

Memo

Aan
Kopie aan
Van



Datum 04-mei-2021
Documentnr. ASD-NOT-2527
Blad 1 van 46

Onderwerp Technische onderbouwing wijzigingsvoorstel golfbelasting noordschuif BSM Kornwerderzand

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	1
1 Inleiding	2
2 Hydraulisch randvoorwaarden	2
3 Golfbelasting Goda en belasting opgegeven in belastingnota	3
4 Schaalmodel onderzoek o.b.v. rapport.....	5
4.1 Beschrijving totstandkoming afgegeven kracht	5
4.2 Nareken modelonderzoek met golfklap model zoals afgeleid voor Afsluitdijk.....	6
4.3 Berekening golfklap met huidige geometrie (met bovenbalk)	8
5 Gedetaileerde analyse schaalmodel onderzoek.....	9
5.1 Analyse tijdsignaal schuif.....	9
5.2 Defensiebalk	13
5.3 Analyse videobeelden model proeven	14
6 CFD Analyse.....	17
6.1 Defensiebalk met brug	17
6.2 Nieuwe geometrie.....	20
6.2.1 Schuif	22
6.2.2 Fietsbrug	26
6.2.3 Bovenbalk	26
7 Conclusie	28
Bijlage 1. tijdsignaal uit modeltestrapport	29
Bijlage 2. Korte beschouwing belasting zuidschuif.....	36
Bijlage 3. Korte beschouwing midden waterstand.....	41

1 Inleiding

Op het moment van schrijven van deze notitie is het ontwerp van de schuif bij Kornwerderzand gebaseerd op de belasting zoals afgegeven in ASD-UNO-0028. In deze notitie willen we de golfbelasting, zoals gegeven in de belastingnota, opnieuw beschouwen vanwege voortschrijdend inzicht door veranderde geometrie. Immers, de gegeven belastingen zijn afgeleid van modelproeven waarin de defensiebalk nog aanwezig was. Dit levert hele grote verschillen in belasting tussen DOV en KWZ (factor 2) en ook een hele ander verdeling van druk over de hoogte.

Level is met de voorgeschreven belastingen aan de slag gegaan, maar loopt nu tegen de grenzen aan van de voorziene liftcapaciteit in heftorens. In deze notitie wil Level aantonen dat de gegeven belastingen voor de schuiven, in de belastingnota, niet representatief zijn voor de geometrie zoals deze buiten gerealiseerd gaat worden. Hetgeen wordt veroorzaakt door de vele wijzigingen in de geometrie (verwijderen defensiebalk, aanbrengen hoge bovenbalk, gewichtsconstructie en roostervloer fietsbrug).

De onderbouwing van de kracht op de noordschuif is steeds verder uitgediept in de opbouw van dit memo. Allereerst is op basis van het schaalmodel test rapport en het parametrisch golfklap model onderbouwd dat de gegeven kracht een gevolg van de defensiebalk moet zijn.

Vervolgens is op basis van de ruwe schaalmodel test data en aanvullende CFD berekeningen aangetoond wat de belasting voor de nieuwe geometrie zou moeten zijn.

2 Hydraulisch randvoorwaarden

Het verval over de schuiven in Kornwerderzand is slechts 4% groter dan in Den Oever dus de belasting uit verval is niet noemenswaardig hoger. Het verschil zit voornamelijk in de toename van golfbelasting (hoogte 30%, periode 33%), zie Tabel 1 en Tabel 2.

Tabel 1: maatgevend verval

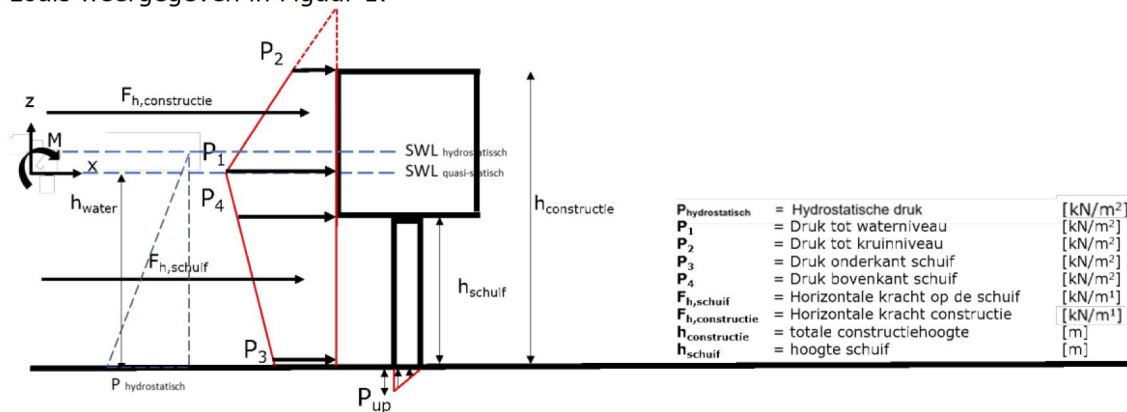
1/10.000 jaar	DOV	KWZ
Waddenzee [m t.o.v. NAP]	5,28	5,45
IJsselmeer [m t.o.v. NAP]	-1,21	-1,29
verval [m]	6,49	6,74
F _{totaal} [kN/m]	380	395

Tabel 2: maatgevend golven

1/10.000 jaar zichtjaar 2050	DOV	KWZ
H _{mo} [m]	2,77	3,61
T _p [s]	5,51	7,33
WL [m t.o.v. NAP]	5,2	5,4

3 Golfbelasting Goda en belasting opgegeven in belastingnota

De theoretische manier van bepalen van belastingen voor de schuiven zou gedaan moeten worden met Goda, omdat de defensiebalk verwijderd is uit het ontwerp. Dit levert een typisch drukfiguur zoals weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Definitie drukfiguur Goda

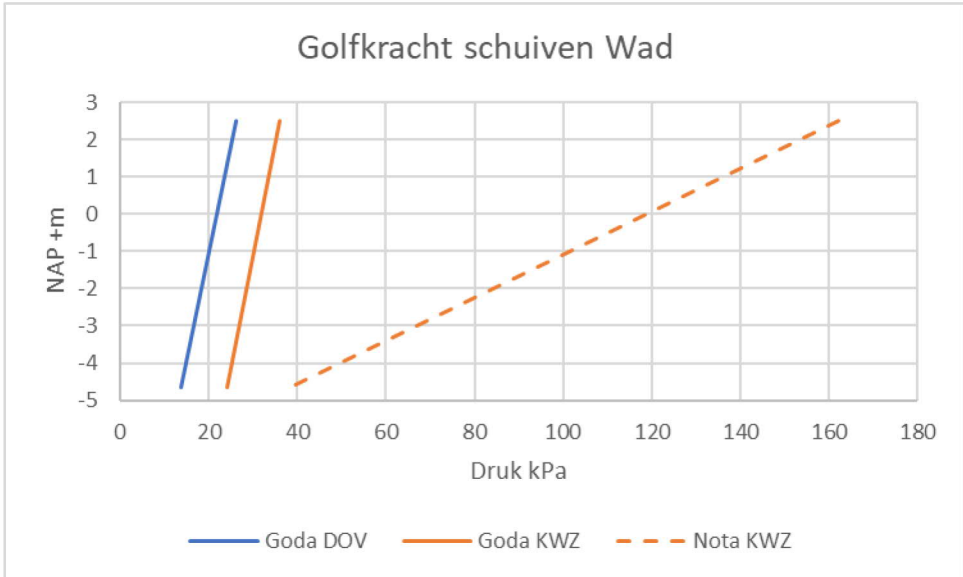
Op basis van de voorgeschreven hydraulische randvoorwaarden zijn de Goda belastingen voor de schuif in DOV en KWZ bepaald. Hierbij is de druk op de SWL het hoogst (P_1) en neemt af naar de bodem (P_3). Omdat de schuiven in een superstorm verzonken zijn is op NAP +2,5m P_4 afgeleid. De drukken onder en boven aan de schuif en de totaal kracht per meter schuifbreedte volgens Goda zijn in kolom 2 en 3 van Tabel 3 weergegeven (belasting in KWZ is 50% hoger dan in DOV).

In de Belastingnota (*RWS_DR_AFSLUITDIJK-12107-v1-Belastingnota_onderdelen_infrastructuur_RWS_Afsluitdijk*) zijn alleen krachten per meter schuifbreedte en arm van aangrijpen gegeven.

Wat opvalt is dat de voorgeschreven kracht voor KWZ meer dan 3x zo hoog is dan wat je op basis van de HR en Goda zou verwachten. Levvel vermoedt dat dit een golfklap is ten gevolge van de defensiebalk in de modelproeven, die in werkelijkheid niet meer aanwezig is, zie volgende hoofdstuk.

Tabel 3: Belastingen Schuiven BSM

1/10.000 jaar	DOV Goda	KWZ Goda	DOV Belastingnota	KWZ Belastingnota
P_4 [kPa]	26,2	35,9		
P_3 [kPa]	13,7	24,1		
F_{totaal} [kN/m]	142,8	214,5	352	702



Figuur 2: druk verloop golfbelasting

4 Schaalmodel onderzoek o.b.v. rapport

4.1 Beschrijving totstandkoming afgegeven kracht

De gegeven golfbelastingen in de belastingnota zijn gebaseerd op modeltesten, welke zijn uitgevoerd in opdracht van RWS voordat het project op de markt kwam. Deze modeltesten zijn beschreven in het informatieve document (*Modeltesten golfkrachten spuisluizen Afsluitdijk Meetrapport 1220263-000-HYE-0006*). In deze studie is speciaal aandacht besteed aan het effect van de defensiebalk op de golfbelasting. Hierbij is gekeken naar het effect op de balk en op de schuiven.

Ten gevolge van golfklappen op de defensiebalk zijn hele hoge (kort durende) belastingen gevonden. De maximale belastingen zijn gevonden bij een waterstand gelijk of iets onder de defensiebalk.

Nadat besloten is de defensiebalk bij BSM te verwijderen zijn de belastingen voor de 'laagwater' conditie naar beneden bijgesteld (1059 kN/m → 322 kN/m). Hiermee is hoogwater maatgevend geworden. Wat verder opvalt is dat de belasting tijdens de 'hoogwater' conditie stijgt van 407 kN/m naar 702 kN/m door het toevoegen van de fietsbrug.

In deze notitie is in detail naar het modeltest rapport gekeken, omdat deze belastingen aanzienlijk hoger zijn dan te verwachten op basis van Goda en extreem variëren met of zonder brug. Het doel was om te achterhalen waarom deze hoogwater belastingen nog steeds zo hoog zijn. De tijdsignalen van de kracht voor K2 met en zonder fietspad zijn uit het modeltestrapport overgenomen en achterin dit document toegevoegd om de onderstaande observaties terug te kijken.

De volgende observaties in het rapport van de schaalmodeltesten zijn gedaan:

- Beschrijving van maatgevende kracht
 - Golfklap is nog steeds het maatgevende mechanisme;
 - De maximale klappen bij hoogwater komen door de aanwezigheid van de defensiebalk. De piek druk/kracht in de tijd komt na een diep golfdal (-50 kPa ≈ 5 m waterkolom verlaging) en knalt bij ongeveer -2,5 m, dit is ongeveer het niveau van de onderkant van de defensiebalk bij een waterstand van +5,4 NAP. Dus staat het water in het golfdal ruim onder defensiebalk, komt het terug omhoog en creëert een golfklap. Deze golfklap is kleiner dan met stilwaterstand op +2,5m NAP, maar is nog steeds hoger dan Goda.
 - De duur van de belasting is maximaal 0,05 s (dus echt een klap rond waterstand 2,5 m +NAP en geen quasi statische druk onder golfkruin)
- Verschil in met en zonder brug
 - De toevoeging heeft duidelijke invloed op het niveau van het golfdal. Zonder brug is de maximale onderdruk ongeveer 40 kPa. Dit neemt toe tot 50 kPa door het toevoegen van de brug. Een verklaring hiervoor is dat de fietsbrug de golfpiek limiteert, maar niet al deze energie dissipeert. Hierdoor blijft de orbitaalbeweging van de golf (gedeeltelijk) in stand, maar zal deze op een lager punt starten met dalen. Dit zal het golfdal verlagen en daarmee de ruimte voor een golfklap verhogen. Deze extra ruimte resulteert in een significant hogere belasting. De reden dat de orbitaal beweging (gedeeltelijk) in stand blijft, is dat de verticale snelheid ondergeschikt is aan de horizontale snelheid tijdens de piek van de golf.
 - Verder is het opvallend dat de kracht met verhoogd spatscherm lager is dan met lager spatscherm, dit zou je intuïtief andersom verwachten. Een verklaring hiervoor is dat er meer water "gevangen" wordt tussen de defensiebalk en het spatscherm/kabelkoker. Dit water moet na de golfpiek terug stromen via de

ontluchtingsopening bij de Defensiebalk. Hierdoor zal het golfdal minder diep zijn en daardoor de golfklap belasting lager.

4.2 Nareken modelonderzoek met golfklap model zoals afgeleid voor Afsluitdijk

We hebben met ons golfklap model geprobeerd de belastingen na te rekenen. De volgende geometrie is gebruikt:

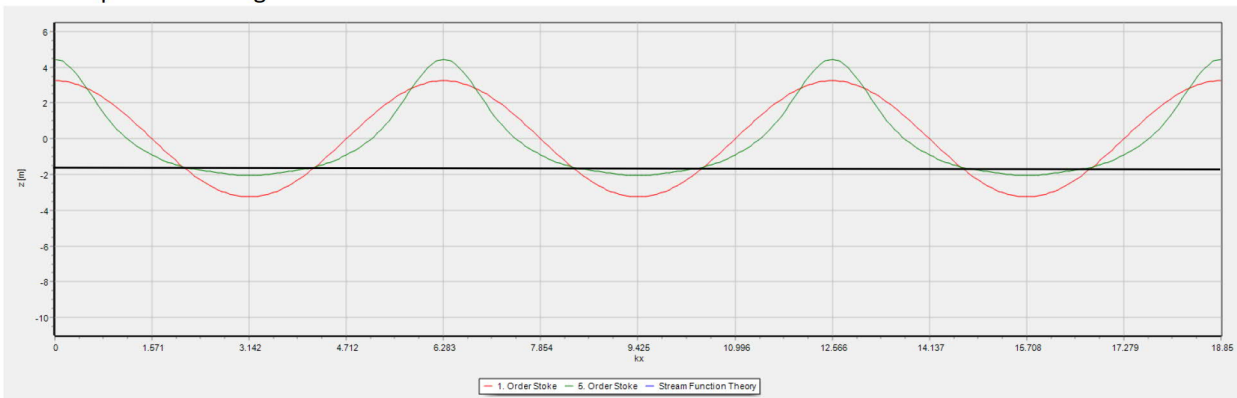
- Bodem niveau -4,65 m +NAP;
- Defensiebalk hoogte 2,5 +NAP;
- Defensiebalkbreedte 2,07 m;
- Spleet opening van 0,1m (in modeltest was dit 0,27m, maar gebaseerd op 'Effects of ventilations on coastal structures with overhangs subject to wave, Marlon Vieira Passos 2019' wordt het effect van een smalle ontluchtingsopening overschat in de gebruikte golfklaptheorie)

We hebben een paar basis waarden in het golfklap model gewijzigd om beter aan te sluiten bij de modelproeven:

- We hanteren een impuls duur van 0,04 s, conform testresultaat, in plaats van de theoretische 0,1 s, golfklap model standaard;
- We hanteren een vooroeverhelling van 1:7, in plaats van 1:100;
- We hanteren een overschrijdingsfrequentie in de golfhoogteverdeling van 0.05% (in plaats van 0,1%), conform Fmax definitie modelonderzoek

Het valt op dat we voor de hoogwater conditie K2 veel hogere klappen uitrekenen dan gemeten in de modelproeven (974 kN/m ipv 407 kN/m). Na verder uitzoeken komt dit waarschijnlijk doordat we in het model uitgaan van lineaire golftheorie. Daarmee wordt een veel dieper golfdal gevonden en hogere verticale orbilaatsnelheden ter hoogte van de defensiebalk dan dat in werkelijkheid optreed. In werkelijkheid is deze maximale golf niet meer lineair.

Ter illustratie is de 1^e orde Stokes en 5^e orde Stokes oplossing voor de hoogwater golfconditie ($H_{max} = 6,5$ m) hieronder weergegeven (zonder reflectie). De zwarte lijn is niveau defensiebalk onder stil water 1,45 m (2,9 m gedeeld door twee om effect reflectie mee te nemen van golf). De 1^e orde laat een golfdal van iets meer dan 3,25 meter zien (halve golfhoogte) en komt hiermee dus ruimschoots onder de defensiebalk. Inclusief reflectie (100%) leidt dit tot een onderdruk van 65 kPa. Dit is veel meer dan geobserveerd en gemeten in met de modeltesten waar slechts 40 kPa onderdruk is gemeten. Dit komt omdat de golven niet lineair meer zijn met deze hoogte waterdiepte verhouding.



Figuur 3: watertstandsverloop golf volgens 1ste orde Stokes (lineair) en 5de orde Stokes (niet lineair)

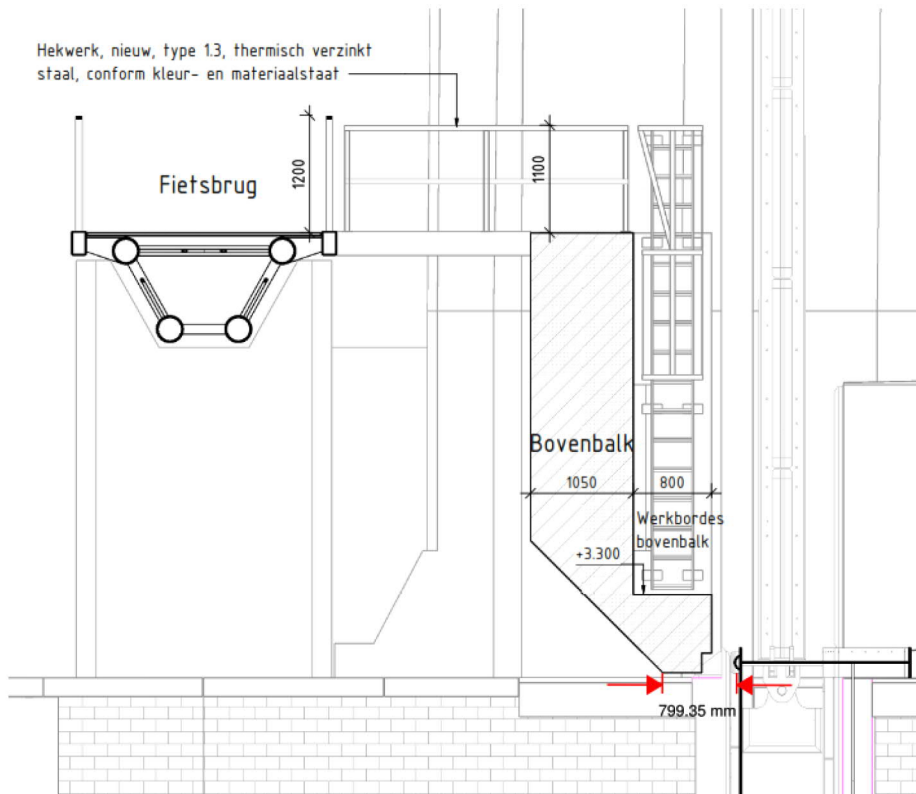
Als we vervolgens de golfhoogte in het golfklapmodel reduceren tot een golf waarmee het golfdal overeen komt met de modelproef, dan komt de gemeten en berekende kracht weer dicht bij elkaar in de buurt, zie onderstaande tabel. Een verlaging van de golfhoogte, bij lineaire golftheorie, geeft ongeveer dezelfde verticale orbitaalsnelheid bij onderkant defensiebalk als gezien wordt bij de 5^e orde Stokes oplossing zonder golfhoogte beperking. Dit verklaart dat de golfklapbelastingen goed bij elkaar in de buurt komen.

Tabel 4: Berekende belastingen Schuiven BSM inclusief correctie niet lineaire golven

K2	Model test / belastingnota			Reken model defensiebalk		
	Onder druk	Ontwerp	Max gemeten	Onderdruk	Golfhoogte	Kracht
Zonder brug	40 kPa	407 kN/m	553 kN/m	42 kPa	64%	512 kN/m
Met brug	50 kPa	702 kN/m	881 kN/m	51 kPa	78%	700 kN/m
				65 kPa	100%	974 kN/m

4.3 Berekening golfklap met huidige geometrie (met bovenbalk)

Op basis van de narekening van de golfklap op de defensiebalk is met dezelfde instellingen de golfklap voor de huidige geometrie, met korte overhang van 0,8 m en zonder spleet berekend. De huidige geometrie is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: geometrie bovenbalk

De narekening resulteert in een golfklapbelasting die kleiner is dan de Goda belasting (215 kN/m), zie Tabel 5.

