



Vlaanderen
is wetenschap



14_131_1
WL rapporten

Ontwerp nieuwe zeedijk Westende – Middelkerke

Proeven op golfoverslag en -impact in golfgoot WL

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ontwerp nieuwe zeedijk Westende – Middelkerke

Proeven op golfoverslag en -impact in golfgoot WL

Vanneste, D.; Willems, M.; Hermans, I. ; Mostaert, F.

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 2019
D/2019/3241/047

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vanneste, D.; Willems, M.; Hermans, I. ; Mostaert, F. (2019). Ontwerp nieuwe zeedijk Westende – Middelkerke : Proeven op golfoverslag en -impact in golfgoot WL Versie 2.0. WL Rapporten, 14_131_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.:	WL2019R14_131_1
Keywords (3-5):	fysisch model, golfgoot, golfoverslag, golfimpact, GDU		
Tekst (p.):	64	Bijlagen (p.):	13
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vanneste, D.
------------	--------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Willems, M. Hermans, I.	Getekend door: Marc Willems (Signature) Getekend op: 2019-04-30 14:49:44 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Marc Willems</i>
		Getekend door: Ivar Hermans (Signature) Getekend op: 2019-05-01 19:41:59 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Ivar Hermans</i>
Projectleider:	Vanneste, D.	Getekend door: Dieter Vanneste (Signature) Getekend op: 2019-05-02 08:26:12 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Dieter Vanneste</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-05-02 13:22:51 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

In de ontwerpplannen voor een nieuwe zeedijk tussen Westende en Middelkerke wordt in bepaalde zones gebruik gemaakt van het concept van een golfdempende uitbouw van de zeedijk om de golfoverslag op een zo efficiënt mogelijke manier te reduceren. Daarnaast zijn er ook ondergrondse parkeergarages voorzien en een geterrasseerde uitbouw van de zeedijk ter hoogte van het Rauschenbergplein. De ontwerpsnedes van deze plannen dienen beproefd te worden op golfoverslag en -impact op structurele onderdelen tijdens de condities gedurende een 1000-jarige storm op het einde van de levensduur van de constructies (2070). In totaal werden 5 modelsecties beproefd in de golfgoot in Hal 3 van het Waterbouwkundig Laboratorium : 1 snede met ondergrondse parking Logierlaan OG1, 2 dijkprofielen met golfdempende uitbouw (in Middelkerke en Westende), en 2 snedes ter hoogte van het Rauschenbergplein Westende.

In geen enkel geval wordt het maximaal toegelaten gemiddeld overslagdebiet van 1 l /m/s overschreden. De ontwerpwaarden van golfkracht werden bepaald in overeenstemming met een maximaal toegelaten faalkans volgens betrouwbaarheidsklasse RC3 uit Eurocode 0.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	IX
1 Inleiding	1
1.1 Context	1
1.2 Doelstelling golfgootproeven	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Schaalmodel golfgoot	3
2.1 Golfgeneratie	4
2.2 Voorland	5
2.3 Indeling modelsecties	5
2.4 Meetopstelling golvenmeters	6
2.5 Meetopstelling golfoverslag	8
2.6 Meetopstelling golfkrachten	8
2.7 Kalibratie invallend golfspectrum.....	10
3 Modelsectie MK01 “parking Logierlaan OG1” (sectie 81, y=2240 m)	11
3.1 Dataset gekalibreerde proeven	11
3.2 Golfoverslag.....	12
3.3 Krachten op de frontmuur.....	13
3.4 Krachten op de dakmuur	22
4 Modelsectie MK02 “GDU Middelkerke” (sectie 87, y=4272 m)	28
4.1 Dataset gekalibreerde proeven	28
4.2 Golfoverslag.....	29
4.3 Golfimpact op de zeewaartse GDU-muur	32
4.4 Golfimpact op de landwaartse GDU-muur	37
5 Modelsectie MK03 “GDU Westende” (sectie 76, y=530 m)	41
5.1 Dataset gekalibreerde proeven	41
5.2 Golfoverslag.....	41
5.3 Golfimpact op de zeewaartse GDU-muur	44
5.4 Golfimpact op de landwaartse GDU-muur	48
6 Modelsectie MK04 “Rauschenbergplein CC’ ” (sectie 77, y=850 m)	52

6.1	Dataset gekalibreerde proeven	52
6.2	Golfoverslag.....	52
6.3	Golfimpact op de zitbank	56
7	Modelsectie MK05 “Rauschenbergplein AA’ ” (sectie 77, y=850 m).....	60
7.1	Dataset gekalibreerde proeven	60
7.2	Golfoverslag.....	60
8	Samenvatting resultaten	63
8.1	Golfoverslag.....	63
8.2	Golfimpact op constructieve onderdelen.....	63
	Referenties	64
Bijlage A	Afleiding ontwerpwaarde golfkracht in overeenstemming met Eurocode 0 (NBN EN 1990).....	B1
A.1	Ontwerpwaarde uit extreme waardeverdeling van krachtpieken	B1
A.2	Ontwerpwaarde uit empirisch bepaalde overschrijdingsfrequenties van krachtpieken	B3
A.3	Ontwerpwaarde uit Gumbel fitting op individuele maxima	B4
Bijlage B	Modelopstelling golfgoot	B5
B.1	Modelopstelling MK01 “parking Logierlaan OG1”	B7
B.2	Modelopstelling MK02/MK03 “GDU Middelkerke/Westende”	B9
B.3	Modelopstelling MK04 “Rauschenbergplein sectie CC’ ”	B11
B.4	Modelopstelling MK05 “Rauschenbergplein sectie AA’ ”	B13

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht modelsecties.....	2
Tabel 2 – Toe te passen schaaufactoren op basis van de Froude schaaufactor 1:25.....	4
Tabel 3 – Definitie voorland (X-coord. t.o.v. nulpositie golfschot, Z-coord t.o.v. bodem golfgoot)	5
Tabel 4 – Posities golvenmeters in golfgoot.....	7
Tabel 5 – overzicht types load cell gebruikt in de verschillende modelopstellingen voor krachtmeting	10
Tabel 6 – Overzicht gekalibreerde proefruns modelsectie 1	11
Tabel 7 – Gemeten overslagdebiet proevenreeks modelsectie MK01 (waarde op natuurschaal).....	13
Tabel 8 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht frontmuur modelsectie MK01 (prototype waarden in kN/m)	21
Tabel 9 – 20 grootste gemeten krachtpieken, dakmuur	26
Tabel 10 – Toelaatbare overschrijdingskansen en geëxtrapoleerde ontwerpwaarden van golfkracht bij verschillende stormduur	26
Tabel 11 – Maximale krachtpieken per proef (prototype waarden), dakmuur modelsectie MK01 (Ch.4).....	27
Tabel 12 – Gumbel fitting op de reeks van maximale krachtpieken van de afzonderlijk.....	27
Tabel 13 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 2 GDU Middelkerke	28
Tabel 14 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet (natuurwaarden), modelsectie 2 GDU Middelkerke	30
Tabel 15 – Proevenreeks met resultaten golfoverslag, modelsectie 2 GDU Middelkerke.....	30
Tabel 16 – Berekening golfoverslagdebiet op basis van de doelwaarde $T_m-1,0$ (5.69 s), modelsectie 2 GDU Middelkerke.....	31
Tabel 17 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht zeewaartse GDU-muur modelsectie MK02.....	36
Tabel 18 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht landwaartse GDU-muur modelsectie MK02 (prototype waarden in kN/m).....	40
Tabel 19 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 3 GDU Westende.....	42
Tabel 20 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet, modelsectie 3 GDU Westende.....	43
Tabel 21 – Proevenreeks met resultaten golfoverslag modelsectie MK03.....	43
Tabel 22 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht zeewaartse GDU-muur modelsectie MK03 (prototype waarden in kN/m).....	47
Tabel 23 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht landwaartse GDU-muur modelsectie MK03 (prototype waarden in kN/m).....	51
Tabel 24 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet (natuurwaarden), modelsectie 3 GDU Westende	53
Tabel 25 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 4 Rauschenbergplein sectie CC'	54
Tabel 26 – Golfcondities aan de dijkteen en gemeten golfoverslag, modelsectie 4 Rauschenbergplein sectie CC'	55

Tabel 27 – prototype ontwerpwaarde horizontale golfkracht [kN/m]	59
Tabel 28 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 5 Rauschenbergplein sectie AA'	61
Tabel 29 – Golfcondities aan de dijkteen en gemeten golfoverslag, modelsectie MK05 Rauschenbergplein sectie AA'	62
Tabel 30 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet (natuurwaarden), modelsectie MK05	62
Tabel 31 – Samenvatting resultaten golfoverslag	63
Tabel 32 – Samenvatting resultaten golfimpact op constructieve onderdelen	63

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Indeling studiegebied in projectzones.....	1
Figuur 2 – Overzicht golfgoot, voorland en modelopstelling	3
Figuur 3 – Golfschot en hydraulische cilinder	4
Figuur 4 – Modelopstelling gezien richting golfschot.	6
Figuur 5 – golvenmeters nabij golfschot	6
Figuur 6 – Meetopstelling golfoverslag modelsectie MK02 met reservoir 40 l	8
Figuur 7 – Opbouw meetframe krachten, modelopstelling MK01.....	9
Figuur 8 – Verbinding load cells op meetframe krachten, modelopstelling MK02.....	9
Figuur 9 – doorsnede MK01 (maten in m en peilen in m TAW). De oranje lijn volgt de contour van de ingebouwde snede in model.	12
Figuur 10 – voorbeeld van dynamische versterking van gemeten krachtsignaal	14
Figuur 11 – voorbeeldvenster bepaling eigenfrequentie en demping in Wavelab.....	15
Figuur 12 – Resultaten DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de frontmuur parking OG1 (Ch.3)	16
Figuur 13 – Filtering dynamische oscillatie in grootste krachtpiek, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK037 .	17
Figuur 14 – Filtering dynamische oscillatie in krachtpiek, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK062.....	18
Figuur 15 – Filtering krachtpiek met onregelmatig verloop, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK062	18
Figuur 16 – Filtering krachtpiek met onregelmatig verloop, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK043	19
Figuur 17 – Weibull fit op DAF-gefilterde krachtpiekwaarden, frontmuur parkingsectie (Ch.3).....	20
Figuur 18 – Weibull fit op Butterworth-gefilterde krachtpiekwaarden, frontmuur parkingsectie (Ch.3)	20
Figuur 19 – Illustratie laagfrequente ruis proef MK072	22
Figuur 20 – Illustratie dynamische golfimpact op de dakmuur (Ch.4)	22
Figuur 21 – Illustratie ruisfiltering op grootste geregistreerde impact op de dakmuur	23
Figuur 22 – Correlatie tussen impact op frontmuur (Ch.3) en dakmuur (Ch.4)	23
Figuur 23 – Empirische overschrijdingsfrequenties voor verschillende low-pass filterfrequenties	25
Figuur 24 – Empirische distributie krachtpieken op de dakmuur	25
Figuur 25 – Lineaire extrapolatie tot ontwerpwaarde golfkracht op basis van de drie grootste gemeten krachtpieken.....	27
Figuur 26 – ontwerpdoorsnede MK02 “GDU Middelkerke”	29
Figuur 27 – Wavelab DAF analyse MK02_024.....	32
Figuur 28 – Resultaten DAF filtering 10 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de zeewaartse muur GDU Middelkerke (Ch.3)	33
Figuur 29 – vergelijking twee types golfimpact : met (links) en zonder (rechts) uitgesproken oscillatie na de krachtpiek.....	34

Figuur 30 – Vergelijking toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)	34
Figuur 31 – Voorbeeld golfimpact met significant aandeel dynamische oscillatie, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)	35
Figuur 32 – Weibull fit op Butterworth gefilterde krachtpiekwaarden, zeewaartse muur GDU Middelkerke (Ch.3)	35
Figuur 33 – Detail geometrie afschuining GDU-frontmuur	37
Figuur 34 – Geometrie beproefde stormmuur met parapet.....	37
Figuur 35 – Offset en drift in ruw krachtsignaal, impact op landwaartse GDU-muur (Ch.4), MK02_017	37
Figuur 36 – Resultaten DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste golfimpact op de zeewaartse muur GDU Middelkerke (Ch. 4).....	38
Figuur 37 – Vergelijking toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter, landwaartse GDU-muur (Ch.4).....	39
Figuur 38 – Weibull fit op DAF-gefilterde krachtpiekwaarden, landwaartse muur GDU Middelkerke (Ch.4)	40
Figuur 39 – ontwerpdoorsnede MK03 “GDU Westende”	41
Figuur 40 – DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de zeewaartse muur GDU Westende (Ch.3)	44
Figuur 41 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact , zeewaartse GDU-muur (Ch.3).....	45
Figuur 42 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact met dynamische versterking, zeewaartse GDU-muur (Ch.3).....	45
Figuur 43 – Weibull fit op Butterworth gefilterde krachtpiekwaarden, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)	46
Figuur 44 – DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de landwaartse muur GDU Westende (Ch.4).....	48
Figuur 45 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact , landwaartse GDU-muur (Ch.4)	49
Figuur 46 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact , landwaartse GDU-muur (Ch.4)	49
Figuur 47 – Weibull fit op gefilterde krachtpiekwaarden, landwaartse muur GDU Middelkerke (Ch.4).....	50
Figuur 48 – Grondplan Rauschenbergplein met definities snedes.....	52
Figuur 49 – Geometrie modelsectie MK04 “Rauschenbergplein CC’ ”	53
Figuur 50 – DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de zitbank Rauschenbergplein snede CC’ (Ch.4)	56
Figuur 51 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact, zitbank Rauschenbergplein (Ch.4)..	57
Figuur 52 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact, zitbank Rauschenbergplein (Ch.4)..	57
Figuur 53 – Weibull fit op gefilterde krachtpiekwaarden, zitbank Rauschenbergplein (Ch.4)	58
Figuur 54 – modelsectie MK05 (peilen in m TAW)	60
Figuur 55 – Planzicht golfgoot met opdeling modelsecties (bemating in mm, afstanden t.o.v. nulpunt golfschot)	B5
Figuur 56 – voorland met wanden buitensecties (zicht richting golfschot)	B6
Figuur 57 – golfdempende matten tussen modelsectie en achterzijde golfgoot	B6
Figuur 58 – Modelsectie MK01 : meetopstelling krachten (voorgrond) en golfoverslag (achtergrond)	B7
Figuur 59 – Modelsectie MK01 : frontaal zicht op meetopstelling krachten	B7

Figuur 60 – Details meetopstelling overslag en krachten modelsectie MK01	B8
Figuur 61 – Modelsectie MK02 GDU Middelkerke : meetopstelling krachten (voorgrond) en golfoverslag (achtergrond).....	B9
Figuur 62 – Detail load cell gemonteerd op meetsectie frontmuur GDU	B9
Figuur 63 – Details meetopstelling krachten en overslag modelsectie MK02 (afmetingen in mm)	B10
Figuur 64 – Modelsectie MK04 : meetopstelling krachten op zitbank (rechts) en golfoverslag (links)	B11
Figuur 65 – Modelsectie MK04 : detail meetopstelling golfoverslag (links) en krachten op zitbank (rechts)	B11
Figuur 66 – Details opstelling golfoverslag modelsectie MK04.....	B12
Figuur 67 – Modelsectie MK05 : meetopstelling golfoverslag.....	B13
Figuur 68 – Details opstelling golfoverslag modelsectie MK05.....	B13

1 Inleiding

1.1 Context

Het voorliggend rapport beschrijft de fysische modelproeven die uitgevoerd werden in het kader van de geplande zeedijkrenovatie tussen Westende en Middelkerke in opdracht van het agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, afdeling Kust. Deze proeven werden uitgevoerd in de periode november 2018 - februari 2019 in de golfgoot in Hal 3 van het Waterbouwkundig Laboratorium.

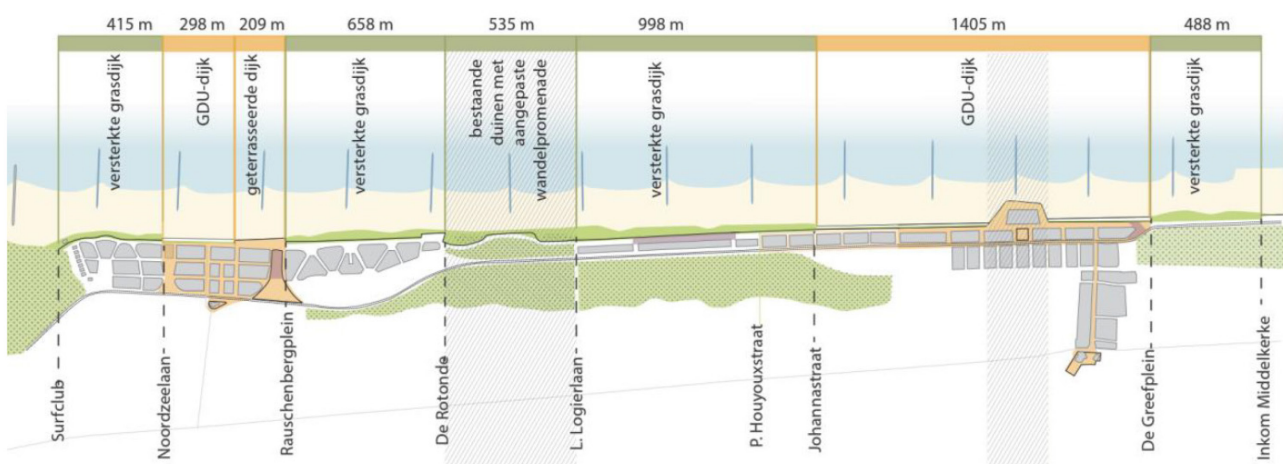
De heraanleg van de zeedijk komt er op vraag van de gemeente Middelkerke en gaat uit van een compromis tussen kustveiligheid, minimaal strandonderhoud (streven naar 5-jaarlijkse strandsuppleties door voldoende grote zandbuffer), en een attractief strand en zeedijk voor toeristen en commerciële activiteiten. De projectzone loopt van de surfclub Westende tot voorbij de laatste bebouwing in Middelkerke en is opgedeeld in verschillende zones naargelang de bestemming (Figuur 1).

In residentiële zones wordt voor het eerst aan onze kust gewerkt met het concept 'versterkte grasdijk'. Er worden met gras begroeide zandbermen aangelegd voor de bestaande zeedijk die een voldoende zandbuffer creëren om het gemiddeld golfoverslagdebiet ter plaatse van de veiligheidslijn binnen het veiligheids criterium (1 l/s/m) te houden tijdens de 1000-jarige storm.

In andere zones, waar de zeedijk een hogere toeristische/commerciële functie heeft wordt de zeedijk aangelegd volgens het concept 'golfdempende uitbouw' (GDU). Dit bestaat uit een dubbele rij stormmuren waarbij de meest zeewaartse de functie heeft het oplopende water opwaarts te projecteren, waardoor het overslagvolume over de meest landwaartse muur beperkt wordt.

Ter hoogte van het Rauschenbergplein in Westende wordt de dijk getrapt uitgebouwd onder een flauwe helling, voor een vlotte doorgang naar het strand. Verder worden twee ondergrondse parkings aangelegd ter hoogte van de Logierlaan in Westende (OG1) en het De Greefplein in Middelkerke (OG2).

Figuur 1 – Indeling studiegebied in projectzones (bron: SBE, 2018)



1.2 Doelstelling golfgootproeven

Het doel van voorliggend proevenprogramma is om 5 modelsecties te beproeven op golfoverslag en golfimpact onder de condities die optreden tijdens de 1000-jarige storm op het einde van de begrote levensduur van de constructie (2070). Dit betekent dat er rekening wordt gehouden met de verwachte zeespiegelstijging tot 2070.

Een overzicht van de modelsecties wordt gegeven in Tabel 1. De locatie van de snedes (y-coörd.) is overgenomen uit 2D-XBeach dat opgesteld werd voor de berekening van de strandafslag onder ontwerpcondities (SBE, 2018). Ter plaatse van het Rauschenbergplein worden twee snedes gedefinieerd (cf. infra).

Tabel 1 – Overzicht modelsecties

Model sectie	Omschrijving	Dijkvak	Locatie y [m]	Meting
MK01	Parking Logierlaan OG1	81	2240	Golfoverslag en golfimpact
MK02	GDU Middelkerke	87	4272	Golfoverslag en golfimpact
MK03	GDU Westende	76	530	Golfoverslag en golfimpact
MK04	Rauschenbergplein CC'	77	850	Golfoverslag en golfimpact
MK05	Rauschenbergplein AA'	77	850	Golfoverslag

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft omschrijving van het fysisch model en de meetopstelling voor golfoverslag en -krachten.

In Hoofdstuk 3 t.e.m. 7 wordt de analyse en de resultaten van de 5 modelsecties besproken.

Tenslotte worden in Hoofdstuk 8 de resultaten van gemeten golfoverslag en -krachten samengevat.

In Bijlage A wordt de methode omschreven voor de bepaling van de ontwerpwaarde van golfkracht. Deze methodiek kwam tot stand in nauw overleg met dr. ir. I. Hermans (Afdeling Expertise Beton en Staal, DMOW), die ook dit luik van voorliggend rapport heeft gereviseerd.

In Bijlage B zijn enkele plannen en foto's van de modelopstelling opgenomen.

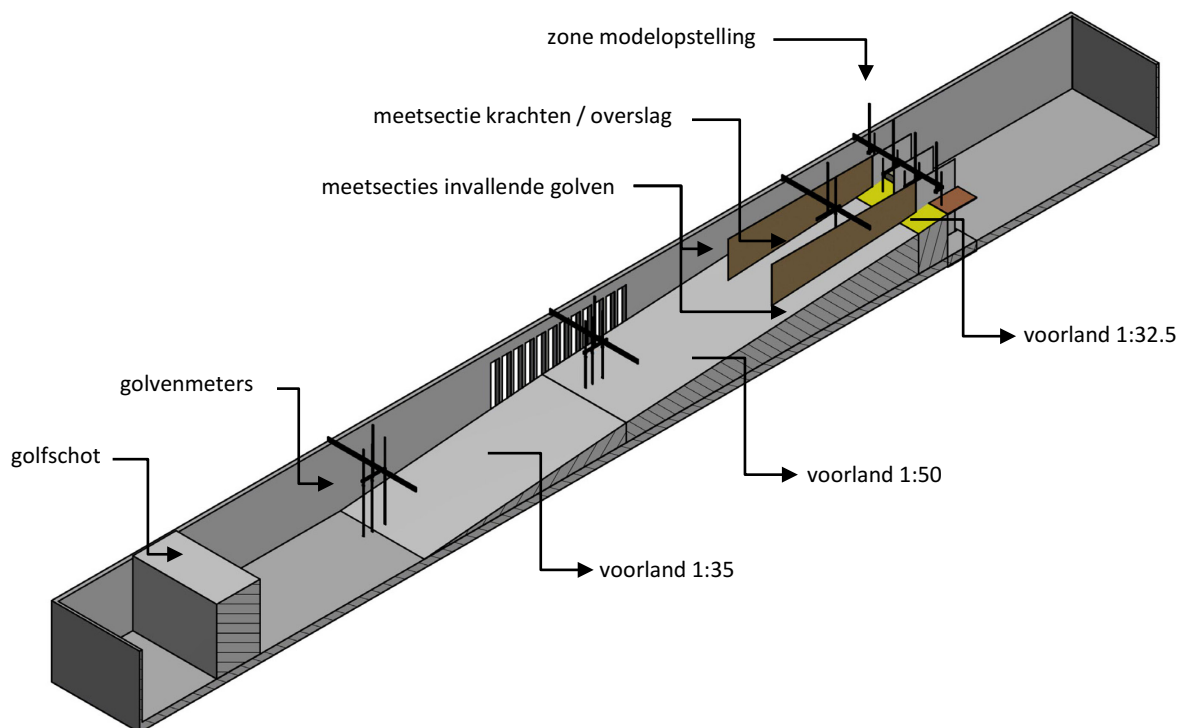
2 Schaalmodel golfgoot

De golfgootproeven werden uitgevoerd in de WL golfgoot in Hal 3 met afmetingen 71 (L) x 4 (B) x 1.4 (H) m. Figuur 2 geeft een overzicht van de golfgoot waarin het golfschot, voorland en modelopstelling zijn aangeduid. Aan beide kopse zijden van de golfgoot, aan de achterzijde van het golfschot en ongeveer halverwege tussen de modelopstelling en de achterwand van de golfgoot, bevinden zich over de volledige breedte van de golfgoot gestapelde blokken met een gaasstructuur voor golfdemping (niet opgenomen in Figuur 2).

De verschillende elementen in de modelopstelling worden hierna in meer detail omschreven. Enkele foto's met details van de modelopstellingen zijn opgenomen in Bijlage B.

In wat volgt wordt voor locatiebepaling een rechtshandig (X,Y,Z)-assenstelsel gedefinieerd met oorsprong in het midden onderaan het golfschot in nulpositie¹. De X-as is gericht naar de modelopstelling volgens de lengteas van de golfgoot.

Figuur 2 – Overzicht golfgoot, voorland en modelopstelling



¹ De nulpositie van het golfschot bevindt zich op 8.18 m van de binnenzijde van de kopse muur. Positieve X-waarden worden gerekend in de richting van het model, positieve Y-waarden in de richting van de dichtstbijzijnde zijmuur Hal 3, positieve Z-waarden opwaarts.

Alle modelsecties zijn Froude verschaald 1:25. Tabel 2 geeft een overzicht van de toe te passen schaalfactoren bij omzetting van grootheden tussen modelschaal en natuur.

Tabel 2 – Toe te passen schaalfactoren op basis van de Froude schaalfactor 1:25

Fysische grootheid	Eenheid	Schaalfactor (natuur : model)
Lengte	meter [m]	25
Tijd	seconde [s]	5
Kracht per eenheidsbreedte	Newton [N/m]	625 (25^2)
Debiet per eenheidsbreedte	liter/meter/seconde (l/m/s)	125 ($25^{3/2}$)

2.1 Golfgeneratie

De golven worden opgewekt door een golfschot van het piston type. Het schot van 4 m breed (Figuur 3) verplaatst zich in horizontale richting onder aandrijving van een hydraulische cilinder. Voor de sturing van het golfschot wordt Awasys² gebruikt. Gelet op de fysische capaciteiten (slaglengte) van het golfschot wordt de generatie van de onregelmatige golven (Jonswap spectrum) toegepast in de modus 'lineaire golfgeneratie' en zonder actieve golfabsorptie. De noodzaak voor toepassing van actieve golfabsorptie is in dit geval zeer beperkt gelet op de zeer lage reflectie veroorzaakt door het voorland en de modelopstelling.

In Awasys wordt de aanmaak van de tijdreeks onregelmatige golven mee bepaald door het z.g. *seed* getal. Deze input parameter stelt een random number generator in, waardoor een willekeurige verdeling van fasehoeken resulteert in een specifieke golftreincompositie.

Figuur 3 – Golfschot en hydraulische cilinder



² <https://www.hydrosoft.civil.aau.dk/awasys/>

2.2 Voorland

De geometrie van het voorland werd bepaald op basis van de strandafslagmodellering met XBeach (SBE, 2018) waaruit voor elke modelsectie een strandprofiel werd bepaald. De modellering resulteert in beperkte verschillen in verticale positie van het strand aan de teen van de constructie (tussen +6.66 m en 7.02 m TAW). Omwille van praktische redenen werd het voorland tot 1 doorsnede vereenvoudigd, waarvan de bepalende punten samengevat worden in Tabel 3. Het eindpunt van het voorland (tevens het niveau van het strand aan de teen van de beproefde structuur) ligt op 0.8676 m t.o.v. de vloerpeil van de golfgoot. In natuur komt dit overeen met een dijkteen op +6.69 m TAW. Het bodempeil van de golfgoot komt overeen met -15 m TAW in natuur.

Tabel 3 – Definitie voorland (X-coord. t.o.v. nulpositie golfschot, Z-coord t.o.v. bodem golfgoot)

Startpunt		Eindpunt		Helling [-]
X [m]	Z[m]	X [m]	Z [m]	
11.40	0.00	25.40	0.40	1:35
25.40	0.40	46.68	0.806	1:50
45.68	0.8676	47.68	0.8676	1:32.5

2.3 Indeling modelsecties

De golfgoot wordt in lengterichting ingedeeld in 4 modelsecties (planzicht Figuur 55 in bijlage). Vanaf $X \approx 37$ m zijn 2 ondoorzichtige wanden in houtvezelplaat op ca. 1 m afstand van de zijwanden van de golfgoot geplaatst. In deze twee buitenste meetsecties volgt na het voorland een horizontaal stuk bathymetrie van ca. 2 m lang, waarna over de volledige breedte van de golfgoot gestapelde blokken met gaasstructuur voor golfabsorptie zorgen.

Vanaf $X \approx 46.8$ m wordt de middelste sectie opgedeeld in 2 secties door middel van een doorzichtige wand in harde kunststof: één sectie voor de opmeting van golfoverslag en één voor de meting van golfkrachten. Op dit punt gaan de buitenste ondoorzichtige wanden over in hetzelfde transparante kunststof materiaal.

Figuur 4 toont een zicht op de modelsecties gezien langs de achterzijde richting golfschot. In de voorgrond de 3 transparante tussenwanden die de meetopstelling voor golfkrachten (links) en golfoverslag (rechts) onderling en van de buitensecties scheiden, en aan beide buitensecties de horizontale bathymetrie. Verder op het voorland gaan de transparante tussenwanden over in ondoorzichtige platen.

Figuur 4 – Modelopstelling gezien richting golfschot.



2.4 Meetopstelling golvenmeters

In totaal werden 14 golvenmeters geplaatst, te zien in het overzicht in Figuur 2 : een groep van 3 nabij het golfschot (Figuur 5), een groep van 3 nabij de overgang in helling op het voorland, 2 afzonderlijke meters op het voorland 1:50 en 6 golvenmeters dicht bij de modelsecties. Tabel 4 bevat een overzicht van de posities.

Figuur 5 – golvenmeters nabij golfschot



De golvenmeters zijn vervaardigd door HR Wallingford³ en van het resistieve type: de gemeten stroom doorheen de twee roestvrijstalen staven wordt omgezet in een uitgangsspanning die evenredig is met de ondergedompelde waterdiepte. De golvenmeters zijn geconnecteerd op een afzonderlijk data acquisitie systeem (DAQ) en worden gelogd aan 50 Hz.

De golvenmeters worden bij het begin van het project gekalibreerd. Nadien wordt er dagelijks voor de start van de proevenreeks een nulmeting uitgevoerd bij stilstaand water om het resultaat te vergelijken met de werkelijke niveau-waarde afgelezen op de meetnaald. Indien dit binnen de tolerantie valt van +- 1mm, kan de proevenreeks van start gaan. Indien dit niet het geval is, wordt het resultaat nader bekeken en eventueel een onderhoud uitgevoerd aan de golvenmeter. De volledige kalibratie wordt wekelijks herhaald. De kalibratie bestaat uit een nulmeting van 30 seconden op 5 verschillende waterniveaus.

De kalibratie van het invallend golfspectrum (zie sectie 2.7) aan de teen van de constructie gebeurt op basis van de golvenmeters in de buitenste meetsecties (WG11 en 14). Voor de statistische analyse van de golfkrachten wordt het aantal golven nabij het golfschot gebruikt, gemeten op basis van golvenmeter WG1 en WG3⁴. De signalen van de overige golvenmeters worden niet gebruikt in deze analyse.

Tabel 4 – Posities golvenmeters in golfgoot.

WG	X [m]	Y [m]
01	10.00	0.00
02	10.60	0.00
03	11.49	0.00
04	25.40	0.00
05	25.87	0.00
06	26.58	0.00
07	37.68	0.00
08	42.68	0.00
09	46.68	-0.504
10	46.68	0.504
11	47.68	-1.512
12	47.68	-0.504
13	47.68	0.504
14	47.68	1.512

³ <http://equipit.hrwallingford.com/products/wave-gauges>

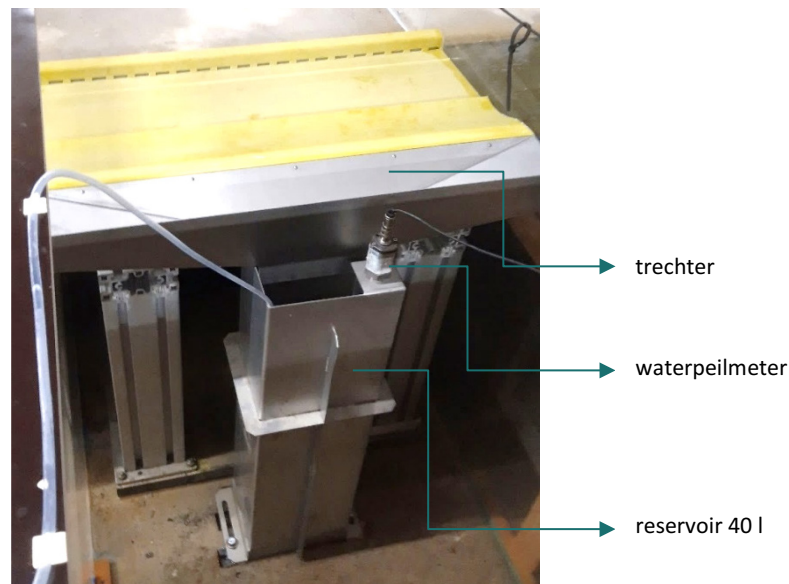
⁴ WG2 vertoonde een systematische ruis bij alle proeven, waardoor het signaal van deze golvenmeter als onbruikbaar bestempeld werd.

2.5 Meetopstelling golfoverslag

Figuur 6 toont een overzicht van de opstelling, gezien langs de achterzijde in de richting van het golfschot. Het overslaand water wordt via een trechter in een reservoir geleid. Voor dit project werden 2 overslagreservoirs gemaakt uit RVS met wanddikte 3mm, die waterdicht afgelast zijn. De grootste heeft een inhoud van ca 215 l de kleinste van ca 40 l. De overslagreservoirs zijn zo gedimensioneerd dat ze het totale verwachte overslagvolume tijdens een proef kunnen stockeren. Er dient m.a.w. niet tussentijds gepompt te worden.

Om te verhinderen dat het overslagreservoir zou opdrijven werd deze met bouten in de vloerplaat van de golfgoot verankerd. Het reservoir heeft een niveausensor die het peil registreert, waaruit dan uiteindelijk de gemiddelde hoeveelheid overslag berekend kan worden. Door de optimale dimensionering van het kleinste reservoir is het mogelijk om individuele overslagdebieten te onderscheiden uit het gemeten waterpeil, zelfs bij de relatief kleine gemiddelde overslagdebieten gemeten in dit project.

Figuur 6 – Meetopstelling golfoverslag modelsectie MK02 met reservoir 40 l



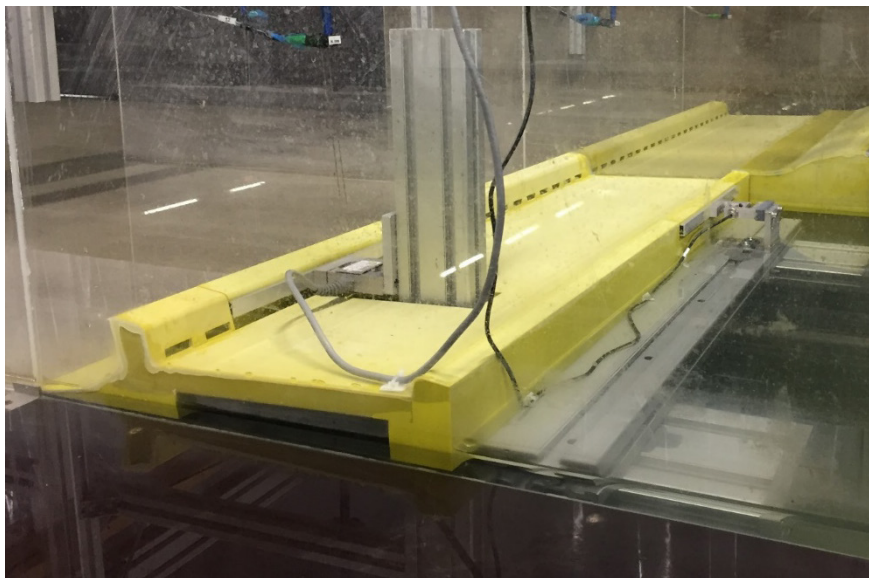
2.6 Meetopstelling golfkrachten

Krachten worden gemeten met een load cell die verbonden is met een 30 cm brede uitsnijding van een te beproeven onderdeel uit de modelsectie (een muur of zitbank). Bij het ontwerp van deze meetopstelling gaat bijzondere aandacht naar het realiseren van een stijve verbinding tussen de load cell en de gemeten sectie, en een zo stijf mogelijke verankering van het meetframe in de vloerplaat van de golfgoot. Figuur 7 en Figuur 8 tonen resp. het frame opgebouwd uit aluminium profielen en de verbinding met de load cells. Om zoveel mogelijk ruisinvloeden te beperken te wijten aan signaaltransmissie werd de versterker dicht bij het meetinstrument geplaatst. De krachtsignalen werden bemonsterd aan 1000 Hz.

