



Vlaanderen
is wetenschap



21_066_1
WL rapporten

Scheldebekken – Sigmoplan

Overzicht ontwerp breuksteensorteringen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Scheldebekken - Sigmaplan

Overzicht ontwerp breuksteensorteringen

Verelst, K.; Visser, K.P.

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 2024
D/2024/3241/081

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P. (2024). Scheldebekken - Sigmaplan: Overzicht ontwerp breuksteensorteringen. Versie 3.0. WL Rapporten, 21_066_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv Regio Centraal	Ref.:	WL2024R21_066_1
Trefwoorden (3-5):	Scheldt; Sigmaplan; riprap; literature review		
Kennisdomeinen:	Waterbouwkundige constructies > Erosiebescherming>Breuksteen>Literatuur- en desktoponderzoek Waterbouwkundige constructies>Erosiebescherming>Gepenetreerde breuksteen>Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	23	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verelst, K.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door:Klaas Visser (Signature) Getekend op:2024-06-14 09:26:04 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2024-06-14 11:53:11 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2024-06-14 09:20:13 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

De Vlaamse Waterweg Regio Centraal heeft aan het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd een overzicht te maken van de breuksteensorteringen die binnen verschillende projecten met betrekking tot het Sigmaplan zijn voorgesteld als dijk- of oeverbekleding. Voor dit overzicht worden niet enkel ontwerpen van een dijkbekleding beschouwd voor Scheldebekken, maar ook ontwerpen van een dijkbekleding voor ringdijken van gecontroleerde overstromingsgebieden met gereduceerd getij. Hiervoor zijn binnen WL en bij de projectleiders van De Vlaamse Waterweg Regio Centraal rapporten of rekennota's van een twaalftal ontwerpstudies opgevraagd. Hierbij wordt opgemerkt dat de focus van dit rapport de voorgestelde breuksteensortering betreft en dat alternatieve bekledingen die in de verschillende ontwerpstudies voorgesteld zijn, niet beschouwd zijn.

Voor deze verschillende ontwerpstudies is eerst een overzicht gegeven van de toegepaste hydraulische randvoorwaarden en de op basis daarvan voorgestelde breuksteensorteringen. Met betrekking tot de voorgestelde breuksteensorteringen in de Zeeschelde zelf wordt vastgesteld dat in het afwaartse gedeelte van de Zeeschelde, in de zone tussen Fort Lillo en Liefkenshoek, golfklap ten gevolge van windgolven de maatgevende hydraulische belasting is. In het meer opwaartse gedeelte van de Schelde zijn de windgolven eerder beperkt en is vooral de stroming in de Schelde de maatgevende hydraulische belasting. Onder invloed van golfklap ten gevolge van windgolven worden beduidend hogere breuksteendiameters bepaald dan volgt uit de dimensionering onder invloed van stroming in de Schelde. Wat betreft de dimensionering onder invloed van stroming in de Schelde volgt voor bijna alle gedeeltes van de Schelde eenzelfde maatgevende stroomsnelheid. Echter, de voorgestelde breuksteensortering is niet dezelfde voor al deze gedeeltes van de Schelde. Dit kan verklaard worden door de verschillende lokale condities. In sommige studiegebieden wordt de stroomsnelheid nog vermenigvuldigd met een verhogingsfactor/krommingscoëfficiënt omwille van de ligging in een bocht, bij andere studiegebieden is de turbulentie verhoogd om invloed van palen in de Schelde in rekening te brengen, geeft een beduidend lagere waterdiepte aanleiding tot grotere breuksteensortering of worden beduidend grotere breuksteensortering berekend omwille van de grotere stroomsnelheden ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van voorbijvarende schepen.

Met betrekking tot de breuksteensorteringen voorgesteld voor de ringdijken van GOG-GGG gebieden wordt vastgesteld dat golfklap ten gevolge van windgolven de maatgevende hydraulische belasting is boven golfploop ten gevolge van windgolven en langsstroming. De berekende golfhoogte is afhankelijk van de grootte van het gebied en de oriëntatie van de ringdijk, maar ook van het type gebied. De voorgestelde breuksteensortering die aan de hand van deze golfhoogtes berekend wordt is hierbij ook zeer sterk afhankelijk van de taludhelling van de ringdijk. Bij een steilere taludhelling worden beduidend hogere breuksteensorteringen voorgesteld.

Daarnaast zijn nog enkele opmerkingen met betrekking tot de bepaling van de hydraulische belastingen en de dimensionering van de breuksteenbekleding geformuleerd.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	V
Lijst van de figuren	VI
1 Inleiding	1
2 Overzicht dimensionering dijk- of oeverbekleding uit breuksteen uit referenties	4
2.1 Ontwerp dijkbekleding GOG-GGG Vlassenbroek (Verelst <i>et al.</i> , 2012a)	4
2.2 Ontwerp dijkbekleding GOG Heindonk (Verelst <i>et al.</i> , 2012b).....	5
2.3 Ontwerp dijkbekleding GOG Schelland- Oudbroekpolder (Verelst <i>et al.</i> , 2019)	7
2.4 Ontwerp dijkbekleding GOG-GGG Wal/Zwijn (Antea Group, 2016)	8
2.5 Ontwerp dijkbekleding Scheldedijken GOG-GGG Wal/Zwijn (Verelst & Visser, 2023).....	9
2.6 Dijkwerken en leidingenstrook van Fort Filip tot Ontpoldering Lillo (Grontmij, 2015b)	11
2.7 Herstel verzakking ter hoogte van Liefkenshoektunnel (Grontmij, 2015a)	11
2.8 Rekennota bodem- en oeverbescherming Royerssluis (SBE nv, 2017).....	12
2.9 Ontwerpnota steenbestorting Wichelen (SBE nv, s.d.)	12
2.10 Dimensionering oeverbescherming Tijarm Zwijnaarde (Verelst <i>et al.</i> , 2018)	13
2.11 Ontwerp erosiebescherming in het kader van Brabo (Witteveen+Bos Belgium N.V., 2018)	14
2.12 Ontwerp bodembescherming Droogdokkenpark Antwerpen (SBE nv, 2016)	14
3 Algemeen overzicht en bespreking	15
4 Referenties	22

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht maatgevende condities voor het Zeescheldebekken uit Peeters <i>et al.</i> (2009)	17
Tabel 2 – Maximale waarde van primaire en secundaire golfhoogte gemeten op verschillende locaties in de Zeeschelde	19
Tabel 3 – Overzicht maximale waarden voor de toegepaste hydraulische belastingen	20
Tabel 4 – Overzicht voorgestelde breuksteensorteringen	21

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Projectlocaties uit de beschouwde ontwerpnota’s.....	2
Figuur 2 – Ringdijk (zwart), Schelgedijk/rivierdijk (blauw), overlooptdijk (oranje) en compartimenteringsdijk (geel) voor GOG-GGG Vlassenbroek.....	3
Figuur 3 – Ringdijk (zwart), Schelgedijk (blauw), overlooptdijk (oranje) en compartimenteringsdijk (geel) voor GOG-GGG Vlassenbroek.....	4
Figuur 4 – Ringdijk (zwart), rivierdijk (blauw) en overlooptdijk (oranje) voor GOG Heindonk	6
Figuur 5 – Ringdijk (zwart), rivierdijk/Schelgedijk (blauw) en overlooptdijk (oranje) voor GOG Schelland-Oudbroekpolder	7
Figuur 6 – Sigmadijk of rivierdijk (aangeduid met “S”), ringdijk (aangeduid met “R”) en overlooptdijk (aangeduid met “O”) voor GOG-GGG Wal-Zwijn;.....	9
Figuur 7 – Overlooptdijken (paars) en Schelgedijken (rood) in het nieuwe scenario	10

1 Inleiding

De Vlaamse Waterweg afdeling regio Centraal (DVW; contactpersoon: Hans De Preter) heeft aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd een overzicht te maken van de breuksteensorteringen die binnen verschillende projecten met betrekking tot het Sigmaplan zijn voorgesteld als dijk- of oeverbekleding. Voor dit overzicht worden niet enkel ontwerpen van een dijkbekleding beschouwd voor Scheldedijken, maar ook ontwerpen van dijkbekleding voor ringdijken, overloofdijken en compartimenteringsdijken van gecontroleerde overstromingsgebieden met gereduceerd getij (GOG-GGG-gebieden).

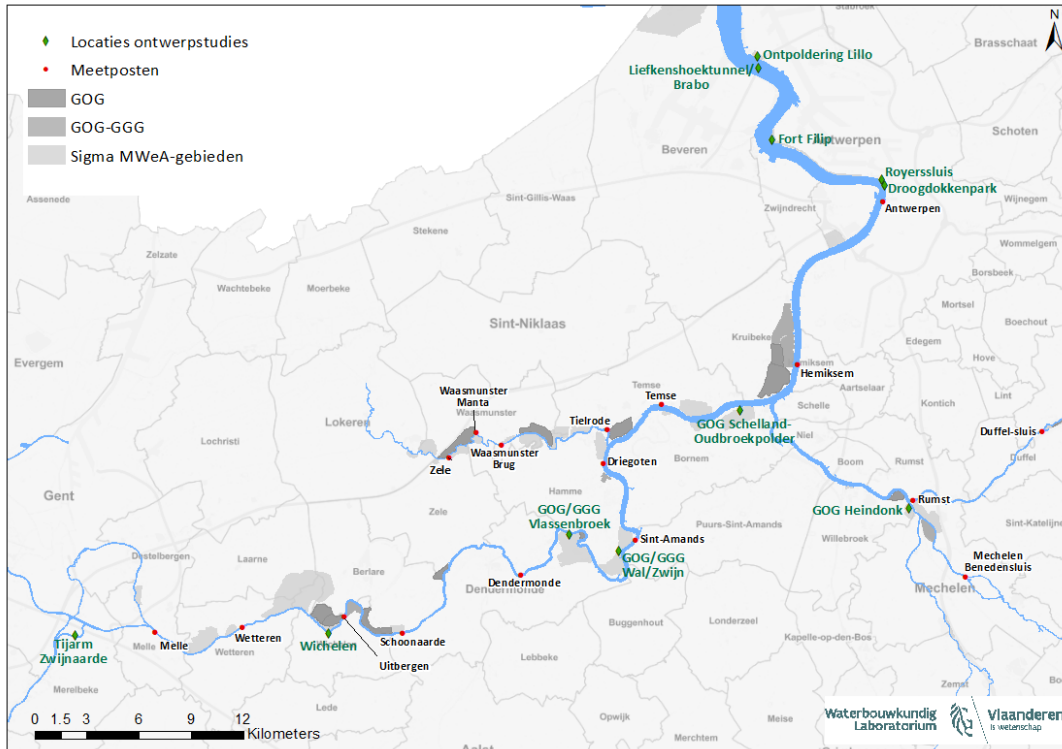
Hiervoor zijn binnen WL en bij de projectleiders van DVW vooreerst volgende rapporten/rekennota's van ontwerpstudies opgevraagd/geraadpleegd:

1. Ontwerp dijkbekleding GOG-GGG Vlassenbroek (Verelst *et al.*, 2012a)
2. Ontwerp dijkbekleding GOG Heindonk (Verelst *et al.*, 2012b)
3. Ontwerp dijkbekleding GOG Schelland- Oudbroekpolder (Verelst *et al.*, 2019)
4. Ontwerp dijkbekleding GOG-GGG Wal/Zwijn (Antea Group, 2016)
5. Ontwerp dijkbekleding Scheldedijken GOG-GGG Wal-Zwijn (Verelst & Visser, 2023)
6. Dijkwerken en leidingstrook van Fort Filip tot Ontpoldering Lillo (Grontmij, 2015b)
7. Herstel verzakking ter hoogte van Liefkenshoektunnel (Grontmij, 2015a)
8. Rekennota bodem- en oeverbescherming Royerssluis (SBE nv, 2017)
9. Ontwerpnota steenbestorting Wichelen (SBE nv, s.d.)

