

Validatie parametrisch golfklap model doormiddel van CFD berekeningen

Project Afsluitdijk






Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud
Zaaknummer: 31091279

Documentnummer: ASD-RAP-928
Revisie: A
Status: Concept
Datum: 22-jul-2020

Werkpakket: A.15.03-Taskforce Hydraulica
Object: 1.05

© Niets uit dit rapport en / of dit ontwerp mag worden vereenvoudigd, openbaar gemaakt en / of overhandigd aan derden, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van LeveU EPC.

Opgesteld door:	Gecontroleerd door:	Vrijgegeven door:
22.07.2020 Paraaf: 	22.07.2020 Paraaf: 	22.07. Paraaf: 

Revisie	Datum	Toelichting
0.01	11-02-2020	Concept
0.02	19-05-2020	Intern commentaar verwerkt
0.03	15-07-2020	Commentaar RWS verwerkt
A	22-07-2020	Definitief

Beheer: De meest recente revisie in het DMS is geldend.

Managementsamenvatting

De golfklappen op dak en schuif van de spuikokers zijn gesimuleerd met een CFD model. Deze modellering heeft als doel onderbouwing te geven aan de methodiek waarmee golfklap belastingen worden uitgerekend. Golfklap belastingen worden voor het ontwerp met een parametrisch model (PM) bepaald. Voor een aantal validatie cases zijn golfklappen op de NSM met een 2D CFD model gesimuleerd. De uitkomsten van de CFD simulaties zijn beschreven in dit document.

- Case 1a: Lage waterstand (± 0.0 m NAP) en niet samendrukbare lucht
- Case 1b: Lage waterstand (± 0.0 m NAP) en samendrukbare lucht
- Case 2a: Hoge waterstand (+1.0 m NAP) en niet samendrukbare lucht
- Case 2b: Hoge waterstand (+1.0 m NAP) en samendrukbare lucht

Uit de vergelijking van PM en CFD resultaten is geconcludeerd:

- Impuls op de dak secties: PM geeft een conservatieve inschatting van de impuls, de impuls wordt mogelijk met een factor 1.25 – 3 overschat.
- Verticale golfkracht op de dak secties: PM geeft een conservatieve inschatting van de golf kracht. De kracht op dak secties 1 en 2 wordt mogelijk overschat met een factor 1.25 – 3; de kracht op dak sectie 3 wordt waarschijnlijk nog meer overschat.
- Horizontale golfkracht op de schuif: PM geeft een conservatieve inschatting van de golf kracht, de golfkracht wordt mogelijk met een factor 3 overschat.
- Impact lengte: PM geeft alleen maar een grove indicatie van de impact lengte op de dak secties. Door luchtopsluiting onder de dak secties kunnen de impact lengtes 2 keer langer zijn dan door het PM voorspeld.
- Tijdsduur van de impact: PM overschat de tijdsduur van de impact op de dak secties ongeveer met een factor 2.
- Druk translatie van de dak secties naar de schuif: PM overschat de druk translatie van dak secties 1 en 2. Daardoor worden de uit een golfklap op dak secties 1 en 2 resulterende krachten op de schuif overschat. PM onderschat de druk translatie van dak sectie 3. Dit wordt gecompenseerd door een overschatting van de golfklap op dak sectie 3 waardoor de resulterende krachten op de schuif niet worden onderschat.

Uit de vergelijking van PM en CFD resultaten van 2 scenario's blijkt dat het PM realistische en in veel gevallen conservatieve golfkrachten op dak en schuif voorspelt.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
1 Algemeen	5
1.1 Project	5
1.2 Doel van het document	5
1.3 Scope van het document	5
1.4 Leeswijzer van het document	5
2 Randvoorwaarden en uitgangspunten	6
2.1 Projectspecifieke documenten (bindend).....	6
2.2 Projectspecifieke documenten (niet-bindend)	6
2.3 Normen en richtlijnen.....	6
2.4 Randvoorwaarden en uitgangspunten.....	6
2.5 Software	6
3 Validatie methodiek.....	7
3.1 Geometrie van de constructie.....	7
3.2 Golfcondities	7
3.3 Modelopzet	8
3.4 Validatie aspecten	9
3.4.1 Impact lengte	9
3.4.2 Druk translatie van impactlocatie naar schuif	9
3.4.3 Impuls verloop (duur en vorm)	9
3.4.4 Effect samendrukbare lucht	9
3.5 Validatie cases	9
4 Resultaten	10
4.1 Parametrisch model	10
4.2 CFD-resultaten	10
4.2.1 Impact duur.....	12
4.2.2 Impact lengte	12
4.2.3 Druk translatie van impactlocatie naar schuif	13
4.2.4 Effect samendrukbare lucht	13
4.3 Vergelijk parametrisch model en CFD model	14
4.3.1 Golfkracht, druk en impuls.....	15
4.3.2 Impact lengte	18
4.3.3 Impact duur.....	19
4.3.4 Druk translatie van impactlocatie naar schuif	19
4.3.5 Conclusie.....	20
CFD-resultaten	21

1 Algemeen

1.1 Project

De Afsluitdijk vormt de scheiding tussen het IJsselmeer en de Waddenzee, is een icoon van de Nederlandse waterbouw en is aangelegd in 1932. De primaire functies van de afsluitdijk zijn het verzorgen van de waterveiligheid vanuit de Waddenzee en waterafvoer vanaf het IJsselmeer en als bijkomende functie het verzorgen van het wegverkeer tussen de provincies Noord-Holland en Friesland en voor scheepvaartverkeer tussen de Waddenzee en het IJsselmeer.

Vanwege het stijgen van de zeespiegel en het vergroten van de afvoercapaciteit dient de Afsluitdijk te worden versterkt zoals aangegeven in Document "Rijksinpassingsplan Afsluitdijk" de datum januari 2016.

Voor deze versterking treedt het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat, Grote Projecten en Onderhoud op als opdrachtgever en Level als Opdrachtnemer.

1.2 Doel van het document

Dit berekeningsrapport heeft als doel onderbouwing te geven aan de methodiek waarmee golfklap belastingen worden uitgerekend. Golfklap belastingen worden voor het ontwerp met een parameterisch model (PM) bepaald. Voor een aantal validatie cases zijn golfklappen met een 2D CFD model gesimuleerd. De uitkomsten van de CFD simulaties zijn beschreven in dit document.

1.3 Scope van het document

Dit rapport behandelt de golfindringing in een spuikoker (NSM) en de resulterende golfklappen op dak en schuif. De scope beperkt zich tot 2D simulaties (in een langsdoorsnede van de koker) met regelmatige golven (maximale golfhoogte van het ontwerp golfspectrum) voor een aantal validatie cases (2 condities voor NSM).

1.4 Leeswijzer van het document

In de onderstaande tabel wordt aangegeven wat in welke hoofdstukken wordt beschreven. Deze hoofdstukken en paragrafen geven invulling aan de scope van het document uiteengezet in paragraaf 1.3.

Tabel 1-1: Leeswijzer

Hoofdstuk	Status	Beschrijving
H1 Algemeen	Gereed	Inleiding van het rapport.
H2 Randvoorwaarden en uitgangspunten	Gereed	Uitgangspunten van de golfklap validatie
H3 Validatie methodiek	Gereed	Aanpak van de golfklap validatie
H4 Resultaten	Gereed	Samenvatting van de golfkrachten uit de CFD modellering
Bijlage	Gereed	Details van golfdruk en golfkrachten uit de CFD modellering

2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Dit rapport is een beschrijving en onderbouwing van ontwerponderdeel hydraulische belastingen en dan specifiek de golfklapbelasting. Voor randvoorwaarden en uitgangspunten met betrekking tot deze rapportage wordt in paragraaf 2.4 verwezen naar de verschillende uitgangspuntennota's/-rapporten die van belang zijn voor dit rapport.

2.1 Projectspecifieke documenten (bindend)

In de onderstaande tabel zijn de overige projectspecifieke bindende documenten gehanteerd in dit rapport weergegeven.

Tabel 2-1: Bindende project-specifieke documenten

Nr.	Document	Versie	Datum	Bindend
A.	Niet van toepassing	–	–	–

2.2 Projectspecifieke documenten (niet-bindend)

In de onderstaande tabel zijn de overige project-specifieke niet-bindende documenten gehanteerd in dit rapport weergegeven.

Tabel 2-2: Niet-bindende project-specifieke documenten

Nr.	Document	Versie	Datum	Bindend
B.	ASD-RAP-0914 – Model beschrijving Golfklap	B	19-02-2020	Nee

2.3 Normen en richtlijnen

In de onderstaande tabel zijn de overige normen en richtlijnen gehanteerd in deze berekeningsrapport weergegeven.

Tabel 2-3: Normen en Richtlijnen

Nr.	Document	Versie	Datum	Bindend
C.	Niet van toepassing	–	–	–

2.4 Randvoorwaarden en uitgangspunten

De randvoorwaarden en uitgangspunten van de CFD modellering zijn in sectie 3 van dit rapport beschreven.

2.5 Software

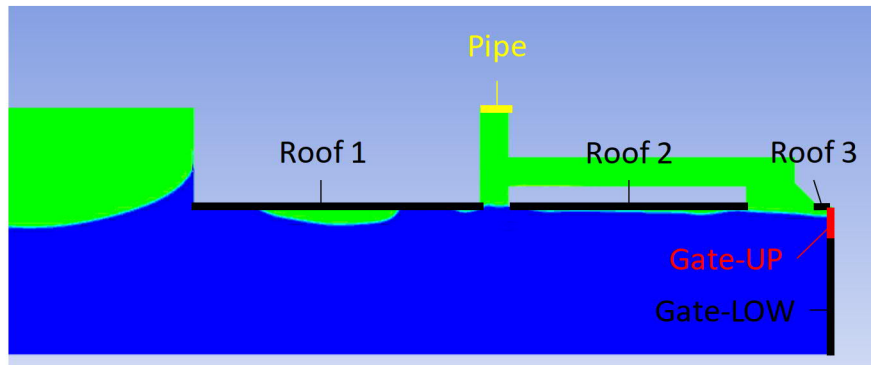
De software die gehanteerd is voor de CFD modellering is ANSYS Fluent (versie 19).

3 Validatie methodiek

Golfklappen op, dak en schuif van de nieuwe spuumiddelen (NSM) zijn door middel van numerieke modellering geanalyseerd. CFD modellering is uitgevoerd met ANSYS Fluent (versie 19).

3.1 Geometrie van de constructie

De geometrie van een NSM spuiukoker (langsdoorsnede) is weergegeven in Figuur 3-1. De bodem van de spuiukoker ligt op -6.55 m NAP. De geometrie van verschillende secties van het dak en van de schuif zijn aangegeven in Tabel 3-1.



Figuur 3-1: Langsdoorsnede door spuiukoker (NSM)

Tabel 3-1: Secties van NSM spuiukoker

	X-Pos. [m]	Z-Pos. [m NAP]	Lengte [m]
Dak sectie 1 (roof 1)	0.0 – 14.5	+1.0	14.50
Dak sectie 2 (roof 2)	16.0 – 28.05	+1.0	12.05
Dak sectie 3 (roof 3)	31.75 – 32.45	+1.0	0.70
Schuif laag (gate low)	32.45	-6.55 - ±0.0	6.55
Schuif hoog (gate up)	32.45	±0.0 - +1.0	1.00

3.2 Golfcondities

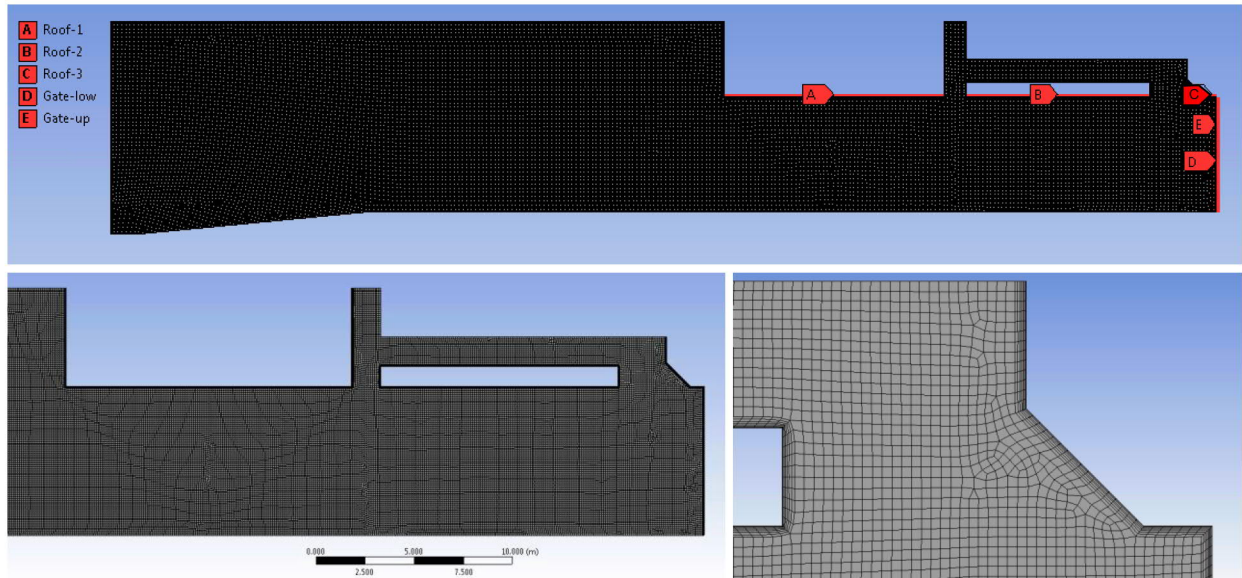
De golfklap simulaties zijn uitgevoerd met de ontwerp golf. Dit is de maximale golf in een ontwerpstorm die als regelmatige golf een aantal keren is gemodelleerd. Voor de simulaties is een ratio H_{max}/H_s aangehouden van 1.8. Deze ratio is hoger dan de met het model van Battjes & Groenendijk (2000) berekende golfhoogte ratio. De ontwerpcondities en de gemodelleerde golven zijn aangegeven in Tabel 3-2.

Tabel 3-2: Golfcondities van CFD golfklap simulaties 1/10.000 jaar IJsselmeerzijde

Structuur	No.	Water-stand [m NAP]	Golf spectrum				Gemodelleerde golven	
			H_s [m]	T_p [m]	H_{max} [m]	H_{max}/H_s [-]	H [m]	T [s]
NSM	1	±0.0	1.29	3.63	2.32	1.80	2.32	3.63
	2	+1.0	1.45	4.18	2.61	1.80	2.61	4.18

3.3 Modelopzet

De golfklap simulaties zijn uitgevoerd als 2D simulaties in een langsdoorsnede van de spuikoker. Het rekenrooster is weergegeven in Figuur 3-2. Voor simulaties is een rooster met rechthoek cellen toegepast (cel afmetingen 10×10 cm²). Langs de relevante modelranden (dak en schuif) zijn inflatielagen toegepast (5 lagen, initiële laag 13 mm en buitenste laag 26 mm). Het model omvat ca. 100,000 cellen.



Figuur 3-2: Rekenrooster van het NSM model

De volgende modelinstellingen zijn toegepast (modellen met incompressibele lucht (ICA) en met compressibele lucht (CPA)):

- Algemeen:
 - Assenstelsel x (horizontaal, positief naar rechts), z (verticaal, positief naar boven)
 - Pressure based, transient (zwaartekracht in z-richting, -9.81 m/s^2)
- Model:
 - Multiphase VOF model met open channel wave BC
 - Volume fraction parameters: Implicit (ICA) en explicit (CPA)
 - Sharp interface modelling (with interfacial anti-diffusion)
 - Turbulentie model k-epsilon (standard) met default settings
- Materialen:
 - Water: constante dichtheid, $1,000 \text{ kg/m}^3$
 - Lucht: constante dichtheid, $1,225 \text{ kg/m}^3$ (ICA) en ideaal gas (CPA)
- Randvoorwaarden:
 - Luchtrand (ambient): Luchtuitswisseling met omgeving (pressure outlet, operating pressure 101.325 kPa), zie Figuur 3-2
 - Golfrand (paddle): Golfopwekking (velocity inlet met open channel wave BC, shallow/intermediate waves, 5th order Stokes), zie Figuur 3-2
 - Dak en bodem NSM: Ruwheidshoogte 2 mm
 - Schuif NSM: Ruwheidshoogte 2 mm
- Solver:
 - PISO scheme (ICA en CPA)
 - Pressure: PRESTO!
 - Momentum: 2nd order upwind

- Volume fraction: Compressive (ICA) en Geo-reconstruct (CPA)
- Turbulent kinetic energy and energy dissipation rate: 1st order upwind
- Energy: 2nd order upwind
- Transient formulation: 1st order implicit
- Berekening:
 - Fixed time step (0.001 s), max. 50 iterations/time step

De simulaties omvatten een opstartfase van het model (de eersten 2 - 3 golven bij de schuif) en een simulatiefase (de volgende 3 - 4 golven). De maximale golfklap in de simulatiefase is vervolgens geanalyseerd.

3.4 Validatie aspecten

3.4.1 Impact lengte

De locatie van de golfklap op een dak sectie wordt bepaald uit de drukverdeling op het moment van de golfklap (waarbij ook de maximale druk optreedt).

3.4.2 Druk translatie van impactlocatie naar schuif

De druk translatie van de golfklap op een specifieke dak sectie naar de schuif wordt bepaald met de golfkracht op de schuif die tegelijk optreedt met de maximale druk/kracht op de desbetreffende dak sectie.

3.4.3 Impuls verloop (duur en vorm)

De karakteristieken van het impuls worden bepaald uit de tijdreeks van de kracht op een dak sectie en op de schuif. De tijdsduur van de door de golfklap veroorzaakte piek in de kracht-tijdsreeks wordt bepaald. Vervolgens wordt de impuls door krachtintegratie (over de tijd) bepaald.

