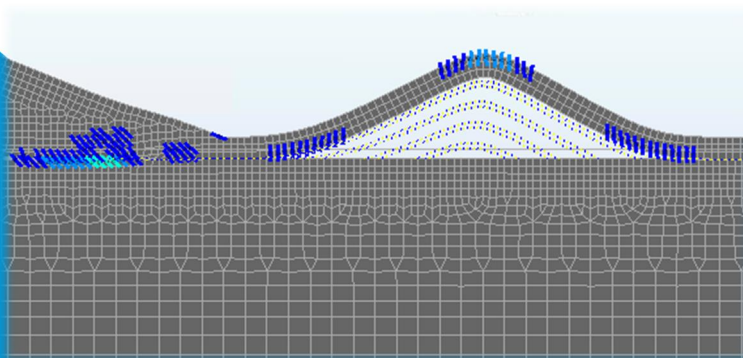


# POVM Opbarsten – Fase 2b

Numerieke variatiestudie en raamwerk voor controle

POV

MACRO  
STABILITEIT



*Datum: oktober 2020*




*Versie: 1.1 (definitief)*

## POVM Opbarsten – Fase 2b

<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Rivierenland
<b>Contactpersoon</b>	J. Schreurs
<b>Referenties</b>	WSRL opdracht met kenmerk 2019100148/2019141322 en opdrachtnummer 5018209
<b>Trefwoorden</b>	Macrostabieliteit, Opbarsten, Opdrijven

Documentgegevens	
<b>Versie</b>	1.1
<b>Datum</b>	19 oktober 2020
<b>Deltares Projectnummer</b>	11204649-002
<b>Document ID</b>	-
<b>Pagina's</b>	569
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

Auteur(s)		
M. Visschedijk	A. Van Hoven	C. Zwanenburg

Doc. Versie	Auteur(s)	Controle	Akkoord	Publicatie
1.1	M. Visschedijk 	T. Stoutjesdijk 	G. de Vries 	

# Samenvatting

Voorliggend rapport doet verslag van fase 2b van het onderzoek naar de invloed van 'opbarsten' op de macrostabiliteit van een dijktalud, zoals geprogrammeerd vanuit de 'Projectoverstijgende verkenning Macrostabiliteit' (POVM).

Bij de controle op macrostabiliteit van een dijktalud wordt aan de landzijde rekening gehouden met het volledig verloren gaan van de horizontale steundruk die een dunnere deklaag biedt aan het talud, omdat de deklaag zou kunnen uitknikken/opbarsten. Deze vrees voor uitknikken/opbarsten bestaat wanneer de waterdruk in het zand onder de deklaag toeneemt door een verhoogde buitenwaterstand. Zodra de waterdruk gelijk wordt aan het gewicht van de deklaag wordt eerst de deklaag omhoog gedrukt (opdrijven). Onder invloed van de horizontale drukkracht kan de deklaag daarna mogelijk uitknikken/opbarsten (geometrisch niet-lineair 'tweede-orde' effect). De dan ook te verwachten buigscheuren en de daarmee gepaard gaande afname van het opneembaar moment zullen het mogelijke uitknikken bevorderen.

De vrees voor opbarsten wordt bij beoordeling en ontwerp momenteel in rekening gebracht door, in geval van een deklaagdikte van 4 m of minder, geen enkele schuifsterkte meer aan de deklaag toe te kennen bij een opdrijfveiligheid van 1,2 of lager. Deze eenvoudige beslisregel berust op een expertinschatting, die niet is onderbouwd met berekeningen, experimenten of praktijkgegevens. Algemeen wordt echter gedacht dat de methode conservatief is en leidt tot een overgedimensioneerd ontwerp. Het vanuit de POVM in 2016 gestarte onderzoek naar opbarsten heeft daarom als doel om een beter begrip van het mechanisme op te bouwen, teneinde daarmee het vermoede conservatisme in de huidige methode uiteindelijk te kunnen beperken.

In onderzoeksfase 2a is al aangetoond dat de (daarvoor aangepaste) eindige-elementensoftware DIANA in staat is om te simuleren wat er gebeurt met de vervormingen en waterdrukken bij opdrijven en bij het daarop eventueel volgende (geometrisch niet-lineaire) uitknikken/opbarsten. Binnen deze simulatie wordt ook de interactie tussen vervorming en grondwaterstroming op de grens tussen zand en deklaag meegenomen, evenals de invloed van buigscheuren op het opneembaar moment.

Voorliggend document doet verslag van de volgende vervolgactiviteiten, zoals uitgevoerd in fase 2b.

- 1 Uitbreiding van in fase 2a al uitgevoerde numerieke simulaties van het opbarsten/samendrukken van de deklaag. De uitbreiding betreft het toepassen van variatie in deklaagsterkte (cohesie), deklaagdikte, deklaagstijfheid (elasticiteitsmodulus), doorlatendheid (permeabiliteit) van het zand en ten slotte de aanwezigheid en ligging van een sloot. Uit de variatiestudie is afgeleid wat de dominante parameters zijn, die in de aangepaste beslisregel moeten worden opgenomen. De aangepaste modellering en de resultaten van de in totaal 42 varianten zijn opgenomen in hoofdstuk 2 en bijlage A.
- 2 Definitie van het benodigde conceptuele raamwerk om de numerieke resultaten (met afschuiven door zowel samendrukken als uitknikken) te kunnen relateren aan de invoer voor het eenvoudiger glijvlakmodel en voor een eventueel ook benodigd samendrukkingsmodel. De resultaten zijn opgenomen in hoofdstuk 3 en bijlage B.
- 3 Planvorming voor proeven ter validatie van het numerieke model. Dat kunnen zowel veldproeven als geo-centrifuge proeven zijn. De resultaten zijn opgenomen in bijlage C.
- 4 Afstemming met buiten de POVM geprogrammeerd onderzoek naar het mechanisme 'piping', voor wat betreft grondwaterstroming bij deklaagperforatie en voor wat betreft correlaties tussen deklaagdikte en geobserveerde zand meevoerende wellen. De resultaten zijn opgenomen in bijlage D.