Daarnaast zijn ook volgende rapporten/rekennota's beschouwd van projecten binnen het Sigmagebied die geen ontwerpen van dijkbekleding omvatten of die ontwerpen van dijkbekleding omvatten van dijken die niet tot het Sigmaplan behoren:

10. Ontwerp erosiebescherming in het kader van Brabo (Witteveen+Bos Belgium N.V., 2018)
11. Ontwerp bodembescherming Droogdokkenpark Antwerpen (SBE nv, 2016)
12. Hydraulische impact oeverherstelling en dimensionering oeverbescherming Tijarm Zwijnaarde (Verelst *et al.*, 2018)

De projectlocaties uit deze rapporten/rekennota's zijn voorgesteld in Figuur 1.



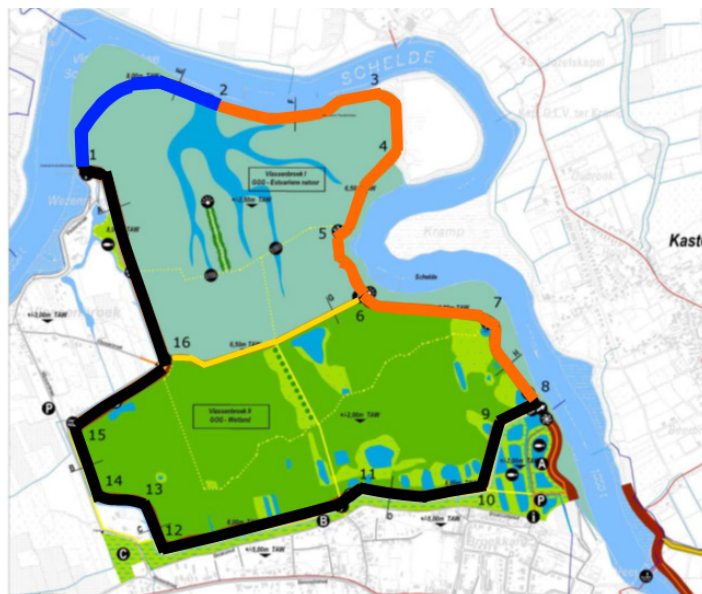
Figuur 1 – Projectlocaties uit de beschouwde ontwerpnota's

Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft voor elk van deze rapporten/rekennota's afzonderlijk een overzicht van de maatgevende hydraulische belastingen die bij de ontwerpen toegepast zijn en van de erosiebescherming uit breuksteen die voorgesteld is binnen deze projecten. In hoofdstuk 3 wordt een algemeen overzicht gegeven van de voorgestelde breuksteenbekleding en worden een aantal opmerkingen met betrekking tot de bepaling van de hydraulische belasting en het ontwerp van de breuksteenbekleding geformuleerd.

In dit rapport wordt volgende terminologie beschouwd met betrekking tot dijken van een GOG-GGG-gebied:

- 1) Rivierdijk: Een dijk die de primaire waterkering vormt tussen rivier en het achterland. Deze dijk dient bijgevolg hoog genoeg te zijn om het achterland te beschermen. De rivierdijken die naast de Schelde gelegen zijn worden soms ook aangeduid met Scheldedijk.
- 2) Ringdijk: Deze dijk vormt de begrenzing van het GOG-GGG-gebied aan landzijde en is net als de rivierdijk een primaire waterkering. Bijgevolg is deze dijk ook hoog genoeg om het achterland te beschermen.
- 3) Overloopdijk: Een verlaagde dijk, waarover het water van de rivier bij hoge rivierwaterstand kan overstromen. Hierdoor wordt het GOG-GGG-gebied gevuld en worden de rivierwaterstanden opwaarts van dit gebied verlaagd met het oog op het tegengaan van overstromingen in het opwaartse gedeelte van de rivier.
- 4) Compartimenteringsdijk: Dijk die een scheiding vormt tussen twee afzonderlijke gedeelten van een GOG-GGG-gebied.

Als voorbeeld zijn deze verschillende types dijken in Figuur 2 aangeduid voor het GOG-GGG-gebied Vlassenbroek. De ringdijk is in zwart gekleurd, de rivierdijk in blauw, de overloopdijk in oranje en de compartimenteringsdijk in geel.



Figuur 2 – Ringdijk (zwart), Scheldedijk/rivierdijk (blauw), overlooptdijk (oranje) en compartimenteringsdijk (geel) voor GOG-GGG Vlassenbroek

Hierbij moet het volgende opgemerkt worden:

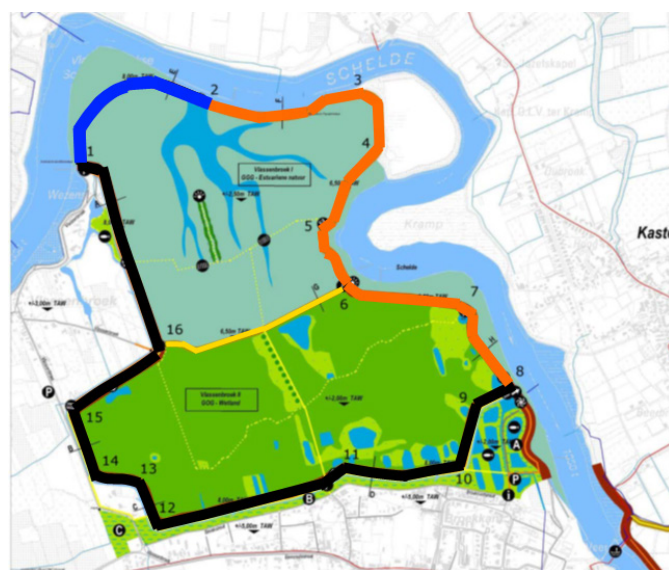
- Voor dit onderzoek zijn rapporten/rekennota's met betrekking tot ontwerpen waarbij een bodembescherming of dijkbekleding is voorgesteld uit Open Steenasfalt (OSA) of een andere alternatieve erosiebescherming dan breuksteen, niet beschouwd. Dit type bodembescherming is onder andere aanwezig als bodembescherming naast de kaaimuren van de Schelde te Antwerpen.
- Een groot deel van de referenties die beschouwd zijn voor het overzicht van de breuksteenbekleding voor de dijken van het Sigmaplan zijn rapporten van ontwerpen die door WL zelf zijn uitgevoerd of waarbij het ontwerp door WL is gereviseerd.
- De referenties die in dit rapport zijn beschouwd betreffen ontwerprapporten of rekennota's. Het overzicht van de breuksteenbekleding voor de dijken van het Sigmaplan betreft bijgevolg de erosiebescherming uit breuksteen die in deze ontwerpen is voorgesteld. Mogelijk kan binnen deze projecten, afhankelijk van de beschikbaarheid van breuksteen of van economische of andere ontwerptechnische redenen, een andere sortering breuksteen of een ander type erosiebescherming aangelegd zijn dan voorgesteld is in deze rapporten of rekennota's.

2 Overzicht dimensionering dijk- of oeverbekleding uit breuksteen uit referenties

Dit hoofdstuk geeft voor elke beschouwde referentie een overzicht van de maatgevende hydraulische belastingen die bij het betreffende ontwerp toegepast is en een overzicht van de overeenkomstige breuksteenbekleding die voorgesteld is in het ontwerp. Hierbij moet opgemerkt worden dat de verschillende paragrafen in dit hoofdstuk een eerder beknopte samenvatting van het betreffende ontwerp bevatten, waarbij enkel de dijken vermeld worden waarvoor een breuksteenbekleding is voorgesteld. Voor een meer uitgebreidere beschrijving en voor de bekleding van de overige dijken wordt verwezen naar de referenties vermeld bij de verschillende paragrafen.

2.1 Ontwerp dijkbekleding GOG-GGG Vlassenbroek (Verelst *et al.*, 2012a)

Op vraag van DVW is door WL het ontwerp van de dijkbekleding van de ringdijken, de Scheldedijk, de compartimenteringsdijk en de overlooptdijken uitgevoerd. Figuur 3 toont de ligging van deze dijken rond het GOG-GGG-gebied Vlassenbroek.



Figuur 3 – Ringdijk (zwart), Scheldedijk (blauw), overlooptdijk (oranje) en compartimenteringsdijk (geel) voor GOG-GGG Vlassenbroek

In het ontwerp is een breuksteenbekleding voorgesteld voor de rivierzijde van de Scheldedijk, de rivierzijde van de overlooptdijken en de GOG-zijde van de gedeelten van de ringdijk die belast worden door golven uit de richting W, WNW en NW. Enkel bij een storm met wind uit deze windrichtingen wordt het GOG-GGG-gebied namelijk gevuld en kunnen binnen het gebied ontstane windgolven de dijkbekleding van de ringdijken belasten. Hierbij wordt opgemerkt dat het noordelijke gedeelte van het overstromingsgebied een GGG-betreft, waarbij twee maal per dag via een inwateringssluis water in het gebied ingelaten wordt. Bij een GGG-gebied kan de dijkbekleding van een dijk bijgevolg ook belast worden door wind uit andere windrichtingen.

Echter de windsnelheden en bijgevolg ook de gegenereerde golfhoogtes zijn lager dan bij wind uit de richtingen W, WNW en NW.

De dijkbekleding voor de rivierzijde van de Scheldedijk en de overloopdijk is ontworpen op basis van stroming in de Schelde, golfklap ten gevolge van scheepsgolven en golfklap ten gevolge van windgolven op de Schelde. De dijkbekleding aan GOG-zijde van de ringdijk is ontworpen op basis van golfklap en golfoploop ten gevolge van windgolven gegenereerd in het gebied. Hierbij wordt opgemerkt dat golfoploop een minder maatgevende belasting is dan golfklap.

De maximale stroomsnelheid aan rivierzijde van de overloopdijk en de rivierdijk en de maximale golfhoogte van de primaire scheepsgolven is overgenomen uit Peeters *et al.*, (2009). De maximale stroomsnelheid bedraagt 2.5 m/s, de maximale primaire golfhoogte van scheepsgolven op de Schelde bedraagt 0.50 m. De golfhoogte van de secundaire scheepsgolven is berekend aan de hand van de formuleringen van het programma DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). De maximale waarde van de op deze wijze berekende golfhoogte van de secundaire golven bedraagt 0.52 m.

De golfhoogte van windgolven op de Schelde wordt voor een aantal terugkeerperiodes afgelezen uit de Excel-files als bijlage bij Peeters *et al.*, (2009). Voor de rivierzijde van de overloopdijk en de rivierzijde van de Scheldedijk wordt op deze wijze een maximale golfhoogte van 0.60 m bekomen bij een terugkeerperiode van 4000 jaar en 0.59 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar voor wind uit het ZW. De windgolven in het GOG-GGG-gebied worden berekend aan de hand van de formuleringen volgens Brettschneider ((IMDC & WL, (2010); Pilarczyk, (1998)), rekening houdend met de beschikbare strijklengte voor de verschillende beschouwde windrichtingen. Op deze wijze wordt voor de GOG-zijde van de ringdijk een maximale golfhoogte van 1.14 m bekomen bij een terugkeerperiode van 4000 jaar en 1.10 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar.