Tabel 5: Berekende golfklapbelasting op Schuiven BSM ten gevolge van bovenbalk

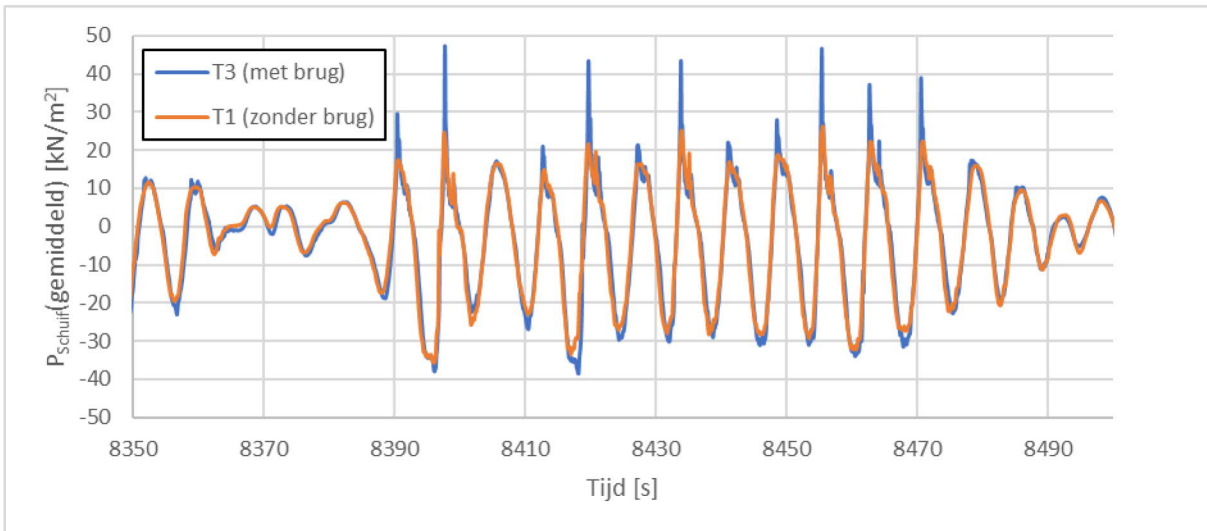
K2	Rekenmodel bovenbalk				Model test geschaalde bovenbalk		
	Golfhoogte	Ontwerp waarde	Modeltest instelling (0,04s)	Rekenmethodiek instelling (0,1 s)	Rekenmodel defensiebalk modeltest instelling (0,04s)	Ratio Bovenbalk-Defensiebalk	Beste inschatting
Zonder brug	64%	407 kN/m	130 kN/m	52 kN/m	512 kN/m	25%	103 kN/m
Met brug	78%	702 kN/m	177 kN/m	71 kN/m	700 kN/m	25 %	178 kN/m

5 Gedetaileerde analyse schaalmodel onderzoek

Op verzoek van Leveel hebben we van RWS de hoog water conditie Kornwerderzand zonder golfbrekers (K2) ontvangen, voor zowel zonder (T1) en met (T3) fietsbrug. Later hebben we ook nog fragmenten videomateriaal van de testen ontvangen en de tijdsignalen van de defensiebalk, fietsbrug en spatscherm gekregen.

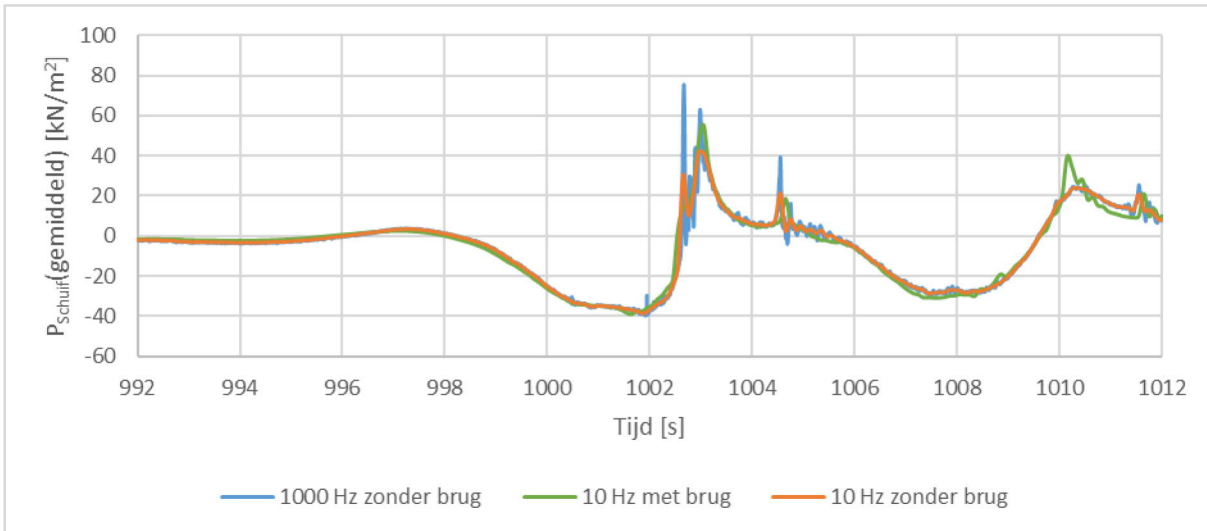
5.1 Analyse tijdsignaal schuif

Na het vergelijken van de tijdseries van T1 en T3 zijn we tot de conclusie gekomen dat beide test met exacte hetzelfde golfsignaal zijn uitgevoerd, er is schaal factor van 0,999 en een shift van minder dan 1 seconde nodig om de krachten exact over elkaar heen te leggen. De verschillen zitten vooral in de klappen die wel of niet optreden, zie stukje van het kracht signaal in Figuur 5.

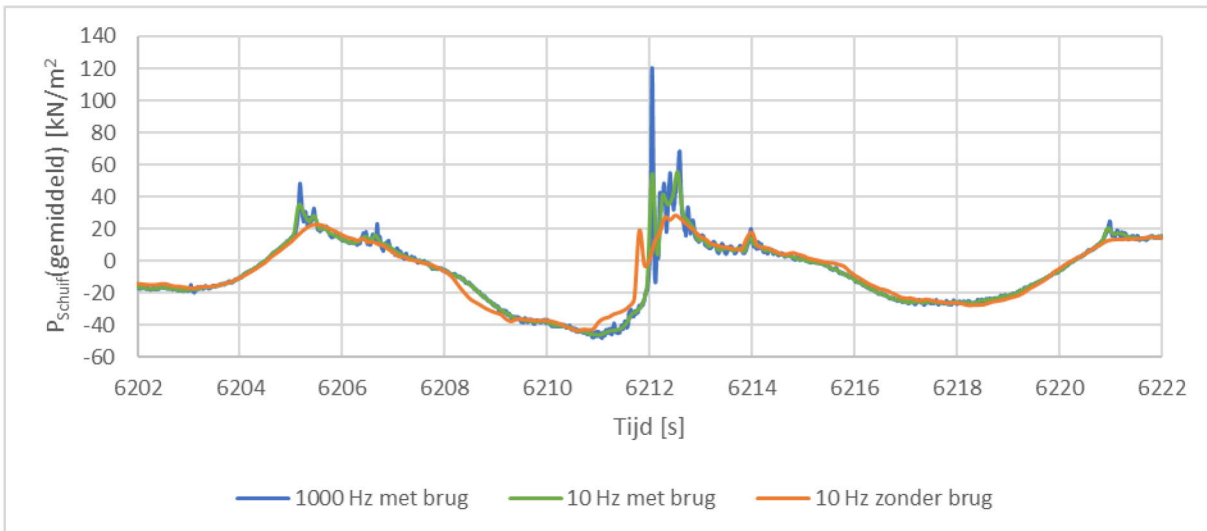


Figuur 5: kracht signaal T1 en T3

Om de tijdserie te kunnen bewerken is deze terug gebracht naar een frequentie van 0,1 s (10 Hz). Deze middeling wordt gerechtvaardigd omdat we niet meer op zoek zijn naar golfklap pieken maar naar quasi statische druk. Het effect van het filteren op 10 Hz is voor T1K2 weergegeven in Figuur 6 en voor T3K2 in Figuur 8. Door het filteren op 10 Hz is de klap op de defensiebalk (eerste blauwe piek) al weg, wel blijft het opsluitingseffect in de druk voor zowel de defensiebalk als fietsbrug goed zichtbaar in de tweede bredere piek.

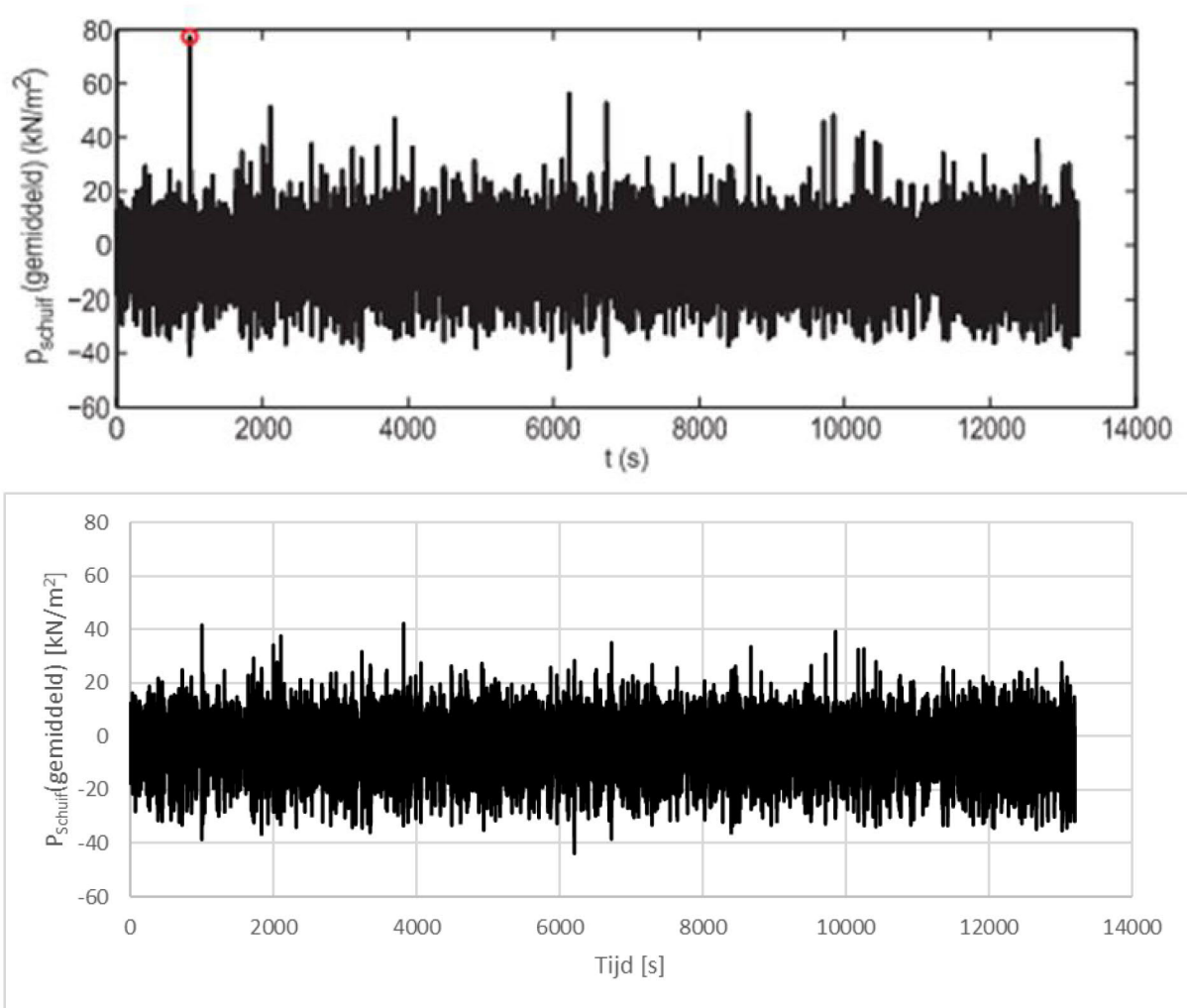


Figuur 6: effect van middelen over 0,1 s op belastingsignaal rond max T1



Figuur 7: effect van middelen over 0,1 s op belastingsignaal rond max T3

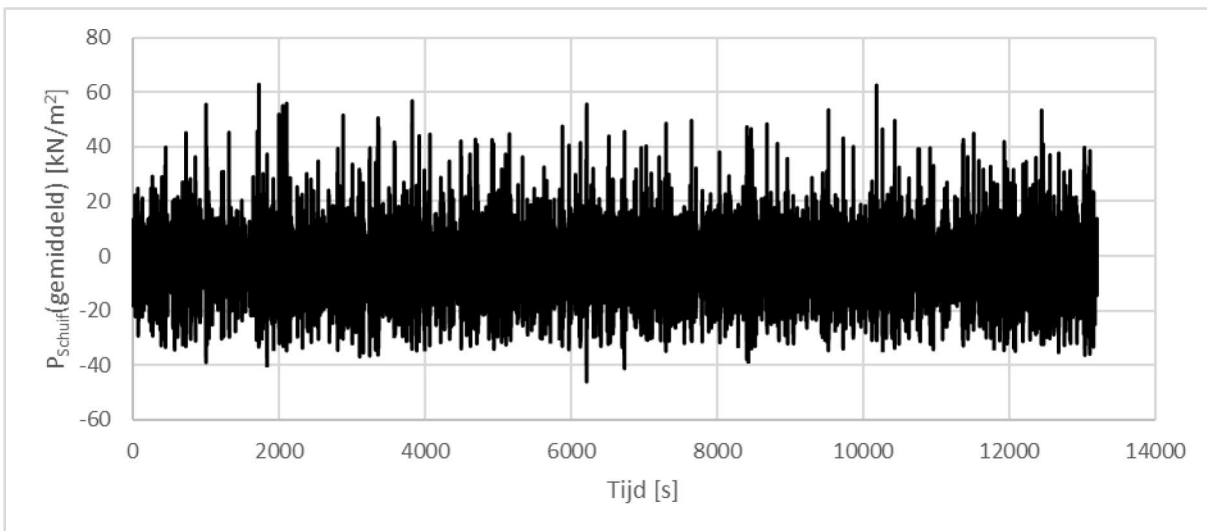
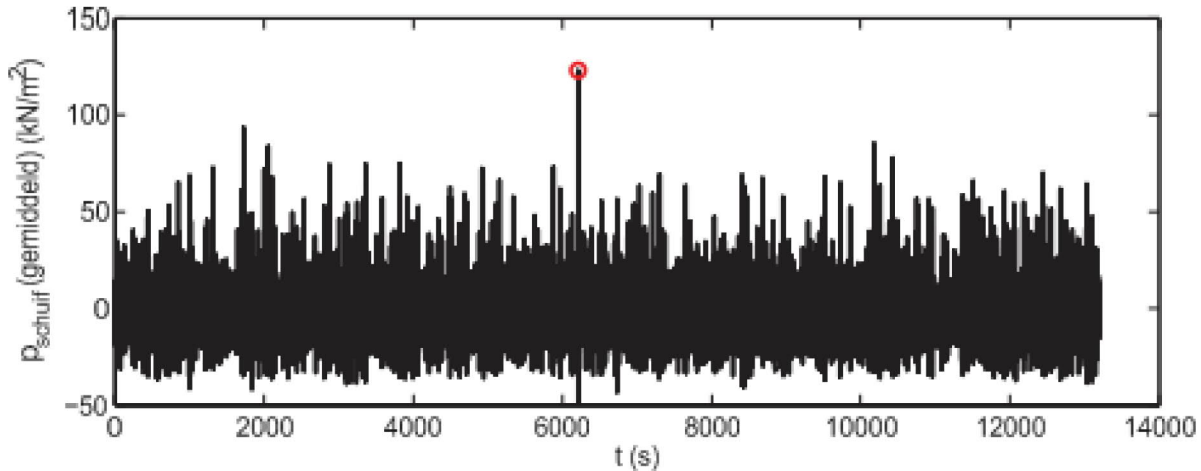
Door het signaal frequentie terug brengen van 1000 Hz naar 10 Hz vallen de hoogste pieken (klappen op defensiebalk) direct weg omdat die slechts enkele honderdste seconden aanhielden, zie verschil in Figuur 8 grafiek uit model test (boven) en gemiddeld over 0,1 s (onder).



Figuur 8: tijdsignaal hele proef T1 (boven 1000 Hz, onder 10 Hz)

Hiermee zakt de maximal druk in de tijdserie T1 van 75,5 naar 42,0 kN/m² wat voor een schuif hoogte van 7,15m neerkomt op een 540 naar 300 kN/m (ontwerpwaarde was 407 kN/m).

Voor tijdserie T3 gaat de maximale gemiddelde druk van 120,4 naar 62,7 kN/m² wat voor een schuif hoogte van 7,15m neerkomt op een 861 naar 448 kN/m (ontwerpwaarde was 702 kN/m).



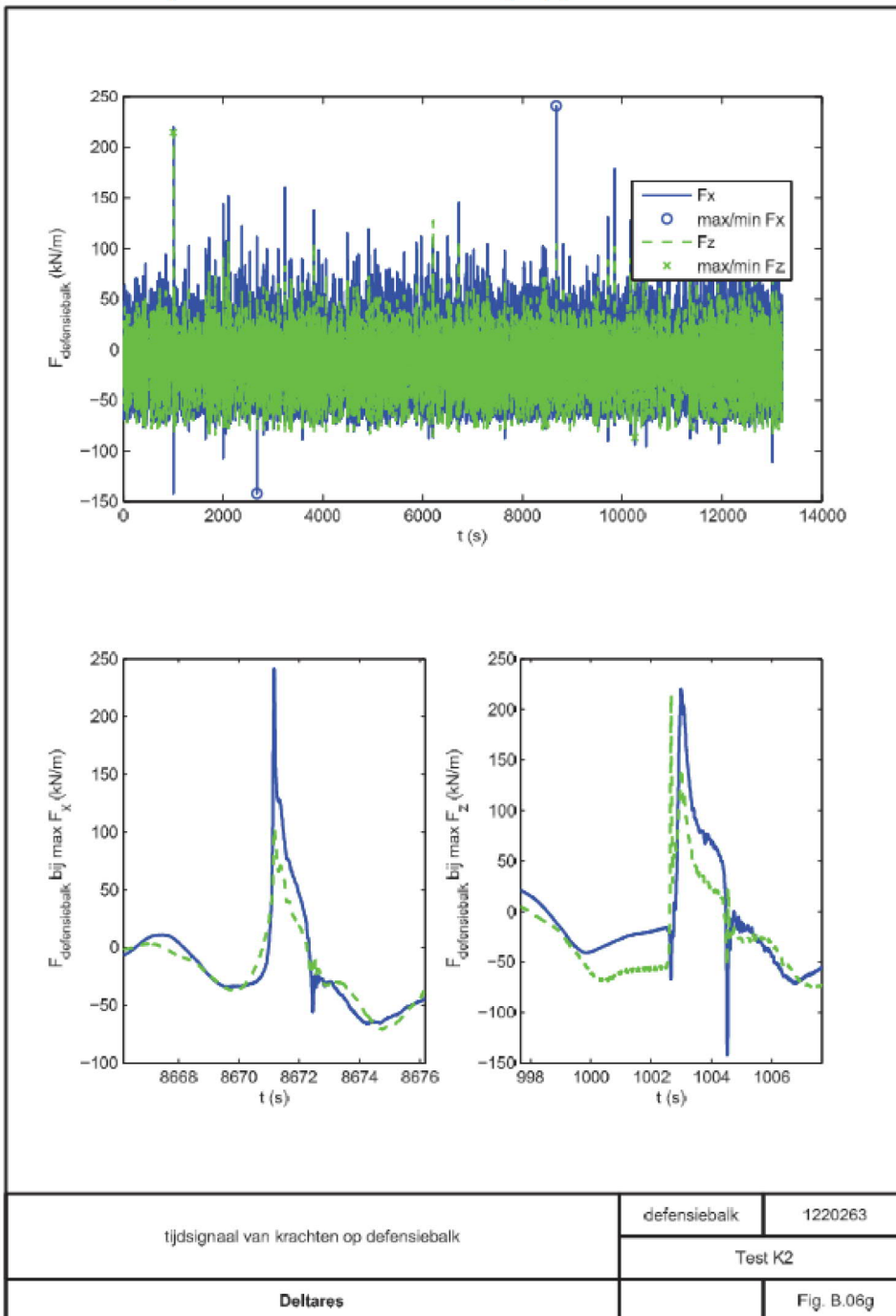
Figuur 9: tijdsignaal hele proef T3 (boven 1000 Hz, onder 10 Hz)

Als we vervolgens in Figuur 5 de subset van 150 seconden bekijken zien we een oscillerende quasi statische belasting (zonder opsluit piek) van ongeveer -30 kPa naar +20 kPa (kracht op schuif varieert van -215 kN/m tot +143kN/m). Wat hieraan opvalt is dat de verhouding golf dal en piek precies andersom is van wat je zou verwachten. Dit komt waarschijnlijk voort uit het feit dat de golfkruin niet wordt gereflecteerd maar doorloopt richting het spatscherm. Wat verder opvalt is dat het krachtsignaal een duidelijk een meer gepiekte vorm heeft, deze pieken (duur 0,1 s) lopen dan wel op tot orde +50 kPa (kracht op schuif 350 kN/m).

Samenvattend is de conclusie dat de maatgevende belastingen gevonden in de modeltest piekbelastingen zijn die sterk geometrisch afhankelijk zijn. En dat de sinusoïde 'quasi' statische belastingen kleiner of gelijk zijn dan wat op basis van Goda berekend wordt, dit komt doordat een groot deel van de golf over de defensiebalk heen slaat.