De resultaten van de numerieke simulaties suggereren dat opbarsten/uitknikken in situaties met een geringe opdrijfveiligheid slechts in een (zeer) beperkt aantal gevallen het dominante

faalmechanisme kan worden. Dit zijn gevallen waarin nabij de binnenteen geen sloot aanwezig is, waarin de deklaag dun en stijf is (dunner dan 2 m en/of met een elasticiteitsmodulus groter dan 3 MPa), en waarin de zandlaag voldoende doorlatend is (transmissiviteit<sup>1</sup>  $kD$  groter dan  $1E-3 \text{ m}^2/\text{s}$ ). De invloed van de treksterkte is beperkt. Belangrijke kanttekening daarbij is wel dat aan de gehanteerde schematisering nog te veel vereenvoudigingen en beperkingen kleven om deze getallen zonder verdere validatie al te kunnen toepassen voor aanpassing van de huidige beslisregel. Deze beperkingen hebben betrekking op: (a) de vereenvoudigde randvoorwaarden en beginvoorwaarden; (b) de niet meegenomen tijdsafhankelijkheid in de ontwikkeling van de waterspanning in dijk en deklaag tijdens een hoogwaterperiode; (c) de niet meegenomen invloed van (verandering van) effectieve spanning en van ruimtelijk variërende initiële overconsolidatie op de schuifsterkte van dijk en deklaag; (d) de niet meegenomen invloed van (verandering van) effectieve spanning op de stijfheid van de deklaag; (e) de niet meegenomen doorlatendheid van de deklaag, inclusief de invloed daarop van scheuren; (f) de niet gemodelleerde heterogeniteit en (g) het vereenvoudigde gedrag op de grenslaag tussen deklaag en zand bij opdrijven en bij horizontaal verschuiven.

Aanbeveling is daarom om validatie aan proefresultaten uit te voeren, in combinatie met verdere numerieke modellering.

De resultaten van de numerieke simulaties suggereren verder dat in geval van dunnere deklagen bij geringe opdrijfveiligheid wellicht ook rekening moet gaan worden gehouden met de indrukking van de deklaag als gevolg van de horizontale kracht vanuit de dijk. Om deze indrukking te kunnen volgen moet het dijktalud dan ook in zekere mate afschuiven.

In § 3.2 worden de stappen en modellen gepresenteerd die nodig zijn voor de beoordeling van macrostabiliteit bij geringe opdrijfveiligheid. Deze stappen en modellen sluiten grotendeels aan op de huidige praktijk, inclusief het gebruik van glijvlakmodellen en inclusief het verwaarlozen van de deklaagsterkte zodra opbarsten niet kan worden uitgesloten. In vergelijking tot de huidige praktijk wordt, op basis van de resultaten van de numerieke variatiestudie, echter het gebruik voorzien van minder conservatieve beslisregels om opbarsten te mogen uitsluiten.

Anderzijds zal bij het optreden van een glijvlak langs de grens tussen deklaag en zand moeten gaan worden gecontroleerd op het effect van het indrukken van dunnere deklagen. Voor deze controle wordt in § 3.2.3 de toepassing van een eindige-elementenmodel gesuggereerd, als alternatief voor de vroeger toegepaste semi-analytische methode. Toepassing van eindige-elementenmodellen is momenteel al gangbaar in het geval van constructief versterkte dijken, ook voor situaties met geringe opdrijfveiligheid. Ten opzichte van de in dit rapport gepresenteerde DIANA simulaties wordt het waterspanningsverloop in de zandlaag binnen de gangbare eindige-elementenmodellen niet berekend maar opgegeven, net zoals bij glijvlakberekeningen. Daarmee kan wel het effect van indrukken worden gesimuleerd, maar niet wat er met de deklaag en met de waterspanning op het grensvlak gebeurt na opdrijven. In de gangbare eindige-elementenmodellen wordt de ongedraineerde schuifsterkte verder beschreven met hetzelfde SHANSEP model dat ook in glijvlakberekeningen wordt toegepast.

In relatie tot de in § 3.2 beschreven stappen wordt geadviseerd om in een vervolgfase van dit onderzoek voldoende onderbouwde criteria en/of grenswaarden op te stellen voor de volgende punten.

- De grenswaarde van de opdrijfveiligheid (de verhouding tussen deklaaggewicht en waterdruk) en de verdere vervolgcriteria op basis waarvan opbarsten mag worden uitgesloten.
- De criteria op basis waarvan een aanvullende controle op indrukken nodig is bij het optreden van een glijvlak langs de grens tussen zand en deklaag.

Eindconclusie van het in fase 2b uitgevoerde onderzoek is dat de huidige beslisregel voor het uitsluiten van opbarsten op grond van de numerieke resultaten significant aangescherpt lijkt te

---

<sup>1</sup> De transmissiviteit is gelijk aan de doorlatendheid keer de laagdikte

kunnen worden, maar dat een eerst nog uit te voeren validatie aan proefresultaten nodig is om op deze numerieke resultaten te mogen vertrouwen.

Het als vervolg uitvoeren van experimenten en van daaraan gekoppelde verdere numerieke simulaties wordt daarom sterk aanbevolen. Een voorstel voor dit vervolgonderzoek is te vinden in bijlage C van dit rapport.



# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Aanleiding en onderzoeksdoel	11
1.2	Opdrachtkader	12
1.3	Afbakening	13
1.4	Mogelijke instabiliteitsvormen bij lage opdrijfveiligheid	13
<b>2</b>	<b>Numerieke variatiestudie</b>	<b>16</b>
2.1	Inleidende glijvlakberekeningen	16
2.2	Schematisering en rekengang	17
2.2.1	Eisen vanuit het onderzoeksdoel	17
2.2.2	Aspecten die overeenkomen met fase 2a	18
2.2.3	Aspecten die afwijken van fase 2a	19
2.2.4	Oplosmethode	22
2.2.5	Beperkingen	22
2.3	Overzicht van de doorgerekende gevallen	24
2.4	Resultaten	25
2.4.1	Overzichtstabel	25
2.4.2	Algemene observaties	27
2.4.3	Resultaten voor een deklaagdikte van 1 m (opbarsten)	28
2.4.4	Resultaten voor het basisgeval met deklaagdikte 3 m (indrukken)	32
2.4.5	Resultaten voor een deklaagdikte van 2 m en een sloot op $x=34$ m (opdrukken bij sloot)	36
2.4.6	Invloed van de gevarieerde eigenschappen op opbarsten	39
2.5	Conclusies	39
<b>3</b>	<b>Raamwerk voor controle bij geringe opdrijfveiligheid</b>	<b>41</b>
3.1	Scenario's voor het verloop van binnenwaartse macro-instabiliteit	41
3.1.1	Inleiding	41
3.1.2	Opdrijven	43
3.1.3	Opbarsten	46
3.1.4	Taludinstabiliteit	46
3.2	Toe te passen controles en modellen	47
3.2.1	Te doorlopen stappen	47
3.2.2	Controle op een glijvlak dat uittreedt nabij de teen	48
3.2.3	Controle op een glijvlak langs de grens tussen zand en deklaag	48
3.2.3.1	Controle op kritieke opdrijfveiligheid	48
3.2.3.2	Opbarsten kan niet worden uitgesloten	49
3.2.3.3	Opbarsten kan wel worden uitgesloten	50
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>52</b>
	<b>Referenties</b>	<b>54</b>