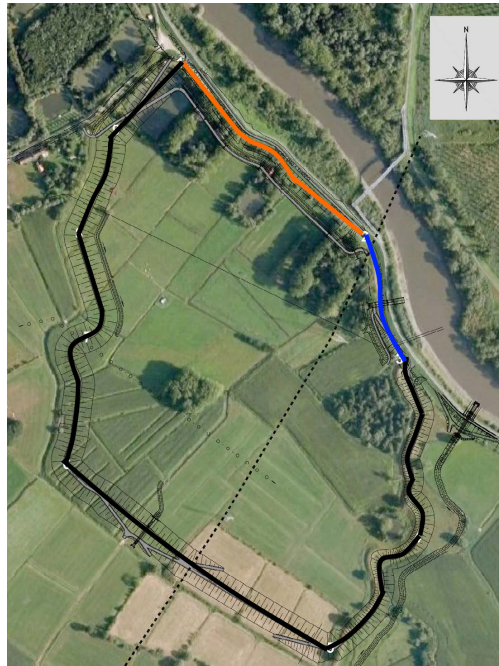
Aan de hand van deze hydraulische belastingen is de dimensionering van de breuksteenbekleding uitgevoerd. Voor de rivierzijde van de overloopdijk en de Scheldedijk wordt een breuksteensortering 5-40 kg bepaald, dewelke zoals in het typeprofiel voorzien wordt tot een peil gelijk aan 0.50 m lager dan het kruinpeil van de overloopdijk.

Voor de ringdijken van het GOG-GGG zijn in de ontwerpfase twee taludhellingen beschouwd, namelijk een taludhelling 12/4 en een taludhelling 16/4. Voor de taludhelling 12/4 aan GOG-zijde van de ringdijk wordt een breuksteensortering 40-200 kg en een breuksteensortering 60-300 kg bepaald. Voor de taludhelling 16/4 wordt maximaal een breuksteensortering 40-200 kg bepaald. Voor de beide taludhellingen aan GOG-zijde van de ringdijk is de breuksteensortering afhankelijk van de oriëntatie van de dijk ten opzichte van de windrichting. De windrichting, waarbij de strijklengte in het GOG-GGG de grootste is, zal aanleiding geven tot zwaardere breuksteensorteringen. Aan GOG-zijde van de ringdijk wordt het talud ofwel volledig bekleed met breuksteen tot het kruinpeil ofwel wordt breuksteen voorzien tot het peil, waarbij de golfklap maximaal is.

2.2 Ontwerp dijkbekleding GOG Heindonk (Verelst *et al.*, 2012b)

WL heeft op vraag van DVW het ontwerp uitgevoerd van de dijkbekleding van de ringdijken, de rivierdijk en de overloopdijk van het GOG Heindonk langs de Dijle. Figuur 4 toont de ligging van deze dijken rond het GOG-gebied.

In het ontwerp is een breuksteenbekleding voorgesteld voor rivierzijde van de rivierdijk, de rivierzijde van de overloopdijken en de GOG-zijde van de gedeelten van de ringdijk die belast worden door golven uit de richting W, WNW en NW. De breuksteenbekleding voor de rivierzijde van de rivierdijk en de overloopdijk is ontworpen op basis van stroming in de Schelde, golfklap ten gevolge van scheepsgolven en windgolven op de Schelde. De dijkbekleding aan GOG-zijde van de ringdijk is ontworpen op basis van golfklap en golfoploop ten gevolge van windgolven gegenereerd in het gebied. Hierbij wordt opgemerkt dat golfoploop een minder maatgevende belasting is dan golfklap.



Figuur 4 – Ringdijk (zwart), rivierdijk (blauw) en overloofdijk (oranje) voor GOG Heindonk

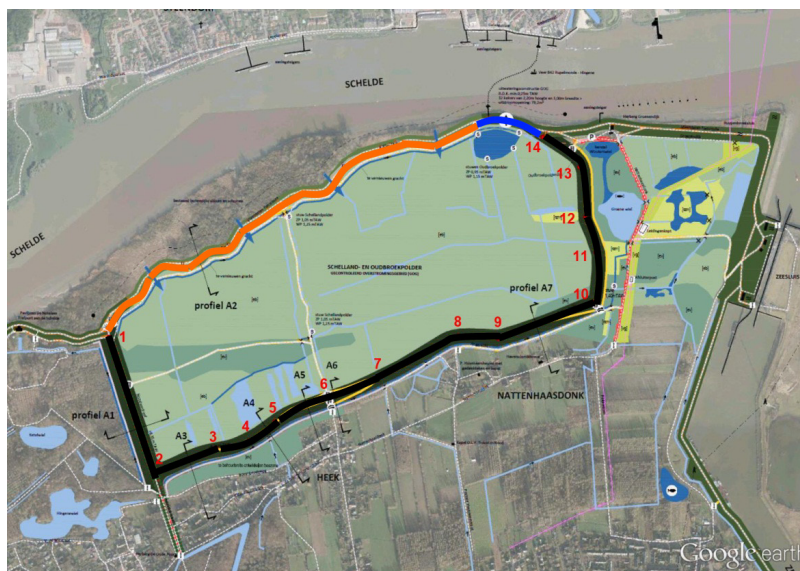
Analoog als bij het ontwerp van de dijkbekleding voor GOG-GGG Vlassenbroek is de maximale stroomsnelheid aan rivierzijde van de overloofdijk en de rivierdijk en de maximale golfhoogte van de primaire scheepsgolven overgenomen uit Peeters *et al.* (2009). De maximale stroomsnelheid bedraagt 2.5 m/s, de maximale golfhoogte van de primaire golfhoogte bedraagt 0.50 m. De golfhoogte van de secundaire golfhoogte van scheepsgolven is berekend aan de hand van de formulerings van het programma DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). De maximale waarde van de op deze wijze berekende golfhoogte van de secundaire scheepsgolven op de Dijle bedraagt 0.55 m.

De golfhoogte van windgolven op de Dijle wordt voor een aantal terugkeerperiodes afgelezen uit de Excel-files als bijlage bij Peeters *et al.* (2009). Voor de rivierzijde van de overloofdijk en rivierdijk wordt op deze wijze een maximale golfhoogte van 0.36 m bekomen bij een terugkeerperiode van 4000 jaar en 0.35 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar. De windgolven in het GOG-GGG-gebied worden berekend aan de hand van de formulerings volgens Brettschneider ((IMDC & WL, (2010); Pilarczyk, (1998)), rekening houdend met de beschikbare strijklengte voor de verschillende beschouwde windrichtingen. Voor de terugkeerperiode 4000 jaar wordt op deze wijze een maximale golfhoogte van windgolven in het GOG berekend van 0.74 m en voor een terugkeerperiode 2500 jaar een golfhoogte van 0.73 m.

Aan de hand van deze hydraulische belastingen is de dimensionering van de breuksteenbekleding uitgevoerd. Voor de rivierzijde van de overloofdijk en de rivierdijk wordt een breuksteensortering 5-40 kg bepaald, dewelke zoals in het typeprofiel voorzien wordt tot een peil gelijk aan 0.50 m lager dan het kruinpeil van de overloofdijk. Voor de GOG-zijde van de rivierdijk wordt een breuksteenbekleding 80/200 mm voorgesteld. Voor de GOG-zijde van de ringdijk wordt enkel een breuksteenbekleding voorgesteld voor de twee dijkvakken die belast worden door golven uit de richting W, WNW en NW. In één dijkvak wordt een breuksteensortering 5-40 kg voorgesteld, in het andere een breuksteensortering 10-60 kg. Voor beide dijkvakken wordt voorgesteld om de breuksteenbekleding aan te brengen tot een peil +4.30 mTAW, i.e. in de zone waar de golfklap maximaal is.

2.3 Ontwerp dijkbekleding GOG Schelland- Oudbroekpolder (Verelst *et al.*, 2019)

Voor de overlooptdijk en de ringdijk van het GOG Schelland-Oudbroekpolder werd door WL in opdracht van DVW de dijkbekleding gedimensioneerd. Figuur 3 toont de ligging van deze dijken rond het GOG-gebied. Hierbij moet opgemerkt worden dat in Verelst *et al.* (2019) de dimensionering van de dijkbekleding voor het kleine gedeelte Schelddedijk beschouwd is onder de dimensionering van de dijkbekleding van de overlooptdijk.



Figuur 5 – Ringdijk (zwart), rivierdijk/Schelddedijk (blauw) en overlooptdijk (oranje) voor GOG Schelland-Oudbroekpolder

In het ontwerp is een breuksteenbekleding voorgesteld voor rivierzijde van de Schelddedijk en voor de gedeelten van de ringdijk die belast worden door golven uit de richting W, WNW en NW. De dijkbekleding aan rivierzijde van de overlooptdijk is gedimensioneerd op basis van stroming in de Schelde en golfklap van windgolven en scheepsgolven op de Schelde. De dijkbekleding aan GOG-zijde van de ringdijk is gedimensioneerd op basis van golfklap en golfoploop ten gevolge van windgolven in het GOG.

Analoog als bij het ontwerp van de dijkbekleding voor GOG-GGG Vlassenbroek en bij het ontwerp van de dijkbekleding voor GOG Heindonk is de maximale stroomsnelheid aan rivierzijde van de overlooptdijk en de rivierdijk en de maximale golfhoogte van de primaire scheepsgolven overgenomen uit Peeters *et al.*, (2009). De maximale stroomsnelheid bedraagt 2.5 m/s, de maximale golfhoogte van de primaire golfhoogte bedraagt 0.50 m. De golfhoogte van de secundaire golfhoogte van scheepsgolven is berekend aan de hand van de formulerings van het programma DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). De maximale waarde van de op deze wijze berekende golfhoogte van de secundaire scheepsgolven op de Schelde ter hoogte van de Schelland-Oudbroekpolder bedraagt 0.50 m.

De golfhoogte van windgolven op de Schelde wordt voor een aantal terugkeerperiodes afgelezen uit de Excel-files als bijlage bij Peeters *et al.* (2009). Voor de rivierzijde van de overlooptdijk wordt op deze wijze een maximale golfhoogte van 0.98 m bepaald bij een terugkeerperiode van 4000 jaar en 0.95 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar. De windgolven in het GOG-gebied worden berekend aan de hand van de formulerings volgens Brettschneider ((IMDC & WL, (2010); Pilarczyk, (1998)), rekening houdend met de beschikbare strijklengte voor de verschillende beschouwde windrichtingen. Voor de terugkeerperiode 4000 jaar wordt op deze wijze een maximale golfhoogte van windgolven in het GOG berekend van 1.10 m en voor een terugkeerperiode 2500 jaar een golfhoogte van 1.08 m.

Aan de hand van deze hydraulische belastingen is de dimensionering van de dijkbekleding uitgevoerd. Voor de rivierzijde van de overloopdijk wordt besloten dat de gepenetreerde breuksteen die reeds aan rivierzijde van de huidige Scheldedijk aanwezig is, voldoet en dat geen breuksteen nodig is.