Figuur 7 – Opbouw meetframe krachten, modelopstelling MK01



Figuur 8 – Verbinding load cells op meetframe krachten, modelopstelling MK02



In dit project wordt gebruikt gemaakt van 2 load cells met een meetbereik van 5 en 50 kg. Het verschil tussen beide load cells is niet alleen de grootte van het meetbereik maar ook de stijfheid van het instrument. De keuze van de load cell hangt af van de te verwachten grootte van de impact. De load cell van 50 kg is stijver en dus minder onderhevig aan mogelijke dynamische oscillatie in het signaal (zie verder), anderzijds dient erover gewaakt te worden dat het gemeten signaal niet binnen de ruisband van deze sensor valt.

Tabel 5 geeft een overzicht van de load cell types gebruikt in de verschillende modelopstellingen.

Tabel 5 – overzicht types load cell gebruikt in de verschillende modelopstellingen voor krachtmeting

Gemeten onderdeel modelsectie	Kanaal DAQ	Meetbereik load cell [kg]
MK01 frontmuur parking	3	50
MK01 dakmuur parking	4	5
MK02 zeewaartse muur GDU	3	50
MK02 landwaartse muur GDU	4	5
MK03 zeewaartse muur GDU	3	50
MK03 landwaartse muur GDU	4	5
MK04 zitbank Rauschenbergplein	4	5

2.7 Kalibratie invallend golfspectrum

Om de golfoverslag en -impact op de modelsecties te beproeven is het noodzakelijk dat de invallende golfcondities aan de teen van de structuur overeenstemmen met deze bepaald uit de SWASH-2D modellering (SBE, 2018).

Bij de uitvoering van de proeven worden de invoerparameters voor golfgeneratie (H_{m0} of T_p) en de waterdiepte iteratief bijgesteld tot de golfcondities aan de teen binnen de gewenste toleranties vallen ($\pm 3\%$ voor H_{m0} , $\pm 5\%$ voor $T_{m-1,0}$, ± 2 mm voor waterdiepte). De toleranties op de significante golfhoogte H_{m0} , spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ en waterstand (incl. golfgeïnduceerde opzet) zijn dezelfde als deze toegepast in de methodologie 'Toetsing kustveiligheid' (Suzuki *et al.*, 2016).

In sommige gevallen blijkt het niet mogelijk alle 3 de parameters tegelijkertijd binnen de gewenste toleranties te brengen. In dat geval wordt ervoor geopteerd om enkel de kalibratie enkele te voldoen voor golfhoogte en waterdiepte samen. Op de eventuele gevolgen voor de gemeten golfoverslag of krachten wordt dieper ingegaan in de bespreking van de modelresultaten.

De specifieke golftreincompositie van elke proef maakt het noodzakelijk om de kalibratie uit te voeren en de inputparameters bij te stellen voor elke proef afzonderlijk.

3 Modelsectie MK01 “parking Logierlaan OG1” (sectie 81, y=2240 m)

3.1 Dataset gekalibreerde proeven

Er zijn 18 gekalibreerde proeven beschikbaar (zie Tabel 6). De meeste proeven bevatten ca. 1300 golven op diep water, enkele 3000 tot 4000. In Tabel 6 bevat de derde kolom het ingestelde waterpeil in de golfgoet in rust (SWL). Kolommen 4 en 5 bevatten de ingestelde parameters voor golfgeneratie (modelschaal 1:25).

De parameters in de vet omlijnde kaderrand (6 laatste kolommen) zijn de gemeten condities aan de teen van de structuur. De laatste 3 kolommen bevatten de afwijkingen t.o.v. de richtwaarden uit de SWASH-2D modellering (in modelschaal 1:25). De parameters van het invallend golfspectrum aan de teen van de structuur worden bepaald als het gemiddelde uit het opgemeten spectrum van beide golvenmeters WG11 en 14 in de buitenste meetsecties (zie sectie 2.4). In de analyse van het golfspectrum wordt enkel de aanwezige golfenergie binnen het interval 0.025-2.5 Hz beschouwd.

Om het aantal golven nabij het golfschot te bepalen (nodig voor de statistische analyse van de golfkrachten), wordt het signaal van de golvenmeters nabij het golfschot gebruikt. Het aantal golven wordt berekend als het gemiddelde aantal golven uit een tijdsdomeinanalyse⁵ van golfhoogtemeters WG1 en 3, weergegeven in kolom 6 in Tabel 6.

Tabel 6 – Overzicht gekalibreerde proefruns modelsectie 1

RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfschot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	Tp [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.0375	Target: 6.66	Target: 0.907	+/- 3%	+/- 5%	+/- 0.002 m
MK035	62312190	0.903	0.11	2.00	1377	0.0374	6.80	0.9064	-0.25%	2.10%	0.0006
MK037	817070576	0.903	0.12	2.00	1351	0.0371	6.92	0.9070	-1.05%	3.90%	0.0000
MK039	1135635988	0.903	0.11	2.00	1370	0.0361	6.67	0.9066	-3.81%	0.10%	0.0004
MK040	1135635988	0.902	0.12	1.80	1326	0.0367	6.78	0.9058	-2.21%	1.76%	0.0012
MK041	909588146	0.902	0.11	2.00	1382	0.0360	6.96	0.9057	-4.05%	4.50%	0.0013
MK043	909588146	0.904	0.12	1.80	1343	0.0378	6.91	0.9077	0.73%	3.75%	-0.0007
MK044	1154988288	0.903	0.12	2.00	1377	0.0376	7.05	0.9068	0.32%	5.91%	0.0002
MK045	1154988288	0.903	0.12	1.80	1362	0.0363	6.81	0.9067	-3.11%	2.24%	0.0003
MK047	1154988288	0.902	0.12	1.90	1337	0.0372	7.09	0.9060	-0.83%	6.39%	0.0010
MK049	1343455737	0.904	0.12	1.80	1333	0.0372	6.42	0.9076	-0.72%	-3.57%	-0.0006

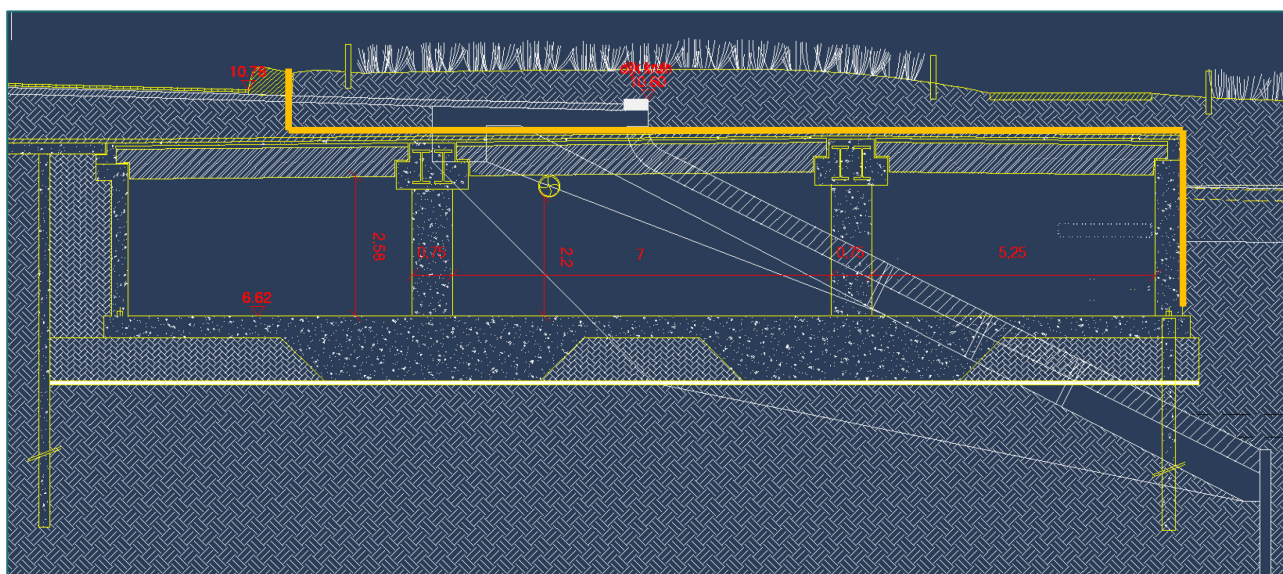
⁵ Wavelab tijdsdomein analyse met weglaten van de eerste 100 s uit het signaal (wegens inspeleffecten).

RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfschot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	Tp [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.0375	Target: 6.66	Target: 0.907	+/- 3%	+/-5%	+/- 0.002 m
MK052	1384645384	0.903	0.12	1.80	1328	0.0371	6.87	0.9069	-1.03%	3.13%	0.0001
MK054	113445332	0.904	0.12	1.80	1337	0.0379	6.93	0.9077	1.00%	4.05%	-0.0007
MK057	664268169	0.904	0.11	1.70	1286	0.0361	6.65	0.9076	-3.61%	-0.17%	-0.0006
MK058	1	0.904	0.12	2.00	1347	0.0387	6.97	0.9081	3.25%	4.63%	-0.0011
MK062	-1041357480	0.904	0.11	2.10	3951	0.0377	6.90	0.9073	0.44%	3.57%	-0.0003
MK067	2	0.903	0.115	1.90	1339	0.0371	6.81	0.9067	-1.09%	2.32%	0.0003
MK068	3	0.903	0.120	2.00	2292	0.0365	6.94	0.9068	-2.81%	4.14%	0.0002
MK072	4	0.904	0.13	1.90	1325	0.0365	6.89	0.9084	-2.65%	3.48%	-0.0014
				totaal	27763						

3.2 Golfoverslag

In bijlage B.1 zijn enkele foto's en tekeningen van de modelopstelling opgenomen. Figuur 9 toont de ontwerpdoorsnede. Het afgeslagen strand ligt op +6.69 m TAW tegen de frontmuur van de parking (het aanzetpeil van de bodemplaat ligt op +5.35 m TAW). De zeewaartse zijde van de dakplaat ligt op +9.96 m TAW. Het golfoverslagdebiet wordt gemeten ter plaatse van de muur op de dakplaat van de parking. Deze heeft een kruinpeil op +11.20 m TAW.

Figuur 9 – doorsnede MK01 (maten in m en peilen in m TAW). De oranje lijn volgt de contour van de ingebouwde snede in model.



In slechts 5 van de 18 proeven werd overslag gemeten (zie Tabel 7). De gemeten volumes en afgeleide gemiddelde overslagdebieten (op natuurschaal) zijn echter verwaarloosbaar klein. Er kan dus gesteld worden dat in deze modelsectie geen overslag optreedt bij de ontwerpcondities.

Tabel 7 – Gemeten overslagdebiet proevenreeks modelsectie MK01 (waarde op natuurschaal).

Proef	Totaal overslagvolume in reservoir [l]	Duurtijd proef [s]	q [l/m/s]
MK043	0.006	1980	3.79E-04
MK047	0.130	2200	7.39E-03
MK058	0.055	2200	3.13E-03
MK062	0.200	6500	3.85E-03
MK067	0.030	2070	1.81E-03

3.3 Krachten op de frontmuur

3.3.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.3)

Op basis van een kwaliteitscontrole op de krachtsignalen worden alle runs in Tabel 6 in aanmerking genomen voor analyse.

Het meetprincipe van de load cell waarmee de krachten gemeten worden is gebaseerd op de vervorming van een rekstrookje. Dit is in feite een veersysteem dat trillingen kan vertonen wanneer onderhevig aan een belasting met impulsief karakter. Dit heeft tot gevolg dat de amplitude van de gemeten piekbelasting overschat wordt door de dynamische respons van de load cell. Figuur 10 illustreert dit voor de grootste gemeten impact in test MK037.

In bepaalde gemeten krachtsignalen is derhalve een oscillatiecomponent aanwezig die eruit gefilterd dient te worden. Ook een onvoldoende stijf meetsysteem kan bijdragen aan de dynamische amplificatie of reductie van het gemeten krachtsignaal. Voor de huidige meetopstelling is de waargenomen oscillatie in het meetsignaal hoogstwaarschijnlijk toe te schrijven aan de load cell zelf, vermits bijzondere aandacht werd besteed aan het bouwen van een voldoende stijf meetframe.

Voor het filteren van het krachtsignaal werden volgende filters toegepast:

- Wavelab⁶ Dynamic Amplification Filter (DAF)
- Wavelab laagdoorlaatfilter (bandpass in frequentiedomein)
- Digitaal laagdoorlaatfilter (Butterworth, in python script)

Het digitaal Butterworth laagdoorlaatfilter wordt uitgevoerd op basis van de python Scipy bibliotheek (Scipy.signal.butter⁷). De filtercoëfficiënten worden toegepast in combinatie met de functie *filtfilt* (Scipy.signal.filtfilt⁸). De dubbele operatie m.b.v. filtfilt (eenmaal voorwaarts en eenmaal achterwaarts) resulteert in een lineair digitaal filter dat geen faseverschuiving t.o.v. het originele signaal veroorzaakt. De orde van het totale filter is dan tweemaal de orde van de originele Butterworth filter (er wordt steeds een 4^{de} orde gebruikt in de analyse).

⁶ <https://www.hydrosoft.civil.aau.dk/wavelab>

⁷ <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.butter.html#scipy.signal.butter>

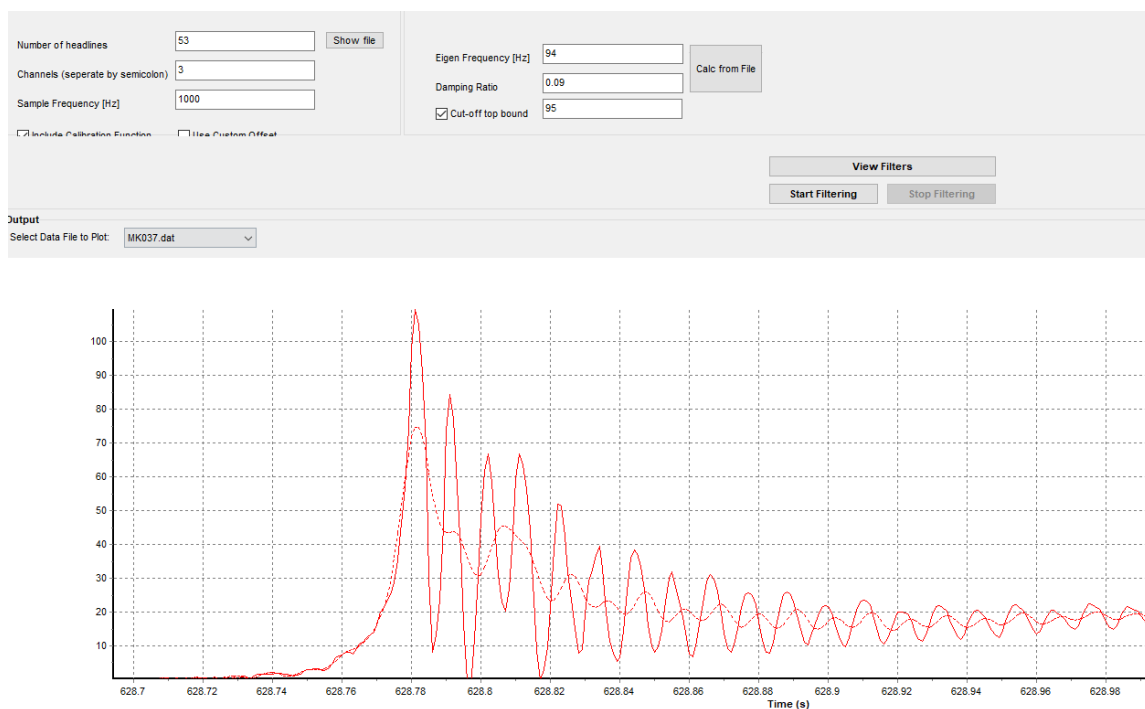
⁸ <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.filtfilt.html#scipy.signal.filtfilt>

Het Wavelab Dynamic Amplification Filter (DAF) heeft als uitgangspunt dat de meetopstelling gemodelleerd kan worden als een systeem met 1 vrijheidsgraad en lineair visceuze damping. De filter kan toegepast worden in zowel het frequentiedomein als in het tijdsdomein (FIR filter). In volgende analyse wordt deze toegepast in het frequentiedomein. De in te stellen parameters zijn:

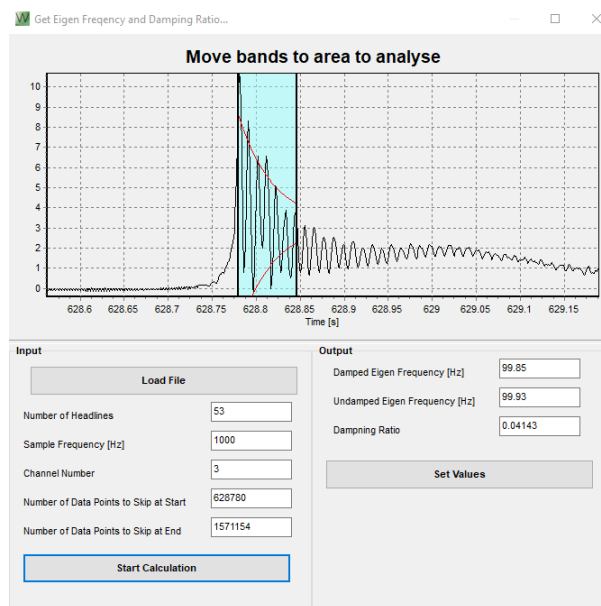
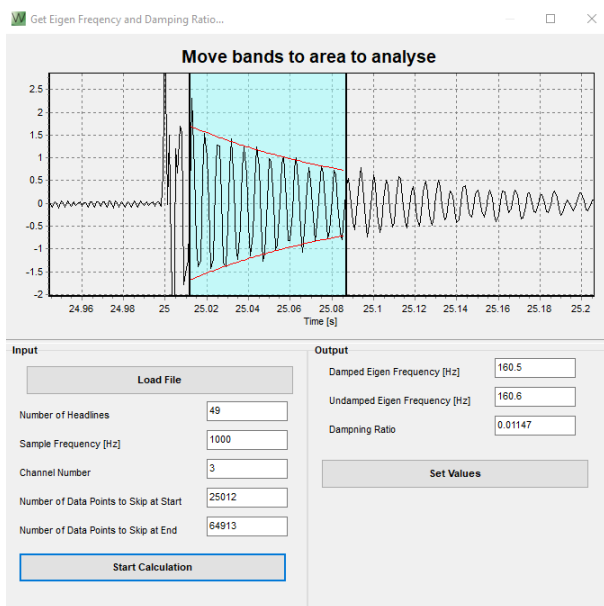
- Eigenfrequentie van de meetopstelling (zie verder)
- Dampingsfactor (zie verder)
- Bovengrens laagdoorlaatfilter (cut-off top bound): vast te leggen net boven de eigenfrequentie om ruisversterking tegen te gaan

De eigenfrequentie en damping kunnen in Wavelab bepaald worden uit het gemeten signaal (Figuur 11). Op basis van een zg. 'hamertest' zonder water tegen de muur wordt een eigenfrequentie van 160 Hz en een dampingsfactor van ca 0.01 afgeleid. De analyse op de grootste gemeten golfimpact in test MK037 geeft een eigenfrequentie van ca 100 Hz en dampingsfactor ca 0.04. Hieruit blijkt dat de dynamische respons van het meetsysteem afhankelijk is van de massa water betrokken in de impact. In principe kunnen dus voor elke individuele impact optimale filterparameters afgeleid worden, hetgeen praktisch moeilijk te implementeren is. Als alternatief wordt d.m.v. een beknopte gevoeligheidsanalyse onderzocht welke globale filterinstellingen voor alle tijdreeksen leiden tot betrouwbare (en licht conservatieve) piekwaarden van reële golfkracht.

Figuur 10 – voorbeeld van dynamische versterking van gemeten krachtsignaal



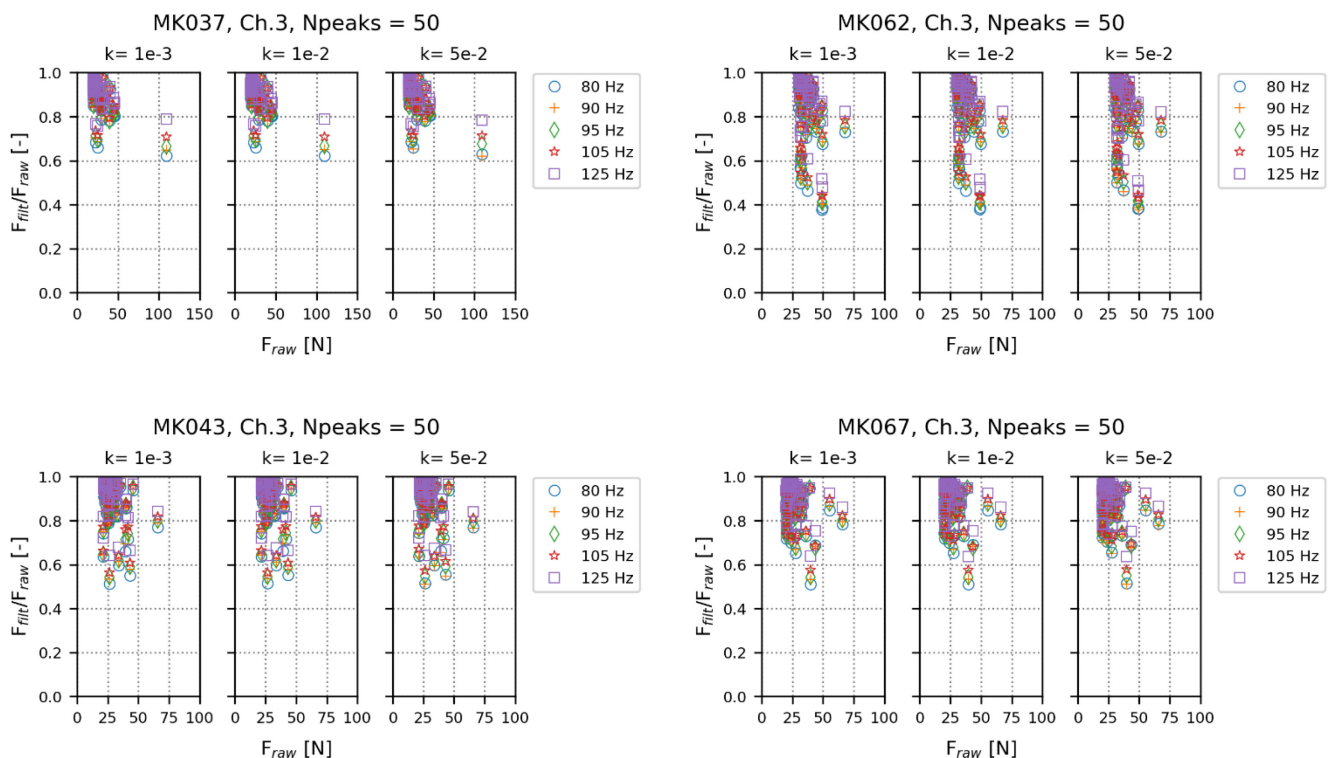
Figuur 11 – voorbeeldvenster bepaling eigenfrequentie en demping in Wavelab :
hamertest op droge opstelling (links) en grootste geregistreerde impact MK037 (rechts)



Figuur 12 toont voor de 50 grootste gemeten krachten in de 4 proeven met de grootste ruwe krachtpiek de verhouding van de gefilterde waarde op basis van het DAF filter t.o.v. de ruwe waarde, met toepassing van de eigenfrequentie tussen 80 en 125 Hz en voor 3 verschillende waarden van dempingsfactor (0.005, 0.01 en 0.05). Uit de vergelijking blijkt dat de dempingsfactor geen significante invloed uitoefent in de toepassing van het DAF filter. Uit een gedetailleerde analyse van verschillende types impacten in de puntenwolk in Figuur 12 blijken volgende algemene observaties:

1. De meeste krachtpieken zijn niet onderhevig aan sterke reductie (F_{filt}/F_{raw} tussen 1 en 0.8): dit wijst erop dat er geen (uitgesproken) dynamische oscillatie aanwezig is in het krachtsignaal. Het zwaartepunt in de puntenwolk van dit type krachten ligt evenwel bij de kleinere waarden van ruwe krachtpiek (tot ca. 50 N gemeten in model);
2. De hoeveelheid reductie na DAF filtering (de absolute waarde van de gefilterde krachtpiek bij de hoogste filterfrequentie) is afhankelijk van de amplitude van dynamische oscillatie: hoe meer het signaal 'terugveert' (negatieve waarden kunnen zelfs bereikt worden), hoe kleiner de gefilterde krachtpiek (zie Figuur 13 en Figuur 15).
3. De mate van effectiviteit van het DAF filter is ook afhankelijk van de vorm van het krachtsignaal na de impact. Indien sprake is van een regelmatig sinusoidaal verloop, wordt de primaire krachtpiek sterker gereduceerd door het DAF filter (in vergelijking met het gewoon laagdoorlaatfilter), waarbij vanaf een zekere filterfrequentie een verzadiging optreedt in de waarde van de primaire krachtpiek. Indien het krachtsignaal een meer onregelmatig verloop vertoont (waarbij ook secundaire pieken voorkomen), blijkt de werking van het DAF filter meer analoog aan een gewoon laagdoorlaatfilter, doorgaans met een iets lagere primaire krachtpiek (zie Figuur 15 en Figuur 16).

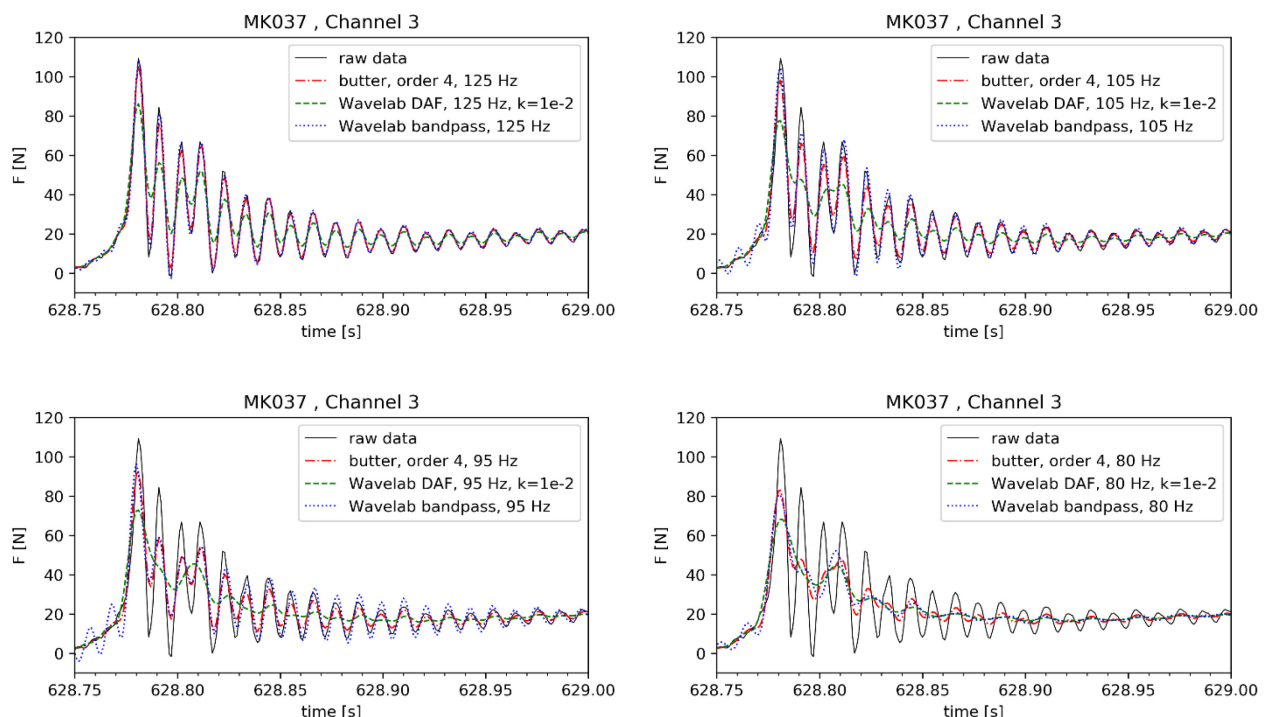
Figuur 12 – Resultaten DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de frontmuur parking OG1 (Ch.3)



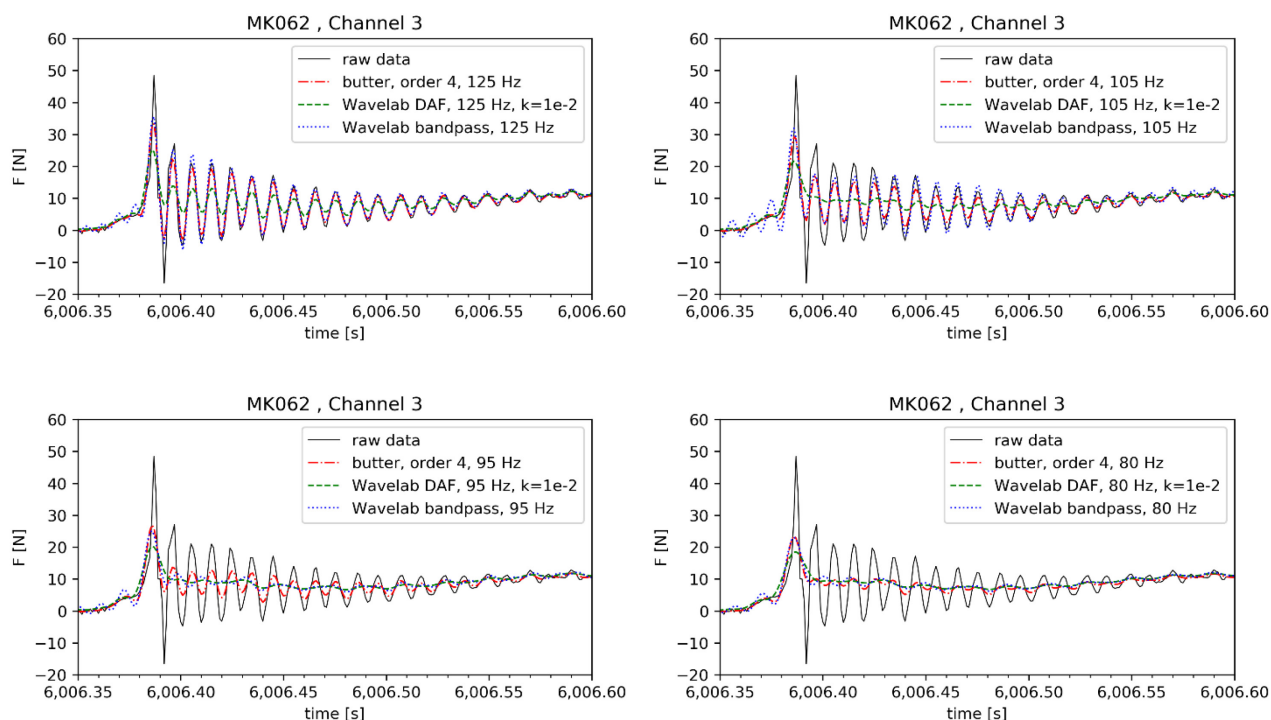
Figuur 13 en Figuur 14 illustreren de tweede bovenstaande conclusie. Beide geselecteerde impacten vertonen een uitgesproken dynamische oscillatie met een duidelijk sinusoidaal krachtsignaal na de piek. De dynamische oscillatie in Figuur 14 is echter nog meer uitgesproken dan in Figuur 13, wat resulteert in een sterkere reductie van de gefilterde krachtpiek. Vanaf een bepaalde eigenfrequentie (hier ca. 105 Hz in zowel MK037 als MK062) verwijderd het DAF filter de oscillaties na de primaire krachtpiek, waarbij ook de grootte van de krachtpiek stelselmatig daalt met afnemende eigenfrequentie (en laagdoorlaatfilter). In dit geval treedt een verzadiging op van de primaire krachtpiek vanaf ca 90 Hz. In tegenstelling tot het Wavelab DAF filter reduceren de gewone laagdoorlaatfilters (wavelab en python Butterworth) de oscillaties na de piek niet. Zoals blijkt uit de vergelijking tussen de toegepaste filterfrequenties van 125 tot 80 Hz, benaderen de gewone laagdoorlaatfilters de werking van het DAF filter vanaf een voldoende lage filterfrequentie (hier vanaf 90 Hz). De waarde van de primaire krachtpiek is echter telkens nog significant hoger dan bij het DAF filter.

Figuur 15 en Figuur 16 illustreren de werking van de verschillende filters op een impact waarbij een eerder onregelmatig verloop van het krachtsignaal na de piek optreedt, waarbij ook secundaire pieken voorkomen. Het signaal uit test MK062 vertoont oscillaties met een relatief diepe ‘terugslag’ van de krachtpieken, waardoor het gefilterd DAF signaal vrij gelijkaardig is aan deze op basis van de laagdoorlaatfilters. De primaire krachtpiek neemt stelselmatig af met afnemende doorlaatfrequentie, en telkens iets meer bij het DAF filter. Het signaal uit test MK043 vertoont ook een onregelmatig patroon in het krachtsignaal na de primaire piek, zij het iets minder uitgesproken als bij MK062. De werking van het DAF filter ligt tussen beide getoonde impacten uit MK062 in (Figuur 14 en Figuur 15).

