



**Vlaanderen**  
is wetenschap



26\_035\_1  
WL rapporten

## Toetsing op hoogte Mercatorsluis voor langere levensduur

Overloop, golfoverslag, komberging en  
stabiliteit bodembescherming

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Toetsing op hoogte Mercatorsluis voor langere levensduur

Overloop, golfoverslag, komberging en  
stabiliteit bodembescherming

Willems, M.; Verelst, K.; Gruwez, V.

#### 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 2026  
D/2026/3241/240

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Willems, M.; Verelst, K.; Gruwez, V. (2026). Toetsing op hoogte Mercatorsluis voor langere levensduur: Overloop, golfoverslag, komberging en stabiliteit bodembescherming. Versie 4.0. WL Rapporten, 26\_035\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

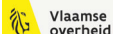
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

#### Documentidentificatie

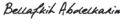
|                    |                                                                                                                                                                                                                  |                |                 |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|
| Opdrachtgever:     | Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, afdeling Kust                                                                                                                                                      | Ref.:          | WL2026R26_035_1 |
| Trefwoorden (3-5): | Overloop, Golfoverslag, Komberging, Erosiebescherming, Sluis                                                                                                                                                     |                |                 |
| Kennisdomeinen:    | Kustbescherming > Kustveiligheid bij extreme stormen > Constructies in havens > Literatuur- en desktoponderzoek<br>Waterbouwkundige constructies > Sluizen > Erosiebescherming > Literatuur- en desktoponderzoek |                |                 |
| Tekst (p.):        | 39                                                                                                                                                                                                               | Bijlagen (p.): | 2               |
| Vertrouwelijk:     | <input checked="" type="checkbox"/> Nee <input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar                                                                                                                   |                |                 |

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| Auteur(s): | Willems, M.; Verelst, K.; Gruwez, V. |
|------------|--------------------------------------|

#### Controle

|                | Naam        | Handtekening                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Revisor(en):   | Gruwez, V.  | Signed by: Gruwez Vincent<br>Signed at: 2026-10-21 13:40:39 +02:00<br>Reason: I approve this document<br>       |
| Projectleider: | Willems, M. | Signed by: Willems Marc Leon<br>Signed at: 2026-10-21 12:34:58 +02:00<br>Reason: Ik keur dit document goed<br>  |

#### Goedkeuring

|                 |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Afdelingshoofd: | Bellafkih, K. | Signed by: Bellafkih Abdelkarim<br>Signed at: 2026-10-21 21:34:29 +02:00<br>Reason: Ik keur dit document goed<br>  |
|-----------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



## Abstract

In dit rapport 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) voor de komende 100 jaar, rekening houdend met enerzijds de mogelijkheid van komberging in het Mercatordok en anderzijds de limieten van de bestaande bodembescherming van de sluis. In Gruwez et al. (2025) werd reeds een evaluatie gemaakt voor een levensduur van 30 jaar maar de evaluatie wordt uitgebreid voor een langere levensduur van de sluis. Het huidige rapport is een update van het rapport van Gruwez et al. (2025) met beschouwing van extra en langere levensduren: 50 en 100 jaar.

Indien de maximale kombergingscapaciteit van het Mercatordok wordt aangewend, zijn de minimale kruinhoogtes voor de sluisdeuren van het benedenhoofd +7.05 m TAW (tot 2055), +7.20 m TAW (tot 2075) en +7.80 m TAW (tot 2125). Dit is enkel mogelijk indien het waterpeil in het Mercatordok vóór de storm verlaagd wordt naar +3.30 m TAW.

Indien er geen overloop door een hoger waterpeil in het Montgomerydok wordt toegelaten en de komberging van het Mercatordok enkel wordt aangewend voor de golfoverslag over de sluisdeuren en de aangrenzende stormmuren, worden volgende kruinhoogtes voor de sluisdeuren van het benedenhoofd aanbevolen: +7.35 m TAW (tot 2055), +7.52 m TAW (tot 2075) en +8.10 m TAW (tot 2125).

Zowel het beton van de beide sluishoofden als de betontegels in de sluiskolk kunnen weerstaan aan de stroomsnelheden nabij de bodem bij het overstromen van de sluisdeuren. Geen informatie is gekend met betrekking tot de bodembescherming naast het bovenhoofd van de sluis in het Mercatordok. Vermoedelijk is deze wel aanwezig. Aan het einde van het bovenhoofd worden stroomsnelheden nabij de bodem berekend tot 1.70 m/s bij een maximale overloophoogte van 0.30 m. Om te weerstaan aan deze stroomsnelheden is een breuksteensortering 5-40 kg nodig.

# 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 .....                                                             | 9   |
| 2.2.3 Golfoverslag .....                                                         | 9   |
| 2.2.4 Methode .....                                                              | 10  |
| 2.3 Stabiliteit bodembescherming .....                                           | 10  |
| 3 Resultaten.....                                                                | 17  |
| 3.1 Sluisdeur met levensduur 30 jaar (2055) .....                                | 17  |
| 3.1.1 Toetsing sluisdeurhoogte .....                                             | 17  |
| 3.1.2 Stabiliteit bodembescherming.....                                          | 19  |
| 3.2 Sluisdeur met levensduur 50 jaar (2075) .....                                | 26  |
| 3.2.1 Toetsing sluisdeurhoogte .....                                             | 26  |
| 3.2.2 Stabiliteit bodembescherming.....                                          | 28  |
| 3.3 Sluisdeur met levensduur 100 jaar (2125) .....                               | 31  |
| 3.3.1 Toetsing sluisdeurhoogte .....                                             | 31  |
| 3.3.2 Stabiliteit bodembescherming.....                                          | 33  |
| 4 Conclusie.....                                                                 | 36  |
| 5 Referenties .....                                                              | 38  |
| Bijlage 1 Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis (in tabel) ..... | B1  |

## Lijst van de tabellen

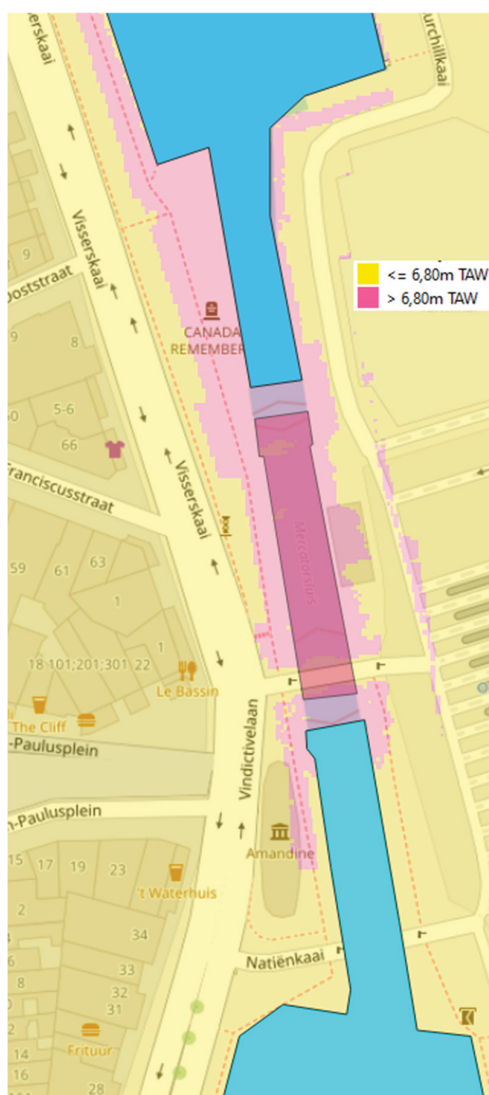
|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 – Stilwaterpeilen en oppervlakte van het Mercatordok.....                                                                                                                          | 3  |
| Tabel 2 – 1000-jarige waterstanden inclusief zeespiegelstijging voor de komende 100 jaar.....                                                                                              | 3  |
| Tabel 3 – Interpolatie van de buitengaats hydraulische randvoorwaarden (terugkeerperiode 1000 jaar). ..                                                                                    | 4  |
| Tabel 4 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +7.24 m TAW (2055), afgeleid uit (Vanneste <i>et al.</i> , 2023). ..... | 5  |
| Tabel 5 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +7.43 m TAW (2075), afgeleid uit (Vanneste <i>et al.</i> , 2023). ..... | 7  |
| Tabel 6 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +8.03 m TAW (2125), afgeleid uit (Vanneste <i>et al.</i> , 2023). ..... | 8  |
| Tabel 7 – Berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering in Raes <i>et al.</i> , (1996).....                                                           | 15 |
| Tabel 8 – Berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998).....                                                | 15 |
| Tabel 9 – Gevoeligheidsanalyse berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering in Raes <i>et al.</i> , (1996) .....                                     | 16 |
| Tabel 10 – Gevoeligheidsanalyse berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) .....                         | 16 |
| Tabel 11 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde (2055) .....             | 22 |
| Tabel 12 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiskolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde (2055) .....      | 23 |
| Tabel 13 – Dimensionering breuksteen aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) .....                                                                           | 25 |
| Tabel 14 – Beschouwde breuksteensorteringen .....                                                                                                                                          | 25 |
| Tabel 15 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2075) .....                                               | 29 |
| Tabel 16 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiskolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2075) .....                                        | 30 |
| Tabel 17 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2125) .....                                               | 33 |
| Tabel 18 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiskolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2125) .....                                        | 35 |
| Tabel 19 – Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis voor 2055. ....                                                                                                           | B1 |
| Tabel 20 – Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis voor 2075. ....                                                                                                           | B2 |
| Tabel 21 – Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis voor 2125. ....                                                                                                           | B2 |

## 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 <i>et al.</i> , 2021). ....                                                                                                                             | 4  |
| Figuur 4 – Situatie sluiskolk bij extreme omstandigheden.....                                                                                                                                        | 11 |
| Figuur 5 – Schematische voorstelling van de watersprong gedurende overloop over een stuw/sluisdeur ...                                                                                               | 11 |
| Figuur 6 – Waterpeil in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2055). ....                                                                           | 18 |
| Figuur 7 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2055). ....                                                                                    | 18 |
| Figuur 8 – Afstand tot sluisdeur van einde benedenhoofd en einde eerste betontegel in de sluiskolk (Ministerie van Openbare Werken, Bruggen en Wegen, Studiedienst voor Waterbouwwerken. 1970) ..... | 20 |
| Figuur 9 – Waterpeil in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2075). ....                                                                           | 27 |
| Figuur 10 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2075). ....                                                                                   | 27 |
| Figuur 11 – Waterpeil in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2125). ....                                                                          | 32 |
| Figuur 12 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2125). ....                                                                                   | 32 |

# 1 Inleiding

Het kruinpeil van de Mercatorsluis is ca. +6.80 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. +7.00 m TAW (Vuik *et al.*, 2020).



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

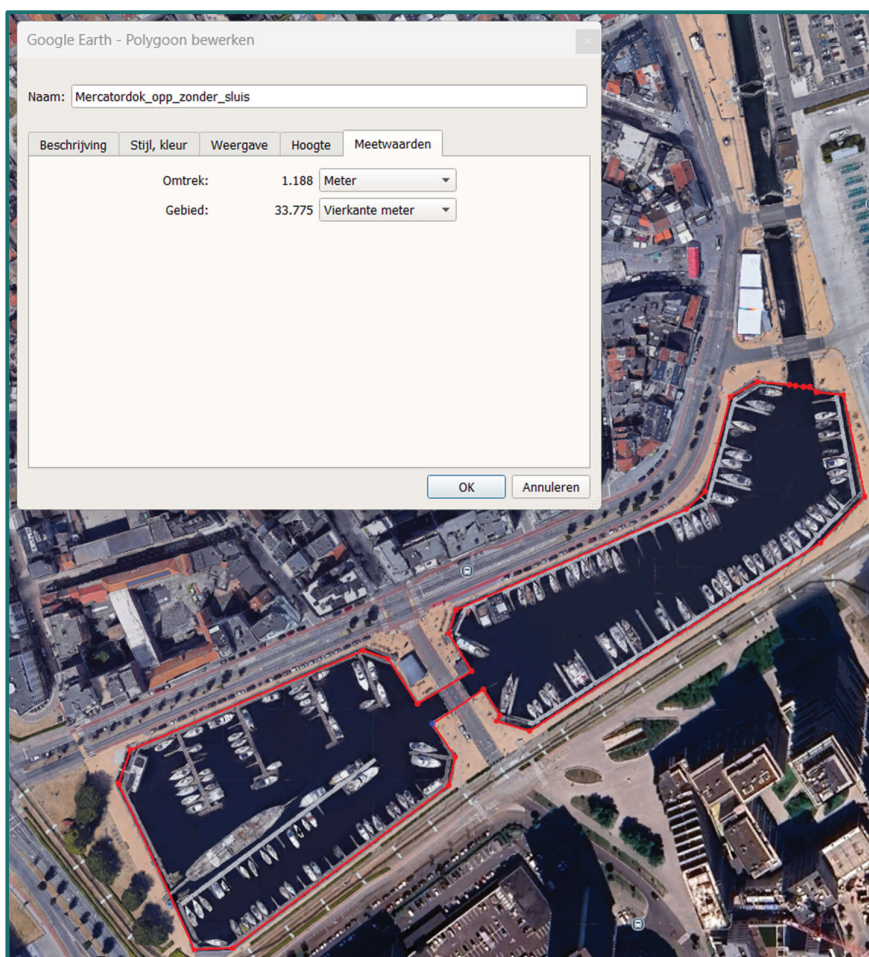
In dit advies wordt een evaluatie gemaakt van de benodigde kruinhoogte van de vloeddeuren van het benedenhoofd van de Mercatorsluis vanuit standpunt kustveiligheid (1000-jarige storm + zeespiegelstijging), rekening houdend met enerzijds de mogelijkheid van komberging in het Mercatordok en anderzijds 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 hangt 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 oppervlaktetelling van het Mercatordok m.b.v. ©Google Earth.

Tabel 1 – Stilwaterpeilen en oppervlakte van het Mercatordok.

| Type peil of oppervlakte Mercatordok       | 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 [m <sup>2</sup> ] | 33775 m <sup>2</sup> |

## 2.2 Overloop en golfoverslag

### 2.2.1 Hydraulische randvoorwaarden

#### Buitengaatse randvoorwaarden haven Oostende (2055 + 2075 + 2125)

Voor de levensduur van de nieuwe sluisdeur wordt 30 jaar, 50 jaar of 100 jaar vooropgesteld, te rekenen vanaf 2025. De berekeningen worden dus uitgevoerd voor 2055, 2075 en 2125. De toetsing dient te gebeuren voor een storm met terugkeerperiode 1000 jaar.