Voor de ringdijken wordt enkel een breuksteenbekleding voorgesteld voor de dijkvakken die belast worden door golven uit de richting W, WNW en NW. In de ontwerpfase werden echter nog twee taludhellingen beschouwd, namelijk een taludhelling 12/4 en een taludhelling 16/4. Voor deze taludhellingen werden verschillende scenario's gedefinieerd die volgden uit de toetsing van de grasbekleding onderhevig aan golfklap ten gevolge van windgolven en uit de toetsing van de golfoverslagdebieten. Op deze wijze werd aan de opdrachtgever de mogelijkheid geboden om zelf een combinatie van terugkeerperiode van waterstand, windsnelheid en golfoverslagdebieten te beschouwen en zo een dijkbekleding te selecteren voor de ringdijk. Algemeen werd besloten dat een taludhelling 16/4 aan GOG-zijde van de ringdijk het voordeel heeft dat voor meer dijkvakken een grasbekleding volstaat dan bij een taludhelling 12/4 aan GOG-zijde. Voor dijkvakken waar de graskleding niet kan volstaan kan er met oog op een alternatieve bekleding gekozen worden tussen breuksteen, gepenetreerde breuksteen of Open Steenasfalt (OSA). Deze alternatieve bekleding wordt voorzien ofwel tot het kruinpeil van de dijk, ofwel tot de peilen +3.20 mTAW, +3.50 mTAW of +3.60 mTAW.

Uit de dimensionering van de breuksteen volgt voor een taludhelling 16/4 een breuksteensortering 5-40 kg voor de dijkvakken waarbij voorgesteld wordt om de breuksteen lager dan het peil +3.50 mTAW of lager dan het peil +3.60 mTAW aan te brengen. Bij het voorzien van de breuksteen tot het kruinpeil van de dijk volgt uit de dimensionering een breuksteensortering 15-120 kg. Bij toepassing van de taludhelling 12/4 aan GOG-zijde wordt maximaal een breuksteensortering 40-200 kg voorgesteld indien deze tot het kruinpeil van de ringdijk wordt aangebracht. Voor dijkvakken waarbij de breuksteen wordt aangebracht tot lagere peilen volgt uit de dimensionering een maximale breuksteensortering 10-60 kg.

2.4 Ontwerp dijkbekleding GOG-GGG Wal/Zwijn (Antea Group, 2016)

Dit rapport betreft het ontwerp van de dijkbekleding voor de rivierdijk, de ringdijk en de overloopdijk van GOG-GGG Wal en Zwijn. Het ontwerp is uitgevoerd door Antea Group. Door WL is een revisie uitgevoerd van dit ontwerp. Het beschouwde ontwerprapport betreft echter het rapport waarop door WL opmerkingen zijn geformuleerd, de laatste versie van het rapport is niet ter beschikking van WL.

De ligging van de rivierdijk, de ringdijk en de overloopdijk van GOG-GGG Wal en Zwijn is voorgesteld in Figuur 6. In het ontwerp is een breuksteenbekleding voorgesteld voor de GOG-GGG zijde van de ringdijk van Wal, voor de GOG-GGG zijde van de ringdijk van Zwijn en voor de GOG-GGG zijde van de rivierdijk van Wal. Een ontwerp van de dijkbekleding aan rivierzijde van de rivierdijk van Wal en aan rivierzijde van de overloopdijken van Wal en Zwijn is niet uitgevoerd omdat de bestaande dijkbekleding behouden blijft en omdat de hydraulische belasting aan rivierzijde van deze dijken niet wijzigt.

In het ontwerp wordt een breuksteenbekleding voorzien aan GOG-GGG-zijde van de ringdijk van Zwijn en aan GOG-GGG-zijde van de rivierdijk. De dijkbekleding aan GOG-GGG-zijde van de ringdijk en de rivierdijk is gedimensioneerd op basis van golfklap van windgolven in het GOG-GGG gebied.

De windgolven in het GOG-GGG-gebied worden berekend aan de hand van de formuleringen volgens Brettschneider ((IMDC & WL, (2010); Pilarczyk, (1998)), rekening houdend met de aanwezige strijklengte voor de verschillende beschouwde windrichtingen. Alle windrichtingen worden beschouwd aangezien het een GGG-gebied betreft, waarin via een inwateringssluis twee maal per dag water wordt binnengelaten. Voor de Scheldedijk, respectievelijk de ringdijk van GOG-GGG Zwijn worden op deze wijze golven met een maximale golfhoogte van 0.46 m, respectievelijk 0.40 m bij een terugkeerperiode van 4000 jaar berekend en golven met een maximale golfhoogte van 0.45 m, respectievelijk 0.39 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar. Voor de ringdijk van GOG-GGG Wal worden golven met een maximale golfhoogte van 0.33 m berekend bij een terugkeerperiode van 4000 jaar en golven met een maximale golfhoogte van 0.32 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar.

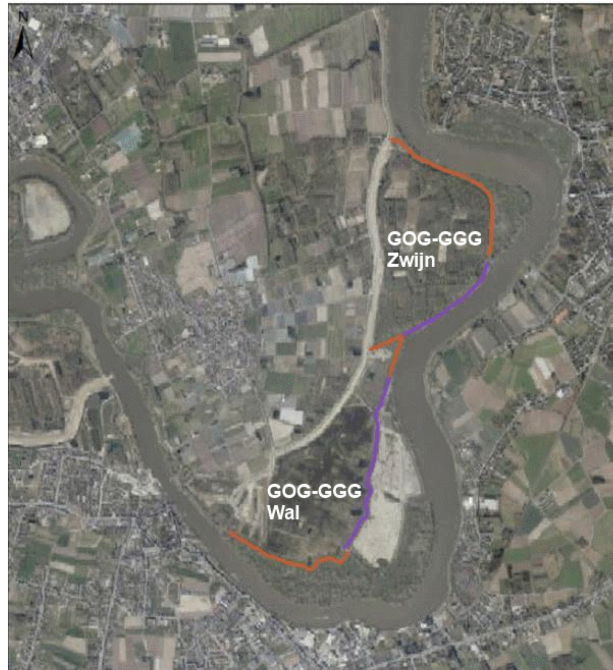


Figuur 6 – Sigmadijk of rivierdijk (aangeduid met “S”), ringdijk (aangeduid met “R”) en overlooptdijk (aangeduid met “O”) voor GOG-GGG Wal-Zwijn;

Aan de hand van deze hydraulische belastingen is de dimensionering van de dijkbekleding uitgevoerd. Hierbij is de weerstand van de dijkbekleding getoetst tegen golfklap en golfoploop van windgolven in het GOG-GGG-gebied. Uit de dimensionering van de breuksteen volgt dat voor de ringdijk van GOG-GGG Zwijn en voor de GOG-GGG-zijde van de rivierdijk geen breuksteen nodig is indien gras met een goede zodekwaliteit op deze dijk wordt verondersteld. Indien deze zodekwaliteit door de GGG-werking in het gebied niet kan gegarandeerd worden, dient een breuksteenbekleding sortering 5-40 kg voorzien te worden tot het peil +3.50 mTAW.

2.5 Ontwerp dijkbekleding Scheldedijken GOG-GGG Wal/Zwijn (Verelst & Visser, 2023)

Voor GOG-GGG Wal en Zwijn is de dijkbekleding van ringdijken en overlooptdijken uitgevoerd door Antea Group (Antea Group, 2016). DVW heeft echter omwille van financiële redenen beslist om de lengtes van de voorziene overlooptdijken te verkorten in de toekomstige GOG-GGG's van Wal en Zwijn. Daardoor zijn er in het Noorden en het Zuiden van deze GOG-GGG's gedeeltes van de bestaande Scheldedijken die behouden blijven en niet omgevormd worden tot overlooptdijken. In Figuur 7 zijn de overlooptdijken en de Scheldedijken uit dit nieuwe scenario aangeduid in respectievelijk paars en rood. Om die reden heeft DVW aan het WL gevraagd om te controleren of er aan GOG-GGG-zijde van de resterende gedeeltes Scheldedijken in het nieuwe scenario breuksteen voorzien moet worden, en indien dit het geval is, tot welk peil deze breuksteenbekleding dient aangebracht te worden.



Figuur 7 – Overloopdijken (paars) en Schelddijken (rood) in het nieuwe scenario

Aan GOG-GGG-zijde van de rivierdijken in GOG-GGG Wal en Zwijn zijn golfklap en golfploop ten gevolge van windgolven de optredende hydraulische belastingen, aan rivierzijde van de rivierdijk zijn dit langstroming in de Schelde en golfklap ten gevolge van zowel windgolven als scheepsgolven. Echter uit vorige studies met betrekking tot de dimensionering van de dijkbekleding is gebleken dat golfploop ten gevolge van windgolven aan GOG-GGG-zijde en golfklap ten gevolge van scheepsgolven aan rivierzijde niet maatgevend zijn in vergelijking met de overige hydraulische belastingen. Bijgevolg zijn enkel golfhoogte en piekperiode bepaald voor windgolven in het GOG-GGG, alsook de golfhoogte en de piekperiode van windgolven op de Schelde en de stroomsnelheid ten gevolge van de langstroming in de Schelde. Voor GOG-GGG Wal, respectievelijk GOG-GGG Zwijn volgt hieruit een maximale golfhoogte aan rivierzijde gelijk aan 0.65 m, respectievelijk 0.58 m bij een terugkeerperiode van 4000 jaar en een golfhoogte gelijk aan 0.64 m, respectievelijk 0.57 m bij een terugkeerperiode van 2500 jaar. Aan GOG-GGG-zijde van de rivierdijk wordt voor de windgolven in GOG-GGG Wal, respectievelijk GOG-GGG Zwijn een maximale golfhoogte (bij een waterstand in het gebied met een terugkeerperiode van 4000 jaar) gelijk aan 0.84 m, respectievelijk 0.88 m berekend bij een terugkeerperiode van de windsnelheid van 4000 jaar en een golfhoogte gelijk aan 0.82 m, respectievelijk 0.86 m bij een terugkeerperiode van de windsnelheid van 2500 jaar. Voor de maximale waarde van de stroomsnelheid in de Schelde wordt, analoog als in andere studies, de waarde van 2.5 m/s uit Peeters *et al.* (2009) beschouwd.

Aan de hand van deze hydraulische belastingen is daarna de dimensionering van de dijkbekleding aan GOG-GGG-zijde van de rivierdijk uitgevoerd. Bij het behouden van de huidige taludhelling aan GOG-GGG zijde van de rivierdijk wordt voor Wal een breuksteenbekleding sortering 5-40 kg berekend met een beperkte hoogte van 0.70 m boven het maaiveld, voor GOG-GGG Zwijn wordt bij een taludhelling 8/4 aan GOG-GGG-zijde een breuksteensortering 40-200 kg tot het kruinpeil van de dijk berekend. Bij een taludhelling 12/4 aan GOG-GGG-zijde wordt een breuksteensortering 15-120 kg berekend bij een windsnelheid met terugkeerperiode 4000 jaar. Om te weerstaan aan golven gegenereerd bij een windsnelheid met terugkeerperiode 1000 jaar wordt een breuksteensortering 10-60 kg berekend. Daarnaast is voor GOG-GGG Zwijn het verflauwen van de taludhelling aan GOG-GGG-zijde ook nagegaan. Hieruit volgt dat geen breuksteen nodig is bij verflauwen van de taludhelling naar helling 12/4 en een terugkeerperiode van de windsnelheid van 1000 jaar en dat bij verflauwen van de taludhelling naar 16/4 een grasbekleding kan volstaan aan polderzijde van de dijk om te weerstaan aan golfklap ten gevolge van windgolven.