5.2 Defensiebalk

De korte piekbelastingen in de krachtsignalen van de defensie balk vertonen grote gelijkenis met die van de schuif, de maximale klap belasting van de defensiebalk vallen samen met de maximale klappen op de schuif (1002 s en 6212 s) De piekbelastingen op de schuif komen dus echt door de overhang van de defensiebalk, zie figuren Figuur 10. De maximale krachten op schuif worden op exact dezelfde tijd gevonden met bijna verticale krachtstoename (klap).



Figuur 10: tijdsignaal Defensiebalk T3 K2

5.3 Analyse videobeelden model proeven

Om de optredende krachten te begrijpen zijn de videobeelden van de modelproeven goed bekeken. Doordat er geen tijd meeloopt met de video kunnen we de beelden niet aan krachtopnames koppelen.

De volgende observaties zijn gemaakt:

K2 (hoogwaterconditie):

- Bij een paar grote golven achter elkaar is veel interactie in water te zien tussen de inkomende golven en het terugtrekkende water boven de defensiebalk, bij de eerste inkomende golf is water oppervlak nog gesloten, pas door de interactie met de defensiebalk en spatscherm komt er een hoop luchtinsluiting tot stand (het zijn over het algemeen niet brekende golven die bij de constructie aankomen, ($H_{max}/diepte < 0,5$))
- De golf breekt echt over de defensiebalk heen, waardoor er een impuls belasting op spatscherm ontstaat
- Als er vervolgens nog een golf over heen komt wordt het boven/ achter de defensiebalk hoog turbulent (ook in de ruimte achter de balk)



Figuur 11: golven die breken op de defensiebalk en dan doorschieten naar het spatscherm

- Er is een golf te zien die gebroken is (breekt net voor de brug) en als een roller aankomt, rolt deze over de bovenbalk heen en heeft visueel weinig impact op de schuif maar vooral op het spatscherm.
- De reflectie op het spatscherm schiet soms precies terug over de defensiebalk in het opkomende water van de volgende golf, zie onder (geeft een impuls naar beneden gericht op de inkomende golf), dit heeft waarschijnlijk een druk verhogende werking op de schuif. Dit verklaart ook waarom de krachten op de schuif met verhoogd spatscherm toenemen. Als er dan ook nog een brug aanwezig is, is de botsing tussen terugkomend water en opkomende golf helemaal opgesloten en ontstaat er een overhang ter lengte van defensiebalk inclusief brug, dit verklaart het hele grote effect van de brug



Figuur 12: terugvallend water in de volgende opkomende golf

- Doordat de reflectie van het spatscherm soms terug komt bij een golfdal en als een jet over de balk stroomt, ontstaat veel luchtinsluiting, en deze lucht wordt voor een klein deel ook onder de balk gevangen (geen idee wat dit met de kracht doet, maar de luchtinsluiting verschaalt in ieder geval niet goed, hierdoor is de lucht in het model veel stijver dan in werkelijkheid).



Figuur 13: terugvallend water in een golfdal

- Over het algemeen komt de waterstand net niet onder de defensiebalk (zelfde als in CDF, zie sectie 6.1) en is het gros van de belastingen bij hoog water is dus geen directe klap op de defensiebalk maar het resultaat wat er boven de defensiebalk in interactie met het spatscherm en de fietsbrug gebeurt (dit is waarschijnlijk ook de reden dat de brug zoveel invloed heeft). In het tijdsignaal zijn er ook maar een paar echte uitschieters te zien, deze komen wel degelijk van de defensiebalk zie sectie 5.2.

K3 (Laagwater conditie)

- Klassieke golfklap op de defensiebalk, dit resulteert in hele hoge belasting zowel op de defensiebalk als op de schuif.



Figuur 14: klap op onderkant defensiebalk met wegschietend water

- De kleine spleet heeft meerdere effecten;
 - weinig effect op klapbelasting. De hoeveelheid water wat links en rechts om de balk heen gaat is duidelijk in onbalans, er gaat veel meer naar voren, dus de spleet is veel te klein om duidelijke verlichting van de klap te geven, zie Figuur 14;
 - heeft een groot effect op neergaande water, neemt veel lucht mee wat als effect heeft dat er een lucht water mengsel onder de balk ontstaat;
 - door het doorlaten van water/lucht blijft het water niet plakken aan de balk waardoor het water onder de balk verder weg zakt;



Figuur 15: effect spleet op wegzakken water niveau onder de defensiebalk

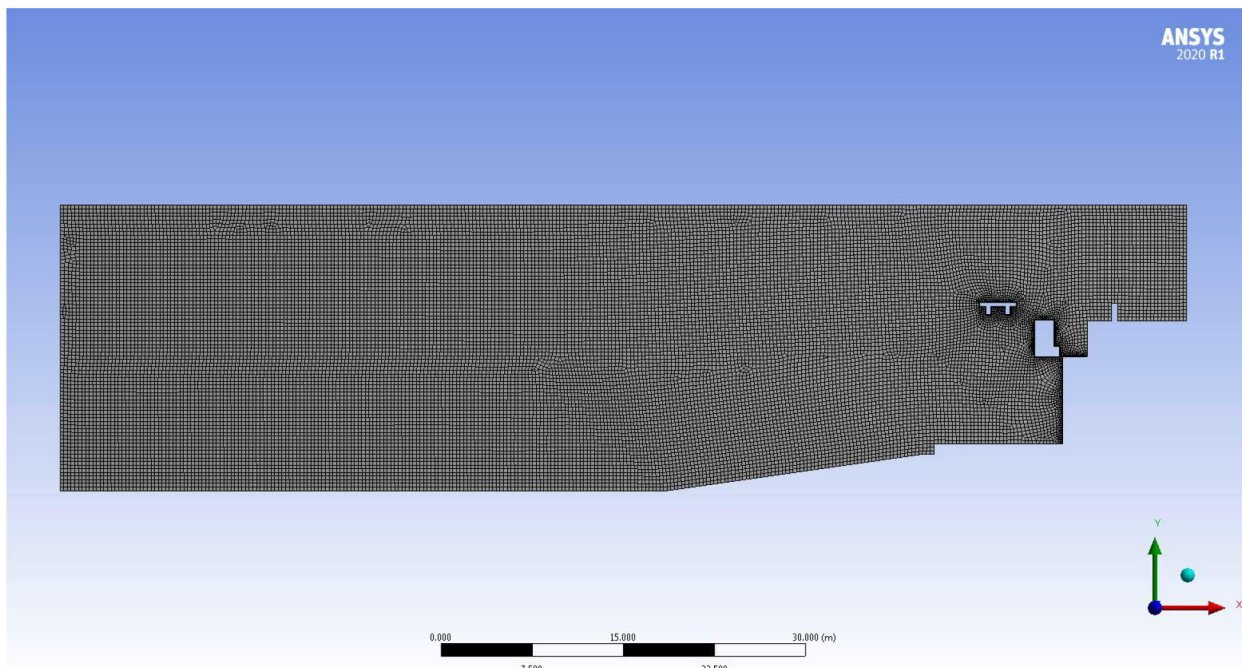
- De verwachting is dat in dit geval de spleet een nadelige werking heeft op de klapbelasting, weinig druk verlichting tijdens de klap wel ruimte creërend voor de volgende golf om snelheid te maken

6 CFD Analyse

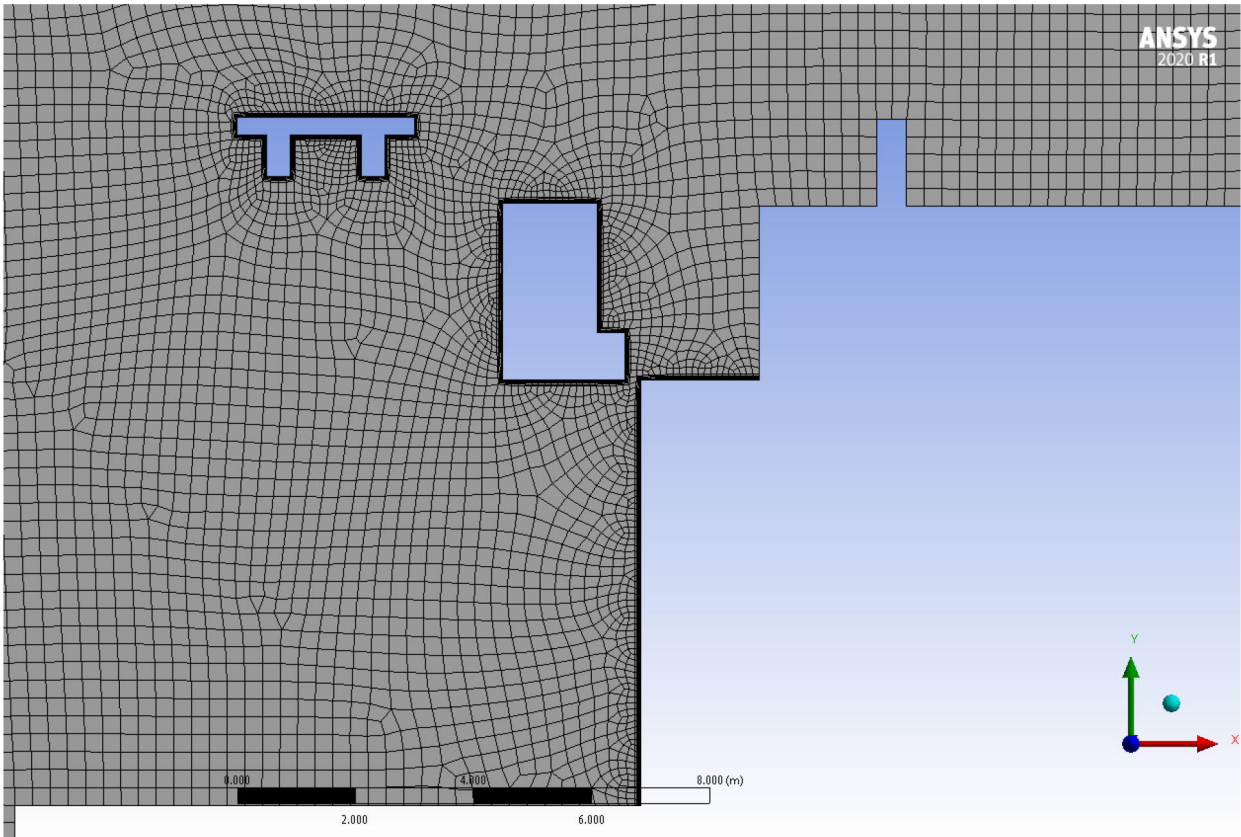
Om de modeltesten te relateren aan de nieuwe geometrie zijn er CFD sommen uitgevoerd met zowel de modeltest geometrie als de nieuwe geometrie met de bovenbalk en de open vakwerk brug. Om rekentijd te besparen zijn regelmatige golven gebruikt in plaats van een volledig spectrum. De berekeningen zijn met een harmonische maximale golf (H_{max}) van $1,8 * \text{de significante golfhoogte}$ gedaan. De opgelegde golf op de rand is gedefinieerd door de orbitaal beweging van een 5^{de} orde Stokes golf (variabel over de diepte). Hierdoor kan de lengte van de numeriek goot beperkt blijven.

6.1 Defensiebalk met brug

Voor de modelproef narekening is zowel een model met als zonder brug gebruikt. Het rooster is weergegeven in Figuur 16 en de details in Figuur 17. Het rekenrooster heeft een grid afmeting van 0,3 m en ronde constructie van 0,1 m. Langs de wanden is ook nog een inflation layer toegepast om de stroming in de grenslaag bij de wanden met voldoende detail te kunnen modelleren.

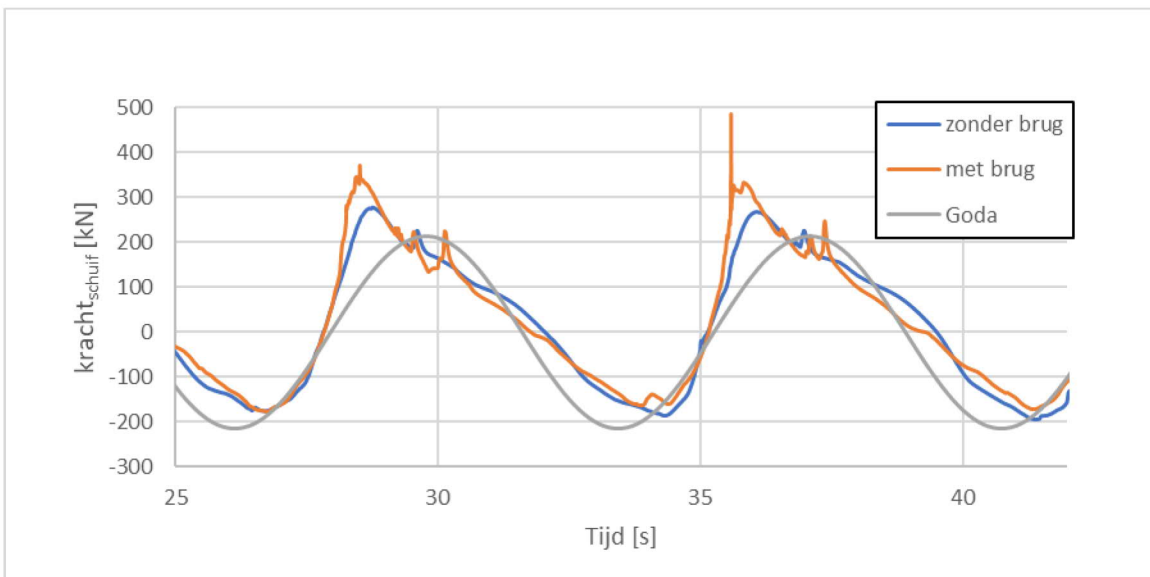


Figuur 16: Rekenrooster model met brug (T3)



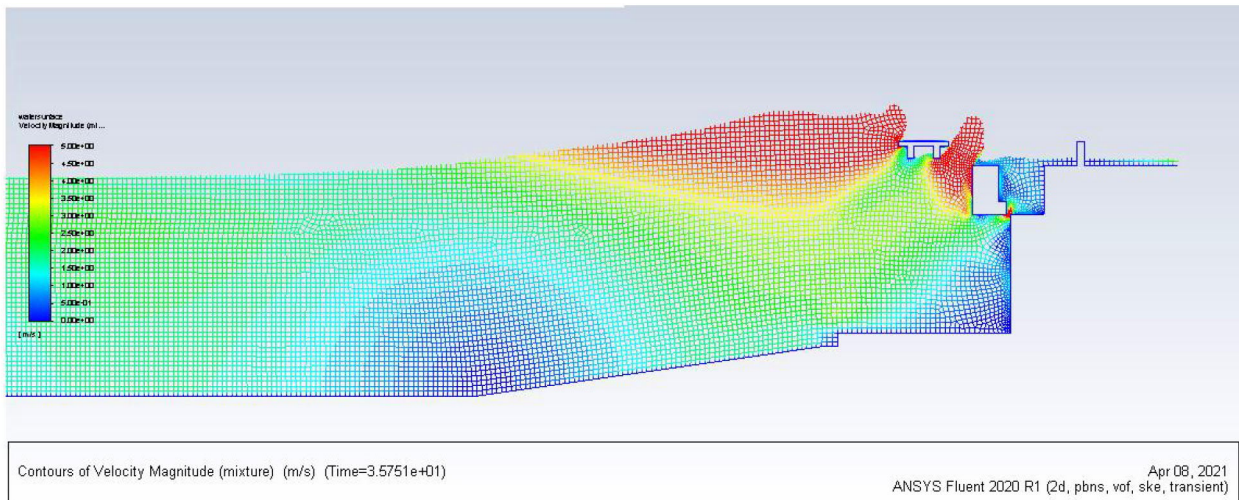
Figuur 17: rekenrooster detail, schuif defensiebalk en brug (T3)

In Figuur 18 is het krachtsverloop op de schuif te zien, hierin is te zien dat de defensiebalk een opsluitend effect heeft en daarmee invloed op de druk en dus ook op de kracht op de schuif (steile stijging kracht bij oplopen van golf).



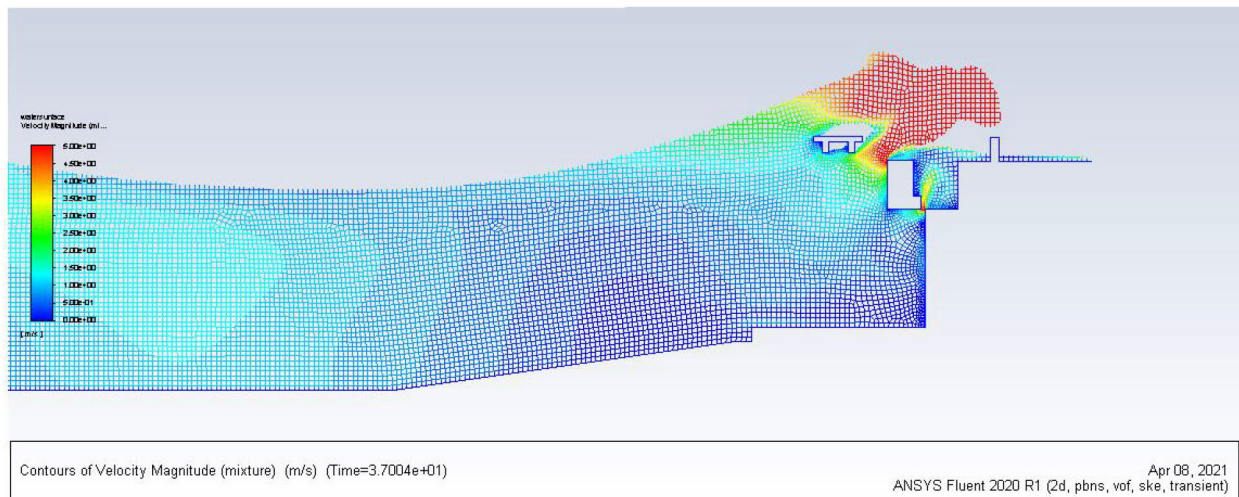
Figuur 18:kracht verloop in tijd op schuif

De fietsbrug heeft nog een verder opsluitend effect welke in het CFD model ook een klap gaf (op 35,7s), zie Figuur 19.



Figuur 19: Moment van golfklap op de brug (T= 35,75 s)

Op het moment dat de golfhoogte maximaal is de druk op de schuif alweer gezakt en komt weer overeen met de verwachte Goda belasting (op 37,0s), zie Figuur 20.

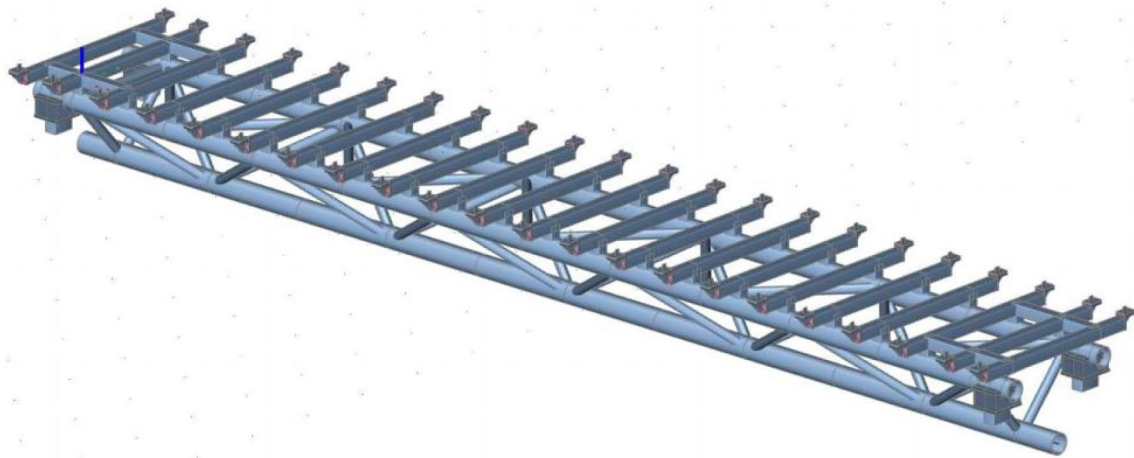


Figuur 20: Moment van maximaal kruin niveau (max Goda)

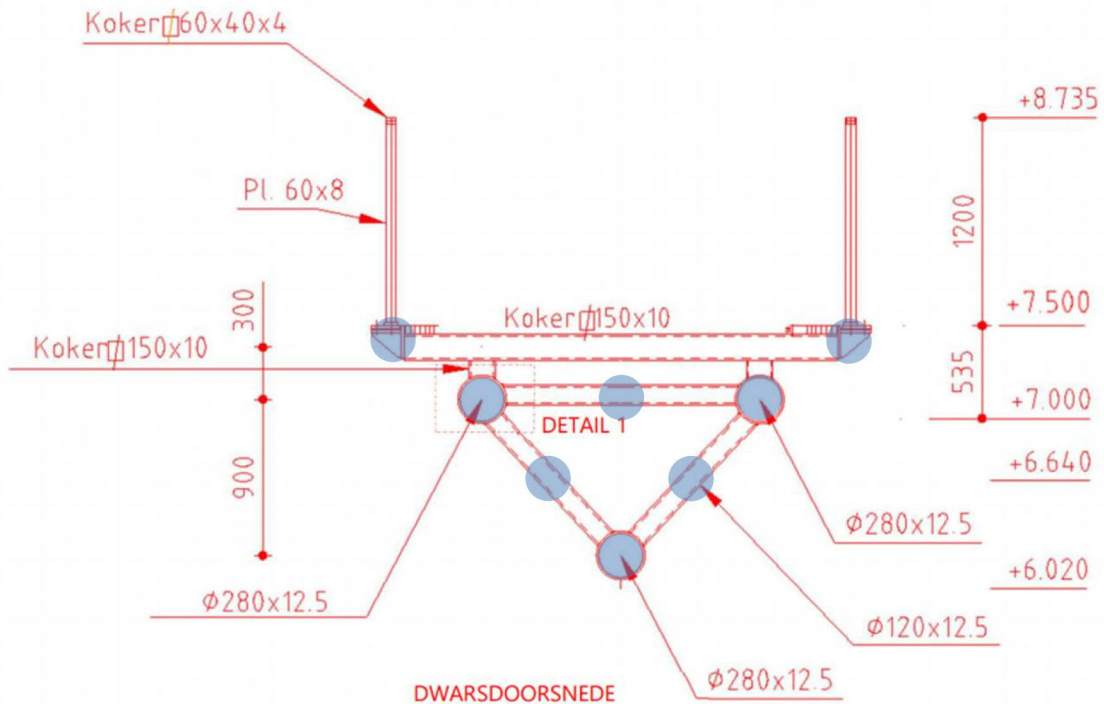
De maximaal gevonden quasi statische druk door de opsluiting van de geometrie zonder brug was ongeveer 280 kN/m, welke omhoog ging naar 350 kN/m met brug. Als de klap van de brug wordt meegenomen vinden we een kracht van een kleine 500 kN/m. De waarden zijn voor de quasi statische druk op de schuif een stuk hoger (ongeveer 50%) dan wat gevonden wordt in de modetest tijdseries. Als we CFD vergelijken met Goda dan zien we dat ze goed overeenkomen, alleen komt de opsluiting van de defensiebalk en fietsbrug natuurlijk niet terug in Goda belasting.

