**-**	1.0
Turbulentiefactor	**K_t**	**-**	2.0
Diepte- of snelheidsprofielfactor	**K_h**	**-**	1.0
Hellingsfactor	**K_s**	**-**	1.0
Valversnelling	**g**	**m/s²**	9.81
Mediaan nominale breuksteendiameter	**D_{n50}**	**m**	0.03

Tabel 9 – Beschouwde breuksteensorteringen

Sortering	M_{50} [kg]	D_{n50} [m]	Laagdikte [m]
5 – 40 kg	14 – 28	0.17 – 0.21	0.42
10 – 60 kg	27 – 47	0.21 – 0.26	0.52
15 -120 kg	45 - 78	0.26 – 0.31	0.62
40 – 200 kg	101 – 152	0.32 – 0.37	0.74
60 – 300 kg	149 – 236	0.38 – 0.43	0.86
15 – 300 kg	70 – 211	0.30 – 0.43	0.86
300 – 1000 kg	628 – 686	0.61 - 0.64	1.28
1000 – 3000 kg	1868 – 2308	0.89 – 0.96	1.92
3000 – 6000 kg	4427 – 5059	1.18 – 1.24	2.48
6000 – 10000 kg	7680 – 8704	1.42 – 1.49	2.98
10000 – 15000 kg	12024 - 13026	1.65 – 1.70	3.40

Bron: NBN EN 13383 (Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN), 2002);
M_{50}: Mediaan breuksteengewicht; D_{n50}: Mediaan breuksteendiameter

4 Conclusie

De toetsing van de hoogte van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde werd uitgevoerd door berekenen van zowel de overloop (bij een waterstand hoger dan de kruin van de sluisdeur) als golfoverslag bij bepalende golfcondities voor een 1000-jarige storm inclusief zeespiegelstijging tot 2055. De maximale komberging tot waterpeil +4.50 m TAW in het Mercatordok diende daarbij als limiterend criterium. Uit het resultaat blijkt dat het huidige deurpeil van +6.76 m TAW onvoldoende hoog is. Een minimaal deurpeil van +7.10 m TAW is noodzakelijk om aan het criterium te voldoen voor het startpeil in het Mercatordok bij storm (+3.3 m TAW). Een minimaal deurpeil van +7.25 m TAW is noodzakelijk om aan het criterium te voldoen voor het normale streefpeil in het Mercatordok (+4.00 m TAW). Voor een deurpeil van +7.35 m TAW treedt geen overloop op en enkel golfoverslag. Gezien het geringe verschil tussen +7.25 en +7.35 m TAW **wordt een deurpeil van +7.35 m TAW aangeraden**, omdat het voordeliger is (i.f.v. de erosiebescherming) om het overstromingsdebiet te beperken tot de golfoverslag en geen overloop te hebben. Met dit deurpeil is er ook voldoende veiligheid in de duurtijd van het storm SWP (die mag toenemen van 2 uur naar 5 of 12 uur, i.f.v. het SWP in het Mercatordok).

Opmerking: Bij de studie van de komberging in het Mercatordok van de golfoverslag over het benedenhoofd van de Mercatorsluis is verondersteld dat het overslaande water de sluiskolk vult en dan via het bovenhoofd overslaat naar het dok. De hoogte van de zijwanden van de sluiskolk werd hierbij niet beschouwd. Als de hoogte van de zijwanden niet (veel) hoger is dan het bovenhoofd, dan moeten extra maatregelen genomen worden om te vermijden dat het water ook over de zijwanden stroomt (bv. naar lagergelegen gebieden in Stad Oostende). Maatregelen zouden kunnen zijn: verhogen van de sluiskolk zijwanden, openen van de sluisdeur(schotten) van het bovenhoofd zodat overslaand water rechtstreeks geborgen kan worden in het Mercatordok zonder gevaar voor overstroming via de zijwanden.