Aangezien zowel voor GOG-GGG Wal als voor GOG-GGG Zwijn de betreffende rivierdijken gelegen zijn op de dijk tussen het GOG-GGG en de Schelde en deze geen primaire kering betreffen, kan er enkel erosie van het dijklichaam zelf optreden. Hieruit en omwille van de conservatieve dimensionering van de dijkbekleding is besloten dat voor GOG-GGG Wal de huidige grasbekleding kan volstaan en dat voor GOG-GGG Zwijn de alternatieve bekleding mogelijk kan weggelaten worden.

Voor de volledigheid is ook de dimensionering van de dijkbekleding van de rivierdijk voor GOG-GGG Wal en GOG-GGG Zwijn uitgevoerd. Hieruit volgt dat een grotere breuksteensortering nodig is om te weerstaan aan de langsstroming in de Schelde dan om te weerstaan aan golfklap ten gevolge van windgolven. Uit de dimensionering volgt dat voor de rivierdijken van GOG-GGG Wal en GOG-GGG Zwijn een breuksteensortering 5-40 kg dient voorzien te worden.

2.6 Dijkwerken en leidingenstrook van Fort Filip tot Ontpoldering Lillo (Grontmij, 2015b)

Deze rekennota betreft de dimensionering van de dijkbekleding uit breuksteen in zone 4 van het project "dijkwerken en leidingenstrook van Fort Filip tot Ontpoldering Lillo". Zone 4 van dit project strekt zich uit langs de rechteroever van de Schelde tussen de Boudewijn- en Van Cauwelaertsluis en de Liefkenshoektunnel.

Het typeprofiel van de dijk voorziet een dijkbekleding uit breuksteen tot het peil + 9.50 mTAW. Bij de dimensionering van de dijkbekleding zijn stroming in de Schelde en windgolven als maatgevende belastingen beschouwd. Voor stroming in de Schelde volgt uit Peeters *et al.* (2009) een stroomsnelheid gelijk aan 2.50 m/s, voor windgolven is een maximale golfhoogte van 1.70 m beschouwd.

De dijkbekleding is gedimensioneerd aan de hand van de formulering van Van der Meer voor golfklap en golfploop (CIRIA; CUR, 2007; Pilarczyk, 1998) en aan de hand van de formulering volgens Izbash (CIRIA; CUR, 2007; Franken et al., 1995) voor stroming in de Schelde. Uit deze dimensionering volgt voor een taludhelling 16/4 van de oever een breuksteensortering 60-300 kg. Hierbij wordt opgemerkt dat golfklap ten gevolge van windgolven de maatgevende hydraulische belasting is.

2.7 Herstel verzakking ter hoogte van Liefkenshoektunnel (Grontmij, 2015a)

Deze rekennota betreft de dimensionering van de dijkbekleding als herstelling van de erosie van het dijktafblad op rechteroever van de Schelde ter hoogte van de Liefkenshoektunnel.

Het typeprofiel van de dijk voorziet een dijkbekleding uit breuksteen tot het peil + 9.50 mTAW. Bij de dimensionering van de dijkbekleding zijn stroming in de Schelde en windgolven als maatgevende belastingen beschouwd. Voor stroming in de Schelde volgt uit Peeters *et al.* (2009) een stroomsnelheid gelijk aan 2.50 m/s, voor windgolven is een maximale significante golfhoogte van 1.70 m beschouwd.

De dijkbekleding is gedimensioneerd aan de hand van de formulering van Van der Meer voor golfklap (CIRIA; CUR, 2007; Pilarczyk, 1998) en aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk uit de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007) voor stroming in de Schelde. Uit deze dimensionering volgt een breuksteensortering 60-300 kg bij een taludhelling 16/4 van de oever. Hierbij wordt opgemerkt dat golfklap windgolven de maatgevende hydraulische belasting is.

2.8 Rekennota bodem- en oeverbescherming Royerssluis (SBE nv, 2017)

Deze rekennota betreft het ontwerp van de bodem- en oeverbescherming van de zuidelijke dijk in de toegangseul naar de Royerssluis. De oeverbescherming is door SBE nv gedimensioneerd om te weerstaan aan windgolven, stroming en belasting van voorbijvarende schepen, de bodembescherming is gedimensioneerd om te weerstaan aan stroming ten gevolge van schroefwerking van schepen. Voor de voorbijvarende schepen worden een duwkonvooi CEMT-klasse VIb beschouwd, een Coaster en een binnenvaartschip CEMT klasse VIa.

De scheepsbelastingen betreffen de retourstroming van de voorbijvarende schepen, de frontgolf, de secundaire scheepsgolf en de belastingen door hoofdschroef en boegschroef. Uit Peeters et al. (2009) volgt een grootte van de retourstroming gelijk aan 0.50 m/s. Deze waarde is voor de verschillende beschouwde scheepstypes nagerekend op basis van de methode van Schijf toegepast in het programma DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). Op basis hiervan wordt een maximale waarde van de retourstroming gelijk aan 1.2 m/s bekomen. Wat scheepsgolven betreft volgt uit Peeters et al. (2009) dat de haalgolf van het schip altijd groter is dan de secundaire scheepsgolven en de frontgolf. In de meest nadelige toestand is de golfhoogte van de haalgolf voor de locatie Oosterweel-Hoboken gelijk aan 0.50 m. De belastingen op de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef zijn bepaald aan de hand van de methodologie beschreven in het PIANC rapport WG180 (MarCom Working Group 180, 2015). Voor de hoofdschroef volgt uit deze berekening een stroomsnelheid gelijk aan 1.9 m/s voor het duwkonvooi CEMT klasse VIb, respectievelijk 3.7 m/s voor het binnenvaartschip CEMT klasse VIa en 4.1 m/s voor de Coaster. Voor de boegschroef volgt uit de berekeningen een stroomsnelheid aan de bodem gelijk aan 2.4 m/s voor het duwkonvooi CEMT klasse VIb, respectievelijk 3.1 m/s voor het binnenvaartschip CEMT klasse VIa en de Coaster. Voor het binnenvaartschip CEMT klasse VIa is de stroomsnelheid aan de bodem voor de boegschroef ook berekend aan de hand van de formuleringen voor pumpjets in het PIANC rapport WG180 (MarCom Working Group 180, 2015). Uit deze berekening volgt een stroomsnelheid aan de bodem gelijk aan 6.6 m/s. Het toepassen van de formuleringen voor het bepalen van de stroomsnelheid van de boegschroef tegen een gehele oever geeft aanleiding tot een stroomsnelheid gelijk aan 3.2 m/s voor het duwkonvooi CEMT klasse VIb, respectievelijk 3.3 m/s voor het binnenvaartschip CEMT klasse VIa en 5.6 m/s voor de Coaster.

Wat betreft de stroomsnelheid ten gevolge van de afvoer van de rivier/waterloop vermeldt Peeters et al. (2009) een sectiegemiddelde stroomsnelheid gelijk aan 2.5 m/s. Voor windgolven wordt een significante golfhoogte gelijk aan 1.0 m afgeleid uit Peeters et al. (2009).

Aan de hand van deze hydraulische belastingen op de bodem en de oever is dimensionering van de bodembescherming en oeverbescherming uit breuksteen uitgevoerd. Op de bodem dient een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen 5-40 kg voorzien te worden om de weerstaan aan deze hydraulische belastingen. Voorgesteld wordt om deze bodembescherming ook op de oever te voorzien in de zone onder +1.50 mTAW. Boven dit peil kan een breuksteensortering 40-200 kg volstaan om te weerstaan aan de optredende hydraulische belastingen.

2.9 Ontwerpnota steenbestorting Wichelen (SBE nv, s.d.)

De ontwerpnota betreft het ontwerp van een breuksteen oeverbekleding voor de Schelde te Wichelen. Aan WL zijn enkel 3 pagina's van de ontwerpnota ter beschikking gesteld, dewelke de dimensionering van de breuksteenbekleding, uitgevoerd door SBE nv, betreffen. Voor informatie met betrekking tot gebruikte hydraulische randvoorwaarden wordt verwezen naar een randvoorwaardennota dewelke niet ter beschikking gesteld is aan WL.

Voor de zone onder +0.50 mTAW wordt de stroomsnelheid in de Schelde als maatgevend beschouwd, voor de zone boven +0.50 mTAW worden de windgolven als maatgevend beschouwd. Voor de maatgevend dwarsgemiddelde stroomsnelheid wordt een waarde gelijk aan 3.5 m/s (= 1.4 x 2.5 m/s) beschouwd. Dit betreft vermoedelijk de stroomsnelheid gelijk aan 2.5 m/s afgeleid uit Peeters et al. (2009) vermenigvuldigd met een krommingscoëfficiënt om rekening te houden met de ligging in de bocht van de Schelde. Voor de golfhoogte wordt gerekend met een maatgevende significante golfhoogte gelijk aan 0.58 m. Hierbij wordt niet vermeld of het windgolven of scheepsgolven betreffen.

Voor het gedeelte van de oever lager dan +0.50 mTAW wordt de dimensionering van de breuksteen onder invloed van stroming uitgevoerd aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk (CIRIA; CUR, 2007; Pilarczyk, 1990) met factor k_t^2 gelijk aan 1.0. Er wordt geen rekening gehouden met de verhoogde turbulentie in buitenbochten aangezien de stroomsnelheid reeds is vermenigvuldigd met de krommingscoëfficiënt. Uit de berekening volgt een breuksteensorting 5-40 kg bij taludhelling 12/4 en een sortering 10-60 kg bij een taludhelling 10/4.

De dimensionering van de breuksteen onderhevig aan golven wordt uitgevoerd aan de hand van de formulering volgens Hudson (CIRIA; CUR, 2007). Hierbij wordt de dimensionering zowel uitgevoerd voor de waarde van de stabiliteitscoëfficiënt K_D gelijk aan 1.0 (structuren met ondoorlatend dijkmassief) als voor een waarde van de stabiliteitscoëfficiënt gelijk aan 4.0 (structuren met een doorlatend dijkmassief). Uit de dimensionering volgt zowel voor een taludhelling gelijk aan 12/4 als voor een taludhelling gelijk aan 10/4 een breuksteensorting 40-200 kg bij toepassing van K_d gelijk aan 1.0 en een breuksteensorting 10 - 60 kg bij toepassing van K_D gelijk aan 4.0. De rekennota vermeldt dat in principe gerekend zou moeten worden met K_d gelijk aan 1.0, maar dat in overleg met DVW de bekomen sortering berekend bij toepassing van K_D gelijk aan 4.0 weerhouden zijn. Dit heeft tot gevolg dat vermoedelijk meer onderhoud van de bekleding nodig is. Op deze wijze wordt zowel voor het gedeelte van de oever lager dan +0.50 mTAW als het gedeelte van de oever hoger dan +0.50 mTAW een breuksteensorting 10 – 60 kg voorgesteld. In de rekennota wordt hierbij opgemerkt dat binnen dezelfde belastingszone van de Schelde overall kalibers 10-60 kg worden geplaatst als erosiebescherming en dat periodiek onderhoud hierbij vereist is om de taludhelling te garanderen.