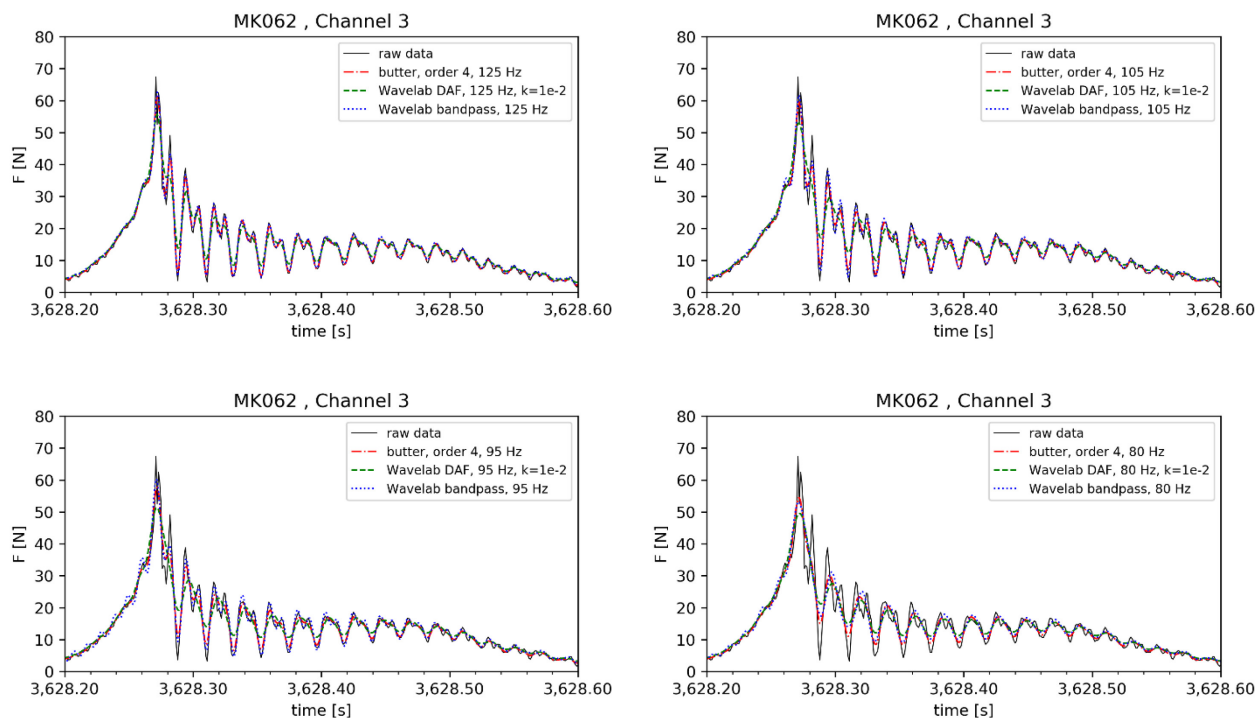
Figuur 13 – Filtering dynamische oscillatie in grootste krachtpiek, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK037



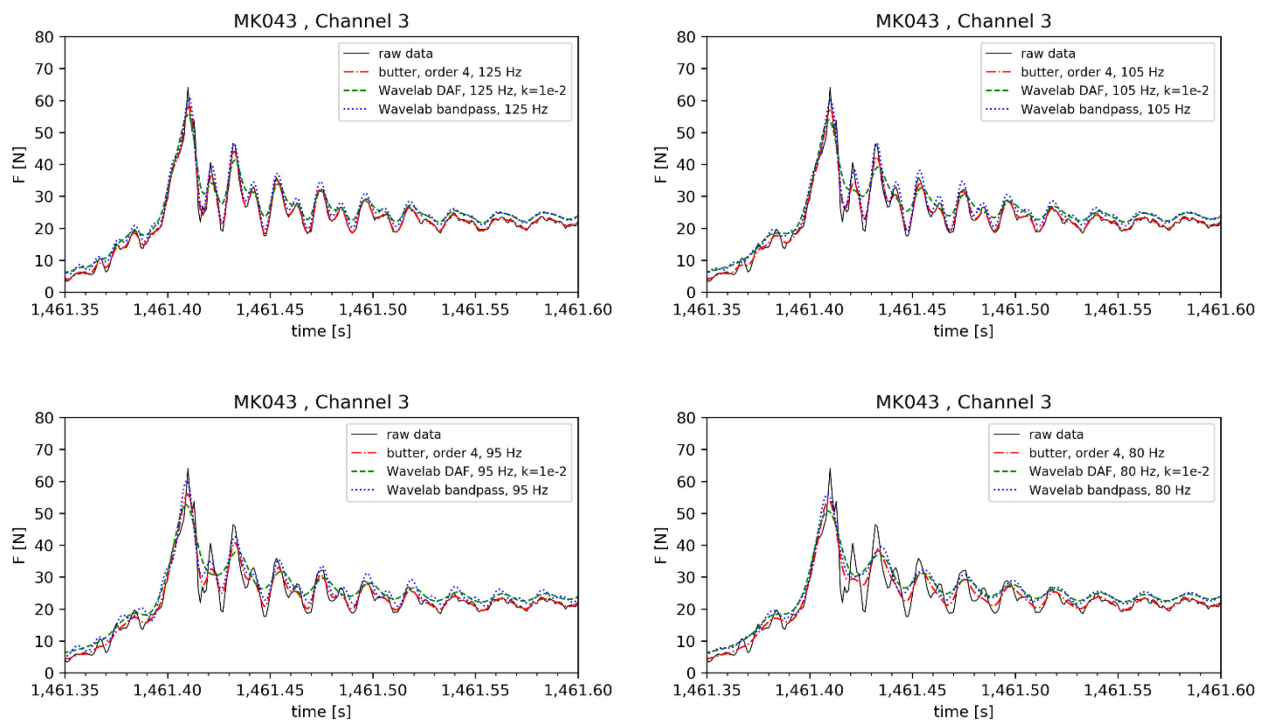
Figuur 14 – Filtering dynamische oscillatie in krachtpiek, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK062



Figuur 15 – Filtering krachtpiek met onregelmatig verloop, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK062



Figuur 16 – Filtering krachtpiek met onregelmatig verloop, frontmuur parking OG1 (Ch.3), MK043



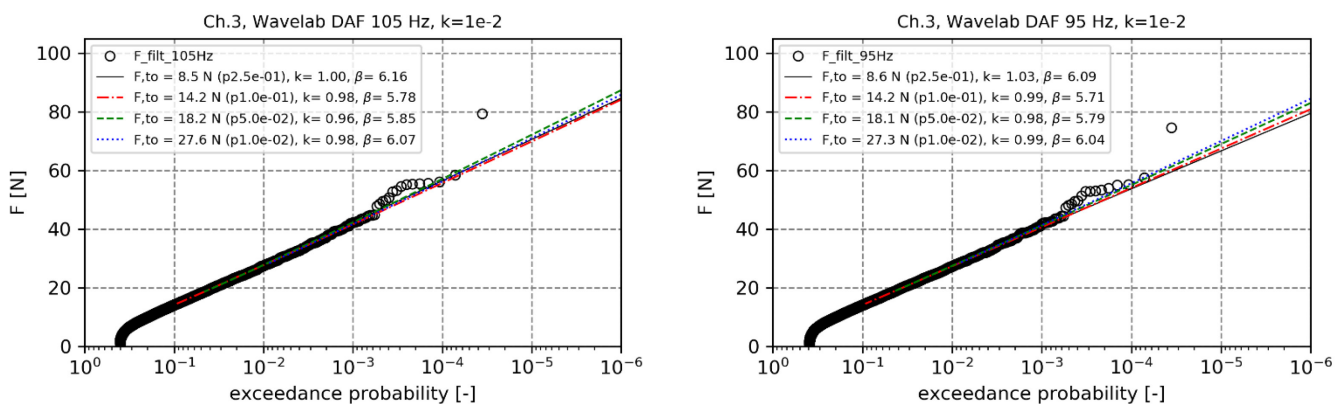
Uiteindelijk worden uit voorgaande vergelijking tussen de filters de volgende conclusies meegenomen in de verdere analyse van de krachtsignalen:

- het Wavelab DAF filter wordt verondersteld om het meest nauwkeurig de reële krachtpiek te benaderen ingeval het krachtsignaal een uitgesproken dynamische oscillatie met een regelmatig sinusoïdaal karakter vertoont. Vermits dynamische versterking vooral optreedt bij de grootste gemeten krachten, en deze de grootste impact hebben op de extreme waardeverdeling van de krachten (zie verder), is het vooral van belang deze grootste krachten zo nauwkeurig mogelijk te benaderen;
- de in te stellen dempingsfactor heeft weinig invloed, in de uiteindelijke analyse wordt de waarde 0.01 gebruikt;
- het criterium om de correcte filterfrequentie in het DAF filter te bepalen is het verdwijnen van de oscillaties in het gefilterde signaal na de primaire krachtpiek. Deze frequentie verschilt echter (licht) van impact tot impact, vermits de frequentie van de dynamische oscillatie ook beïnvloed wordt door de hoeveelheid betrokken watermassa. Bv. voor de krachtpiek in Figuur 13 is dit ca 95 Hz, voor de krachtpiek in Figuur 14 is dit 105 Hz. **Als praktische (conservatieve) waarde voor de filterfrequentie wordt in de verdere analyse het Wavelab DAF filter in het frequentiedomein met eigenfrequentie 104.9 en laagdoorlaatfrequentie 105 Hz toegepast, en een dempingsfactor 0.01;**
- indien het krachtsignaal een onregelmatige verloop kent na de primaire krachtpiek (met secundaire pieken), of helemaal geen dynamische oscillaties, benadert het DAF filter de werking van een gewoon laagdoorlaatfilter met dezelfde frequentie. Er dient wel opgemerkt te worden dat het DAF filter telkens resulteert in een iets lagere krachtpiek in vergelijking met een gewoon laagdoorlaatfilter. Vermits dit vooral van toepassing is op de lagere gemeten impacten (de grootste uitschieters worden logischerwijs veroorzaakt door dynamische versterking), heeft dit uiteindelijk een beperkte impact op de verdere statistische analyse van de krachtverdeling.

3.3.2 Verdeling van golfkrachten

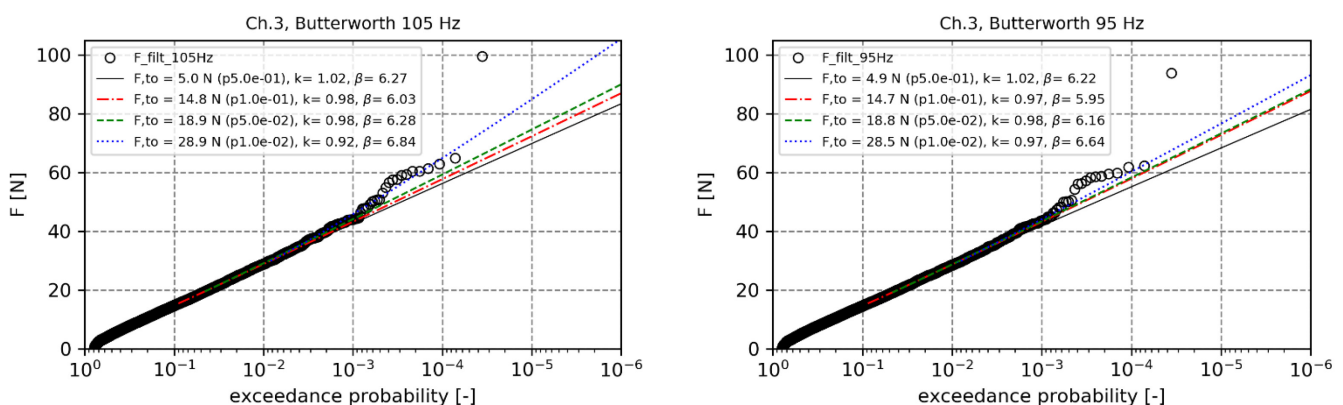
Figuur 17 toont de resultaten van de Weibull fitting op de DAF-gefilterde krachtpieken met laagdoorlaatfrequentie 95 en 105 Hz. De fits worden toegepast voor verschillende drempelwaarden F_{to} die gekozen worden op basis van de fractielen van overschrijdingskans (25%, 10%, 5% en 1%). De keuze van de drempelwaarde F_{to} (zie (A-3)) gebeurt enigszins arbitrair maar kan geoptimaliseerd worden op basis van de kleinste kwadraten som van de foutterm (MSE)⁹. Hoe hoger de drempelwaarde, hoe meer gewicht toegekend wordt aan de grootste metingen binnen de dataset in de fitting. Uit de analyse wordt duidelijk dat een te hoge drempelwaarde (bv. groter dan 40 N) een overmatig gewicht verleent aan de extreme uitschieters in de dataset, waardoor de vormparameter k kleiner dan 1 wordt. Dit zal leiden tot een onrealistische overschatting van de extreme golfkrachten. De drempelwaarde bij het fractiel van 1% lijkt een praktische bovengrens.

Figuur 17 – Weibull fit op DAF-gefilterde krachtpiekwaarden, frontmuur parkingsectie (Ch.3)



Ter vergelijking zijn in Figuur 18 ook de fits getoond op de gefilterde krachtpieken met het Butterworth laagdoorlaatfilter op dezelfde frequenties. Vermits de piekwaarden in het gebied met overschrijdingskans kleiner dan 0.1% hoger liggen dan bij het DAF filter, resulteert de fit hier in een iets kleinere vormparameter.

Figuur 18 – Weibull fit op Butterworth-gefilterde krachtpiekwaarden, frontmuur parkingsectie (Ch.3)



⁹ De vormfactor k en schaalparameter β werden gefit op basis van een lineaire regressie (kleinste kwadratenmethode in Scipy stats.lingress). Verdere optimalisatie is mogelijk door toepassing van andere methodes voor parameterschatting (maximum likelihood, method of moments, ...), maar dit werd niet uitgevoerd in deze analyse.

3.3.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de zeewaartse parkingmuur

De ontwerpwaarde van de golfkracht wordt bepaald volgens de methode gebruik makend van de experimenteel bepaalde extreme waardeverdeling van de krachtpieken (zie A.1 bijlage A). In wat volgt worden de hoger afgeleide Weibull parameters op de DAF gefilterde (105 Hz) krachtpieken gebruikt.

Verder worden de volgende parameters vastgelegd (ook in alle volgende modelsecties worden deze waarden toegepast):

- Terugkeerperiode ontwerpstorm $T=1000$ jaar
- Levensduur constructie $t=50$ jaar
- Betrouwbaarheidsklasse RC3 : $\beta_t=4.3$

De toegelaten maximale faalkans volgens de betrouwbaarheidseis in Eurocode wordt berekend als :

$$\mu = \frac{T}{t} p_{f,t} = \frac{1000}{50} \Phi[-4.3]$$

Tabel 8 geeft de ontwerpwaarden van horizontale golfkracht op de frontmuur van de parking OG1 (op prototype schaal) voor verschillende waarden van stormduur (1000, 2000 of 3000 golven).

Tabel 8 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht frontmuur modelsectie MK01 (prototype waarden in kN/m)

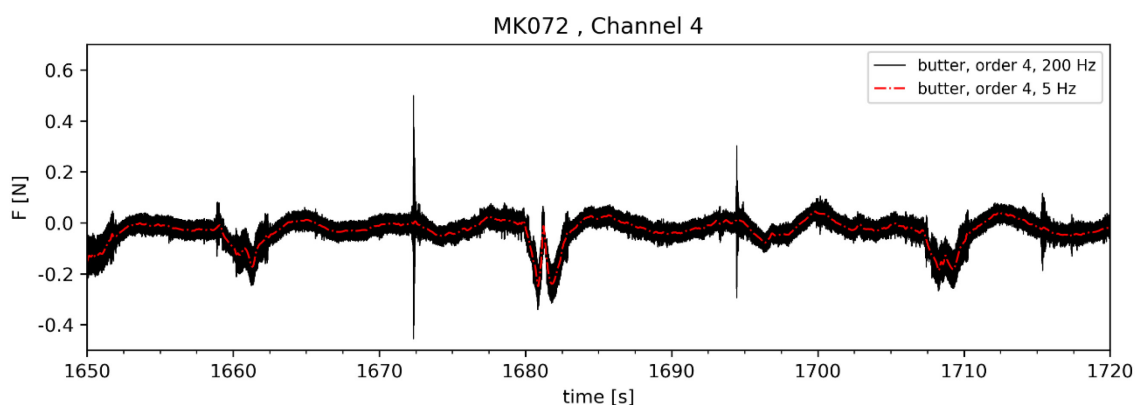
	$\mu = 1.71E-04$	
F_{to} [N]	18.2 (p0.05)	27.6 (p0.01)
k [-]	0.964	0.981
beta [N]	5.853	6.072
N=1000 (ca 2.7 u stormduur)	206.7	202.8
N=2000 (ca 5.4 u stormduur)	216.3	212.1
N=3000 (ca 8.3 u stormduur)	222.0	217.6

3.4 Krachten op de dakmuur

3.4.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.4)

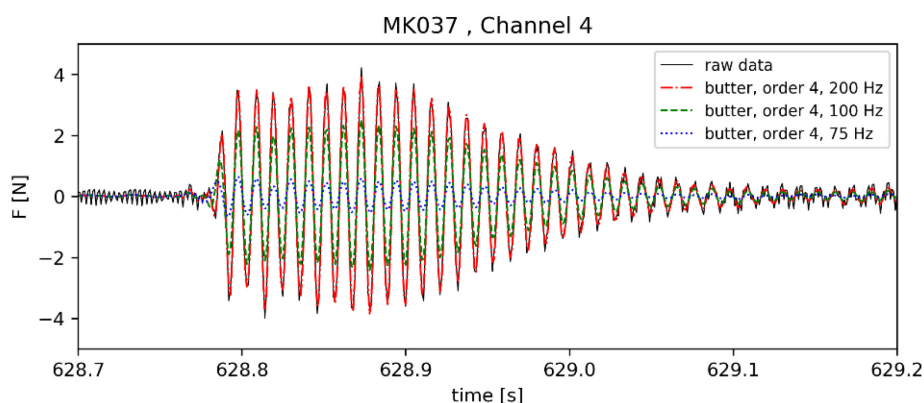
Op basis van een kwaliteitscontrole op de krachtsignalen worden alle volledige runs in Tabel 6 in aanmerking genomen voor analyse, behalve proef MK072. Deze proef (zie Figuur 19) vertoont een laagfrequente oscillatie/ruis in het signaal die niet doelmatig geëlimineerd kan worden, waardoor de geregistreerde krachtpieken als onbetrouwbaar geacht worden.

Figuur 19 – Illustratie laagfrequente ruis proef MK072



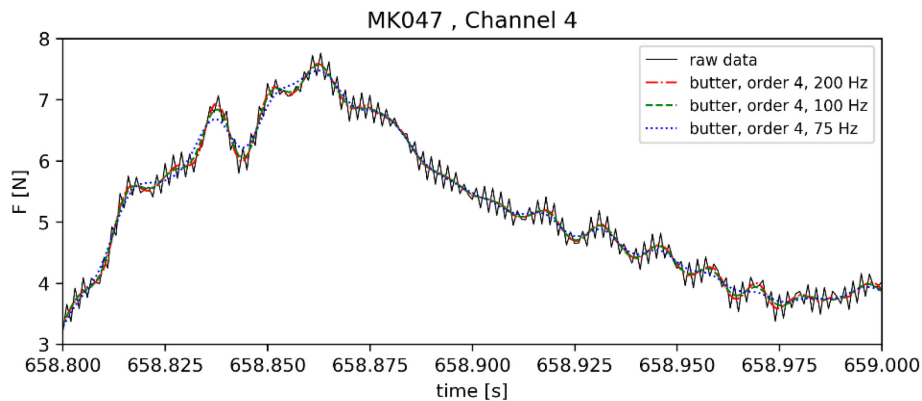
Het is belangrijk op te merken dat in een niet verwaarloosbaar aantal gevallen de golfimpact op de dakmuur een impulsief karakter vertoont die zich in het geregistreerde signaal vertaalt in een sterk uitgesproken dynamische respons (zie Figuur 20). In tegenstelling tot de metingen op de frontmuur (met load cell 50 kg) is het niet mogelijk een betrouwbare analyse met het Wavelab DAF filter toe te passen. Er zal dan ook in de verdere analyse geen rekening gehouden worden met de 'dynamische' krachtpieken, vermits hun reële waarde niet op betrouwbare wijze vastgesteld kan worden. Om die reden wordt enkel een low-pass filter toegepast (Butterworth, orde 4) voor ruisfiltering. Uit de toepassing van verschillende filterfrequenties (zie Figuur 21) blijkt dat de gefilterde waarde van de krachtpiek relatief ongevoelig is vanaf een zekere drempel. Om die reden wordt 200 Hz als een praktische bovengrens voor het laagdoorlaatfilter vastgelegd.

Figuur 20 – Illustratie dynamische golfimpact op de dakmuur (Ch.4)



Zoals te merken in het voorbeeld in Figuur 20 neemt de amplitude van het krachtsignaal af met afnemende filterfrequentie, iets wat niet gebeurt bij een krachtsignaal zonder dynamische versterking (Figuur 21). Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt om de krachtpieken die onderhevig zijn aan dynamische versterking automatisch te detecteren (zie verder).

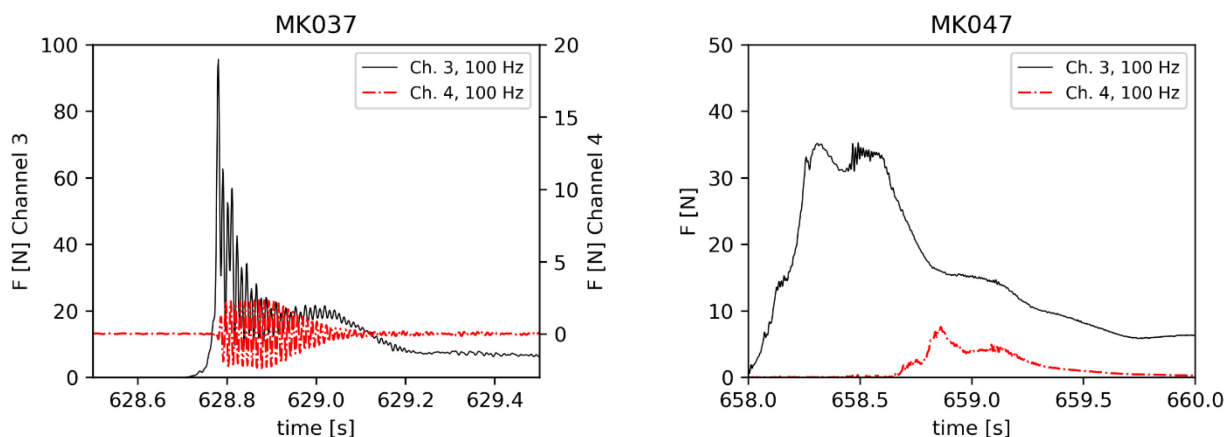
Figuur 21 – Illustratie ruisfiltering op grootste geregistreerde impact op de dakmuur



3.4.2 Verdeling van golfkrachten

Voor het opstellen van de empirische overschrijdingsfrequenties van de gemeten krachtpieken wordt rekening gehouden met de aanwezigheid van de dynamische krachtpieken, ook al kan hun waarde niet betrouwbaar vastgesteld worden. De reden hiertoe is dat deze golfimpacten wel degelijk significant zijn. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 22, waar links de grootste geregistreerde impact op de frontmuur getoond wordt samen met de (dynamische) impact op de dakmuur. De rechter Figuur 22 toont de grootste geregistreerde krachtpiek op de dakmuur samen met de impact op de frontmuur. Er wordt opgemerkt dat door een (gelukkig) toeval de grootste gemeten krachtpiek op de dakmuur in test MK047 (ca 7.8 N op modelschaal) geen dynamische oscillatie vertoont, zodat er (quasi) geen onzekerheid is op de waarde van deze impact.

Figuur 22 – Correlatie tussen impact op frontmuur (Ch.3) en dakmuur (Ch.4) (waarden in modelschaal).
Illustratie van golfimpact met (figuur links) en zonder (figuur rechts) dynamische oscillatie in impactsignaal op dakmuur.



De empirische overschrijdingsfrequenties worden afgeleid voor een reeks (gefilterde) krachtpieken, gesorteerd van groot naar klein, op basis van de positie van voorkomen in deze reeks ($i=0$ stemt overeen met de grootste gemeten krachtpiek) :

$$P(i) = 1 - \frac{N_{waves}-i}{N_{waves}+1}, (i=0,1,..) \quad (1)$$

Hierbij is N_{waves} het totale aantal golven in alle beschouwde testreeksen samen (merk op dat MK072 niet beschouwd wordt). In dit geval zijn dit 26438 golven (zie ook Tabel 6).

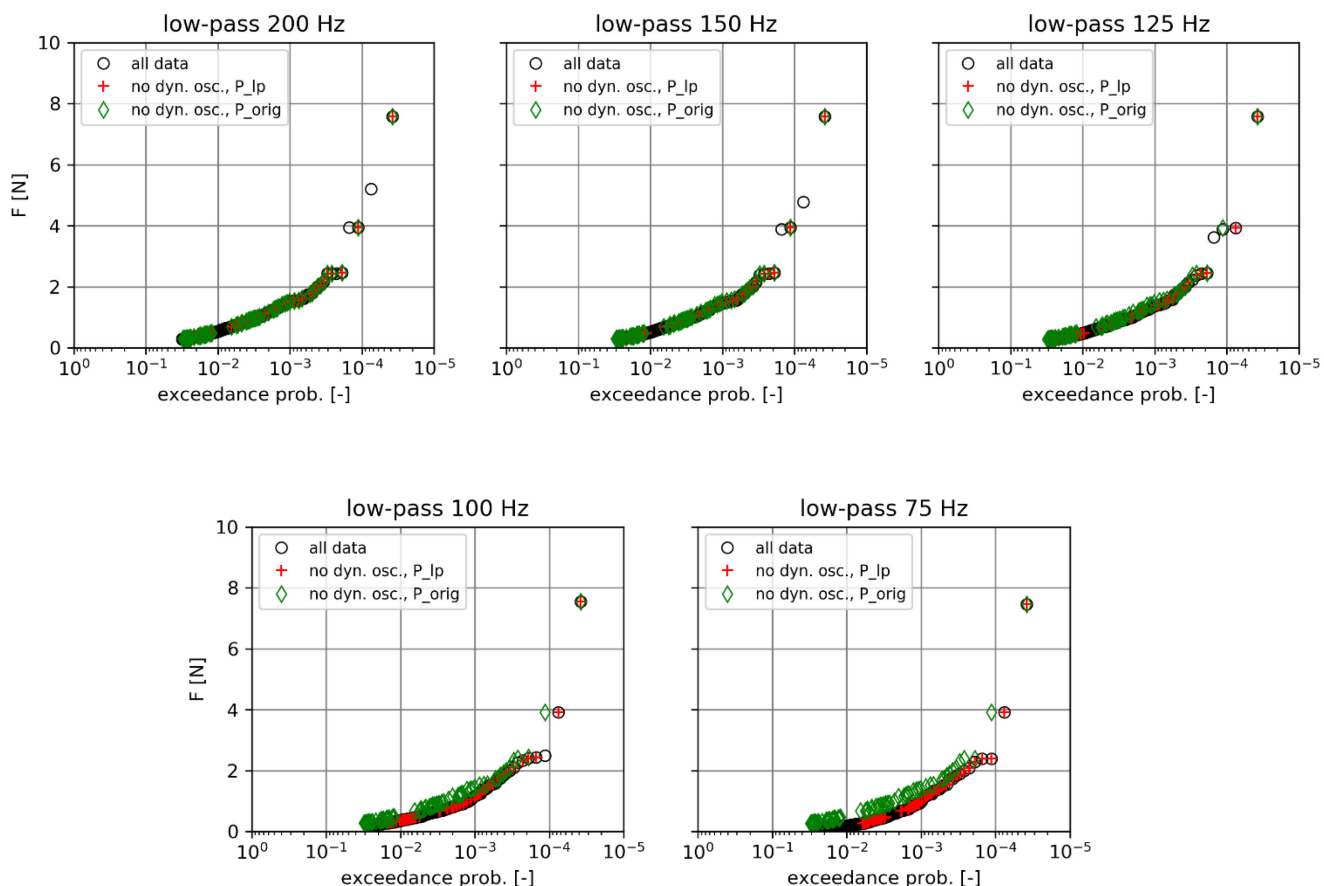
De krachtpieken die gepaard gaan met een dynamische oscillatie worden automatisch gedetecteerd op basis van een afnemende amplitude bij het stelselmatig verlagen van de low-pass filterfrequentie. Het resultaat wordt geïllustreerd in Figuur 23. De reeks *all data* bevat alle geregistreerde krachtpieken (na toepassing van een specifiek low-pass filter, hier getoond tussen 200 en 75 Hz), waarbij de overschrijdingsfrequenties berekend worden op basis van de volledige reeks krachtpieken. De reeks *no dyn. osc.*, P_{lp} is identiek aan *all data*, met uitzondering van de krachtpieken onderhevig aan dynamische oscillatie die weggelaten zijn.

De reeks *no dyn. osc.*, P_{orig} toont enkel de gefilterde krachtpieken zonder dynamische oscillatie, waarbij de overschrijdingsfrequenties berekend worden op basis van de volledige reeks krachtpieken (na toepassing van een low-pass filter 200 Hz), incl. deze die een dynamische oscillatie vertonen. Hoe deze reeks overschrijdingsfrequenties tot stand komt, wordt hierna verder toegelicht.

In de analyse wordt de waarde van de dynamische krachtpiek bepaald als de maximale in het gefilterde signaal met de hoogste filterfrequentie 200 Hz. Deze krachtpiek is een overschatting van de reële (onbekende) piekwaarde. De waarde van deze krachtpiek zelf wordt niet weerhouden in de gesorteerde reeks, maar de positie wel, hetgeen leidt tot een conservatieve inschatting van de overschrijdingskansen die gebruikt kan worden voor ontwerp. De reeks die opgesteld wordt voor een voldoende hoge¹⁰ low-pass frequentie (hier: 200 Hz) wordt hierna de 'basisreeks' genoemd. De overschrijdingskans van een krachtpiek zonder dynamische oscillatie wordt bepaald op basis van de positie in de basisreeks. Daarbij kan het verschil in index tussen 2 opeenvolgende pieken in de gesorteerde reeks groter zijn dan 1, naargelang het aantal tussenliggende krachtpieken met dynamische oscillatie. Vermits gefilterde krachtpieken ook onderling kunnen verschuiven van positie (t.o.v. de onderlinge posities in de basisreeks), naargelang het resultaat van het filterproces, is het ook noodzakelijk de positionele reeks te sorteren vermits een grotere krachtpiek overeen dient te stemmen met een lagere overschrijdingsfrequentie in de uiteindelijke empirische krachtenverdeling.

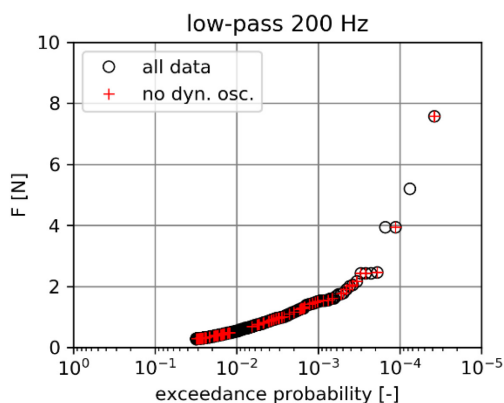
¹⁰ De waarde is in zekere mate arbitrair, maar mag niet te laag zijn opdat de amplitude van de gefilterde krachtpieken in het dynamisch oscillerende signaal niet aangetast wordt, vermits anders de positie van deze gefilterde krachtpiek in de basisreeks verschuift.

Figuur 23 – Empirische overschrijdingsfrequenties voor verschillende low-pass filterfrequenties
(enkel de 10% grootste krachtpieken worden getoond)



Figuur 24 toont de distributie van krachtpieken na toepassing van een low-pass filter 200 Hz, te gebruiken voor ontwerp. Enkel de krachtpieken in de reeks *no dyn. osc.* zijn betrouwbaar gemeten. De gegevens voor de 20 grootste krachtpieken zijn opgenomen in Tabel 9. De grootste gemeten krachtpiek komt voor in de testreeks MK047. Na ruisfiltering bedraagt deze ca 7.6 N (gemeten in model).

Figuur 24 – Empirische distributie krachtpieken op de dakmuur (na toepassing low-pass filter 200 Hz, waarden op modelschaal)



Tabel 9 – 20 grootste gemeten krachtpieken, dakmuur (na toepassing low-pass filter 200 Hz, waarden op modelschaal)

F [N] (200 Hz)	Dyn. impact [j/n]	P [-]	F [N] (200 Hz)	Dyn. impact [j/n]	P [-]
7.580	N	3.78E-05	2.002	N	4.16E-04
5.200	J	7.57E-05	1.903	N	4.54E-04
3.947	N	1.14E-04	1.793	N	4.92E-04
3.946	J	1.51E-04	1.763	N	5.30E-04
2.464	N	1.89E-04	1.752	J	5.67E-04
2.440	N	2.27E-04	1.684	J	6.05E-04
2.432	N	2.65E-04	1.618	J	6.43E-04
2.432	J	3.03E-04	1.606	N	6.81E-04
2.170	N	3.40E-04	1.597	J	7.19E-04
2.050	N	3.78E-04	1.560	N	7.57E-04

3.4.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de dakmuur parking

Zoals op te merken in Figuur 24 vertonen de grootste 3 krachtpieken een zeer sterk stijgende toename in het gemeten kracht-overschrijdingsdiagram, in tegenstelling tot de trend in de onderliggende krachtpieken. Convergentie in de metingen lijkt hier niet op te treden, en toepassing van extreme waardefitting zal in dit geval meer dan waarschijnlijk resulteren in een aanzienlijke overschatting van de ontwerpwaarde. Als alternatief wordt voorgesteld om de ontwerpwaarde af te leiden volgens de methodes uit bijlage A.

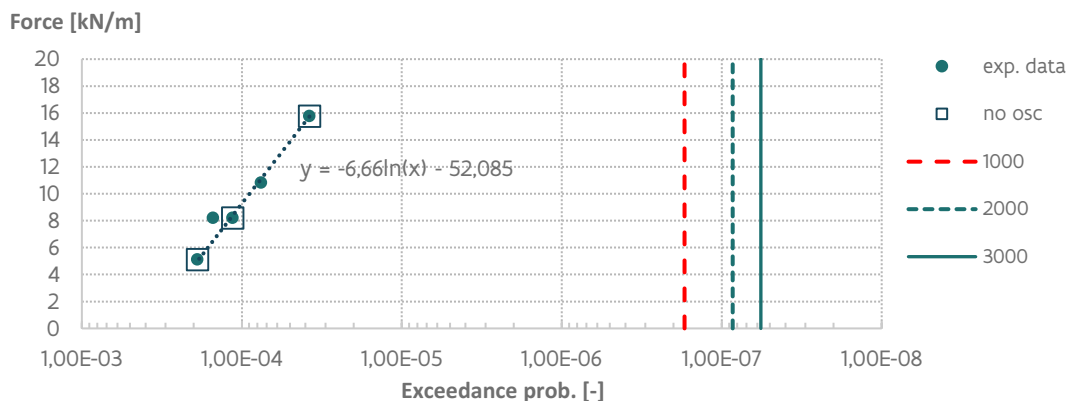
Tabel 10 geeft de overschrijdingskansen in functie van de stormduur, vastgelegd op basis van (A-13). De ontwerpwaarden worden bepaald via lineaire extrapolatie¹¹ doorheen de drie grootste gemeten krachtpieken zonder dynamische oscillatie, vermits de toelaatbare overschrijdingsfrequenties buiten het gemeten bereik vallen (zie Figuur 25).

Tabel 10 – Toelaatbare overschrijdingskansen en geëxtrapoleerde ontwerpwaarden van golfkracht bij verschillende stormduur

	$\mu = 1.71E-04$		
N_0	1000	2000	3000
$P[F_{max} > x_{qt}]$	1.71E-07	8.54E-08	5.69E-08
$F_{h,des} [kN/m]$	51.7	56.3	59.0

¹¹ In de praktijk wordt zo de extreme waardefit type Weibull vervangen door een lineaire regressie.

Figuur 25 – Lineaire extrapolatie tot ontwerpwaarde golfkracht op basis van de drie grootste gemeten krachtpieken



Gelet op de relatief grote onzekerheid die gepaard gaat met de extrapolatie in Figuur 25 wordt er in dit geval voor geadviseerd om de methode met Gumbel fitting op de maxima toe te passen volgens methode beschreven in bijlage A.3. Uit de reeks van 17 beschikbare proeven zijn er 13 waarvan de maximale krachtpiek niet onderhevig is aan dynamische versterking en dus in aanmerking komen voor analyse (zie Tabel 11).

Tabel 11 – Maximale krachtpieken per proef (prototype waarden), dakmuur modelsectie MK01 (Ch.4)

proef	Fmax [kN/m]	Nwaves	proef	Fmax [kN/m]	Nwaves
MK035	4.27	1377	MK049	-	1333
MK037	1.89	1351	MK052	3.03	1328
MK039	-	1370	MK054	-	1337
MK040	-	1326	MK057	2.77	1286
MK041	3.35	1382	MK058	4.17	1347
MK043	3.25	1343	MK062	8.22	3951
MK044	2.10	1377	MK067	5.07	1339
MK045	2.28	1362	MK068	3.67	2292
MK047	15.79	1337			

Tabel 12 geeft de gefitte Gumbel parameters en de geschatte ontwerpwaarde van de golfkracht op de dakmuur van de parking : 27 kN/m (prototype waarde). Merk op dat deze waarde overeenstemt met een stormduur van ongeveer 1350 golven, al bevatten 2 proeven in de reeks meer golven (zie Tabel 11).