De referentiesituatie in de berekening is een 1000-jarig (omnidirectioneel) stilwaterpeil (SWP) van +7.00 m TAW in de haven van Oostende in 2020 (Vuik *et al.*, 2020). De zeespiegelstijging (ZSS) wordt berekend met volgende formule t.o.v. referentiejaar 2000 (Verwaest, 2011):

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

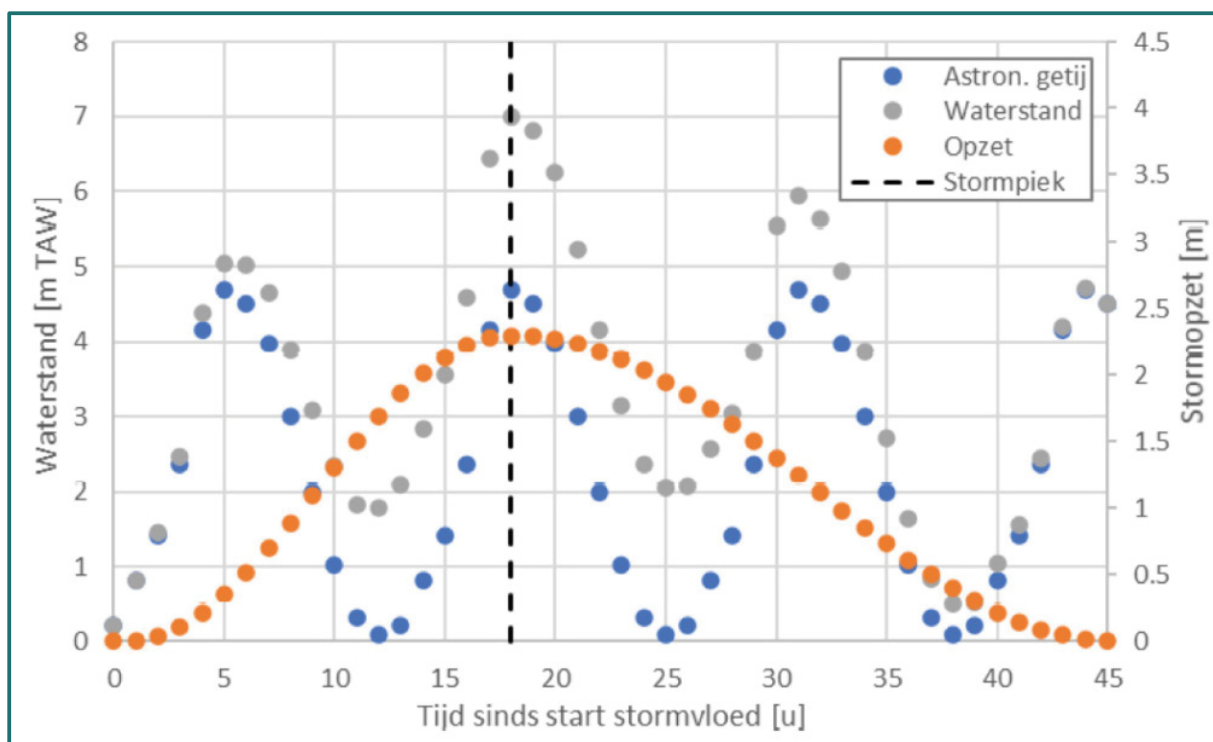
Vergelijking 1

De gebruikte waterstanden met inachtnaam van de zeespiegelstijging zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 – 1000-jarige waterstanden inclusief zeespiegelstijging voor de komende 100 jaar.

| Parameter           | 2020  | 2055  | 2075  | 2125 |
|---------------------|-------|-------|-------|------|
| ZSS t.o.v. 2020 [m] | nvt   | 0.24  | 0.43  | 1.03 |
| SWP [m TAW]         | +7.00 | +7.24 | +7.43 | 8.03 |

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 de waterstanden in Tabel 2 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 hogere waterstanden (resp. +0.30 m / +0.80 m / +1.50 m zeespiegelstijging (ZSS)), zie Tabel 3.

Tabel 3 – Interpolatie van de buitengaatse hydraulische randvoorwaarden (terugkeerperiode 1000 jaar).

| Parameter      | zonder ZSS | 2055  | +0.30 m ZSS | 2075  | +0.80 m ZSS | 2125  | +1.50 m ZSS |
|----------------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|
| SWP [m TAW]    | +7.00      | +7.24 | +7.30       | +7.43 | +7.80       | +8.03 | +8.50       |
| $H_{m0,o}$ [m] | 5.41       | 5.51  | 5.53        | 5.57  | 5.70        | 5.78  | 5.93        |
| $T_{p,o}$ [s]  | 11.18      | 11.19 | 11.19       | 11.19 | 11.19       | 11.19 | 11.20       |

### Randvoorwaarden Mercatorsluis (2055)

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, zie Tabel 4. Hieruit werden de golfindringingscoëfficiënten bepaald voor de totale laagfrequente ( $f < 0.05$  Hz;  $K_{d,lf}$ ) en de invallende wind-deining golven ( $f > 0.05$  Hz;  $K_{d,wd}$ ):

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

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

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 buitengaats golfcondities bepaald in Tabel 3 (zie resultaten in Tabel 4). 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 4 blijkt dat golfrichting N voor de meest nadelige golfindringing tot aan de Mercatorsluis zorgt. Deze golfcondities worden dan ook weerhouden voor de verdere golfoverslagberekeningen.

Tabel 4 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +7.24 m TAW (2055), afgeleid uit (Vanneste *et al.*, 2023).

| Richting | Terugkeerperiode scenario | SWP [m TAW] | $K_{d,lf}$ [-] | $K_{d,wd}$ [-] | $H_{m0,lf,tot}$ [m] | $H_{m0,wd,inv}$ [m] | $H_{m0,log,inv,T3}$ [m] | $H_{m0,wd+log,inv}$ [m] |
|----------|---------------------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| W        | T5 (2020)                 | +7.26       | 0.007          | 0.016          | 0.04                | 0.09                | 0.16                    | 0.18                    |
| WNW      | T4 (2050)                 | +7.18       | 0.035          | 0.080          | 0.19                | 0.44                | 0.21                    | 0.49                    |
| NW       | T4 (2050)                 | +7.19       | 0.035          | 0.081          | 0.20                | 0.44                | 0.2                     | 0.49                    |
| -37°N    | T4 (2050)                 | +7.26       | 0.031          | 0.056          | 0.17                | 0.31                | 0.22                    | 0.38                    |
| NNW      | T4 (2020)                 | +7.16       | 0.031          | 0.050          | 0.17                | 0.27                | 0.24                    | 0.36                    |
| <b>N</b> | T4 (2050)                 | +7.19       | 0.041          | 0.078          | <b>0.23</b>         | <b>0.43</b>         | <b>0.24</b>             | <b>0.49</b>             |
| NNO      | T5 (2020)                 | +7.19       | 0.017          | 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 4 (richting N). Voor de golven is dit een totale (hoogfrequente) golfhoogte van 0.49 m. Het effect van de laagfrequente golven wordt in rekening gebracht in het SWP, als volgt:

$$SWP\_berekening = [7.24 + (H_{m0,lf,tot} / 2)] \text{ m TAW} = 7.24 + 0.23/2 = +7.35 \text{ m TAW}$$

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.

Samenvatting randvoorwaarden Mercatorsluis 2055 (terugkeerperiode 1000 jaar):

- waterpeil = +7.24 m TAW
- golfhoogte = 0.49 m
- waterpeil incl. lange golven = 7.35 m TAW (gebruikt voor berekeningen overslag & overloop)

### Randvoorwaarden Mercatorsluis (2075)

Op dezelfde wijze worden de golfcondities aan de Mercatorsluis voor 2075 afgeleid.

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, zie Tabel 5. Hieruit werden de golfindringingscoëfficiënten bepaald voor de totale laagfrequente ( $f < 0.05 \text{ Hz}$ ;  $K_{d,lf}$ ) en de invallende wind-deining golven ( $f > 0.05 \text{ Hz}$ ;  $K_{d,wd}$ ), zie Vergelijking 2 en 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 buitengaats golfcondities bepaald in Tabel 3 (zie resultaten in Tabel 5). 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 5 blijkt dat golfrichting NW voor de meest nadelige golfindringing tot aan de Mercatorsluis zorgt. Deze golfcondities worden dan ook weerhouden voor de verdere golfoverslagberekeningen.

Tabel 5 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +7.43 m TAW (2075), afgeleid uit (Vanneste *et al.*, 2023).

| Richting | Terugkeerperiode scenario | SWP [m TAW] | $K_{d,lf}$ [-] | $K_{d,wd}$ [-] | $H_{m0,lf,tot}$ [m] | $H_{m0,wd,inv}$ [m] | $H_{m0,log,inv,T3}$ [m] | $H_{m0,wd+log,inv}$ [m] |
|----------|---------------------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| W        | T5 (2050)                 | +7.50       | 0.007          | 0.016          | 0.04                | 0.09                | 0.16                    | 0.18                    |
| WNW      | T5 (2020)                 | +7.37       | 0.018          | 0.028          | 0.10                | 0.16                | 0.21                    | 0.26                    |
| NW       | T5 (2020)                 | +7.39       | 0.033          | 0.063          | 0.18                | 0.35                | 0.20                    | 0.41                    |
| -37°N    | T5 (2020)                 | +7.50       | 0.028          | 0.040          | 0.16                | 0.22                | 0.22                    | 0.31                    |
| NNW      | T4 (2050)                 | +7.39       | 0.030          | 0.034          | 0.17                | 0.19                | 0.24                    | 0.31                    |
| N        | T5 (2020)                 | +7.50       | 0.017          | 0.017          | 0.09                | 0.09                | 0.24                    | 0.26                    |
| NNO      | T5 (2020)                 | +7.43       | 0.016          | 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 5 (richting NW). Voor de golven is dit een golfhoogte van 0.41 m. Het effect van de laagfrequente golven wordt in rekening gebracht in het SWP, als volgt:

$$SWP_{\text{berekening}} = [7.43 + (H_{m0,lf,tot} / 2)] \text{ m TAW} = 7.43 + 0.18 / 2 = +7.52 \text{ m TAW}$$

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.

Samenvatting randvoorwaarden Mercatorsluis 2075 (terugkeerperiode 1000 jaar):

- waterpeil = +7.43 m TAW
- golfhoogte = 0.41 m
- waterpeil incl. lange golven = 7.52 m TAW (gebruikt voor berekeningen overslag & overloop)

### Randvoorwaarden Mercatorsluis (2125)

Op dezelfde wijze worden eveneens de golfcondities aan de Mercatorsluis voor 2125 afgeleid.

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, zie Tabel 6. Hieruit werden de golfindringingscoëfficiënten bepaald voor de totale laagfrequente ( $f < 0.05$  Hz;  $K_{d,lf}$ ) en de invallende wind-deining golven ( $f > 0.05$  Hz;  $K_{d,wd}$ ), zie Vergelijking 2 en 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 3 (zie resultaten in Tabel 6). 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 6 blijkt dat golfrichting NW voor de meest nadelige golfindringing tot aan de Mercatorsluis zorgt. Deze golfcondities worden dan ook weerhouden voor de verdere golfoverslagberekeningen.

Tabel 6 – Totale laagfrequente en invallende wind-deining + lokaal opgewekte golfcondities horende bij een SWP van +8.03 m TAW (2125), afgeleid uit (Vanneste et al., 2023).

| Richting | Terugkeerperiode scenario | SWP [m TAW] | $K_{d,lf}$ [-] | $K_{d,wd}$ [-] | $H_{m0,lf,tot}$ [m] | $H_{m0,wd,inv}$ [m] | $H_{m0,log,inv,T3}$ [m] | $H_{m0,wd+log,inv}$ [m] |
|----------|---------------------------|-------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| W        | T5 (2050)                 | +7.50       | 0.007          | 0.016          | 0.04                | 0.09                | 0.16                    | 0.19                    |
| WNW      | T5 (2050)                 | +7.60       | 0.017          | 0.028          | 0.10                | 0.16                | 0.21                    | 0.26                    |
| NW       | T5 (2050)                 | +7.63       | 0.026          | 0.042          | 0.15                | 0.24                | 0.20                    | 0.31                    |
| -37°N    | T5 (2050)                 | +7.73       | 0.026          | 0.028          | 0.15                | 0.16                | 0.22                    | 0.27                    |
| NNW      | T5 (2050)                 | +7.93       | 0.022          | 0.018          | 0.13                | 0.10                | 0.24                    | 0.26                    |
| N        | T5 (2050)                 | +7.73       | 0.017          | 0.017          | 0.10                | 0.10                | 0.24                    | 0.26                    |
| NNO      | T5 (2050)                 | +7.43       | 0.016          | 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 6 (richting NW). Voor de golven is dit een golfhoogte van 0.30 m. Het effect van de laagfrequente golven wordt in rekening gebracht in het SWP, als volgt:

$$SWP_{berekening} = [8.03 + (H_{m0,lf,tot} / 2)] \text{ m TAW} = 8.03 + 0.15 / 2 = +8.10 \text{ m TAW}$$

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.

Samenvatting randvoorwaarden Mercatorsluis 2125 (terugkeerperiode 1000 jaar):

- waterpeil = +8.03 m TAW
- golfhoogte = 0.31 m
- waterpeil incl. lange golven = 8.10 m TAW (gebruikt voor berekeningen overslag & overloop)

### 2.2.2 Overloop

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

---


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


---

met:

- $q$  het overloopdebiet per meter breedte [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]
- $C_d$  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  $= 9.81 \text{ m/s}^2$

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 Vergelijking 4 hangt af van het type stuw. Voor breed gekruinde stuwen ( $-R_{c,o}/W \leq 1.45$ ) geldt:

---


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


---

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  $W = 0.63 \text{ m}$ . 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):

---


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


---

met:

- $q$  het gemiddelde golfoverslagdebiet per meter breedte [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]
- $H_{m0}$  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 ( $B = 2 \times 7.52 \text{ m} = 15.04 \text{ m}$ ; de breedte van een deurelhelft 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. Hierbij wordt enkel de stormmuur ten oosten van de sluis beschouwd (kant station); van water ten westen van de sluis (kant Visserijkaai) wordt verondersteld dat dit het Mercatordok niet bereikt. Volgens het huidige ontwerpplan van de stormmuur in de zone station is de stormmuur 171 m lang tussen de sluisdeur en het stationsgebouw. Hierbij wordt aangenomen dat het overslagdebiet over de stormmuur 1 l/s/m zal zijn omdat dit het maximum toelaatbare overslagdebiet is volgens het geldende veiligheids criterium.