<b>A</b>	<b>Resultaten numerieke variatiestudie</b>	<b>55</b>
A.1	Overzichtstabel	55
A.2	Resultaten voor de afzonderlijke varianten	55
A.2.1	Inleiding	55
A.2.2	Legenda	56
A.2.3	'Output_d=1_c=13_E=3_k=1e-07_20200818'	57
A.2.4	'Output_d=1_c=14_E=3_k=1e-07_20200818'	69
A.2.5	'Output_d=1_c=15_E=3_k=1e-07_20200818'	81
A.2.6	'Output_d=2_c=14_E=3_k=1e-07_20200818'	93
A.2.7	'Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-07_20200818'	104
A.2.8	'Output_d=2_c=16_E=3_k=1e-07_20200818'	116
A.2.9	'Output_d=2_c=17_E=3_k=1e-07_20200818'	128
A.2.10	'Output_d=3_c=15_E=3_k=1e-07_20200818'	140
A.2.11	'Output_d=3_c=16_E=3_k=1e-07_20200818'	152
A.2.12	'Output_d=3_c=17_E=3_k=1e-07_20200818'	163
A.2.13	'Output_d=3_c=18_E=3_k=1e-07_20200818'	175
A.2.14	'Output_d=3_c=19_E=3_k=1e-07_20200818'	186
A.2.15	'Output_d=3_c=20_E=3_k=1e-07_20200818'	198
A.2.16	'Output_d=4_c=18_E=3_k=1e-07_20200818'	212
A.2.17	'Output_d=1_c=14_E=1_k=1e-07_20200818'	224
A.2.18	'Output_d=2_c=15_E=1_k=1e-07_20200818'	236
A.2.19	'Output_d=3_c=18_E=1_k=1e-07_20200821'	243
A.2.20	'Output_d=1_c=14_E=5_k=1e-07_20200818'	254
A.2.21	'Output_d=2_c=15_E=5_k=1e-07_20200818'	266
A.2.22	'Output_d=3_c=18_E=5_k=1e-07_20200818'	278
A.2.23	'Output_d=1_c=14_E=10_k=1e-07_20200818'	289
A.2.24	'Output_d=2_c=15_E=10_k=1e-07_20200818'	300
A.2.25	'Output_d=3_c=18_E=10_k=1e-07_20200821'	311
A.2.26	'Output_d=1_c=14_E=3_k=1e-08_20200818'	323
A.2.27	'Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-08_20200818'	335
A.2.28	'Output_d=3_c=18_E=3_k=1e-08_20200821'	347
A.2.29	'Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-07_xs=34_20200818'	359
A.2.30	'Output_d=2_c=16_E=3_k=1e-07_xs=34_20200818'	371
A.2.31	'Output_d=2_c=17_E=3_k=1e-07_xs=34_20200818'	383
A.2.32	'Output_d=3_c=17_E=3_k=1e-07_xs=36_20200818'	396
A.2.33	'Output_d=3_c=18_E=3_k=1e-07_xs=36_20200818'	411
A.2.34	'Output_d=3_c=19_E=3_k=1e-07_xs=36_20200818'	422
A.2.35	'Output_d=3_c=20_E=3_k=1e-07_xs=36_20200818'	433
A.2.36	'Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-07_xs=40_20200818'	445
A.2.37	'Output_d=3_c=18_E=3_k=1e-07_xs=45_20200821'	457
A.3	Resultaten voor de aanvullende variatie van de treksterkte	468
A.3.1	Inleiding	468
A.3.2	Output_d=1_c=14_E=3_k=1e-07_tc=1_20200927	468
A.3.3	Output_d=1_c=14_E=3_k=1e-07_tc=5_20200927	480
A.3.4	Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-07_tc=1_20200927	491
A.3.5	Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-07_tc=5_20200927	502
A.3.6	Output_d=3_c=18_E=3_k=1e-07_tc=1_20200927	513
A.3.7	Output_d=3_c=18_E=3_k=1e-07_tc=5_20200927	524
<b>B</b>	<b>Methode berekening vervormingen bij opdrijven door middel van lamellen</b>	<b>535</b>
B.1	Grotendeels overgenomen uit Leidraad 2 Appendix D	535
B.1.1	Passieve weerstandskracht	536



B.1.2	Vervormingsberekening	536
B.2	Grotendeels overgenomen uit SE-701120, Februari 1990	538
<b>C</b>	<b>Plan voor vervolgonderzoek</b>	<b>549</b>
C.1	Waarom vervolgonderzoek?	549
C.2	Doel van het onderzoek	549
C.3	De onderzoeksvragen	549
C.4	Uitwerking onderzoek	551
C.5	Kosten en baten van het onderzoek	553
C.6	Referenties	554
<b>D</b>	<b>Afstemming piping</b>	<b>555</b>
D.1	Memo afstemming macrostabiliteit bij opbarsten en piping, d.d. 12 juni 2020	555
D.1.1	Inleiding	555
D.1.2	Opdrijven en opbarsten	555
D.1.3	Verschillen bij omgang met opbarsten bij piping en macrostabiliteit binnenwaarts	557
D.1.4	Drukverlies na opbarsten	561
D.1.5	Werkomschrijving	562
D.2	Experiment waterontspanners/nooddrains als noodmaatregel vrijdag 7 februari 2020	562



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en onderzoeksdoel

Bij de controle op macrostabiliteit van een dijktalud wordt aan de landzijde rekening gehouden met het volledig verloren gaan van de horizontale steundruk die een dunnere deklaag biedt aan het talud, omdat de deklaag zou kunnen uitknikken/opbarsten. Deze vrees voor uitknikken/opbarsten bestaat wanneer de waterdruk in het zand onder de deklaag toeneemt door een verhoogde buitenwaterstand. Zodra de waterdruk gelijk wordt aan het gewicht van de deklaag wordt eerst de deklaag omhoog gedrukt (opdrijven). Dit wordt in werkelijkheid ook waargenomen. Onder invloed van de horizontale drukkracht kan de deklaag daarna mogelijk uitknikken/opbarsten (geometrisch niet-lineair ‘tweede-orde’ effect). De dan ook te verwachten buigscheuren en de daarmee gepaard gaande afname van het opneembaar moment zullen het mogelijke uitknikken bevorderen.