3.4.4 Effect samendrukbare lucht

Het effect van compressibele lucht (t.o.v. niet compressibele lucht) op de golfklap en op de golfkrachten op dak en schuif wordt bepaald door middel van simulaties met identieke randvoorwaarden en met of incompressibele lucht (ICA) of compressibele lucht (CPA).

3.5 Validatie cases

De randvoorwaarden m.b.t. constructie (zie ook sectie 3.1), golfcondities (zie ook sectie 3.2) en luchteigenschappen (niet indrukbaar of indrukbaar) zijn samengevat in Tabel 3-3:

Randvoorwaarden van validatie cases Tabel 3-3.

Tabel 3-3: Randvoorwaarden van validatie cases

Structuur	Simulatie No.	Water-stand [m NAP]	Golven			Lucht
			H _s [m]	T _p [m]	H _{max} [m]	
NSM	1a	±0.0	1.29	3.63	2.32	Niet indrukbaar (ICA)
	1b	±0.0	1.29	3.63	2.32	Indrukbaar (CPA)
	2a	+1.0	1.45	4.18	2.61	Niet indrukbaar (ICA)
	2b	+1.0	1.45	4.18	2.61	Indrukbaar (CPA)

4 Resultaten

Dit hoofdstuk bevat een korte samenvatting van de resultaten (kracht, druk, impuls en impact lengte op dak en schuif) van het parametrische model (sectie 4.1) en van de CFD simulaties (sectie 4.2). Een vergelijking tussen PM en CFD resultaten volgt in sectie 4.3.

4.1 Parametrisch model

De met het parametrische model (PM) berekende golfimpuls op de dak secties van de NSM (voor de validatie cases volgens Tabel 3-3) zijn weergegeven in Tabel 4-1. Van de impuls worden vervolgens kracht, druk en impuls lengte afgeleid. Achtergrond, aannames en details van het rekenmodel zijn beschreven in Ref. [B]. Per dak sectie zijn aangegeven in Tabel 4-1:

- Lengte: De totale lengte van de dak sectie
- Impuls: De op basis van watermassa en snelheid met het PM berekende golfimpuls
- Verticale kracht: De uit de golfimpuls afgeleide verticale kracht op de dak sectie (uitgaand van een lineaire toe- en afname van de kracht met een totale tijdsduur van 0.1 s)
- Impact lengte: De lengte van het natte oppervlak van de dak sectie tijdens de golfklap (wordt afgeleid uit de geometrie van de golf met een maximum van 15% van de golflengte)
- Maximale druk: De uit de golfklap resulterende maximale druk op de dak sectie (wordt afgeleid van verticale kracht en impact lengte)
- Horizontale kracht: De uit de golfklap op het dak door druk translatie resulterende horizontale kracht op de schuif.

Voor validatie case 2 (met waterstand +1.0 m NAP) worden er geen golfklappen voorspeld op dak secties 2 en 3 (met onderkant dak op +1.0 m NAP).

Tabel 4-1: Met PM berekende krachten op dak secties van de NSM

Case	Constructie onderdeel	Lengte [m]	Impuls [kN s/m]	Vert. kracht [kN/m]	Impact lengte [m]	Maximale druk [kPa]	Horiz. kracht [kN/m]
NSM-1	Dak sectie 1	14.50	7.7	154	2.33	66	6.3
	Dak sectie 2	12.05	6.4	127	2.11	60	67.8
	Dak sectie 3	0.70	1.2	23	0.70	33	42.0
NSM-2	Dak sectie 1	14.50	23.3	466	3.89	120	10.8
	Dak sectie 2	12.05	–	–	–	–	–
	Dak sectie 3	0.70	–	–	–	–	–

4.2 CFD-resultaten

De met het CFD model berekende krachten op de dak secties en op de schuif van NSM (voor de validatie cases volgens Tabel 3-3) zijn weergegeven in Tabel 4-2 (met compressibele en incompressibele lucht). Per constructie onderdeel zijn aangegeven:

- Kracht: De uit de golfklap resulterende kracht op het constructie onderdeel
- Druk: De uit de golfklap resulterende maximale druk op het constructie onderdeel
- Kracht op schuif: De tegelijk met de golfklap op het dak optredende kracht op de schuif (exclusief de hydrostatische kracht die uit de waterdruk onder de waterlijn resulteert).
- Tijdsduur: De tijdsduur van de golfklap op het constructie onderdeel
- Impuls: De impuls van de golfklap (integraal van de kracht over de tijdsduur van de golfklap) op het constructie onderdeel
- Impuls op de schuif: Het integraal van de kracht op de schuif over de tijdsduur van de golfklap op een specifiek constructie onderdeel

Om onderscheid te maken tussen gemodelleerde golfbelasting van het CFD model en afgeleide golfbelasting van het CFD model wordt de volgende benaming gebruikt:

- Maximale golfbelasting: Met het CFD model gemodelleerde maximale golfkracht, F_{max} en golfdruk P_{max} (Tabel 4-2)
- Nominale golfbelasting: rekenkundige maximale golfbelasting, op basis van de golfimpuls gevonden in het CFD model, F_{nom} en berekende impact lengte, L_{nom} . (Tabel 4-3)

De maximale golfbelastingen zoals gevonden in de CFD simulaties zijn weergegeven in Tabel 4-2. Omdat deze krachten dynamisch worden beschouwd op de constructie is de tijdsduur net zo belangrijk als de kracht zelf, daarom is de gemeten impulsduur ook weergegeven.

Tabel 4-2: Met CFD model berekende krachten op dak en schuif van de NSM

Case	Constructie onderdeel	Kracht [kN/m]	Druk [kPa]	Kracht op schuif [kN/m]	Tijdsduur [s]	Impuls [kN s/m]	Impuls op schuif [kN s/m]
NSM-1 Incom- pressibele lucht (ICA)	Dak sectie 1	246	40	45	0.040	3.05	0.02
	Dak sectie 2	333	38	117	0.075	4.98	0.90
	Dak sectie 3	17	33	92	0.030	0.13	0.30
	Schuif	117	95	117	0.075	0.65	0.65
NSM-1 Com- pressibele lucht (CPA)	Dak sectie 1	183	19	66	0.250	16.95	0.32
	Dak sectie 2	205	25	111	0.180	17.52	2.71
	Dak sectie 3	27	42	129	0.075	1.04	2.73
	Schuif	132	99	132	0.025	3.35	3.35
NSM-2 Incom- pressibele lucht(ICA)	Dak sectie 1	1,066	175	69	0.050	7.47	0.17
	Dak sectie 2	504	83	218	0.050	3.39	1.44
	Dak sectie 3	29	43	105	0.055	0.21	0.61
	Schuif	218	139	218	0.060	1.53	1.53
NSM-2 Com- pressibele lucht (CPA)	Dak sectie 1	258	20	73	0.185	5.95	0.86
	Dak sectie 2	150	14	74	0.170	3.15	0.90
	Dak sectie 3	10	14	96	0.670	0.28	2.27
	Schuif	96	109	96	0.685	2.56	2.56

Voor een beter vergelijking van CFD resultaten en PM resultaten zijn de CFD resultaten gebruikt om golfkracht en impuls lengte volgens de PM methodiek van de golfimpuls af te leiden.

F_{nom} is bepaald op basis van de impuls I van de golfklap (integraal van de golfkracht over de tijdsduur van de golfklap) en Δt is de tijdsduur van de golfklap. Hierbij wordt het driehoekvormige krachtverloop zoals in PM bepaald toegepast, i.e. een lineaire toe- en afname van de kracht in de tijd aangenomen. Zowel voor de gemeten tijdsduur in de CFD berekening als de in PM toegepaste tijdsduur.

De maximale golfkracht, F_{nom} is berekend met:

$$F_{nom} = 2 I / \Delta t$$

De lengte van het dak, L_{nom} die blootgesteld is aan de golfklap wordt berekend met:

$$L_{nom} = F_{max} / P_{max}$$

Daarin zijn F_{max} en P_{max} de daarbij optredende maximale kracht en druk, gevonden in Tabel 4-2.

De nominale golfkracht en impact lengte in Tabel 4-3 zijn allebei berekend met de golfimpuls van het CFD model ($F_{nom} = 2 I_{CFD} / \Delta t$ en $L_{nom} = F_{nom}/P_{max}$). De berekening is twee keer gedaan met verschillende tijdsduur van de impact:

- De tijdsduur van de impact van het CFD is aangehouden (zie Tabel 4-2)
- De tijdsduur van de impact van het PM is aangehouden ($\Delta t = \text{const.} = 0.1 \text{ s}$).

De afgeleide golfkracht en impuls lengte zijn weergegeven in Tabel 4-3.

Tabel 4-3: Uit CFD resultaten afgeleide nominale krachten op dak en schuif en de nominale lengte van de golfklap

Case	Constructie onderdeel	Lengte van dak of schuif [m]	Impactduur van CFD (variabel)		Impact duur van PM (const. = 0.1 s)		Nominale impact lengte [m]
			Nominale kracht [kN/m]	Nominale kracht op schuif [kN/m]	Nominale kracht [kN/m]	Nominale kracht op schuif [kN/m]	
NSM-01 Incompressibele lucht (ICA)	Dak sectie 1	14.50	152.5	0.8	61.0	0.3	6.17
	Dak sectie 2	12.05	132.7	24.1	99.6	18.1	8.77
	Dak sectie 3	0.70	8.7	20.2	2.6	6.1	0.51
	Schuif	7.15	17.3	17.3	13.0	13.0	1.23
NSM-01 Compressibele lucht (CPA)	Dak sectie 1	14.50	135.6	2.5	339.0	6.4	9.83
	Dak sectie 2	12.05	194.7	30.1	350.5	54.2	8.18
	Dak sectie 3	0.70	27.7	72.8	20.8	54.6	0.66
	Schuif	7.15	268.1	268.1	67.0	67.0	1.33
NSM-02 Incompressibele lucht(ICA)	Dak sectie 1	14.50	299.0	7.0	149.5	3.5	6.10
	Dak sectie 2	12.05	135.4	57.5	67.7	28.7	6.08
	Dak sectie 3	0.70	7.7	22.0	4.2	12.1	0.67
	Schuif	7.15	51.1	51.1	30.7	30.7	1.57
NSM-02 Compressibele lucht (CPA)	Dak sectie 1	14.50	64.4	9.3	119.1	17.1	12.70
	Dak sectie 2	12.05	37.1	10.6	63.1	18.0	10.67
	Dak sectie 3	0.70	0.8	6.8	5.6	45.5	0.69
	Schuif	7.15	7.5	7.5	51.3	51.3	0.88

4.2.1 Impact duur

De tijdsduur van de golfklap op dak en schuif is weergegeven in Tabel 4-2. De tijdsduur van de golfklap verschilt tussen de modellering met wel en niet samendrukbare lucht:

- Incompressibele lucht: De gemiddelde tijdsduur van de golfklap is 0.054 s (ca. 1/18 s) en varieert tussen 0.030 s en 0.075 s.
- Compressibele lucht: De gemiddelde tijdsduur van de golfklap op een dak sectie is 0.172 s (ca. 1/6 s) en varieert tussen 0.075 s en 0.250 s. Daarnaast zijn er ook kortere golfklappen (golfklap op de schuif bij scenario 1 is 0.025 s) en significant langere golfklappen (golfklap op dak sectie 3 en schuif bij scenario 2 is langer dan 0.6 s). Deze lange golfklappen treden op bij scenario's en constructieonderdelen, waar het PM geen golfklap voorspeld en kunnen ook worden beschouwd als mix tussen golfklap en de quasi-statische golfbelasting.

4.2.2 Impact lengte

De lengte van de golfklap op dak en schuif (berekend met de maximale kracht en de maximale druk) is weergegeven in Tabel 4-3. De berekende impact lengte is niet afhankelijk van de tijdsduur van de impact (variabel of constant). De impact lengte op de drie dak secties is langer (gemiddeld ca. 1.5 keer) bij de modellering met compressibele lucht dan bij de modellering met incompressibele lucht.

4.2.3 Druk translatie van impactlocatie naar schuif

De druk translatie van de golfklap locatie onder het dak naar de schuif zijn weergegeven in Tabel 4-2.

De golfklap op de schuif is ca. 5% van de golfklap op dak sectie 1, 26% van de golfklap op dak sectie 2 en is ca. 4 keer groter dan de golfklap op dak sectie 3.

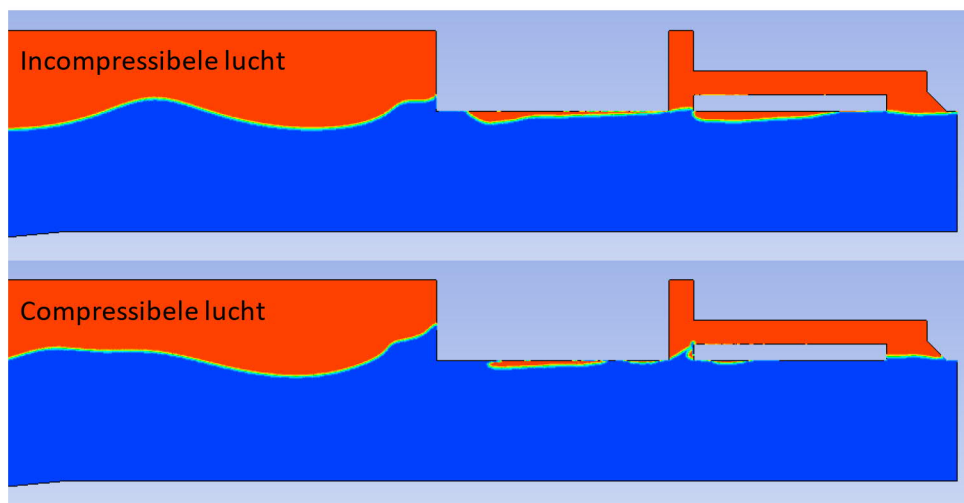
4.2.4 Effect samendrukbare lucht

De verhouding van golfkracht, druk, impuls en tijdsduur van de golfklap in de modellering met compressibele lucht (CPA) en met incompressibele lucht (ICA) is weergegeven in Tabel 4-4. Bij de modellering met compressibele lucht zijn de golfkracht en de golfdruk gereduceerd behalve bij een lage waterstand (case 1) achter in de spuikoker (dak sectie 3 en schuif). De tijdsduur van de golfklap neemt met compressibele lucht toe (behalve bij case 1, met lage waterstand bij de schuif). De langere tijdsduur van de golfklap resulteert in een golfimpuls die meestal hoger is met compressibele lucht.

Tabel 4-4: Verschil in golfkrachten met compressibele lucht (CPA) in verhouding met incompressibele lucht (ICA)

Case	Constructie onderdeel	Kracht [kN/m]	Druk [kPa]	Kracht op schuif [kN/m]	Tijdsduur [s]	Impuls [Ns/m]
NSM-1 CPA / ICA	Dak sectie 1	74%	47%	148%	625%	556%
	Dak sectie 2	62%	66%	95%	240%	352%
	Dak sectie 3	165%	129%	141%	250%	801%
	Schuif	113%	104%	113%	33%	516%
NSM-2 CPA / ICA	Dak sectie 1	24%	12%	106%	370%	80%
	Dak sectie 2	30%	17%	34%	340%	93%
	Dak sectie 3	34%	33%	92%	1218%	133%
	Schuif	44%	78%	44%	1142%	167%

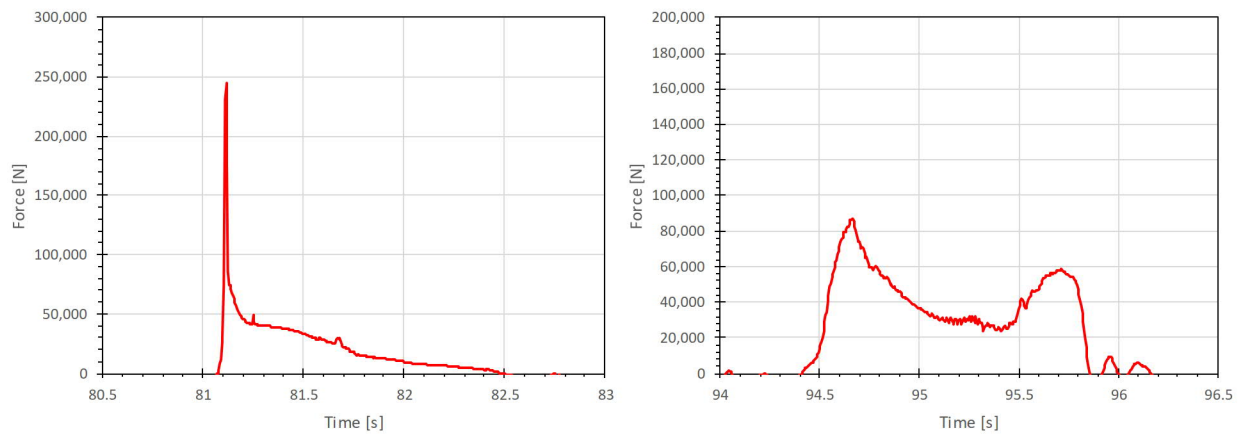
De waterlijn tijdens een golfklap op dak sectie 2 gemodelleerd met incompressibele lucht en met compressibele lucht is weergegeven in Figuur 4-1. De luchtopsluitingen onder het dal zijn duidelijk groter bij de modellering met incompressibele lucht.



Figuur 4-1: Golfklap op dak sectie 2 gemodelleerd met incompressibele lucht (boven) en met compressibele lucht (onder)

De tijdreeks van een typische golfklap gemodelleerd met incompressibele lucht en met compressibele lucht is weergegeven in Figuur 4-2. De karakteristieke van golfklap en quasi-statische golfkracht zijn duidelijk herkenbaar bij de modellering met incompressibele lucht. Bij de modellering met compressibele lucht zijn de overgangen van quasi-statischer en dynamischer belasting minder duidelijk.