Tabel 12 – Gumbel fitting op de reeks van maximale krachtpieken van de afzonderlijk

a	0.32	-
u	3.02	-
beta_RC	4.3	-
T	1000	jaar
t	20	jaar
mu,f	0.000427	-
F_{h,des}	27.2	kN/m

4 Modelsectie MK02 “GDU Middelkerke” (sectie 87, $y=4272$ m)

4.1 Dataset gekalibreerde proeven

Er zijn 19 gekalibreerde proeven op golfhoogte en waterdiepte (Tabel 13). In de praktijk blijkt het in dit geval onmogelijk om het equivalent van het door SWASH gemodelleerde 2D-golfspectrum in de golfgoot te realiseren door het instellen van de randvoorwaarden. Om die reden wordt ervoor geopteerd om enkel de golfhoogte en het waterpeil gelijktijdig binnen de toleranties te brengen, waardoor de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ aan de dijkteen systematisch met ca. 30-40 % overschat wordt. Dit heeft als gevolg dat de meting ook het werkelijke overslagdebiet overschat (zie verder). De invloed van de overschatte golfperiode op de golfimpact is niet duidelijk, maar gelet op het feit dat dit leidt tot meer overslag is het aannemelijk te veronderstellen dat ook de gemeten waarden een overschatting zijn van de werkelijke krachtpieken.

Tabel 13 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 2 GDU Middelkerke

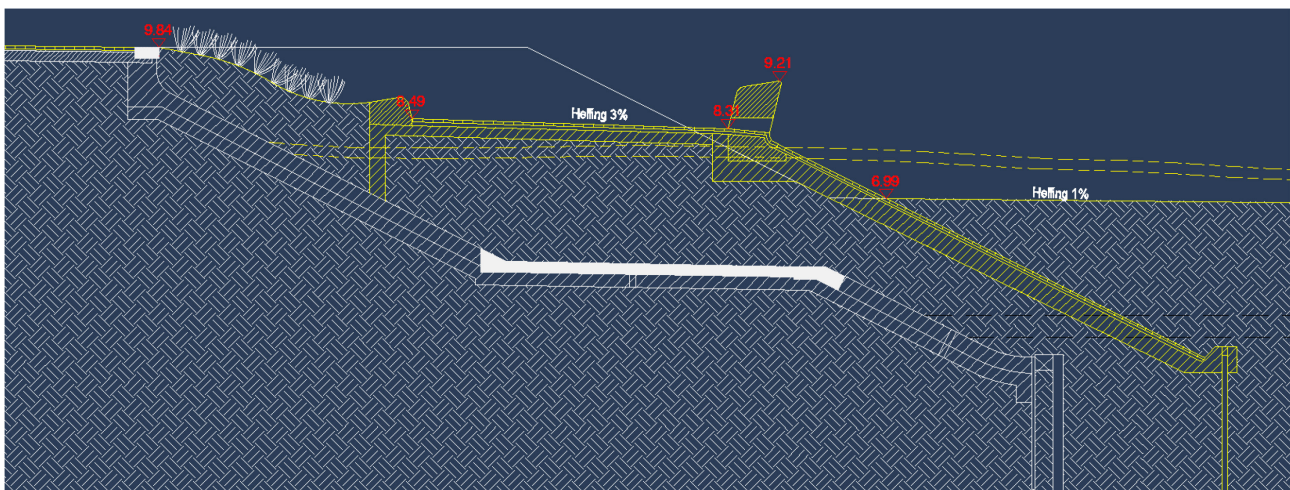
RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfshot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	TP [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.044	Target: 5.69	Target: 0.906	+/- 3%	+/- 5%	+/- 0.002 m
MK02_012	817070576	0.904	0.13	2.20	1342	0.0446	7.96	0.9081	1.4%	39.9%	0.0021
MK02_017	1135635988	0.903	0.13	2.40	1362	0.0447	8.15	0.9073	1.7%	43.4%	0.0013
MK02_021	909588146	0.903	0.12	2.15	1371	0.0432	7.70	0.9068	-1.9%	35.4%	0.0008
MK02_024	664268169	0.903	0.125	2.15	1341	0.0430	7.90	0.9070	-2.2%	39.0%	0.0010
MK02_025	1343455737	0.903	0.130	2.15	1359	0.0437	7.78	0.9073	-0.6%	36.9%	0.0013
MK02_026	1384645384	0.903	0.130	2.15	1363	0.0442	8.18	0.9073	0.4%	43.8%	0.0013
MK02_028	113445332	0.903	0.130	2.15	1346	0.0445	7.59	0.9077	1.1%	33.4%	0.0017
MK02_029	-1041357480	0.903	0.130	2.15	1335	0.0430	7.30	0.9076	-2.2%	28.3%	0.0016
MK02_030	1019647399	0.903	0.130	2.15	1351	0.0435	7.83	0.9077	-1.2%	37.6%	0.0017
MK02_031	1154988288	0.903	0.130	2.15	1363	0.0435	7.83	0.9075	-1.0%	37.7%	0.0015
MK02_032	962182491	0.903	0.130	2.15	1347	0.0451	7.80	0.9074	2.4%	37.1%	0.0014
MK02_037	-1496045881	0.903	0.130	2.15	1338	0.0427	7.32	0.9074	-2.9%	28.7%	0.0014
MK02_038	-1691786776	0.903	0.130	2.15	1336	0.0434	7.84	0.9074	-1.2%	37.9%	0.0014
MK02_039	-1008693838	0.903	0.130	2.15	1351	0.0427	7.57	0.9074	-3.0%	33.2%	0.0014
MK02_040	1390045384	0.903	0.130	2.15	1374	0.0434	7.79	0.9074	-1.4%	36.9%	0.0014
MK02_041	1613066018	0.903	0.130	2.15	1366	0.0443	7.78	0.9072	0.7%	36.9%	0.0012

RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfschot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	Tp [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.044	Target: 5.69	Target: 0.906	+/- 3%	+/- 5%	+/- 0.002 m
MK02_044	1213352906	0.903	0.135	2.15	1349	0.0427	7.62	0.9076	-2.9%	33.9%	0.0016
MK02_045	-608657444	0.903	0.135	2.15	1361	0.0438	7.89	0.9074	-0.4%	38.7%	0.0014
MK02_047	-987952017	0.903	0.135	2.15	1376	0.0433	7.81	0.9075	-1.6%	37.3%	0.0015
				totaal	25727						

4.2 Golfoverslag

De golfoverslag in het model wordt opgemeten over de promenade die zich landwaarts van de golfdempende uitbouw op een peil +9.84m TAW bevindt (Figuur 26). Het gemodelleerde strandpeil ligt in natuur op +6.69 m TAW tegen de dijkhelling van de GDU. In bijlage B.2 zijn enkele foto's van de modelopstelling opgenomen.

Figuur 26 – ontwerpdoorsnede MK02 “GDU Middelkerke”



Een overzicht van de gemeten overslag wordt gegeven in Tabel 15. Een proef bevat ca. 1000 golven op diep water die aanleiding geeft tot een meting van een gemiddeld overslagdebiet. Het gemiddeld overslagdebiet¹² van de volledige proevenreeks bedraagt 0.88 l/m/s (natuurwaarde).

Het gemeten debiet in elke proef vertoont een natuurlijke variabiliteit veroorzaakt door de golftreincompositie (opgelegd door het seed getal dat generatie van willekeurige fasehoeken initialiseert). Het berekende gemiddelde overslagdebiet op basis van een beperkt aantal (n) proeven is een benadering is van het werkelijke gemiddelde van de populatie. De onzekerheid op het gemiddeld overslagdebiet ten gevolge van het beperkte aantal proeven kan gekwantificeerd worden d.m.v. een t-verdeling, vermits de populatie ‘gemeten gemiddeld overslagdebiet o.b.v. een testreeks van ca 1000 golven’ (incl. kalibratiefouten, meet-en modelfouten) normaal verdeeld verondersteld mag worden.

¹² Dit gemiddelde werd berekend als het rekenkundig gemiddelde van alle proeven, vermits alle proeven in deze reeks quasi dezelfde duurtijd hebben.

Op basis van de $n = 19$ gekalibreerde proeven resulteert een t-verdeling met $n-1 = 18$ vrijheidsgraden in een **overschrijdingskans van 2.5% van het normdebiet 1 l/m/s** (zie Tabel 14).

Tabel 14 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet (natuurwaarden), modelsectie 2 GDU Middelkerke

aantal proeven	19	
S_n (steekproefvariantie)	0.240	
q_{avg}	0.88	l/m/s
$T_{0.95}$	1.734	
$q_{0.95}$	0.98	l/m/s
$T_{0.975}$	2.101	
$q_{0.975}$	1.00	l/m/s

In wat volgt wordt gepoogd de invloed van de overschatting van de spectrale periode in de kalibratie (zie Tabel 13) in te schatten op basis van de overslagformule geldig voor dijken met een ondiep voorland (Altomare *et al.*, 2016). Deze formule is evenwel ontwikkeld voor een eenvoudig talud zonder golfdempende uitbouw. In deze formule wordt kunstmatig een reductiefactor γ_{SWB} ingebracht, die iteratief aangepast wordt tot het berekende overslagdebiet gelijk is aan het gemeten overslagdebiet (op basis van de gemeten golfcondities aan de dijken en ingesteld waterpeil in de golfgoot). Met de aldus berekende γ_{SWB} wordt vervolgens het overslagdebiet herberekend voor de optredende golfcondities aan de dijken, met gelijkstelling van de spectrale periode aan de target waarde uit de SWASH-2D modellering. Als dijkelling ($\tan \alpha$) in de formule wordt de helling van het talud van de golfdempende uitbouw gebruikt (1:2). De resultaten worden in Tabel 16 samengevat. In deze tabel worden ook de overslagdebieten voor een dijkelling zonder GDU q_{dike_Tmeas} en q_{dike_Tcal} weergegeven, resp. op basis van de gemeten (overschatte) golfperiode en de eigenlijke doelwaarde (5.69 s).

Na de correctie voor de spectrale golfperiode aan de dijken bedraagt het reeksproeven gemiddeld overslagdebiet 0.53 l/m/s (natuurwaarde). Uit de analyse op basis van een t-distributie volgt dat een debiet van 1 l/m/s een overschrijdingskans van slechts 4E-11 heeft, wat praktisch gelijk kan gesteld worden aan nul.

Tabel 15 – Proevenreeks met resultaten golfoverslag, modelsectie 2 GDU Middelkerke

	Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ	
RUN_ID	Target: 0.044	Target: 5.69	Target: 0.906	+/- 3%	+/-5%	+/- 0.002 m	q_gem. natuur [l/m/s]
MK02_012	0.0446	7.96	0.9081	1.4%	39.9%	0.0021	0.57
MK02_017	0.0447	8.15	0.9073	1.7%	43.4%	0.0013	1.19
MK02_021	0.0432	7.70	0.9068	-1.9%	35.4%	0.0008	0.81
MK02_024	0.0430	7.90	0.9070	-2.2%	39.0%	0.0010	0.55
MK02_025	0.0437	7.78	0.9073	-0.6%	36.9%	0.0013	0.75
MK02_026	0.0442	8.18	0.9073	0.4%	43.8%	0.0013	0.93
MK02_028	0.0445	7.59	0.9077	1.1%	33.4%	0.0017	1.27
MK02_029	0.0430	7.30	0.9076	-2.2%	28.3%	0.0016	0.72

	Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ	
RUN_ID	Target: 0.044	Target: 5.69	Target: 0.906	+/- 3%	+/-5%	+/- 0.002 m	q_gem. natuur [l/m/s]
MK02_030	0.0435	7.83	0.9077	-1.2%	37.6%	0.0017	0.77
MK02_031	0.0435	7.83	0.9075	-1.0%	37.7%	0.0015	0.65
MK02_032	0.0451	7.80	0.9074	2.4%	37.1%	0.0014	1.11
MK02_037	0.0427	7.32	0.9074	-2.9%	28.7%	0.0014	0.64
MK02_038	0.0434	7.84	0.9074	-1.2%	37.9%	0.0014	0.75
MK02_039	0.0427	7.57	0.9074	-3.0%	33.2%	0.0014	0.85
MK02_040	0.0434	7.79	0.9074	-1.4%	36.9%	0.0014	0.81
MK02_041	0.0443	7.78	0.9072	0.7%	36.9%	0.0012	0.94
MK02_044	0.0427	7.62	0.9076	-2.9%	33.9%	0.0016	0.92
MK02_045	0.0438	7.89	0.9074	-0.4%	38.7%	0.0014	1.08
MK02_047	0.0433	7.81	0.9075	-1.6%	37.3%	0.0015	1.41
						gemiddelde	0.88

Tabel 16 – Berekening golfoverslagdebiet op basis van de doelwaarde Tm-1,0 (5.69 s), modelsectie 2 GDU Middelkerke

q_dike_Tmeas [l/m/s]	q_dike_Tcal [l/m/s]	gamma_SWB [-]	q_red [l/m/s]
6.76	4.6	0.645	0.32
6.47	4.29	0.730	0.69
5.17	3.59	0.717	0.49
5.29	3.55	0.677	0.32
5.55	3.84	0.699	0.44
6.17	4.04	0.707	0.51
5.79	4.18	0.753	0.82
4.77	3.55	0.716	0.47
5.44	3.72	0.705	0.45
5.48	3.75	0.685	0.37
6.35	4.46	0.723	0.68
4.62	3.41	0.708	0.42
5.45	3.71	0.702	0.44
4.81	3.39	0.733	0.53
5.37	3.69	0.712	0.48
5.88	4.1	0.715	0.56
4.86	3.41	0.740	0.57
5.68	3.87	0.736	0.64
5.33	3.6	0.778	0.86
gemiddelde			0.53

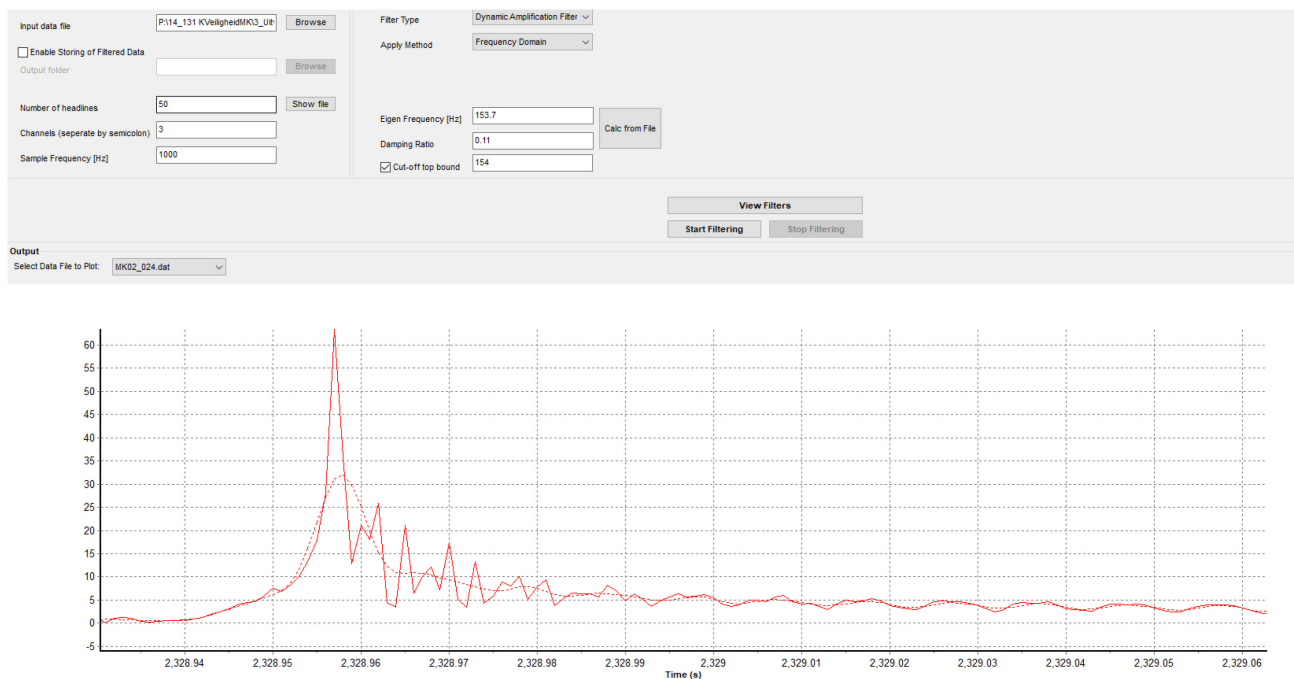
4.3 Golfimpact op de zeewaartse GDU-muur

4.3.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.3)

Op basis van een kwaliteitscontrole op de krachtsignalen wordt geconcludeerd dat alle proeven in de reeks in aanmerking komen voor analyse. Uit het gemeten ruwe signaal dienen ongewenste invloeden van ruis en dynamische respons van de meetopstelling verwijderd te worden. De gemeten ruis heeft een frequentie van ca. 330 Hz en kan met een laagdoorlaatfilter verwijderd worden.

In eerste instantie wordt opnieuw de Wavelab DAF filter toegepast om de eventuele ongewenste dynamische respons uit het gemeten krachtsignaal te filteren. De toepassing hiervan wordt geïllustreerd a.d.h.v. de grootste gemeten golfimpact in test MK02_024. Deze vertoont een eigenfrequentie van ca. 154 Hz en dempingsfactor ca. 0.11 (Figuur 27). Vermits de dynamische respons van het meetsysteem afhankelijk is van de massa water betrokken in de impact, kan voor elke individuele impact een set optimale filterparameters afgeleid worden. Omdat dit praktisch moeilijk te implementeren is wordt opnieuw d.m.v. een beknopte gevoeligheidsanalyse onderzocht welke globale filterinstellingen voor alle tijdreeksen leiden tot betrouwbare (en licht conservatieve) piekwaarden van reële golfkracht. Er wordt bovendien opgemerkt dat de filterinstellingen voor de frontmuur (zie sectie 3.3.1) niet zomaar overgenomen kunnen worden vermits hier een andere geometrie (massa) gemonteerd is op de load cell en een andere hydrodynamische interactie plaatsvindt, hetgeen leidt tot een specifieke eigenfrequenties bij de golfimpacten op deze modelopstelling.

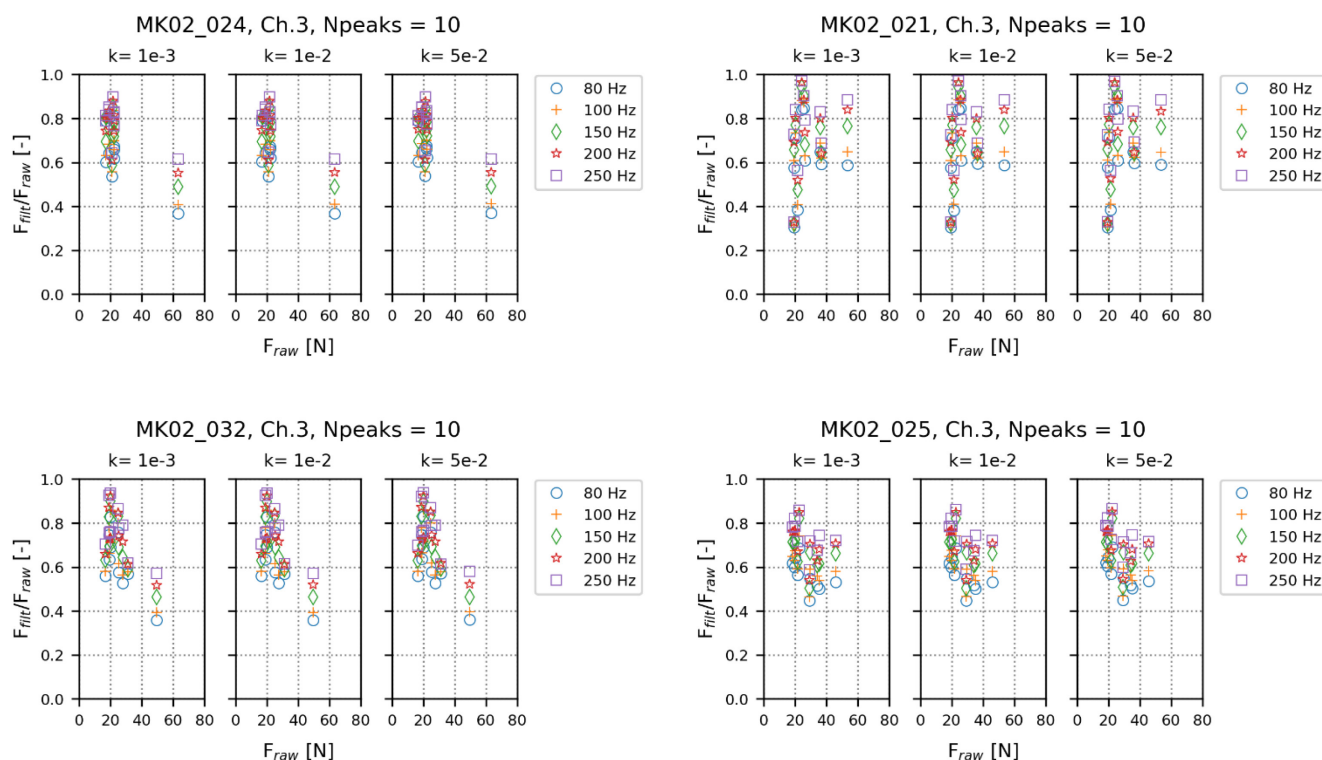
Figuur 27 – Wavelab DAF analyse MK02_024



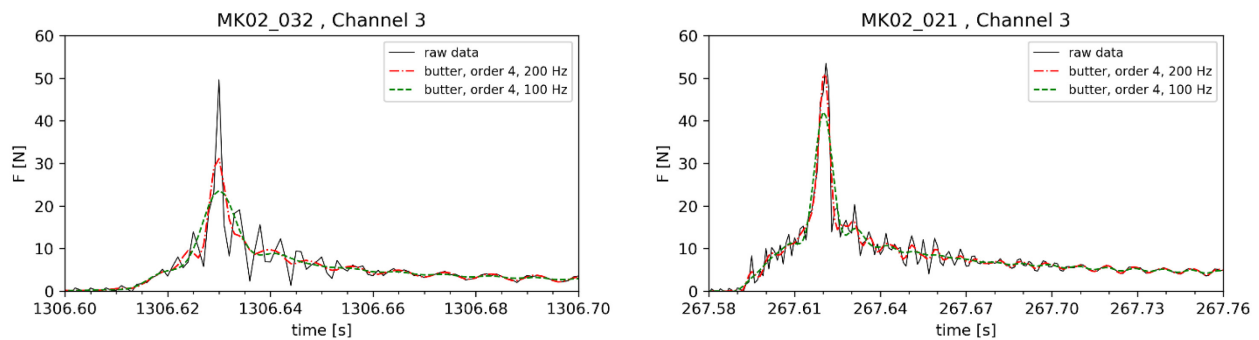
Figuur 28 toont de resultaten van de DAF filtering op de 4 proeven die de grootste ruwe krachtpiek bevatten, voor verschillende low-pass frequenties en dempingsfactoren. Zoals eerder aangetoond in sectie 3.3.1 heeft de waarde van de dempingsfactor quasi geen invloed op het resultaat. De meeste impacten vertonen een waarde F_{filt}/F_{raw} tussen ca. 0.9 en 0.55 voor het toegepaste interval van laagdoorlaatfrequenties tussen 80 en 250 Hz. Bij de grootste krachtpieken in MK02_024 en MK02_032 ligt deze verhouding beduidend lager, tussen ca. 0.6 en 0.4. Tenslotte is er ook nog een uitschieter met een reductie lager dan 0.4 in test MK02_021, die quasi niet beïnvloed wordt door de DAF-filterfrequentie.

Figuur 29 toont de vergelijking tussen twee types impacten uit hoger vermelde groepen. Voor de grootste impact uit test MK02_021 treedt duidelijk geen dynamische versterking door de load cell op (vergelijk met het getoonde voorbeeld in Figuur 11). In dergelijk geval is het zeker niet aangewezen de frequentie van het laagdoorlaatfilter te laag in te stellen vermits anders de krachtpiek op onrealistische wijze verlaagd wordt. De grootste krachtpiek uit test MK02_032, als voorbeeld voor de impacten uit de tweede groep (F_{filt}/F_{raw} tussen ca. 0.6 en 0.4) vertoont een grillige oscillatie van het signaal na de krachtpiek, die echter niet uitgesproken sinusoidaal is (vergelijk met het getoonde voorbeeld in Figuur 11). Het verlagen van de filterfrequentie resulteert in een stelselmatige reductie van de krachtpiek. Er treedt echter geen saturatie zoals vastgesteld in de analyse van de impacten op de parkingmuur (zie Figuur 12). Het is m.a.w. onzeker of de gemeten oscillatie te wijten is aan de dynamische respons van het meetsysteem, of dat het gaat versterkte ruis. Om die reden wordt veiligheidshalve beslist geen DAF filter toe te passen, maar een eenvoudig laagdoorlaatfilter.

Figuur 28 – Resultaten DAF filtering 10 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de zeewaartse muur GDU Middelkerke (Ch.3)

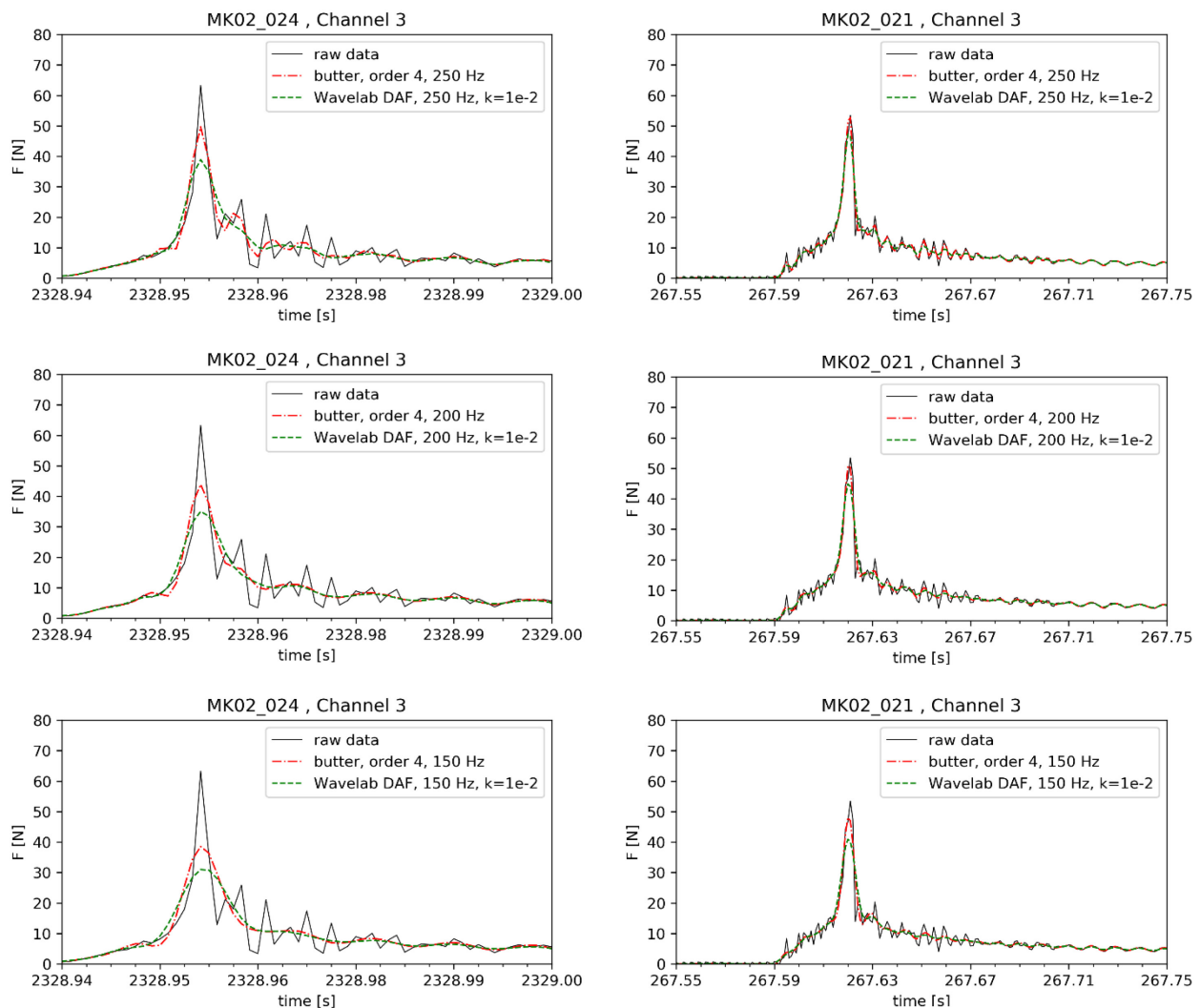


Figuur 29 – vergelijking twee types golfimpact : met (links) en zonder (rechts) uitgesproken oscillatie na de krachtpiek



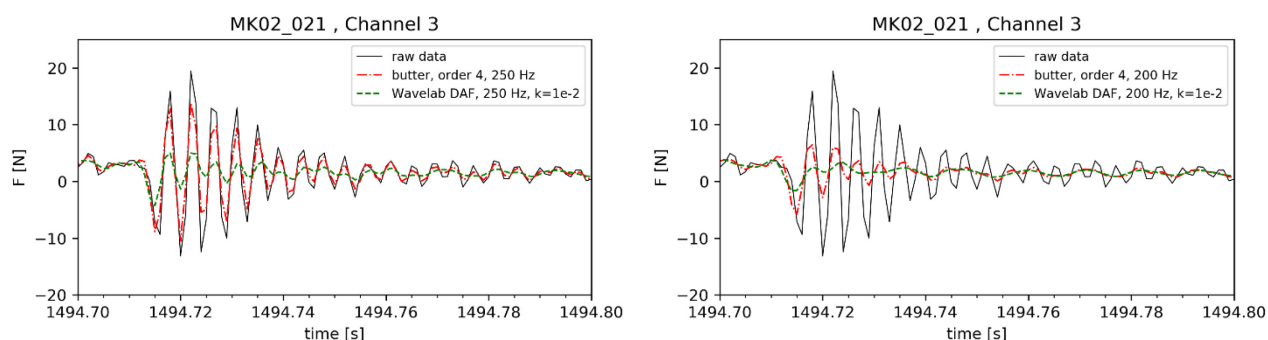
Figuur 30 toont de vergelijking tussen de Wavelab DAF filter en de Butterworth laagdoorlaatfilter, voor de twee grootste gemeten golfimpacten. Het Butterworth filter geeft systematisch een hogere krachtpiek, waarbij de verschillen groter zijn voor het type impact die onderhevig is aan een meer uitgesproken oscillatie na de krachtpiek.) Vermits bij een frequentie van 200 Hz de oscillaties na de piek verdwijnen (bemerkt het verschil tussen de signalen gefilterd op 250 en 200 Hz voor MK02_24 in Figuur 30), wordt deze frequentie weerhouden in de verdere analyse (sectie 4.3.2).

Figuur 30 – Vergelijking toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)



Tenslotte wordt in Figuur 31 een voorbeeld van impact getoond die de grootste reductie na DAF ondergaat (meer dan 60%). Zoals blijkt uit de analyse van het krachtsignaal treedt in zulke gevallen een uiterst groot aandeel dynamische oscillatie op waarbij het signaal terugveert tot ver in de negatieve krachtwwaarden. In zulke gevallen is het onmogelijk een betrouwbare schatting van de reële krachtpiek te bekomen. Zoals blijkt uit de vergelijking tussen beide filterfrequenties resulteert het Butterworth laagdoorlaatfilter in een relatief snelle daling van de amplitude van de krachtoscillatie.

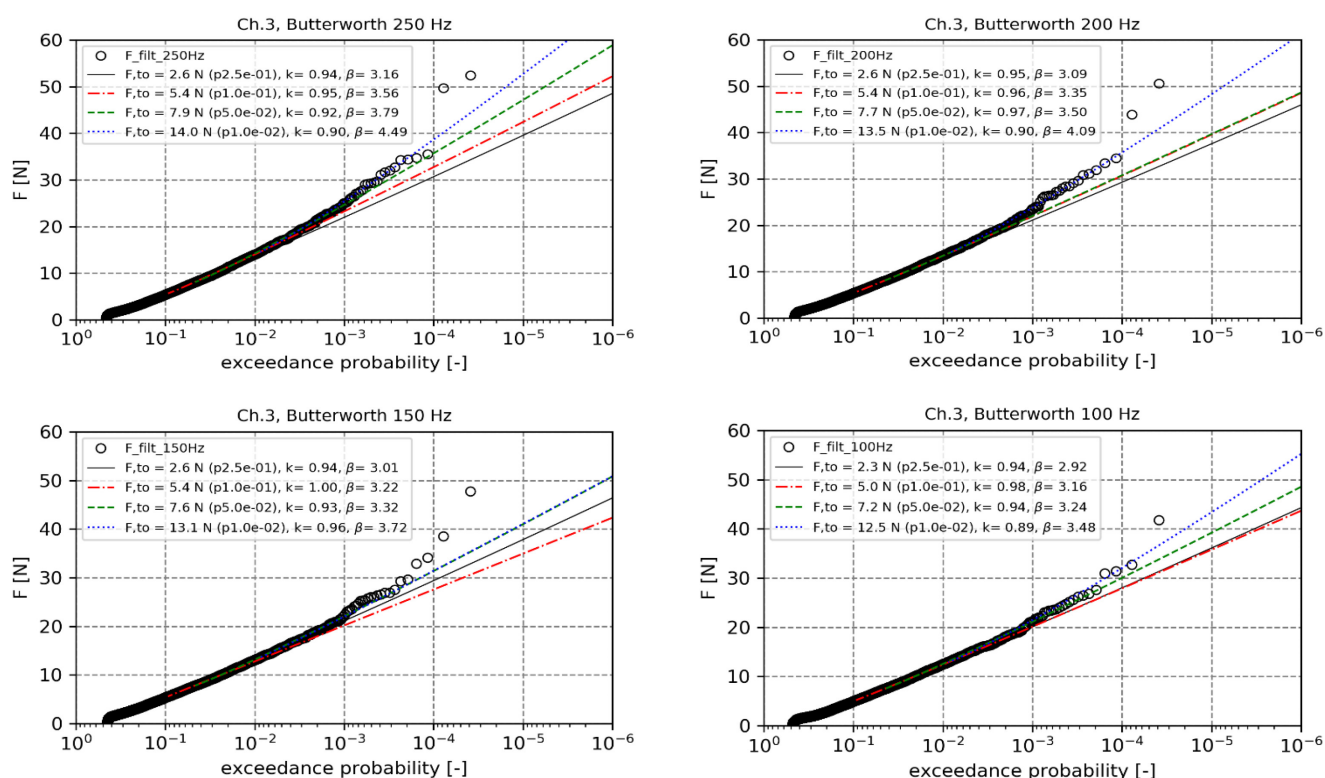
Figuur 31 – Voorbeeld golfimpact met significant aandeel dynamische oscillatie, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)



4.3.2 Verdeling van de krachten

Figuur 32 toont de resultaten van de toepassing van Weibull-fitting op de gefilterde krachtpieken, voor verschillende drempelwaarden $F_{t,o}$ (overeenstemmend met 50, 10, 1 en 0.1 % overschrijdingskans). Uit voorgaande analyse werd de frequentie 200 Hz weerhouden als meest optimale keuze voor het laagdoorlaatfilter. De drempel bij 1% overschrijdingskans, zoals ook vastgelegd in de analyse bij de frontmuur van de parkingsectie (zie sectie 3.3.2) lijkt hier opnieuw een geschikte keuze.

Figuur 32 – Weibull fit op Butterworth gefilterde krachtpiekwaarden, zeewaartse muur GDU Middelkerke (Ch.3)



4.3.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de zeewaartse GDU-muur

Tabel 17 geeft de ontwerpwaarde van de horizontale golfkracht op de zeewaartse GDU-muur in modelsectie MK02 voor verschillende waarden van stormduur (1000, 2000 of 3000 golven). Hierbij werden de Weibull parameters op basis van 200 Hz Butterworth gefilterde krachtpieken toegepast.