6.2 Nieuwe geometrie

De belasting op de schuif in de situatie met een Bovenbalk en een open vakwerkbrug is ook gemodelleerd in CFD. Een 3D impressie is weergegeven in Figuur 21. Omdat dit geen constante doorsnede is in 2D is er een schematisering van in 2D van gemaakt, zie Figuur 22. De brug is geschematiseerd door 8 buisprofielen met een diameter van 280 mm op de blauwe cirkels te plaatsen.

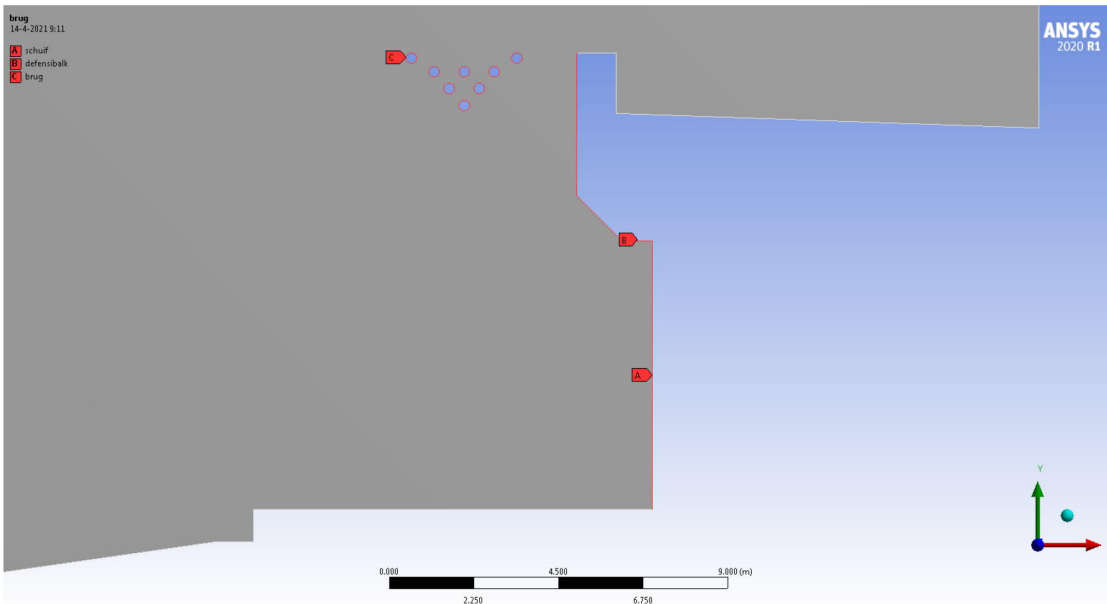


Figuur 21: 3D impressie van de fietsbrug



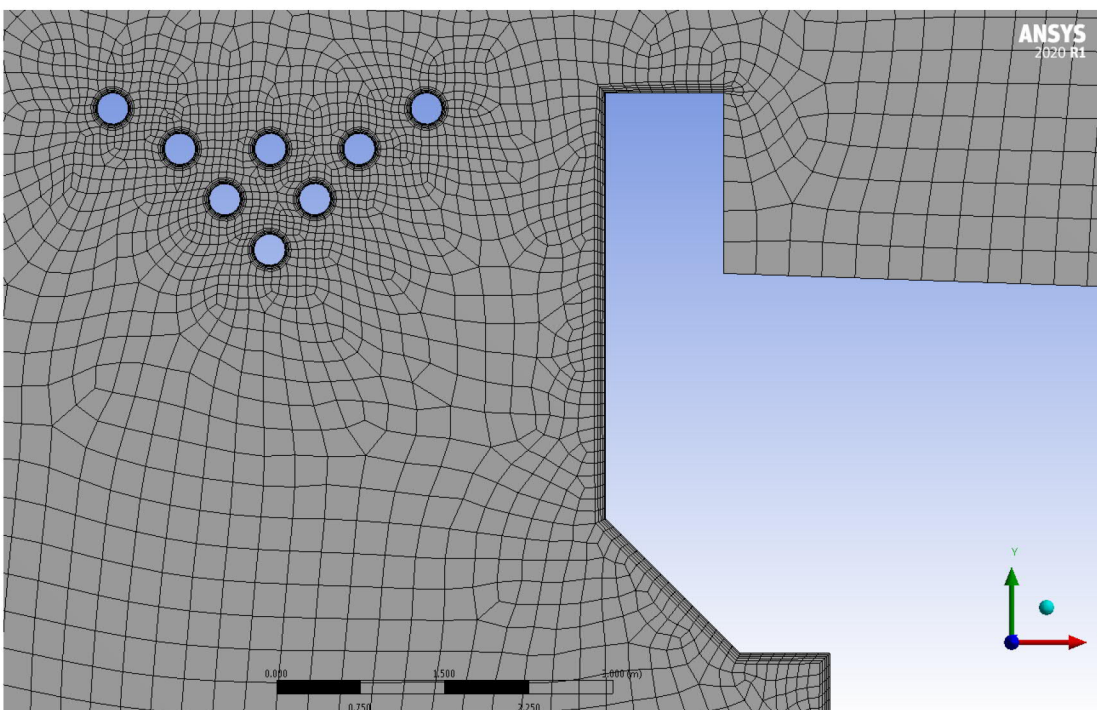
Figuur 22: 2D representatie van de vakwerkbrug

Voor zowel de schuif, bovenbalk en de fietsbrug zijn de totale krachten bepaald, de randen waar de drukken over zijn geïntegreerd zijn weergegeven in Figuur 23.



Figuur 23: constructie onderdelen

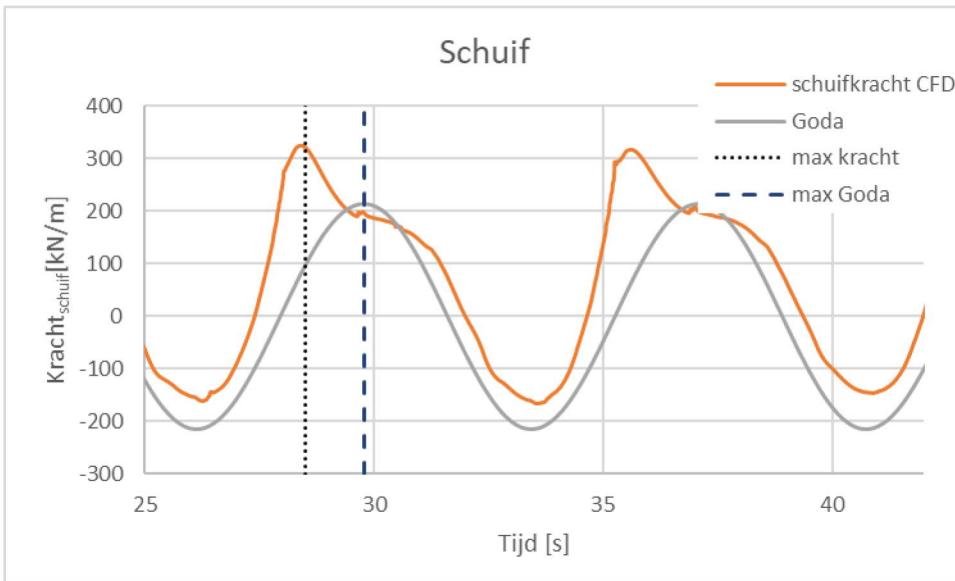
Her rekenrooster komt overeen met dat voor de defensiebalk, het detail rooster bij de bovenbalk en brug is weergegeven in Figuur 24. Het rekenrooster bij de brug is teruggebracht tot 0,05 m om de geometrie goed te kunnen representeren.



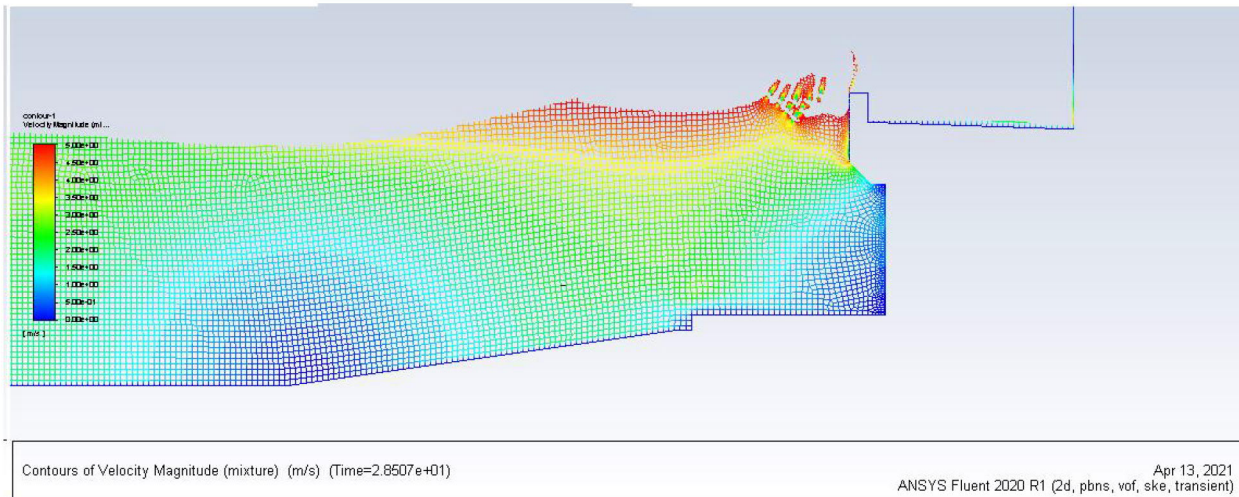
Figuur 24: detail rekenrooster bovenbalk en brug

6.2.1 Schuif

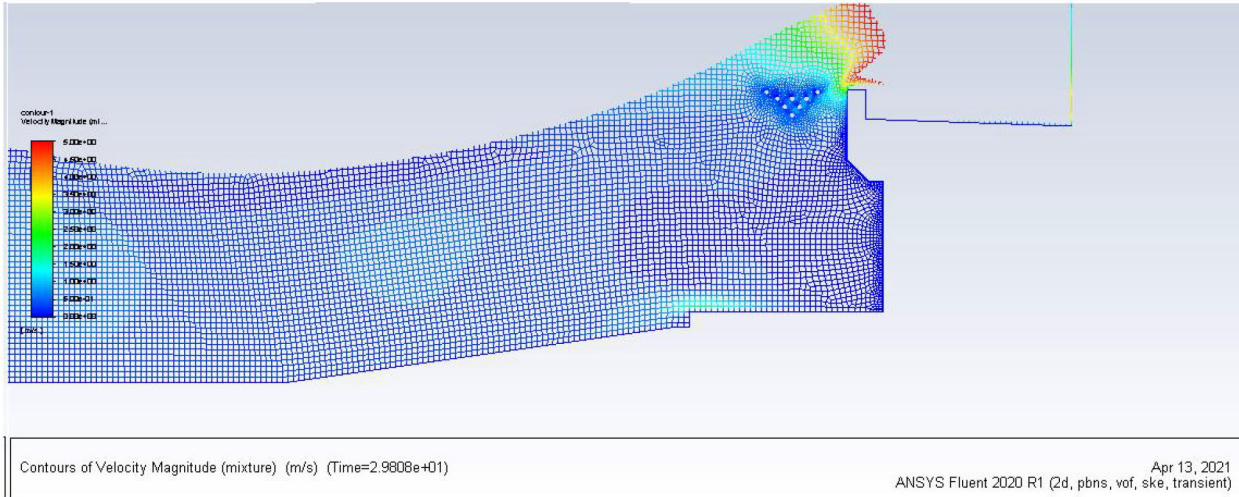
In Figuur 25 wordt het krachtsignaal op de schuif weergegeven, hierin komt naar voren dat de bovenbalk en open fietsbrug ook een opsluitend effect hebben. De maximale kracht op de schuif is tijdens het moment dat de golf de fietsbrug passeert, zie Figuur 26. Op dit moment is de maximale kracht is dan 326 kN/m. Op het moment dat de golf kruin maximaal is, Figuur 27, is de kracht op de schuif 194 kN/m.



Figuur 25: kracht signaal in de tijd op de schuif hoge waterstand (T = 28,5 s)

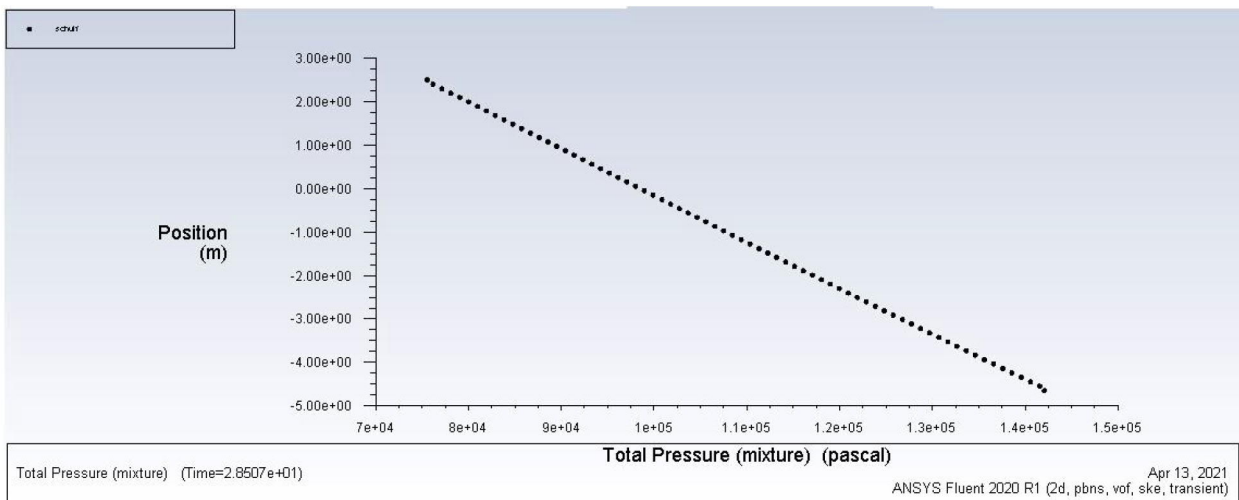


Figuur 26: Maximale kracht op schuif (T=28,5 s)



Figuur 27: Maximaal golfkruin/goda (T= 29,8s)

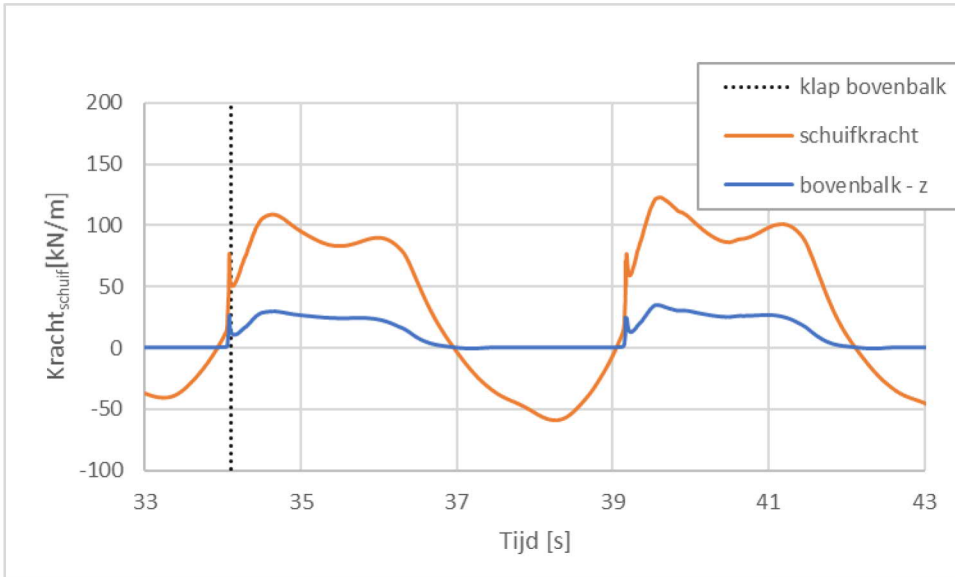
De druk in Figuur 28 is de totale druk inclusief hydrostatische druk. Om de drukverdeling onder de golf te bepalen moet de hydrostatische druk eraf worden getrokken. De hydrostatische druk boven aan de schuif is 29 kPa (waterstand 5,4 m en niveau bovenkant schuif 2,5m), aan de onderkant van de schuif is de hydrostatische druk 100,5kPa (waterstand 5,4 m en niveau onderkant schuif -4,65m)



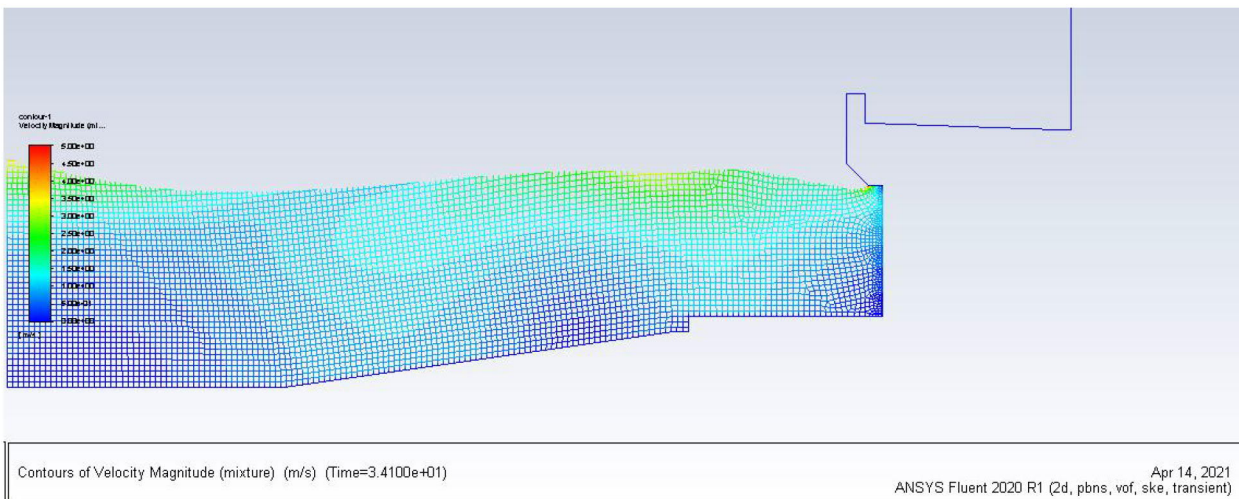
Figuur 28: Druk verloop op moment van maximale kracht op schuif (T=28,5 s)

Als de hydrostatische druk van Figuur 28 wordt afgetrokken resulteert dat in een golfdruk boven van $77-29=46$ kPa en onder $142-100.5= 41.5$ kPa. Dit is dus een redelijk uniforme druk met een lichte afname naar de bodem.

Voor dezelfde geometrie is ter controle ook de lage waterstand berekend (WL = 2,5m $H_{max} = 3,17$ m en $T_p = 5,0$ s). Het kracht signaal op de schuif en bovenbalk is weergegeven in Figuur 29. Hierin is te zien dat de overhang een kleine klap laat zien, maar de kracht hiervan op de schuif is kleiner dan de maximale quasi statische belasting. En dat de belastingen ook veel kleiner zijn dan bij hoog water.