Het effect van de compressibele lucht is in de 2D modellering (waarin luchtopsluitingen als een veer werken) mogelijk overschat omdat in 2D lucht makkelijker opgesloten wordt dan in 3D. Daardoor zijn de 2D resultaten met compressibele lucht mogelijk afgevlakt. De meer eenvoudige modellering met incompressibele lucht lijkt een veilige bovengrens. De resultaten met incompressibele lucht zullen daarom op de eerste plaats gebruikt worden voor de validatie van het parametrische model.



Figuur 4-2: Tijdreeks van de golfkracht op dak sectie 1 gemodelleerd met incompressibele lucht (links) en met compressibele lucht (rechts)

4.3 Vergelijk parametrisch model en CFD model

De met de impact tijdsduur van het PM (0.1 s) berekende nominale golfkracht en impact lengte in Tabel 4-3 worden (zodra niet anders vermeld) in deze sectie aangehouden voor de vergelijking van CFD en PM resultaten.

De nominale golfkrachten op de dak secties uit de CFD modellering en de corresponderende krachten van het PM zijn tegenover gesteld in Tabel 4-5. Daarnaast zijn de golfkrachten op de schuif (door druk translatie) en de lengte van de golfklap op het dak van CFD model en PM weergegeven.

De nominale golfkrachten uit de CFD modellering met compressibele lucht op dak secties 1 en 2 van scenario 1 zijn rekenkundig omhoog gegaan doordat de duur van impact duidelijk langer dan 0,1 s is. Deze krachten vormen alsnog geen probleem omdat de bijhorende maximale druk 25 kPa niet overschrijdt (zie Tabel 4-2). De krachten zijn daarom gekenmerkt als "niet relevant voor ontwerp".

Tabel 4-5: Overzicht van CFD en PM resultaten voor dak secties en schuif van de NSM (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht en compressibele lucht)

Case	Dak sectie	CFD				PM			
		Impuls [kNs/m]	Nom. kracht [kN/m]	Nom. kracht op schuif [kN/m]	Nom. golfklap lengte [m]	Impuls [kNs/m]	Kracht [kN/m]	Kracht op schuif [kN/m]	Golfklap lengte [m]
NSM-1 ICA	1	3.1	61	0	6.17	7.7	154	6	2.33
	2	5.0	100	18	8.77	6.4	127	68	2.11
	3	0.1	3	6	0.51	1.2	23	42	0.70
NSM-1 CPA	1	17.0	339*	6	9.83	7.7	154	6	2.33
	2	17.5	350*	54	8.18	6.4	127	68	2.11
	3	1.0	21	55	0.66	1.2	23	42	0.70
NSM-2 ICA	1	7.5	149	3	6.10	23.3	466	11	3.89
	2	3.4	68	29	6.08	–	–	–	–
	3	0.2	4	12	0.67	–	–	–	–
NSM-2 CPA	1	6.0	119	17	12.70	23.3	466	11	3.89
	2	3.2	63	18	10.67	–	–	–	–
	3	0.3	6	45	0.69	–	–	–	–

*niet relevant voor ontwerp

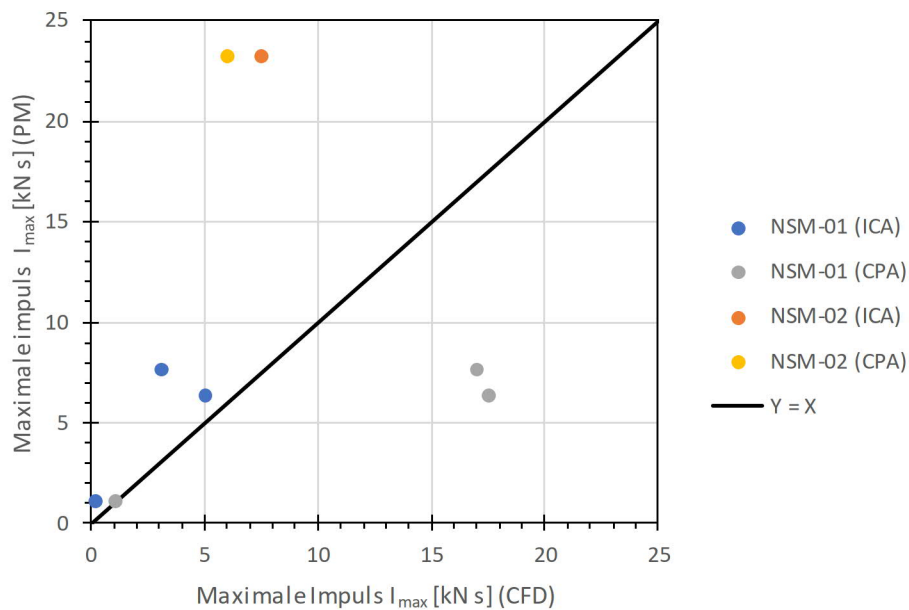
4.3.1 Golfkracht, druk en impuls

De golfimpuls op de dak secties van scenario 1 en 2 is in Figuur 4-3 weergegeven. De met het parametrische model (PM) berekende impuls is geplot over de met het CFD model berekende impuls. We zien in Figuur 4-3:

- Scenario 1, incompressibele lucht: De PM resultaten zijn ca. 1.25 – 2.5 keer groter dan de CFD resultaten
- Scenario 1, compressibele lucht: Voor dak secties 1 en 2 zijn de CFD resultaten ca. 2 keer groter dan de PM resultaten. Voor dak sectie 3 komen PM en CFD resultaten redelijk overeen.
- Scenario 2, incompressibele en compressibele lucht: De PM resultaten zijn ca. 3 keer groter dan de CFD resultaten.

De CFD resultaten met compressibele lucht zijn in verband met de in sectie 4.2.4 geconstateerde problemen met de 2D modellering van luchtopsluitingen minder betrouwbaar dan de resultaten met incompressibele lucht. De CFD resultaten met incompressibele lucht zullen daarom vooral worden aangehouden voor de validatie van het PM. De resultaten met compressibele lucht zijn wel weergegeven in de grafieken in deze en in de volgende secties.

Op basis van de CFD resultaten met incompressibele lucht kan worden concludeert dat het PM een conservatieve inschatting geeft van de impuls op de dak secties. De impuls wordt mogelijk met een factor 1.25 – 3 overschat.

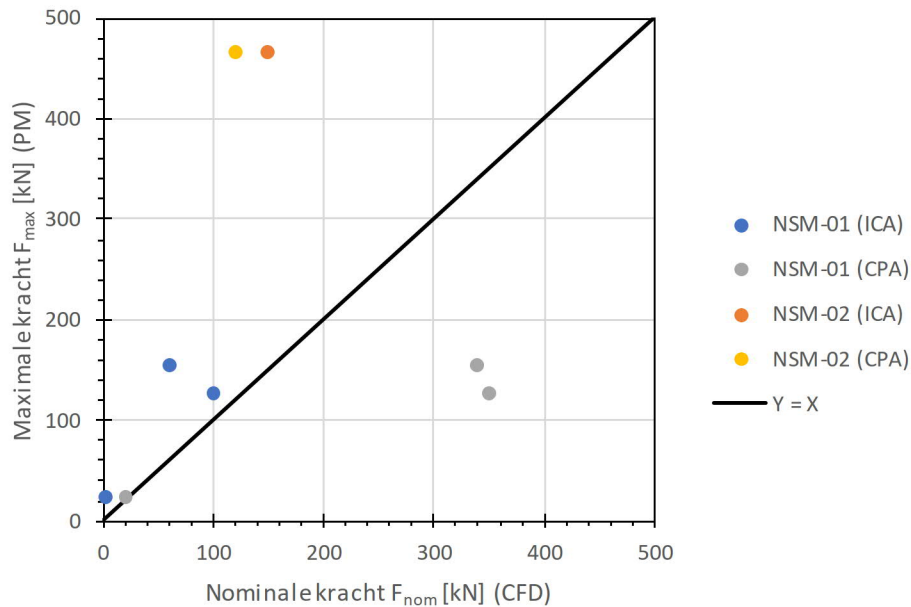


Figuur 4-3: Maximale impuls op de dak secties: Resultaten van PM vs. CFD resultaten (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht (ICA) en compressibele lucht (CPA))

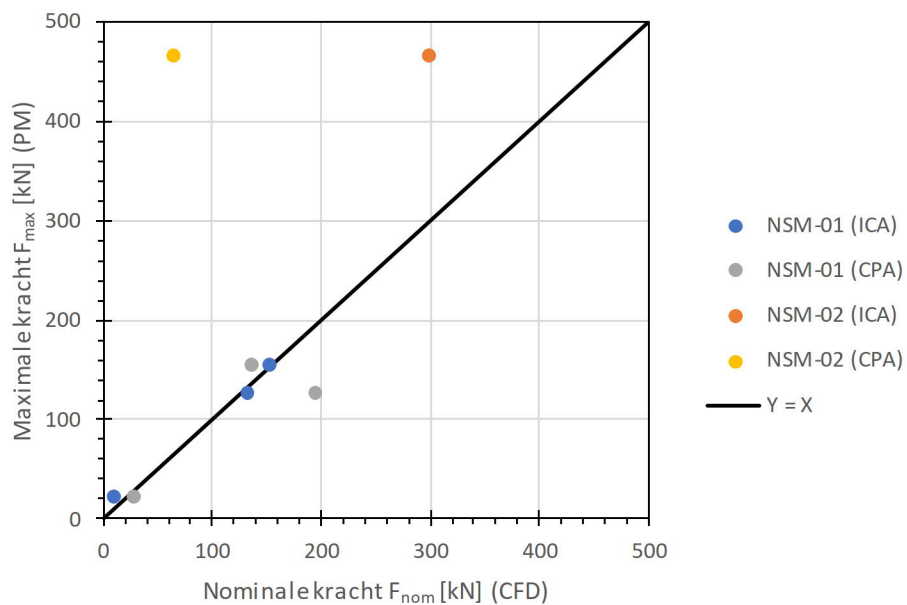
De maximale verticale kracht op de dak secties van scenario 1 en 2 is weergegeven in Figuur 4-4 en in Figuur 4-5 (PM resultaten zijn geplot over CFD resultaten). De maximale krachten van het CFD model zijn afgeleid van de impuls (nominale kracht). De impuls heeft of een constante tijdsduur van 0.1 s (Figuur 4-4) of een variabele tijdsduur (Figuur 4-5). We zien:

- Scenario 1, incompressibele lucht:
 - Impuls met constante tijdsduur (Figuur 4-4): De PM resultaten zijn 1.25 – 2.5 keer groter dan de CFD resultaten voor dak secties 1 en 2 en zijn 9 keer groter voor dak sectie 3.
 - Impuls met variabele tijdsduur (Figuur 4-5): De PM resultaten komen goed overeen met de CFD resultaten, alleen de krachten op dak sectie 3 worden overschat bij een factor 3 door het PM.
- Scenario 1, compressibele lucht:
 - Impuls met constante tijdsduur (Figuur 4-4): Voor dak secties 1 en 2 zijn de CFD resultaten ca. 2.5 keer groter dan de PM resultaten. Voor dak sectie 3 komen PM en CFD resultaten redelijk overeen.
 - Impuls met variabele tijdsduur (Figuur 4-5): Voor dak secties 1 en 3 komen de PM resultaten overeen met de CFD resultaten. Voor dak sectie 2 voorspeld het CFD model ca. 50% grotere krachten dan het PM.
- Scenario 2, incompressibele lucht:
 - Impuls met constante tijdsduur (Figuur 4-4): De PM resultaten zijn ca. 3 keer hoger dan de CFD resultaten.
 - Impuls met variabele tijdsduur (Figuur 4-5): De PM resultaten zijn ca. 50% hoger dan de CFD resultaten.
- Scenario 2, compressibele lucht:
 - Impuls met constante tijdsduur (Figuur 4-4): De PM resultaten zijn ca. 4 keer hoger dan de CFD resultaten.
 - Impuls met variabele tijdsduur (Figuur 4-5): De PM resultaten zijn ca. 7 keer hoger dan de CFD resultaten.

Op basis van de CFD resultaten met incompressibele lucht kan worden concludeert dat het PM een conservatieve inschatting geeft van de maximale verticale golfkracht op de dak secties. De kracht op dak secties 1 en 2 wordt waarschijnlijk overschat met een factor 1.25 – 3; de kracht op dak sectie 3 wordt waarschijnlijk nog meer overschat.



Figuur 4-4: Maximale verticale kracht op de dak secties: Resultaten van PM vs. CFD resultaten berekend met een constante tijdsduur van de golfimpuls (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht (ICA) en compressibele lucht (CPA))

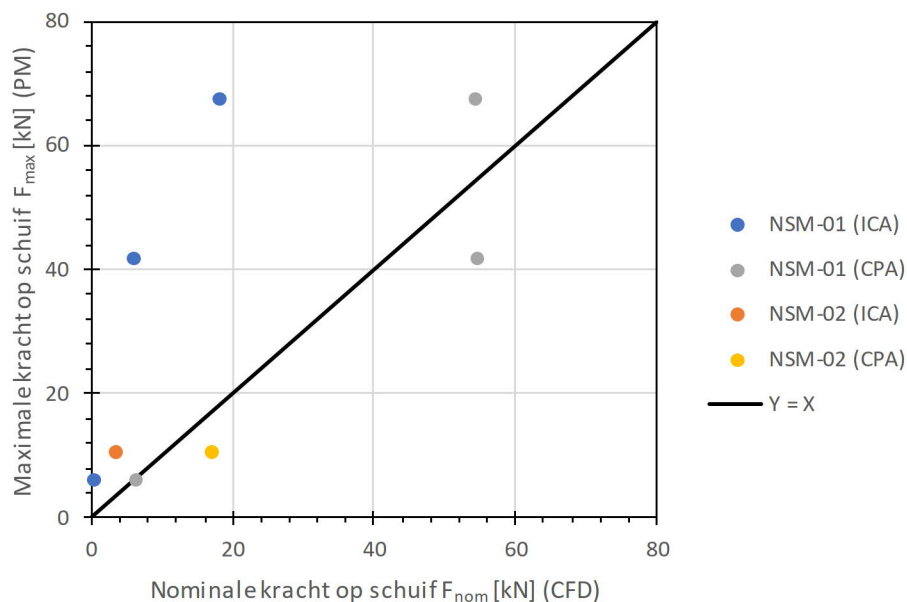


Figuur 4-5: Maximale verticale kracht op de dak secties: Resultaten van PM vs. CFD resultaten berekend met een variabele tijdsduur van de golfimpuls (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht (ICA) en compressibele lucht (CPA))

De maximale horizontale kracht op de schuif van scenario 1 en 2 is in Figuur 4-6 weergegeven (PM resultaten zijn geplot over CFD resultaten afgeleid van de impuls met constante tijdsduur). We zien in Figuur 4-6:

- Scenario 1, incompressibele lucht: De PM resultaten zijn ca. 3 – 19 keer groter dan de CFD resultaten
- Scenario 1, compressibele lucht: De PM resultaten komen redelijk overeen met de CFD resultaten. De afwijkingen zijn ca. $\pm 25\%$.
- Scenario 2, incompressibele lucht: De PM resultaten zijn 3 keer groter dan de CFD resultaten.
- Scenario 2, compressibele lucht: De PM resultaten zijn ca. 35% kleiner dan de CFD resultaten.

Op basis van de CFD resultaten met incompressibele lucht kan worden concludeert dat het PM een conservatieve inschatting geeft van de maximale horizontale golfkracht op de schuif. De golfkracht wordt waarschijnlijk met een factor 3 of meer overschat.



Figuur 4-6: Maximale horizontale kracht op de schuif: Resultaten van PM vs. CFD resultaten (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht (ICA) en compressibele lucht (CPA))

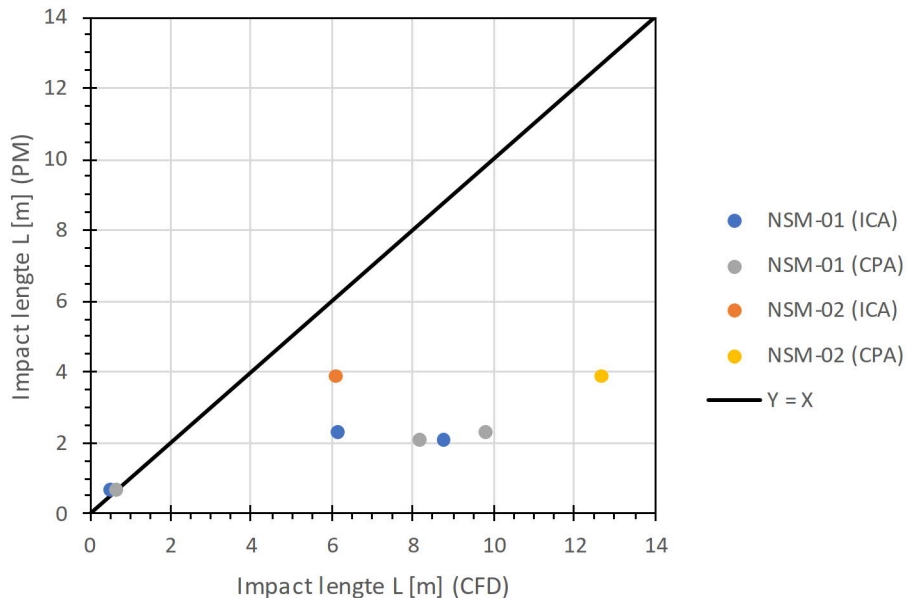
4.3.2 Impact lengte

De impact lengte (gedefinieerd als de verhouding van maximale kracht en druk) op de dak secties van scenario 1 en 2 is weergegeven in Figuur 4-7 (PM resultaten zijn geplot over CFD resultaten). We zien in Figuur 4-7:

- Incompressibele lucht:
 - Dak secties 1 en 2: Door luchtopsluiting onder het dak zijn de impact lengtes van het CFD model (6 – 9 m) langer dan de impact lengtes van het PM (2 – 4 m).
 - Dak sectie 3: De impact lengtes van CFD model en PM komen redelijk overeen (afwijkingen ca. ± 0.2 m).
- Compressibele lucht:
 - Dak secties 1 en 2: Door luchtopsluiting onder het dak zijn de impact lengtes van het CFD model (8 – 13 m) significant langer dan de impact lengtes van het PM (2 – 4 m).