Tabel 17 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht zeewaartse GDU-muur modelsectie MK02 (prototype waarden in kN/m)

	$\mu = 1.71E-04$	
F_{to} [N]	7.7 (p0.05)	13.5 (p0.01)
k [-]	0.968	0.903
beta [N]	3.498	4.089
N=1000 (ca 2.7 u stormduur)	115.8	149.0
N=2000 (ca 5.4 u stormduur)	121.4	157.5
N=3000 (ca 8.3 u stormduur)	124.8	162.5

4.3.4 Opwaartse kracht op de zeewaartse GDU-muur

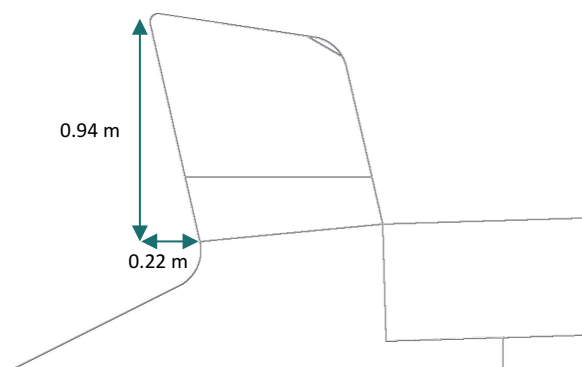
Vermits het frontaal oppervlak van de zeewaartse GDU-muur voorover helt (zie Figuur 33) treedt er bij een golfklap op dit oppervlak een opwaarts gerichte kracht op. De meetopstelling meet echter enkel de horizontale component van de totale golfkracht op. Bij gebrek aan metingen wordt een beroep gedaan op beschikbare informatie in de literatuur om een inschatting te maken van de opwaartse component van de golfkracht op de frontmuur.

In Van Doorslaer (2018) worden voor 2 beproefde geometrieën waarden gerapporteerd voor de verhouding van de verticale t.o.v. de horizontale kracht op een muur met parapet op de rand van een gladde dijk (zie Figuur 34). In sectie 6.5.2 wordt een waarde $F_v/F_h = 0.45$ en 0.39 vermeld voor afschuiningshoeken van resp. 45° en 30° .

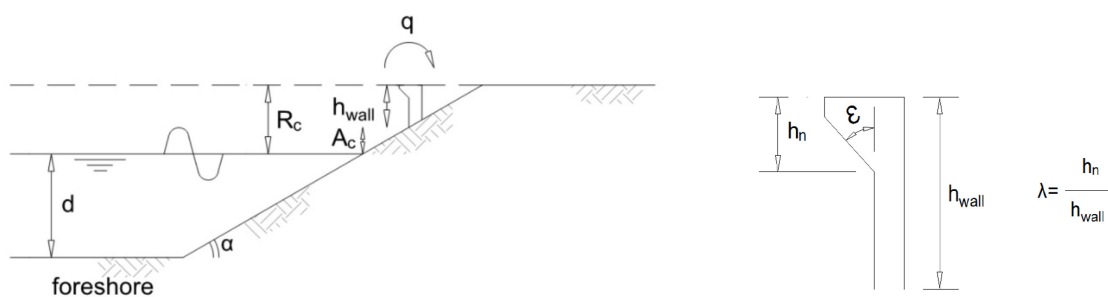
De hellingshoek van de GDU-frontmuur bedraagt ca. 13° (hellingshoek gedefinieerd in Figuur 34). Deze is beduidend kleiner dan de laagste gemeten hoek (30°) in Van Doorslaer (2018). Bovendien is de geometrie van de beproefde muur met parapet anders dan deze van de GDU-muur in Figuur 33. De meest geschikte parameter om de krachtswerking tussen beide geometrieën te vergelijken is wellicht de verhouding van de geprojecteerde horizontale oppervlakte waarop de golfkracht kan inwerken t.o.v. de totale muurhoogte. Bij de beproefde modelsecties in Van Doorslaer (2018) bedraagt deze 38% en 22%¹³ voor de afschuiningshoeken van resp. 45° en 30° . Bij de GDU-muur van het huidig ontwerp bedraagt deze verhouding 19%. Met een veilige aanname wordt voorgesteld om de verhouding F_v/F_h gelijk aan 0.39 te nemen voor het voorliggend ontwerp. Deze kan toegepast worden op de ontwerpwaarde van de horizontale golfkracht in Tabel 17.

¹³ De geprojecteerde horizontale oppervlakte (per eenheidslengte) wordt berekend als $h_n \tan \varepsilon$, bij gebrek aan informatie over de afmeting van het rechtopstaand gedeelte van de muur boven de afschuining. Dit is een overschatting.

Figuur 33 – Detail geometrie afschuining GDU-frontmuur



Figuur 34 – Geometrie beproefde stormmuur met parapet (Figuur 3-5 in Van Doorslaer (2018))



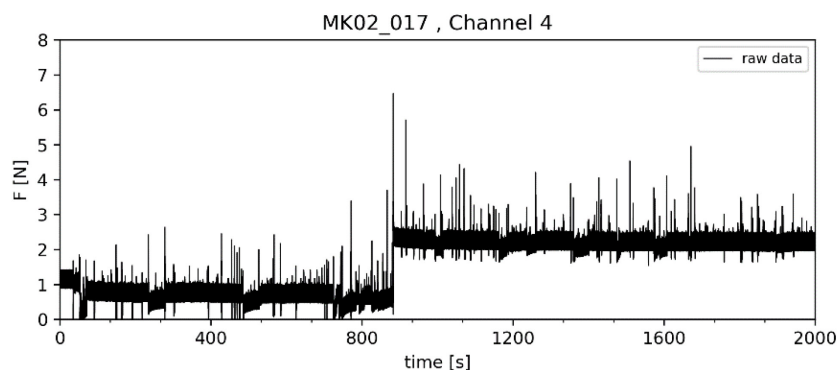
4.4 Golfimpact op de landwaartse GDU-muur

4.4.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.4)

Uit een kwaliteitscontrole van de signalen blijkt dat verschillende proefreeksen problemen vertonen met sprongen en drift in het signaal. Ter illustratie wordt de proef MK02_017 getoond in Figuur 35. De offset (sprongen) in het signaal werden vermoedelijk veroorzaakt door vuil (steengruis) dat bleef steken in de smalle spleet voor de uitsnijding in de muur (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**).

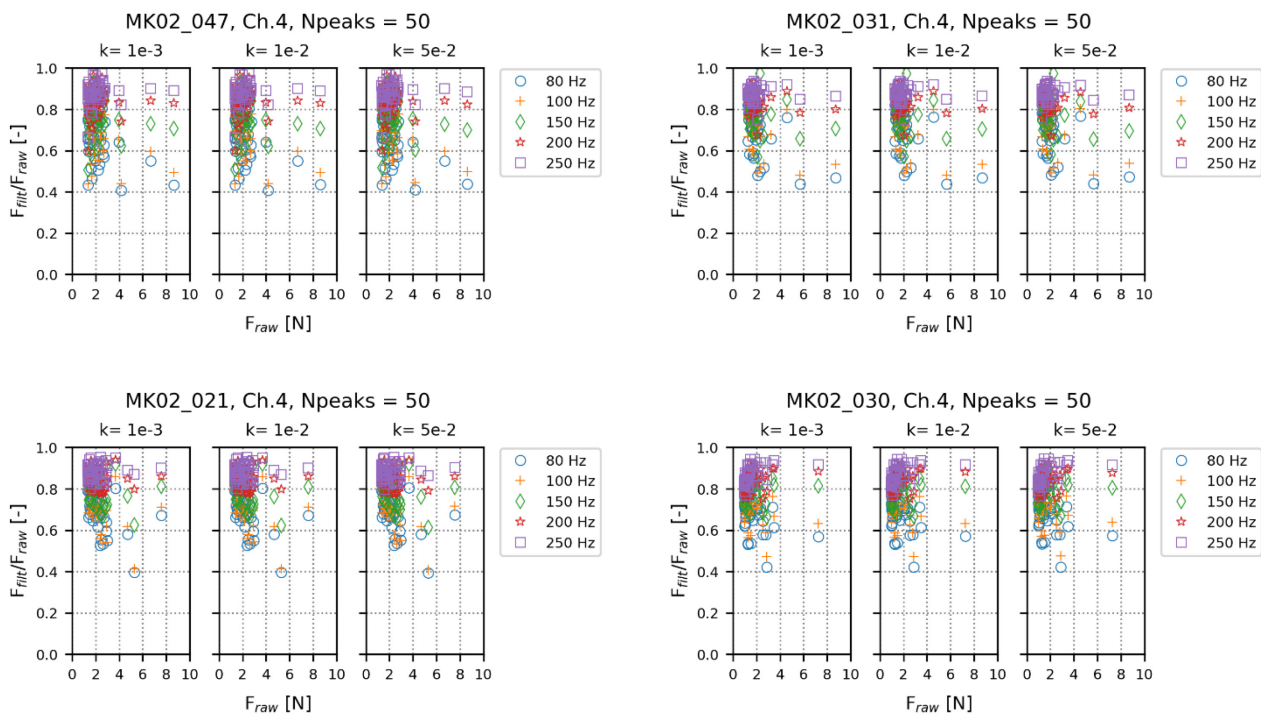
Voor elke proefrun werd een geldig tijdsvenster bepaald waarin de krachtpieken in aanmerking genomen worden. Tevens werd ook eventuele signaaldrift (hoewel steeds beperkt) geëlimineerd door lineaire interpolatie tussen de tijdsgemiddelde krachten aan het begin en eind van het tijdvenster.

Figuur 35 – Offset en drift in ruw krachtsignaal, impact op landwaartse GDU-muur (Ch.4), MK02_017

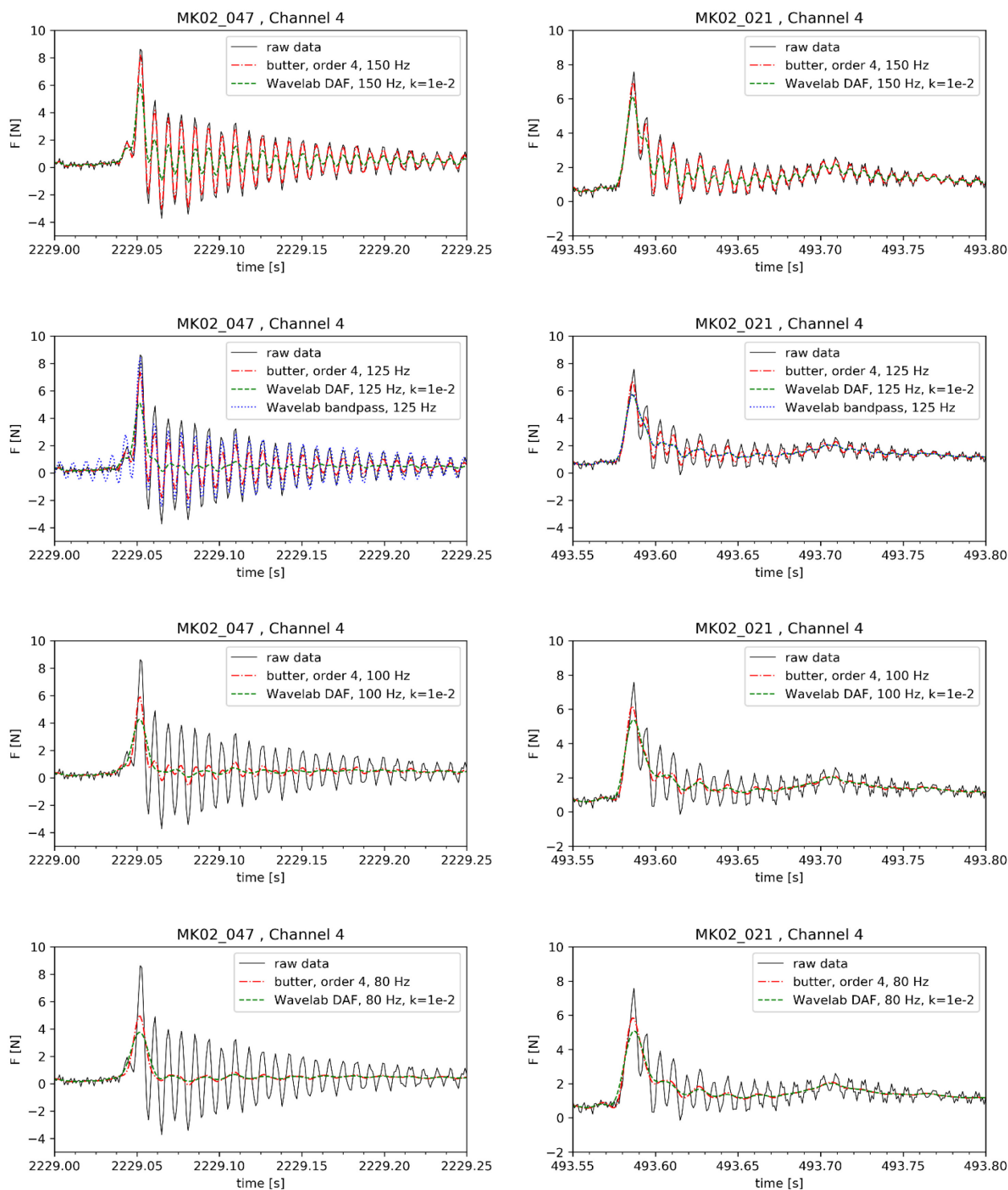


Figuur 36 toont de resultaten van de DAF filtering op de 4 proeven die de grootste ruwe krachtpiek bevatten, voor verschillende low-pass frequenties en dempingsfactoren. In alle gevallen is er een stelselmatige reductie van de krachtpiek met afnemende filterfrequentie, die lijkt te convergeren naar de laagste toegepaste frequenties (100 en 80 Hz). Zoals eerder geconcludeerd is de absolute reductie afhankelijk van de hoeveelheid dynamische oscillatie. In Figuur 37 wordt dieper ingegaan op 2 typevoorbeelden: enerzijds de grootste impact in proef MK02_047 die een relatief groot aandeel dynamische oscillatie vertoont, anderzijds de grootste impact in MK02_021, waar dit aandeel beperkter is. De vergelijking tussen het DAF en het Butterworth laagdoorlaatfilter toont dat hoe groter het aandeel dynamische oscillatie, hoe sterker de relatieve reductie door het DAF filter t.o.v. het Butterworth filter. Op basis van het selectie criterium (het verdwijnen van de dynamische oscillaties na de primaire krachtpiek) volgt een optimale filterfrequentie van 125 Hz voor het DAF filter en 80 Hz voor het Butterworth laagdoorlaatfilter. Er wordt gekozen om het DAF filter verder te gebruiken in de analyse.

Figuur 36 – Resultaten DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste golfimpact op de zeewaartse muur GDU Middelkerke (Ch. 4)



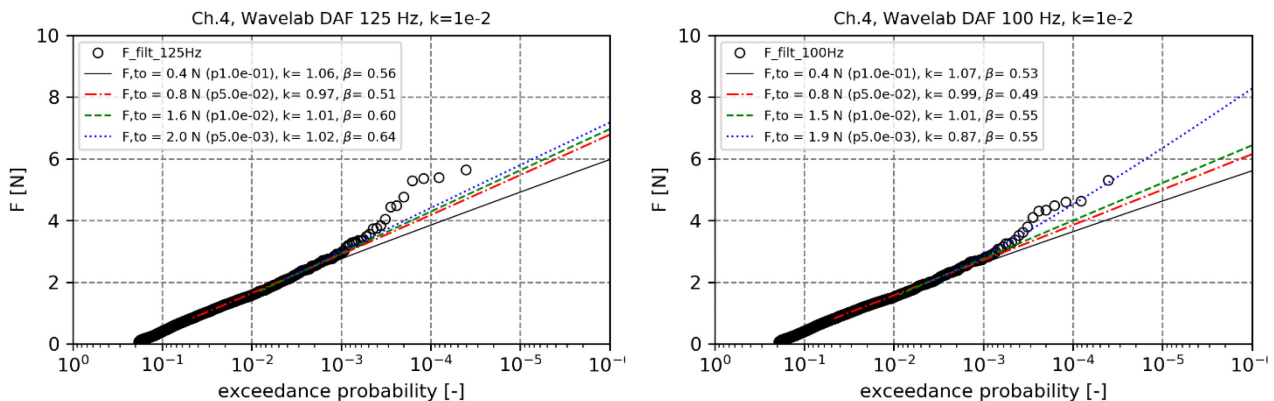
Figuur 37 – Vergelijking toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter, landwaartse GDU-muur (Ch.4)



4.4.2 Verdeling van de krachten

Figuur 38 toont de resultaten van de toepassing van Weibull-fitting op de gefilterde krachtpieken, voor verschillende drempelwaarden F_{to} (overeenstemmend met 50, 10, 1 en 0.1 % overschrijdingskans). Uit voorgaande analyse werd de frequentie 125 Hz weerhouden als meest optimale keuze voor het DAF filter. De drempel bij 1% overschrijdingskans, zoals ook vastgelegd in de analyse bij de frontmuur van de parkingsectie (zie sectie 3.3.2 en 4.3.2) lijkt hier opnieuw een geschikte keuze.

Figuur 38 – Weibull fit op DAF-gefilterde krachtpiekwaarden, landwaartse muur GDU Middelkerke (Ch.4)



4.4.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de landwaartse GDU-muur

Tabel 18 geeft de ontwerpwaarden van horizontale golfkracht op de landwaartse GDU-muur in modelsectie MK02 voor verschillende waarden van stormduur (1000, 2000 of 3000 golven). Hierbij werden de Weibull fitting parameters voor DAF 125 Hz gefilterde krachtpieken toegepast.

Tabel 18 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht landwaartse GDU-muur modelsectie MK02 (prototype waarden in kN/m)

	$\mu = 1.71E-04$	
F_{to} [N]	1.6 (p0.01)	2.0 (p0.005)
k [-]	1.009	1.025
beta [N]	0.596	0.643
N=1000 (ca 2.7 u stormduur)	16.6	17.1
N=2000 (ca 5.4 u stormduur)	17.5	18.0
N=3000 (ca 8.3 u stormduur)	18.0	18.5

5 Modelsectie MK03 “GDU Westende” (sectie 76, y=530 m)

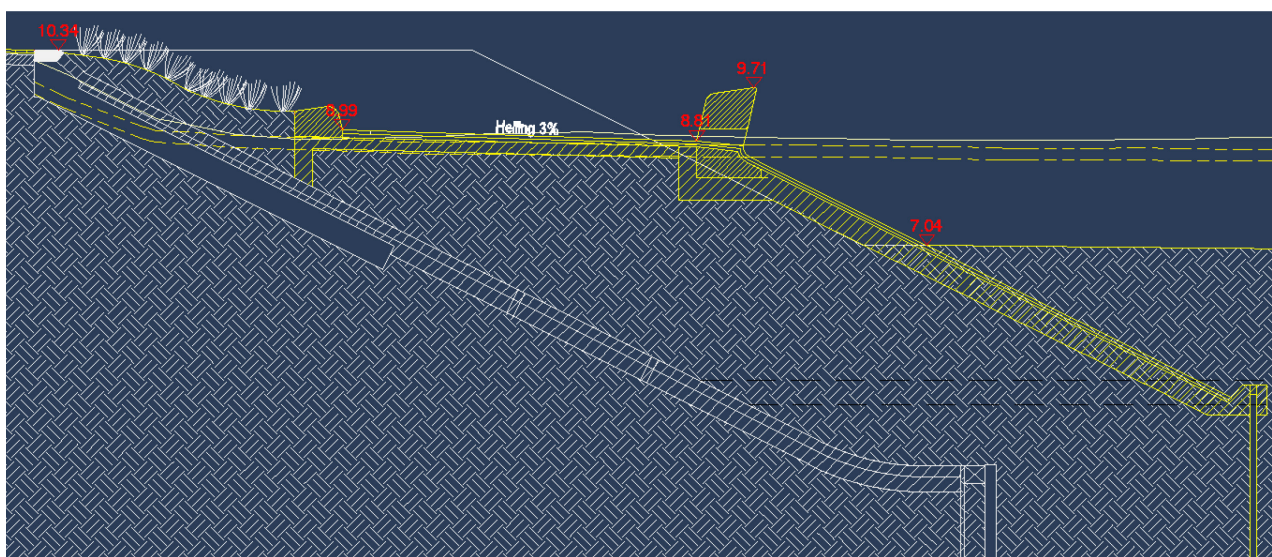
5.1 Dataset gekalibreerde proeven

Er zijn 22 gekalibreerde proeven (Tabel 19). Hierbij wordt opgemerkt dat de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ aan de dijkteen systematisch overschat wordt (tot ca. 25 %). Dit is wel iets minder in vergelijking met modelsectie MK02 (zie Tabel 13).

5.2 Golfoverslag

De golfoverslag in het model wordt opgemeten over de promenade die zich landwaarts van de golfdempende uitbouw op een peil +10.34m TAW bevindt (Figuur 39). Het gemodelleerde strandpeil ligt in natuur op +6.69 m TAW tegen de dijkhelling van de GDU.

Figuur 39 – ontwerpdoorsnede MK03 “GDU Westende”



Het gemiddeld overslagdebiet¹⁴ op basis van de proevenreeksen bedraagt 0.132 l/m/s op natuurschaal (zie Tabel 21). Hierbij wordt opgemerkt dat dit een overschatting is van het reële overslagdebiet wegens de foutieve kalibratie van de spectrale golfperiode aan de dijkteen.

Uit de analyse op basis van een t-distributie volgt dat een debiet van 1 l/m/s een overschrijdingskans van slechts 1.08E-25 heeft, wat praktisch gelijk kan gesteld worden aan nul. In dit geval is het niet relevant nog een correctie voor de golfperiode toe te passen op basis van de ondiepwater overslagformule (zie sectie 4.2).

¹⁴ Het rekenkundig gemiddelde bedraagt 0.132 l/m/s. Indien rekening gehouden wordt met de duurtijd van de proeven bedraagt het gewogen gemiddelde 0.134 l/m/s. Vermits er slechts 1 proef (MK03_034) een afwijkende duurtijd heeft, kan verondersteld worden dat de inschatting van de onzekerheid op basis van de t-distributie voldoende nauwkeurig is zonder expliciet rekening te houden met deze afwijkende duurtijd.

Tabel 19 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 3 GDU Westende.

RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfshot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	Tp [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.0424	Target: 6.29	Target: 0.906	+ - 3%	+5%	+ - 0.002 m
MK03_011	817070576	0.903	0.120	2.20	1347	0.0425	7.72	0.9068	0.31%	22.80%	0.0008
MK03_013	1135635988	0.903	0.130	2.20	1368	0.0429	7.96	0.9072	1.20%	26.54%	0.0012
MK03_015	909588146	0.903	0.125	2.00	1371	0.0419	7.64	0.9072	-1.08%	21.45%	0.0012
MK03_016	664268169	0.903	0.125	2.10	1338	0.0422	7.96	0.9069	-0.47%	26.62%	0.0009
MK03_017	1343455737	0.903	0.125	2.10	1364	0.0428	7.65	0.9069	0.90%	21.62%	0.0009
MK03_018	1384645384	0.903	0.125	2.10	1367	0.0428	7.81	0.9069	0.92%	24.13%	0.0009
MK03_019	113445332	0.903	0.125	2.10	1344	0.0418	7.64	0.9070	-1.45%	21.48%	0.0010
MK03_020	-1041357480	0.903	0.125	2.10	1341	0.0431	7.20	0.9070	1.59%	14.54%	0.0010
MK03_021	1019647399	0.903	0.125	2.10	1335	0.0434	7.90	0.9069	2.43%	25.56%	0.0009
MK03_022	1154988288	0.903	0.125	2.10	1372	0.0419	7.25	0.9068	-1.20%	15.25%	0.0008
MK03_023	962182491	0.903	0.125	2.10	1335	0.0436	7.72	0.9069	2.89%	22.71%	0.0009
MK03_024	-1832930490	0.903	0.125	2.10	1369	0.0428	7.65	0.9069	1.01%	21.69%	0.0009
MK03_025	-1496045881	0.903	0.125	2.10	1350	0.0417	7.27	0.9069	-1.58%	15.53%	0.0009
MK03_026	-1691786776	0.903	0.125	2.10	1345	0.0425	7.61	0.9069	0.34%	20.96%	0.0009
MK03_027	-1008693838	0.903	0.125	2.10	1365	0.0423	7.24	0.9069	-0.29%	15.11%	0.0009
MK03_028	1390045384	0.903	0.125	2.10	1363	0.0427	7.72	0.9069	0.65%	22.66%	0.0009
MK03_029	1613066018	0.903	0.125	2.10	1359	0.0433	7.58	0.9068	2.09%	20.49%	0.0008
MK03_030	1213352906	0.903	0.125	2.10	1375	0.0422	7.32	0.9070	-0.46%	16.44%	0.0010
MK03_031	-608657444	0.903	0.125	2.10	1363	0.0431	7.81	0.9068	1.72%	24.17%	0.0008
MK03_032	-987952017	0.903	0.125	2.10	1366	0.0430	7.44	0.9070	1.37%	18.28%	0.0010
MK03_034	958841150	0.903	0.125	2.10	6681	0.0436	7.84	0.9068	2.87%	24.69%	0.0008
MK03_035	449789771	0.903	0.125	2.10	1294	0.0427	7.71	0.9070	0.81%	22.55%	0.0010
				totaal	35112						

Tabel 20 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet, modelsectie 3 GDU Westende

aantal proeven	22	
S _n (steekproefvariantie)	0.068	
q _{avg}	0.132	l/m/s
T0.95	1.721	
q _{0.95}	0.16	l/m/s
T0.9999	4.493	
q _{0.9999}	0.20	l/m/s

Tabel 21 – Proevenreeks met resultaten golfoverslag modelsectie MK03.

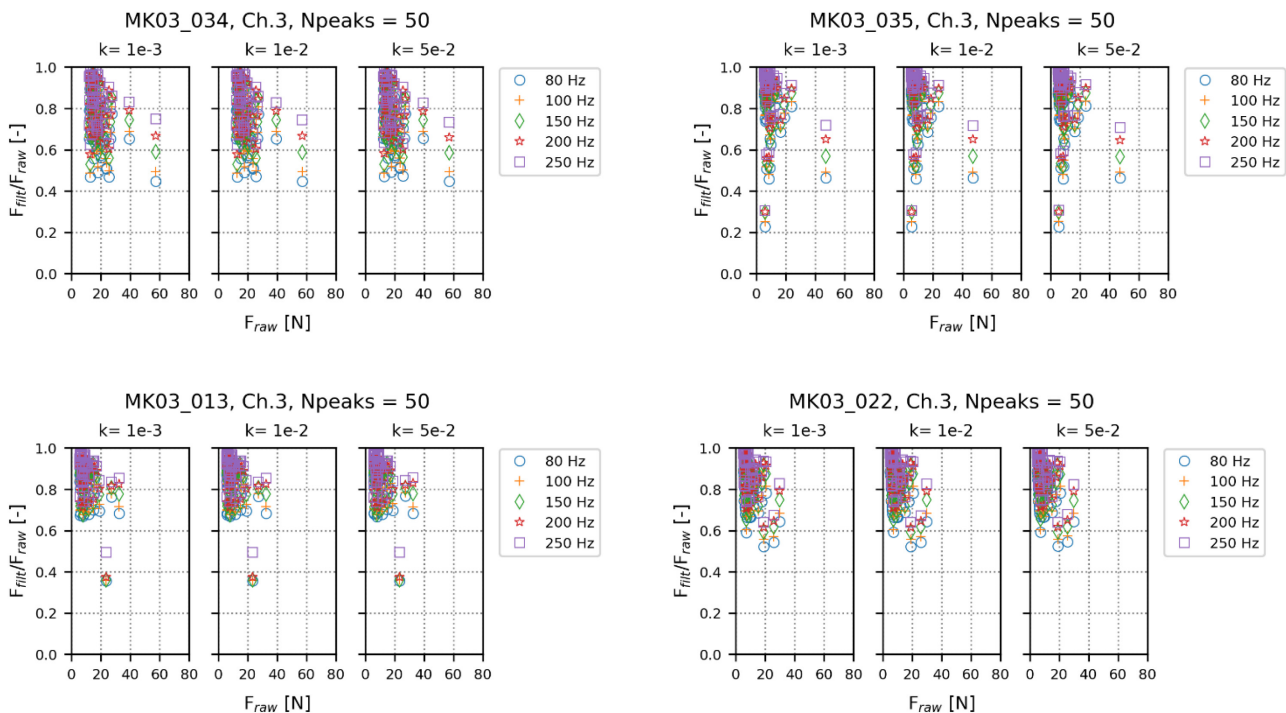
	Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ	
RUN_ID	Target: 0.0424	Target: 6.29	Target: 0.906	+/- 3%	+/-5%	+/- 0.002 m	q _{gem} natuur [l/m/s]
MK03_011	0.0425	7.72	0.9068	0.31%	22.80%	0.0008	0.025
MK03_013	0.0429	7.96	0.9072	1.20%	26.54%	0.0012	0.199
MK03_015	0.0419	7.64	0.9072	-1.08%	21.45%	0.0012	0.172
MK03_016	0.0422	7.96	0.9069	-0.47%	26.62%	0.0009	0.188
MK03_017	0.0428	7.65	0.9069	0.90%	21.62%	0.0009	0.061
MK03_018	0.0428	7.81	0.9069	0.92%	24.13%	0.0009	0.284
MK03_019	0.0418	7.64	0.9070	-1.45%	21.48%	0.0010	0.069
MK03_020	0.0431	7.20	0.9070	1.59%	14.54%	0.0010	0.017
MK03_021	0.0434	7.90	0.9069	2.43%	25.56%	0.0009	0.130
MK03_022	0.0419	7.25	0.9068	-1.20%	15.25%	0.0008	0.103
MK03_023	0.0436	7.72	0.9069	2.89%	22.71%	0.0009	0.059
MK03_024	0.0428	7.65	0.9069	1.01%	21.69%	0.0009	0.165
MK03_025	0.0417	7.27	0.9069	-1.58%	15.53%	0.0009	0.082
MK03_026	0.0425	7.61	0.9069	0.34%	20.96%	0.0009	0.072
MK03_027	0.0423	7.24	0.9069	-0.29%	15.11%	0.0009	0.173
MK03_028	0.0427	7.72	0.9069	0.65%	22.66%	0.0009	0.190
MK03_029	0.0433	7.58	0.9068	2.09%	20.49%	0.0008	0.132
MK03_030	0.0422	7.32	0.9070	-0.46%	16.44%	0.0010	0.214
MK03_031	0.0431	7.81	0.9068	1.72%	24.17%	0.0008	0.096
MK03_032	0.0430	7.44	0.9070	1.37%	18.28%	0.0010	0.128
MK03_034	0.0436	7.84	0.9068	2.87%	24.69%	0.0008	0.144
MK03_035	0.0427	7.71	0.9070	0.81%	22.55%	0.0010	0.202
	gemiddelde						0.132

5.3 Golfimpact op de zeewaartse GDU-muur

5.3.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.3)

Op basis van een kwaliteitscontrole op de krachtsignalen wordt geconcludeerd dat alle proeven in de reeks in aanmerking komen voor analyse. Er is geen correctie nodig voor ongewenste offset of drift. Figuur 40 toont de resultaten van de DAF filtering op de 4 proeven die de grootste ruwe krachtpiek bevatten, voor verschillende filterfrequenties en dempingsfactoren. De meeste krachtpieken vertonen een waarde $F_{\text{filt}}/F_{\text{raw}}$ tussen ca. 0.9 en 0.5 voor het toegepaste interval van laagdoorlaatfrequenties tussen 80 en 250 Hz. Opvallend zijn ook enkele uitschieters met een reductie tot meer dan 60% in proeven MK03_013 en 035, die quasi niet beïnvloed wordt door de DAF-filterfrequentie.

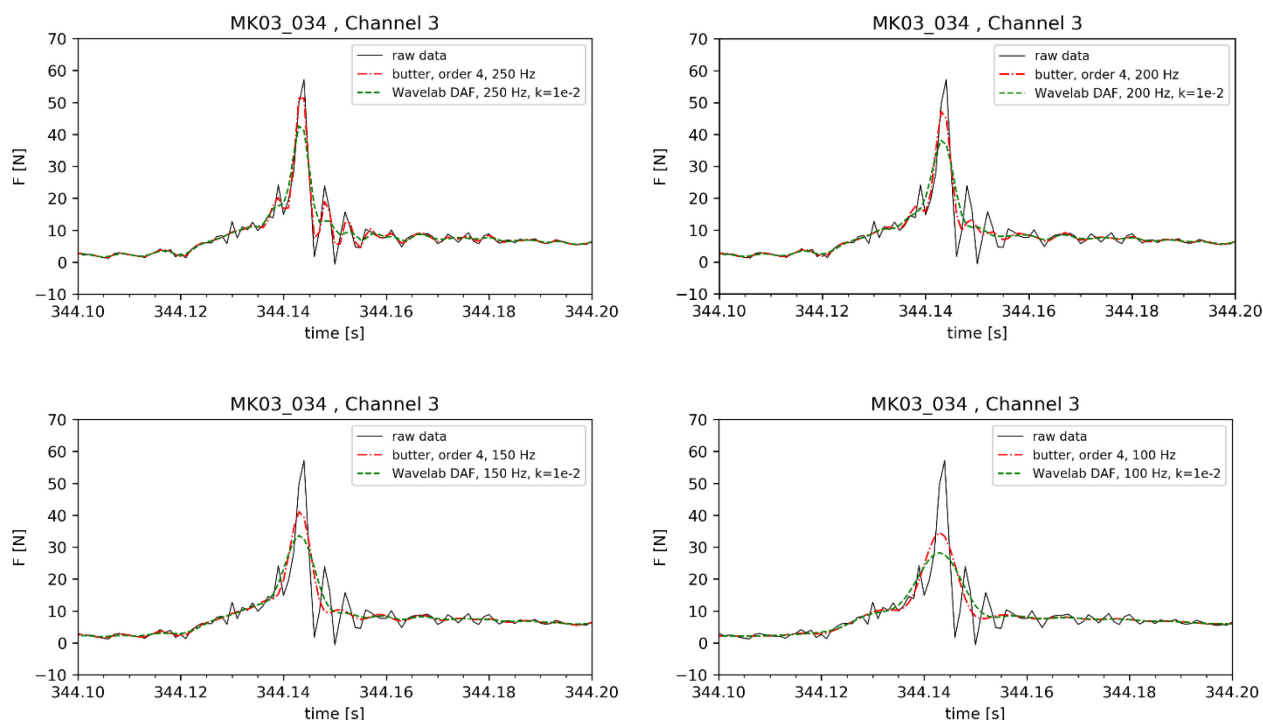
Figuur 40 – DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de zeewaartse muur GDU Westende (Ch.3)



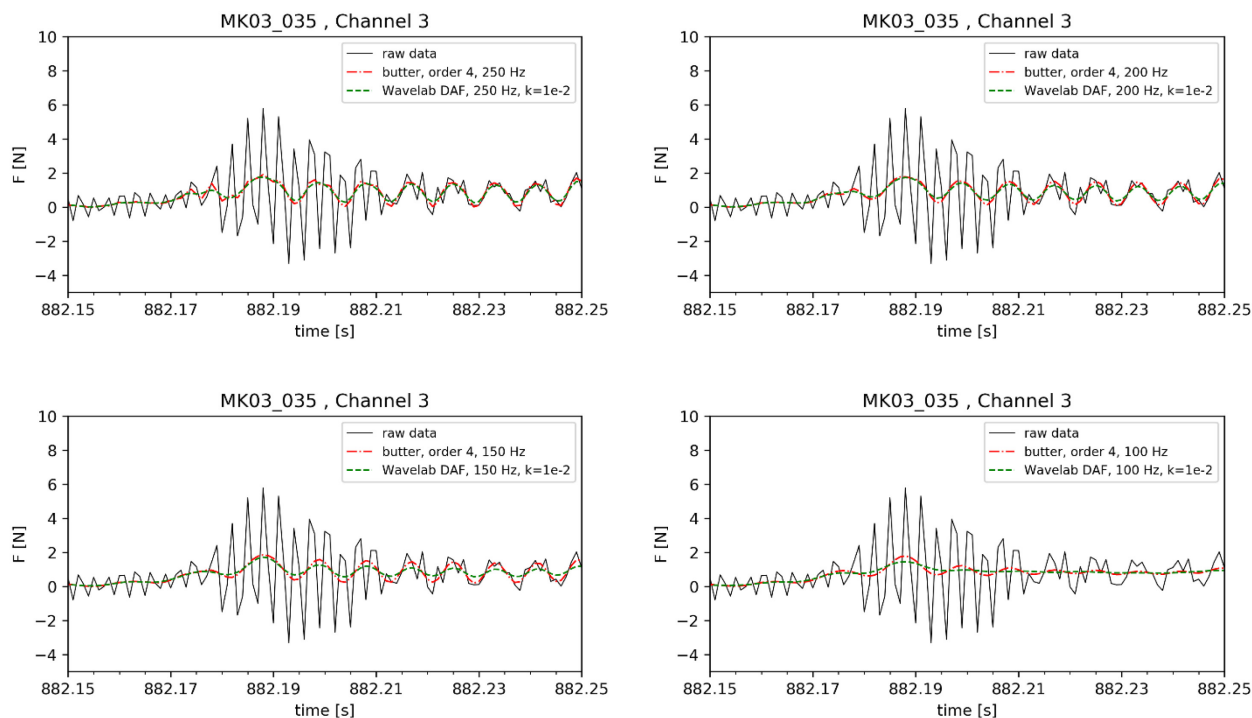
De grootste impact uit proef MK03_034 (Figuur 41) vertoont een oscillatie van het signaal na de krachtpiek, die niet uitgesproken sinusoidaal is (vergelijk met het getoonde voorbeeld in Figuur 11). Het verlagen van de filterfrequentie resulteert in een stelselmatige reductie van de krachtpiek. Er treedt echter geen saturatie zoals vastgesteld in de analyse van de impacten op de parkingmuur (zie Figuur 12). Het is m.a.w. onzeker of de gemeten oscillatie te wijten is aan de dynamische respons van het meetsysteem, of dat het gaat versterkte ruis. Om die reden wordt veiligheidshalve beslist geen DAF filter toe te passen, maar een eenvoudig laagdoorlaatfilter. Op basis van het selectie criterium (het verdwijnen van de dynamische oscillaties na de primaire krachtpiek) volgt een optimale filterfrequentie van 150 Hz voor het Butterworth laagdoorlaatfilter.