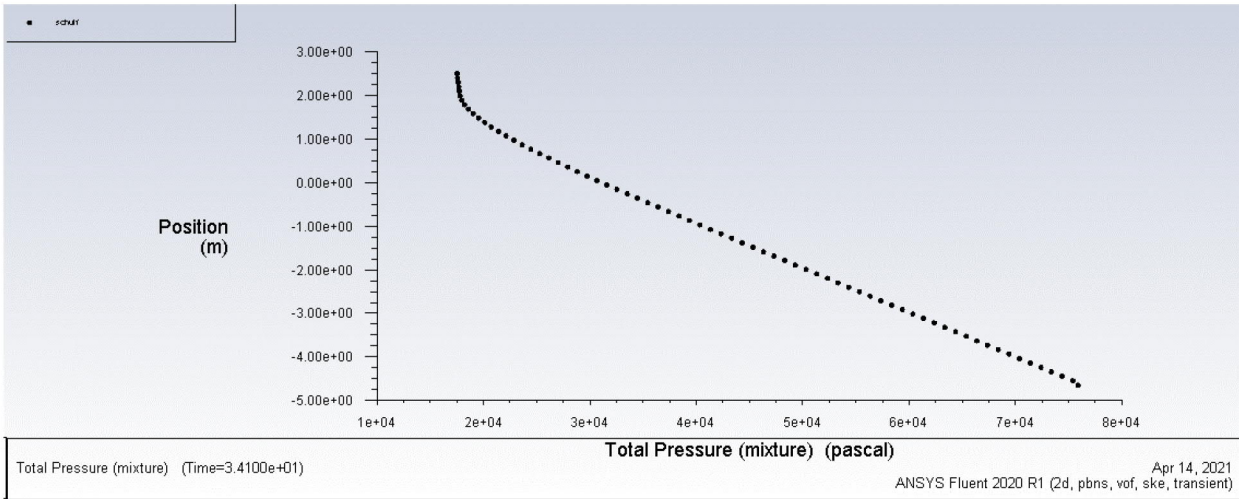


Figuur 29: kracht signaal in de tijd op de schuif lage waterstand



Figuur 30: moment van golfklap (T= 34.1 s)

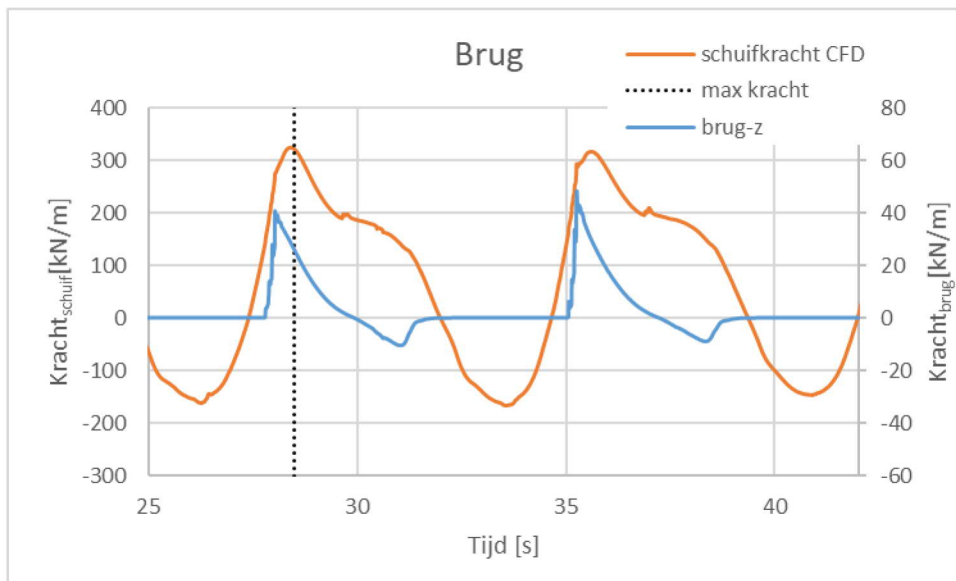
Op dit moment laat zien dat de druk ten gevolge van de klap vooral boven in de schuif zit, zie Figuur 31.



Figuur 31: druk verloop over de schuif ten gevolge van klap op bovenbalk (T = 34,1 s)

6.2.2 Fietsbrug

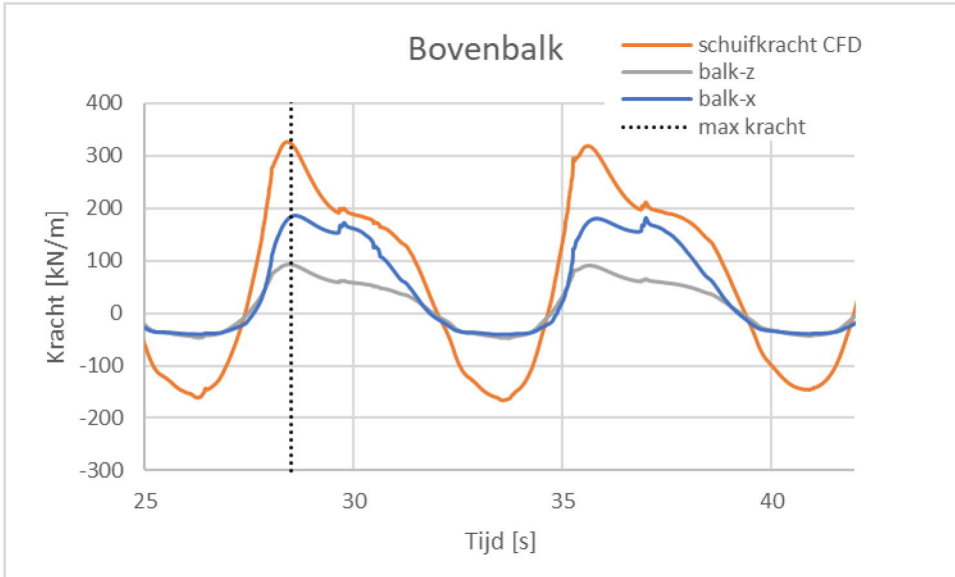
De verticale belasting op de brug loopt heel snel op als de golf passeert, de maximale verticale kracht gevonden op de fietsbrug is 45 kN/m omhoog gericht, zie Figuur 32. In een nauwkeurige bepaling van de kracht op de fietsbrug op basis van daadwerkelijk toegepaste profielen en roostervloer is de opwaartse kracht van 17 kN/m bepaald (ASD-UNO-0193). De schematisering van de brug in CFD van is zeer conservatief meegenomen voor de belasting op de schuif (meer blokkade dan werkelijk).



Figuur 32: verticale belasting fietsbrug

6.2.3 Bovenbalk

De horizontale belasting op de bovenbalk is berekend in ASD-UNO-0028 op 185 kN/m, dit komt zeer goed overeen met de gevonden belasting in CFD, zie Figuur 33. De verticale belasting op de bovenbalk in de UNO-ASD-0028 is afgegeven als de maximale van de Goda druk of de golfklap, hierin is Goda maatgevend ($36 \text{ kN/m}^2 * 2,0\text{m}$) 72 kN/m, in CFD vinden we 90 kN/m, dit verschil komt omdat het opsluifeffect in Goda niet aanwezig is. De UNO geeft hier dus waarschijnlijk een kleine onderschatting.



Figuur 33: belasting op bovenbalk

7 Conclusie

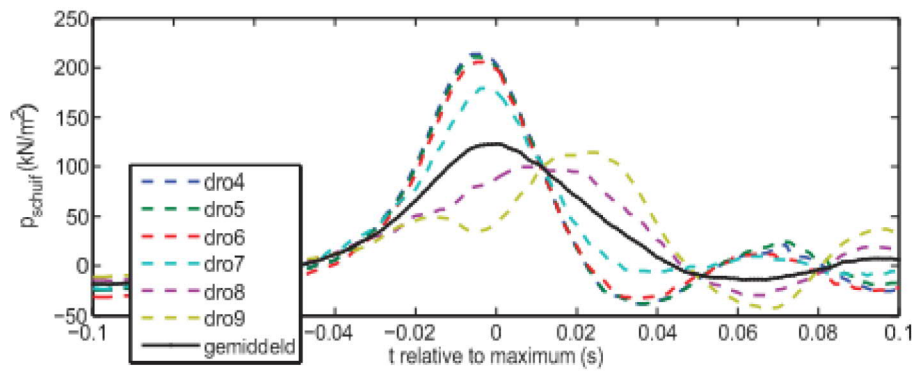
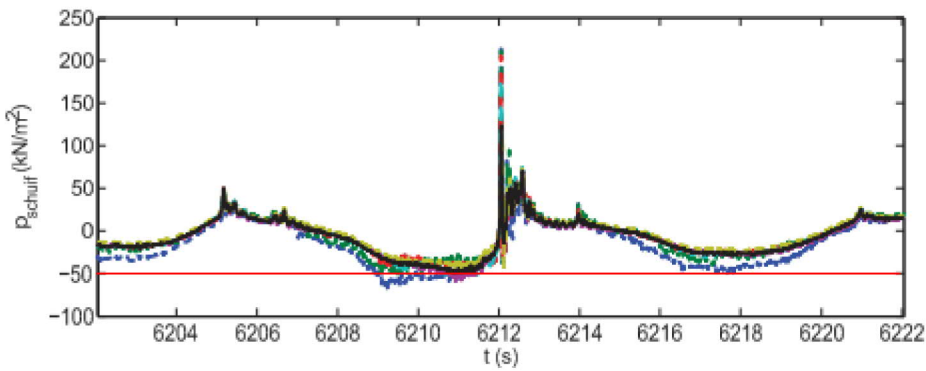
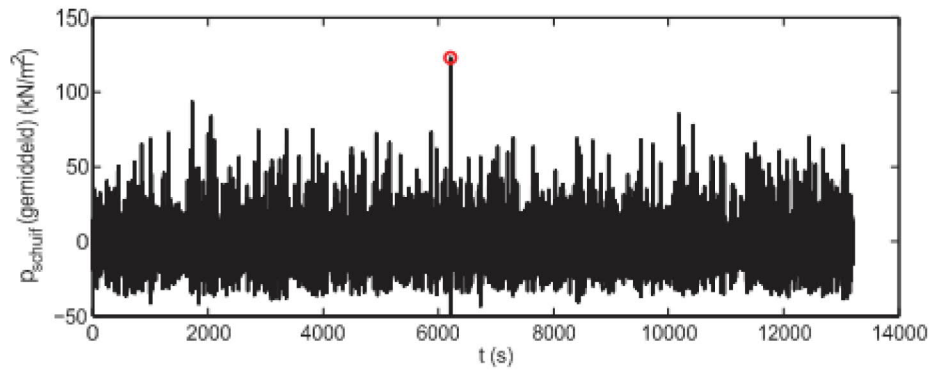
De belastingen afgegeven in de belastingnota zijn gebaseerd op modelproeven met een hele specifieke geometrie. De klapbelastingen op de defensiebalk en dynamisch gedrag van het water boven de defensiebalk richting spatscherm en de reflectie op het spatscherm met een dichte fietsbrug geeft een heel complex systeem. Door de nieuwe geometrie met bovenbalk is het reflectiepunt meer in 1 lijn gebracht en is de overhang waar directe golfklappen optreden significant verkleind. Tevens heeft de fietsbrug een meer open karakter heeft gekregen.

Ten gevolge van de geometrie aanpassingen is de golfklap niet meer maatgevend voor de belasting van de schuif, de maatgevende belasting komt voort uit quasi-statische golfdruk (Goda) met opsluitingseffect.

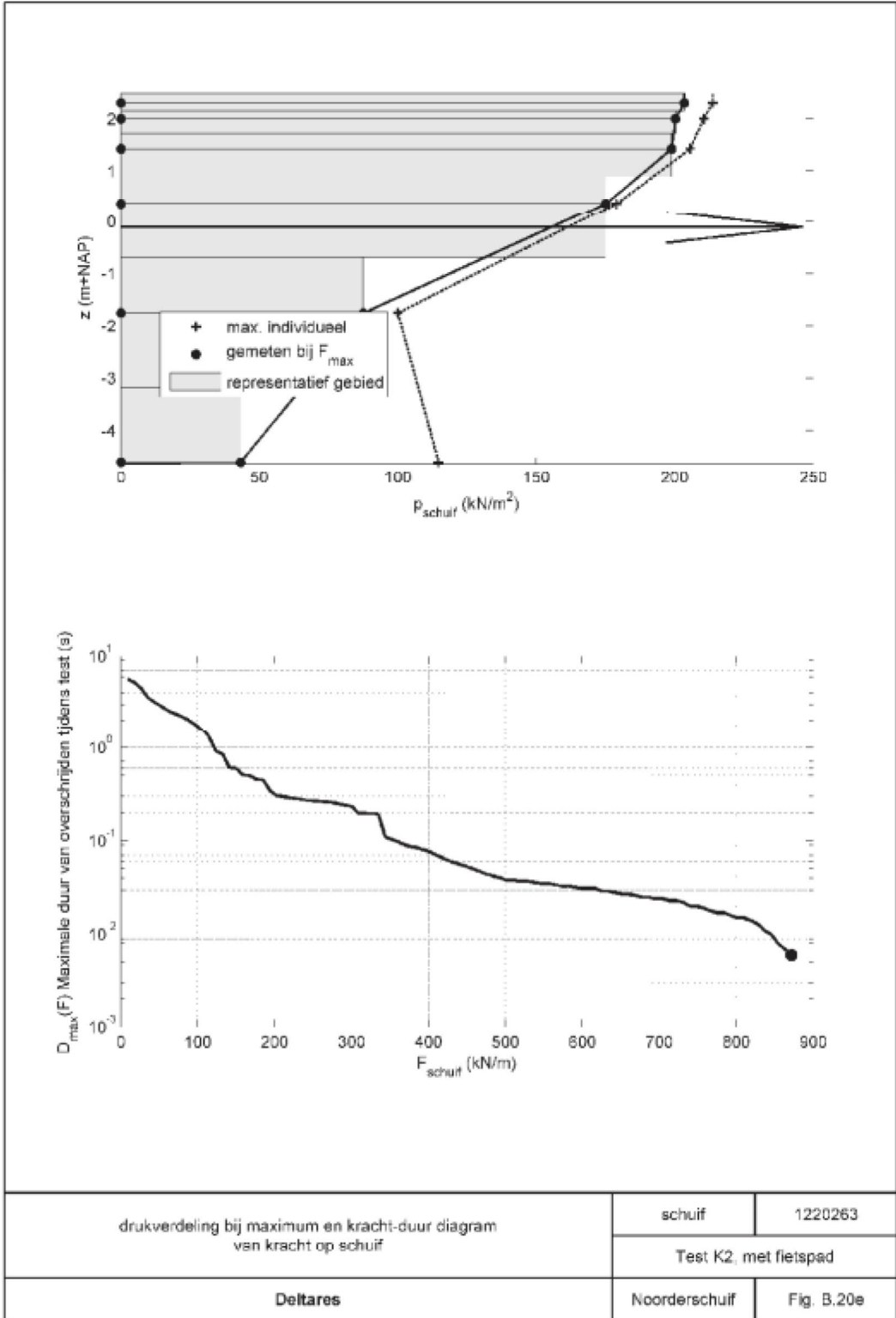
De belasting bij hoog water is maatgevend. De maatgevende belasting op de schuif is 326 kN/m met een bijna uniform druk verloop.

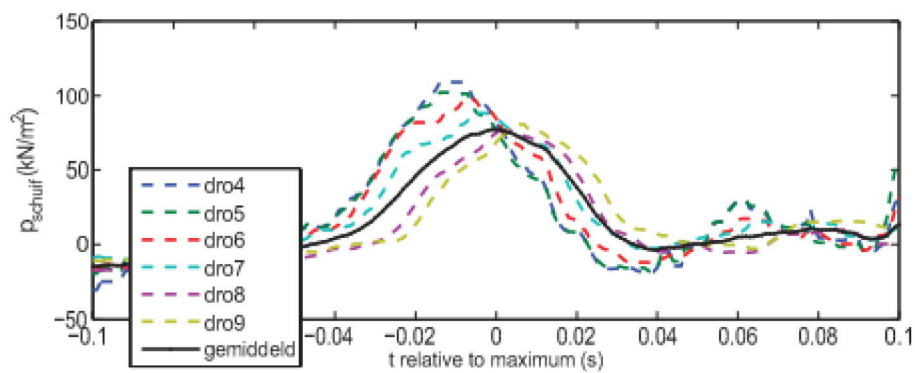
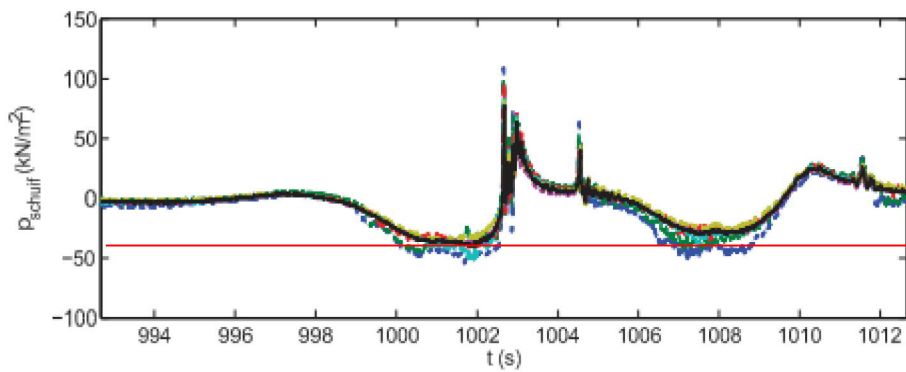
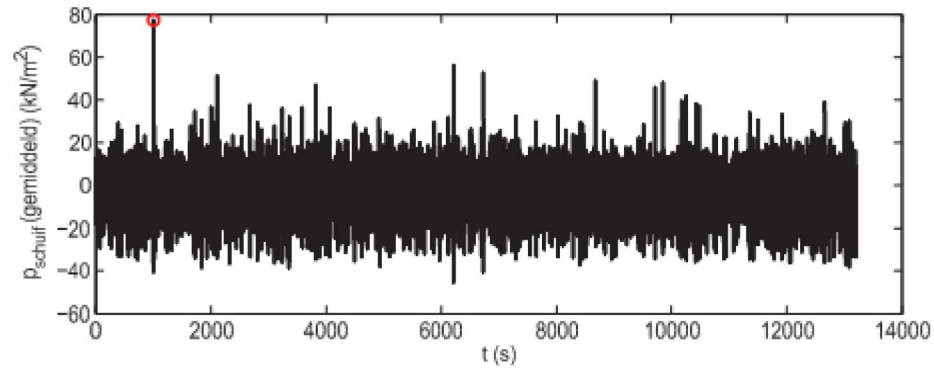
In overleg met RWS (30-04-2021) is vastgesteld dat de afleiding van de kracht op de noordschuif met de nieuwe geometrie zoals in deze memo gerapporteerd en besproken is correct is. Om toch nog wat extra comfort te hebben wil RWS dat we in de berekeningen uitgaan van 350 kN/m voor de noord schuif van KWZ, deze waarden zullen we meenemen in het ontwerp.