- Dak sectie 3: De impact lengtes van CFD model en PM komen redelijk overeen (afwijkingen ca. ± 0.1 m).

Op basis van de CFD resultaten met incompressibele lucht kan worden concludeert dat het PM alleen maar een grove indicatie geeft van de impact lengte op de dak secties. De impact lengtes van het CFD model (dak secties 1 en 2) kunnen 2 keer langer zijn dan de impact lengtes van het PM.



Figuur 4-7: Impact lengte op de dak secties: Resultaten van PM vs. CFD resultaten (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht (ICA) en compressibele lucht (CPA))

4.3.3 Impact duur

De impact duur van het PM is constant (0.1 s). De impact duur van het CFD model is beschreven in sectie 4.2.1:

- Incompressibele lucht: De gemiddelde tijdsduur van de golfklap is 0.054 s (ca. 1/18 s) en varieert tussen 0.030 s en 0.075 s.
- Compressibele lucht: De gemiddelde tijdsduur van de golfklap op een dak sectie is 0.172 s (ca. 1/6 s) en varieert tussen 0.075 s en 0.250 s. Daarnaast zijn er ook significant kortere en langere golfklappen.

Op basis van de CFD resultaten met incompressibele lucht kan worden concludeert dat het PM de tijdsduur van de impact op de dak secties mogelijk overschat met een factor 2. Daardoor zijn de door het PM berekende golfkrachten minder conservatief dan de golfimpuls.

4.3.4 Druk translatie van impactlocatie naar schuif

De druk translatie van de dak secties naar de schuif is samengevat in Tabel 4-6. Op basis van de CFD resultaten met incompressibele lucht (ICA) kan worden concludeert dat het PM de druk translatie van dak secties 1 en 2 overschat. Daardoor worden de uit een golfklap op dak secties 1 en 2 resulterende krachten op de schuif overschat. Het PM onderschat de druk translatie van dak sectie 3. Dit wordt gecompenseerd door een overschatting van golfimpuls en golfkracht op dak sectie 3 waardoor de uit een golfklap op dak secties 3 resulterende krachten op de schuif niet worden onderschat.

Tabel 4-6: Druk translatie van dak sectie naar schuif: Resultaten van PM en CFD model (scenario 1 en 2, met incompressibele lucht (ICA) en compressibele lucht (CPA))

Model	Lucht	Druk translatie naar schuif		
	[kN/m]	Dak 1	Dak 2	Dak 3
PM	–	3%	53%	182%
CFD	ICA	1.8%	28%	266%
	CPA	5%	17%	379%
	ICA & CPA	3%	23%	323%

4.3.5 Conclusie

De uit de vergelijking van PM en CFD resultaten (met incompressibele lucht, scenario's 1 en 2, nominale kracht berekend met een constante tijdsduur van de impuls) getrokken conclusies zijn hieronder samengevat:

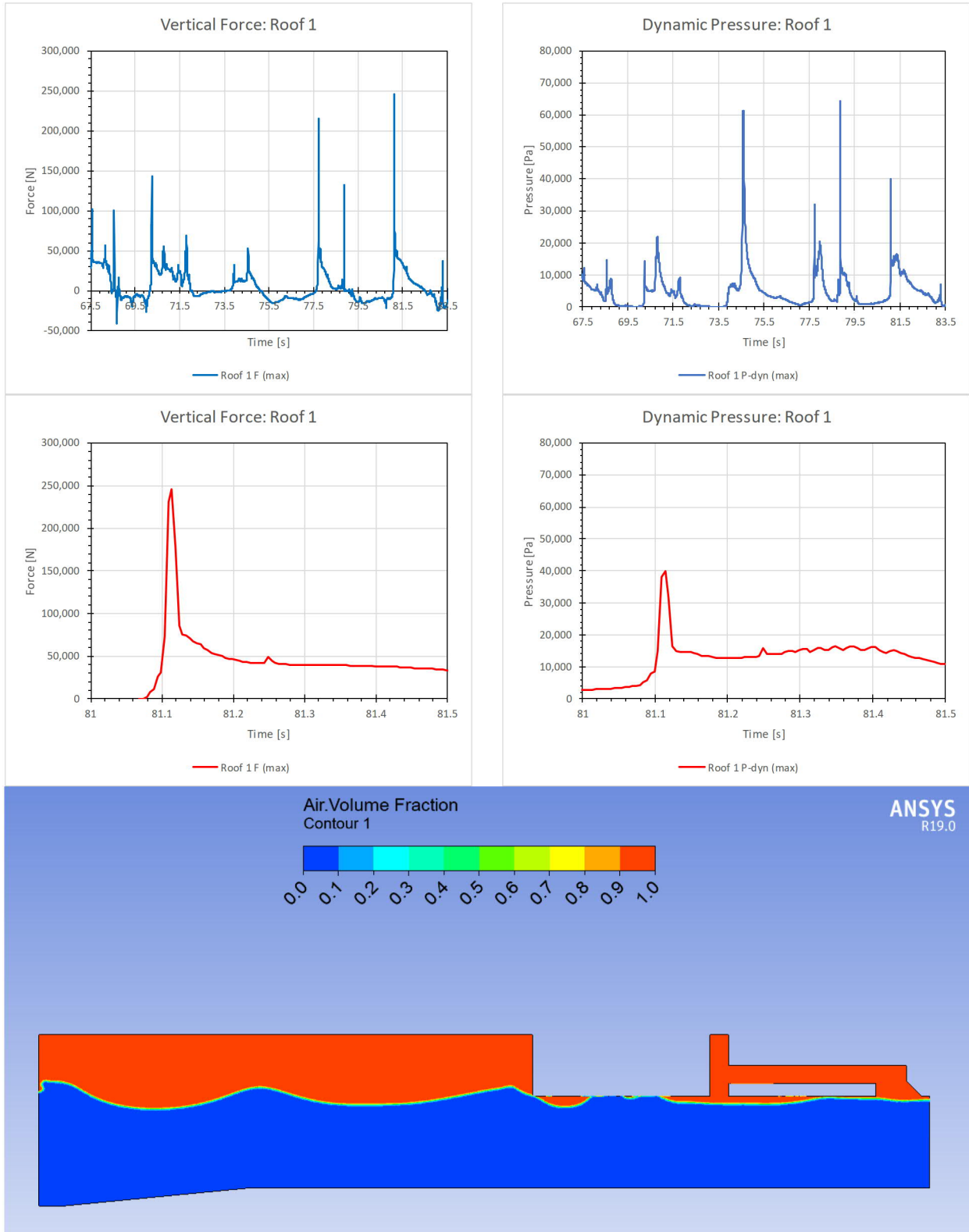
- Impuls op de dak secties: PM geeft een conservatieve inschatting van de impuls, de impuls wordt mogelijk met een factor 1.25 – 3 overschat.
- Verticale golfkracht op de dak secties: PM geeft een conservatieve inschatting van de golf kracht. De kracht op dak secties 1 en 2 wordt mogelijk overschat met een factor 1.25 – 3; de kracht op dak sectie 3 wordt waarschijnlijk nog meer overschat.
- Horizontale golfkracht op de schuif: PM geeft een conservatieve inschatting van de golf kracht, de golfkracht wordt mogelijk met een factor 3 overschat.
- Impact lengte: PM geeft alleen maar een grove indicatie van de impact lengte op de dak secties. Door luchtopsluiting onder de dak secties kunnen de impact lengtes 2 keer langer zijn dan door het PM voorspeld.
- Tijdsduur van de impact: PM overschat de tijdsduur van de impact op de dak secties ongeveer met een factor 2.
- Druk translatie van de dak secties naar de schuif: PM overschat de druk translatie van dak secties 1 en 2. Daardoor worden de uit een golfklap op dak secties 1 en 2 resulterende krachten op de schuif overschat. PM onderschat de druk translatie van dak sectie 3. Dit wordt gecompenseerd door een overschatting van de golfklap op dak sectie 3 waardoor de resulterende krachten op de schuif niet worden onderschat.

Uit de vergelijking van de PM resultaten en de CFD resultaten met incompressibele lucht van scenario's 1 en 2 blijkt dat het PM realistische en in veel gevallen conservatieve golfkrachten op dak en schuif voorspelt.

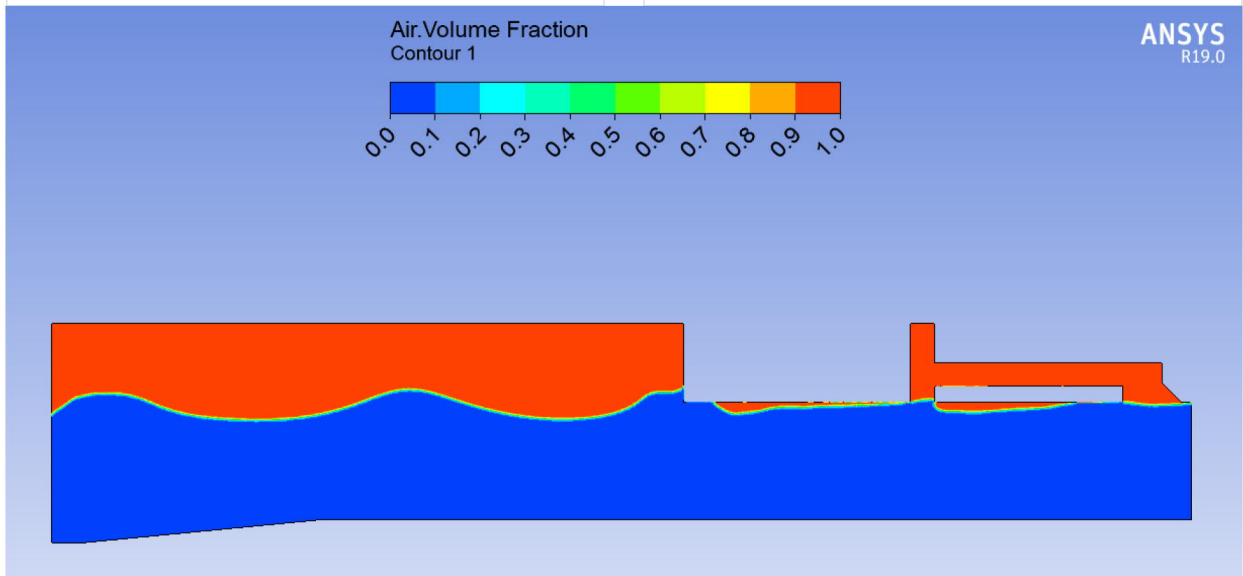
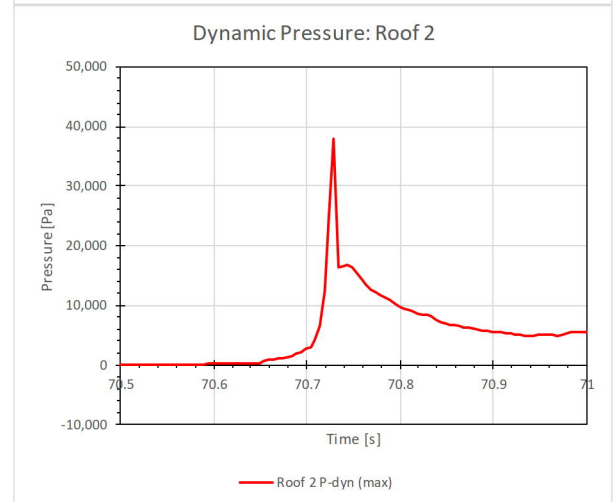
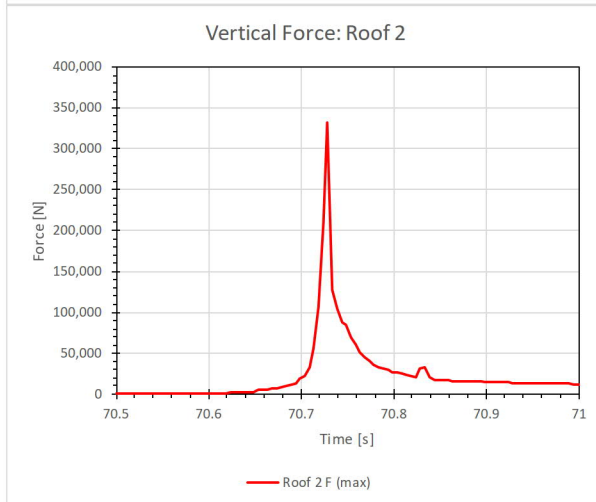
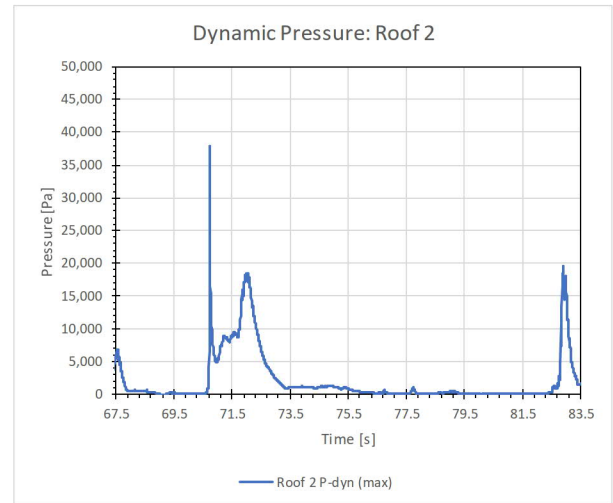
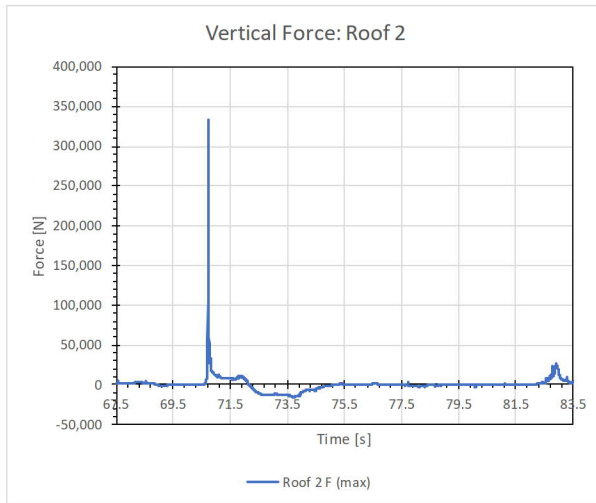
CFD-resultaten