De oprijfveiligheid (ook wel genoemd opbarstveiligheid of opdrukveiligheid) is ter plaatse van de grenslaag tussen deklaag en zand gedefinieerd als het deklaaggewicht gedeeld door de waterdruk. De vrees voor opbarsten wordt bij beoordeling en ontwerp momenteel in rekening gebracht door, in geval van een deklaagdikte van 4 m of minder, geen enkele schuifsterkte meer aan de deklaag toe te kennen bij een oprijfveiligheid van 1,2 of lager. In dat geval geeft alleen het deklaaggewicht nog steun aan het dijktalud.

Deze eenvoudige beslisregel berust op een expertinschatting, die niet is onderbouwd met berekeningen, experimenten of praktijkgegevens. Algemeen wordt echter gedacht dat de methode conservatief is en leidt tot een overgedimensioneerd ontwerp [1].

Het vanuit de ‘Projectoverstijgende Verkenning Macrostabiliteit’ (POVM) in 2017 gestarte onderzoek naar opbarsten heeft daarom als doel om een beter begrip van het mechanisme op te bouwen, teneinde daarmee het vermoede conservatisme in de huidige methode uiteindelijk te kunnen beperken. Vanaf 2016 zijn daartoe al de volgende twee fasen doorlopen.

**Fase 1.** De eerste onderzoeksfase liep tot medio 2017. In deze fase is een literatuuronderzoek uitgevoerd, is conceptueel naar het mechanisme gekeken, is een consequentieanalyse uitgevoerd en is een voorstel geformuleerd voor nader onderzoek [2] [3] [4] [5].

**Fase 2a.** Uit de consequentieanalyse bleek voldoende belang om het onderzoek voort te zetten met een tweede fase. In de loop van 2018 zijn binnen de start van deze tweede fase de volgende drie wegen bewandeld:

1. Numeriek modelleren van het opbarsten van de deklaag [9].
2. Numeriek modelleren van de grondwaterstroming bij aanwezigheid van een opbarstkanaal of scheur in samenspraak met deskundigen op het gebied van piping [10].
3. Afstemming met deskundigen op het gebied van piping en een check van laagdiktes in de bestaande database van ruim 494 bekende wellen in het rivierengebied [10].

Ad 1. Het opbarsten van de deklaag kon voor het eerst numeriek worden gesimuleerd, met hulp van de (daarvoor eerst aangepaste) eindige-elementensoftware DIANA. Dat gebeurt door gelijktijdig de grondwaterstroming en de vervorming te berekenen, inclusief de onderlinge interactie, onder invloed van opdrijven. Voor het specifieke gedrag op de grenslaag tussen zand en deklaag is de software eerst aangepast, om in deze grenslaag na opdrijven zowel de hydraulische kortsluiting in horizontale richting te kunnen beschrijven, als ook de waterberging die nodig is om de openstand te vergroten. Opbarsten gebeurde in de eindige-elementensimulaties alleen bij een deklaagdikte van 1 m. Bij een deklaag van 2 m en 3 m trad een vooraf niet voorzien mechanisme op. Daarbij werd de deklaag als een slappe veer ingedrukt zonder zelf op schuifsterkte te bezwijken. Door deze indrukking schoof het dijktalud vervolgens wel af. De uitgevoerde variantenstudie is te beperkt geweest om op basis hiervan al een voorstel te doen voor aanscherping van de rekenregels. Bovendien kleven daarvoor aan de modellering

nog te veel beperkingen. Aanbeveling na voltooiing van activiteit 1 was daarom om de variatiestudie verder uit te breiden. Daarnaast werd aanbevolen om met behulp van een experiment, ofwel op prototype schaal ofwel grootschalig laboratoriumonderzoek of geo-centrifuge de proef op de som te nemen en het model te valideren.

Ad 2. Door middel van een numerieke variatiestudie met de eindige-elementensoftware D-GeoFlow is aangetoond dat een lokale opening in de deklaag leidt tot drukverlies, waardoor het opbarsten beperkt blijft tot een lengteschaal kleiner dan de lengteschaal van een afschuiving. Ook werd echter aangetoond dat indien er in zo'n opening een zandsuspensie omhoog komt, het begin van piping, het gat daardoor verstopt raakt en het gunstige effect van drukverlies daarmee ook verloren gaat.

Ad 3. Het optreden van een zandmeevoerende wel is een sterke aanwijzing dat (lokaal) opbarsten is opgetreden. De database van 494 zandmeevoerende wellen is daarom gecombineerd met een ondergrondmodel waaruit de deklaagdikte ter plaatse is afgeleid. Uit de analyse blijkt dat de deklaagdikte in 10% van de gevallen met zandmeevoerende wellen groter is dan 4 m. Dit zou kunnen betekenen dat 4 m een onveilige rekenwaarde is, in elk geval voor opbarsten op lokale schaal. Bij deze analyse hoort echter de kanttekening dat zowel de database als het bodemmodel onnauwkeurigheden bevatten die deze 10 % zullen beïnvloeden. Daarom is aanbevolen om de nauwkeurigheid van het ondergrondmodel te vergroten door het toevoegen van informatie uit lokaal uit te voeren grondonderzoek. Deze informatie zou dan ook kunnen worden gebruikt als validatiemateriaal voor de onder punt 1 aangeduide numerieke analyses.

## 1.2 Opdrachtkader

Voorliggende rapportage doet verslag van de activiteiten zoals omschreven in de Deltares offerte 'POVM Onderzoek Opbarsten 2019', met kenmerk 11204649-001-GEO-0001. De daarin opgenomen opsomming wordt hierna geciteerd, met uitzondering van twee activiteiten waarvan het resultaat niet in de voorliggende rapportage is opgenomen (begeleiding afstudeerstudie en schrijven artikel).