Figuur 42 toont de impact uit proef MK03_035 die de grootste reductie na DAF ondergaat (meer dan 60%). Het krachtsignaal vertoont hier quasi volledige dynamische excitatie op waarbij het signaal terugveert tot ver in de negatieve krachtwwaarden. In zulke gevallen is het onmogelijk een betrouwbare schatting van de reële krachtpiek te bekomen. Zoals blijkt uit de vergelijking tussen beide filterfrequenties resulteert het Butterworth laagdoorlaatfilter in een relatief snelle daling van de amplitude van de krachtooscillatie.

Figuur 41 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact , zeewaartse GDU-muur (Ch.3)



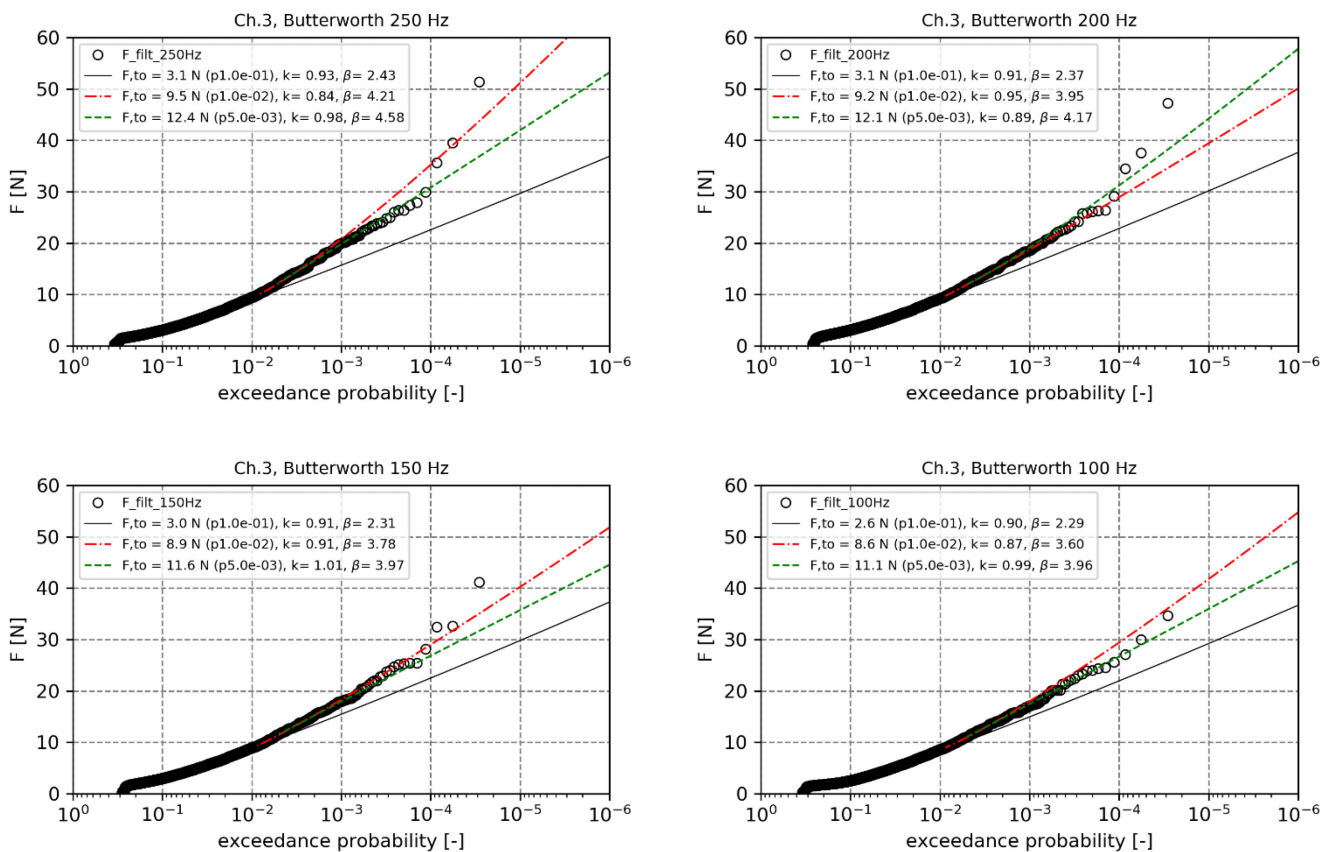
Figuur 42 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact met dynamische versterking, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)



5.3.2 Verdeling van de krachten

Figuur 43 toont de resultaten van de toepassing van Weibull-fitting op de gefilterde krachtpieken, voor verschillende drempelwaarden $F_{t,o}$ (overeenstemmend met 10, 1 en 0.5 % overschrijdingskans). Uit voorgaande analyse werd de frequentie 150 Hz weerhouden als meest optimale keuze voor het Butterworth laagdoorlaatfilter. De drempel bij 1% overschrijdingskans, zoals ook vastgelegd in de analyse bij de voorgaande modelsecties lijkt hier opnieuw een geschikte keuze.

Figuur 43 – Weibull fit op Butterworth gefilterde krachtpiekwaarden, zeewaartse GDU-muur (Ch.3)



5.3.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de zeewaartse GDU-muur

Tabel 22 geeft de ontwerpwaarden van horizontale golfkracht op de zeewaartse GDU-muur in modelsectie MK03 voor verschillende waarden van stormduur (1000, 2000 of 3000 golven). Hierbij werden de Weibull fitting parameters op basis van 150 Hz Butterworth gefilterde krachtpieken toegepast.

Tabel 22 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht zeewaartse GDU-muur modelsectie MK03 (prototype waarden in kN/m)

	$\mu = 1.71E-04$	
F_{to} [N]	8.9 (p0.01)	11.6 (p0.005)
k [-]	0.91	1.01
beta [N]	3.78	3.97
N=1000 (ca 2.7 u stormduur)	126.9	101.6
N=2000 (ca 5.4 u stormduur)	134.4	138.8
N=3000 (ca 8.3 u stormduur)	138.8	115.6

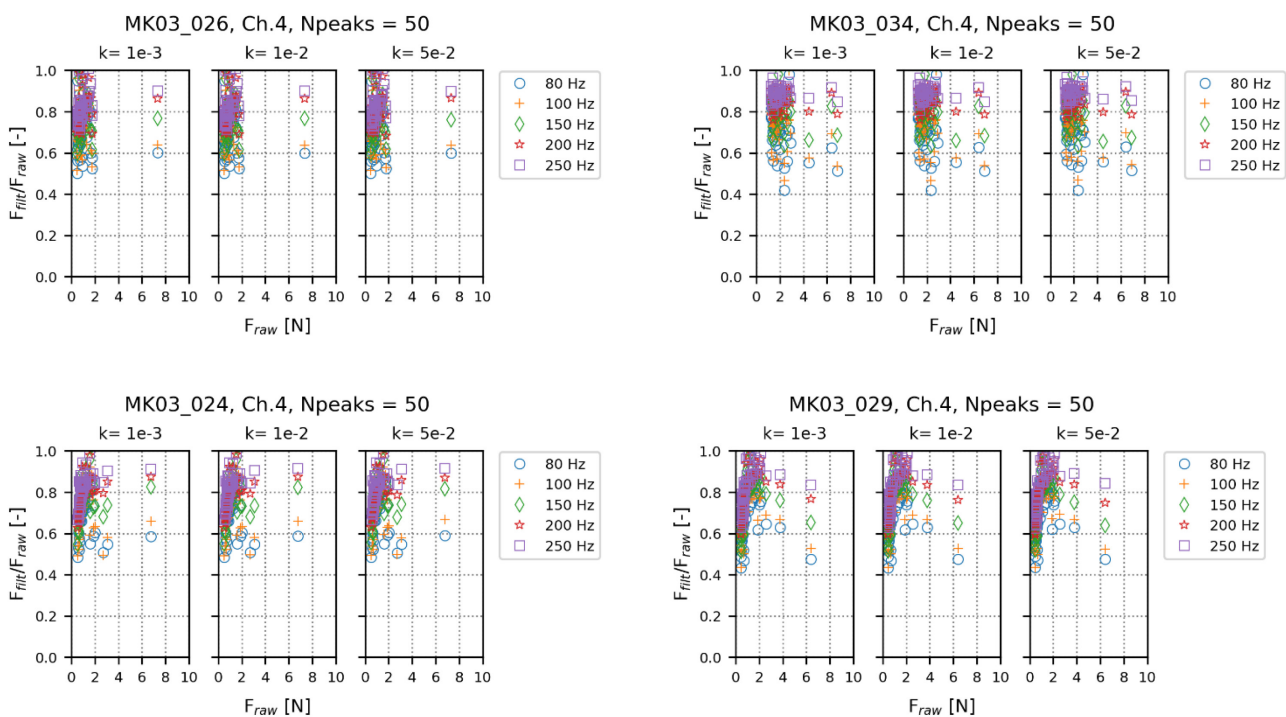
5.4 Golfimpact op de landwaartse GDU-muur

5.4.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.4)

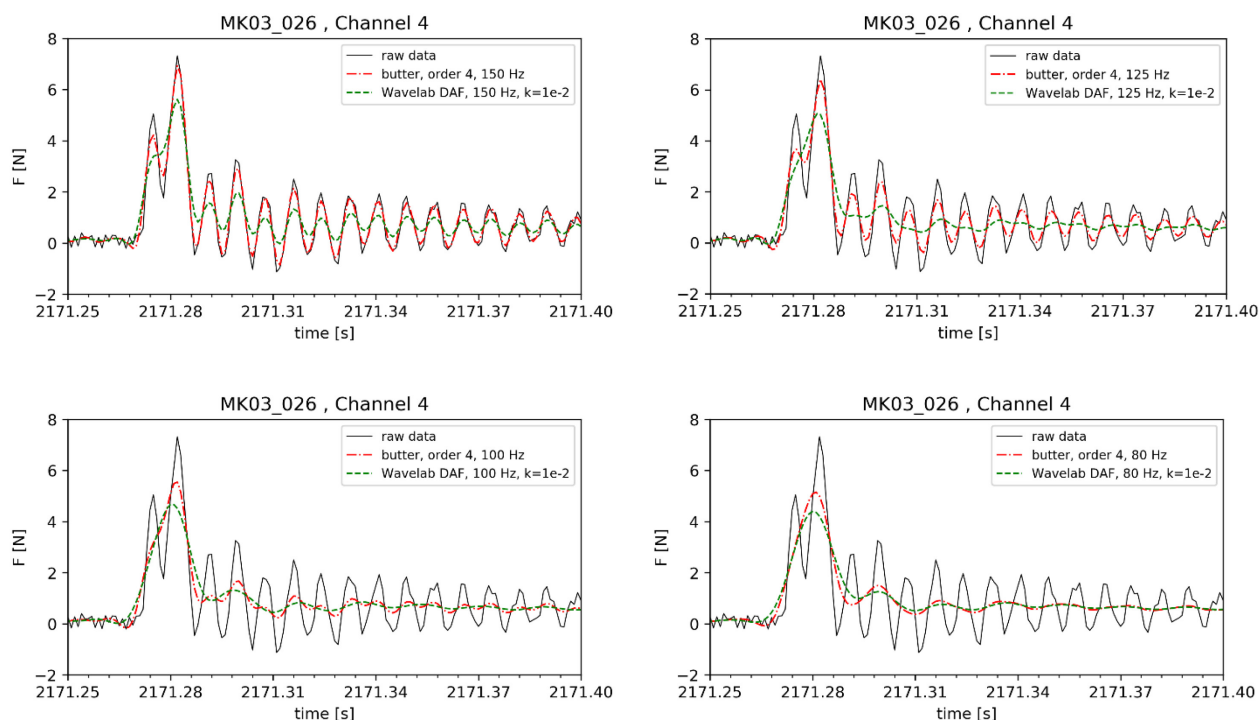
Op basis van een kwaliteitscontrole op de krachtsignalen wordt geconcludeerd dat alle proeven in de reeks in aanmerking komen voor analyse. Er is geen correctie nodig voor ongewenste offset of drift.

Figuur 44 toont de resultaten van de DAF filtering op de 4 proeven die de grootste ruwe krachtpiek bevatten, voor verschillende filterfrequenties en dempingsfactoren. Uit de analyse van de grootste krachtpieken in Figuur 45Figuur 46 blijkt een optimale filterkeuze te vallen op het DAF filter op 125 Hz of een Butterworth op 80 Hz, zoals dat ook het geval was bij de modelsectie MK02 (sectie 4.4.1). In verdere analyse worden de krachtpieken na toepassing van het DAF filter gebruikt.

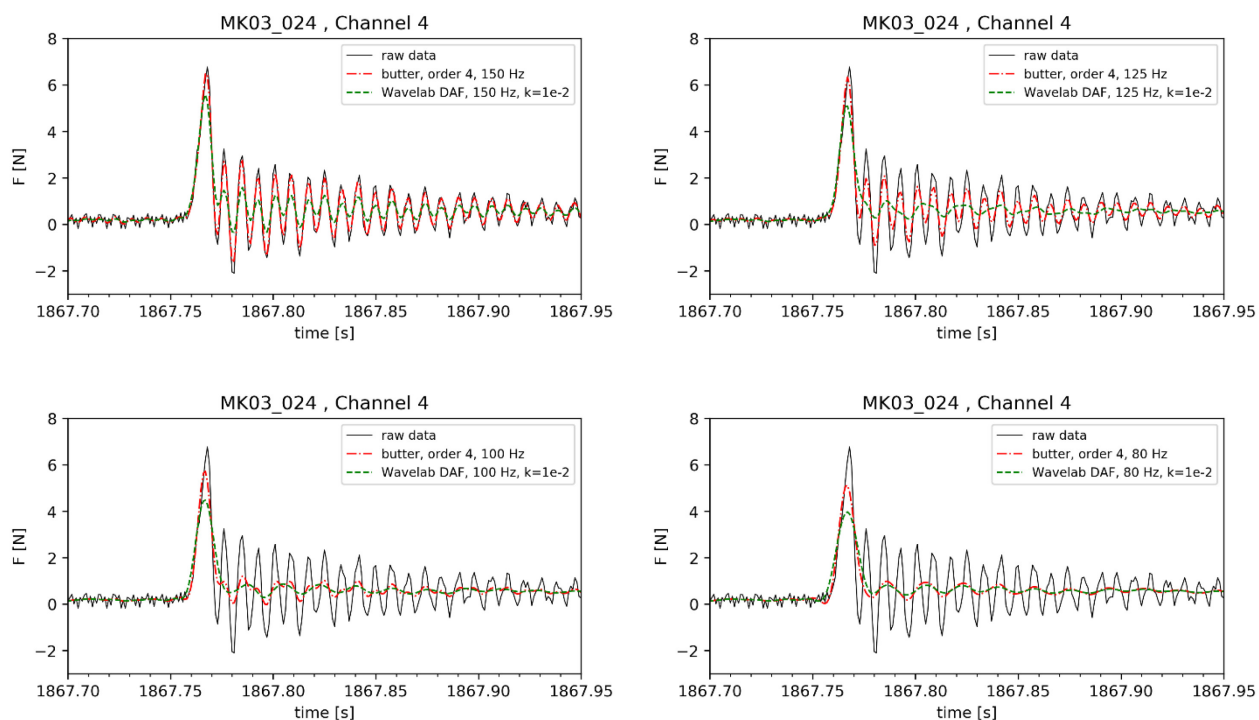
Figuur 44 – DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de landwaartse muur GDU Westende (Ch.4)



Figuur 45 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact , landwaartse GDU-muur (Ch.4)



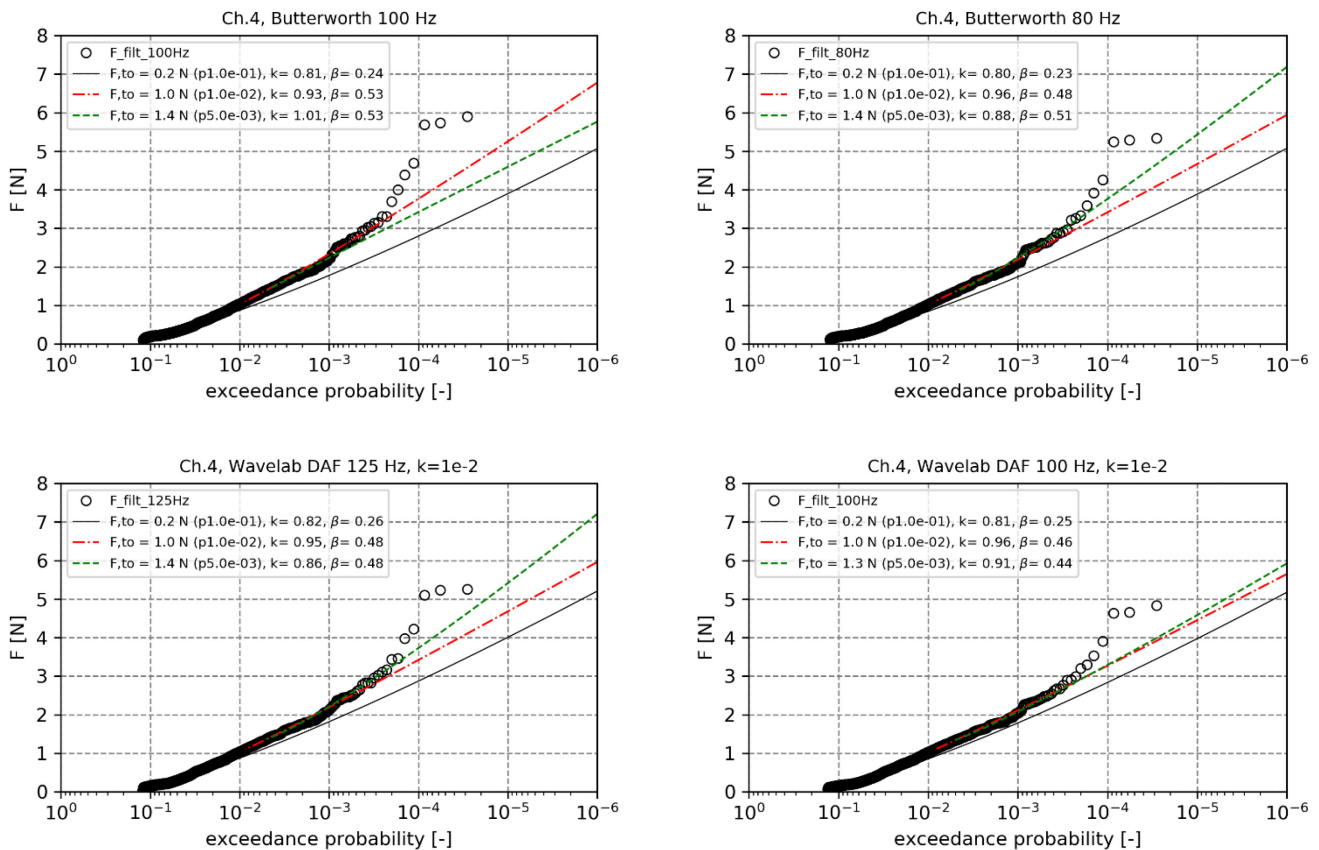
Figuur 46 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact , landwaartse GDU-muur (Ch.4)



5.4.2 Verdeling van de krachten

Figuur 47 toont de resultaten van de toepassing van Weibull-fitting op de gefilterde krachtpieken, voor verschillende drempelwaarden $F_{t,o}$ (overeenstemmend met 10, 1 en 0.5 % overschrijdingskansen). Uit voorgaande analyse werd de frequentie 125 Hz weerhouden als meest optimale keuze voor het DAF filter. De drempelwaarde met 0.5 % overschrijdingskansen leidt hier tot de minst conservatieve overschrijdingskromme.

Figuur 47 – Weibull fit op gefilterde krachtpiekwaarden, landwaartse muur GDU Middelkerke (Ch.4)



5.4.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de landwaartse GDU-muur

Tabel 23 geeft de ontwerpwaarden van horizontale golfkracht op de landwaartse GDU-muur in modelsectie MK03 voor verschillende waarden van stormduur (1000, 2000 of 3000 golven). Hierbij werden de Weibull fitting parameters voor DAF 125 Hz gefilterde krachtpieken toegepast.

Tabel 23 – Ontwerpwaarde horizontale golfkracht landwaartse GDU-muur modelsectie MK03 (prototype waarden in kN/m)

	$\mu = 1.71E-04$	
F_{to} [N]	1.0 (p0.01)	1.4 (p0.005)
k [-]	0.954	0.858
beta [N]	0.480	0.481
N=1000 (ca 2.7 u stormduur)	14.5	18.0
N=2000 (ca 5.4 u stormduur)	15.3	19.2
N=3000 (ca 8.3 u stormduur)	15.8	19.9

6 Modelsectie MK04 "Rauschenbergplein CC' "
(sectie 77, y=850 m)

6.1 Dataset gekalibreerde proeven

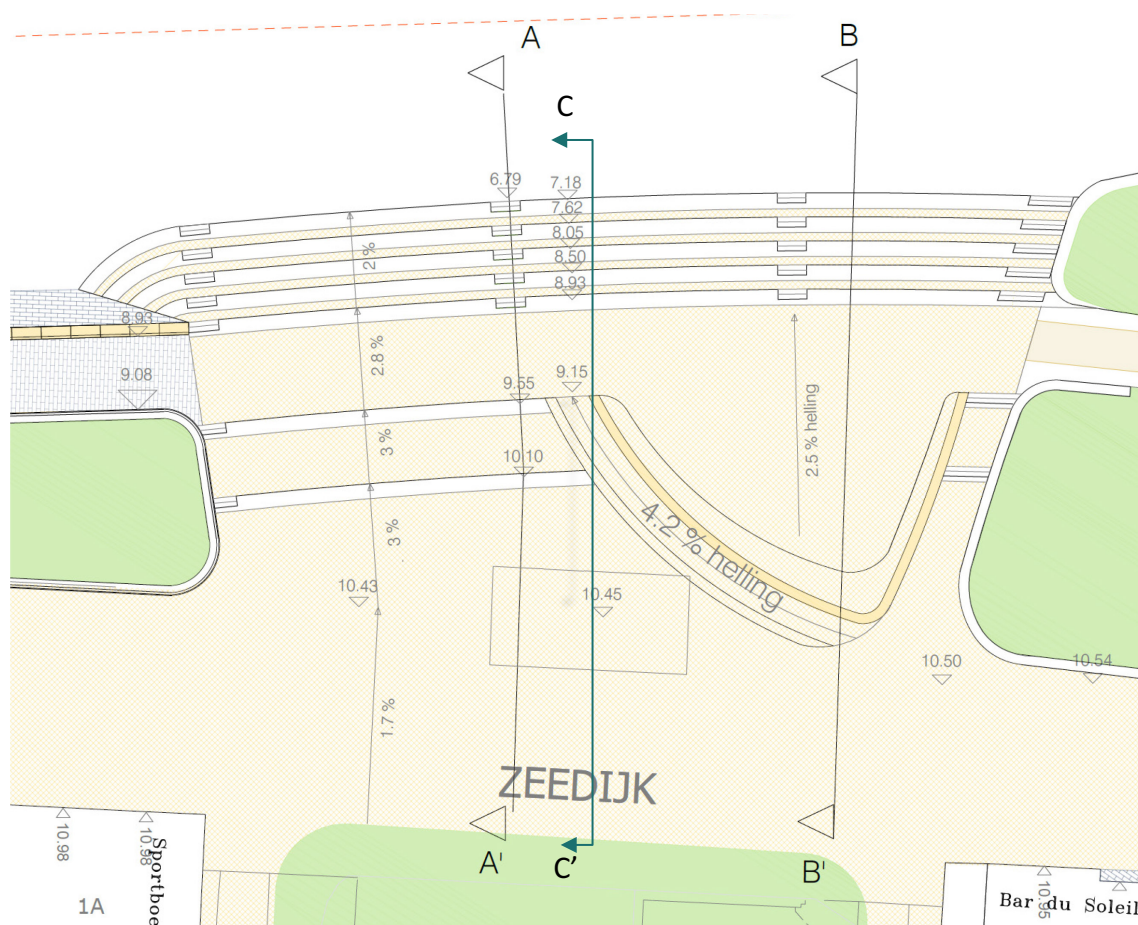
Er zijn 25 gekalibreerde proeven op golfhoogte en waterdiepte (Tabel 25). De spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ aan de dijkteen wordt systematisch overschat tot ca. 30- 40 %.

6.2 Golfoverslag

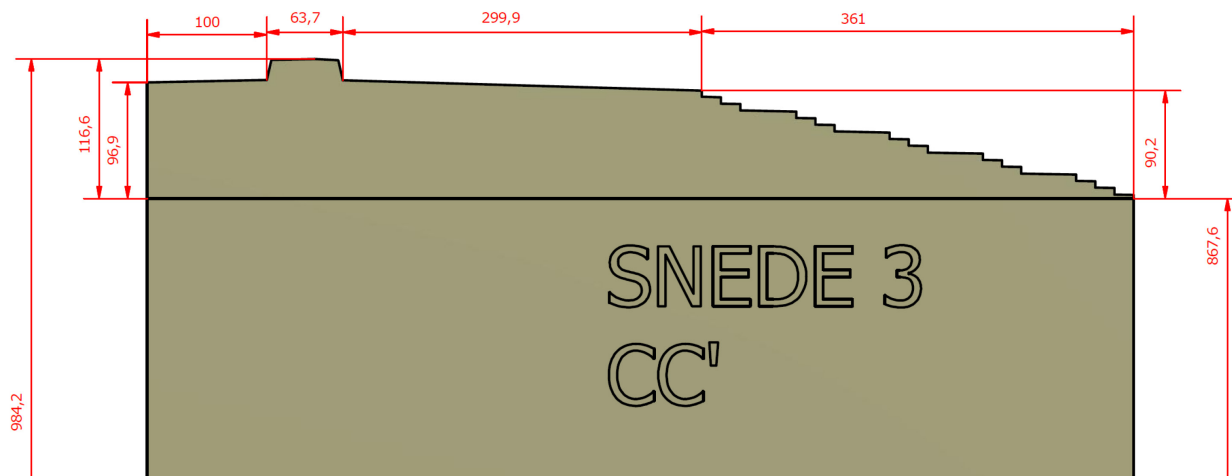
Figuur 48 toont het ontwerp grondplan van het Rauschenbergplein. Het gemodelleerde strandpeil ligt in natuur op +6.69 m TAW aan de voet van de trappenpartij.

Snede AA' is de meest nadelige voor golfoverslag. In snede CC' bevindt zich een zitbank met kruinpeil op +9.55 m TAW. Deze snede is maatgevend voor de golfimpact op dit constructief element. De golfimpacten op de trappen worden niet gemeten in model. In bijlage B.3 zijn enkele foto's van de modelopstelling opgenomen.

Figuur 48 – Grondplan Rauschenbergplein met definities snedes



Figuur 49 – Geometrie modelsectie MK04 "Rauschenbergplein CC' " (afmetingen in mm)



De golfoverslag wordt gemeten over de zitbank met kruinpeil +9.6 m TAW (0.9842 m t.o.v. het vloerpeil van de golfgoet in Figuur 49). Het gemiddeld overslagdebiet¹⁵ op basis van de proevenreeksen bedraagt 4.19 l/m/s op natuurschaal (zie Tabel 25). Hierbij wordt opgemerkt dat dit een overschatting is van het reële overslagdebiet wegens de foutieve kalibratie van de spectrale golfperiode aan de dijkteen. Uit de analyse op basis van een t-distributie (Tabel 24) volgt dat een debiet van 4.7 l/m/s 0.1% overschrijdingskans heeft. Uit de resultaten blijkt dat zelfs met een eventuele correctie voor de overschatting van de spectrale golfperiode aan de dijkteen, het normdebiet quasi zeker overschreden wordt ter hoogte van de zitbank in deze doorsnede.

Tabel 24 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet (natuurwaarden), modelsectie 3 GDU Westende

aantal proeven	25	
S_n (steekproefvariantie)	0.744	
q_{avg}	4.19	l/m/s
$T_{0.95}$	1.711	
$q_{0.95}$	4.44	l/m/s
$T_{0.999}$	3.467	
$q_{0.999}$	4.70	l/m/s

¹⁵ Dit gemiddelde werd berekend als het rekenkundig gemiddelde van alle proeven, vermits alle proeven in deze reeks quasi dezelfde duurtijd hebben.

Tabel 25 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 4 Rauschenbergplein sectie CC'

RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfschot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	Tp [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.044	Target: 5.85	Target: 0.906	+/- 3%	+5%	+/- 0.002 m
MK04_004	817070576	0.902	0.135	2.15	1330	0.0448	8.25	0.9060	1.74%	40.89%	0.0000
MK04_005	1135635988	0.902	0.130	2.15	1356	0.0431	8.13	0.9060	-2.08%	38.88%	0.0000
MK04_007	909588146	0.902	0.135	2.15	1359	0.0440	7.98	0.9055	0.00%	36.38%	-0.0005
MK04_009	664268169	0.902	0.135	2.15	1309	0.0450	8.74	0.9065	2.25%	49.37%	0.0005
MK04_010	1343455737	0.903	0.135	2.15	1360	0.0448	7.94	0.9067	1.73%	35.72%	0.0007
MK04_011	1384645384	0.903	0.145	2.00	1348	0.0450	8.27	0.9067	2.25%	41.36%	0.0007
MK04_012	113445332	0.903	0.145	2.00	1342	0.0447	7.77	0.9069	1.60%	32.81%	0.0009
MK04_013	-1041357480	0.903	0.145	2.00	1327	0.0432	7.42	0.9068	-1.74%	26.86%	0.0008
MK04_014	1019647399	0.903	0.145	2.00	1355	0.0436	8.02	0.9070	-1.02%	36.97%	0.0010
MK04_016	1154988288	0.903	0.135	2.00	1353	0.0434	8.03	0.9069	-1.34%	37.13%	0.0009
MK04_019	962182491	0.903	0.135	2.00	1335	0.0445	7.87	0.9068	1.06%	34.43%	0.0008
MK04_020	-1832930490	0.903	0.135	2.00	1364	0.0437	8.20	0.9071	-0.73%	40.05%	0.0011
MK04_021	-1496045881	0.903	0.138	1.95	1333	0.0434	7.69	0.9071	-1.27%	31.37%	0.0011
MK04_022	-1691786776	0.903	0.141	1.95	1318	0.0442	8.28	0.9071	0.50%	41.47%	0.0011
MK04_023	-1008693838	0.903	0.140	1.95	1341	0.0438	8.13	0.9074	-0.48%	38.98%	0.0014
MK04_024	1390045384	0.903	0.143	1.95	1353	0.0445	8.27	0.9074	1.15%	41.40%	0.0014
MK04_025	1613066018	0.903	0.135	2.15	1327	0.0450	8.25	0.9073	2.17%	40.94%	0.0013
MK04_026	1213352906	0.903	0.130	2.15	1327	0.0441	7.89	0.9076	0.31%	34.74%	0.0016
MK04_028	-987952017	0.903	0.135	2.15	1325	0.0443	7.79	0.9071	0.66%	33.19%	0.0011
MK04_029	1762702917	0.903	0.135	2.15	1327	0.0428	7.93	0.9072	-2.66%	35.48%	0.0012
MK04_030	737145576	0.903	0.135	2.15	1345	0.0428	7.32	0.9071	-2.80%	25.04%	0.0011
MK04_031	-176547126	0.903	0.145	2.00	1297	0.0437	7.77	0.9073	-0.68%	32.82%	0.0013
MK04_034	-1387719321	0.903	0.145	2.00	1296	0.0428	7.95	0.9075	-2.80%	35.77%	0.0015
MK04_035	1776294857	0.903	0.145	2.00	1295	0.0450	8.08	0.9073	2.17%	38.15%	0.0013
MK04_036	-1363079300	0.903	0.145	2.00	1296	0.0442	8.15	0.9074	0.42%	39.27%	0.0014
				totaal	33311						

Tabel 26 – Golfcondities aan de dijken en gemeten golfoverslag, modelsectie 4 Rauschenbergplein sectie CC'

	Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ	
RUN_ID	Target: 0.044	Target: 5.85	Target: 0.906	+/- 3%	+/-5%	+/- 0.002 m	q_gem natuur [l/m/s]
MK04_004	0.0448	8.25	0.9060	1.74%	40.89%	0.0000	3.12
MK04_005	0.0431	8.13	0.9060	-2.08%	38.88%	0.0000	3.31
MK04_007	0.0440	7.98	0.9055	0.00%	36.38%	-0.0005	3.87
MK04_009	0.0450	8.74	0.9065	2.25%	49.37%	0.0005	4.80
MK04_010	0.0448	7.94	0.9067	1.73%	35.72%	0.0007	4.29
MK04_011	0.0450	8.27	0.9067	2.25%	41.36%	0.0007	4.69
MK04_012	0.0447	7.77	0.9069	1.60%	32.81%	0.0009	4.65
MK04_013	0.0432	7.42	0.9068	-1.74%	26.86%	0.0008	3.50
MK04_014	0.0436	8.02	0.9070	-1.02%	36.97%	0.0010	3.69
MK04_016	0.0434	8.03	0.9069	-1.34%	37.13%	0.0009	3.70
MK04_019	0.0445	7.87	0.9068	1.06%	34.43%	0.0008	4.64
MK04_020	0.0437	8.20	0.9071	-0.73%	40.05%	0.0011	5.67
MK04_021	0.0434	7.69	0.9071	-1.27%	31.37%	0.0011	4.13
MK04_022	0.0442	8.28	0.9071	0.50%	41.47%	0.0011	4.08
MK04_023	0.0438	8.13	0.9074	-0.48%	38.98%	0.0014	5.22
MK04_024	0.0445	8.27	0.9074	1.15%	41.40%	0.0014	4.10
MK04_025	0.0450	8.25	0.9073	2.17%	40.94%	0.0013	5.09
MK04_026	0.0441	7.89	0.9076	0.31%	34.74%	0.0016	4.63
MK04_028	0.0443	7.79	0.9071	0.66%	33.19%	0.0011	4.35
MK04_029	0.0428	7.93	0.9072	-2.66%	35.48%	0.0012	2.64
MK04_030	0.0428	7.32	0.9071	-2.80%	25.04%	0.0011	5.10
MK04_031	0.0437	7.77	0.9073	-0.68%	32.82%	0.0013	3.92
MK04_034	0.0428	7.95	0.9075	-2.80%	35.77%	0.0015	2.92
MK04_035	0.0450	8.08	0.9073	2.17%	38.15%	0.0013	4.19
MK04_036	0.0442	8.15	0.9074	0.42%	39.27%	0.0014	4.34
	gemiddelde						4.19