NSM – Case 1, incompressibele lucht

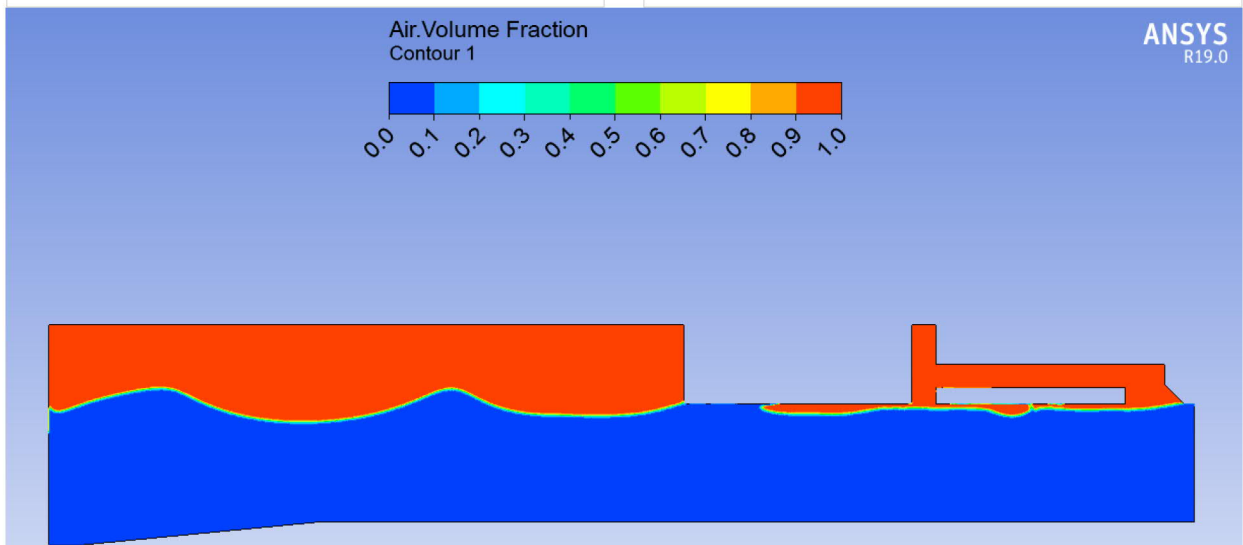
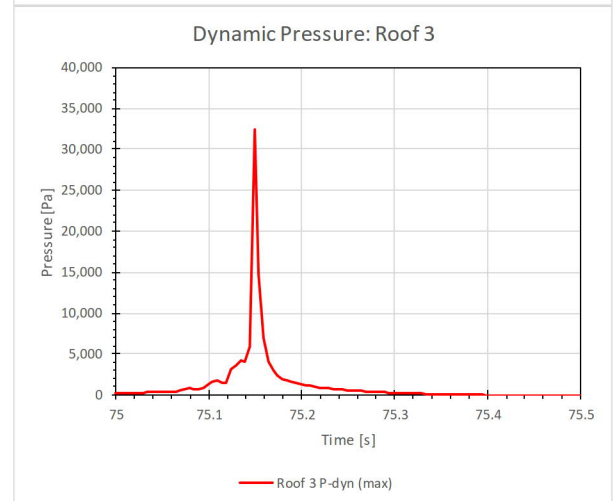
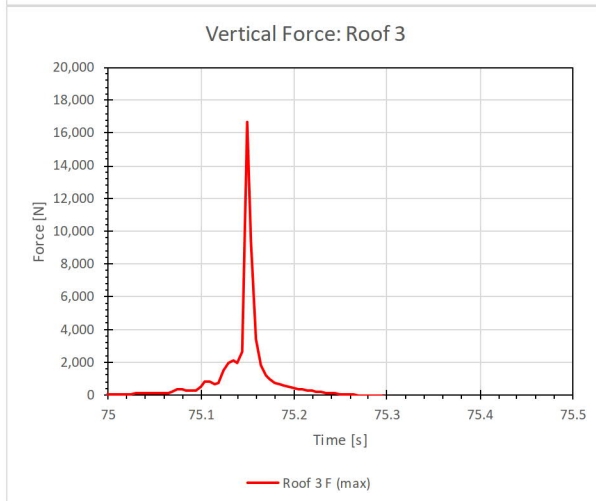
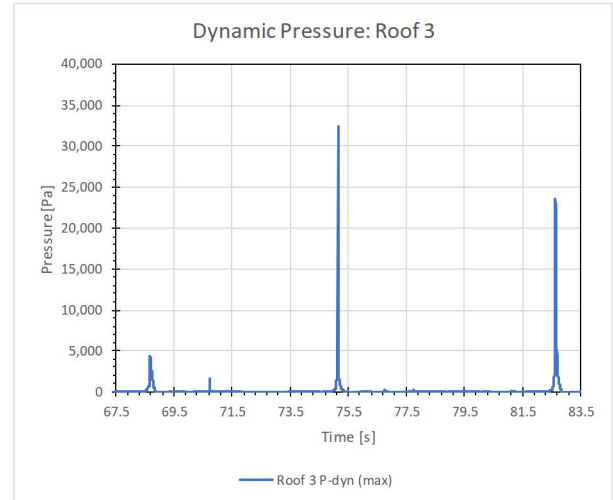
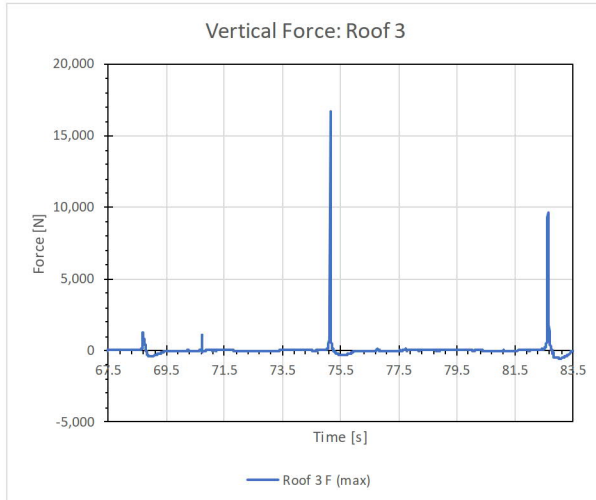
Dak sectie 1



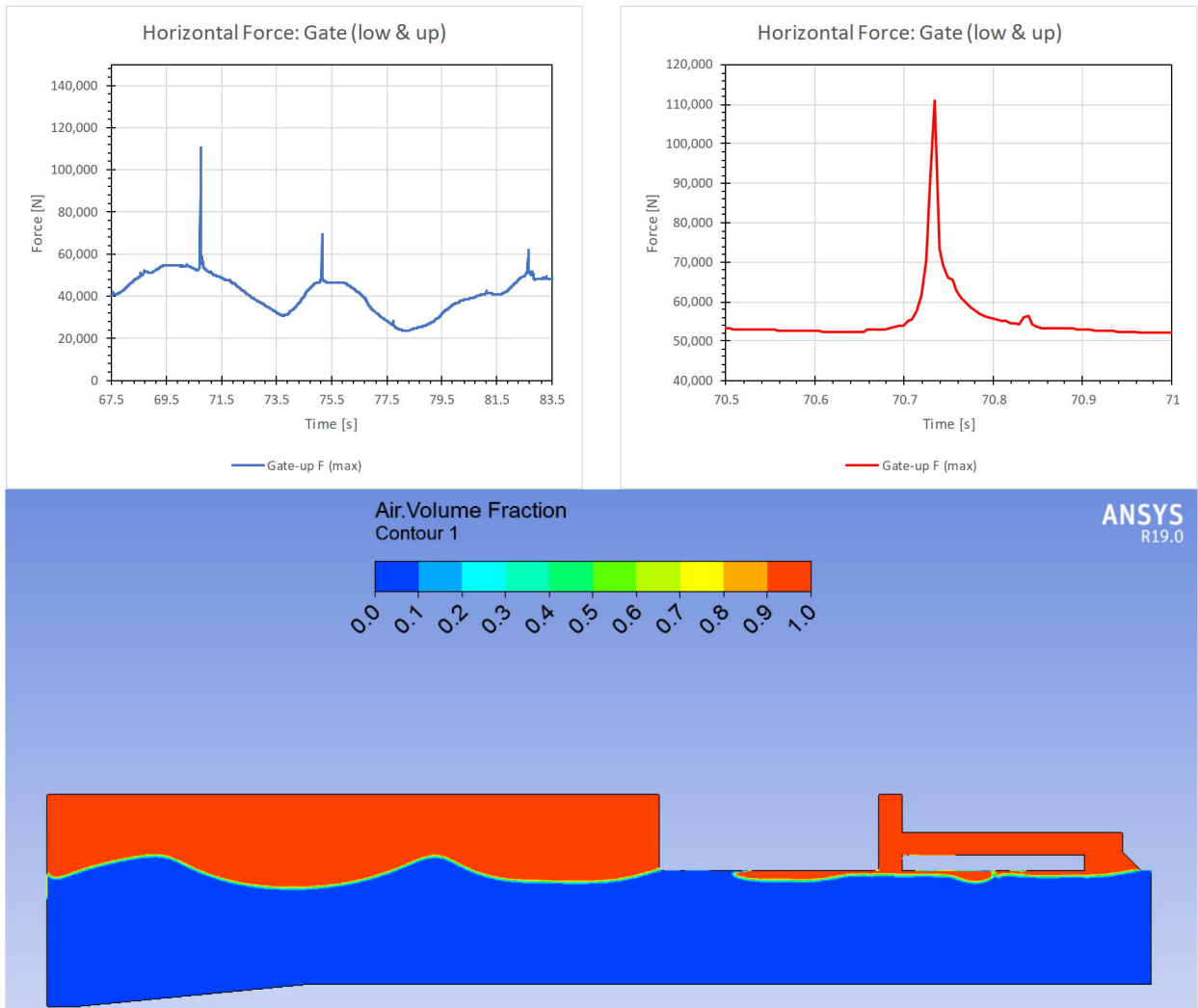
Dak sectie 2



Dak sectie 3

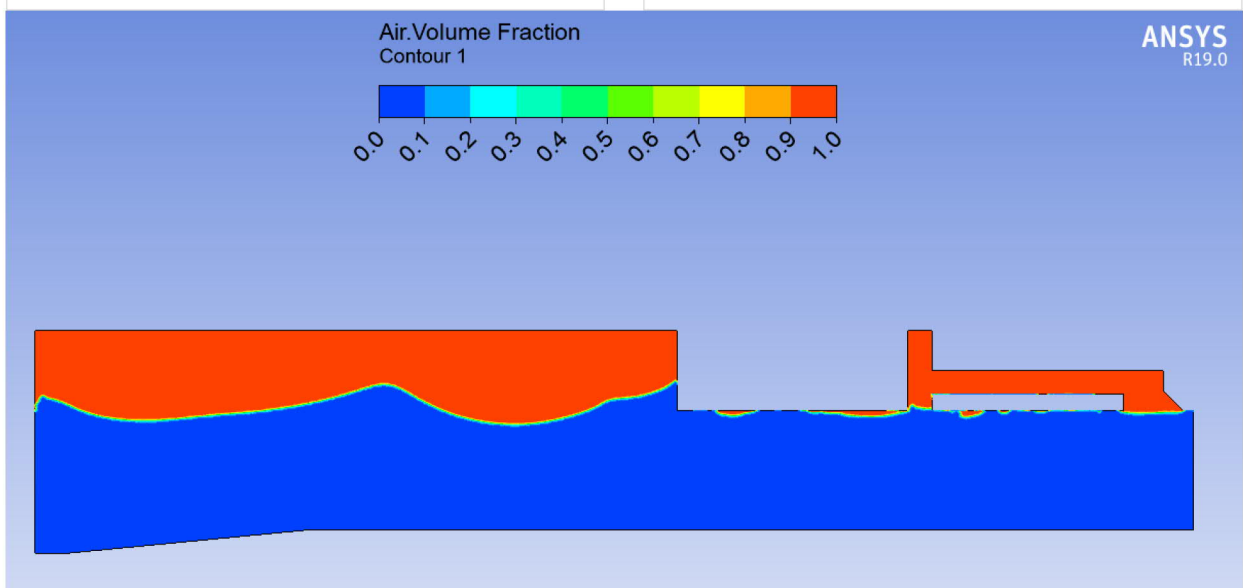
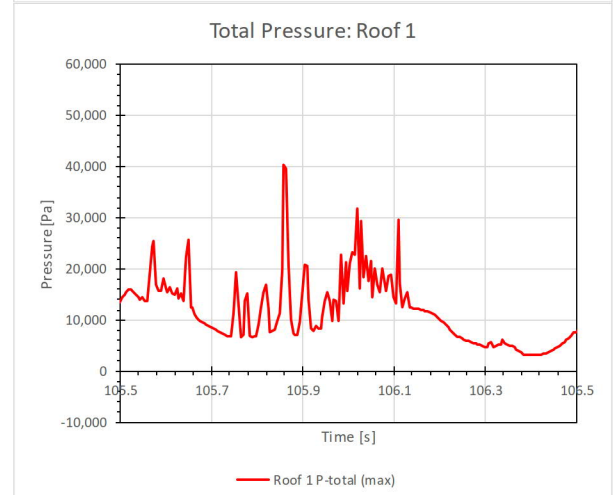
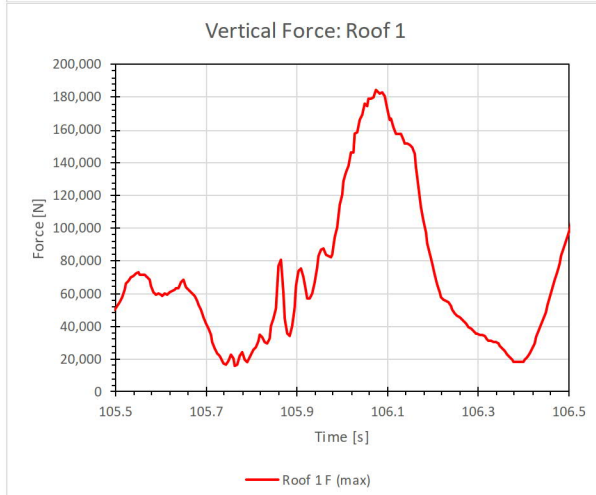
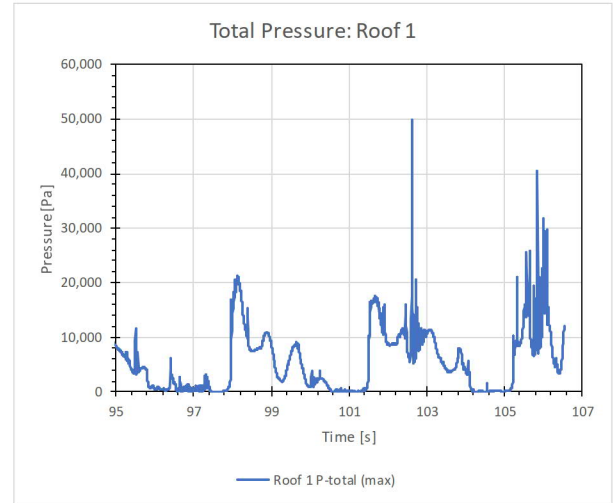
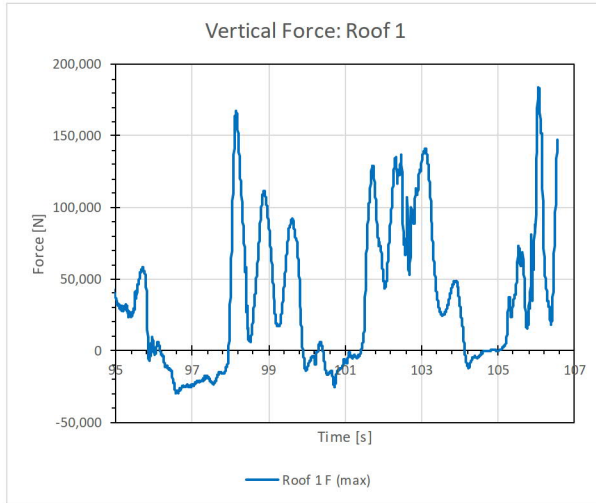


Schuif

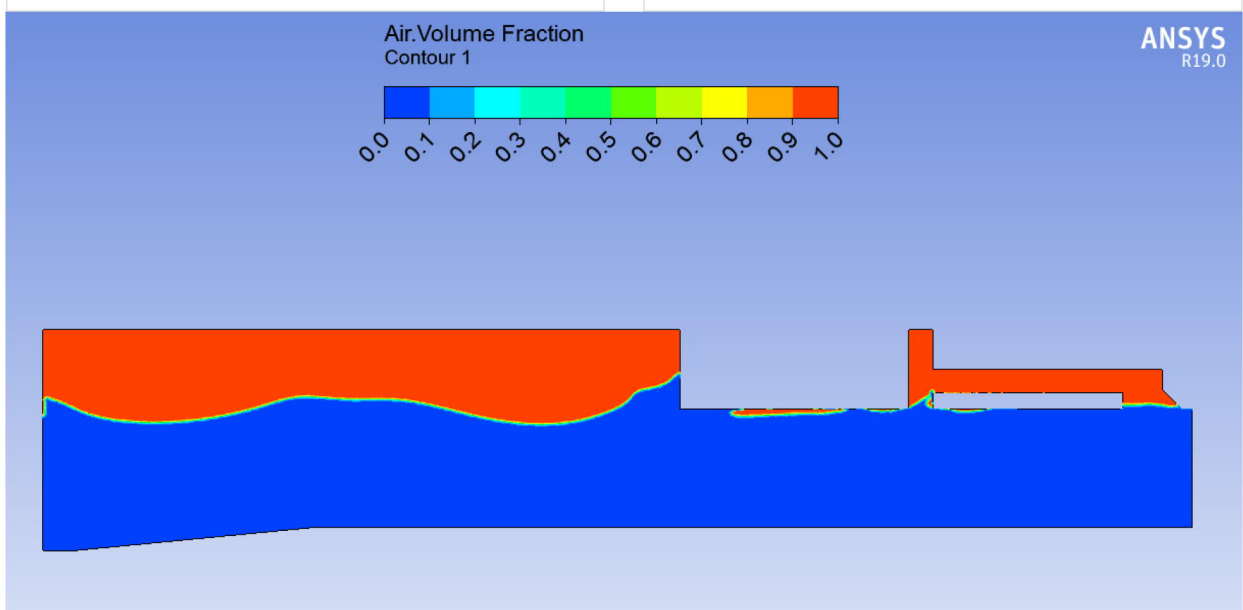
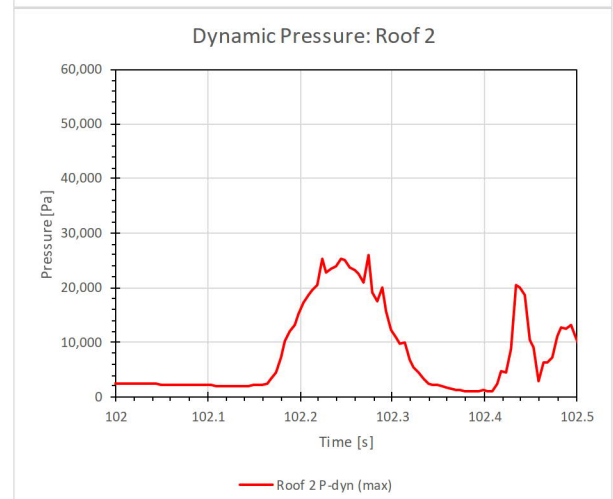
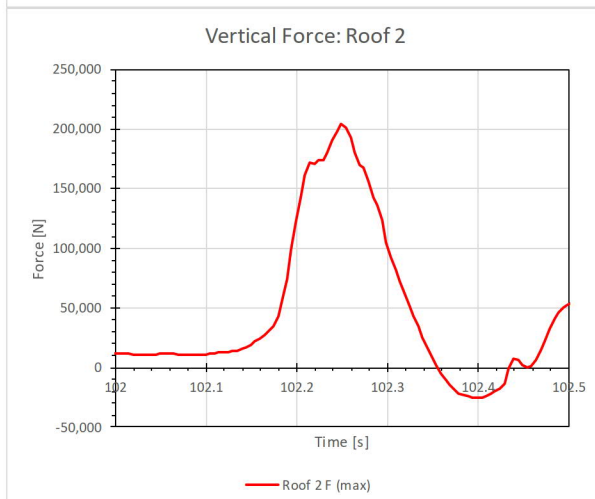
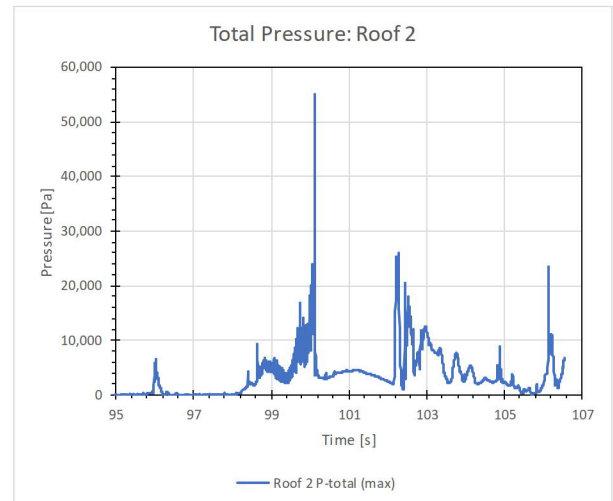
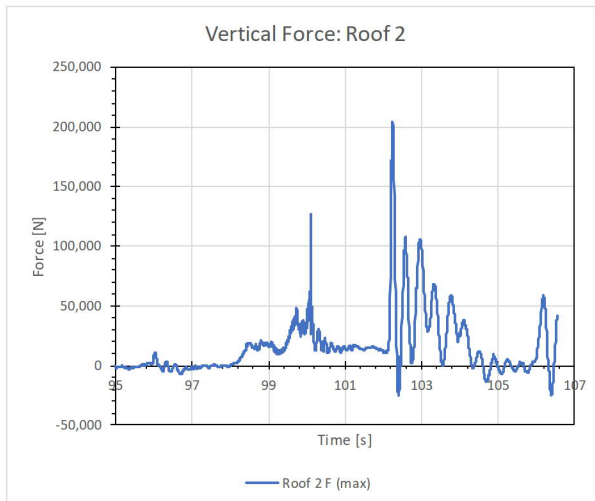