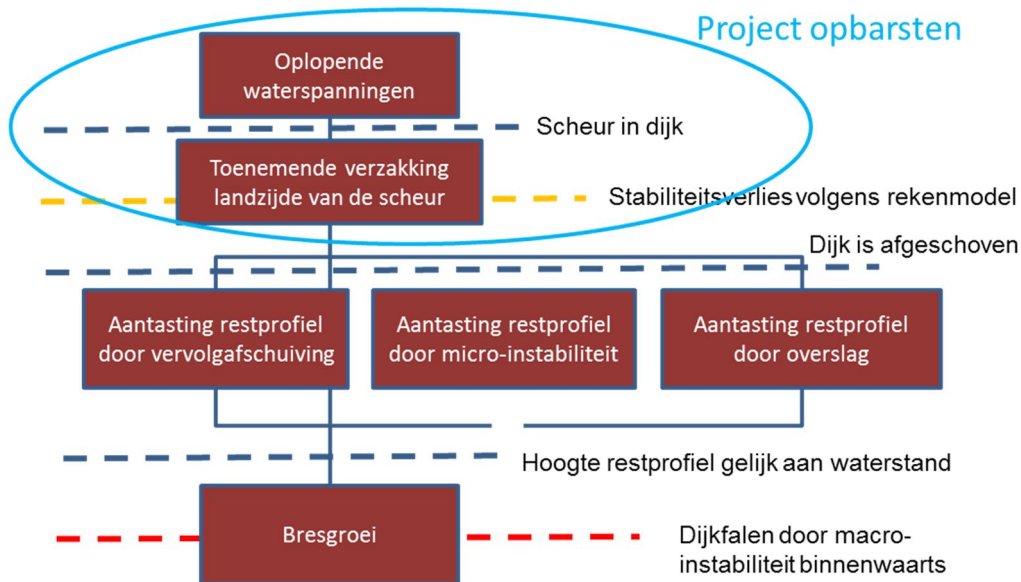
- 1 Uitbreiding van de begin 2019 gerapporteerde eerste numerieke simulatie van het opbarsten/samendrukken van de deklaag met de DIANA-software [9], overeenkomstig het advies na afsluiting van fase 2a. De uitbreiding betreft het toepassen van meer variabelen in geometrie, deklaageigenschappen en karakteristieken van het watervoerende pakket, om vat te krijgen op de dominante parameters die in de rekenregel moeten worden opgenomen. De aangepaste modellering en de resultaten van deze variatiestudie zijn opgenomen in hoofdstuk 2 en bijlage A.
- 2 Onderzoek naar het benodigde conceptuele raamwerk (incl. veiligheidsraamwerk) om de numerieke resultaten (met afschuiven door zowel samendrukken als uitknikken) te kunnen relateren aan de invoer voor het eenvoudiger glijvlakmodel en voor een eventueel ook benodigd eenvoudig samendrukkingsmodel. De resultaten zijn opgenomen in hoofdstuk 3 en bijlage B.
- 3 Planvorming voor proeven ter validatie van het numerieke model. Dat kunnen zowel veldproeven als geo-centrifuge proeven zijn. De resultaten zijn opgenomen bij bijlage C.
- 4 Afstemming met buiten de POVM geprogrammeerd onderzoek naar het mechanisme Piping, voor wat betreft grondwaterstroming bij deklaagperforatie en voor wat betreft correlaties tussen deklaagdikte en geobserveerde zand meevoerende wellen. De resultaten zijn opgenomen in bijlage D.

Binnen de totale onderzoekslijn zijn de hiervoor opgesomde activiteiten op te vatten als een uitbreiding van fase 2a. Hierna wordt deze uitbreiding genoemd: fase 2b. Voorliggend document doet daarmee dus verslag van het resultaat van fase 2b.

### 1.3 Afbakening

Een grote taludinstabiliteit kan direct tot een bres leiden. Als de afschuiving insnijdt in de kruin of het binnentalud dan kunnen daardoor secundaire afschuivingen en/of micro-instabiliteit en/of erosie door golfoverslag worden geïnitieerd, met successievelijk kruindaling, overstroming en daardoor uiteindelijk ook bresgroei tot gevolg. Zie Figuur 1-1 voor de gebeurtenissenboom tot en met bresgroei.

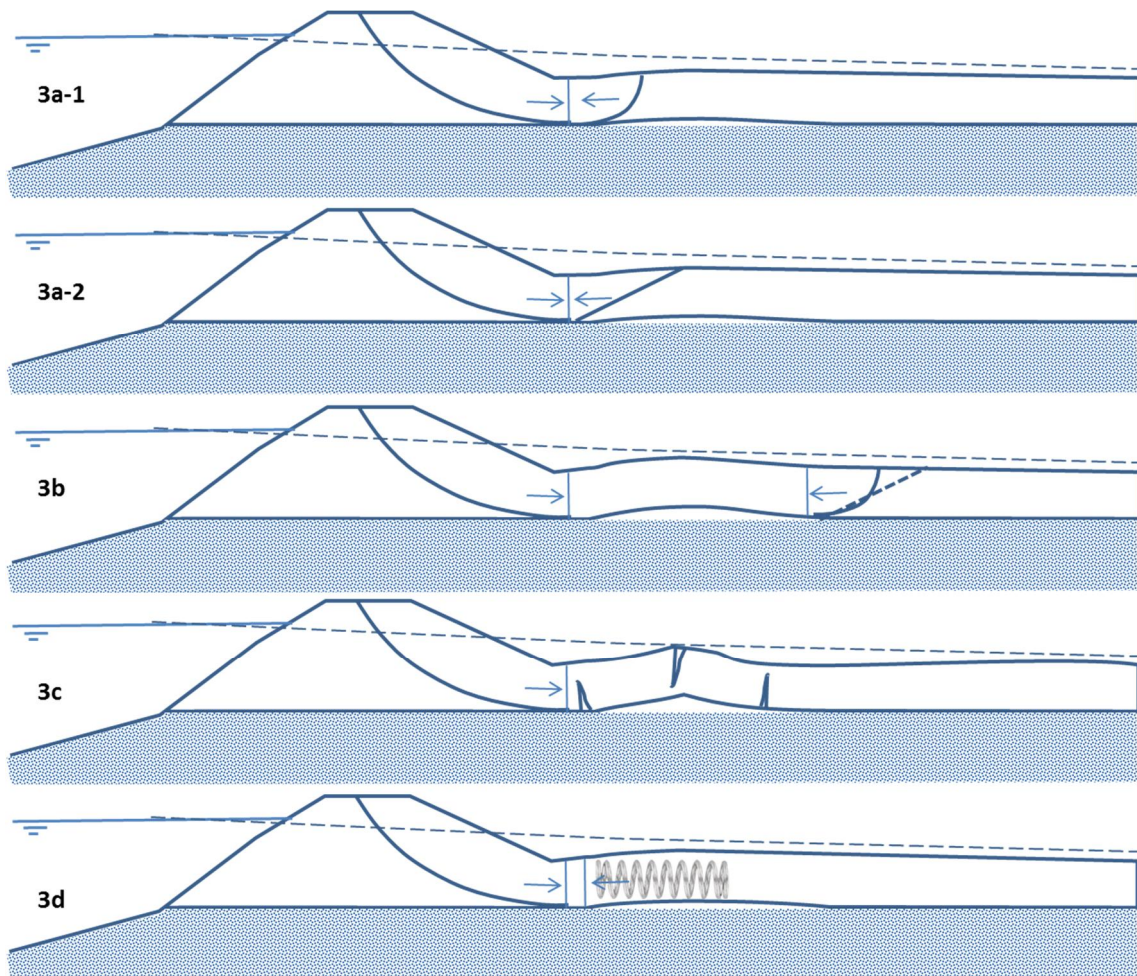
Evenals in de eerdere fasen ligt de focus in fase 2b alleen op taludinstabiliteit. De omvang en ernst van de instabiliteit in het licht van de overstromingskans wordt dus niet beschouwd.