2.10 Dimensionering oeverbescherming Tijarm Zwijnaarde (Verelst *et al.*, 2018)

In 2018 werd door DVW Regio Centraal een acute verzakking waargenomen aan de oever van de tijarm van de Zeeschelde te Zwijnaarde. Door DVW is een herstelling van de oeverbescherming met een zandlichaam en een breuksteenbekleding voorgesteld. Voor de herstelling wordt een breuksteensorting 10-60 kg onder helling 12/4 voorgesteld. DVW heeft voor deze herstelling aan WL advies gevraagd om te controleren of het ontwerp geen opstuwing geeft wegens een vernauwing van de sectie en om na te gaan of de breuksteensorting 10-60 kg voldoet om te weerstaan aan de optredende stroomsnelheden.

Het gedeelte van de tijarm te Zwijnaarde heeft een beperkte breedte en er is geen scheepvaart mogelijk. Wat hydraulische belastingen betreft is stroming in dit gedeelte van de tijarm de maatgevende belasting. Op basis van 1D-numerieke modellering is de controle van de opstuwing in de Boven-Zeeschelde ten gevolge van de herstelling uitgevoerd. Hieruit volgt dat de opstuwing in de Zeeschelde beperkt blijft tot 0.5 cm en dat ter plaatse van de herstelde oever sectiegemiddelde stroomsnelheden tot 2.3 m/s kunnen voorkomen. Voor de zone Uitbergen-Gentbrugge vermeldt Peeters et al. (2009) een dwarsgemiddelde stroomsnelheid gelijk aan 2.5 m/s. De stroomsnelheid van 2.3 m/s is juist lager dan deze waarde. Om die reden wordt voor de dimensionering van de breuksteen een sectiegemiddelde stroomsnelheid gelijk aan 2.5 m/s beschouwd.

Aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk (CIRIA; CUR, 2007; Pilarczyk, 1990) wordt de dimensionering van de breuksteen uitgevoerd. Hieruit volgt dat de breuksteensorting 10-60 kg voor de herstelling voldoet om te weerstaan aan de optredende stroomsnelheden.

2.11 Ontwerp erosiebescherming in het kader van Brabo (Witteveen+Bos Belgium N.V., 2018)

Ter hoogte van de Liefkenshoektunnel kruist de nieuwe 380 kV hoogspanningslijn de Schelde. Voor deze kruising worden 2 elektriciteitsmasten in de oevers van de Schelde gebouwd. Per elektriciteitsmast worden 4 pontons met elk 8 palen in de Schelde voorzien. Dit rapport betreft de dimensionering van de bodembescherming rond deze twee elektriciteitsmasten, uitgevoerd door het studiebureau Witteveen+Bos Belgium N.V.

Voor de dimensionering van de bodembescherming wordt enkel stroming in de Schelde als belasting beschouwd. Er wordt een maximale stroomsnelheid van 0.5 m/s voor de ene mast en 1.0 m/s voor de andere mast als maatgevende stroomsnelheid beschouwd. Aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk (CIRIA; CUR, 2007; Pilarczyk, 1990) wordt een breuksteensortering 90/250 mm beschouwd om aan te brengen rond de elektriciteitsmasten.

Echter bij de revisie door WL van dit rapport werd opgemerkt dat de toegepaste maatgevende stroomsnelheid beduidend lager is dan de waarde van 2.5 m/s die volgt uit Peeters *et al.* (2009) die binnen het Sigmaplan wordt voorgesteld. Indien deze waarde toegepast zou worden, volgt hieruit een breuksteensortering 3000-6000 kg, wat zeer zwaar is. Om die reden heeft DVW in de mail van 01/06/2018 voorgesteld om een sortering 60-300 kg toe te passen, zoals ook op de dijktafuds in deze omgeving beschouwd is.

2.12 Ontwerp bodembescherming Droogdokkenpark Antwerpen (SBE nv, 2016)

Deze ontwerpnota betreft het ontwerp van de bodembescherming aan Scheldezijde van de Belvédère in het Droogdokkenpark aan de rechteroever van de Schelde te Antwerpen. Het ontwerp van de bodembescherming werd uitgevoerd door SBE nv. Door WL werd advies geleverd aan DVW met betrekking tot de toe te passen waarde voor de stroomsnelheid in de Schelde en werden een aantal opmerkingen geformuleerd op de ontwerpnota. De beschouwde ontwerpnota betreft echter de nota waarop door WL opmerkingen zijn geformuleerd, de laatste versie van de rekennota is niet ter beschikking gesteld aan WL.

De bodembescherming is enkel ontworpen op basis van stroomsnelheden in de Schelde. Er wordt vermeld dat geen schepen kunnen aanmeren, dus wordt deze belasting niet beschouwd bij het ontwerp. Voor de tijdelijke toestand wordt een maximaal optredende stroomsnelheid van 1.8 m/s beschouwd. Als maatgevende stroomsnelheid wordt een stroomsnelheid van 3.0 m/s beschouwd. In 2016 heeft DVW aan WL advies gevraagd met betrekking tot de toe te passen stroomsnelheden. Uit numerieke modellering en metingen volgt een stroomsnelheid in de Schelde bij springtij van 1.2 à 1.6 m/s, wat juist lager is dan de toegepaste waarde van 1.8 m/s. Uit Peeters *et al.* (2009) volgt een maximale stroomsnelheid in de Schelde bij was gelijk aan 2.5 m/s. Toepassen van een krommingcoëfficiënt met waarde $\sqrt{2}$ op de sectiegemiddelde stroomsnelheid van 2.5 m/s geeft dan een maximale stroomsnelheid gelijk aan 3.5 m/s. De beschouwde stroomsnelheid van 3.0 m/s is iets lager dan deze berekende maximale waarde.

Gebruik makend van deze stroomsnelheden en aan de hand van de formulering volgens Izbash (CIRIA; CUR, 2007; Franken *et al.*, 1995), waarbij de invloed van de helling van de bodem wordt in rekening gebracht, wordt een breuksteensortering 40-200 kg berekend voor de bodembescherming naast de Belvédère in het droogdokkenpark.

3 Algemeen overzicht en bespreking

In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de toegepaste hydraulische randvoorwaarden en de voorgestelde breuksteensorteringen uit 12 ontwerprapporten met betrekking tot ontwerp van dijkbekleding in het kader van het Sigmaplan en het ontwerp van dijkbekleding en bodembescherming voor oevers van de Schelde. Tabel 3 geeft een samenvatting van de maximale waarden van de toegepaste hydraulische belastingen bij deze ontwerpen. Een overzicht van de op basis van deze hydraulische belastingen voorgestelde breuksteensorteringen binnen de betreffende projecten is gegeven in Tabel 4.

Met betrekking tot de voorgestelde breuksteensortering voor de oevers van de Scheldedijken wordt op basis van Tabel 3 en Tabel 4 het volgende vastgesteld:

- 1) In het afwaartse gedeelte van de Schelde, in de zone tussen Fort Lillo en Liefkenshoek is golfklap ten gevolge van windgolven de maatgevende hydraulische belasting. In het meer opwaartse gedeelte van de Schelde zijn de windgolven eerder beperkt en is vooral de stroming in de Schelde de maatgevende hydraulische belasting. Onder invloed van golfklap ten gevolge van windgolven worden beduidend hogere breuksteendiameters bepaald dan volgt uit de dimensionering onder invloed van stroming in de Schelde (zie volgend punt). Voor het afwaartse gedeelte van de Zeeschelde in de zone tussen Fort Lillo en Liefkenshoek volgt uit de dimensionering onder invloed van golfklap ten gevolge van windgolven een breuksteensortering 60-300 kg.
- 2) Wat betreft de dimensionering onder invloed van stroming in de Schelde wordt voor bijna alle gedeelten van de Schelde een stroomsnelheid van 2.5 m/s toegepast, welke is afgeleid uit Peeters *et al.* (2009). Enkel voor de bijrivieren worden lagere (Durme) of hogere (Boven-Dijle en Zenne) stroomsnelheden bepaald. Alhoewel voor alle gedeelten van de Schelde eenzelfde maatgevende stroomsnelheid bepaald wordt, is de voorgestelde breuksteensortering toch niet dezelfde voor dijken gelegen in deze gedeelten van de Schelde. Dit wordt verklaard omdat de stroomsnelheid voor sommige studiegebieden vermenigvuldigd wordt met een verhogingsfactor/krommingscoëfficiënt omwille van de ligging in een bocht. Bij de dimensionering van de bodembescherming rond de pylonen van de elektriciteitsmast in het kader van Brabo is dan weer de turbulentie verhoogd om de invloed van de palen in rekening te brengen. In het meest opwaarts gedeelte van de tijarm te Zwijnaarde is de waterdiepte beduidend lager, wat een grotere breuksteensortering tot gevolg heeft omwille van de omgekeerde evenredigheid van de snelheidsprofielfactor K_H met de waterdiepte in de toegepaste formulering volgens Pilarczyk.
- 3) In de toegangsgoed van de Royerssluis volgt uit de dimensionering een beduidend grotere breuksteensortering als oeverbescherming omwille van de grotere stroomsnelheden ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van voorbijvarende schepen. In plaats van deze grote breuksteensorteringen is voor deze locatie een oeverbekleding uit gepenetreerde breuksteen voorgesteld.

Met betrekking tot de breuksteensorteringen voorgesteld voor de ringdijken van GOG-GGG gebieden wordt op basis van Tabel 3 en Tabel 4 het volgende vastgesteld:

- 1) Voor de dimensionering van de breuksteensortering is golfklap ten gevolge van windgolven de maatgevende hydraulische belasting. Golfloop is niet maatgevend en de stroomsnelheden langsheen de ringdijken van een GOG-GGG gebied zijn beperkt. De golfhoogte van de windgolven is afhankelijk van de grootte van het gebied en de oriëntatie van de ringdijk, maar ook van het type gebied. In een GOG-gebied worden enkel golven uit windrichtingen W, WNW en NW beschouwd, omdat vullen van een GOG ten gevolge van overloop over een overloofdijk enkel bij stormen met deze windrichtingen voorkomt. Bij een GGG gebied worden golven uit alle windrichtingen beschouwd, aangezien het gebied twee maal per dag via de inwateringssluis gevuld wordt.

- 2) Op deze wijze kunnen voor bepaalde gebieden relatief hoge golfhoogtes berekend worden van 1.10 m à 1.15 m (Vlassenbroek, Schelland-Oudbroekpolder) en voor andere gebieden eerder beperkte golfhoogtes tot maximaal 0.50 m à 0.80 m.
- 3) De golfhoogte in het GOG-GGG gebied wordt bepaald bij verschillende terugkeerperiodes voor de maximale waterstanden in het GOG-GGG gebied. Gebruikelijk wordt een terugkeerperiode van 4000 jaar, 2500 jaar, 1000 jaar en 100 jaar beschouwd en worden de waterstanden in het gebied berekend met de synthetische stormen beschouwd. Uit de verschillende ontwerprapporten volgt dat de golfhoogte berekend bij een maximale waterstand met een terugkeerperiode van 4000 jaar slechts 1 à 2 cm groter is dan deze berekend bij een maximale waterstand met een terugkeerperiode van 2500 jaar. Bij de nog lagere terugkeerperiodes van de waterstand in het gebied worden wel lagere golfhoogtes berekend.
- 4) De voorgestelde breuksteensortering die aan de hand van deze golfhoogtes berekend wordt is zeer sterk afhankelijk van de taludhelling van de ringdijk. Voor een taludhelling 16/4 wordt een beduidend lagere breuksteensortering berekend dan voor een taludhelling 12/4 van de ringdijk.