NSM – Case 1, compressibele lucht

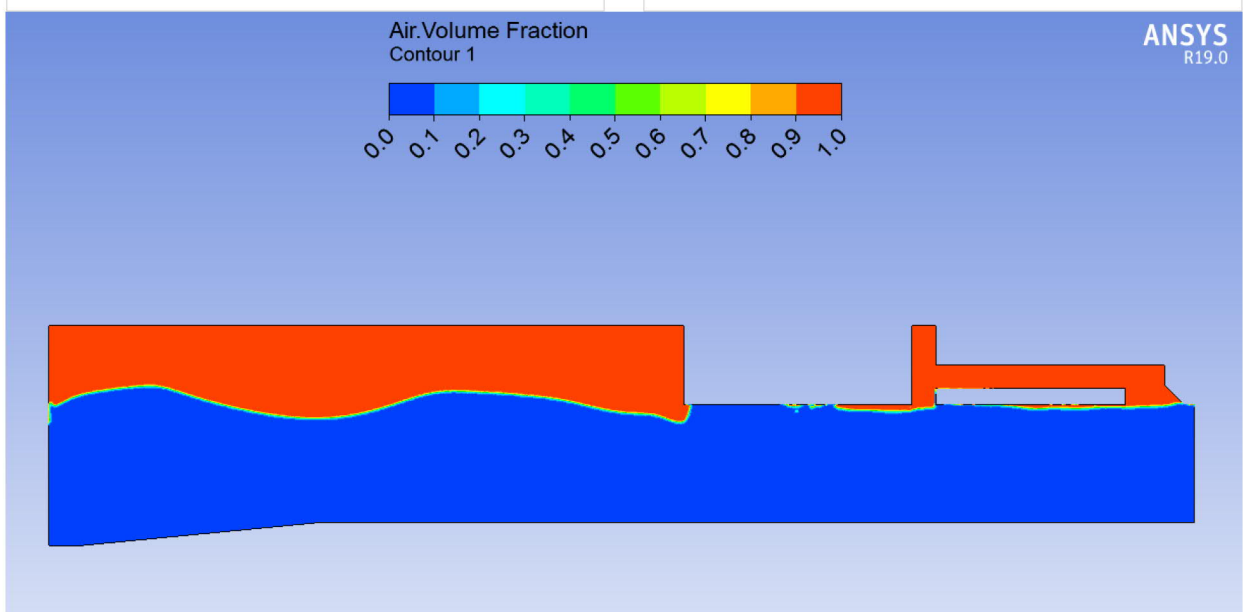
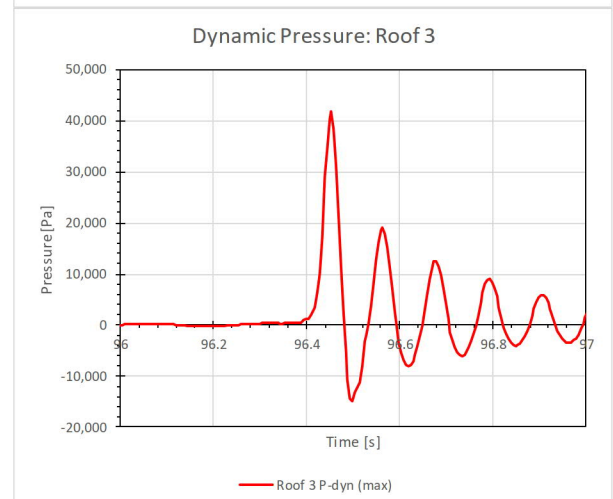
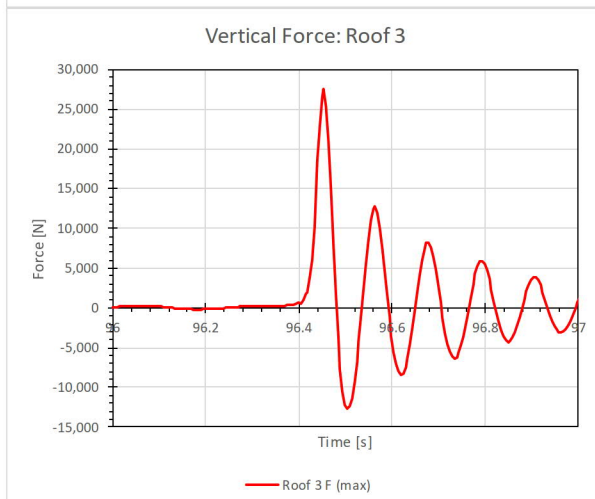
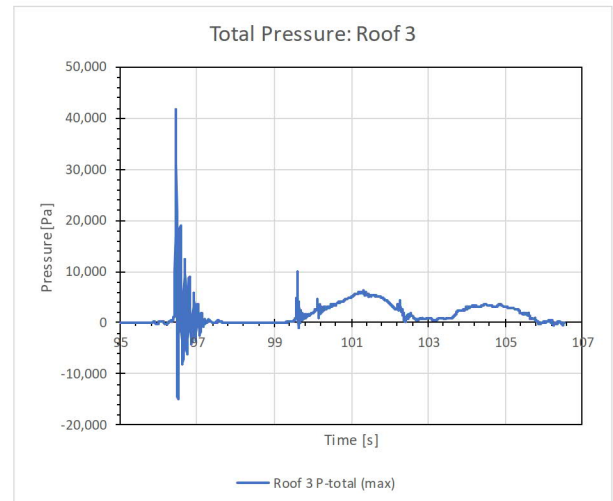
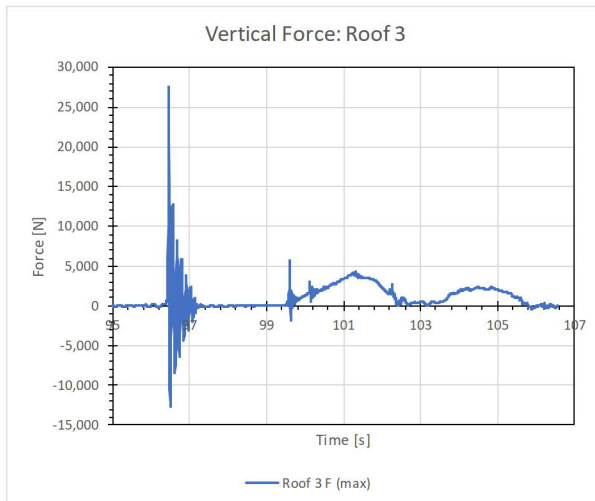
Dak sectie 1



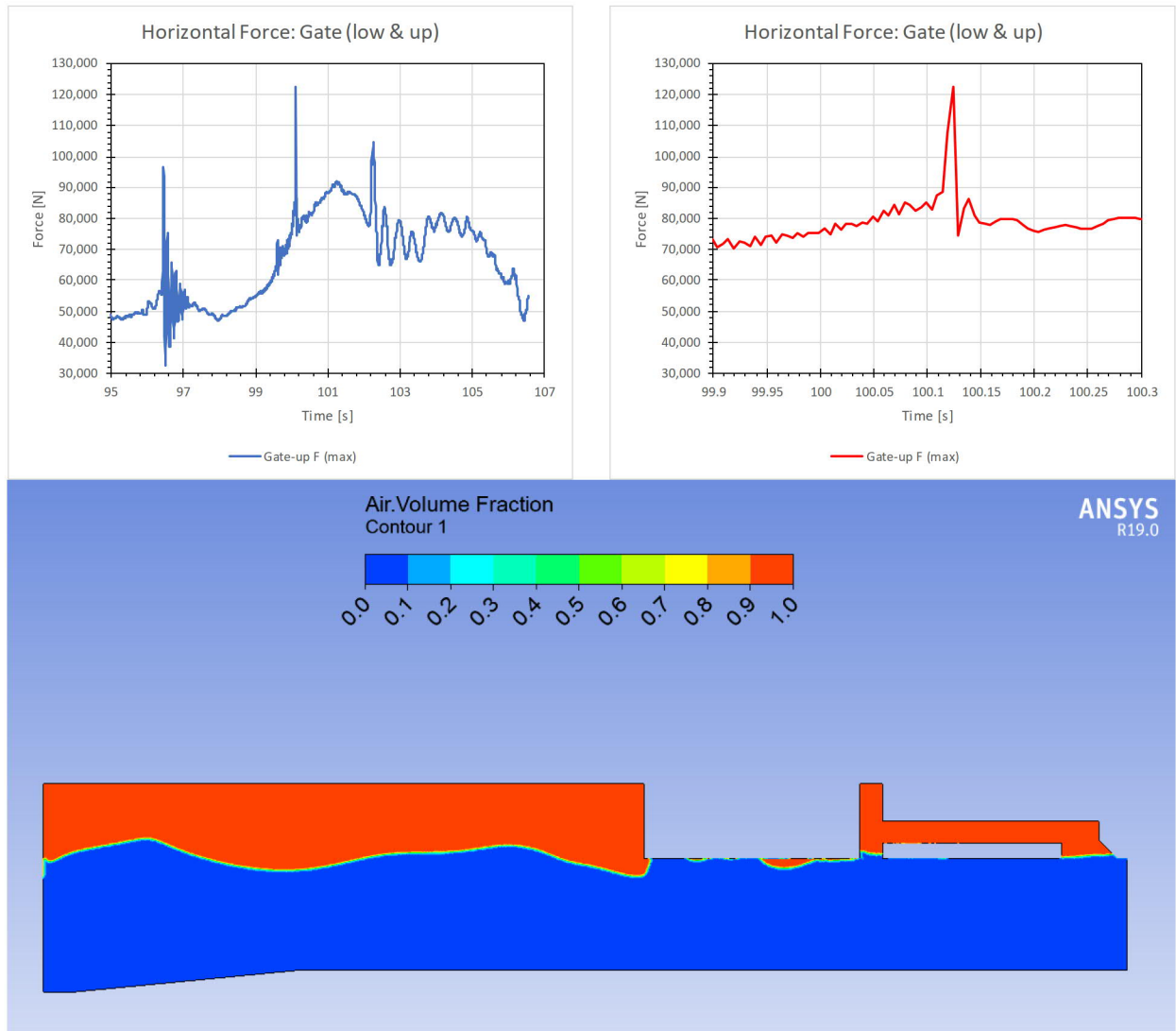
Dak sectie 2



Dak sectie 3

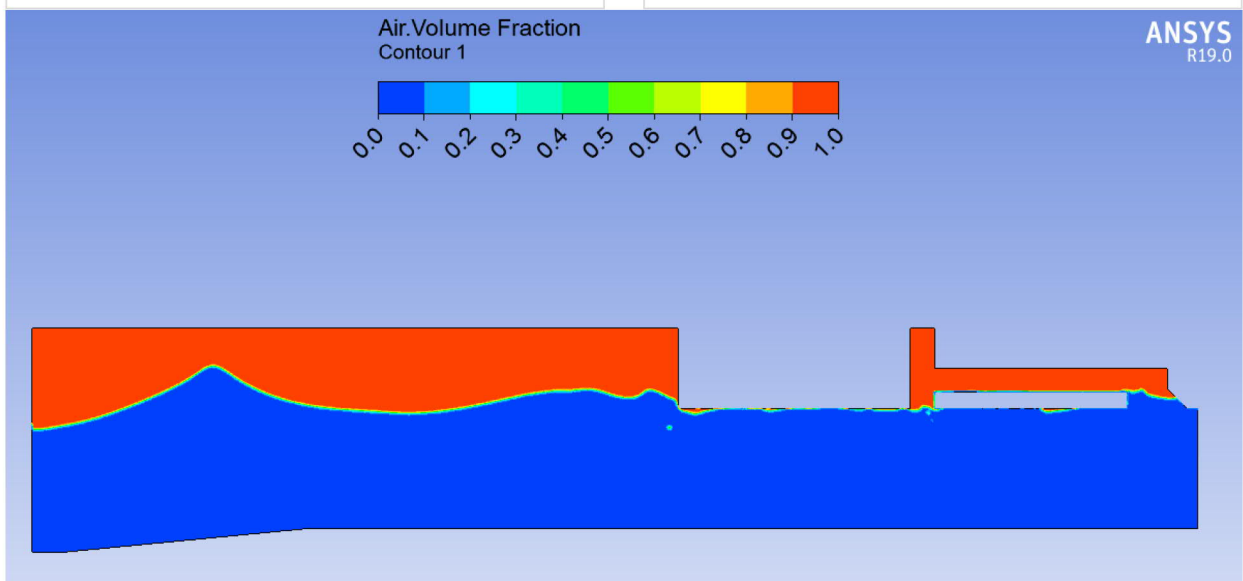
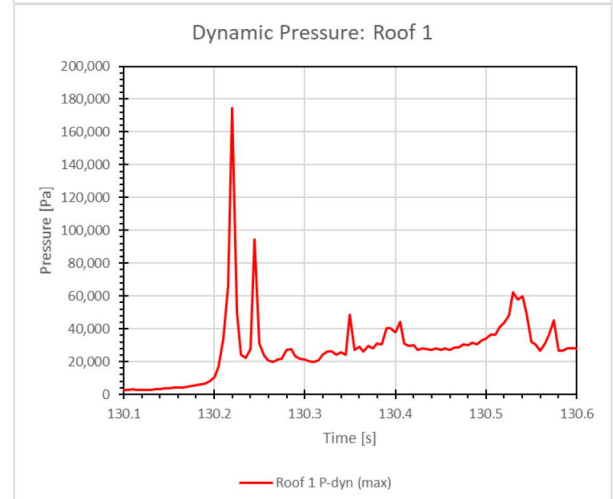
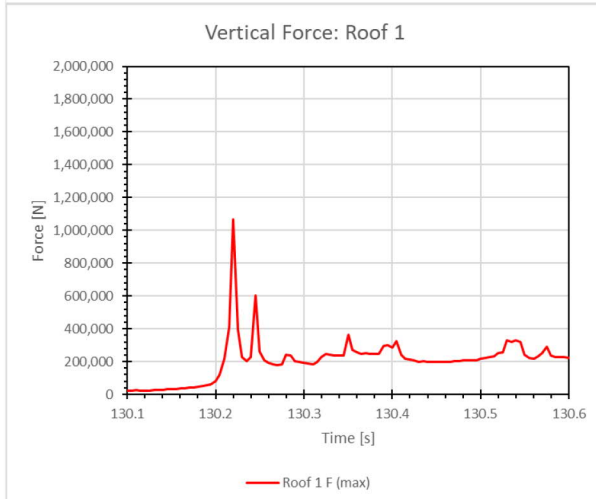
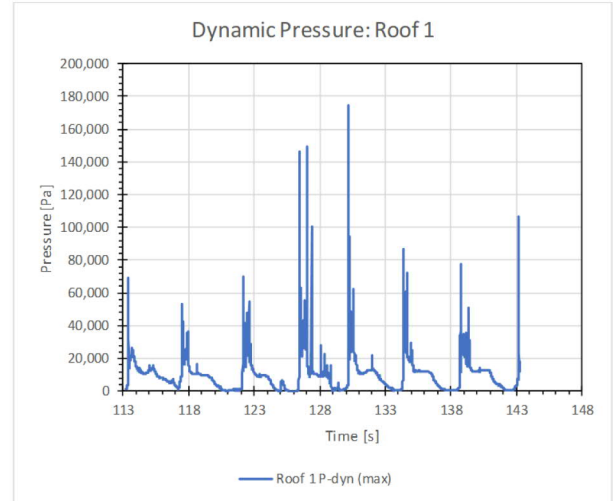
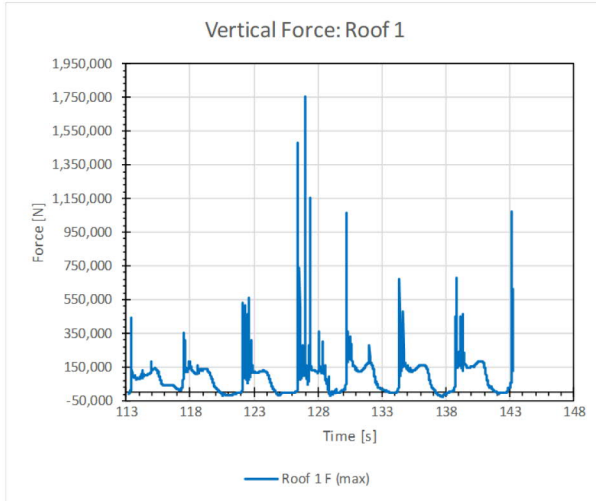