Bijlage 1. tijdsignaal uit modeltestrapport



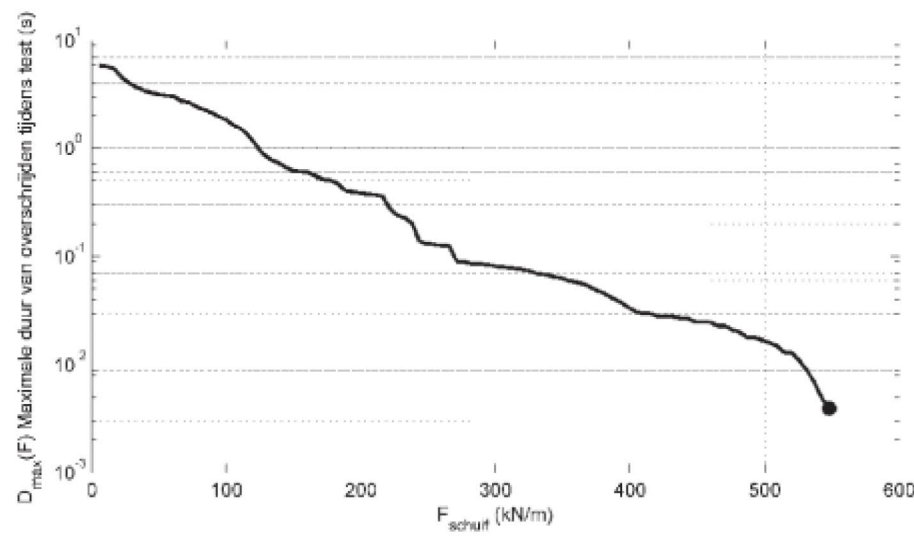
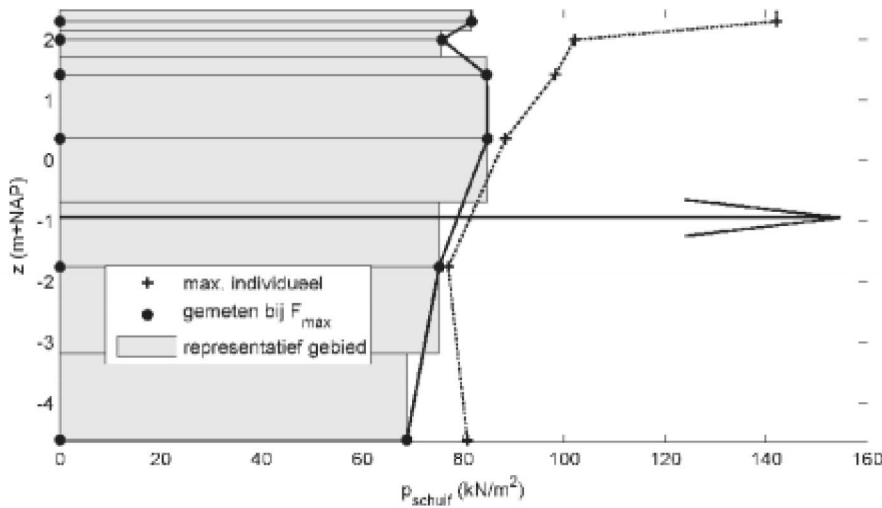
tijdsignaal van druken op schuif	schuif	1220263
	Test K2, met fietspad	
Deltares	Noorderschuif	Fig. B.20d



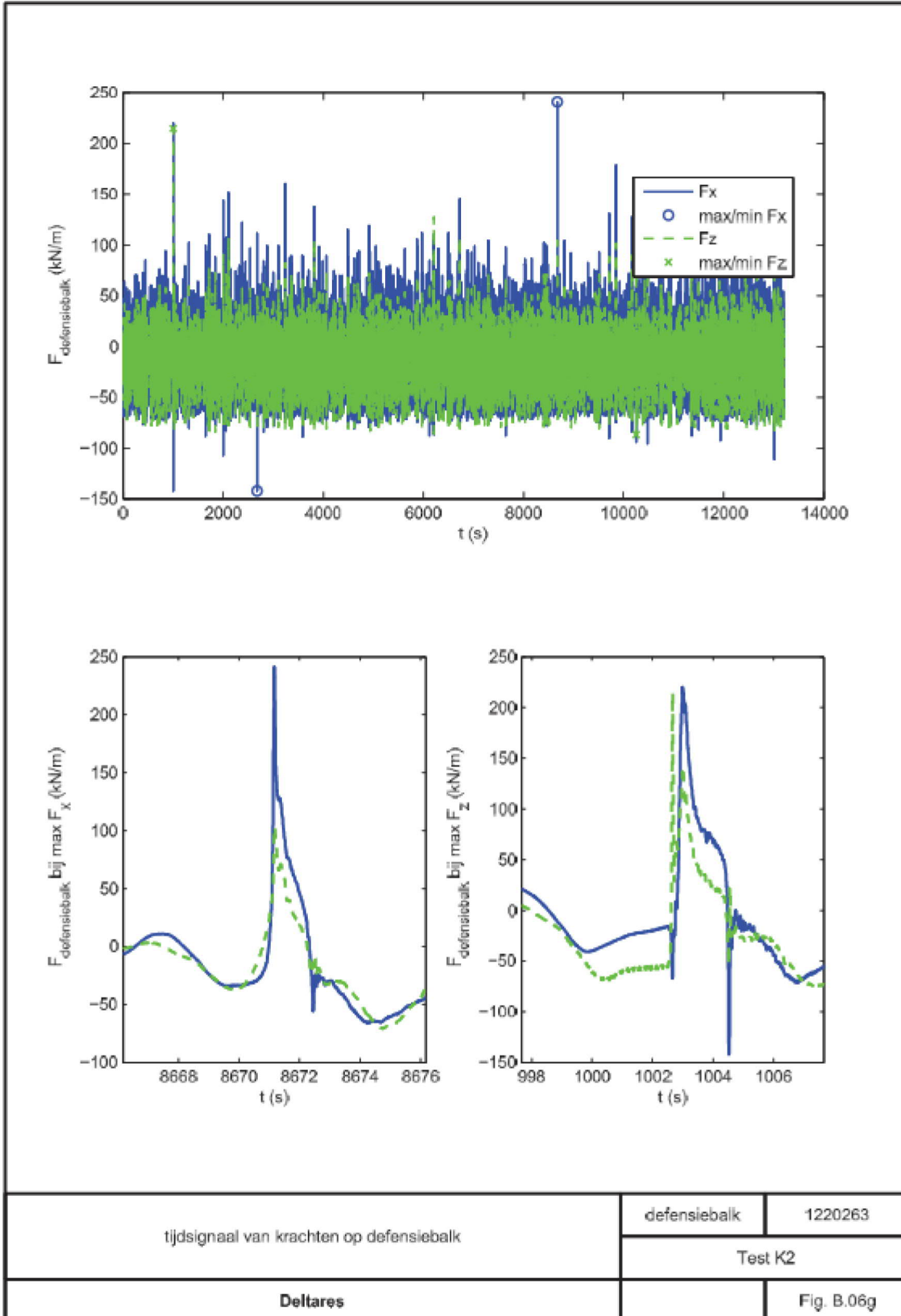


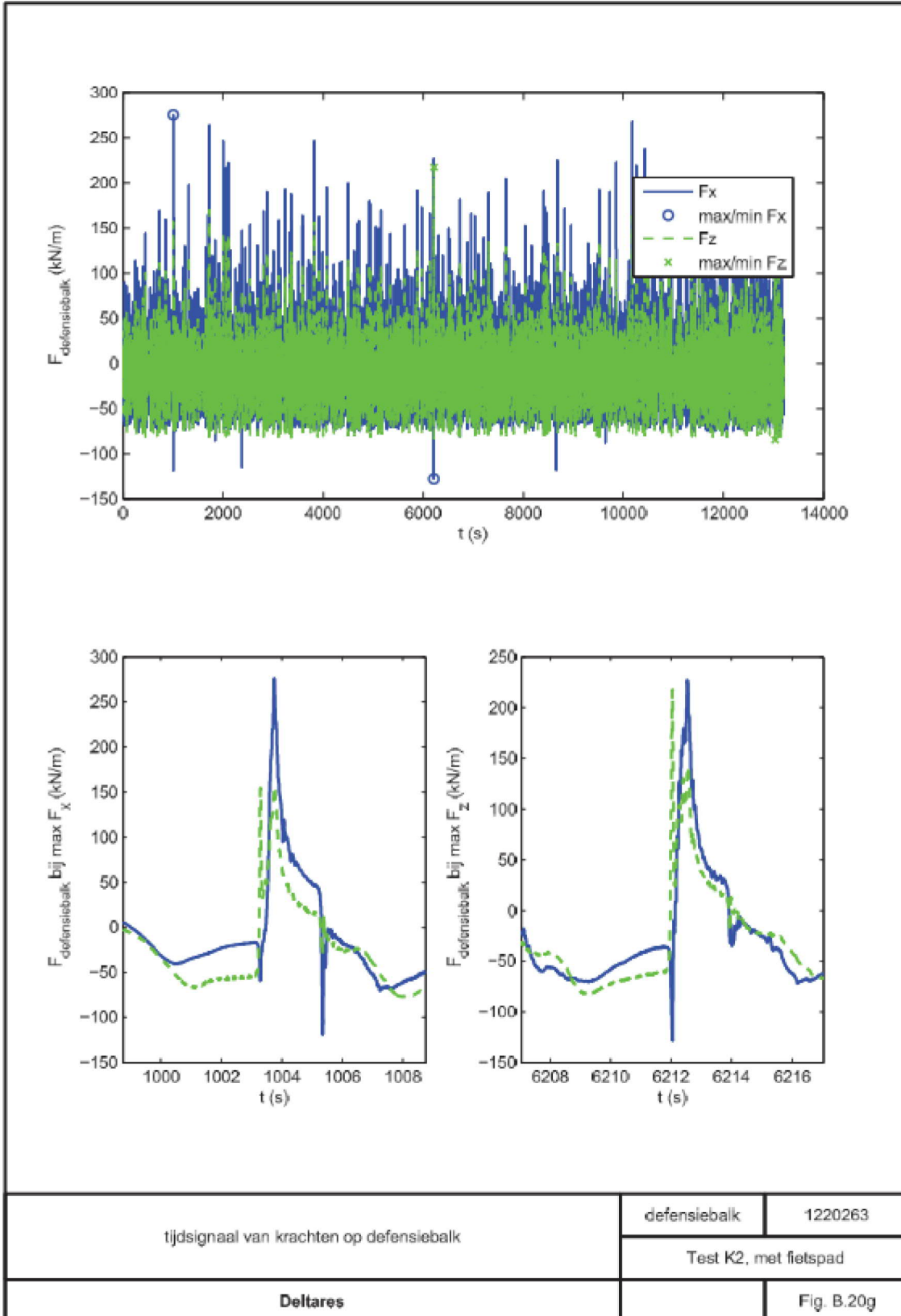
tijdsignaal van druken op schuif	schuif	1220263
	Test K2	
Deltares	Noorderschuif	Fig. B.06d

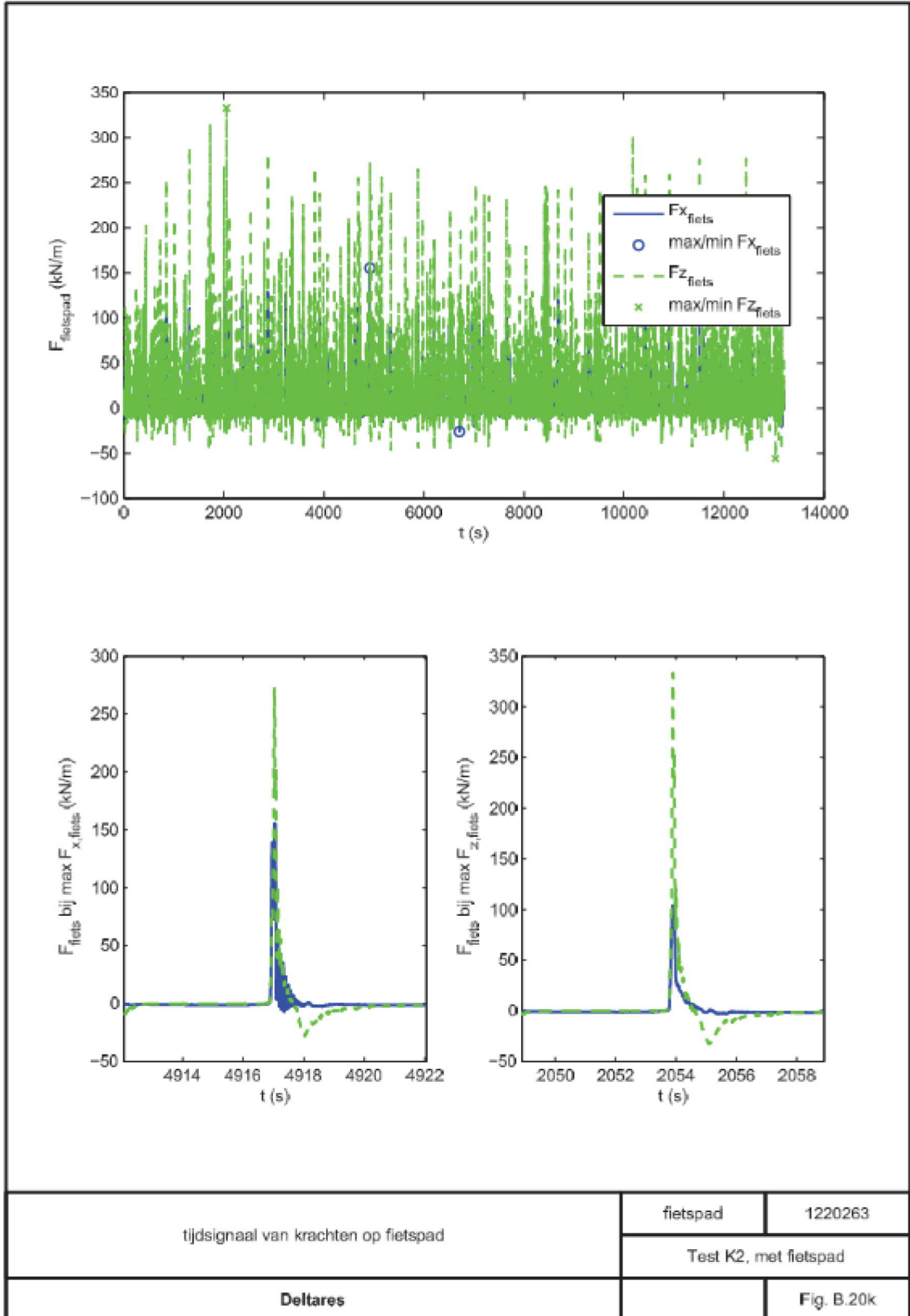
Datum 04-mei-2021
 Documentnr. ASD-NOT-2527
 Blad 32 van 46



drukverdeling bij maximum en kracht-duur diagram van kracht op schuif	schuif	1220263
	Test K2	
Deltares	Noorderschuif	Fig. B.06e

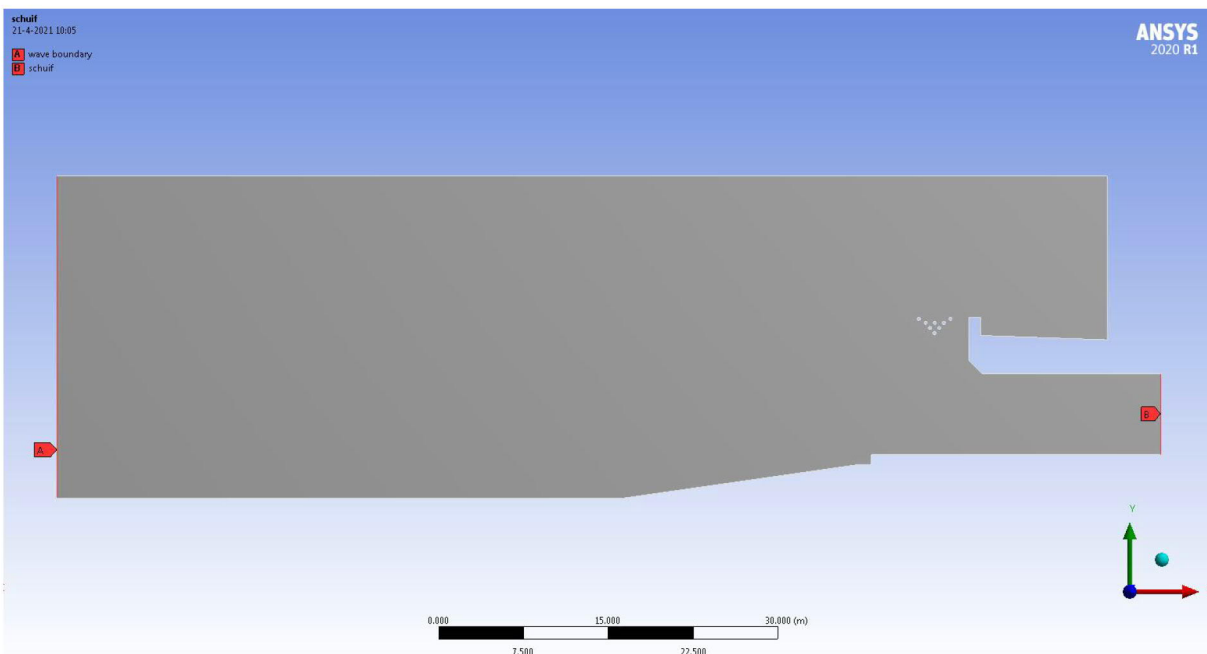






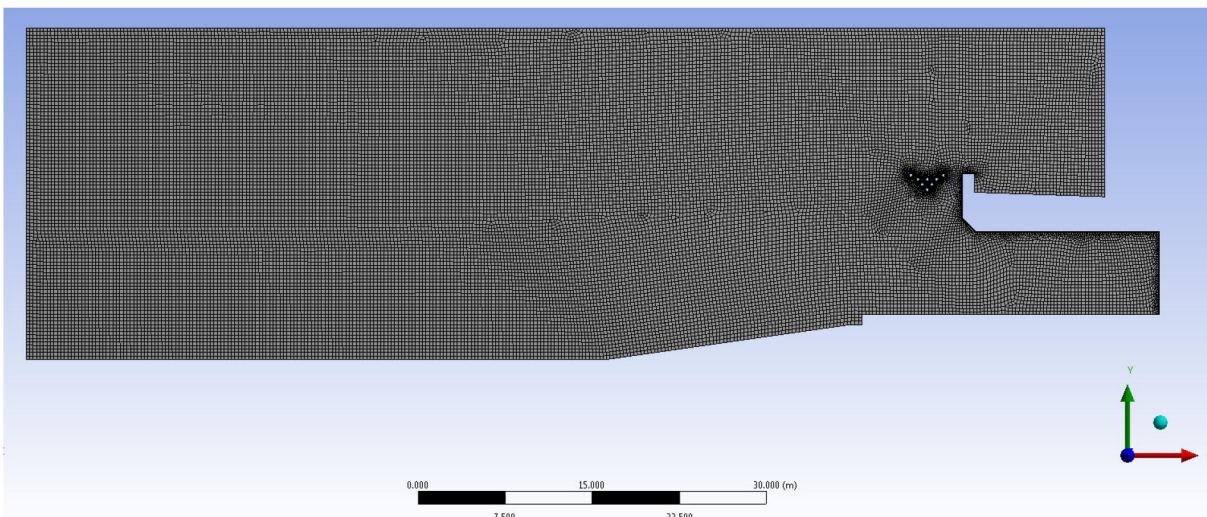
Bijlage 2. Korte beschouwing belasting zuidschiuf

Op verzoek van RWS is een extra simulatie gedaan om te laten zien dat met CFD de belasting op de Zuidschuif inderdaad hoger is dan op de in deze notitie bepaald belasting op de Noordschuif (zoals het geval is door de voorgeschreven belasting op de zuidschiuf in de belastingsnota). Hiervoor is de geometrie van het model van de noordschiuf 15 m naar achter geschoven, Figuur 34.



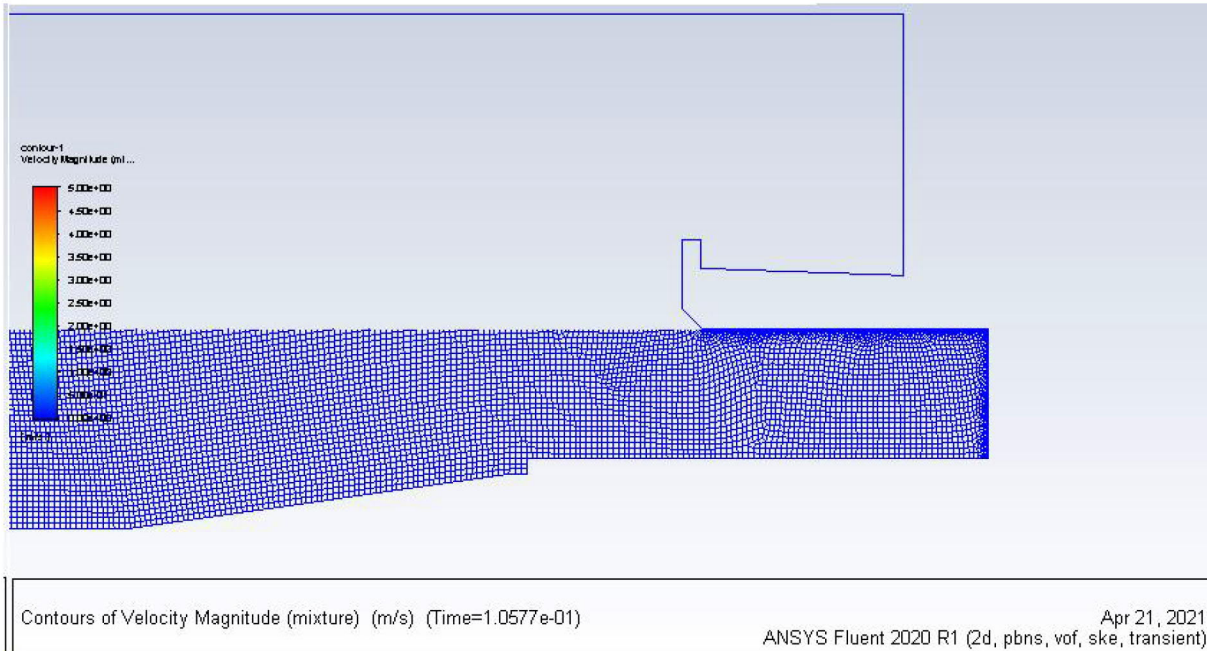
Figuur 34: geometrie bepalen belastingen Zuidschuif

Het rekenrooster is gelijk gehouden aan de modellen voor de noordschiuf, zie Figuur 35.