Figuur 1-1 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk na binnenwaartse macro-instabiliteit uit Fenomenologische beschrijving in het WBI [6]

### 1.4 Mogelijke instabiliteitsvormen bij lage oprijfveiligheid

Voor het geval dat de oprijfveiligheid de waarde 1 nadert zijn binnen fase 2a al een vijftal verschillende mogelijke vormen van taludinstabiliteit onderscheiden [9]. Voor de volledigheid zijn deze bezwijkvormen nogmaals opgenomen in Figuur 1-2, gevolgd door een korte omschrijving.



Figuur 1-2 Schetsmatige manieren waarop de steun vanuit de deklaag te kort kan schieten bij ondersteuning van het talud in geval van hoogwater en opdrukken van de deklaag

- Geval 3a-1 en 3a-2 in Figuur 1-2 betreffen het passief afschuiven van de deklaag bij de teen van de dijk, ofwel cirkelvormig (3a-1) of als passieve wig, (3a-2). De in de deklaag aanwezige schuifsterkte langs het passieve deel van het glijvlak wordt hierbij benut. Bezwijken volgens dergelijke glijvlakken kan worden voorspeld met de gangbare glijvlakmodellen, die ook wel 'Limit Equilibrium Method' (LEM) modellen worden genoemd. Tot deze LEM-modellen behoren LiftVan (cirkelvorm van intredend en uitredend deel) en 'Spencer van der Meij' (vrije glijvlakvorm).
- In geval 3b is er eveneens sprake van een uitredend glijvlak, dat ook weer cirkelvormig kan zijn, dan wel wigvormig. Het uitredende glijvlak bevindt zich nu echter voorbij de opgedreven deklaag. De deklaag tussen het talud en het uitredende glijvlak blijft intact en kan de kracht zonder veel indrukking overdragen vanuit het talud naar de passieve kant van het glijvlak. De in de deklaag aanwezige schuifsterkte langs het glijvlak wordt benut. Bezwijken via dit mechanisme kan eveneens worden voorspeld met LiftVan en Spencer van der Meij.
- In geval 3c barst de deklaag op. De deklaag welke als een drukstaaf wordt ingedrukt knikt uit voordat de maximale passieve weerstand in de deklaag kan worden gemobiliseerd. De steun die de deklaag kan bieden aan het talud is kleiner dan de steun welke wordt gevonden bij een gangbaar passief uitredend glijvlak (gevallen 3a en 3b). De schuifsterkte in de deklaag langs een potentieel passief glijvlak wordt niet volledig benut, omdat voorafgaand al uitknikken van de deklaag optreedt. Rekenkundig wordt hiermee in de gangbare LEM-modellen momenteel omgegaan door de schuifsterkte tot nul te reduceren.
- In het laatste geval (3d) treedt geen bezwijken op van de deklaag, maar drukt deze als een slappe veer in. Aan de actieve zijde van het glijvlak, dat door de dijk gaat, kan de schuifsterkte

volledig zijn gemobiliseerd of overschreden, zonder dat dit aan de passieve zijde in de deklaag gebeurt. Dit kan gebeuren bij slappe deklagen die over enige lengte opdrijven. Ook in dit geval wordt de in de deklaag aanwezige schuifsterkte niet volledig benut. Deze faalmodus kan alleen berekend worden door de stijfheid van de dijk en de deklaag in rekening te brengen (zie [1] en [7]).