Schuif

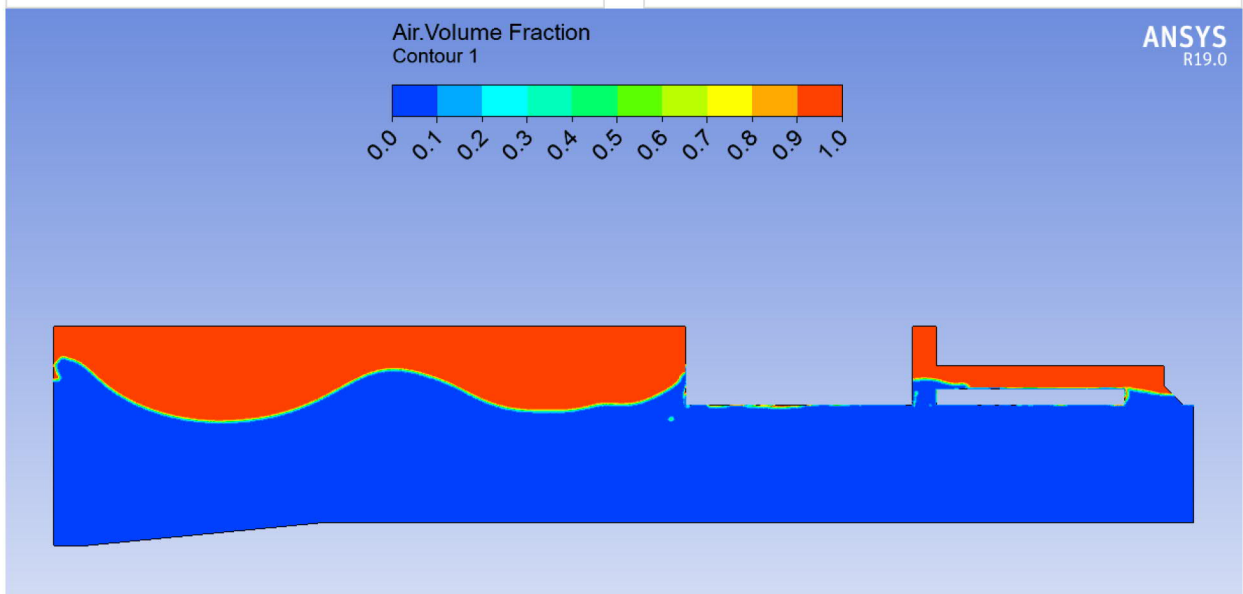
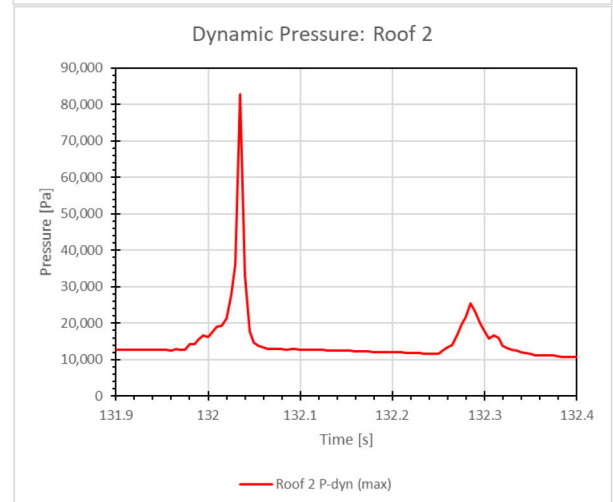
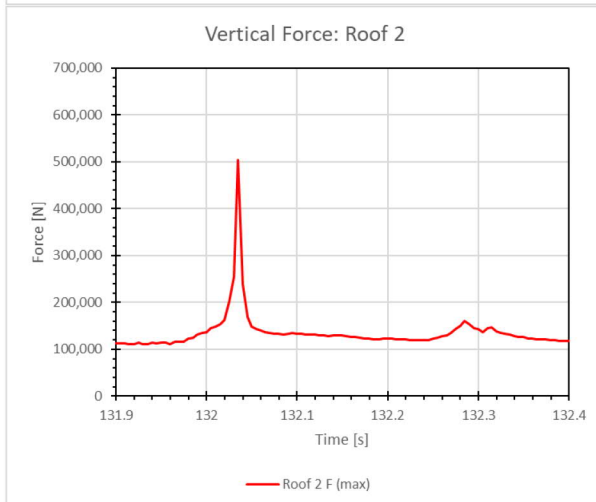
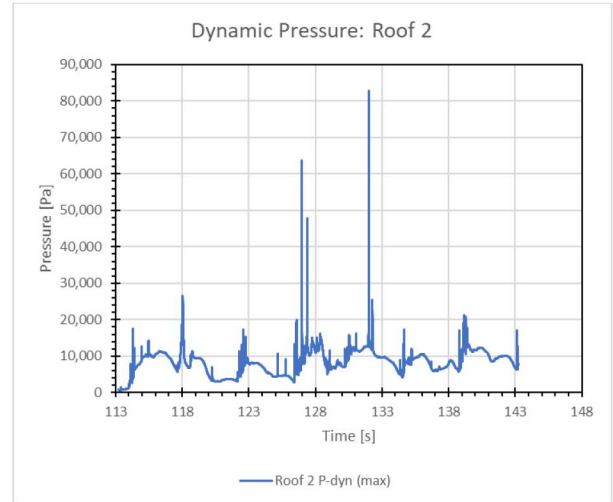
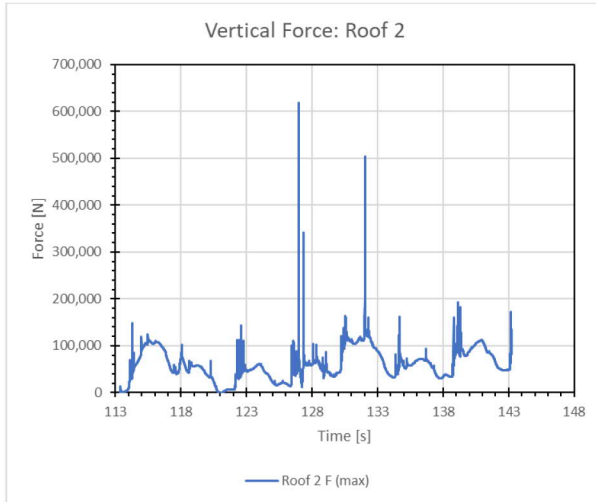


NSM – Case 2, incompressibele lucht

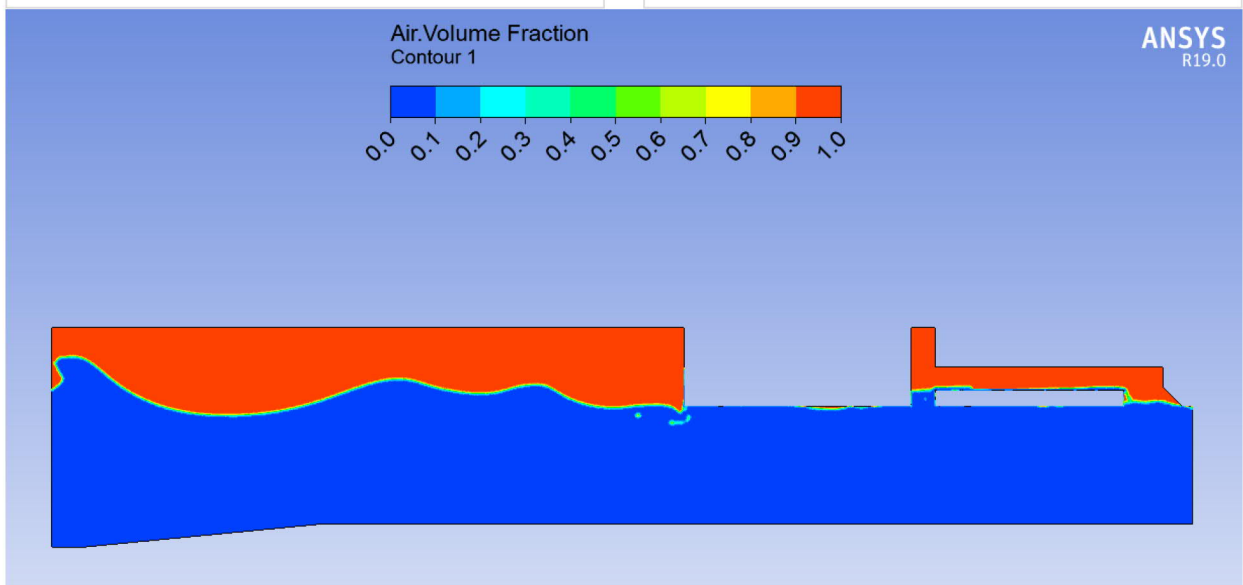
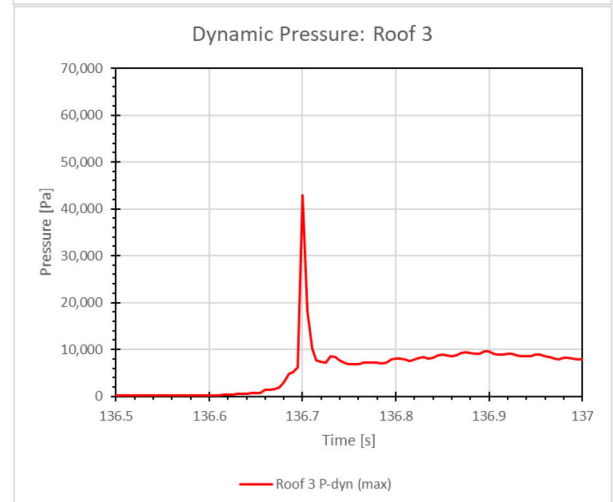
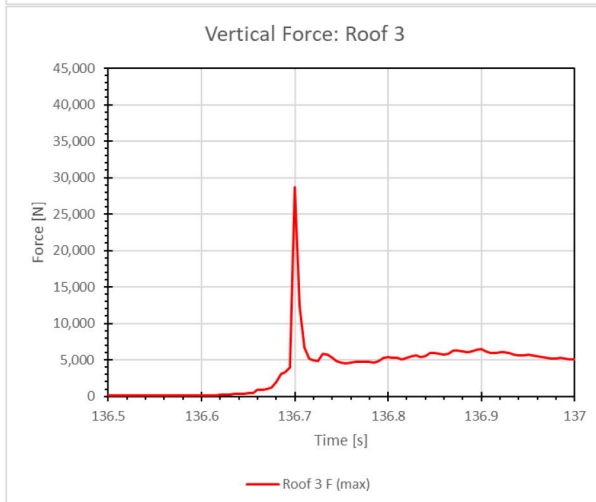
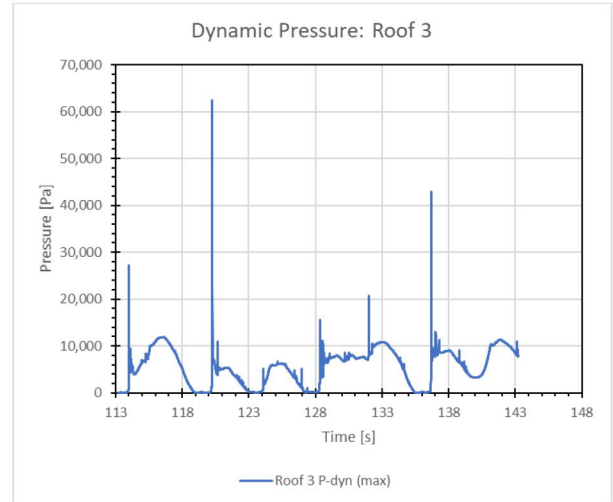
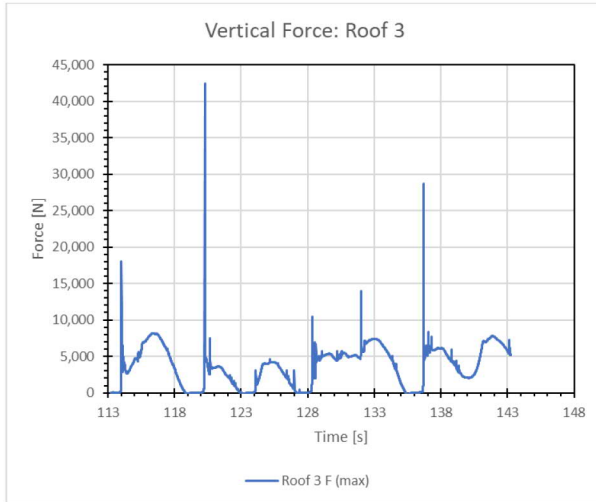
Dak sectie 1