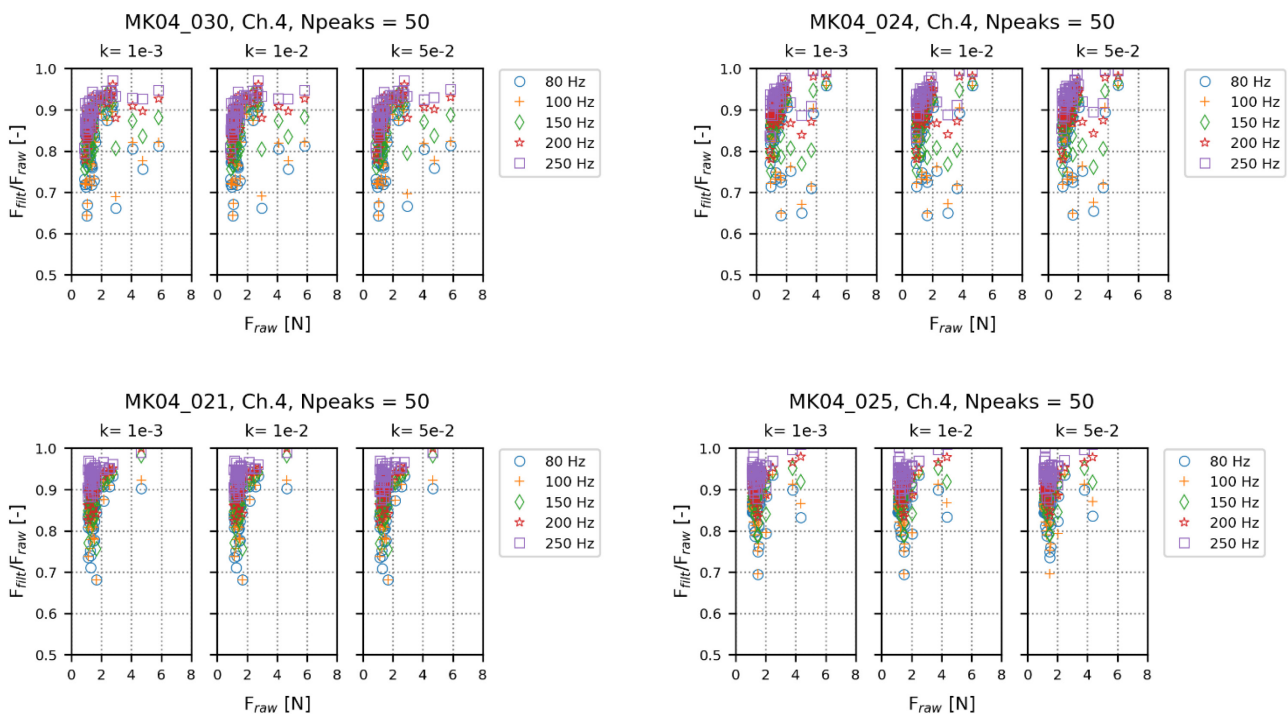
6.3 Golfimpact op de zitbank

6.3.1 Filtering van het ruwe signaal (Ch.4)

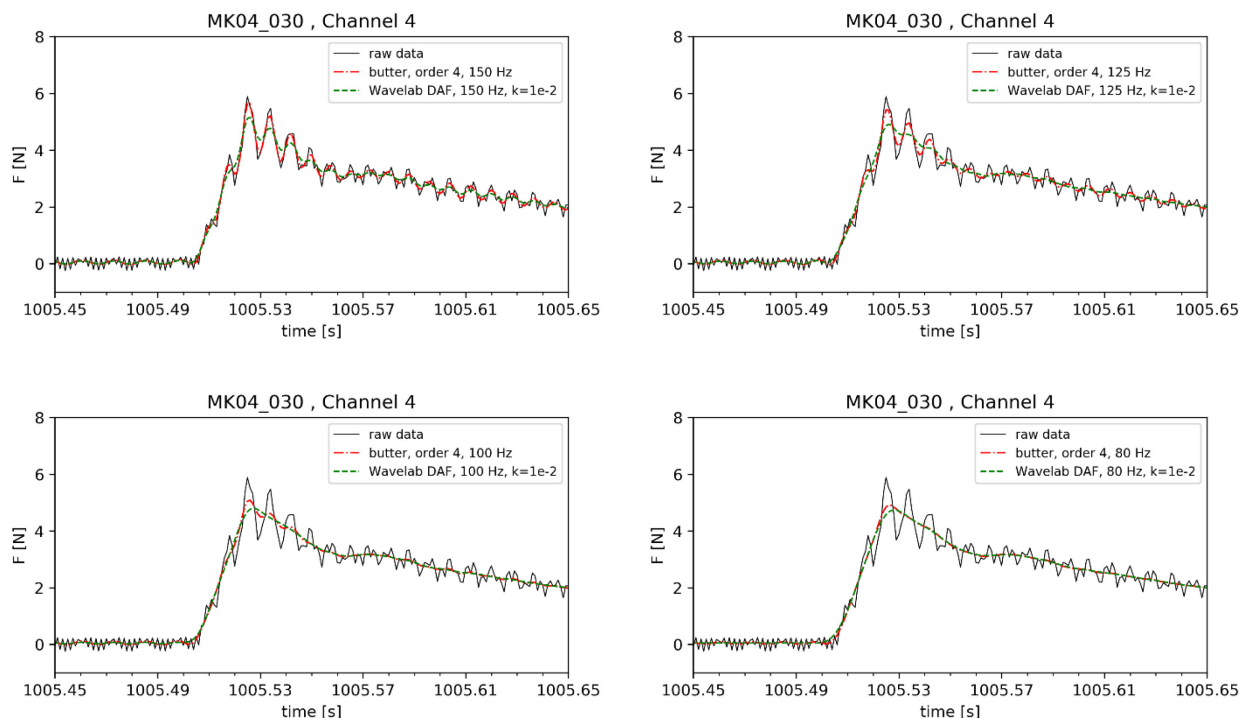
Op basis van een kwaliteitscontrole op de krachtsignalen wordt geconcludeerd dat alle proeven in de reeks in aanmerking komen voor analyse. Figuur 50 toont de resultaten van de DAF filtering op de 4 proeven die de grootste ruwe krachtpiek bevatten, voor verschillende low-pass frequenties en dempingsfactoren. Uit deze grafiek blijkt dat bepaalde impacten een grote reductie na filtering vertonen, afhankelijk van de hoeveelheid dynamische oscillatie in het signaal. Figuur 51 en Figuur 52 illustreren dit voor resp. een impact zonder en met uitgesproken dynamische oscillatie.

Uit de analyse van de impact in Figuur 52 blijkt dat de oscillaties na de krachtpiek verdwijnen bij toepassing van een Butterworth filter op 80 Hz. Deze wordt weerhouden als optimale filterinstelling.

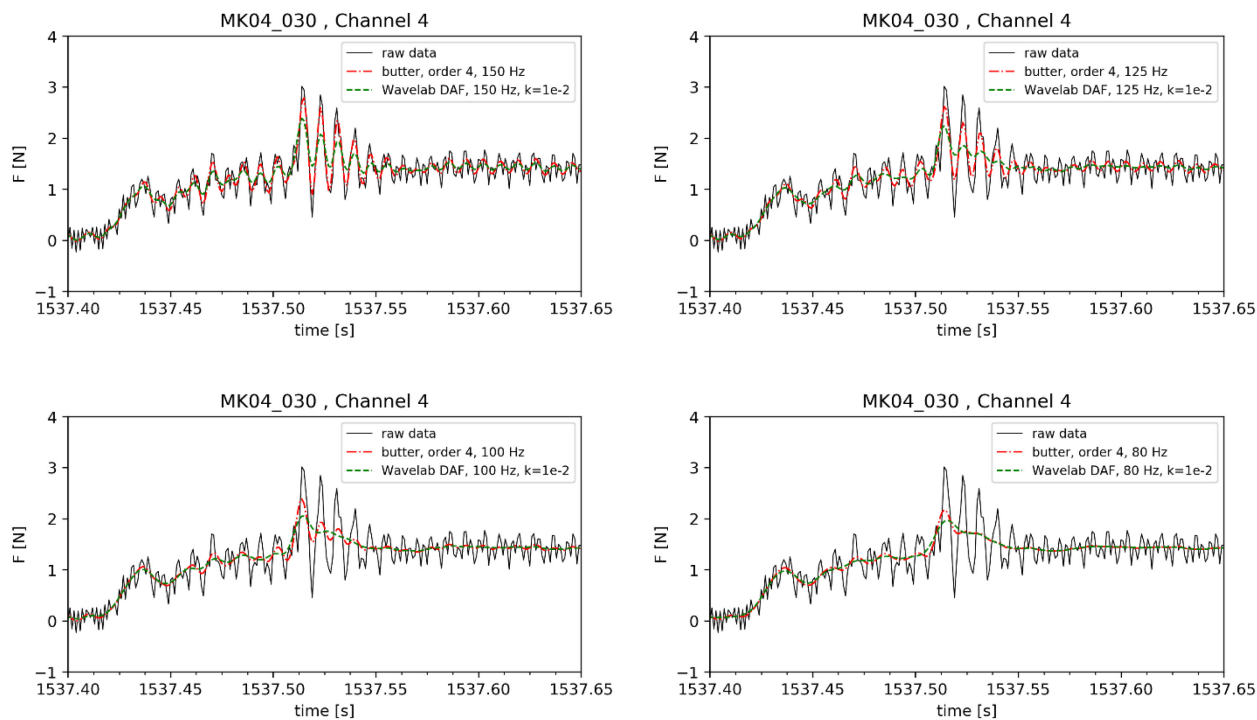
Figuur 50 – DAF filtering 50 grootste krachtpieken van de 4 proefruns met de grootste ruwe golfimpact op de zitbank Rauschenbergplein snede CC' (Ch.4)



Figuur 51 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact, zitbank Rauschenbergplein (Ch.4)



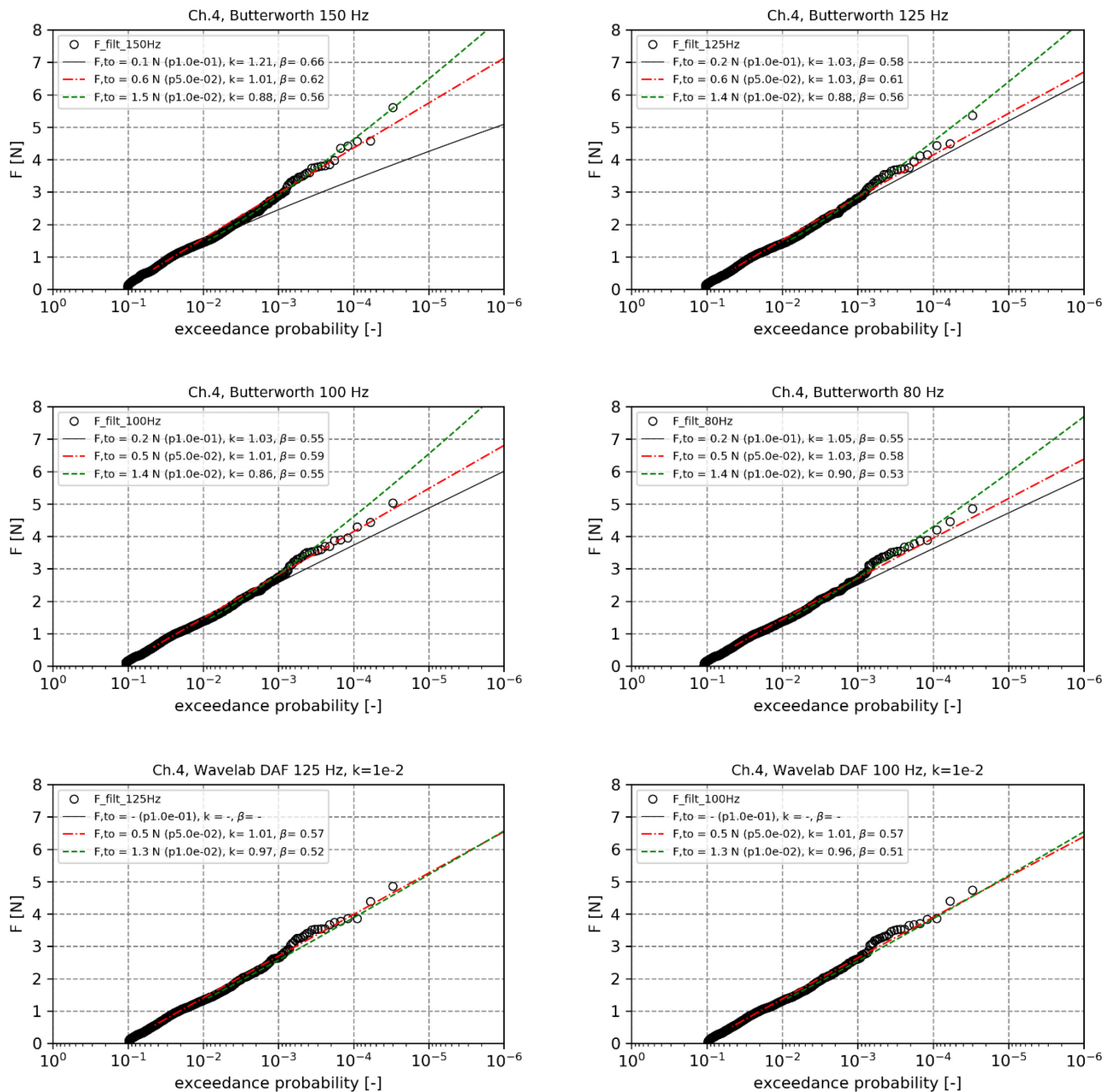
Figuur 52 – Toepassing Wavelab DAF en Butterworth filter op impact, zitbank Rauschenbergplein (Ch.4)



6.3.2 Verdeling van de krachten

Figuur 53 toont de resultaten van de toepassing van Weibull-fitting op de gefilterde krachtpieken, voor verschillende drempelwaarden $F_{t,o}$ (overeenstemmend met 10, 5 en 1 % overschrijdingskans). Uit voorgaande analyse werd de frequentie 80 Hz weerhouden als meest optimale keuze voor het Butterworth filter. De kromme bij een drempel bij 1% overschrijdingskans ligt iets hoger dan deze bij de 5% drempelwaarde, hetgeen zal leiden tot een iets conservatievere inschatting van de ontwerpwaarde van de golfkracht.

Figuur 53 – Weibull fit op gefilterde krachtpiekwaarden, zitbank Rauschenbergplein (Ch.4)



6.3.3 Ontwerpwaarde voor golfkracht op de zitbank

Tabel 27 geeft de ontwerpwaarden van horizontale golfkracht op de zitbank in modelsectie MK04 (op prototype schaal) voor verschillende waarden van stormduur (1000, 2000 of 3000 golven). Hierbij werden de Weibull fitting parameters voor Butterworth 80 Hz gefilterde krachtpieken toegepast.

Tabel 27 – prototype ontwerpwaarde horizontale golfkracht [kN/m]

	$\mu = 1.71E-04$	
F_{to} [N]	0.53 (p0.05)	1.38 (p0.01)
k [-]	1.028	0.899
beta [N]	0.577	0.534
N=1000 (ca 2.7 u stormduur)	15.23	18.87
N=2000 (ca 5.4 u stormduur)	15.99	19.99
N=3000 (ca 8.3 u stormduur)	16.43	20.66

7 Modelsectie MK05 “Rauschenbergplein AA’ ” (sectie 77, y=850 m)

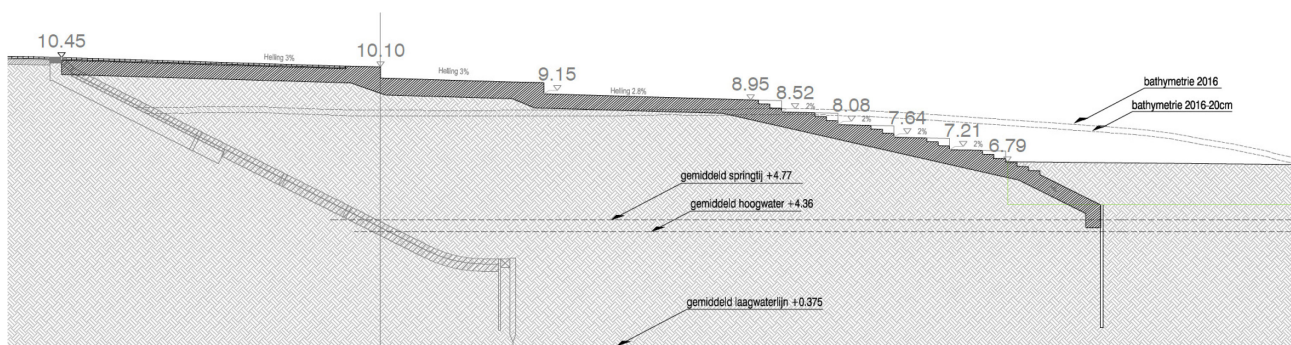
7.1 Dataset gekalibreerde proeven

Er zijn 21 gekalibreerde proeven op golfhoogte en waterdiepte (Tabel 28). De spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ aan de dijkteen wordt systematisch overschat tot ca. 30- 40 %.

7.2 Golfoverslag

In deze modelsectie wordt enkel de golfoverslag gemeten over het punt van de zeedijk promenade dat zich in natuur op een peil van +10.45 m TAW bevindt (Figuur 54).

Figuur 54 – modelsectie MK05 (peilen in m TAW)



Het gemiddeld overslagdebiet¹⁶ op basis van de proevenreeksen bedraagt 0.167 l/m/s (natuurwaarde, zie Tabel 29). Hierbij wordt opgemerkt dat dit een overschatting is van het reële overslagdebiet wegens de foutieve kalibratie van de spectrale golfperiode aan de dijkteen.

Uit de analyse op basis van een t-distributie (Tabel 30) volgt dat een debiet van 1 l/m/s een overschrijdingskans van slechts 6.6E-18 heeft, wat praktisch gelijk kan gesteld worden aan nul. In dit geval is het niet relevant nog een correctie voor de golfperiode toe te passen op basis van de overslagformule voor dijken met een ondiep voorland (zie sectie 4.2).

¹⁶ Vermits alle proeven quasi dezelfde duur hebben wordt het gemiddeld overslagdebiet berekend als het rekenkundig gemiddelde van de proevenreeksen.

Tabel 28 – Proevenreeks met kalibratieresultaten, modelsectie 5 Rauschenbergplein sectie AA'

RUN_ID	Seed [-]	Waterpeil [m]	Invoer golfschot			Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ
			Hm0 [m]	Tp [s]	Aantal golven [-]	Target: 0.044	Target: 5.85	Target: 0.906	+ 3%	+5%	+ 0.002 m
MK05_003	1343455737	0.903	0.13	2.00	1339	0.0444	8.05	0.9068	0.80%	37.62%	0.0008
MK05_005	1384645384	0.903	0.13	2.00	1354	0.0438	7.98	0.9066	-0.36%	36.36%	0.0006
MK05_007	113445332	0.903	0.13	2.00	1334	0.0433	7.82	0.9071	-1.55%	33.54%	0.0011
MK05_009	1019647399	0.903	0.13	2.00	1339	0.0445	8.01	0.9068	1.08%	36.90%	0.0008
MK05_010	1154988288	0.903	0.135	2.00	1373	0.0430	7.96	0.9066	-2.39%	36.00%	0.0006
MK05_011	962182491	0.903	0.130	2.15	1378	0.0436	8.13	0.9067	-0.86%	38.85%	0.0007
MK05_013	-1041357480	0.903	0.13	2.00	1374	0.0433	7.31	0.9071	-1.60%	24.88%	0.0011
MK05_014	-1496045881	0.903	0.135	2.15	1372	0.0443	7.99	0.9072	0.77%	36.46%	0.0012
MK05_015	-1832930490	0.903	0.135	2.15	1379	0.0447	8.53	0.9072	1.55%	45.69%	0.0012
MK05_016	-1691786776	0.903	0.135	2.15	1390	0.0452	8.66	0.9080	2.74%	47.91%	0.0020
MK05_018	-1008693838	0.903	0.140	2.00	1380	0.0442	8.34	0.9072	0.56%	42.56%	0.0012
MK05_020	1390045384	0.903	0.140	2.00	1370	0.0451	8.44	0.9075	2.51%	44.30%	0.0015
MK05_022	1613066018	0.903	0.138	2.00	1404	0.0453	8.30	0.9072	2.99%	41.88%	0.0012
MK05_023	1213352906	0.903	0.145	2.00	1363	0.0452	8.18	0.9078	2.69%	39.71%	0.0018
MK05_024	-987952017	0.903	0.135	2.00	1372	0.0447	8.02	0.9071	1.57%	37.11%	0.0011
MK05_025	1762702917	0.903	0.135	2.00	1406	0.0436	8.20	0.9079	-0.85%	40.17%	0.0019
MK05_027	737145576	0.903	0.135	2.00	1413	0.0447	7.55	0.9071	1.64%	29.09%	0.0011
MK05_028	-176547126	0.903	0.138	1.95	1370	0.0453	8.04	0.9073	2.85%	37.45%	0.0013
MK05_029	-1387719321	0.903	0.141	1.95	1373	0.0445	8.09	0.9076	1.19%	38.16%	0.0016
MK05_031	1776294857	0.903	0.130	1.95	1402	0.0448	8.03	0.9070	1.80%	37.24%	0.0010
MK05_033	-1363079300	0.903	0.140	1.95	1382	0.0452	8.28	0.9076	2.69%	41.56%	0.0016
				totaal	28861						

Tabel 29 – Golfcondities aan de dijkteen en gemeten golfoverslag, modelsectie MK05 Rauschenbergplein sectie AA'

	Hm0 [m]	Tm-1,0 [s]	h teen [m]	Δ	Δ	Δ	
RUN_ID	Target: 0.044	Target: 5.85	Target: 0.906	+/- 3%	+/-5%	+/- 0.002 m	q_avg natuur [l/m/s]
MK05_003	0.0444	8.05	0.9068	0.80%	37.62%	0.0008	0.17
MK05_005	0.0438	7.98	0.9066	-0.36%	36.36%	0.0006	0.31
MK05_007	0.0433	7.82	0.9071	-1.55%	33.54%	0.0011	0.07
MK05_009	0.0445	8.01	0.9068	1.08%	36.90%	0.0008	0.12
MK05_010	0.0430	7.96	0.9066	-2.39%	36.00%	0.0006	0.26
MK05_011	0.0436	8.13	0.9067	-0.86%	38.85%	0.0007	0.17
MK05_013	0.0433	7.31	0.9071	-1.60%	24.88%	0.0011	0.00
MK05_014	0.0443	7.99	0.9072	0.77%	36.46%	0.0012	0.11
MK05_015	0.0447	8.53	0.9072	1.55%	45.69%	0.0012	0.31
MK05_016	0.0452	8.66	0.9080	2.74%	47.91%	0.0020	0.03
MK05_018	0.0442	8.34	0.9072	0.56%	42.56%	0.0012	0.31
MK05_020	0.0451	8.44	0.9075	2.51%	44.30%	0.0015	0.33
MK05_022	0.0453	8.30	0.9072	2.99%	41.88%	0.0012	0.07
MK05_023	0.0452	8.18	0.9078	2.69%	39.71%	0.0018	0.08
MK05_024	0.0447	8.02	0.9071	1.57%	37.11%	0.0011	0.03
MK05_025	0.0436	8.20	0.9079	-0.85%	40.17%	0.0019	0.08
MK05_027	0.0447	7.55	0.9071	1.64%	29.09%	0.0011	0.56
MK05_028	0.0453	8.04	0.9073	2.85%	37.45%	0.0013	0.09
MK05_029	0.0445	8.09	0.9076	1.19%	38.16%	0.0016	0.06
MK05_031	0.0448	8.03	0.9070	1.80%	37.24%	0.0010	0.15
MK05_033	0.0452	8.28	0.9076	2.69%	41.56%	0.0016	0.21
	gemiddelde						0.167

Tabel 30 – Resultaten toepassing t-verdeling op gemiddeld overslagdebiet (natuurwaarden), modelsectie MK05

Aantal proeven	21	
S _n (steekproefvariantie)	0.138	
q_avg	0.167	l/m/s
T0.95	1.725	
q_0.95	0.22	l/m/s
T0.99	2.528	
q 0.99	0.24	l/m/s

8 Samenvatting resultaten

8.1 Golfoverslag

Tabel 31 – Samenvatting resultaten golfoverslag (prototype schaal)

Modelsectie	Omschrijving	Golfoverslag [l/m/s]	Overschrijding normdebiet 1l /m/s
MK01	Parking Logierlaan OG1	0.00	Nee
MK02	GDU Middelkerke	0.88	Nee
MK03	GDU Westende	0.13	Nee
MK04	Rauschenbergplein CC'	nvt	nvt
MK05	Rauschenbergplein AA'	0.17	Nee

8.2 Golfimpact op constructieve onderdelen

Ontwerpwaarden golfkracht geselecteerd voor een stormduur van 1000 golven (ca 2u 45 min).

Tabel 32 – Samenvatting resultaten golfimpact op constructieve onderdelen (prototype schaal)

Modelsectie	Omschrijving	Hor. kracht [kN/m]	Vert. kracht ¹⁷ [kN/m]
MK01	Parking Logierlaan OG1 frontmuur	207	-
	Parking Logierlaan OG1 muur dakplaat	27	-
MK02	Muur GDU Middelkerke zeewaarts	150	59
	Muur GDU Middelkerke landwaarts	17	-
MK03	Muur GDU Westende zeewaarts	127	40
	Muur GDU Westende landwaarts	18	-
MK04	Zitbank Rauschenbergplein snede CC'	19	-

¹⁷ De verhouding $F_{\text{ver}}/F_{\text{hor}} = 0.39$ zoals bepaald in sectie 4.3.4 werd toegepast.

Referenties

Altomare, C.; Suzuki, T.; Chen, X.; Verwaest, T.; Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coast. Eng.* 116: 236–257. doi:10.1016/j.coastaleng.2016.07.002

Goda, Y. (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures. 3rd ed.. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 33 (P. L.-F. Liu, Ed.). World Scientific. ISBN 978-981-4282-39-0. doi:10.1142/7425

Hermans, I. (2019a). Ontwerpwaarde op basis van kansverdeling met gegeven terugkeerperiode. *persoonlijke communicatie*. Expertise Beton en Staal, DMOW

Hermans, I. (2019b). Ontwerpwaarde op basis van kansverdeling met gegeven terugkeerperiode - aanvulling. *persoonlijke communicatie*. Expertise Beton en Staal, DMOW

SBE. (2018). Zeedijk Middelkerke - Inschattingsberekeningen zeewering. 11486-REK-G-V-002-B

Suzuki, T.; De Roo, S.; Altomare, C.; Zhao, G.; Kolokythas, G.K.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Toetsing kustveiligheid-2015 - Methodologie: toetsingsmethodologie voor dijken en duinen. versie 10. *WL Rapporten*, 14_014. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Van Doorslaer, K. (2018). Reduction of Wave Overtopping by and Wave-Induced Forces on Storm Walls and Promenades at Crest Level of Smooth Dikes. An Experimental Study. Ghent University

Bijlage A Afleiding ontwerpwaarde golfkracht in overeenstemming met Eurocode 0 (NBN EN 1990)

Voor de toepassing in het constructief ontwerp stelt zich de vraag hoe een ontwerpwaarde van de golfkracht vastgelegd kan worden op basis van een toegelaten faalkans binnen het kader van de Eurocode 0 (NBN EN 1990) ontwerpmethodiek, vast te leggen voor een gekozen betrouwbaarheidsklasse. Verder dient ook rekening gehouden te worden met de stormduur, d.w.z. dat de beschouwde ontwerp situatie met gegeven terugkeerperiode T (hier: 1000 jaar) op zich bestaat uit het maximum van een reeks krachtpieken tijdens de ontwerpstorm met een duur van N_0 golven op diep water¹⁸.

Indien verondersteld wordt dat binnen de ontwerpstorm met retourperiode T bestaande uit N_0 golven de kans op voorkomen van de extreme krachtpieken F_{mi} onafhankelijk van elkaar zijn, kan de (marginale) kansverdelingsfunctie $F_T(x)$ van de individuele golfkrachten (X_T) uitgedrukt worden als:

$$F_T(x) = P[X_T \leq x] = \prod_{i=1}^{N_0} P[F_{mi} \leq x] \quad (\text{A-1})$$

Gebruik makend van de notatie $P^*(x) = P[F_{mi} > x]$ voor de kansverdelingsfunctie van de extreme krachtpieken kan (A-1) geschreven worden als:

$$F_T(x) = [1 - P^*(x)]^{N_0} \quad (\text{A-2})$$

Op basis van (A-2) kan een ontwerpwaarde F_{max} bepaald worden. Indien deze ontwerpwaarde in overeenstemming is met de voorgeschreven toelaatbare faalkans, dient geen partiële belastingfactor meer toegepast te worden op deze waarde.

In wat volgt wordt de gezochte ontwerpwaarde F_{max} afgeleid voor 2 gevallen: (i) op basis van een gefitte extreme waardeverdeling van de krachtpieken en (ii) op basis van empirisch vastgestelde overschrijdingskansen van de krachtpieken. Tenslotte wordt ook nog een alternatieve methode gegeven op basis van Gumbel fitting op de maximale gemeten golfkracht van een afzonderlijke proef.

A.1 Ontwerpwaarde uit extreme waardeverdeling van krachtpieken

Als uitgangspunt wordt verondersteld dat een (marginale) kansverdeling met voldoende betrouwbaarheid gefit kan worden op de experimenteel waargenomen piekwaarden van golfkracht op de structuur, die optreden tijdens een storm met terugkeerperiode T . Er wordt verder abstractie gemaakt van eventuele modelfouten (lack of fit) en statistische onzekerheid (eindig aantal metingen) die gepaard gaan met het toepassen van deze kansverdeling.

A priori is niet gekend welk type kansverdeling het meest geschikt is om het staartgedrag van de experimenteel waargenomen kansverdeling van golfkrachten te beschrijven. Verschillende types extreme

¹⁸ Bemerk dat de beschouwde stormduur hier vertaald wordt naar een aantal golven N_0 op diep water, vermits de overschrijdingskansen van de experimenteel gemeten golfkrachten ook berekend werden op basis van het aantal golven op diep water. Als alternatief kunnen de experimenteel bepaalde overschrijdingskansen berekend worden op basis van het aantal golven aan de teen van de structuur, maar dan dient de beschouwde stormduur in (A-4) eveneens gelinkt te worden aan het aantal golven aan de teen. Dit is enkel relevant indien de golven een significante transformatie (golfbreking) ondergaan tussen diep water en de locatie van de beschouwde structuur.

waardeverdelingen kunnen onderzocht worden (bv. Gumbel, Weibull of Generalized Pareto), maar hier wordt enkel de Weibull distributie toegepast, met gebruik van een drempelwaarde F_{to} .

De verdeling van de overschrijdingskansen voor golfkrachten groter dan een drempelwaarde F_{to} volgens de Weibull distributie luidt:

$$W(F) = P[F > f | F > F_{to}] = P_{m,to}^* \cdot \exp \left[- \left(\frac{F - F_{to}}{\beta} \right)^k \right] \quad (A-3)$$

waarbij $P_{m,to}^* = \frac{N_{\# > F_{to}}}{N_{tot} + 1}$ de overschrijdingskans van de drempelwaarde F_{to} voorstelt. De vormparameter k en de schaalparameter β in deze theoretische kansverdeling worden bepaald via fitting op de experimentele gegevens waarbij de overschrijdingsfrequenties van de gemeten waarden berekend worden op basis van het totaal aantal golven (op diep water) in alle tijdreeksen.

Merk op dat de redenering die in bovenstaande tot de uitdrukking (A-2) leidt voor de faalkans van de extreme krachtpieken in een ontwerpstorm met N_0 golven, equivalent is aan de afleiding van de maximale golfhoogte H_{max} uit een Rayleigh verdeling in §10.1.3 Goda (2010). Met invoering van de notatie μ voor de (vast te leggen) overschrijdingskans van de ontwerpwaarde F_{max} kan (A-2) voor voldoende extreme waarden van krachtpieken ($P(F_{max}) \approx 0$) benaderd worden als:

$$\mu = 1 - [1 - P^*(F_{max})]^{N_0} \approx 1 - \exp[-N_0 P^*(F_{max})] \quad (A-4)$$

Introductie van de Weibull kansverdeling (A-3) in (A-4) leidt tot de gezochte F_{max} :

$$F_{max} = F_{to} + \beta \cdot \left(\ln \left[\frac{N_0 \cdot P_{m,to}^*}{\ln \left(\frac{1}{1 - \mu} \right)} \right] \right)^{1/k} \quad (A-5)$$

Om de ontwerpwaarde van de kracht te bepalen dient in (A-5) nog de maximaal toelaatbare faalkans (μ) vastgelegd te worden in overeenstemming met de ontwerplevensduur (t) en de faalkans tijdens de beschouwde referentieperiode (=levensduur) van de constructie, voorgeschreven door de Eurocode. De hierna gevolgde redenering werd uitgewerkt door dr ir. I. Hermans (Expertise Beton en Staal, DMOW) en is gedocumenteerd in enkele nota's (Hermans, 2019a; b).

Gegeven is de kansverdelingsfunctie $F_T(x)$ van de golfkrachten (x) tijdens een storm met terugkeerperiode T :

$$F_T(x) = P[X_T \leq x] \quad (A-6)$$

De betrouwbaarheidseis volgens Eurocode, voor een constructie met levensduur t en betrouwbaarheidsindex β_t (volgens een te kiezen RC klasse) kan vertaald worden als:

$$F_t(x_{qt}) = P[x_{qt} \leq x] = 1 - p_{f,t} \quad (A-7)$$

x_{qt} is de kracht die een kans van overschrijden q heeft tijdens een storm met terugkeerperiode T , gedurende de levensduur van de constructie. Volgens Eurocode luidt de faalkans $p_{f,t}$ tijdens een gekozen referentieperiode (= levensduur van de constructie):

$$p_{f,t} = \Phi[-\beta_t] \quad (A-8)$$

met Φ de standaard normale verdeling en β_t de betrouwbaarheidsindex voor een referentieperiode t , vastgelegd in Eurocode voor een gekozen betrouwbaarheidsklasse. Om de link te leggen tussen de betrouwbaarheidseis volgens Eurocode en de gekende kansverdeling van golfkrachten tijdens een storm met terugkeerperiode T wordt gebruik gemaakt van volgende verbanden:

$$F_t(x_{qt}) = F_1(x_{qt})^t \quad (\text{A-9a})$$

$$F_T(x_{qt}) = F_1(x_{qt})^T \quad (\text{A-9b})$$

waarbij het subscript i in de notatie van de kansverdeling F_i betrekking heeft op de referentieperiode (1, t of T jaar).

Door combinatie van (A-9) en (A-7) volgt (bij benadering, voor een voldoende kleine faalkans p_f) :

$$F_T(x_{qt}) = (1 - p_{f,t})^{\frac{T}{t}} \cong 1 - \frac{T}{t} p_{f,t} \quad (\text{A-10})$$

Uit (A-10) en de definitie van μ in (A-4) volgt de gezochte faalkans in (A-5):

$$\mu = \frac{T}{t} p_{f,t} \quad (\text{A-11})$$

A.2 Ontwerpwaarde uit empirisch bepaalde overschrijdingsfrequenties van krachtpieken

Indien het niet mogelijk is om met voldoende betrouwbaarheid een extreme waardeverdeling te fitten op de overschrijdingsfrequenties van de gemeten krachtpieken, kan men rechtstreeks gebruik maken van de empirische¹⁹ overschrijdingsfrequenties (op voorwaarde dat deze voldoende klein zijn, wat dus betekent dat de experimenten een voldoende aantal golven bevatten).