Wat hydraulische belastingen voor een dijk aan rivierzijde betreft worden voor het Zeescheldebekken binnen het Sigmoplan de maatgevende condities uit Peeters *et al.* (2009) beschouwd. Tabel 1 geeft een overzicht van de maatgevende condities voor de verschillende deelgebieden van het Zeescheldebekken. Met betrekking tot windgolven is het mogelijk dat Tabel 3 andere waarden vermeld. De golfhoogtes in Tabel 3 zijn afgelezen uit de Excel-tabellen in bijlage bij Peeters *et al.* (2009) met golfhoogtes berekend voor de betreffende locatie langs het Zeescheldebekken. De waarden in Tabel 1 betreffen de maximale waarde van de golfhoogte aan linkeroever en rechteroever van de rivier binnen de betreffende zone. Uit Tabel 1 volgt dat in het afwaartse gedeelte van de Zeeschelde beduidend hogere waarden voor de golfhoogte van windgolven wordt berekend dan in het opwaartse gedeelte. Wat dwarsgemiddelde stroomsnelheden betreft volgt uit Tabel 1 voor het grootste gedeelte van de Zeeschelde een maximale waarde gelijk aan 2.5 m/s. Enkel voor de Durme en de Grote Nete wordt een lagere waarde van 2.0 m/s berekend en voor de BovenDijle en Zenne een hogere waarde gelijk aan 3.0 m/s. Met uitzondering van het gedeelte van de Zeeschelde opwaarts Dendermonde wordt voor scheepsgolven in het Zeescheldebekken een maximale golfhoogte gelijk aan 0.5 m berekend. Voor het gedeelte van de Boven-Zeeschelde opwaarts Dendermonde wordt een maximale golfhoogte gelijk aan 0.3 m berekend.

Tabel 1 – Overzicht maatgevende condities voor het Zeescheldebekken uit Peeters *et al.* (2009)

Locatie	Belastingszone	Waterstand ¹¹ (m TAW)	Windgolven (LO/RO) (m)	Dwarsgemiddelde stroomsnelheden (m/s)	Scheepsgolven ¹² (m)
Nederlands Belgische grens – Oosterweel	1	9.00	1.1/1.7	2.5	0.5
Oosterweel – Hoboken	2	8.75	0.8/1.0	2.5	0.5
Kruike – Wintam	3a	8.25	0.8/1.0	2.5	0.5
Wintam – Temse & Rupel	3b	7.85	0.8/1.0 & 0.5/0.5	2.5	0.5
Temse – Dendermonde	4a	7.50	0.5/0.8	2.5	0.5
Dendermonde – Uitbergen	4b	7.50	0.5/0.8	2.5	0.3
Uitbergen – Gentbrugge	4c	7.50	0.4/0.4	2.5	0.3
Durme	4d	7.50	0.3/0.3	2.0	nvt
Benedendijle	5a	7.85	0.5/0.5	2.5	0.5
Bovendijle	5b	7.85 – oplopend met maaiveld	0.2/0.2	3.0	nvt
Zenne	5c	7.85 – oplopend met maaiveld	0.2/0.2	3.0	nvt
Benedennete	5d	7.85	0.5/0.5	2.5	0.5
Grote Nete	5e	7.85 – oplopend met maaiveld	0.2/0.2	2.0	nvt
Kleine Nete	5f	7.85 – oplopend met maaiveld	0.2/0.2	2.5	nvt

Met betrekking tot deze vaststellingen en de methodologie voor het ontwerp van een breuksteenbekleding voor een dijk- of oeverbekleding wordt het volgende opgemerkt:

1. Wat toegepaste waterstanden betreft, wordt voor langsstroming aan rivierzijde telkens de laagst mogelijke waterstand beschouwd voor de dimensionering van de dijkbekleding. Voor de bepaling van significante golfhoogte en piekperiode van golven wordt telkens de hoogste waterstand beschouwd. Bij een toetsing van de bekleding van een dijk in een GOG-GGG gebied aan golfklap ten gevolge van windgolven worden een reeks waterpeilen beschouwd tussen het laagste en het hoogst voorkomende waterpeil in het GOG-GGG gebied.
2. De toegepaste maximale stroomsnelheid in het Zeescheldebekken betreft een dwarssectiegemiddelde stroomsnelheid, dewelke bepaald is op basis van 1D-modellering van het Zeescheldebekken. De maximale stroomsnelheid is voor de verschillende delen van het Zeescheldebekken bepaald als de maximale waarde van de dwarssectiegemiddelde stroomsnelheden voor de verschillende dwarssecties die binnen dit gedeelte gelegen zijn. Deze stroomsnelheden zijn in werkelijkheid nog niet voorgekomen. Peeters *et al.* (2009) vermeldt dat bij locaties in bochten deze maximale stroomsnelheden nog vermenigvuldigd dienen te worden met een krommingscoëfficiënt. De vraag stelt zich of de vermenigvuldiging met de krommingscoëfficiënt in bochten wel nodig is aangezien de maximale waarde van de dwarssectiegemiddelde stroomsnelheden een maximale waarde over een groter gebied betreft.

Bijgevolg zou het hierbovenop toepassen van een krommingscoëfficiënt aanleiding zou geven tot een overschatting van de maximale stroomsnelheid. Daarnaast geldt ook dat de breuksteenbekleding onderhevig aan stroming gedimensioneerd wordt aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk (CIRIA; CUR, 2007; Pilarczyk, 1990), waarin een factor aanwezig is om bij gebruik van dieptegemiddelde stroomsnelheden rekening te houden met een verhoogde turbulentie in bijvoorbeeld bochten of ten gevolge van schroefstralen. Hierbij moet opgepast worden dat de verhoogde turbulentie niet dubbel in rekening gebracht wordt, enerzijds via de krommingscoëfficiënt en anderzijds via de turbulentiefactor in de toegepaste formulering. De krommingscoëfficiënten worden ook teruggevonden in National Highway Institute (2009). Hierin worden deze als volgt gedefinieerd:

$$K_b = 2.0 \quad \text{for } 2 \geq R_c/T$$

$$K_b = 2.38 - 0.206 \left(\frac{R_c}{T} \right) + 0.0073 \left(\frac{R_c}{T} \right)^2 \quad \text{for } 10 > R_c/T > 2$$

$$K_b = 1.05 \quad \text{for } R_c/T \geq 10$$

Met:

1.	K_b	Krommingscoëfficiënt	[-]
2.	R_c	Bochtstraal	[m]
3.	T	Breedte van de rivier aan de waterlijn	[m]

Aan de hand van deze formuleringen kunnen de krommingscoëfficiënten uit de tabel vermeld in Peeters et al. (2009) nagerekend worden. Echter de formuleringen voor de krommingscoëfficiënten in National Highway Institute (2009) worden vermeld in de formulering voor schuifspanning, dewelke evenredig is met het kwadraat van de stroomsnelheid. Bij toepassing op een stroomsnelheid moet bijgevolg de vierkantswortel van de krommingscoëfficiënt beschouwd worden en niet de waarden uit de tabel vermeld in Peeters et al. (2009).

- Wat windgolven betreft geldt algemeen dat golfloop ten gevolge van windgolven een minder maatgevende belasting is dan golfklap ten gevolge van windgolven. Voor windgolven in een GOG-GGG gebied geldt dat de golfhoogte en piekperiode van de golven op een zeer conservatieve wijze berekend worden. Bij berekening van significante golfhoogte en piekperiode is het niet mogelijk om enige invloed van begroeiing (zoals bomen, rietbegroeiing, .. in het GOG-GGG gebied), dewelke zorgen voor een verlaging van de golfhoogte, in rekening te brengen.
- Peeters et al. (2009) vermeldt op basis van berekeningen in IMDC *et al.* (2010) een retourstroming ten gevolge van scheepvaart in het Zeescheldebekken van ongeveer 0.5 m/s. Uit de berekening van de retourstroming in het kader van de oeverbescherming van de toegangseul naar de Royerssluis volgt een waarde gelijk aan 1.2 m/s. De retourstroomsnelheden van scheepvaart in het Zeescheldebekken is beduidend lager dan de maximale waarde van de stroomsnelheid van de langstrooming (2.5 m/s à 3.0 m/s, Tabel 1). Bijgevolg is retourstroming geen maatgevende belasting bij ontwerp van een dijk- of oeverbekleding en is een dimensionering onder invloed van retourstroming bij de meeste ontwerpen niet uitgevoerd.
- Uit Peeters et al. (2009) en de onderliggende rapportage is het niet duidelijk welke scheepstypes en welke vaarsnelheden beschouwd zijn voor het bepalen van de golfhoogte van primaire golven en de golfhoogte van secundaire golven in het Zeescheldebekken. Door WL zijn in de periode 2019-2021 golfmetingen uitgevoerd op slikken en schorren in de Zeeschelde ter plaatse van Saefthinge, het Galgeschoor, Rupelmonde en Dendermonde. Deze golfmetingen zijn gerapporteerd in Meire *et al.* (2019, 2020, 2021). Tabel 2 geeft een overzicht van de maximale waarde van de primaire en secundaire golfhoogte die gemeten is op deze locaties. Uit de tabel volgt dat ter plaatse van Saefthinge en het Galgeschoor maximale waarden van primaire en secundaire golfhoogtes gemeten zijn die hoger zijn dan de waarde van 0.5 m uit de maatgevende condities voor het Sigmaplan.

Ter plaatse van Rupelmonde wordt een maximale golfhoogte van 0.35 m gemeten die juist lager is dan de waarde van 0.5 m. Ter plaatse van Dendermonde wordt een maximale golfhoogte van 0.45 m opgemeten dewelke hoger is dan de waarde van 0.3 m als maatgevende conditie voor het Sigmaplan.

Tabel 2 – Maximale waarde van primaire en secundaire golfhoogte gemeten op verschillende locaties in de Zeeschelde.

	Primaire golfhoogte	Secundaire golfhoogte
Saeftinghe en Galgeschoor	0.6 m (Galgeschoor) à 0.8 m (Saeftinghe)	0.5 m (Galgeschoor) à 1.0 m (Saeftinghe)
Rupelmonde	Niet waarneembaar tijdens meetcampagne	0.35 m
Dendermonde	Niet waarneembaar tijdens meetcampagne	0.45 m

6. De dimensionering van de oeverbescherming in de toegangseul van de Royerssluis geeft aanleiding tot een zware breuksteenbekleding (40-200 kg) of tot een breuksteenbekleding gepenetreerd met colloïdaal beton om te kunnen weerstaan aan de hoge stroomsnelheden ten gevolge van schroefstraalwerking. Dit volgt ook uit andere projecten, waarbij een ontwerp uitgevoerd is van een bodembescherming of oeverbekleding onderhevig aan stroomsnelheden ten gevolge van schroefstralen van schepen. Het ontwerp van een erosiebescherming onderhevig aan stroomsnelheden ten gevolge van schroefstralen van schepen is conservatief, aangezien de toegepaste formuleringen een stroomsnelheid beschouwen die constant en langdurig in de tijd aangehouden wordt. Echter bij belasting ten gevolge van schepen die voorbijvaren is de hoge stroomsnelheid eerder kortstondig aanwezig.
7. Bij de dimensionering van de dijkbekleding van een ringdijk wordt initieel verondersteld dat een grasbekleding aanwezig is, zowel aan GOG-GGG zijde als aan landzijde. Voor dit scenario wordt eerst de toetsing van de grasbekleding aan GOG-zijde op basis van golfklap ten gevolge van windgolven en de toetsing van golfoverslaggebieten over de kruin van de dijk uitgevoerd. Indien de grasbekleding niet voldoet om te weerstaan aan de golfklap ten gevolge van windgolven wordt een minimale hoogte bepaald tot dewelke een alternatieve bekleding aangelegd dient te worden. Bij deze ontwerpmethodologie wordt standaard altijd een goede graszode verondersteld, aangezien de ingebruikname van een GOG-GGG meestal een 4 à 5 jaar beslag neemt na aanleg van de ringdijk rond het gebied.