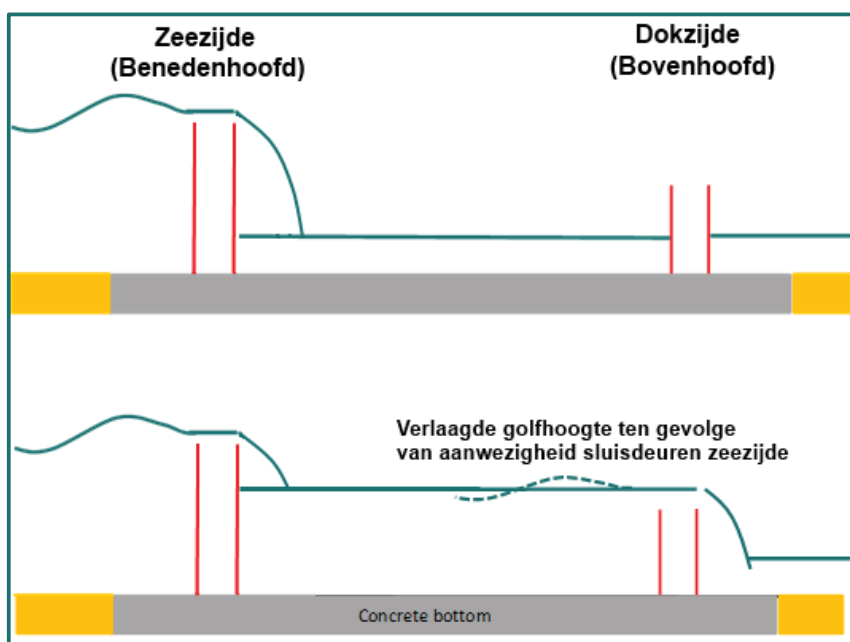
Opmerking: uit de kombergingsberekening zal volgen dat 1 l/s/m over 100 m stormmuur gedurende een storm van 2 uur het Mercatordok doet stijgen met 2 cm. Een onzekerheid over de juiste lengte van de stormmuur die een bijdrage kan leveren aan de stijging van het dokpeil, heeft dus geen significante invloed op de resultaten van de kombergingsstudie.

Het resulterende totaal overstroomde volume moet kleiner zijn dan de kombergingscapaciteit van het Mercatordok om overstrooming 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 deurpeil.

### 2.3 Stabiliteit bodembescherming

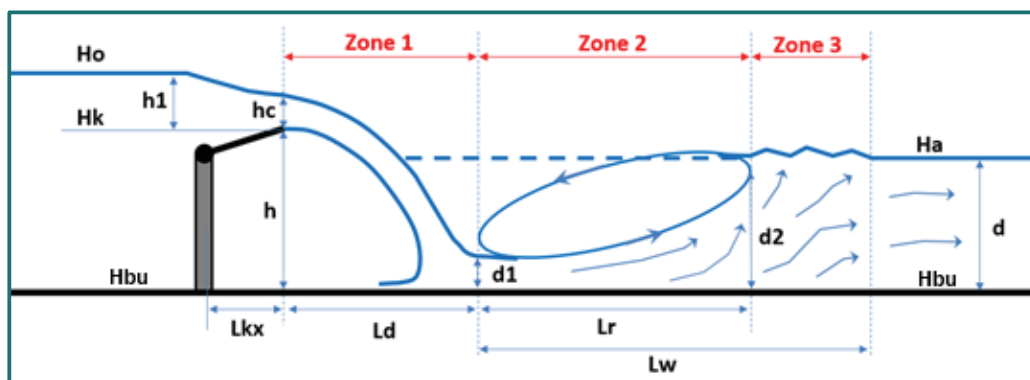
Tijdens extreme omstandigheden zullen zowel de sluisdeuren aan zeezijde als aan dokzijde gesloten zijn. Ten gevolge van overloop of golfoverslag doet zich eerst overloop over de sluisdeuren aan zeezijde voor. Na een tijdje is de sluiskolk volledig gevuld en doet zich overloop over de sluisdeuren aan dokzijde voor. Ten gevolge van de verhoging van de sluisdeur aan zeezijde 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 sluiskolk 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):

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

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

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

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

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

Met:

|             |                                                           |                     |
|-------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|
| - $L_D$     | Lengte vallende straal                                    | [m]                 |
| - $d_c$     | Kritische waterdiepte ( $d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ ) | [m]                 |
| - $q$       | Debiet per eenheidsbreedte                                | [m <sup>2</sup> /s] |
| - $g$       | Valversnelling (= 9.81 m/s <sup>2</sup> )                 | [m/s <sup>2</sup> ] |
| - $h$       | Valhoogte (= $H_k - H_{b,u}$ )                            | [m]                 |
| - $H_k$     | Kruinpeil overlaat/bovenste peil sluisdeur                | [m TAW]             |
| - $H_{b,u}$ | Bodempeil sluiskolk                                       | [m TAW]             |
| - $d_1$     | 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 3.1.2, volgt dat de evenwichtswaterdiepte beduidend lager is dan de waterdiepte in de sluiskolk. Bijgevolg ontstaat een verdrongen watersprong. Bij een verdrongen 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 3.1.2, volgt dat een sterk verdrongen 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 verdrongen 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 (verdrongen) 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 (Ministerie van Openbare Werken, Bruggen en Wegen, Dienst der Kust, 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 van 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:

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

met:

|   |          |                                                                                 |                      |
|---|----------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| – | $u_b$    | Stroomsnelheid aan de bodem                                                     | [m/s]                |
| – | $C_L$    | Liftcoëfficiënt                                                                 | [-]                  |
| – | $\rho_s$ | Dichtheid plaatbekleding                                                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| – | $\rho_w$ | Dichtheid water (= 1000 kg/m <sup>3</sup> )                                     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| – | $\Delta$ | Relatieve dichtheid van de stenen ( $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ ) | [-]                  |
| – | $g$      | Valversnelling (= 9.81 m/s <sup>2</sup> )                                       | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| – | $d$      | 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/m<sup>3</sup>).

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]                  |
| - | $\Delta$ | Relatieve dichtheid van de stenen ( $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ ) | [-]                  |
| - | $\rho_s$ | Dichtheid beton                                                                 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| - | $\rho_w$ | Dichtheid water (= 1000 kg/m <sup>3</sup> )                                     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| - | $K_T$    | Turbulentiefactor                                                               | [-]                  |
| - | $K_h$    | Diepte – (of snelheidsprofiel) factor ( $K_h = 1$ )                             | [-]                  |
| - | $K_S$    | Hellingfactor                                                                   | [-]                  |
|   |          | $K_S = 1$ voor een vlakke bodem                                                 |                      |
| - | $\Psi$   | Kritische schuifspanningsparameter                                              | [-]                  |
| - | $\Phi$   | 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 bodem nabije 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  $\Psi$  wordt voor een plaatbekleding gelijk genomen aan 0.070 in plaats van 0.035 voor breuksteen.
- Wat betreft de waarde voor de stabiliteitsfactor  $\Phi$  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  $\phi = 0.50$  dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en  $\phi = 1.00$  voor hoeken en overgangen. PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat  $\phi = 0.50$  à  $0.75$  dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en  $\phi = 0.75$  à  $1.00$  voor hoeken en overgangen. In dit rapport worden conservatief de waarde  $\phi = 0.75$  beschouwd voor doorgaande delen van een plaatbekleding.
- Voor de dichtheid van de plaatbekleding wordt de dichtheid van ongewapend beton toegepast (2400 kg/m<sup>3</sup>).
- 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).

Om de stabiliteit van de bodembescherming na te gaan wordt daarna de berekende stroomsnelheid aan de bodem vergeleken met de maximale stroomsnelheid waaraan de bodembescherming in de sluiskolk kan weerstaan.

De bodem van het bovenhoofd en het benedenhoofd van de sluis bestaan uit een betonplaat. Algemeen kan beton weerstaan aan stroomsnelheden tot 6 à 7 m/s. In de sluiskolk zijn betontegels aanwezig. Deze betontegels hebben een dikte van 0.25 m. Tabel 7, respectievelijk Tabel 8 geven de resultaten van de berekening van de maximaal toelaatbare stroomsnelheid voor deze betontegels op basis van de formulerings 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.

Tabel 7 – 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/m <sup>3</sup> | 2400   |
| Dichtheid water           | $r_w$   | kg/m <sup>3</sup> | 1000   |
| Relatieve dichtheid beton | $D_r$   | -                 | 1.4    |
| Valversnelling            | g       | m/s <sup>2</sup>  | 9.81   |
| Stroomsnelheid            | U       | m/s               | 3.71   |

Tabel 8 – 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/m <sup>3</sup> | 2400   |
| Dichtheid water                    | $r_w$   | kg/m <sup>3</sup> | 1000   |
| Relatieve dichtheid beton          | $D_r$   | -                 | 1.4    |
| Kritische schuifspanningsparameter | $\Psi$  | -                 | 0.070  |
| Stabiliteitsfactor voor stroming   | $\Phi$  | -                 | 0.75   |
| Turbulentiefactor                  | $K_t$   | -                 | 2.0    |
| Diepte- of snelheidsprofielfactor  | $K_h$   | -                 | 1.0    |
| Hellingsfactor                     | $K_s$   | -                 | 1.0    |
| Valversnelling                     | g       | m/s <sup>2</sup>  | 9.81   |
| Stroomsnelheid                     | U       | m/s               | 3.03   |

Bij toepassing van deze formulerings zijn een aantal aannames gedaan voor bepaalde parameters. Bij wijze van gevoeligheidsanalyse is de waarde van de volgende parameters gevarieerd:

1. formulering in Raes *et al.*, (1996)
  - a. De waarde van de lift coëfficiënt is gevarieerd van de beschouwde waarde gelijk aan 0.50 over 0.75 naar 1.00. Deze laatste waarde is geldig voor hoeken en overgangen.
  - b. De dichtheid van water is gevarieerd van 1000 kg/m<sup>3</sup> (zoet water) naar 1025 kg/m<sup>3</sup> (waarde voor zeewater).
  - c. De dichtheid van beton is gevarieerd van 2400 kg/m<sup>3</sup> (ongewapend beton) naar 2500 kg/m<sup>3</sup> (gewapend beton).

## 2. Formulering volgens Pilarczyk

- De dichtheid van water is gevarieerd van 1000 kg/m<sup>3</sup> (zoet water) naar 1025 kg/m<sup>3</sup> (waarde voor zeewater).
- De dichtheid van beton is gevarieerd van 2400 kg/m<sup>3</sup> (ongewapend beton) naar 2500 kg/m<sup>3</sup> (gewapend beton).
- De stabiliteitsfactor voor stroming  $\Phi$  is verlaagd van 0.75 naar 0.50, maar ook verhoogd van 0.75 naar 1.00 (waarde voor hoeken en overgangen).
- De turbulentiefactor  $K_t$  is in de berekening gelijk aan 2.0, de waarde voor hoge turbulentie. De waarde van deze factor wordt eerst verlaagd naar 1.5, de waarde voor verhoogde turbulentie in bijvoorbeeld rivierbochten en daarna verhoogd naar 2.5, de waarde voor stroming in scherpe rivierbochten (straal bocht/breedte rivier < 5).

De resultaten van deze gevoeligheidsanalyse zijn gegeven in Tabel 9 en Tabel 10. Uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat de berekende toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels varieert tussen 2.6 m/s en 3.9 m/s.

Tabel 9 – Gevoeligheidsanalyse berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering in Raes *et al.*, (1996)

| Parameter                 | Symbool              | Eenheid                 | Waarde |             |             |             |             |
|---------------------------|----------------------|-------------------------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Dikte betontegel          | <b>d</b>             | <b>m</b>                | 0.25   | 0.25        | 0.25        | 0.25        | 0.25        |
| Lift coëfficiënt          | <b>C<sub>l</sub></b> | -                       | 0.50   | <b>0.75</b> | <b>1.00</b> | 0.50        | 0.50        |
| Dichtheid beton           | <b>r<sub>b</sub></b> | <b>kg/m<sup>3</sup></b> | 2400   | 2400        | 2400        | <b>2500</b> | 2400        |
| Dichtheid water           | <b>r<sub>w</sub></b> | <b>kg/m<sup>3</sup></b> | 1000   | 1000        | 1000        | 1000        | <b>1025</b> |
| Relatieve dichtheid beton | <b>Dr</b>            | -                       | 1.4    | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         |
| Valversnelling            | <b>g</b>             | <b>m/s<sup>2</sup></b>  | 9.81   | 9.81        | 9.81        | 9.81        | 9.81        |
| Stroomsnelheid            | <b>U</b>             | <b>m/s</b>              | 3.71   | <b>3.03</b> | <b>2.62</b> | <b>3.84</b> | <b>3.67</b> |

Grijze waarden betreffen de referentie berekening; parameterwaarden in vet zijn aangepast ten opzichte van deze referentie.

Tabel 10 – Gevoeligheidsanalyse berekening toelaatbare stroomsnelheid voor betontegels aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998)

| Parameter                          | Symbool              | Eenheid                 | Waarde      |             |             |             |             |             |             |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Dikte betontegel                   | <b>d</b>             | <b>m</b>                | 0.25        | 0.25        | 0.25        | 0.25        | 0.25        | 0.25        | 0.25        |
| Dichtheid beton                    | <b>r<sub>b</sub></b> | <b>kg/m<sup>3</sup></b> | 2400        | <b>2500</b> | 2400        | 2400        | 2400        | 2400        | 2400        |
| Dichtheid water                    | <b>r<sub>w</sub></b> | <b>kg/m<sup>3</sup></b> | 1000        | 1000        | <b>1025</b> | 1000        | 1000        | 1000        | 1000        |
| Relatieve dichtheid beton          | <b>Dr</b>            | -                       | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         | 1.4         |
| Kritische schuifspanningsparameter | <b>Ψ</b>             | -                       | 0.070       | 0.070       | 0.070       | 0.070       | 0.070       | 0.070       | 0.070       |
| Stabiliteitsfactor voor stroming   | <b>Φ</b>             | -                       | 0.75        | 0.75        | 0.75        | <b>0.50</b> | <b>1.00</b> | 0.75        | 0.75        |
| Turbulentiefactor                  | <b>K<sub>t</sub></b> | -                       | 2.0         | 2.0         | 2.0         | 2.0         | 2.0         | <b>1.5</b>  | <b>2.5</b>  |
| Diepte- of snelheidsprofielfactor  | <b>K<sub>h</sub></b> | -                       | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         |
| Hellingsfactor                     | <b>K<sub>s</sub></b> | -                       | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         |
| Valversnelling                     | <b>g</b>             | <b>m/s<sup>2</sup></b>  | 9.81        | 9.81        | 9.81        | 9.81        | 9.81        | 9.81        | 9.81        |
| Stroomsnelheid                     | <b>U</b>             | <b>m/s</b>              | <b>3.03</b> | <b>3.13</b> | <b>3.00</b> | <b>3.71</b> | <b>2.62</b> | <b>3.49</b> | <b>2.70</b> |

Grijze waarden betreffen de referentie berekening; parameterwaarden in vet zijn aangepast ten opzichte van deze referentie.