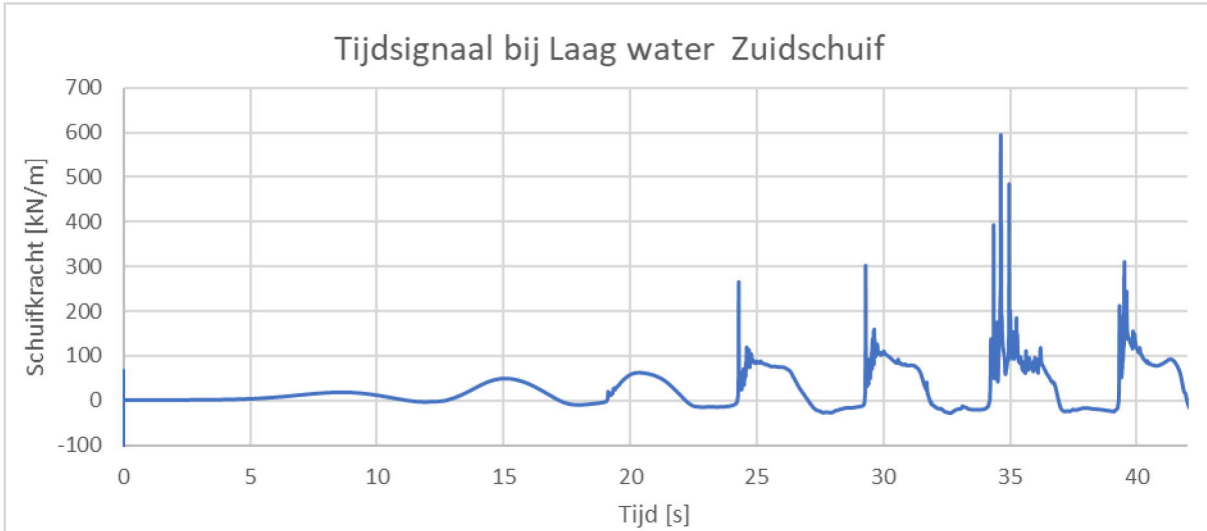
Figuur 35: rekenrooster

Voor deze simulatie is een waterstand van +2,5m NAP gebruikt met een harmonische golf met een hoogte van 3,17 m ($1,8 * H_s$) en een periode van 5,0 s.

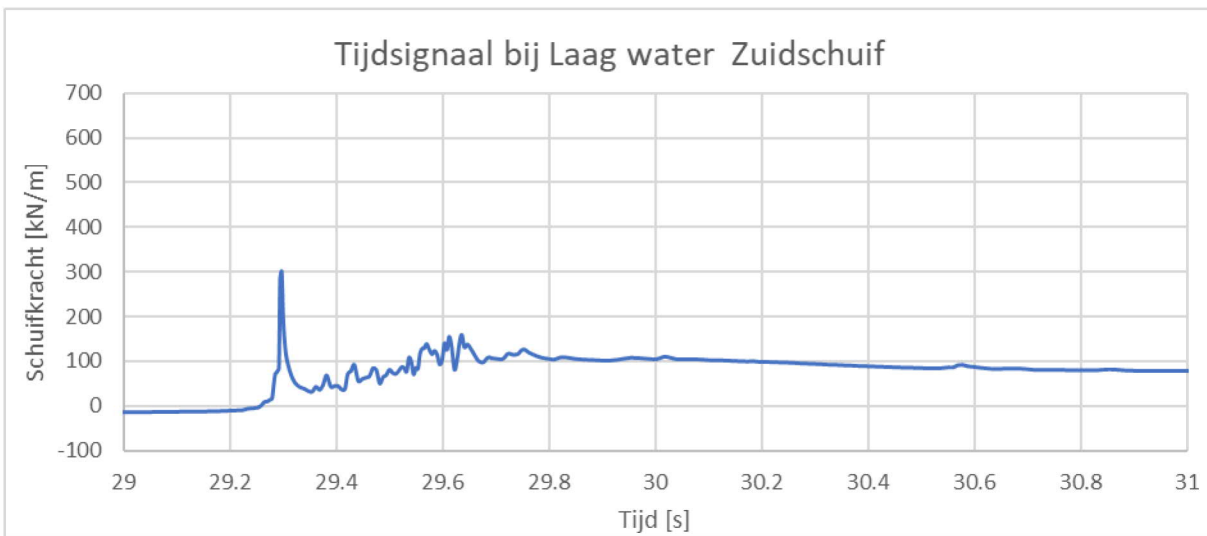


Figuur 36: waterstand start simulatie, gelijk aan onderkant brug

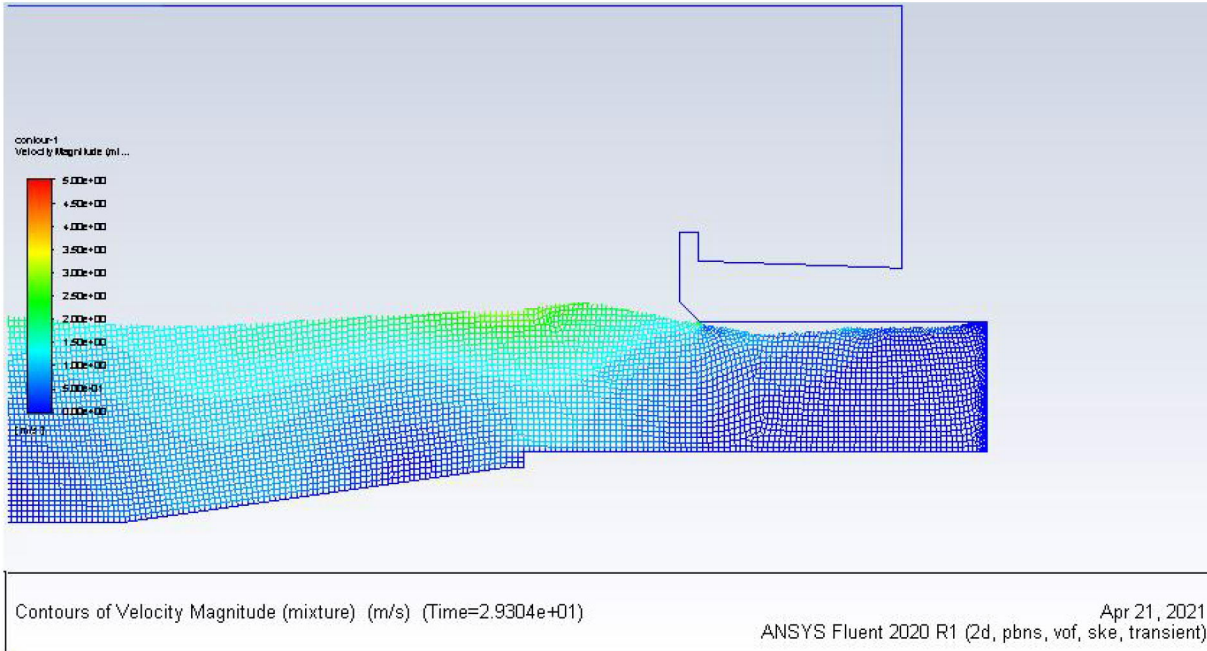
In de simulatie zien we nadat de golven tot ontwikkeling zijn gekomen de golfklappen op de schuif ontstaan. Hier zijn duidelijke 2 verschillende klappen te identificeren, de klap rond 24 en 29 en 34 en 39 seconden zijn belastingen ten gevolge van een klap direct voor de schuif. De belastingen rond de 35 seconden zijn belastingen van klappen voorin de koker die zich als een drukgolf naar achter verplaatsen. Deze twee verschillende klappen zijn ook geïdentificeerd in het parametrische golfklap model ASD-RAP-0914. Zonder nu direct de 1 op 1 waarde met de fysische model testen te doen toont dit aan dat de hogere belastingen voor de Zuidschuif uit de modeltesten niet in twijfel moeten worden getrokken, maar dat de aanpassing in geometrie er wel degelijk in resulteert dat de belasting op de noordschuif flink naar beneden gaat in verhouding tot de model test met defensiebalk en dichte fietsbrug.



Figuur 37: tijdsverloop krachten op zuidschiif

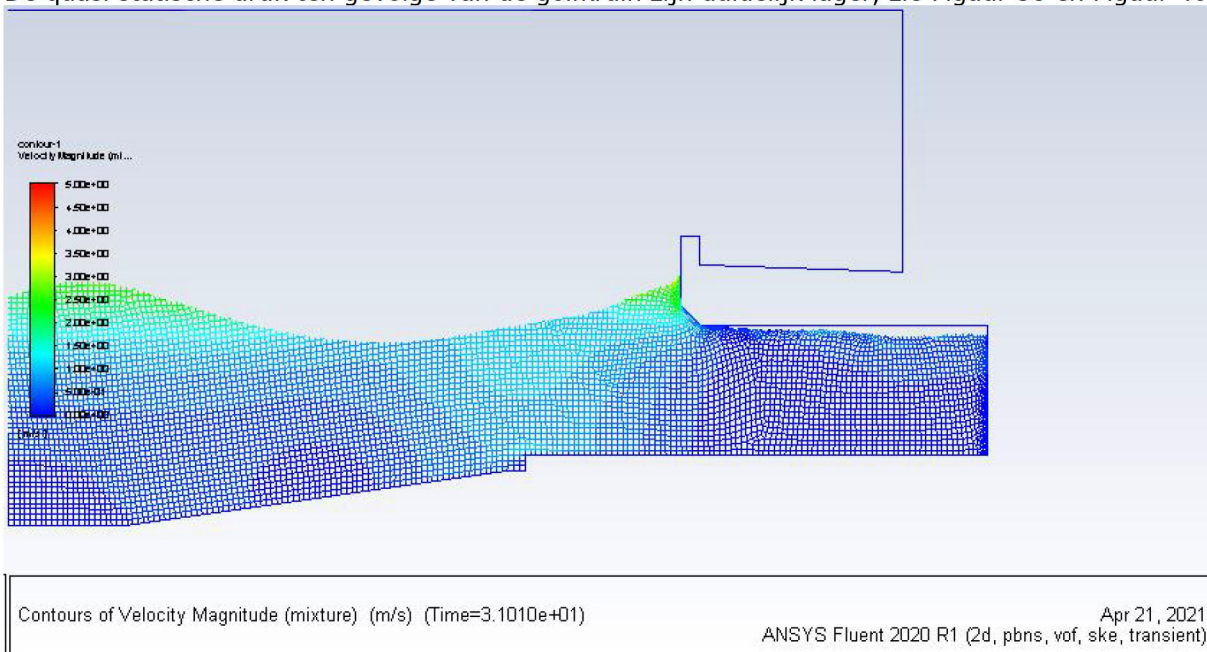


Figuur 38: belasting ten gevolge van klap direct voor de schuif

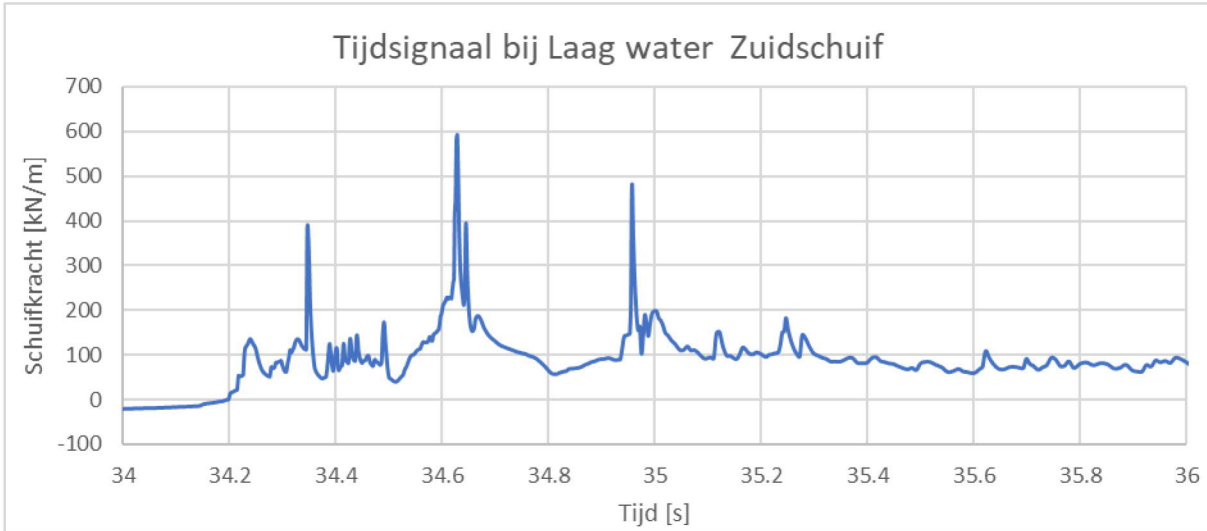


Figuur 39: waterstand ten tijde van klap direct voor de schuif (T = 29,3 s)

De quasi statische druk ten gevolge van de golfkruin zijn duidelijk lager, zie Figuur 38 en Figuur 40



Figuur 40: waterstand ten tijde van maximale waterstand tegen bovenbalk (T= 31,0s)

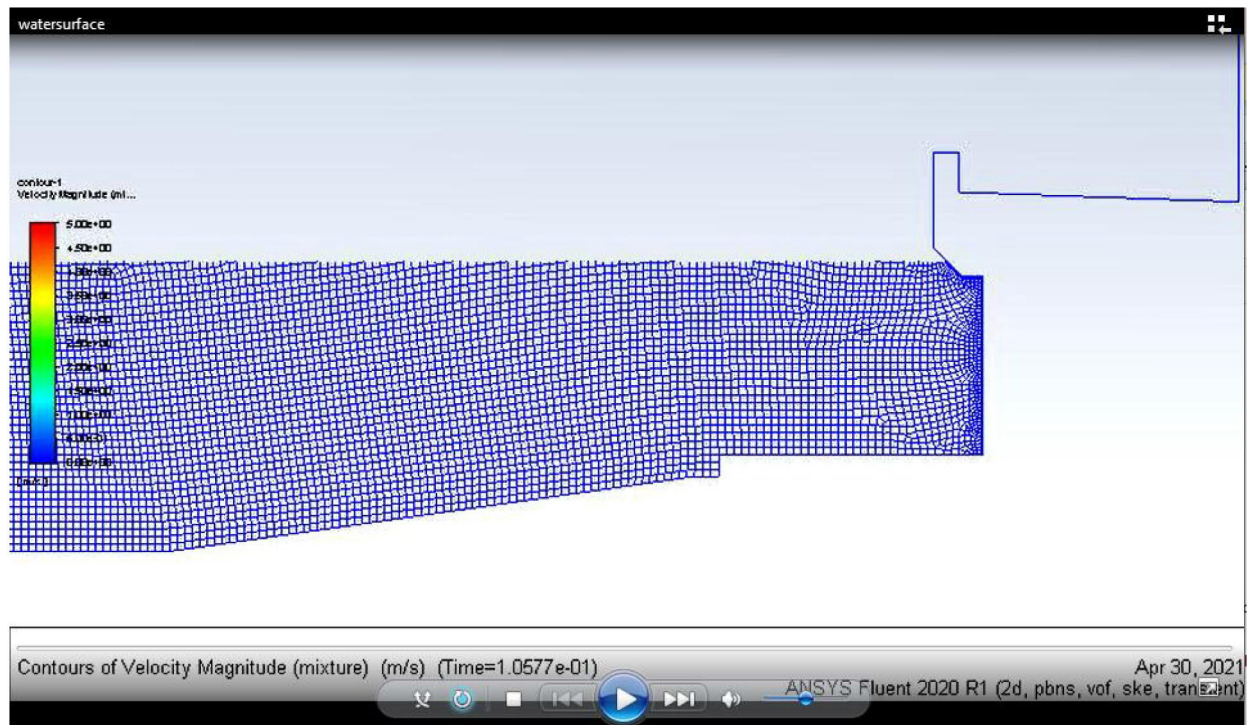


Figuur 41: golfklappen voorin die als druk door de koker migreren in de koken

Bijlage 3. Korte beschouwing midden waterstand

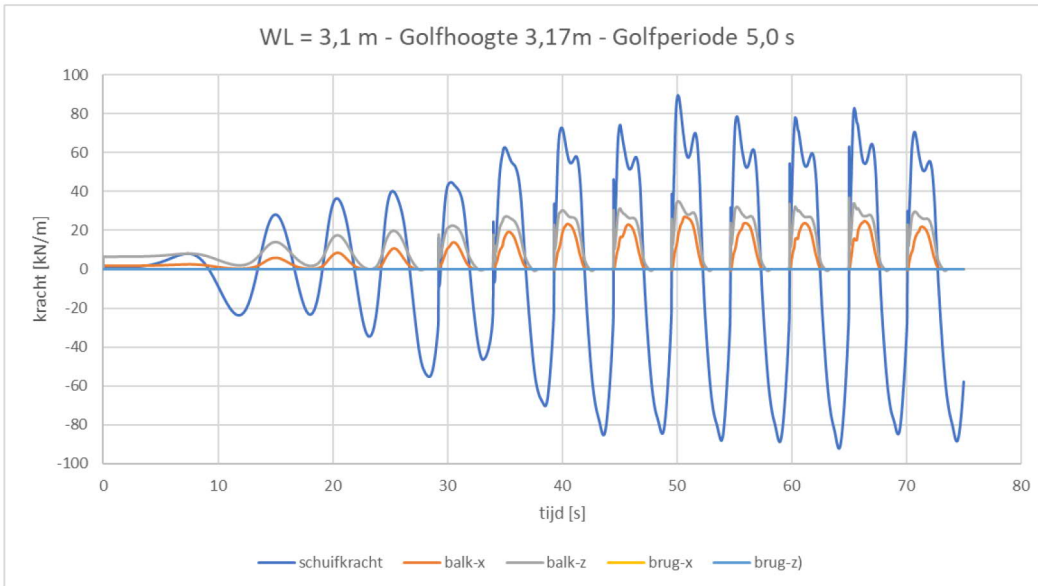
Op verzoek van RWS is een extra simulatie gedaan om te laten zien dat met CFD de belasting op de bovenbalk en schuif bij een midden waterstand niet maatgevend wordt. Hiervoor is de geometrie niet aangepast, alleen de waterstand is verhoogd tot +3,1m NAP (halverwege schuine vlak bovenbalk). De golf condities zijn gelijk gehouden aan die van laag water (waren geen andere condities beschikbaar, maar eventuele onderschatting zal gering zijn en geen ander krachtsprincipe opleveren).

De golfhoogte is 3,17 m ($1,8 * H_s$) en een periode van 5,0 s.

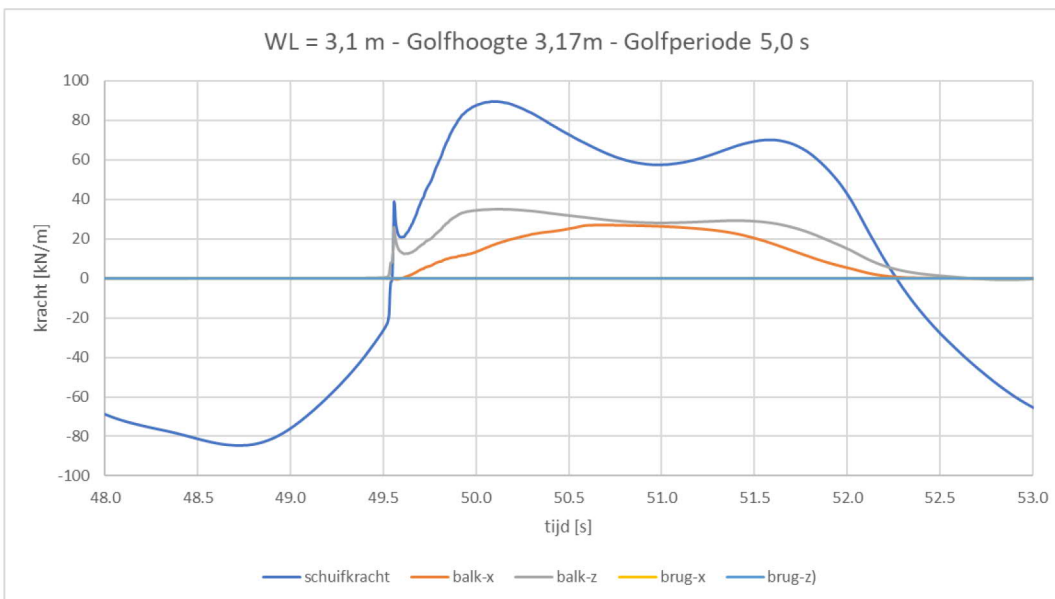


Figuur 42: waterstand start simulatie, gelijk aan midden schuin vlak bovenbalk

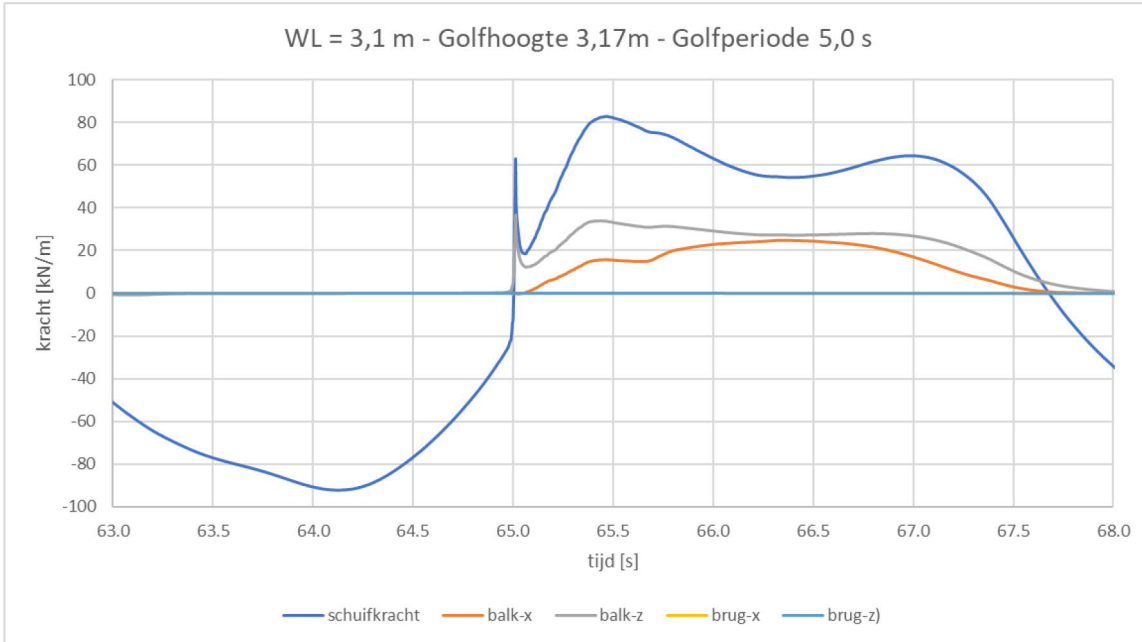
In de simulatie zien we nadat de golven tot ontwikkeling zijn gekomen de golfklappen op de onderkant van de bovenbalk (horizontale vlak), vergelijkbaar met de laagwater simulatie beschreven in sectie 6.2. Verder zien we de maximale 'quasi' statische belasting op het moment dat het water langs het schuine vlak tegen de golf in omhoog gaat, en niet bij de maximale waterstand (vergelijkbaar bij de laagwater conditie). Het hele tijdsignaal is weergegeven in Figuur 43 en het krachtverloop van de golf met maximale kracht in weergegeven in Figuur 44. De maximale klap belasting wordt gevonden bij de golf rond 65 s, zie Figuur 45. Om de klap op de bovenbalk te illustreren is de golf rond 34 s gebruikt. Dit is gedaan omdat die klap maar heel even (paar honderdste seconde) bestaat en de druk figuur en water oppervlak om de 0,1 s weggeschreven is. Bij 34,0 hebben we de klap in deze uitvoer precies 'gevangen'.