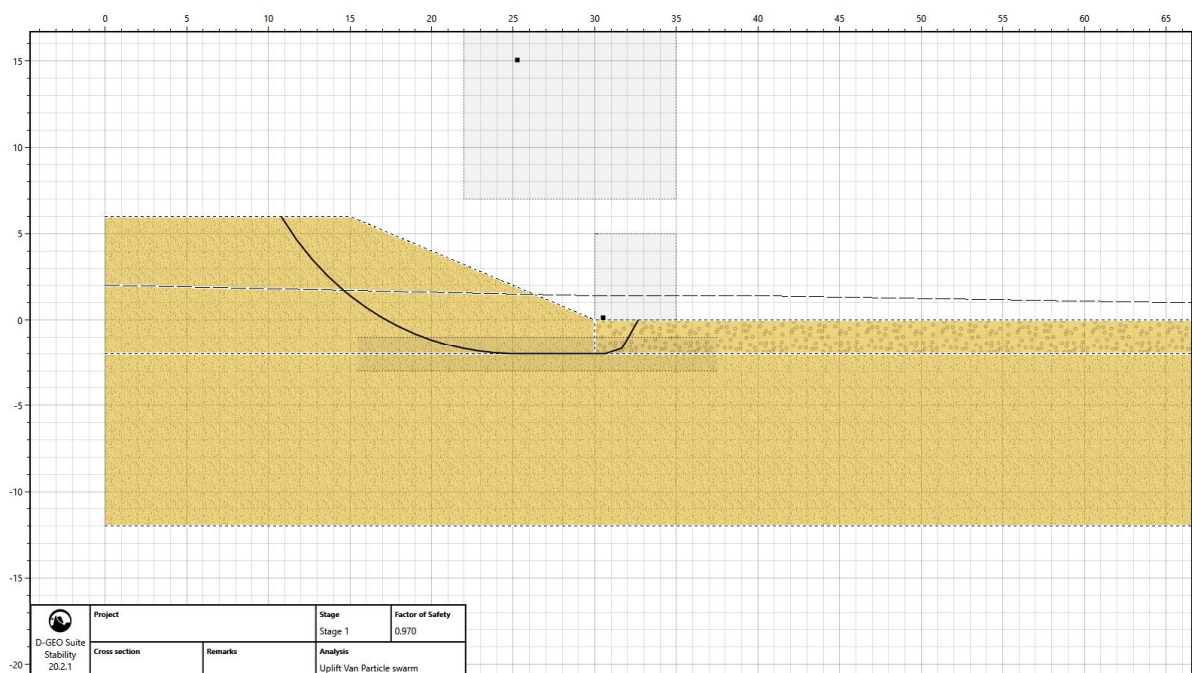
Door middel van de in hoofdstuk 2 gerapporteerde numerieke variatiestudie is nagegaan welk van deze bezwijkvormen kunnen voorkomen bij variatie van deklaagsterkte, deklaagdikte, deklaagstijfheid, doorlatendheid (permeabiliteit) van het zand en ten slotte de aanwezigheid en ligging van een sloot. In het conceptuele deel (hoofdstuk 3) is vervolgens aangegeven hoe deze bezwijkvormen zouden kunnen worden gemodelleerd in combinatie met een glijvlakberekening.

## 2 Numerieke variatiestudie

### 2.1 Inleidende glijvlakberekeningen

In de rapportage bij fase 2a zijn al de resultaten gepresenteerd van inleidende glijvlakberekeningen [9]. Deze berekeningen geven een indruk van relevante boven- en ondergrenzen voor de ongedraineerde schuifsterkte, zoals bepaald bij dezelfde aangenomen geometrie en hetzelfde aangenomen stijghoogteverloop als in de hierna gerapporteerde numerieke analyses. De boven en ondergrenzen aan de schuifsterkte worden bepaald om numerieke berekeningen te maken waarbij zonder steun van de deklaag voor het eerst instabiliteit zal optreden (bovengrens) en waarbij instabiliteit al optreedt zonder enige verzwakking van de deklaag (ondergrens). Vanwege de betekenis voor het vervolg worden voorgenoemde resultaten in deze paragraaf nog eens samengevat.

Net zoals voor de eindige-elementenberekeningen in fase 2a en 2b is de dijkhoogte gelijk aan 6 m gekozen en de taludhelling gelijk aan 1:2,5. Net zoals voor de eindige-elementenberekeningen in fase 2b, is voor de glijvlakberekeningen in dijk en deklaag een hydrostatisch waterspanningsverloop ingevoerd, met de freatische lijn op maaiveld. Het stijghoogteverloop in de zandlaag is zo gekozen dat de opdrijfveiligheid bij de teen gelijk aan 1 is (waterdruk gelijk aan deklaaggewicht). Iteratief is vervolgens de kritieke waarde van de cohesie in en onder de dijk opgezocht. Dat is de waarde waarbij de stabiliteitsfactor ongeveer gelijk aan 1 is. Deze kritieke waarde is bepaald voor drie verschillende deklaagdiktes en per deklaagdikte voor het geval dat de cohesie in de deklaag gelijk is aan de cohesie in en onder de dijk en voor het geval dat de cohesie in de deklaag gelijk is aan nul. Daarmee wordt voor elke deklaagdikte een onder- en bovengrens voor de cohesiewaarden gevonden, die is gebruikt voor de in volgende paragrafen gerapporteerde eindige-elementenberekeningen.



Figuur 2-1 Voorbeeld glijvlakberekening (in dit geval voor een deklaagdikte van 2 m) met wel of geen cohesie in de deklaag, waarbij de waarde van de cohesie in en onder de dijk wordt opgezocht waarbij de stabiliteitsfactor ongeveer gelijk aan 1 is.



Tabel 2-1 Kritieke waarde voor de cohesie uit de glijvlakberekeningen (bij een stabiliteitsfactor gelijk aan 1), voor verschillende deklaagdiktes en voor het geval zonder – en met deklaagbijdrage

Deklaagdikte [m]	Resultaat Glijvlakberekening (D-Stability)			
	Stijghoogte bij opdrijven deklaag [m]	Kritieke waarde cohesie $c$ [kPa]		Wrijvingshoek* $\phi$ [deg]
		Met deklaagbijdrage	Zonder deklaagbijdrage	
3	2.20	20	15.1	3
2	1.47	16.8	13.8	3
1	0.73	15.1	13.1	3

\* Voor de wrijvingshoek is dezelfde kleine waarde aangehouden als nodig was in de numerieke berekening

Tabel 2-2 en Tabel 2-3 tonen de invloed van de wrijvingshoek op de berekende stabiliteitsfactor bij de in Tabel 2-1 gegeven 'kritieke' cohesiewaarden. Een wrijvingshoek van drie graden vergroot de stabiliteitsfactor met hooguit 5 % ten opzichte van een wrijvingshoek van 0 graden.