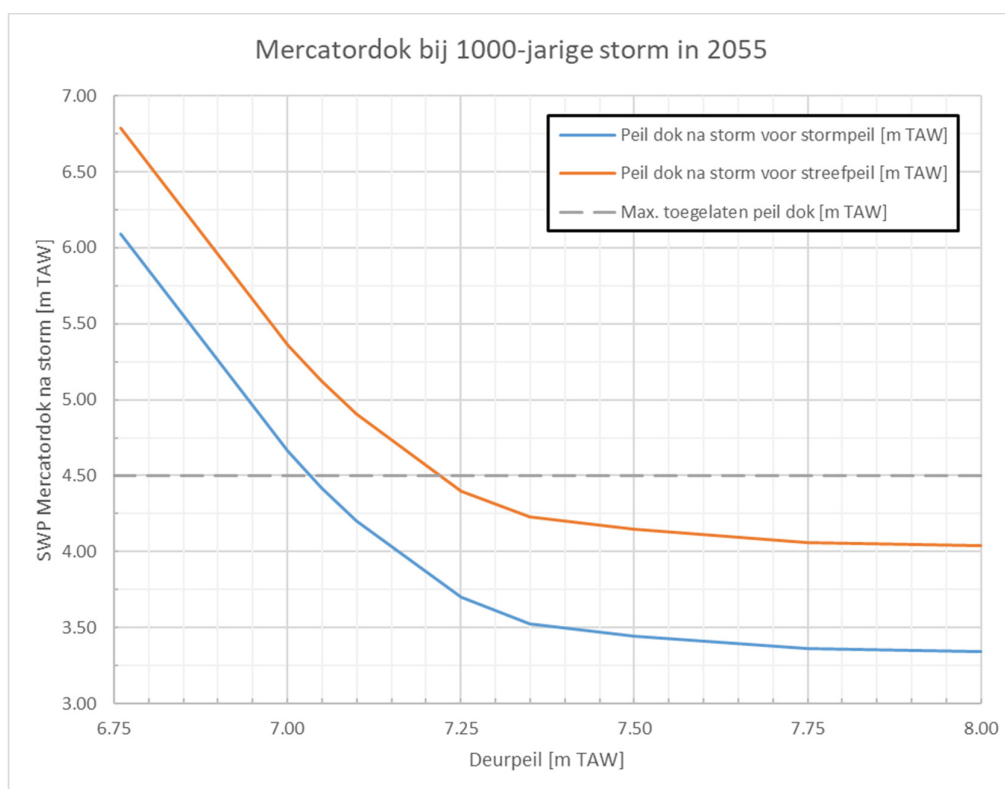
## 3 Resultaten

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de resultaten van de berekeningen voor de hydraulische randvoorwaarden aan de Mercatorsluis zoals beschreven in paragraaf 2.2.1.

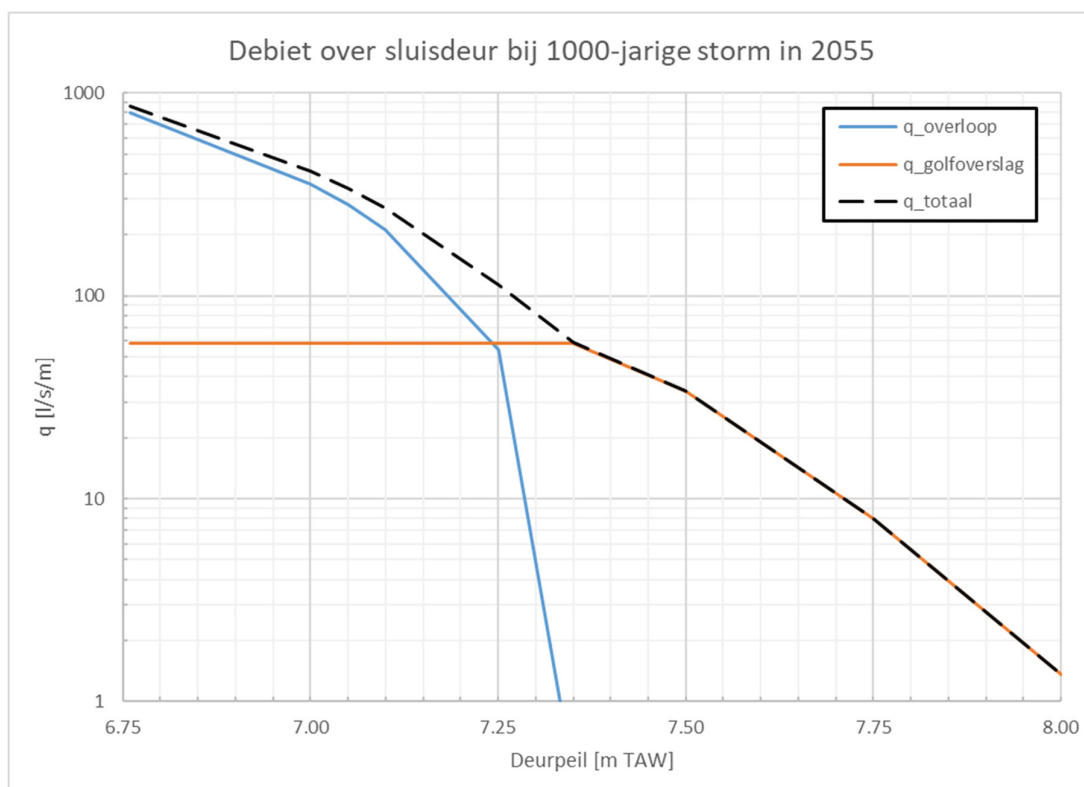
### 3.1 Sluisdeur met levensduur 30 jaar (2055)

#### 3.1.1 Toetsing sluisdeurhoogte

Uit het resultaat in Figuur 6 (zie ook Tabel 19 in Bijlage 1) blijkt dat het huidige deurpeil van +6.76 m TAW onvoldoende hoog is: het SWP in het Mercatordok stijgt tot ver boven het maximaal toegelaten peil van +4.50 m TAW (kombergingscriterium). Een minimaal deurpeil van +7.05 m TAW is noodzakelijk om aan het kombergingscriterium te voldoen voor het verlaagde peil in het Mercatordok bij storm (+3.30 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 incl. toeslag lange golf) treedt geen overloop meer op en dus enkel golfoverslag (Figuur 7). Voor dit deurpeil mag de duurtijd van het stormwaterpeil toenemen van 2 uur naar 4 uur (voor het normaal streefpeil van +4.00 m TAW in het Mercatordok) of naar 10 uur (voor het verlaagde peil van +3.30 m TAW in het Mercatordok), zodat er voor dit deurpeil voldoende veiligheid aanwezig is wat betreft de duurtijd van het stormwaterpeil.



Figuur 6 – Waterpeil in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2055).



Figuur 7 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2055).

### 3.1.2 Stabiliteit bodembescherming

De controle van de stabiliteit van de bodembescherming wordt zowel voor de sluisdeur aan zeezijde als voor de sluisdeur aan dokzijde uitgevoerd. Voor de sluisdeur aan zeezijde volgt uit paragraaf 3.1.1 een minimaal mogelijke deurhoogte gelijk aan +7.05 m TAW. Daarnaast wordt ook de deurhoogte beschouwd waarbij enkel golfoverslag en geen overloop meer voorkomt en één tussenliggende deurhoogte. Dit betreffen respectievelijk de deurhoogtes +7.35 mTAW en +7.25 mTAW. Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt één deurhoogte beschouwd, namelijk de deurhoogte +6.76 m TAW van de huidige sluisdeur.

Bij de laagste waarde van de deurhoogte 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. 83 %/17 %. Bij de hoogste waarde van de beschouwde deurhoogtes doet zich enkel golfoverslag voor en geen overloop (Figuur 7). Voor de tussenliggende deurhoogte wordt een verhouding van het debiet ten gevolge van overloop tot het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 48 %/52 %.

Tijdens een storm 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 waterpeil in de sluiskolk tijdens de overloop over de sluisdeur aan dokzijde is beperkt hoger dan het peil van de sluisdeur. Maximaal is de overloophoogte gelijk aan de overloophoogte over de sluisdeur aan zeezijde (gelijk debiet over bovenhoofd en benedenhoofd). Deze waarde wordt beschouwd voor de controle van de stabiliteit van de bodembescherming aan dokzijde van het bovenhoofd.

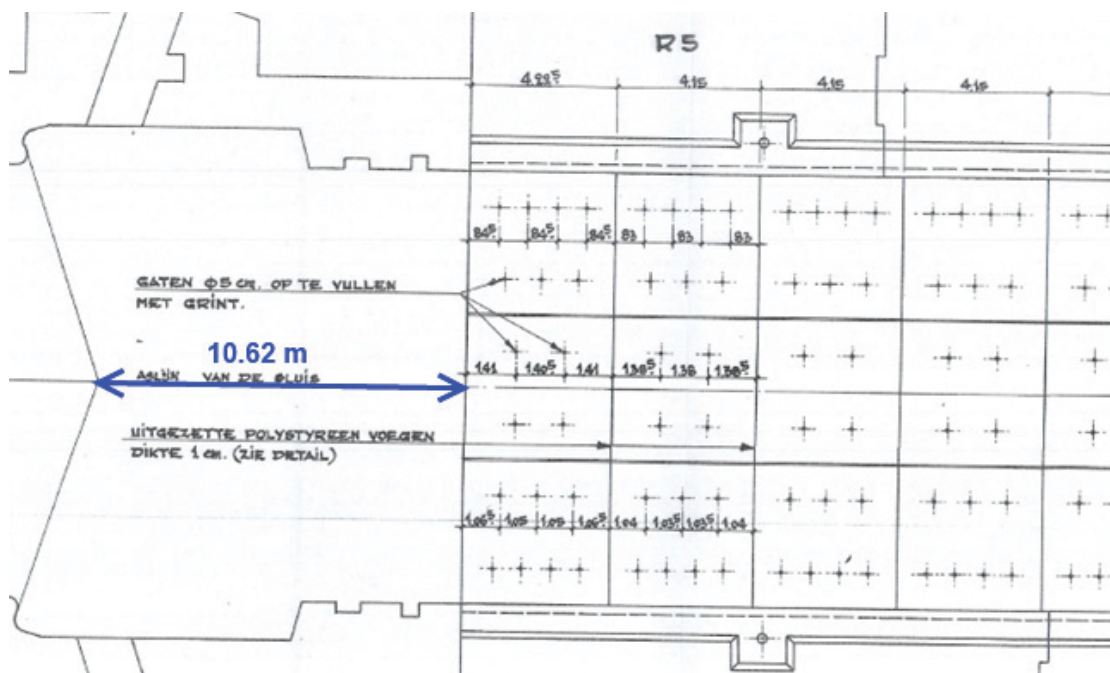
Zoals vermeld in paragraaf 2.3 valt het water dat de sluisdeur overstroomt ten gevolge van golfoverslag en/of overloop vooreerst op het beton van het benedenhoofd van de sluiskolk. In de sluiskolk ontstaat dan een watersprong samen met een jet nabij de bodem die zich in hoogte uitspreidt in de richting van het bovenhoofd van de sluiskolk. Voor de verschillende deurhoogtes van de sluisdeur aan zeezijde en 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 11. Voor de deurpeilen 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.

Voor de sluisdeur aan zeezijde volgt uit Tabel 11 dat bij een deurhoogte gelijk aan +7.05 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 0.74 m à 0.78 m (waterdiepte  $d_2$ ). De lengte van de verdronken watersprong bedraagt 33.6 m. Bij hogere deurhoogtes aan zeezijde nemen de waterdieptes  $d_1$  aan het begin van de watersprong en  $d_2$  aan het einde van de watersprong af, bv. bij een peil +7.35 m TAW tot een verwaarloosbare waterdiepte  $d_1$  van enkele millimeter en een waterdiepte  $d_2$  gelijk aan 0.29 m. De locatie waar de vallende straal neerkomt op de bodem van de sluiskolk neemt af van 3.03 m voorbij de sluisdeur bij een peil +7.05 m TAW tot 1.67 m bij een peil 7.35 m TAW. Voor alle beschouwde peilen van de sluisdeur aan zeezijde worden hoge verdrinkingsgraden van de watersprong berekend, variërend tussen 7.6 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. Bij een overloophoogte gelijk aan dit van de sluisdeur aan zeezijde, i.e. 0.30 m, wordt een waterdiepte  $d_1$  aan het begin van de watersprong, respectievelijk  $d_2$  aan het einde van de watersprong berekend gelijk aan 0.04 m, respectievelijk 0.77 m. De vallende straal komt neer op 2.99 m verwijderd van de sluisdeur.

Voor overloophoogte 0.10 m is de verdrinkingsgraad van de watersprong gelijk aan 23, voor de overloophoogte 0.30 m bedraagt deze 7. Dit is in beide situaties nog beduidend hoger 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 aan 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 (Ministerie van Openbare Werken, Bruggen en Wegen, Studiedienst voor Waterbouwwerken. 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 12. Voor de sluisdeur aan zeezijde volgt uit deze tabel dat de vallende straal op de sluiskolkbodem neerkomt op een afstand tussen 1.67 m en 3.03 m van de sluisdeur. Deze locatie bevindt zich op de betonvloer van het benedenhoofd.

Ter plaatse van deze locatie wordt voor de deurhoogte van +7.05 m TAW een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 8.30 m/s, voor de deurhoogte van +7.35 m TAW een stroomsnelheid gelijk aan 7.35 m/s en voor de deurhoogte +7.35 mTAW een stroomsnelheid gelijk aan 6.84 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 1.7 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 1.2 m/s aan het einde van de eerste betontegel en waarden die kleiner zijn dan 0.5 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 bij een overloophoogte van 0.10 m en op ca. 3.0 m van de sluisdeur bij een overloophoogte van 0.30 m. Op deze locatie wordt een stroomsnelheid nabij de bodem berekend van 6.6 m/s bij een overloophoogte van 0.10 m en 8.2 m/s bij een overloophoogte van 0.30 m. 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 bij een overloophoogte van 0.10 m en 1.70 m/s aan het einde van het bovenhoofd en 0.5 m/s ter plaatse van het einde van de watersprong.