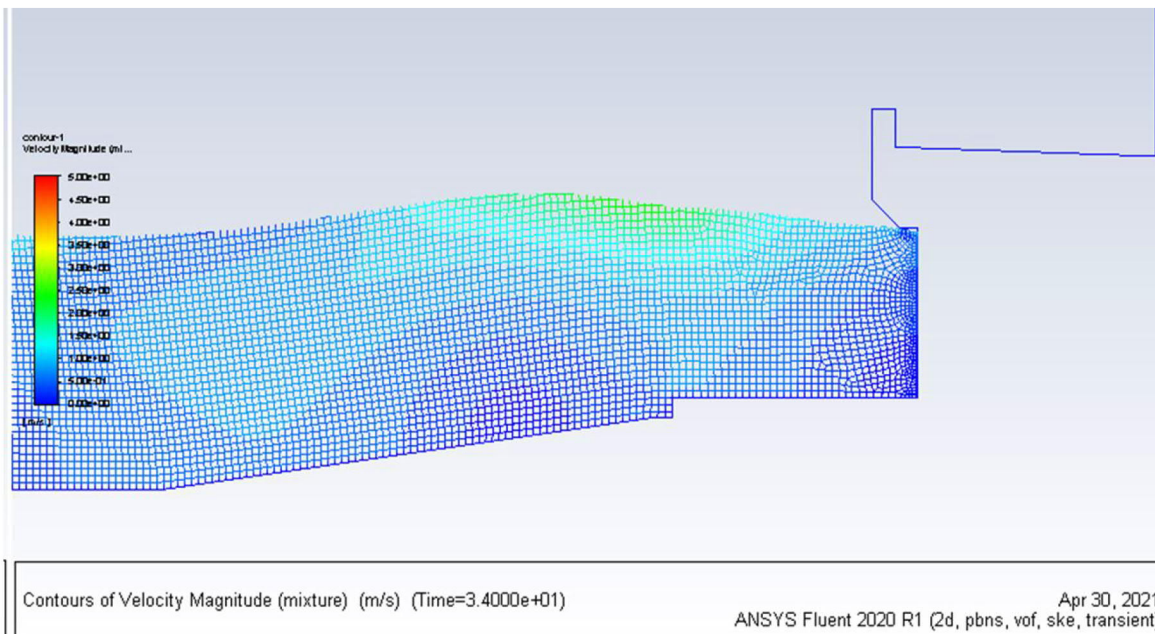
Figuur 43: tijdsverloop krachten



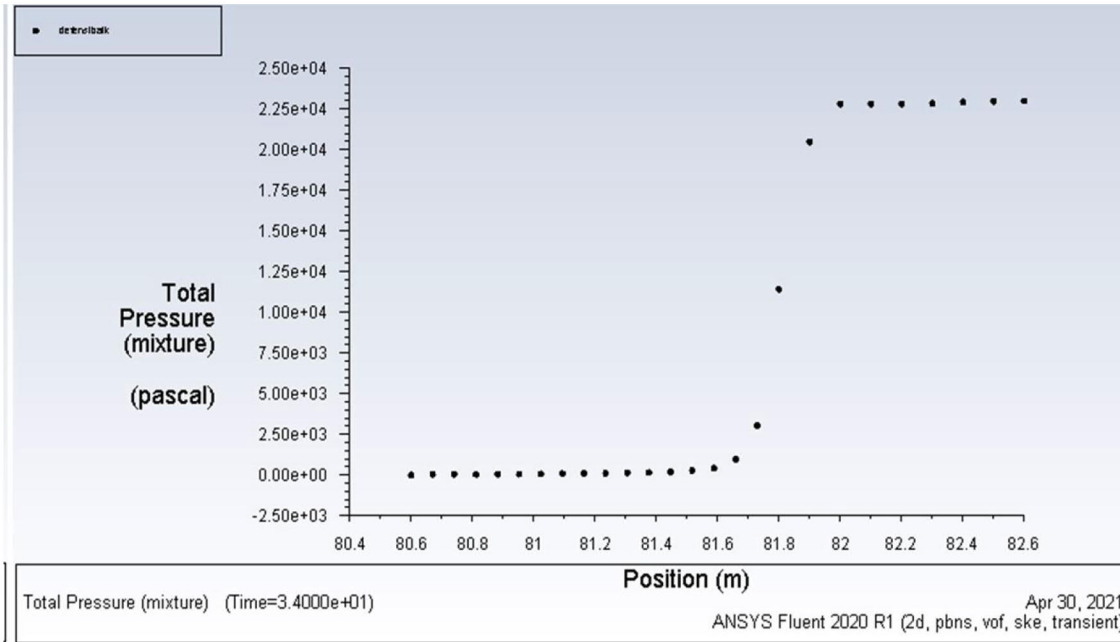
Figuur 44: maximale belasting



Figuur 45: maximale golfklap belasting (T=65,0 s)



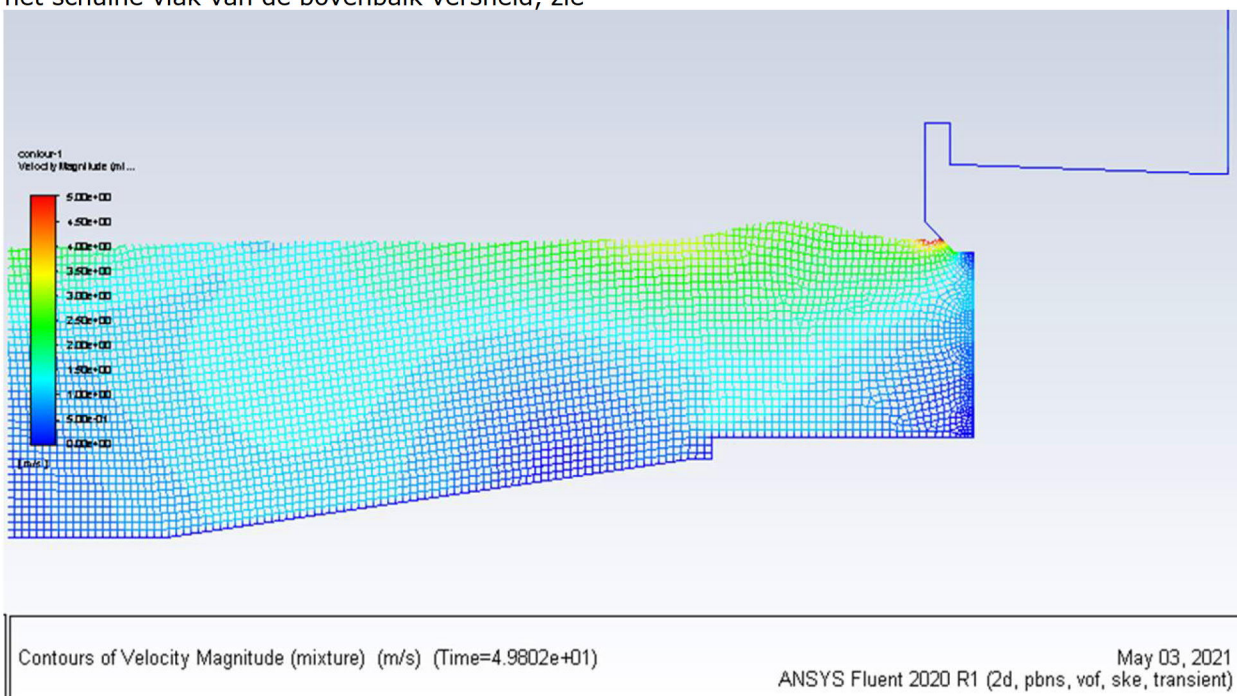
Figuur 46: waterstand ten tijde van klap direct op de bovenbalk (T = 34,0 s)



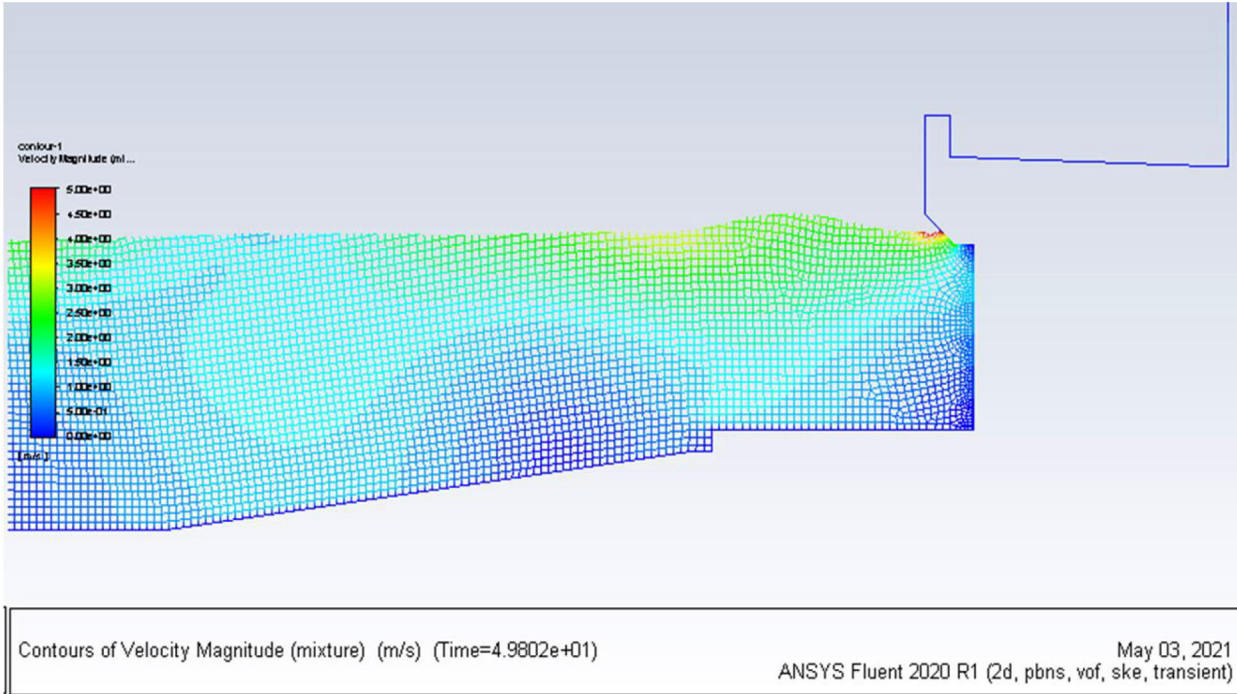
Figuur 47: druk op onderkant bovenbalk (81,8 tot 82,6 m is horizontale onderkant bovenbalk, 80,6 tot 81,8 m is schuine vlak)

De golf van 65 seconden zal hetzelfde beeld geven als Figuur 45 van de golf bij 34,0 s alleen op basis van de gevonden kracht zal de druk dan ongeveer 40 kPa zijn.

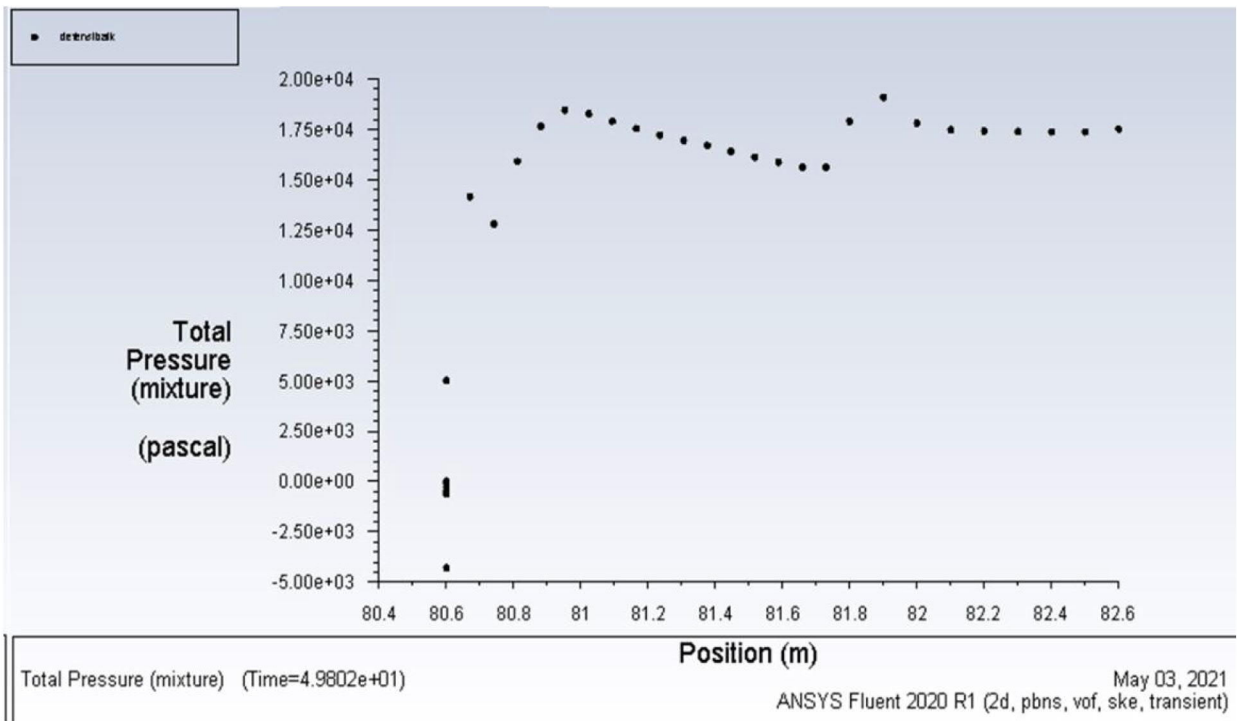
De maximale kracht op de bovenbalk en schuif wordt gevonden op het moment dat het water langs het schuine vlak van de bovenbalk versneld, zie



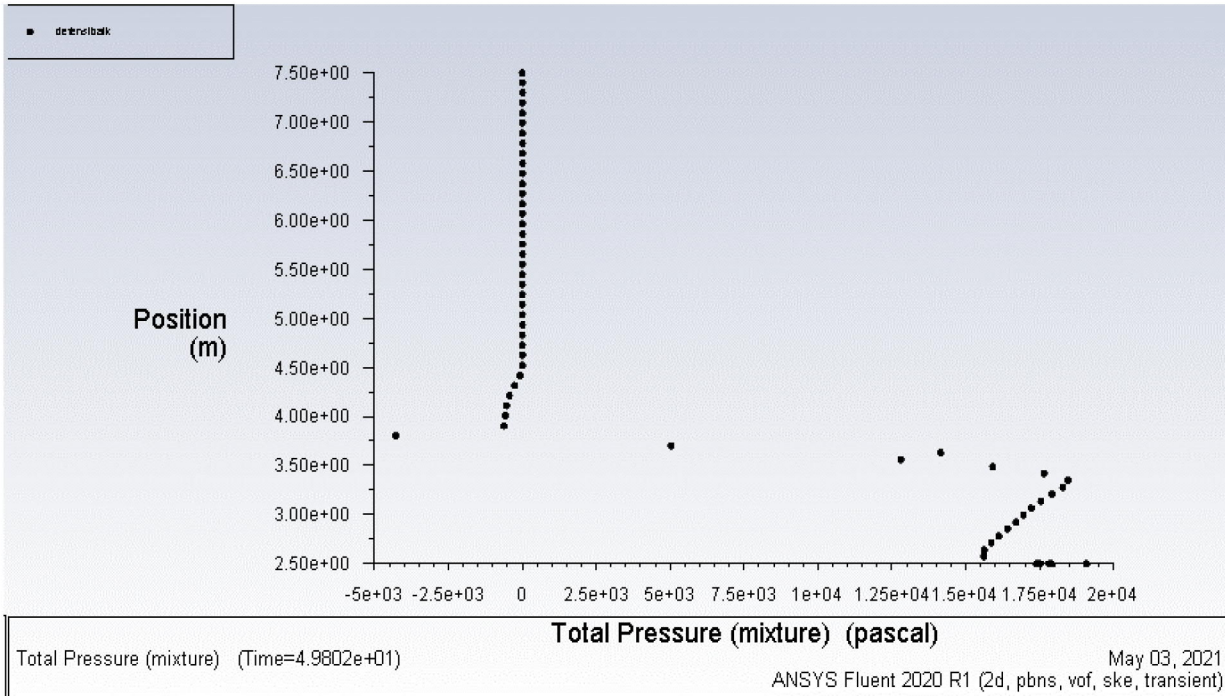
Figuur 48. De druk verdelingen op de bovenbalk en schuif zijn weergegeven in Figuur 47



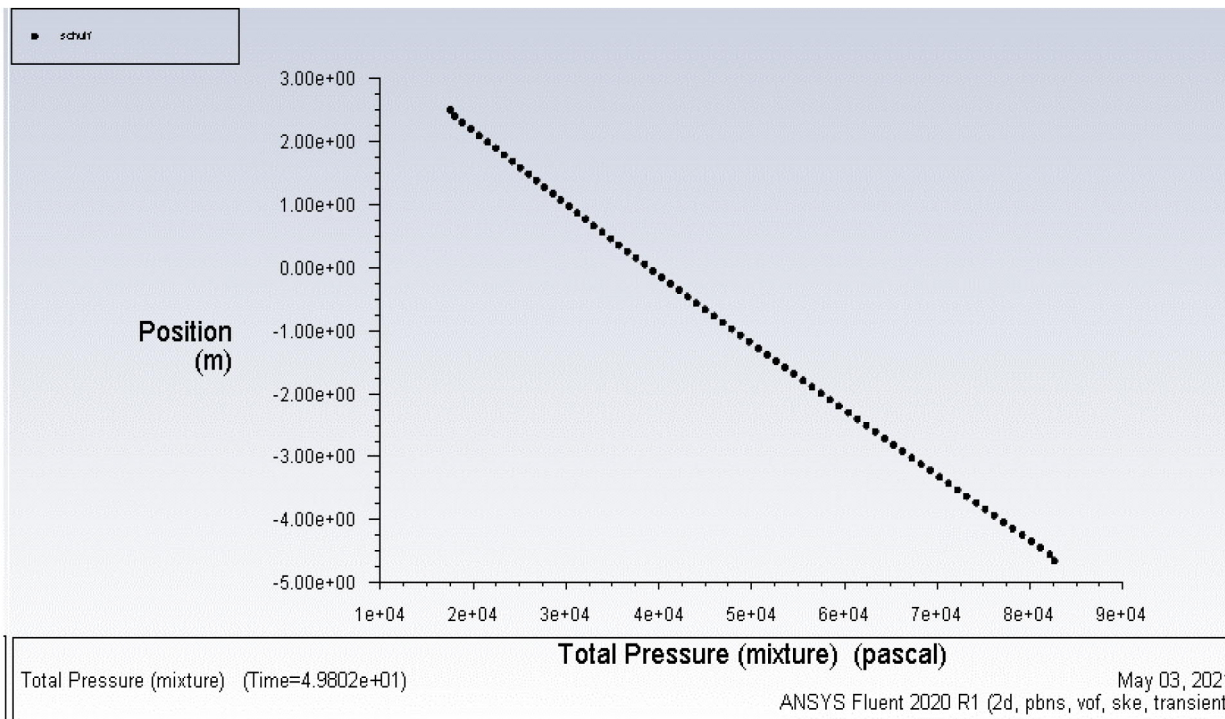
Figuur 48: waterstand ten tijde van maximale kracht op schuif en bovenbalk (T= 49,8s)



Figuur 49: druk op verticale vlak bovenbalk (T= 49,8s)



Figuur 50: druk op horizontale vlak bovenbalk (T= 49,8s)



Figuur 51: druk op schuif inclusief hydrostatische druk (T= 49,8s)