Voor zeer kleine overschrijdingskansen $P^*(x)$ kan (A-2) met voldoende nauwkeurigheid benaderd worden als :

$$F_T(x) \cong 1 - N_0 P^*(x) \quad (\text{A-12})$$

Uit de combinatie van (A-12) en (A-10) volgt dan de gezochte waarde F_{max} die rechtstreeks bepaald kan worden voor een vastgelegde overschrijdingskans in overeenstemming met de betrouwbaarheidseis volgens Eurocode (deze legt de faalkans $p_{f,t}$ vast) , de retourperiode van de ontwerpstorm (T) en de levensduur van de constructie (t):

$$P[F_{max} > x_{qt}] \cong \frac{1}{N_0} \frac{T}{t} p_{f,t} \quad (\text{A-13})$$

¹⁹ Bemerk dat hier een relatief grotere mate van onzekerheid mee gepaard gaat in vergelijking met de methode op basis van de gefitte extreme waardeverdeling van de golfkrachten, vermits de golfkrachten bij de extreme individuele overschrijdingsfrequenties doorgaans een grote spreiding vertonen.

A.3 Ontwerpwaarde uit Gumbel fitting op individuele maxima

Van elke proef afzonderlijk wordt de maximale krachtpiek $F_{max,i}$ bepaald. Deze waarden hebben een overschrijdingskans van $1/N_{waves,i}$, met $N_{waves,i}$ het aantal golven in de proef, en kunnen met grote waarschijnlijkheid als onafhankelijk beschouwd worden.

Volgens het extremewaarden theorema²⁰ kan de verdeling van $F_{max,i}$ beschreven worden door een Generalized Extreme Value (GEV) verdeling van het type I (Gumbel), II (Fréchet) of III (Weibull). Hier wordt enkel de Gumbelverdeling beschouwd (die geen boven- of ondergrens heeft voor de beschouwde kracht):

$$G(F_{max,i}) = P[F_{max,i} \leq f] = \exp[-e^{-a(f-u)}] \quad (A-14)$$

De verwachtingswaarde (μ) volgens de Gumbelverdeling met parameters a en u luidt:

$$E[F_{max,i}] = u + \frac{\gamma}{a} = u + 0.577/a \quad (A-15)$$

Met $\gamma = 0.577$ de constante van Euler.

De standaardafwijking (σ) volgens de Gumbelverdeling met parameters a en u luidt:

$$\sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6}a} \quad (A-16)$$

Analoog als in voorgaande methodes kan de gezochte ontwerpwaarde F_{max} bepaald kan worden voor een vastgelegde overschrijdingskans in overeenstemming met de betrouwbaarheidseis volgens Eurocode (deze legt de faalkans $p_{f,t}$ vast), de retourperiode van de ontwerpstorm (T) en de levensduur van de constructie (t):

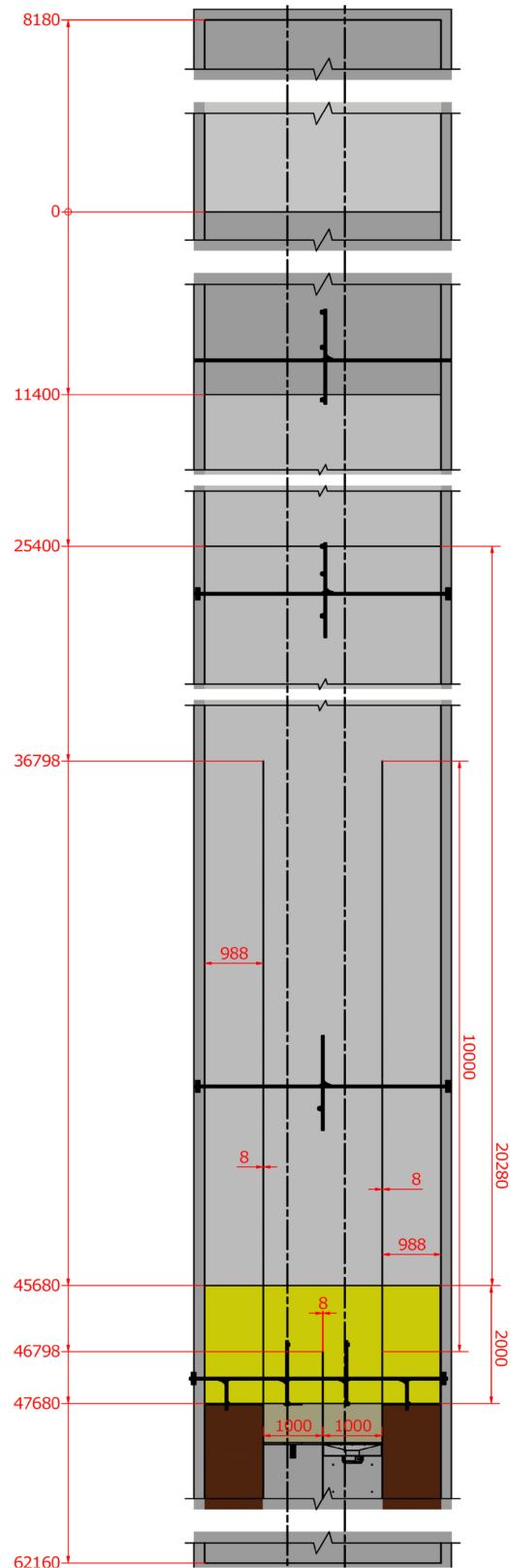
$$P[F_{max} > x_{qt}] \cong \frac{T}{t} p_{f,t} \quad (A-17)$$

Merk op dat in (A-17) -in tegenstelling tot de voorgaande methodes- de stormduur (het aantal golven) niet expliciet in rekening gebracht wordt. De stormduur is immers impliciet gekoppeld aan de overschrijdingskans van de individuele maxima $F_{max,i}$ waarop de Gumbel verdeling toegepast wordt. In dit geval is het van belang dat alle proeven (ongeveer) dezelfde duur hebben, zo niet verschilt de overschrijdingskans tussen de experimenteel bepaalde $F_{max,i}$ onderling en wordt het extremewaarden theorema toegepast op een intrinsiek verschillende golfkracht parameter.

²⁰Ook bekend als het Fisher–Tippett–Gnedenko theorema (zie https://en.wikipedia.org/wiki/Fisher-Tippett-Gnedenko_theorem)

Bijlage B Modelopstelling golfgoot

Figuur 55 – Planzicht golfgoot met opdeling modelsecties (bemating in mm, afstanden t.o.v. nulpunt golfschot)



Figuur 56 – voorland met wanden buitensecties (zicht richting golfschot)

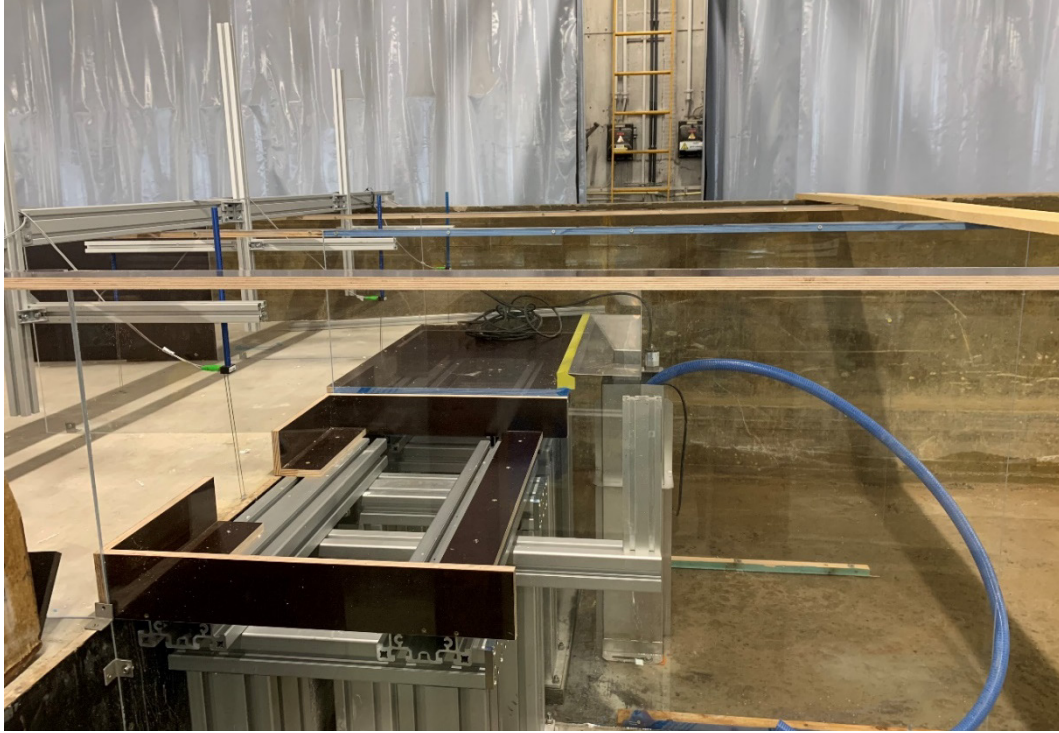


Figuur 57 – golfdempende matten tussen modelsectie en achterzijde golfgoot

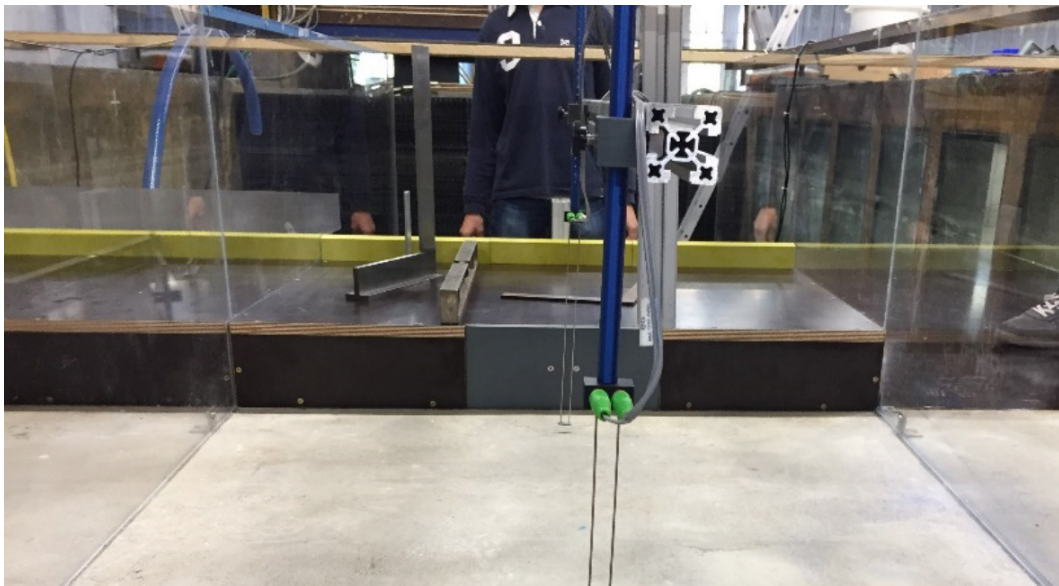


B.1 Modelopstelling MK01 “parking Logierlaan OG1”

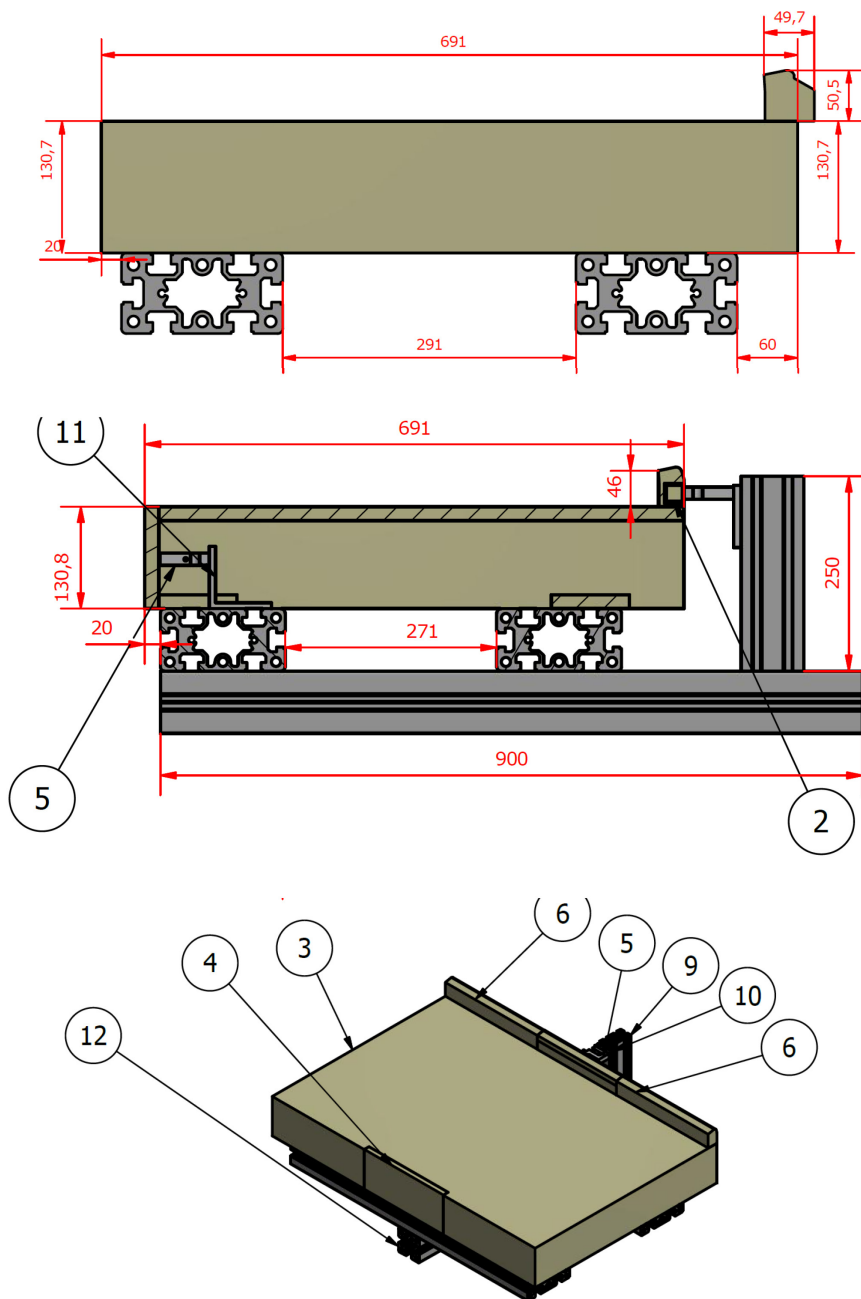
Figuur 58 – Modelsectie MK01 : meetopstelling krachten (voorgrond) en golfoverslag (achtergrond)



Figuur 59 – Modelsectie MK01 : frontaal zicht op meetopstelling krachten



Figuur 60 – Details meetopstelling overslag en krachten modelsectie MK01 (afmetingen in mm)

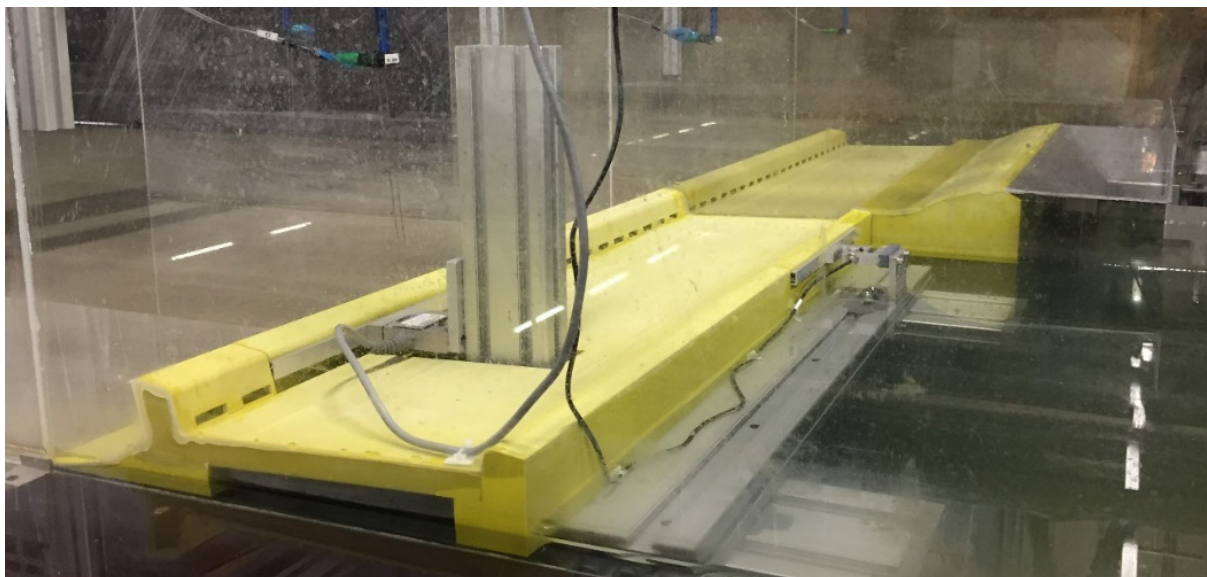


ITEM	PART NUMBER	TITLE
1	14-131 RKR 160x80-4C15000-3	D-80x160-heavy duty profiles x 900 mm
2	14-131 Profiel 25x25x2x 300 mm	14-131 Profiel 25 x 2 x 300mm
3	14-131 Snede_4_K_Part2	14-131-062
4	14-131 Snede_4_K_Part3	14-131-042
5	Celtron S-type loadcell	
6	14-131 Snede_4_K_Part4	14-131-063
7	14-131 Snede_4_K_Part5B	14-131-064
9	14-131 RKR 80x40-4395000-3	F-40x80-structural profiles x 250 mm
10	14_131 Houder sensor	14-131-053
11	14_131 Winkelhaak	13-022-001
12	14-131 RKR 80x80-4C45000-5	D-80x80-heavy duty profiles x 900 mm

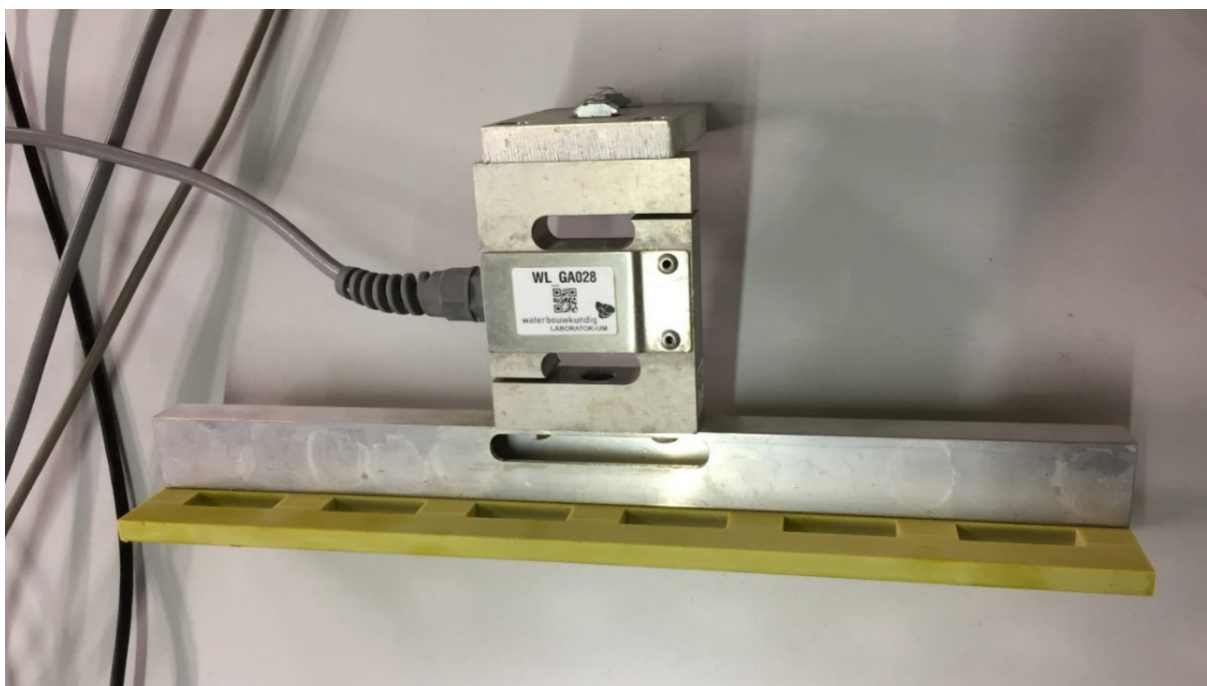
B.2 Modelopstelling MK02/MK03 “GDU Middelkerke/Westende”

Beide modelopstellingen MK02 en MK03 zijn identiek, op een verschil in kruinpeil na van 2 cm (0.5 m in natuurschaal).

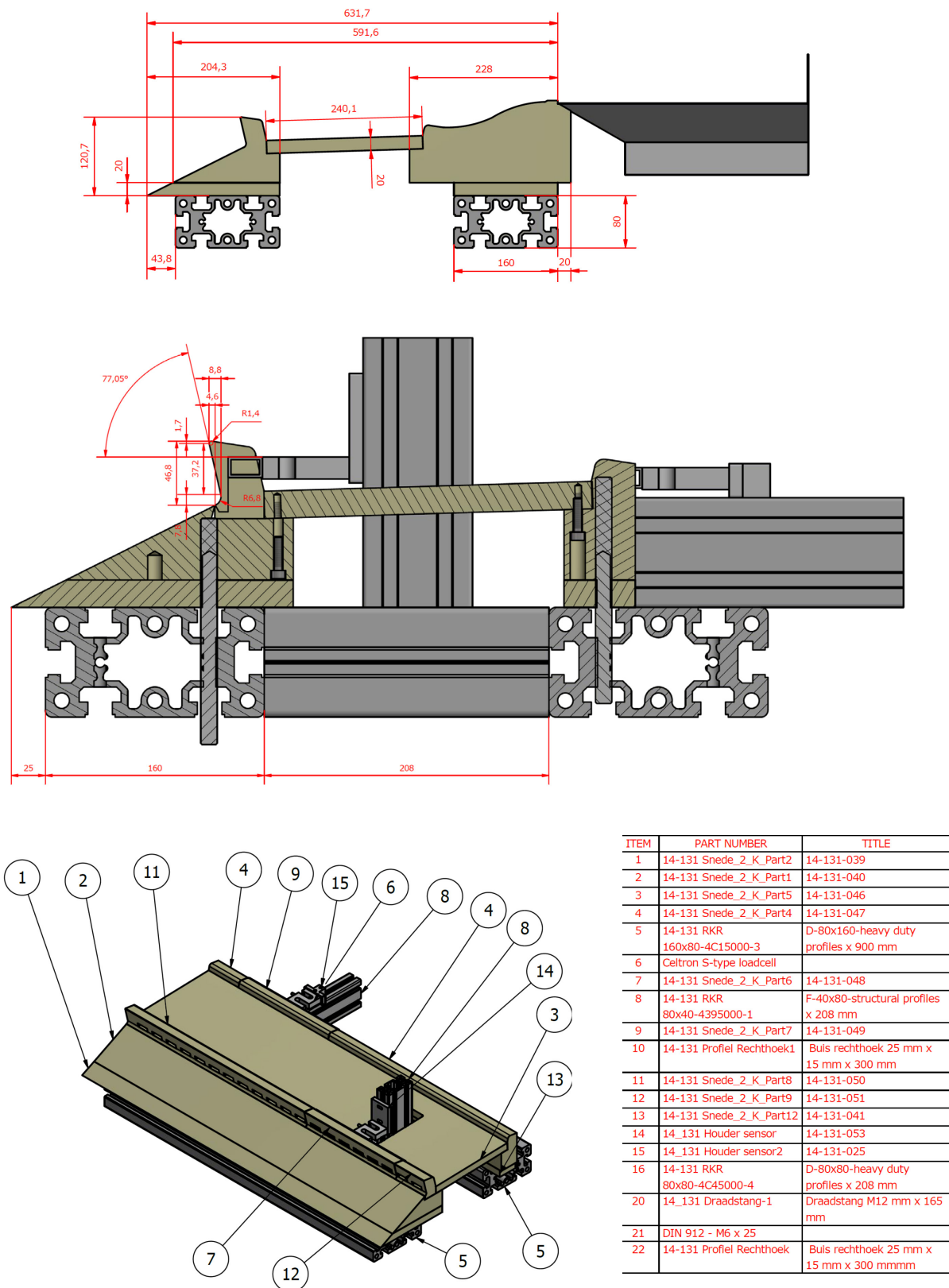
Figuur 61 – Modelsectie MK02 GDU Middelkerke : meetopstelling krachten (voorgond) en golfoverslag (achtergrond)



Figuur 62 – Detail load cell gemonteerd op meetsectie frontmuur GDU

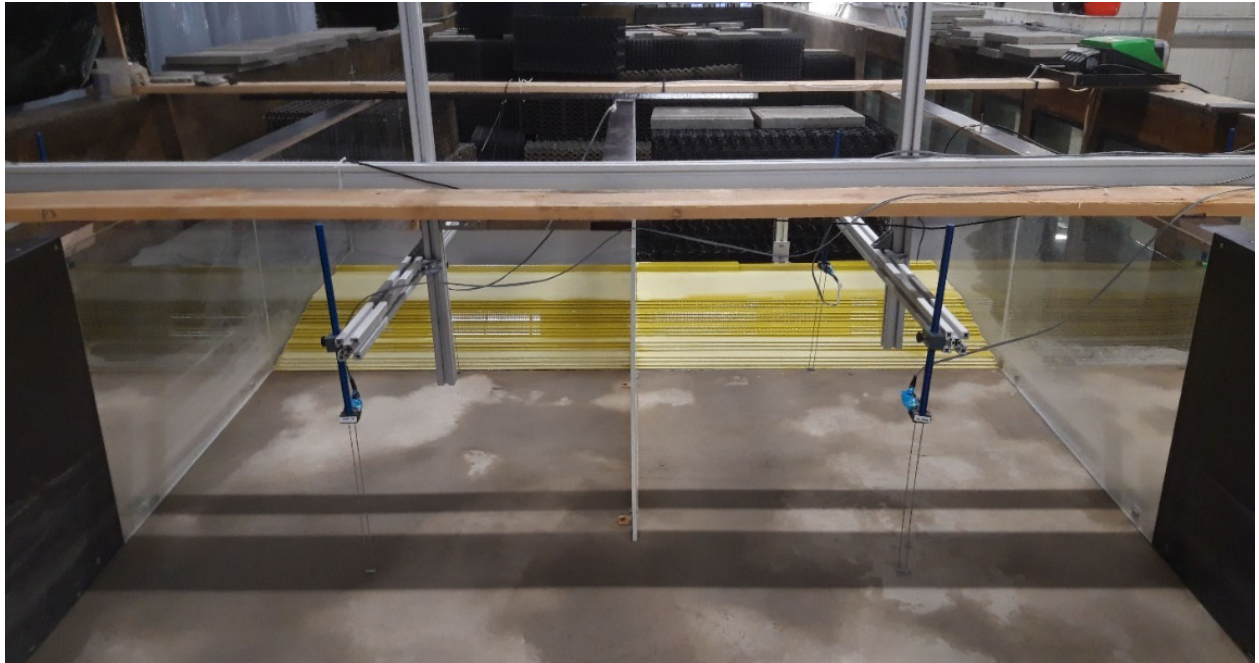


Figuur 63 – Details meetopstelling krachten en overslag modelsectie MK02 (afmetingen in mm)

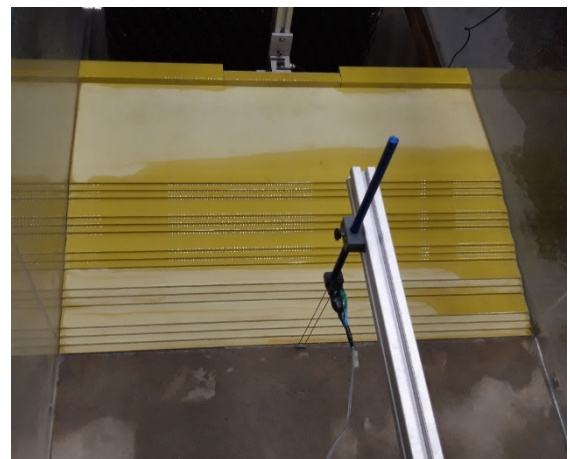
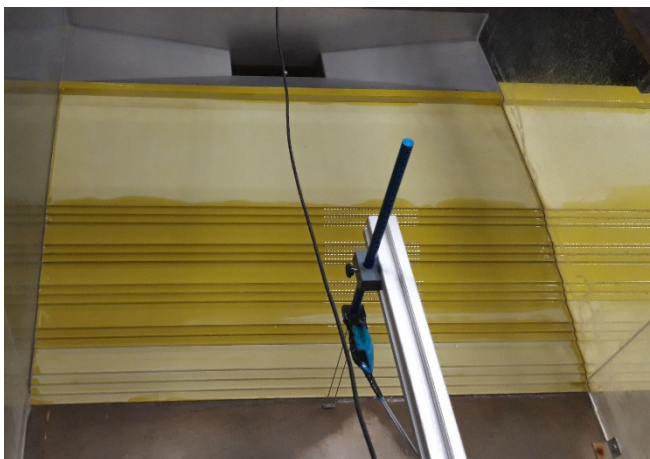


B.3 Modelopstelling MK04 “Rauschenbergplein sectie CC’ ”

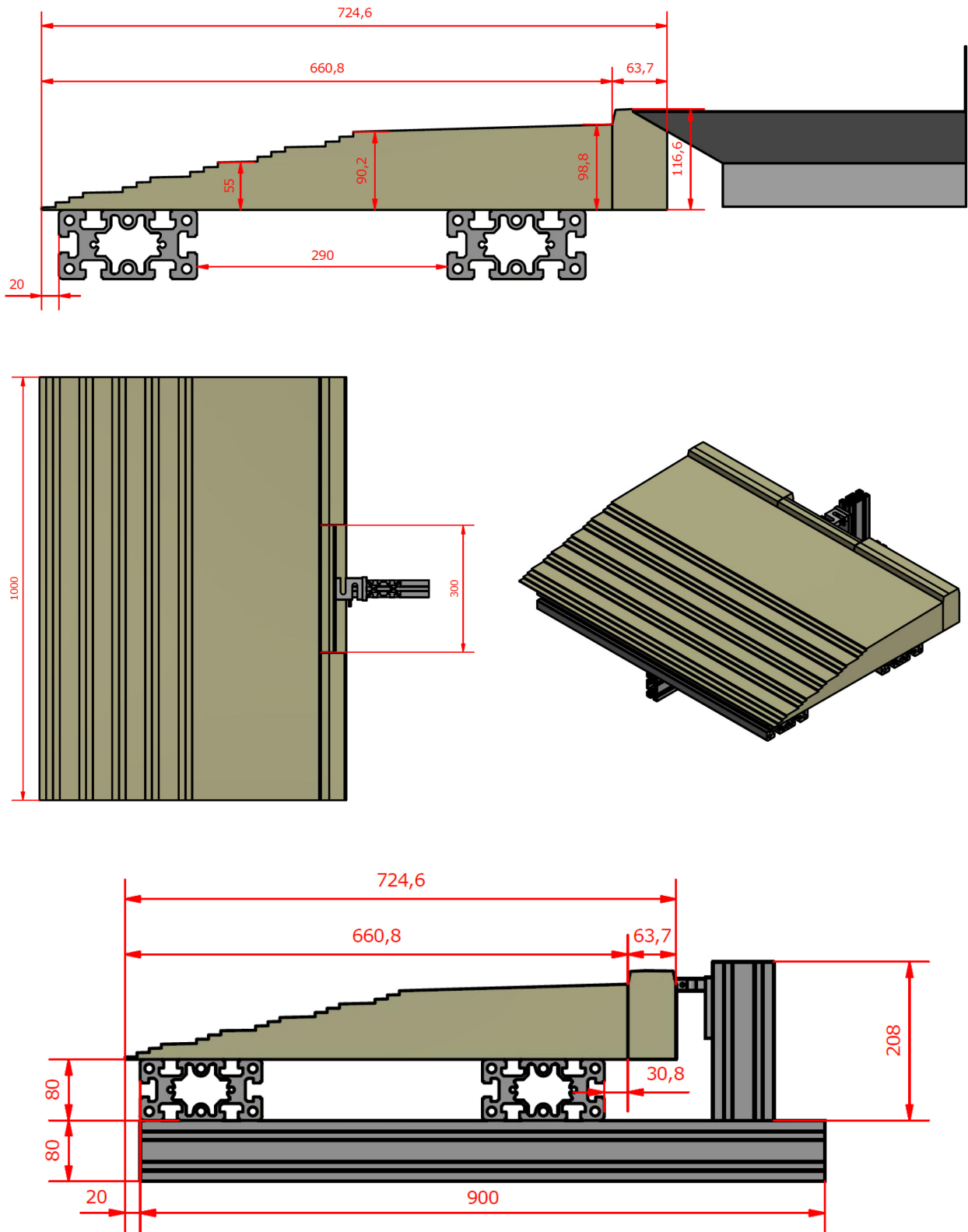
Figuur 64 – Modelsectie MK04 : meetopstelling krachten op zitbank (rechts) en golfoverslag (links)



Figuur 65 – Modelsectie MK04 : detail meetopstelling golfoverslag (links) en krachten op zitbank (rechts)



Figuur 66 – Details opstelling golfoverslag modelsectie MK04 (afmetingen in mm)

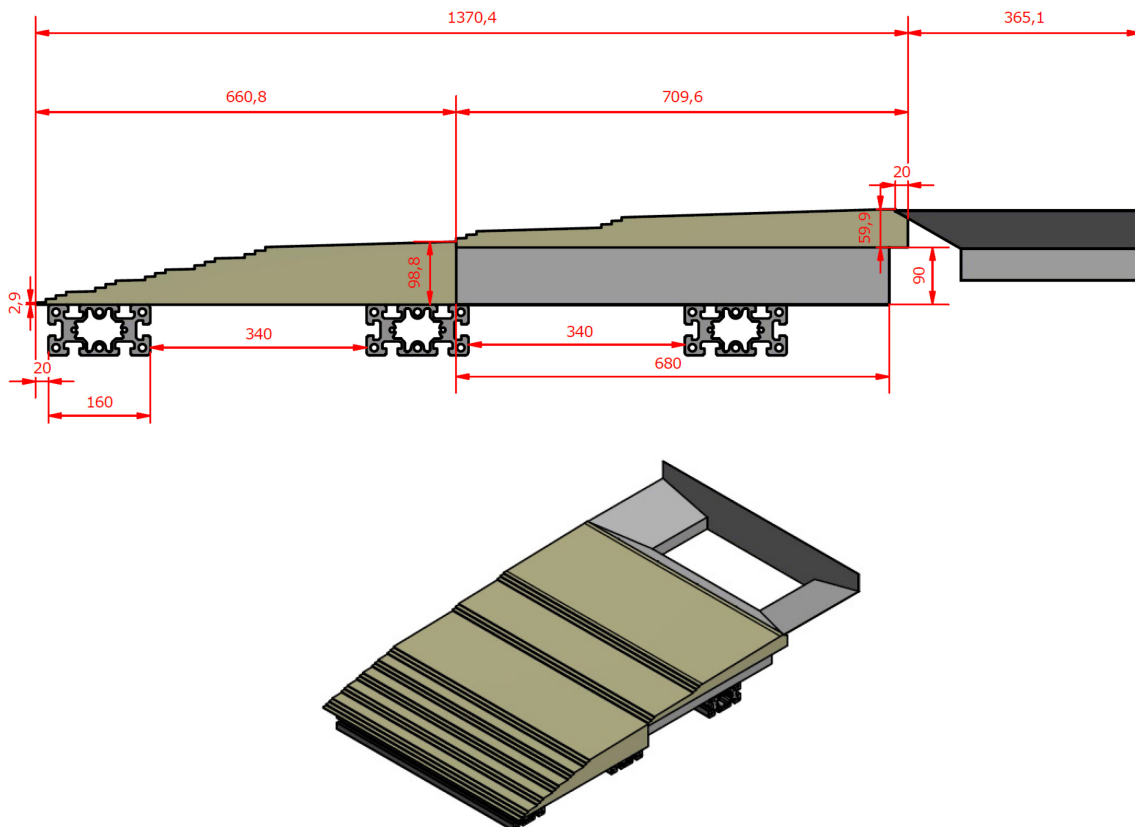


B.4 Modelopstelling MK05 “Rauschenbergplein sectie AA’ ”

Figuur 67 – Modelsectie MK05 : meetopstelling golfoverslag (sectie in de achtergrond)



Figuur 68 – Details opstelling golfoverslag modelsectie MK05 (afmetingen in mm)



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