Tabel 11 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde (2055)

| Parameter                                                  | Symbool                           | Eenheid                     | Sluisdeur zeezijde          |                             |                       |                       | Sluisdeur dokzijde    |                       |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                            |                                   |                             | Deurhoogte +7.05 mTAW       | Deurhoogte +7.25 mTAW       | Deurhoogte +7.35 mTAW | Deurhoogte +6.76 mTAW | Deurhoogte +6.76 mTAW | Deurhoogte +6.76 mTAW |
|                                                            |                                   |                             | Overloop 0.30 m en overslag | Overloop 0.10 m en overslag | Enkel overslag        | Enkel overloop 0.30 m | Enkel overloop 0.10 m | Enkel overloop 0.10 m |
| Waterstand opwaarts                                        | $H_u$                             | mTAW                        | 7.35                        | 7.35                        | 7.35                  | 7.06                  | 6.86                  |                       |
| Waterstand afwaarts                                        | $H_d$                             | mTAW                        | 3.33                        | 3.33                        | 3.33                  | 3.33                  | 3.33                  |                       |
| <b>Kruinpeil</b>                                           | <b><math>H_k</math></b>           | <b>mTAW</b>                 | <b>7.05</b>                 | <b>7.25</b>                 | <b>7.35</b>           | <b>6.76</b>           | <b>6.76</b>           |                       |
| Waterhoogte boven kruin                                    | $h_1$                             | mTAW                        | 0.30                        | 0.10                        | 0.00                  | 0.30                  | 0.10                  |                       |
| Bodempeil                                                  | $H_{bu}/H_{bd}$                   | mTAW                        | -3.33                       | -3.33                       | -3.33                 | -3.33                 | -3.33                 |                       |
| Waterdiepte afwaarts                                       | $d$                               | mTAW                        | 6.66                        | 6.66                        | 6.66                  | 6.66                  | 6.66                  |                       |
| <b>Debiet per eenheidsbreedte</b>                          | <b><math>q</math></b>             | <b><math>m^3/s/m</math></b> | <b>0.338</b>                | <b>0.113</b>                | <b>0.060</b>          | <b>0.338</b>          | <b>0.051</b>          |                       |
| Kritische waterdiepte                                      | $d_c$                             | m                           | 0.23                        | 0.11                        | 0.07                  | 0.23                  | 0.06                  |                       |
| Hoogte van de val                                          | $h$                               | m                           | 10.38                       | 10.58                       | 10.68                 | 10.09                 | 10.09                 |                       |
| Verhouding $d_c/h$                                         | $d_c/h$                           | -                           | 0.022                       | 0.010                       | 0.007                 | 0.022                 | 0.006                 |                       |
| <b>Lengte vallende straal</b>                              | <b><math>L_d</math></b>           | <b>m</b>                    | <b>3.03</b>                 | <b>2.08</b>                 | <b>1.67</b>           | <b>2.99</b>           | <b>1.54</b>           |                       |
| <b>Waterdiepte <math>d_1</math> volgens Rand (1995)</b>    | <b><math>d_{1,rand}</math></b>    | <b>m</b>                    | <b>0.043</b>                | <b>0.017</b>                | <b>0.010</b>          | <b>0.043</b>          | <b>0.009</b>          |                       |
| <b>Waterdiepte <math>d_1</math> volgens Chanson (2002)</b> | <b><math>d_{1,chanson}</math></b> | <b>m</b>                    | <b>0.041</b>                | <b>0.015</b>                | <b>0.009</b>          | <b>0.041</b>          | <b>0.008</b>          |                       |
| <b>Waterdiepte <math>d_2</math> volgens Rand (1995)</b>    | <b><math>d_{2,rand}</math></b>    | <b>m</b>                    | <b>0.779</b>                | <b>0.432</b>                | <b>0.305</b>          | <b>0.774</b>          | <b>0.279</b>          |                       |
| <b>Waterdiepte <math>d_2</math> volgens Chanson (2002)</b> | <b><math>d_{2,chanson}</math></b> | <b>m</b>                    | <b>0.737</b>                | <b>0.409</b>                | <b>0.289</b>          | <b>0.732</b>          | <b>0.264</b>          |                       |
| Verdrinkingsraad watersprong                               | $S_j$                             | -                           | 7.55                        | 14.42                       | 20.84                 | 7.61                  | 22.89                 |                       |
| <b>Lengte watersprong</b>                                  | <b><math>L_w</math></b>           | <b>m</b>                    | <b>33.6</b>                 | <b>33.2</b>                 | <b>33.0</b>           | <b>33.56</b>          | <b>32.97</b>          |                       |

Tabel 12 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluisolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde en voor de sluisdeur aan dokzijde (2055)

| Parameter                         | Symbool                  | Eenheid           | Sluisdeur zeezijde                |                                   |                          |                             | Sluisdeur dokzijde          |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                                   |                          |                   | Deurhoogte<br>+7.05 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.25 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.35 mTAW | Deurhoogte<br>+6.76 mTAW    | Deurhoogte<br>+6.76 mTAW    | Deurhoogte<br>+6.76 mTAW |
| Debiet per eenheidsbreedte        |                          | m <sup>2</sup> /s | Overloop<br>0.30 m<br>en overslag | Overloop<br>0.10 m<br>en overslag | Enkel<br>overslag        | Enkel<br>overloop<br>0.30 m | Enkel<br>overloop<br>0.10 m |                          |
|                                   |                          |                   | 0.338                             | 0.113                             | 0.060                    | 0.051                       | 0.338                       |                          |
| Locatie vallende straal           | Afstand tot<br>sluisdeur | m                 | 3.03                              | 2.08                              | 1.67                     | 2.99                        | 1.54                        |                          |
|                                   | Waterdiepte              | m                 | 0.041                             | 0.015                             | 0.009                    | 0.041                       | 0.008                       |                          |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s               | 8.30                              | 7.35                              | 6.84                     | 6.60                        | 6.60                        |                          |
| Einde benedenhoofd/<br>bovenhoofd | Afstand tot<br>sluisdeur | m                 | 10.62                             | 10.62                             | 10.62                    | 10.62                       | 10.62                       |                          |
|                                   | Waterdiepte              | m                 | 0.198                             | 0.117                             | 0.085                    | 0.198                       | 0.078                       |                          |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s               | 1.66                              | 1.07                              | 0.78                     | 1.70                        | 0.65                        |                          |
| Einde eerste betontegel           | Afstand tot<br>sluisdeur | m                 | 14.95                             | 14.95                             | 14.95                    | n.v.t.                      | n.v.t.                      |                          |
|                                   | Waterdiepte              | m                 | 0.288                             | 0.168                             | 0.121                    | n.v.t.                      | n.v.t.                      |                          |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s               | 1.16                              | 0.75                              | 0.54                     | n.v.t.                      | n.v.t.                      |                          |
| Einde watersprong                 | Afstand tot<br>sluisdeur | m                 | 36.60                             | 35.23                             | 34.67                    | 36.55                       | 34.51                       |                          |
|                                   | Waterdiepte              | m                 | 0.737                             | 0.409                             | 0.289                    | 0.732                       | 0.264                       |                          |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s               | 0.46                              | 0.28                              | 0.20                     | 0.46                        | 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. Zoals vermeld in paragraaf 2.3 kan beton algemeen weerstaan aan stroomsnelheden tot 6 à 7 m/s. Bij een deurhoogte aan zeezijde gelijk aan +7.35 mTAW worden ter plaatse van de locatie waar de vallende straal op de betonplaat van het benedenhoofd neerkomt stroomsnelheden berekend die lager zijn dan deze maximale waarde. Bij lagere deurhoogtes aan zeezijde worden stroomsnelheden berekend tot 8.3 m/s. Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt ter plaatse van de locatie waar de vallende straal op de betonplaat van het bovenhoofd neerkomt bij een overloophoogte gelijk aan 0.10 m een stroomsnelheid nabij de bodem berekend gelijk aan 6.6 m/s, wat juist gelijk is aan deze maximale waarde. Bij een overloophoogte van 0.30 m worden een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 8.2 m/s, wat beperkt hoger is dan deze maximale waarde.

Eenzijds geldt dat deze beperkt hogere stroomsnelheden zich niet continu in de tijd voordoen, aangezien golfoverslag een variatie in de tijd vertoont. Het golfoverslagdebiet wordt namelijk berekend voor een gemiddelde golfhoogte, waarbij de werkelijke golfhoogte een variatie vertoont rond deze gemiddelde golfhoogte. Hierdoor zullen ten gevolge van golfoverslag de hoge berekende stroomsnelheden afgewisseld worden met hogere en lagere stroomsnelheden gedurende de duur van de storm. Anderzijds vermeldt Graham, et al. (1998) dat gewoon beton een erosie van 30 mm vertoont bij een stroomsnelheid van 37 m/s gedurende 10 uur, maar dat door imperfecties echter al erosie kan optreden bij stroomsnelheden vanaf 8 m/s. Daarnaast volgt uit paragraaf 2.3 ook dat formuleringen toegepast worden voor een vrije watersprong, terwijl in werkelijkheid een sterk verdrongen 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. Bijgevolg kan het beton van het benedenhoofd en dit van het bovenhoofd wel weerstaan aan de berekende stroomsnelheden nabij de bodem van 8.2 m/s à 8.3 m/s gedurende de stormduur.

Wat de sluiskolkvloer uit betontegels betreft, doen de hoogste stroomsnelheden nabij de bodem 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 die berekend zijn in paragraaf 2.3.

Voor de sluisdeur aan dokzijde wordt aan het einde van het bovenhoofd een stroomsnelheid nabij de bodem berekend gelijk aan 0.7 m/s bij een overloophoogte van 0.10 m/s en een stroomsnelheid van 1.7 m/s bij de maximale overloophoogte van 0.30 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 lager dan de berekende waarden voor de stroomsnelheid nabij de bodem, de waarde voor vaste klei is hoger dan de berekende stroomsnelheid bij een overloophoogte van 0.10 m en lager dan de berekende stroomsnelheid bij de maximale overloophoogte van 0.30 m. 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  $\Psi$ , een relatieve dichtheid voor breuksteen gelijk aan 1.65, een waarde gelijk aan 1.0 voor de Stabiliteitsfactor voor stroming  $\Phi$  toegepast te worden. Het resultaat van deze dimensionering is gegeven in Tabel 13. Uit deze tabel volgt een mediaan nominale breuksteendiameter  $D_{n50}$  gelijk aan 0.03 m bij een overloophoogte gelijk aan 0.10 m en een diameter 0.18 m bij de maximale overloophoogte van 0.30 m.

De mediaan nominale breuksteendiameter  $D_{n50}$  kan omgerekend worden naar een gemiddeld breuksteengewicht  $M_{50}$  ( $M_{50} = \rho_s (D_{n50})^3$  met  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ). 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 14 geeft een overzicht van de in deze norm beschouwde klassen voor breuksteen. Hieruit volgt voor de overloophoogte 0.10 m dat de benodigde breuksteensortering beduidend kleiner is dan kleinste sortering 5-40 kg. Bij de maximale overloophoogte van 0.30 m is een breuksteensortering 5-40 kg nodig.

Tabel 13 – Dimensionering breuksteen aan de hand van formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998)

| Parameter                              | Symbool   | Eenheid           | Overloophoogte<br>0.10 m | Overloophoogte<br>0.30m |
|----------------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| Stroomsnelheid                         | U         | m/s               | 0.65                     | 1.70                    |
| Dichtheid beton                        | $r_b$     | kg/m <sup>3</sup> | 2650                     | 2650                    |
| Dichtheid water                        | $r_w$     | kg/m <sup>3</sup> | 1000                     | 1000                    |
| Relatieve dichtheid beton              | Dr        | -                 | 1.65                     | 1.65                    |
| Kritische schuifspanningsparameter     | $\Psi$    | -                 | 0.035                    | 0.035                   |
| Stabiliteitsfactor voor stroming       | $\Phi$    | -                 | 1.0                      | 1.0                     |
| Turbulentiefactor                      | $K_t$     | -                 | 2.0                      | 2.0                     |
| Diepte- of snelheidsprofielfactor      | $K_h$     | -                 | 1.0                      | 1.0                     |
| Hellingsfactor                         | $K_s$     | -                 | 1.0                      | 1.0                     |
| Valversnelling                         | g         | m/s <sup>2</sup>  | 9.81                     | 9.81                    |
| Mediaan nominale<br>breuksteendiameter | $D_{n50}$ | m                 | 0.03                     | 0.18                    |

Tabel 14 – 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          |

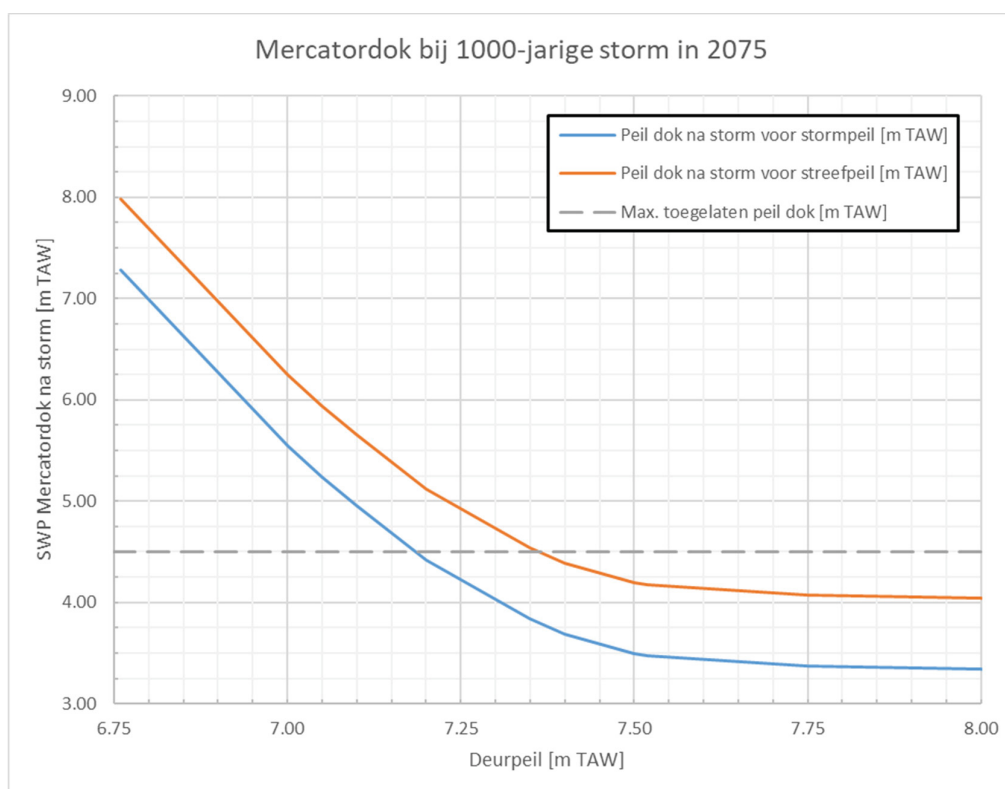
Bron: NBN EN 13383 (Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN), 2002);  
 $M_{50}$ : Mediaan breuksteengewicht;  $D_{n50}$ : Mediaan breuksteendiameter