Daarna is de controle van de stabiliteit van de bodembescherming uitgevoerd zowel voor de sluisdeur aan zeezijde als voor de sluisdeur aan dokzijde. Voor de sluisdeur aan zeezijde zijn het minimaal peil van +7.10 mTAW, het maximaal peil gelijk aan +7.75 mTAW en twee tussenliggende peilen gelijk aan +7.25 mTAW en +7.35 mTAW beschouwd. Voor de sluisdeur aan dokzijde is één peil beschouwd, namelijk het peil +6.76 mTAW of het peil van de huidige sluisdeur. Ten gevolge van overloop en golfoverslag stroomt water over de sluisdeur. Dit water komt neer op de bodem van de sluiskolk. De vloer van het benedenhoofd en van het bovenhoofd van de sluiskolk bestaat uit beton. **Voor peilen van de sluisdeur aan zeezijde hoger dan +7.35 mTAW kan de betonvloer weerstaan aan de berekende stroomsnelheden.** Bij lagere peilen van de sluisdeur aan zeezijde worden stroomsnelheden berekend die hoger zijn dan de maximaal toelaatbare waarden. Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt een stroomsnelheid nabij de bodem berekend gelijk aan 6.6 m/s, wat juist gelijk is aan de toelaatbare stroomsnelheid voor de betonvloer van het bovenhoofd. Echter bij de berekeningen worden formuleringen toegepast voor een vrije watersprong, terwijl in werkelijkheid een sterk verdronken watersprong voorkomt. Het water dat de sluisdeur overstroomt valt in een bak water met minimale diepte 6.66 m. Dit kan aanleiding geven tot verlaging van de berekende stroomsnelheden nabij de bodem. **De betontegels in de sluiskolk kunnen weerstaan aan de stroomsnelheden nabij de bodem die berekend worden bij overstromen van de sluisdeur aan zeezijde.** Geen informatie is gekend met betrekking tot de bodembescherming naast het bovenhoofd van de sluis in het Mercatordok. Aan het einde van het bovenhoofd worden stroomsnelheden nabij de bodem berekend gelijk aan 0.65 m/s. Rekening houdend met het feit dat bij de berekeningen een aantal conservatieve aannames gedaan zijn (formuleringen zijn toegepast voor een vrije watersprong, terwijl in werkelijkheid een sterk verdronken watersprong voorkomt: het water dat de sluisdeur overstroomt valt in een bak water met minimale diepte 6.66 m), wordt geconcludeerd dat **bij afwezigheid van een bodembescherming, de huidige bodem kan weerstaan aan de belasting op de bodem ten gevolge van overloop over de sluisdeur aan dokzijde**.

5 Referenties

Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN). (2002). NBN EN 13383-1. Waterbouwsteen – Deel 1: Specificatie.: Brussel, Belgium

Besix. (2022). As-built plan: Mercatorsluis Oostende - Voeddeuren: Sluisdeur-Overzicht (5652-1-1). Besix

Bos, M.G. (1989). Discharge measurement structures. ILRI. ISBN 978-90-70754-15-0. Available at: https://research.wur.nl/en/publications/discharge-measurement-structures-3 [date of retrieval: 07/03/2025]

Chanson, H. (2002). The hydraulics of stepped chutes and spillways. Swets & Zeitlinger: Lisse. ISBN 90-5809-352-2

De Roo, S.; Trouw, K.; Suzuki, T.; Thoon, D.; Mostaert, F. (2021). Toetsing kustveiligheid 2021: toetsingsmethodologie voor dijken en duinen. *WL Rapporten*. Available at: https://expertplatform.waterbouwkundiglaboratorium.be/nl/imis?module=ref&refid=340930, https://expertplatform.waterbouwkundiglaboratorium.be/nl/imis [date of retrieval: 10/03/2025]

EurOtop. (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.Second Edition (Final version). (J. W. Van der Meer, Ed.). Available at: www.overtopping-manual.com

MarCom Working Group 180. (2015). Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. *PIANC Report*. PIANC: Brussels. ISBN 978-2-87223-223-9

Ministerie van Openbare Werken, B. en Wegen.D. der K. (1973, December 5). Haven te Oostende. Nieuwe sluis tussen Montgomery dok en Mercator-jachtdokken. Vloer moten 5 &6. Plan A3/380/HO/AA-28