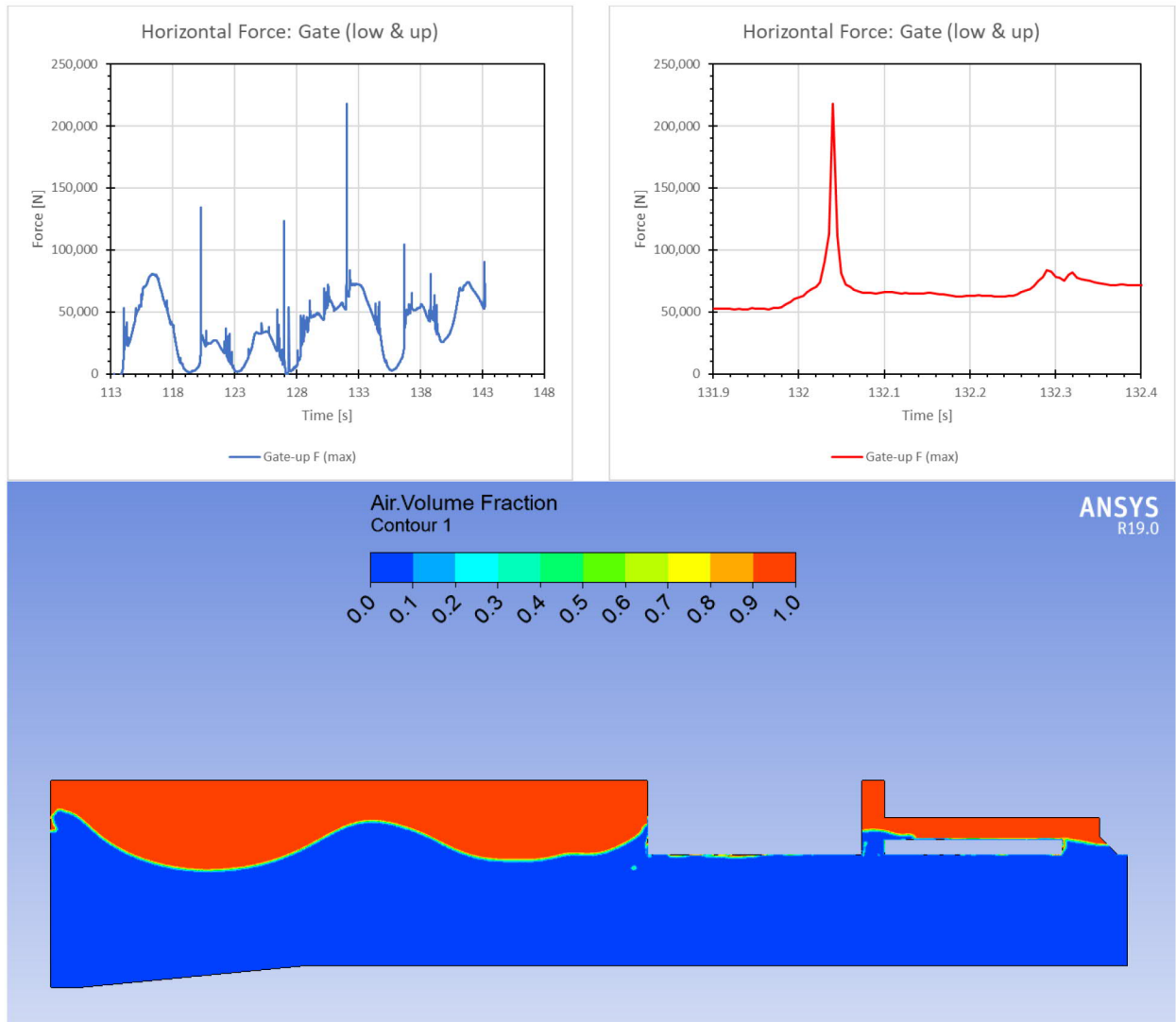
Dak sectie 2



Dak sectie 3

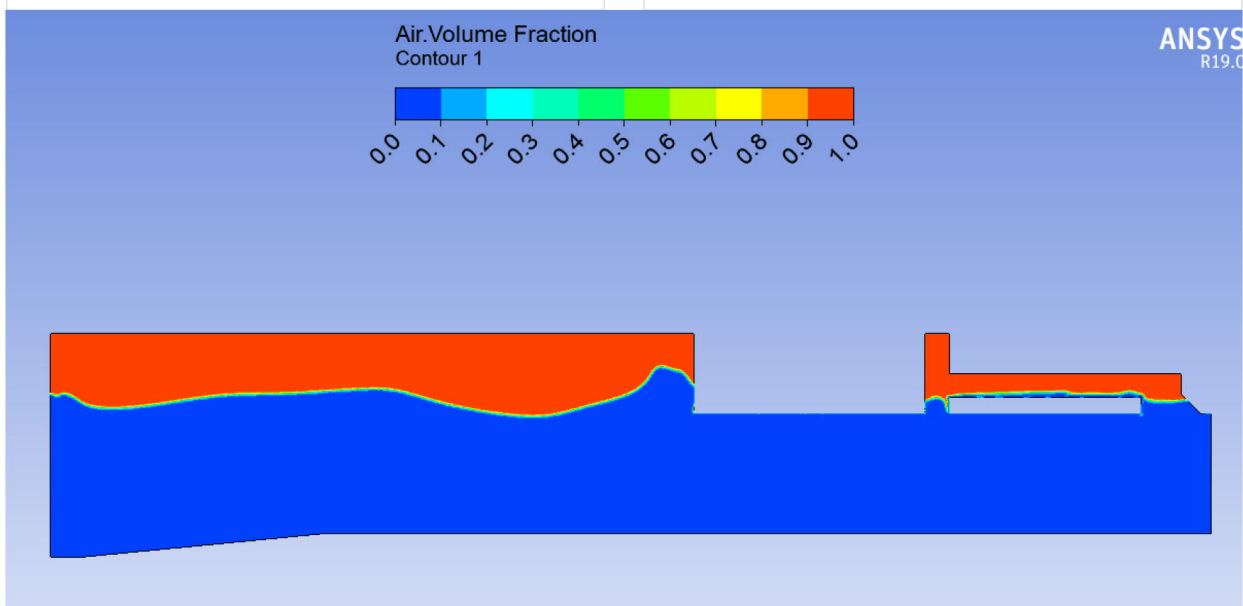
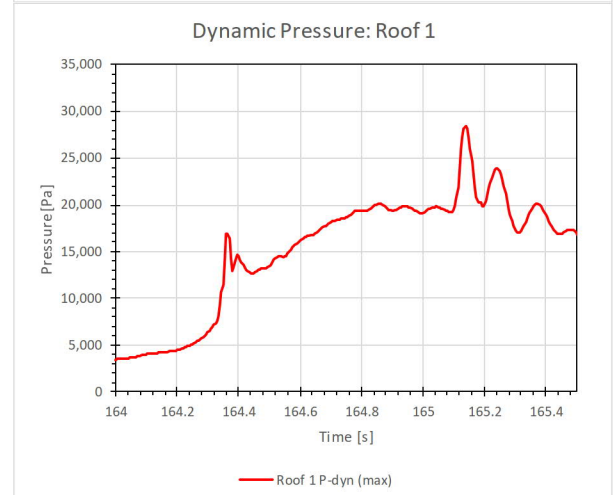
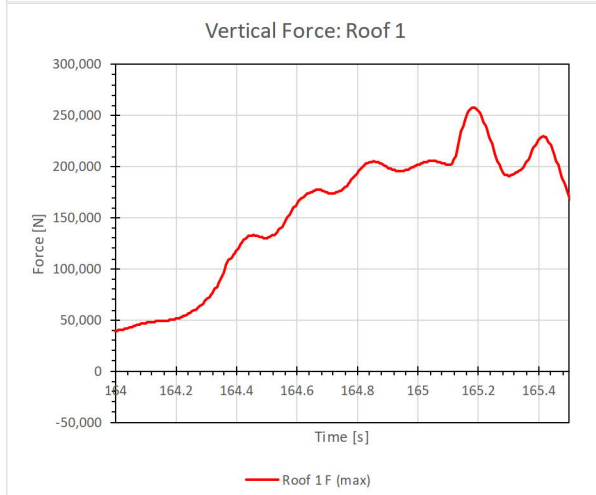
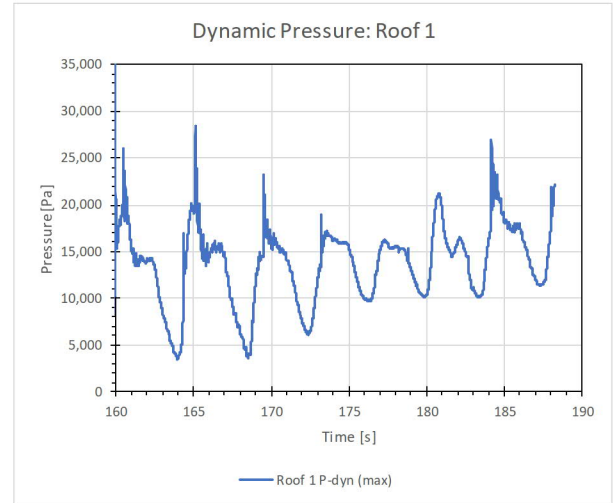
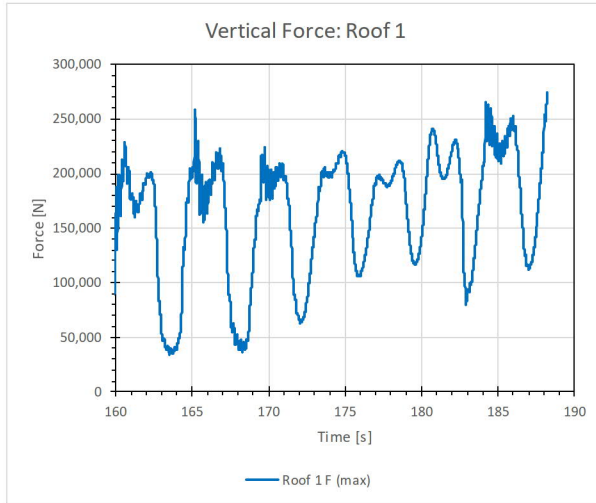


Schuif

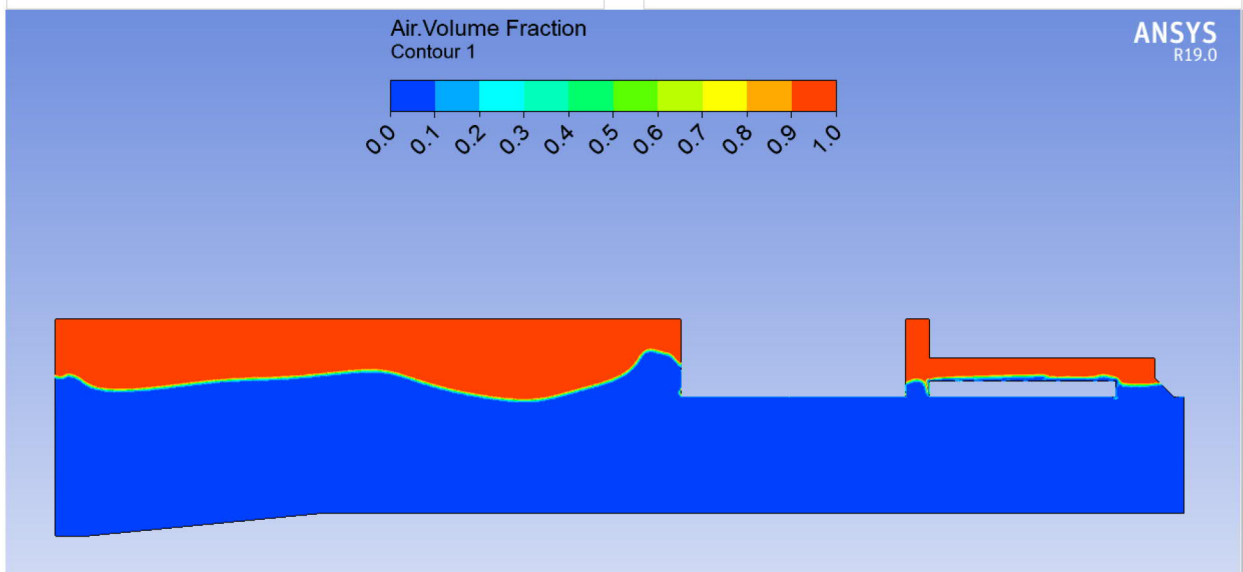
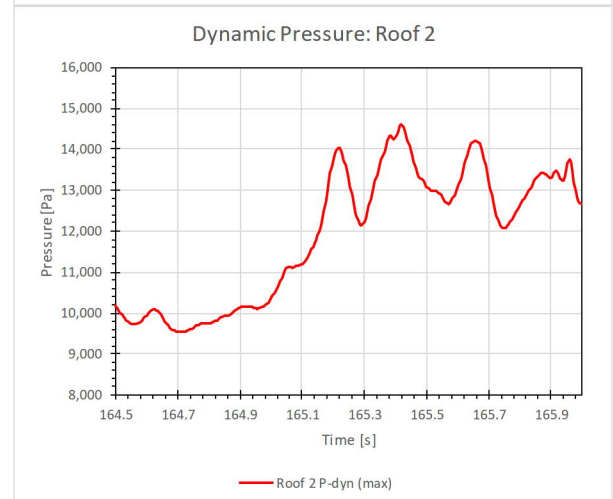
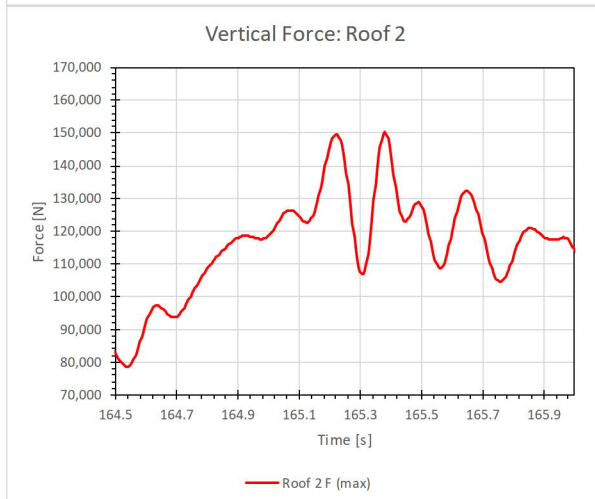
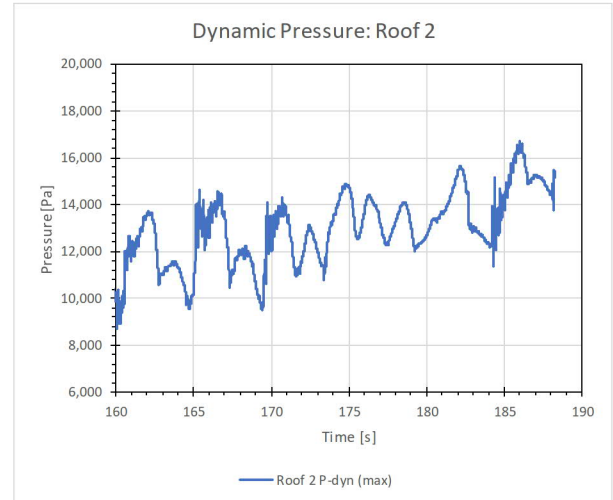
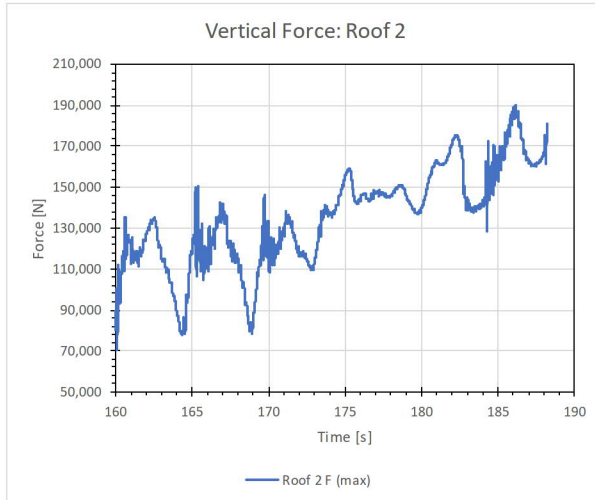


NSM – Case 2, compressie lucht

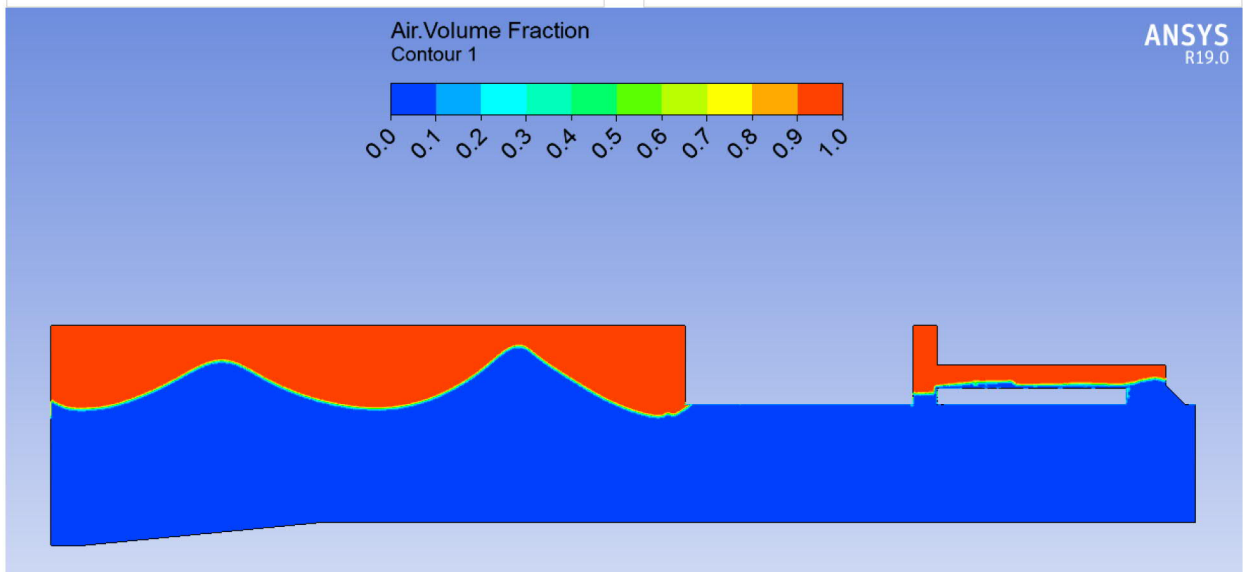
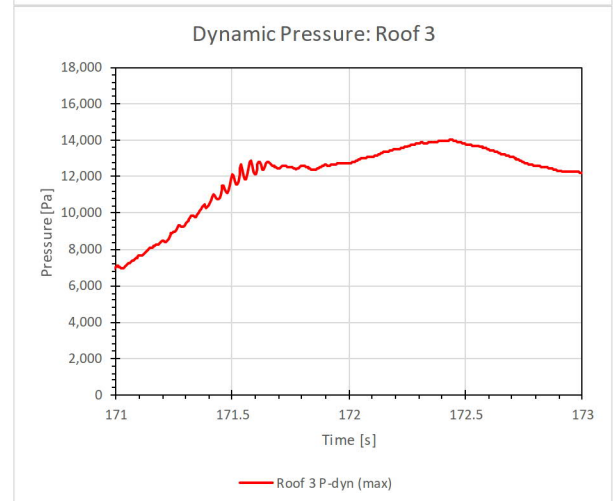
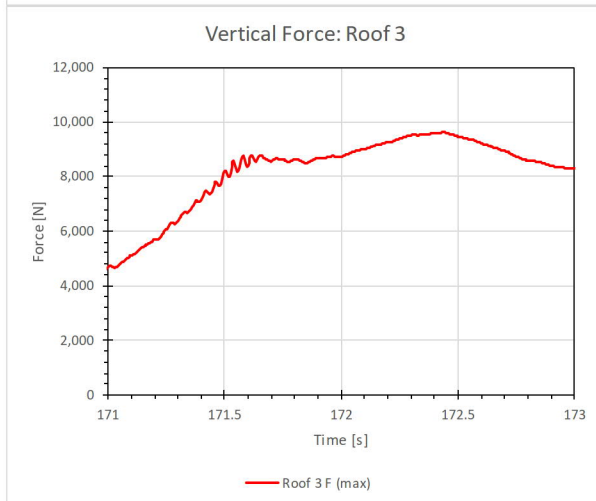
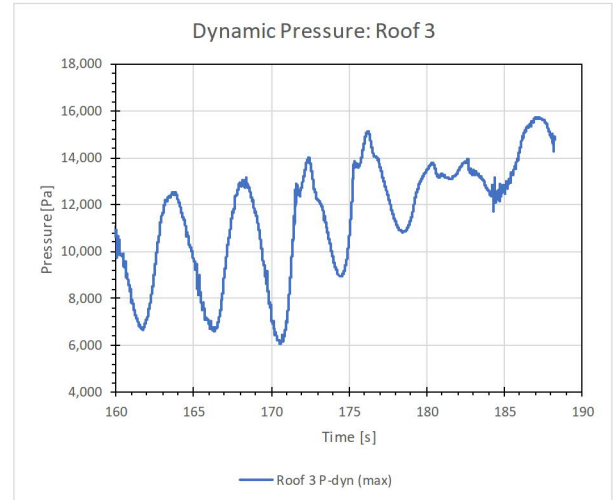
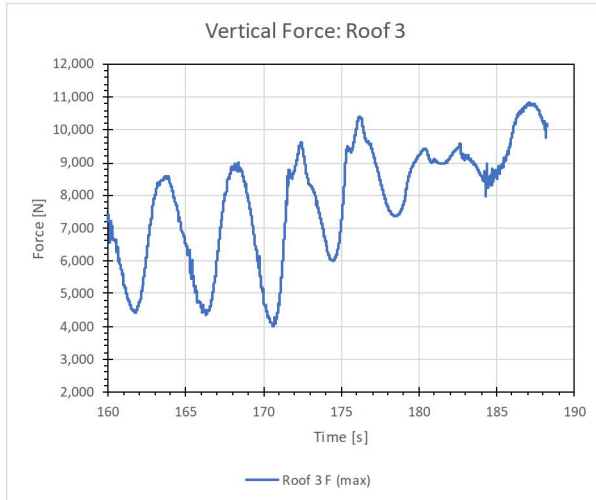
Dak sectie 1



Dak sectie 2



Dak sectie 3



Schuif