## 3.2 Sluisdeur met levensduur 50 jaar (2075)

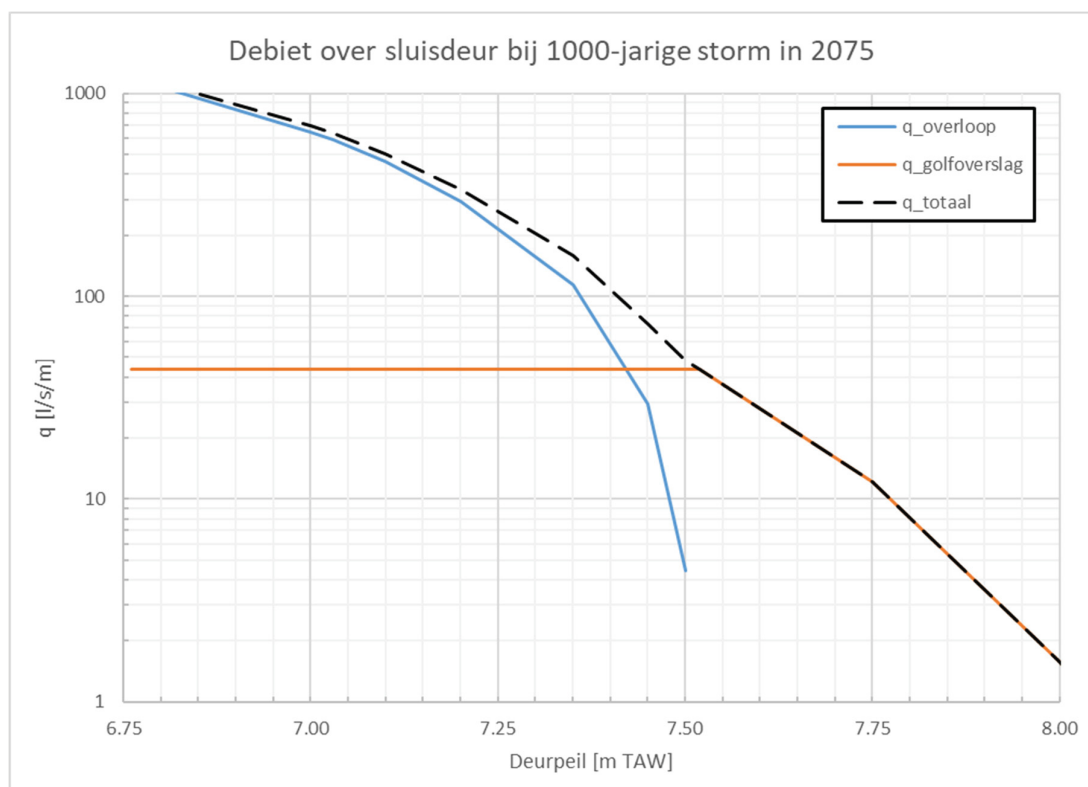
### 3.2.1 Toetsing sluisdeurhoogte

Uit het resultaat in Figuur 9 (zie ook Tabel 20 in Bijlage 1) blijkt dat het huidige deurpeil van +6.76 m TAW onvoldoende hoog is: het SWP in het Mercatordok stijgt tot ver boven het maximaal toegelaten peil van +4.50 m TAW (kombergingscriterium). Een minimaal deurpeil van +7.20 m TAW is noodzakelijk om aan het kombergingscriterium te voldoen voor het verlaagde peil in het Mercatordok bij storm (+3.30 m TAW). Een minimaal deurpeil van +7.40 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 +7.52 m TAW (= SWP zeezijde incl. toeslag lange golf) treedt geen overloop meer op en dus enkel golfoverslag (Figuur 10). Voor dit deurpeil mag de duurtijd van het stormwaterpeil toenemen van 2 uur naar 5 uur (voor het normaal streefpeil van +4.00 m TAW in het Mercatordok) of naar 13 uur (voor het verlaagde peil van +3.30 m TAW in het Mercatordok), zodat er voor dit deurpeil voldoende veiligheid aanwezig is wat betreft de duurtijd van het stormwaterpeil.

Opmerking: De golfindringingscoëfficiënten ( $K_d = 0.033$  en  $0.063$ , zie Tabel 5) voor de berekening van de golfhoogtes in 2075 zijn kleiner dan deze van 2055 voor NW ( $K_d = 0.035$  en  $0.081$ , zie Tabel 4). De kleinere  $K_d$ -factoren uit de numerieke modellering bij hogere waterstanden zijn een gevolg van minder golfreflectie in de haven ten gevolge van overstromingen op de kaaivlakken. De vraag kan gesteld worden of dit nog geldig is indien er extra stormmuren zouden staan bij een stijgende zeespiegel. Uit een controleberekening met de hogere  $K_d$ -factoren ( $0.035$  en  $0.081$ ) en dus licht hogere golfhoogtes voor 2075 blijkt dat het Mercatordok dan 4 à 7 cm meer zou stijgen. De voorgestelde deurpeilen blijven dus voldoen bij deze hypothese (zie Tabel 20).



Figuur 9 – Waterpeil in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2075).



Figuur 10 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2075).

### 3.2.2 Stabiliteit bodembescherming

Voor de sluisdeur met levensduur 30 jaar werd de controle van de stabiliteit van de bodembescherming zowel voor de sluisdeur aan zeezijde als voor de sluisdeur aan dokzijde uitgevoerd. Voor de sluisdeur aan dokzijde werden overloophoogtes van 0.10 m en 0.30 m beschouwd. Voor de sluisdeur met levensduur 50 jaar volgt uit de toetsing van de sluisdeurhoogte een maximale overloophoogte van 0.32 m. Dit is slechts beperkt hoger dan de maximale sluisdeurhoogte bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar. Om die reden wordt in deze paragraaf de controle van de stabiliteit van de bodembescherming enkel uitgevoerd voor de sluisdeur aan zeezijde en niet meer voor de sluisdeur aan dokzijde.

Voor de sluisdeur aan zeezijde wordt de controle van de stabiliteit van de bodembescherming uitgevoerd voor volgende deurhoogtes:

- Een minimaal mogelijk peil van de sluisdeur gelijk aan +7.20 m TAW, waarbij de verhouding debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 87 %/13 % bedraagt.
- Een deurhoogte gelijk aan +7.52 mTAW: Dit is het peil waarbij zich juist enkel golfoverslag voordoet en geen overloop.
- Een tussenliggende deurhoogte van +7.40 mTAW, waarbij de verhouding debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 61 %/39 % bedraagt.

Voor deze verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde wordt analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar 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 15. Uit deze tabel volgt dat bij een deurhoogte gelijk aan +7.20 m TAW 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 0.74 m à 0.78 m (waterdiepte  $d_2$ ). De lengte van de verdronken watersprong bedraagt hierbij 33.6 m. Bij de hogere deurhoogte van +7.40 mTAW neemt de waterdiepte  $d_1$  aan het begin van de watersprong af naar 0.02 m en neemt de waterdiepte  $d_2$  aan het einde van de watersprong af tot 0.43 m. Bij een deurhoogte gelijk aan +7.52 mTAW doet zich enkel nog golfoverslag voor en wordt een waterdiepte  $d_1$  gelijk aan 0.007 m berekend en een waterdiepte  $d_2$  gelijk aan 0.26 m.

De locatie waar de vallende straal neerkomt op de bodem van de sluisdeur neemt af van 3.04 m voorbij de sluisdeur bij een peil +7.20 m TAW tot 1.51 m bij een peil +7.52 m TAW. De invloed van de hogere deurhoogte op de berekende lengte van de watersprong is eerder beperkt. De lengte van de verdronken watersprong varieert tussen 32.9 m en 33.6 m. Voor alle beschouwde deurhoogtes van de sluisdeur aan zeezijde worden hoge verdrinkingsgraden van de watersprong berekend, variërend tussen 8 en 25. Analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar zijn dit waarden die beduidend hoger liggen dan de waarden vermeld in Wu & Rajaratnam (1995).

Tabel 15 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2075)

| Parameter                                                      | Symbool                           | Eenheid                  | Deurhoogte<br>+7.20 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.40 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.52 mTAW |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
|                                                                |                                   |                          | Overloop<br>0.32 m<br>en overslag | Overloop<br>0.12 m<br>en overslag | Enkel<br>overslag        |
| Waterstand opwaarts                                            | $H_u$                             | mTAW                     | 7.52                              | 7.52                              | 7.52                     |
| Waterstand afwaarts                                            | $H_d$                             | mTAW                     | 3.33                              | 3.33                              | 3.33                     |
| <b>Kruinpeil</b>                                               | <b><math>H_K</math></b>           | <b>mTAW</b>              | <b>7.20</b>                       | <b>7.40</b>                       | <b>7.52</b>              |
| Waterhoogte boven kruin                                        | $h_1$                             | mTAW                     | 0.32                              | 0.12                              | 0.00                     |
| Bodempeil                                                      | $H_{bu}/H_{bd}$                   | mTAW                     | -3.33                             | -3.33                             | -3.33                    |
| Waterdiepte afwaarts                                           | $d$                               | mTAW                     | 6.66                              | 6.66                              | 6.66                     |
| <b>Debiet per<br/>eenheidsbreedte</b>                          | <b><math>q</math></b>             | <b>m<sup>3</sup>/s/m</b> | <b>0.336</b>                      | <b>0.111</b>                      | <b>0.044</b>             |
| Kritische waterdiepte                                          | $d_c$                             | m                        | 0.23                              | 0.11                              | 0.06                     |
| Hoogte van de val                                              | $h$                               | m                        | 10.53                             | 10.73                             | 10.85                    |
| Verhouding $d_c/h$                                             | $d_c/h$                           | -                        | 0.021                             | 0.010                             | 0.005                    |
| <b>Lengte vallende straal</b>                                  | <b><math>L_d</math></b>           | <b>m</b>                 | <b>3.04</b>                       | <b>2.08</b>                       | <b>1.51</b>              |
| <b>Waterdiepte <math>d_1</math> volgens<br/>Rand (1995)</b>    | <b><math>d_{1,rand}</math></b>    | <b>m</b>                 | <b>0.042</b>                      | <b>0.016</b>                      | <b>0.007</b>             |
| <b>Waterdiepte <math>d_1</math> volgens<br/>Chanson (2002)</b> | <b><math>d_{1,chanson}</math></b> | <b>m</b>                 | <b>0.040</b>                      | <b>0.015</b>                      | <b>0.007</b>             |
| <b>Waterdiepte <math>d_2</math> volgens<br/>Rand (1995)</b>    | <b><math>d_{2,rand}</math></b>    | <b>m</b>                 | <b>0.778</b>                      | <b>0.429</b>                      | <b>0.260</b>             |
| <b>Waterdiepte <math>d_2</math> volgens<br/>Chanson (2002)</b> | <b><math>d_{2,chanson}</math></b> | <b>m</b>                 | <b>0.736</b>                      | <b>0.406</b>                      | <b>0.246</b>             |
| Verdrinkingsgraad<br>watersprong                               | $S_j$                             | -                        | 7.56                              | 14.54                             | 24.64                    |
| <b>Lengte watersprong</b>                                      | <b><math>L_w</math></b>           | <b>m</b>                 | <b>33.6</b>                       | <b>33.1</b>                       | <b>32.9</b>              |

Analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar wordt voor deze deurhoogtes aan de hand van deze berekende waterdieptes in de watersprong de stroomsnelheid aan de bodem berekend voor de locatie waarbij de vallende straal neerkomt op de sluiskolkbodem, voor de locatie aan het einde van de watersprong, 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. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 16. Uit deze tabel volgt dat de vallende straal op de sluiskolkbodem neerkomt op een afstand tussen 1.51 m en 3.04 m van de sluisdeur. Deze locatie bevindt zich op de betonvloer van het benedenhoofd. Ter plaatse van deze locatie wordt voor een deurhoogte gelijk aan +7.20 mTAW een stroomsnelheid berekend gelijk is aan 8.3 m/s, voor een deurhoogte van +7.40 mTAW een stroomsnelheid van 7.4 m/s en voor een deurhoogte van +7.52 mTAW een stroomsnelheid van 6.6 m/s. Ter plaatse van het einde van het benedenhoofd neemt de stroomsnelheid aan de bodem reeds af naar waarden die variëren tussen 0.3 m/s en 1.7 m/s. Daarna doet zich een verdere verlaging van de stroomsnelheid nabij de bodem voor tot waarden die variëren tussen 0.2 m/s en 1.2 m/s aan het einde van de eerste betontegel en waarden die kleiner zijn dan 0.5 m/s ter plaatse van het einde van de watersprong.

Bij een deurhoogte gelijk aan +7.52 mTAW worden ter plaatse van de locatie waar de vallende straal op de betonplaat van de sluiskolk neerkomt stroomsnelheden berekend, die lager zijn dan de algemeen beschouwde maximale waarde van 6 à 7 m/s. Bij lagere deurhoogtes worden ter plaatse van de locatie van de vallende straal stroomsnelheden berekend tot 8.3 m/s. Volgens een analoge redenering als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar kan bijgevolg besloten worden dat het beton van het benedenhoofd ook voor de lagere deurhoogtes kan weerstaan aan beperkt hogere stroomsnelheden dan de algemeen gangbare maximaal toelaatbare stroomsnelheid van 6 à 7 m/s.

Wat de sluiskolkvloer uit betontegels betreft doen, analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar, de hoogste stroomsnelheden nabij de bodem zich voor ter plaatse van de overgang tussen het benedenhoofd en de sluiskolkvloer uit betontegels. Op deze locatie volgen uit Tabel 16 stroomsnelheden die variëren tussen 0.3 m/s en 1.7 m/s. Deze stroomsnelheden zijn lager dan de maximaal toelaatbare stroomsnelheden voor de betontegels in de sluiskolk die berekend zijn in paragraaf 2.3.