Ministerie van Openbare Werken, B. en Wegen.S. voor W. (1970, March 15). Haven te Oostende. Nieuwe sluis tussen Montgomery dok en Mercator-jachtdokken. Sluishoofd (Stroomafwaarts) Plan OW423

Pilarczyk, K.W. (1990). Proceedings of the short course on coastal protection, Delft University of Technology / 30 June-1 July 1990. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-127-3

Pilarczyk, K.W. (1998). Dikes and revetments: design, maintenance and safety assessment. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-5410-455-4

Raes, L.; Elskens, F.; Romisch, K.; Sas, M. (1996). The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments, ***in***: (1996). *11th International Harbour Congress, Antwerpen, June 17-21, 1996*. pp. 433–442

Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers 81*: 1–13

Rijkswaterstaat. (1999). Natuurvriendelijke oevers : belasting en sterkte. *CUR publicatie*. CUR. ISBN 90-376-0470-6. Available at: https://open.rijkswaterstaat.nl/@214200/natuurvriendelijke-oevers-belasting/ [date of retrieval: 29/10/2025]

Vanneste, D.; Nguyen, D.A.; De Roo, S. (2023). Toetsing kunstwerken in kusthavens: Deelrapport 3 – Golfbelasting Mercatorsluis.. *20_025_3*. *WL Rapporten*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verwaest, T. (2011, December 20). Klimaatscenario's Vlaamse Baaien. WL-memo

Vuik, V.; Kuijper, B.; Geerse, C.P.M.; Strijker, B.; Gautier, C.; Trouw, K.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Nossent, J.; Thoon, D.; De Roo, S.; Mostaert, F. (2020). Het hydraulisch randvoorwaardenboek (2020). Rapport. *WL Rapporten*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: https://www.vlaanderen.be/publicaties/het-hydraulisch-randvoorwaardenboek-2020-achtergrondrapport [date of retrieval: 07/10/2021]

Willems, M.; Suzuki, T. (2020). Oostende Montgomerydok: golfovertopping. *WL Memo's, 18_066_7*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Wu, S.; Rajaratnam, N. (1995). Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research*. doi:10.1080/00221689509498670

Bijlage 1 Resultaten toets op hoogte Mercatorsluisdeur (in tabel)

Tabel 10 – Resultaten toets op hoogte Mercatorsluisdeur

gem. kruinpeil vloeddeuren [m TAW]	6.76	7	7.03	7.1	7.25	7.346	7.5	7.75	8
Oppervlakte [m²]	33775	33775	33775	33775	33775	33775	33775	33775	33775
Stormpeil dok [m TAW]	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
Max. toegelaten peil dok [m TAW]	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Streefpeil dok [m TAW]	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
q_zone5 [l/s/m] (Willems et al. (2020)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Lengte kaaimuren zone5 [m]	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
q_Mercatorsluis [l/s/m]	816.19	412.96	367.41	270.56	112.84	59.77	33.99	7.97	1.35
Lengte Mercatordeuren [m]	15.04	15.04	15.04	15.04	15.04	15.04	15.04	15.04	15.04
Duurtijd constante SWP [h]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Stijging waterpeil Mercatordok									
t.g.v. overslag zone5 [m]	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
t.g.v. overslag Mercatorsluis [m]	2.6168	1.3240	1.1780	0.8675	0.3618	0.1916	0.1090	0.0256	0.0043
totaal [m]	2.6211	1.3283	1.1822	0.8717	0.3661	0.1959	0.1132	0.0298	0.0086
Peil dok na storm vr stormpeil [m TAW]	5.92	4.63	4.48	4.17	3.67	3.50	3.41	3.33	3.31
Peil dok na storm vr streefpeil [m TAW]	6.62	5.33	5.18	4.87	4.37	4.20	4.11	4.03	4.01

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen
T +32 (0)3 224 60 35
F +32 (0)3 224 60 36
waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.waterbouwkundiglaboratorium.be