Algemeen wordt opgemerkt dat de referenties die voor de vaststellingen uit dit rapport zijn beschouwd ontwerprapporten of rekennota's betreffen, waarin een bepaalde breuksteensortering voor dijken of oevers van de Schelde is voorgesteld. Mogelijk kan binnen deze projecten, afhankelijk van de beschikbaarheid van breuksteen of van economische, ecologische, duurzaamheid of andere ontwerptechnische redenen, een ander type breuksteen of erosiebescherming aangelegd zijn dan voorgesteld is in deze rapporten of rekennota's. In de rekennota met betrekking tot het ontwerp van de breuksteen oeverbekleding te Wichelen wordt opgemerkt dat binnen dezelfde belastingszone van de Schelde overal breuksteensortering 10-60 kg worden geplaatst als erosiebescherming en dat periodiek onderhoud hierbij vereist is om de taludhelling te te garanderen. Daarnaast werd bij het ontwerp van de bodembescherming rond de elektriciteitsmasten te Liefkenshoek in het kader van Brabo door DVW in de mail van 01/06/2018 voorgesteld om een sortering 60-300 kg toe te passen, zoals ook op de dijktafuds in deze omgeving beschouwd is. Het is bijgevolg aanbevolen om de ervaringen van DVW na te gaan met in bepaalde zones toegepaste "standaard" breuksteensorteringen, zoals hierboven vermeld, en om na te gaan of voor de in deze zones toegepaste breuksteensorteringen structureel onderhoud van de oeverbekleding nodig is.

Tabel 3 – Overzicht maximale waarden voor de toegepaste hydraulische belastingen

Locatie		Stroom- snelheid	Golfhoogte windgolven	Retour- stroming	Golfhoogte scheepgolven	Stroomsnelheid schroefstraalwerking scheepvaart
Ontpoldering Lillo-Fort Filip	Schelde	2.5 m/s	1.7 m	-	-	-
Verzakking t.h.v. Liefkenshoektunnel	Schelde	2.5 m/s	1.7 m	-	-	-
Erosiebescherming i.k.v. Brabo	Schelde	2.5 m/s	-	-	-	-
Oeverbescherming Royerssluis	Schelde	2.5 m/s	1.0 m	1.2 m/s	0.50 m	Hoofdschroef: max. 4.1 m/s Boegschroef tegen bodem: max. 3.1 m/s (kanalensystemen) / 6.6 m/s (pumpjets) Boegschroef tegen oever: max. 5.6 m/s
Bodembescherming Droogdokkenpark	Schelde	3.0 m/s	-	-	-	-
GOG Schelland-Oudbroekpolder	Schelde/ GOG	2.5 m/s	Rivierzijde: 0.95 m GOG-zijde: 1.10 m	-	0.50 m	-
GOG Heindonk	Dijle/GOG	2.5 m/s	Rivierzijde: 0.36 m GOG-zijde: 0.74 m	-	0.50 m	-
GOG-GGG Wal-Zwijn (Antea Group)	GOG-GGG	-	Zwijn: 0.46 m Wal: 0.33 m	-	-	-
GOG-GGG Wal-Zwijn (WL)	Schelde/ GOG-GGG	2.5 m/s	Rivierzijde Wal: 0.65 m Rivierzijde Zwijn: 0.58 m GOG-GGG zijde Wal: 0.84 m GOG-GGG zijde Zwijn: 0.88 m	-	-	-
GOG-GGG Vlassenbroek	Schelde/ GOG-GGG	2.5 m/s	Schelde: 0.60 m GOG-GGG: 1.14 m	-	0.52 m	-
Wichelen	Schelde	3.5 m/s	0.58 m	-	-	-
Tijarm Zwijnaarde	Schelde	2.5 m/s	-	-	-	-

Tabel 4 – Overzicht voorgestelde breuksteensorteringen

Locatie		Type bescherming	Maatgevende hydraulische belasting	Breuksteensortering
Ontpoldering Lillo-Fort Filip	Schelde	Oever	Golfklap windgolven	60-300 kg
Verzakking t.h.v. Liefkenshoektunnel	Schelde	Oever	Golfklap windgolven	60-300 kg
Erosiebescherming i.k.v. Brabo	Schelde	Oever	Stroming Schelde	Dimensionering: 3000-6000 kg; Voorstel DVW: 60-300 kg
Oeverbescherming Royerssluis	Schelde	Bodem/	Stroming schroefstraalwerking	Gepenetreerde breuksteen 5-40 kg
		Oever	Stroming schroefstraalwerking	Lager dan +1.50 mTAW: Gepenetreerde breuksteen 5-40 kg
			Stroming schroefstraalwerking	Boven +1.50 mTAW: 40-200 kg
Bodembescherming Droogdokkenpark	Schelde	Bodem	Stroming Schelde	40-200 kg
GOG Schelland-Oudbroekpolder	Schelde	Oever	Stroming	Aanwezige gepenetreerde breuksteen voldoet
	GOG	Oever	Golfklap windgolven	Taludhelling 16/4: 5-40 kg lager dan peil +3.50 mTAW en +3.60 mTAW of 15/120 kg bij voorzien van breuksteen tot kruinpeil Taludhelling 12/4: 40-200 bij breuksteen tot kruinpeil en 10-60 kg bij voorzien breuksteen tot lagere peilen
GOG Heindonk	Dijle	Oever	Stroming Dijle	5-40 kg
	GOG	Oever	Golfklap windgolven	5-40 kg en 10-60 kg tot peil +4.30 mTAW
GOG-GGG Wal-Zwijn (Antea Group)	GOG-GGG	Oever	Golfklap windgolven	Zodekwaliteit dijken goed: geen breuksteen nodig Anders: 5-40 kg tot peil +3.50 mTAW
GOG-GGG Wal-Zwijn (WL)	Schelde	Oever	Stroming Schelde	5-40 kg
	GOG-GGG	Oever	Golfklap windgolven	Dimensionering Wal: 5-40 kg en Zwijn 40-200 kg In overleg met DVW: geen breuksteen voorgesteld (Dit betreft geen primaire kering)
GOG-GGG Vlassenbroek	Schelde	Oever	Stroming Schelde	5-40 kg
	GOG-GGG	Oever	Golfklap windgolven	Taludhelling 12/4: 40-200 kg en 60-300 kg Taludhelling 16/4: 40-200 kg
Wichelen	Schelde	Oever	Stroming Schelde	10-60 kg
Tijarm Zwijnaarde	Schelde	Oever	Stroming Schelde	10-60 kg

4 Referenties

Antea Group. (2016). Sigma Zeeschelde - Ontwerp GOG Wal/Zwijn. Ontwerp dijkbekleding bij GOG-GGG-werking

CIRIA; CUR. (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)

Franken, A.; Ariëns, E.; Klatter, H. (1995). Handleiding voor het ontwerpen van granulaire bodemverdedigingen achter tweedimensionale uitstromingsconstructies: Utrecht

Grontmij. (2015a). Sigmaplan dijkwerken en leidingenstrook van Fort Filip tot Ontpoldering Lillo. Ontwerpnota herstelling verzakking t.h.v. Liefkenshoektunnel. Grontmij Belgium N.V.

Grontmij. (2015b). Sigmaplan dijkwerken en leidingenstrook van Fort Filip tot Ontpoldering Lillo. Voorontwerpnota zone 4. Grontmij Belgium N.V.

International Marine and Dredging Consultants; Tractebel Development Engineering; Jan Maertens BVBA. (2010). Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken: deelopdracht 5. Opstellen van een wetenschappelijke verantwoorde en praktisch haalbare methode. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

International Marine and Dredging Consultants; Waterbouwkundig Laboratorium. (2010). Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken: deelopdracht 2. Literatuuronderzoek van de grondmechanische faalmechanismen met beschrijving van de relevante parameters. 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

Meire, D.; Kolokythas, G.; Smolders, S.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2019). Agenda voor de Toekomst – Waves in the estuary: analysis of wave measurements at Saeftinghe. Version 2.. *FHR reports, 14_082_1*. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=318351>

Meire, D.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda voor de Toekomst – Waves in the Scheldt estuary: analysis of wave measurements at Appels (Dendermonde). Version 2.. *FHR reports, 14_082_2*. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334161>

Meire, D.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2021). Agenda voor de Toekomst – Golven in het estuarium: analyse van golfmetingen bij de Notelaer (Rupelmonde). Versie 5.0. *WL Rapporten, 14_082_3*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334263>

National Highway Institute. (2009). Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance - Third Edition. Volume 2. Publication No. FHWA-NHI-09-112

Peeters, P.; Taverniers, E.; Mostaert, F. (2009). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: hydraulische randvoorwaarden voor toetsen op en ontwerpen naar veiligheid. *WL Rapporten, 713_15a*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

SBE nv. (2016). Droogdokkenpark te Antwerpen. Bodembescherming. Rekennota 10979-REK-G-010 rev0

SBE nv. (2017). Toegangsgedul Royerssluis. Rekennota bodem- en oeverbescherming

SBE nv. (S.d.). Stabiliteit steenbestorting Wichelen. Ontwerpnota 11167-REK-G-003-C

Verelst, K.; Peeters, P.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2012a). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: ontwerp dijkbekleding Vlassenbroek. *WL Rapporten*, 713_15e. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2012b). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: Ontwerp dijkbekleding Heindonk. *WL Rapporten*, 713_15f. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vanderkimpen, P.; Visser, K.P.; Mostaert, F. (2018). Zeeschelde - Tijarm Zwijnaarde: hydraulische impact oeverherstelling en dimensionering oeverbescherming. Versie 5.0. *WL Rapporten*, 17_079_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://www.vliz.be/nl/open-marien-archief?module=ref&refid=292245>

Verelst, K.; Visser, K.P. (2023). Sigmaplan - Gereduceerde Getijdegebieden - Wal-Zwijn: dimensionering dijkbekleding Scheldedijken: Antwerpen, België

Verelst, K.; Visser, K.P.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2019). Zeeschelde - GOG Schelland en Oudbroekpolder: Ontwerp dijkbekleding overloopdijk en ringdijk.. *WL Rapporten*, 14_101: Antwerpen, België. 107 + 49 (bijlagen) pp.

Waterloopkundig Laboratorium. (1997). Dipro 3.02n Gebruikershandleiding

Witteveen+Bos Belgium N.V. (2018). Erosiebescherming Schelde Brabo. Concept eindrapport

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be