Tabel 16 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiskolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2075)

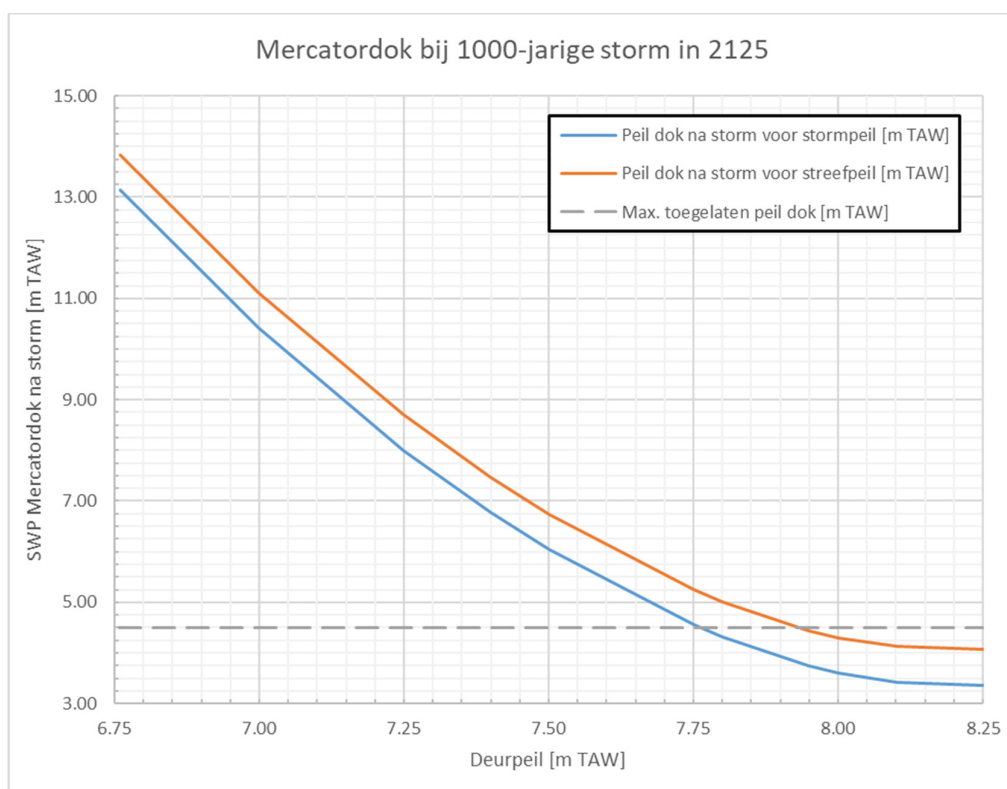
| Locatie                           | Parameter                | Eenheid | Deurhoogte<br>+7.20 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.40 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.52 mTAW |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
|                                   |                          |         | Overloop<br>0.32 m<br>en overslag | Overloop<br>0.12 m<br>en overslag | Enkel<br>overslag        |
| Debiet per eenheidsbreedte        |                          | m²/s    | 0.336                             | 0.073                             | 0.044                    |
| Locatie vallende straal           | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 3.04                              | 1.80                              | 1.44                     |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.040                             | 0.010                             | 0.007                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 8.33                              | 7.04                              | 6.43                     |
| Einde benedenhoofd/<br>bovenhoofd | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 10.62                             | 10.62                             | 10.62                    |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.198                             | 0.094                             | 0.072                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 1.70                              | 0.78                              | 0.60                     |
| Einde eerste betontegel           | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 14.95                             | 14.95                             | 14.95                    |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.287                             | 0.136                             | 0.103                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 1.17                              | 0.54                              | 0.42                     |
| Einde watersprong                 | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 33.6                              | 33.0                              | 32.9                     |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.736                             | 0.325                             | 0.242                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 0.46                              | 0.23                              | 0.18                     |

### 3.3 Sluisdeur met levensduur 100 jaar (2125)

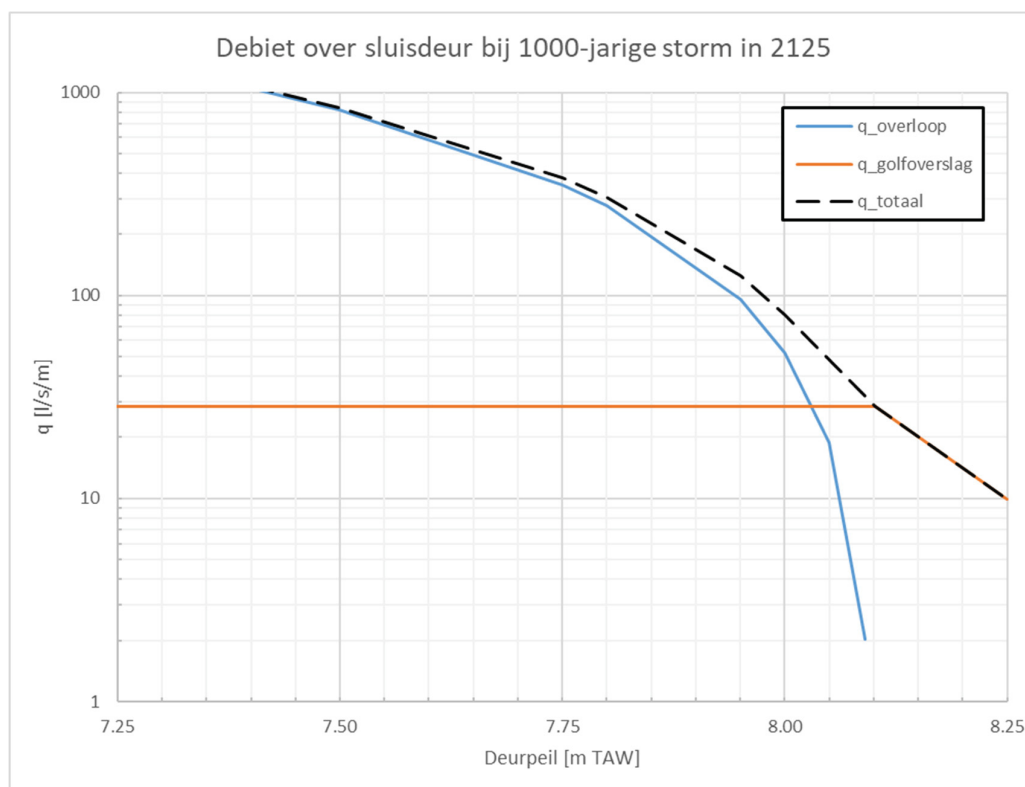
#### 3.3.1 Toetsing sluisdeurhoogte

Uit het resultaat in Figuur 11 (zie ook Tabel 21 in Bijlage 1) blijkt dat het huidige deurpeil van +6.76 m TAW onvoldoende hoog is: het SWP in het Mercatordok stijgt tot ver boven het maximaal toegelaten peil van +4.50 m TAW (kombergingscriterium). Een minimaal deurpeil van +7.80 m TAW is noodzakelijk om aan het kombergingscriterium te voldoen voor het verlaagde peil in het Mercatordok bij storm (+3.30 m TAW). Een minimaal deurpeil van +7.95 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 +8.10 m TAW (= SWP zeezijde incl. toeslag lange golf) treedt geen overloop meer op en dus enkel golfoverslag (Figuur 12). Voor dit deurpeil mag de duurtijd van het stormwaterpeil toenemen van 2 uur naar 7 uur (voor het normaal streefpeil van +4.00 m TAW in het Mercatordok) of naar 18 uur (voor het verlaagde peil van +3.30 m TAW in het Mercatordok), zodat er voor dit deurpeil voldoende veiligheid aanwezig is wat betreft de duurtijd van het stormwaterpeil.

Opmerking: De golfindringingscoëfficiënten ( $K_d = 0.026$  en  $0.042$ , zie Tabel 6) voor de berekening van de golfhoogtes in 2125 zijn veel kleiner dan deze van 2055 voor NW ( $K_d = 0.035$  en  $0.081$ , zie Tabel 4). De kleinere  $K_d$ -factoren uit de numerieke modellering bij hogere waterstanden zijn een gevolg van minder golfreflectie in de haven ten gevolge van overstromingen op de kaaivlakken. De vraag kan gesteld worden of dit nog geldig is indien er extra stormmuren zouden staan bij een stijgende zeespiegel. Uit een controleberekening met de hogere  $K_d$ -factoren ( $0.035$  en  $0.081$ ) en dus hogere golfhoogtes voor 2125 blijkt dat het Mercatordok dan ongeveer 20 cm meer zou kunnen stijgen bij de voorgestelde deurpeilen. Onder deze hypothese zouden de deurpeilen 5 cm hoger moeten gekozen worden om te voldoen aan het kombergingscriterium.



Figuur 11 – Waterpeil in het Mercatordok na de storm i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2125).



Figuur 12 – Overloop- en golfoverslagdebiet i.f.v. het deurpeil van de Mercatorsluisdeur aan zeezijde (2125).

### 3.3.2 Stabiliteit bodembescherming

Analoog als voor de sluisdeur met levensduur 50 jaar (zie paragraaf 3.2.2) wordt voor de sluisdeur met levensduur 100 jaar de controle van de stabiliteit van de bodembescherming enkel uitgevoerd voor de sluisdeur aan zeezijde. Hierbij worden volgende deurhoogtes beschouwd:

- De minimale deurhoogte gelijk aan +7.80 m TAW, waarbij de verhouding debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 91 %/9 % bedraagt.
- Een deurhoogte gelijk aan +8.10 mTAW: Dit is het peil waarbij zich juist geen overloop meer voordoet en enkel golfoverslag.
- Eén tussenliggende deurhoogte gelijk aan +7.95 mTAW, waarbij de verhouding debiet ten gevolge van overloop en het debiet ten gevolge van golfoverslag in het totale debiet ca. 65 %/35 % bedraagt.

Voor deze verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde wordt analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar en analoog als bij de sluisdeur met levensduur 50 jaar 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 17.

Tabel 17 – Berekening waterdieptes in watersprong en lengte watersprong voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2125)

| Parameter                                | Symbool                 | Eenheid                  | Deurhoogte +7.80 mTAW       | Deurhoogte +7.95 mTAW       | Deurhoogte +8.10 mTAW |
|------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
|                                          |                         |                          | Overloop 0.30 m en overslag | Overloop 0.15 m en overslag | Enkel overslag        |
| Waterstand opwaarts                      | $H_u$                   | mTAW                     | 8.10                        | 8.10                        | 8.10                  |
| Waterstand afwaarts                      | $H_d$                   | mTAW                     | 3.33                        | 3.33                        | 3.33                  |
| <b>Kruinpeil</b>                         | <b><math>H_K</math></b> | <b>mTAW</b>              | <b>7.80</b>                 | <b>7.95</b>                 | <b>8.10</b>           |
| Waterhoogte boven kruin                  | $h_1$                   | mTAW                     | 0.30                        | 0.15                        | 0.00                  |
| Bodempeil                                | $H_{bu}/H_{bd}$         | mTAW                     | -3.33                       | -3.33                       | -3.33                 |
| Waterdiepte afwaarts                     | $d$                     | mTAW                     | 6.66                        | 6.66                        | 6.66                  |
| <b>Debiet per eenheidsbreedte</b>        | <b><math>q</math></b>   | <b>m<sup>3</sup>/s/m</b> | <b>0.305</b>                | <b>0.124</b>                | <b>0.028</b>          |
| Kritische waterdiepte                    | $d_c$                   | m                        | 0.21                        | 0.12                        | 0.04                  |
| Hoogte van de val                        | $h$                     | m                        | 11.13                       | 11.28                       | 11.43                 |
| Verhouding $d_c/h$                       | $d_c/h$                 | -                        | 0.019                       | 0.0010                      | 0.004                 |
| <b>Lengte vallende straal</b>            | <b><math>L_d</math></b> | <b>m</b>                 | <b>3.02</b>                 | <b>2.22</b>                 | <b>1.33</b>           |
| Waterdiepte $d_1$ volgens Rand (1995)    | $d_{1,rand}$            | m                        | 0.038                       | 0.018                       | 0.005                 |
| Waterdiepte $d_1$ volgens Chanson (2002) | $d_{1,chanson}$         | m                        | 0.036                       | 0.016                       | 0.004                 |
| Waterdiepte $d_2$ volgens Rand (1995)    | $d_{2,rand}$            | m                        | 0.746                       | 0.461                       | 0.208                 |
| Waterdiepte $d_2$ volgens Chanson (2002) | $d_{2,chanson}$         | m                        | 0.706                       | 0.437                       | 0.197                 |
| Verdrinkingsgraad watersprong            | $S_j$                   | -                        | 7.93                        | 13.45                       | 31.06                 |
| <b>Lengte watersprong</b>                | <b><math>L_w</math></b> | <b>m</b>                 | <b>33.5</b>                 | <b>33.2</b>                 | <b>32.9</b>           |

Uit Tabel 17 volgt dat bij een deurhoogte gelijk aan +7.80 mTAW 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 0.70 m à 0.75 m (waterdiepte  $d_2$ ). De lengte van de verdronken watersprong bedraagt hierbij 33.5 m. Bij de hogere deurhoogtes van +7.95 mTAW en +8.10 mTAW neemt de waterdiepte  $d_1$  aan het begin van de watersprong af tot 0.01 m en neemt de waterdiepte  $d_2$  aan het einde van de watersprong af tot 0.20 m. Voor alle beschouwde deurhoogtes van de sluisdeur aan zeezijde worden relatief hoge verdrinkingsgraden van de watersprong berekend, variërend tussen 8 en 31. Analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar en als bij de sluisdeur met levensduur 50 jaar zijn dit waarden die beduidend hoger liggen dan de waarden vermeld in Wu & Rajaratnam (1995).

Analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar en als bij de sluisdeur met levensduur 50 jaar wordt voor deze deurhoogtes aan de hand van deze berekende waterdieptes in de watersprong de stroomsnelheid aan de bodem berekend voor de locatie waarbij de vallende straal neerkomt op de sluiskolkbodem, de locatie aan het einde van de watersprong, de locatie aan het einde van het benedenhoofd van de sluiskolk, waar het begin is van de vloer in de sluiskolk uit betontegels en de locatie aan het einde van de eerste betontegel. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 18. Uit deze tabel volgt dat de vallende straal op de sluiskolkbodem neerkomt op een afstand tussen 1.33 en 3.02 m van de sluisdeur. Deze locatie bevindt zich nog op de betonvloer van het benedenhoofd. Ter plaatse van deze locatie wordt voor een deurhoogte gelijk aan +7.80 m TAW een stroomsnelheid van 8.4 m/s berekend. Deze stroomsnelheid op deze locatie neemt af tot 6.4 m/s bij een deurhoogte gelijk aan +8.10 mTAW. Ter plaatse van het einde van het benedenhoofd neemt de stroomsnelheid aan de bodem reeds af naar waarden die variëren tussen 0.6 m/s en 1.6 m/s. Daarna doet zich een verdere verlaging van de stroomsnelheid nabij de bodem voor tot waarden die variëren tussen 0.4 m/s en 1.1 m/s aan het einde van de eerste betontegel en waarden die kleiner zijn dan 0.5 m/s ter plaatse van het einde van de watersprong.

Bij een deurhoogte gelijk aan +8.10 mTAW worden ter plaatse van de locatie waar de vallende straal op de betonplaat van het benedenhoofd neerkomt stroomsnelheden berekend, die lager zijn dan de algemeen beschouwde maximale toelaatbare waarde van 6 à 7 m/s. Bij lagere deurhoogtes worden ter plaatse van de locatie van de vallende straal stroomsnelheden berekend tot 8.4 m/s. Volgens een analoge redenering als in paragraaf 3.1.2 en paragraaf 3.2.2 kan bijgevolg besloten worden dat het beton van het benedenhoofd ook voor deze lagere deurhoogtes kan weerstaan aan de beperkt hogere stroomsnelheden dan de algemeen beschouwde maximaal toelaatbare stroomsnelheid van 6 à 7 m/s.

Wat de sluiskolkvloer uit betontegels betreft doen, analoog als bij de sluisdeur met levensduur 30 jaar en bij de sluisdeur met levensduur 50 jaar, de hoogste stroomsnelheden nabij de bodem zich voor ter plaatse van de overgang tussen het benedenhoofd en de sluiskolkvloer uit betontegels. Op deze locatie volgen uit Tabel 18 stroomsnelheden die variëren tussen 0.4 m/s en 1.6 m/s. Deze stroomsnelheden zijn lager dan de maximaal toelaatbare stroomsnelheden voor de betontegels in de sluiskolk die berekend zijn in paragraaf 2.3.

Tabel 18 – Berekening stroomsnelheid op verschillende locaties in de sluiscolk voor verschillende peilen van de sluisdeur aan zeezijde (2125)

| Locatie                           | Parameter                | Eenheid | Deurhoogte<br>+7.80 mTAW          | Deurhoogte<br>+7.95 mTAW          | Deurhoogte<br>+8.10 mTAW |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
|                                   |                          |         | Overloop<br>0.30 m<br>en overslag | Overloop<br>0.15 m<br>en overslag | Enkel<br>overslag        |
| Debiet per eenheidsbreedte        |                          | m²/s    | 0.305                             | 0.124                             | 0.028                    |
| Locatie vallende straal           | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 3.02                              | 2.22                              | 1.33                     |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.036                             | 0.016                             | 0.004                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 8.39                              | 7.59                              | 6.42                     |
| Einde benedenhoofd/<br>bovenhoofd | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 10.62                             | 10.62                             | 10.62                    |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.188                             | 0.122                             | 0.046                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 1.62                              | 1.01                              | 0.61                     |
| Einde eerste betontegel           | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 14.95                             | 14.95                             | 14.95                    |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.274                             | 0.178                             | 0.066                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 1.11                              | 0.70                              | 0.43                     |
| Einde watersprong                 | Afstand tot<br>sluisdeur | m       | 36.6                              | 35.4                              | 32.9                     |
|                                   | Waterdiepte              | m       | 0.706                             | 0.437                             | 0.197                    |
|                                   | Stroomsnelheid           | m/s     | 0.43                              | 0.29                              | 0.14                     |

## 4 Conclusie

De toetsing van de hoogte van de sluisdeur van de Mercatorsluis aan zeezijde werd uitgevoerd voor een levensduur van 30 jaar (2055), 50 jaar (2075) en 100 jaar (2125). Hiervoor werd zowel de overloop (bij een waterstand hoger dan de kruin van de sluisdeur) als de golfoverslag berekend bij bepaalde golfcondities voor een 1000-jarige storm inclusief zeespiegelstijging. De maximale komberging tot waterpeil +4.50 m TAW in het Mercatordok diende daarbij als limiterend criterium. Daarnaast wordt een nazicht gedaan van de bestaande bodembescherming stroomafwaarts van de sluisdeuren, d.i. aan de landwaartse kant van de sluisdeuren (voor het benedenhoofd in de sluiskolk, respectievelijk voor het bovenhoofd in het Mercatordok).

Uit het resultaat blijkt dat het huidige deurpeil van +6.76 m TAW aan zeezijde onvoldoende hoog is. Voor de verschillende levensduren van de sluisdeur gelden volgende deurpeilen:

### Levensduur 30 jaar

- Een minimaal deurpeil van +7.05 m TAW is noodzakelijk om te voldoen aan het kombergingscriterium voor het startpeil in het Mercatordok bij storm (+3.30 m TAW).
- Een minimaal deurpeil van +7.25 m TAW is noodzakelijk om te voldoen aan het kombergingscriterium 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. Het kombergingscriterium is ruim voldaan.

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 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 stormwaterpeil (die mag toenemen van 2 uur naar 4 of 10 uur, i.f.v. het startpeil in het Mercatordok).

### Levensduur 50 jaar

- Een minimaal deurpeil van +7.20 m TAW is noodzakelijk om te voldoen aan het kombergingscriterium voor het startpeil in het Mercatordok bij storm (+3.30 m TAW).
- Een minimaal deurpeil van +7.40 m TAW is noodzakelijk om te voldoen aan het kombergingscriterium voor het normale streefpeil in het Mercatordok (+4.00 m TAW).
- Voor een deurpeil van +7.52 m TAW treedt geen overloop op en enkel golfoverslag. Het kombergingscriterium is ruim voldaan.

Gezien het geringe verschil tussen +7.40 en +7.52 m TAW **wordt een deurpeil van +7.52 m TAW aangeraden**, omdat het voordeliger is 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 stormwaterpeil (die mag toenemen van 2 uur naar 5 of 13 uur, i.f.v. het startpeil in het Mercatordok).

### Levensduur 100 jaar

- Een minimaal deurpeil van +7.80 m TAW is noodzakelijk om te voldoen aan het kombergingscriterium voor het startpeil in het Mercatordok bij storm (+3.30 m TAW).
- Een minimaal deurpeil van +7.95 m TAW is noodzakelijk om te voldoen aan het kombergingscriterium voor het normale streefpeil in het Mercatordok (+4.00 m TAW).
- Voor een deurpeil van +8.10 m TAW treedt geen overloop op en enkel golfoverslag.

Gezien het geringe verschil tussen +7.95 en +8.10 m TAW **wordt een deurpeil van +8.10 m TAW aangeraden**, omdat het voordeliger is 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 stormwaterpeil (die mag toenemen van 2 uur naar 7 of 18 uur, i.f.v. het startpeil in het Mercatordok).

Voor alle levensduren is de controle van de stabiliteit van de bodembescherming uitgevoerd, zowel voor de sluisdeur aan zeezijde als voor de sluisdeur aan dokzijde. De bodembescherming van het bovenhoofd en van het benedenhoofd bestaat uit beton, de vloer van de sluiskolk bestaat uit betontegels. **Zowel het beton van de beide sluishoofden als 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. Vermoedelijk is deze wel aanwezig. Aan het einde van het bovenhoofd worden stroomsnelheden nabij de bodem berekend tot 1.70 m/s bij de maximale overloophoogte van 0.30 m. Om te weerstaan aan deze stroomsnelheden is een breuksteensortering 5-40 kg nodig.

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 Mercatordok. De hoogte van de zijwanden van de sluiskolk werd hierbij niet beschouwd. Als de zijwanden minder dan 40 cm hoger zijn dan het bovenhoofd (rekening houdend met een overstorthoogte van 30 cm over de sluisdeuren), dan moeten extra maatregelen genomen worden om te vermijden dat het water ook over de zijwanden stroomt (bv. naar lager gelegen 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.

Bijkomend detail: in deze studie wordt enkel tweedimensionaal geredeneerd, niet driedimensionaal. Dit impliceert dat al het water over de sluisdeur van het benedenhoofd recht in de sluiskolk stroomt. Maar indien de zijwanden van de sluiskolk lager zijn dan het zeewaartse waterpeil, kan lokaal overstortend water naast de sluiskolk terecht komen. Bij detailontwerp is het belangrijk om aandacht te besteden aan dit fenomeen om te voorkomen dat water kan afstromen naar lager gelegen gebieden naast de sluiskolk (bv. de stad). Dit kan door de kruinpeilen van de sluiswand nabij de sluisdeuren te verhogen of andere extra maatregelen te nemen.

## 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](http://www.overtopping-manual.com)

**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

**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, Bruggen en Wegen, Dienst der Kust.** (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, Bruggen en Wegen, Studiedienst voor Waterbouwwerken.** (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 benedenhoofd Mercatorsluis (in tabel)

Tabel 19 – Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis voor 2055.

|                                           |        |        |        |        |        |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| gem. kruinpeil vloeddeuren [m TAW]        | 6.76   | 7.00   | 7.05   | 7.10   | 7.25   | 7.35  | 7.50  | 7.75  | 8.00  |
| Oppervlakte Mercatordok [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_stormmuur [l/s/m]                       | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
| Lengte stormmuren naast sluisdeur [m]     | 171    | 171    | 171    | 171    | 171    | 171   | 171   | 171   | 171   |
| q_tot_sluisdeur [l/s/m]                   | 858.47 | 413.03 | 338.43 | 270.62 | 112.89 | 59.06 | 34.01 | 7.98  | 1.35  |
| Lengte sluisdeuren [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  |
| <b>Stijging waterpeil Mercatordok</b>     |        |        |        |        |        |       |       |       |       |
| t.g.v. overslag stormmuren [m]            | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.04  |
| t.g.v. overslag+overloop sluisdeur [m]    | 2.75   | 1.32   | 1.09   | 0.87   | 0.36   | 0.19  | 0.11  | 0.03  | 0.00  |
| totale waterpeilstijging [m]              | 2.79   | 1.36   | 1.12   | 0.90   | 0.40   | 0.23  | 0.15  | 0.06  | 0.04  |
| Peil dok na storm voor stormpeil [m TAW]  | 6.09   | 4.66   | 4.42   | 4.20   | 3.70   | 3.53  | 3.45  | 3.36  | 3.34  |
| Peil dok na storm voor streefpeil [m TAW] | 6.79   | 5.36   | 5.12   | 4.90   | 4.40   | 4.23  | 4.15  | 4.06  | 4.04  |

(groene waarden: lager dan kombergingscriterium +4.50 m TAW)

Tabel 20 – Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis voor 2075.

|                                           |         |        |        |        |        |        |       |       |       |
|-------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| gem. kruinpeil vloeddeuren [m TAW]        | 6.76    | 7.00   | 7.05   | 7.20   | 7.35   | 7.40   | 7.52  | 7.75  | 8.00  |
| Oppervlakte Mercatordok [m <sup>2</sup> ] | 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_stormmuur [l/s/m]                       | 1.00    | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
| Lengte stormmuren naast sluisdeur [m]     | 171     | 171    | 171    | 171    | 171    | 171    | 171   | 171   | 171   |
| q_tot_sluisdeur [l/s/m]                   | 1229.80 | 690.47 | 595.05 | 336.36 | 157.74 | 110.68 | 43.62 | 12.20 | 1.59  |
| Lengte sluisdeuren [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  |
| <b>Stijging waterpeil Mercatordok</b>     |         |        |        |        |        |        |       |       |       |
| t.g.v. overslag stormmuren [m]            | 0.04    | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.04  | 0.04  |
| t.g.v. overslag+overloop sluisdeur [m]    | 3.94    | 2.21   | 1.91   | 1.08   | 0.51   | 0.35   | 0.14  | 0.04  | 0.01  |
| totale waterpeilstijging [m]              | 3.98    | 2.25   | 1.94   | 1.11   | 0.54   | 0.39   | 0.18  | 0.08  | 0.04  |
| Peil dok na storm voor stormpeil [m TAV]  | 7.28    | 5.55   | 5.24   | 4.41   | 3.84   | 3.69   | 3.48  | 3.38  | 3.34  |
| Peil dok na storm voor streefpeil [m TAV] | 7.98    | 6.25   | 5.94   | 5.11   | 4.54   | 4.39   | 4.18  | 4.08  | 4.04  |

(groene waarden: lager dan kombergingscriterium +4.50 m TAW)

Tabel 21 – Resultaten toets op hoogte benedenhoofd Mercatorsluis voor 2125.

|                                           |         |         |         |        |        |        |        |       |       |       |
|-------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| gem. kruinpeil vloeddeuren [m TAW]        | 6.76    | 7.00    | 7.25    | 7.50   | 7.75   | 7.80   | 7.95   | 8.00  | 8.10  | 8.25  |
| Oppervlakte Mercatordok [m <sup>2</sup> ] | 33775   | 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  | 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  | 4.50  |
| Streefpeil dok [m TAW]                    | 4.00    | 4.00    | 4.00    | 4.00   | 4.00   | 4.00   | 4.00   | 4.00  | 4.00  | 4.00  |
| q_stormmuur [l/s/m]                       | 1.00    | 1.00    | 1.00    | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
| Lengte stormmuren naast sluisdeur [m]     | 171     | 171     | 171     | 171    | 171    | 171    | 171    | 171   | 171   | 171   |
| q_tot_sluisdeur [l/s/m]                   | 3071.54 | 2219.48 | 1466.70 | 853.28 | 385.63 | 310.88 | 129.09 | 84.64 | 29.50 | 11.10 |
| Lengte sluisdeuren [m]                    | 15.04   | 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  | 2.00  |
| <b>Stijging waterpeil Mercatordok</b>     |         |         |         |        |        |        |        |       |       |       |
| t.g.v. overslag stormmuren [m]            | 0.04    | 0.04    | 0.04    | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.04  | 0.04  |
| t.g.v. overslag+overloop sluisdeur [m]    | 9.85    | 7.12    | 4.70    | 2.74   | 1.24   | 1.00   | 0.41   | 0.27  | 0.09  | 0.04  |
| totale waterpeilstijging [m]              | 9.88    | 7.15    | 4.74    | 2.77   | 1.27   | 1.03   | 0.45   | 0.31  | 0.13  | 0.07  |
| Peil dok na storm voor stormpeil [m TAV]  | 13.18   | 10.45   | 8.04    | 6.07   | 4.57   | 4.33   | 3.75   | 3.61  | 3.43  | 3.37  |
| Peil dok na storm voor streefpeil [m TAV] | 13.88   | 11.15   | 8.74    | 6.77   | 5.27   | 5.03   | 4.45   | 4.31  | 4.13  | 4.07  |

(groene waarden: lager dan kombergingscriterium +4.50 m TAW)

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](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)