Tabel 2-2 Vergelijking stabiliteitsfactoren bij verschillende wrijvingshoeken voor het geval met deklaagbijdrage

Deklaagdikte [m]	Resultaat Glijvlakberekening (D-Stability)			Stabiliteitsfactor [-]
	Stijghoogte bij opdrijven deklaag [m]	Kritieke waarde cohesie $c$ [kPa]	Wrijvingshoek $\phi$ [deg]	
3	2.20	20	3 / 0	0,984 / 0,930
2	1.47	16.8	3 / 0	0,988 / 0,931
1	0.73	15.1	3 / 0	1,022 / 0,975

Tabel 2-3 Vergelijking stabiliteitsfactoren bij verschillende wrijvingshoeken voor het geval zonder deklaagbijdrage

Deklaagdikte [m]	Resultaat Glijvlakberekening (D-Stability)			Stabiliteitsfactor [-]
	Stijghoogte bij opdrijven deklaag [m]	Kritieke waarde cohesie $c$ [kPa]	Wrijvingshoek $\phi$ [deg]	
3	2.20	15.1	3 / 0	0,991 / 0,941
2	1.47	16.8	3 / 0	0,970 / 0,917
1	0.73	13.8	3 / 0	1,013 / 0,975

## 2.2 Schematisering en rekengang

### 2.2.1 Eisen vanuit het onderzoeksdoel

Voor het onderzoeksdoel moeten de schematisering en rekengang zo worden gekozen dat er vanuit de dijk een significante horizontale kracht wordt uitgeoefend op de deklaag, die bij opdrijven uitknikken zou kunnen veroorzaken. Deze kracht wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van het talud en door het verhang van de stijghoogte in horizontale richting. De waterdruk in de zandlaag moet bij deze horizontale kracht in de tijd vanaf de waterzijde vervolgens worden opgevoerd, totdat de berekening vanwege numerieke instabiliteit niet meer kan worden doorgezet. Op dat moment moet vervolgens, voor zover mogelijk, worden bepaald met welke van de in § 1.4 gepresenteerde fysische instabiliteitsvormen de numerieke instabiliteit kan worden geassocieerd.

Om de in § 1.4 gepresenteerde mogelijke instabiliteitsvormen in de eindige-elementenberekening te kunnen laten optreden moet de schematisering in ieder geval de mogelijkheid toestaan tot het optreden van de volgende niet-lineaire fenomenen:

- Het afschuiven van dijks- en/of deklaagmateriaal door overschrijden van de schuifsterkte.
- Het indrukken van de deklaag met gelijktijdig schuiven over de zandlaag, zodra de schuifsterkte in de zandlaag onder invloed van de oplopende waterspanning wordt overschreden.
- Het opdrijven van de deklaag, zodra de effectieve spanning in het zand gelijk aan nul wordt. De interactie tussen opdrijven en de grondwaterstroming en grondwaterdrukken in het zand moet

daarbij in rekening worden gebracht. En binnen de opdrijfzone moet op de grenslaag een uniforme waterdruk worden geforceerd.

- Het eventuele (geometrisch niet-lineaire) uitknikken van de deklaag, waarbij ook de invloed van buigscheuren op het opneembaar moment in rekening moet worden gebracht.

### 2.2.2 Aspecten die overeenkomen met fase 2a

Op de volgende onderdelen komen de toegepaste schematiseringsprincipes in fase 2b overeen met de principes die ook al zijn gehanteerd in fase 2a [9].

- Het eindige-elementenmodel bestaat uit een dijk, een deklaag en zandlaag. Deze lagen worden gemodelleerd met 8-knoops vierhoekige vlakke-rek elementen (CQ16E).
- De dijk heeft een hoogte van 6 m, een totale kruinbreedte van 30 m en een taludhelling van 1:2,5. De zandlaag heeft een dikte van 10 m. Voor de dikte van de deklaag zijn binnen de variatiestudie verschillende waarden gehanteerd.
- De schuifsterkte in de deklaag en dijk wordt binnen het toegepaste Mohr-Coulomb model beschreven door een uniforme cohesiewaarde  $c$  en door een minimale wrijvingshoek  $\phi$  van 3 graden. Voor de uniforme cohesiewaarde zijn binnen de variatiestudie verschillende waarden gehanteerd. De reden voor de gehanteerde minimale wrijvingshoek is uitsluitend dat deze in het Mohr-Coulomb model van DIANA niet gelijk aan nul mag worden gekozen. Via deze eenvoudige karakterisering wordt benaderingsgewijs een ongedraineerde schuifsterkte beschreven. Om redenen van consistentie is in de vergelijkende glijvlakberekeningen eenzelfde wrijvingshoek toegepast.
- Verder wordt in het dijksmateriaal gerekend met een 'tension cut-off' waarde zonder 'softening' en in de deklaag met een treksterkte inclusief 'softening'. Dit betekent dat het opneembaar moment van de deklaag zal afnemen op de locaties waar in de doorsnede de treksterkte wordt overschreden. De treksterkte werkt op de effectieve hoofdspinning. Voor de trekspanning zijn binnen de variatiestudie verschillende waarden gehanteerd.
- De elasticiteit van dijk en deklaag wordt gekarakteriseerd door eenzelfde constante (niet-spanningsafhankelijke) elasticiteitsmodulus  $E$  en een dwarscontractiecoëfficiënt  $\nu$ . Voor de stijfheidsmodulus van de deklaag en dijk zijn binnen de variatiestudie verschillende waarden gehanteerd.
- In de zandlaag worden naast de verplaatsingen gelijktijdig ook de waterdrukken berekend (MIXTURE formulering), onder invloed van de randvoorwaarden en onder invloed van het eventuele opdrijven van de deklaag. Voor de doorlatendheid van het zand zijn binnen de variatiestudie verschillende waarden gehanteerd.
- Tussen de zandlaag en de deklaag zijn interface elementen aangebracht met een wrijvingshoek gelijk aan die van het zand en met de mogelijkheid tot openstand wanneer de effectieve normaalspanning gelijk aan nul wordt. Deze interface-elementen krijgen bij openstand bovendien een grote hydraulische geleidbaarheid in langsrichting (per lengte-eenheid 100 keer groter dan een zandlaag van 1 meter dik). Via deze geleidbaarheid wordt in de opgedreven zone een ongeveer gelijke waterdruk in het aanliggende deel van de zandlaag geforceerd. Verder wordt in de interface-elementen ook berging van water in rekening gebracht. Dit betekent dat vergroting van de openstand vereist dat vanuit het zand gelijktijdig water instroomt en omgekeerd dat bij verkleining van de openstand water uitstroomt.
- Als criterium voor het aanzetten van de grote hydraulische geleidbaarheid in langsrichting wordt binnen de interface-elementen een op te geven grenswaarde gebruikt voor de in deze elementen berekende relatieve elastische verplaatsing in normaalrichting. Deze grenswaarde is bij elk van de deklaagdiktes zo gekozen dat bij het bereiken van de grenswaarde in de interface ongeveer een effectieve normaalspanning gelijk aan 0 wordt bereikt.

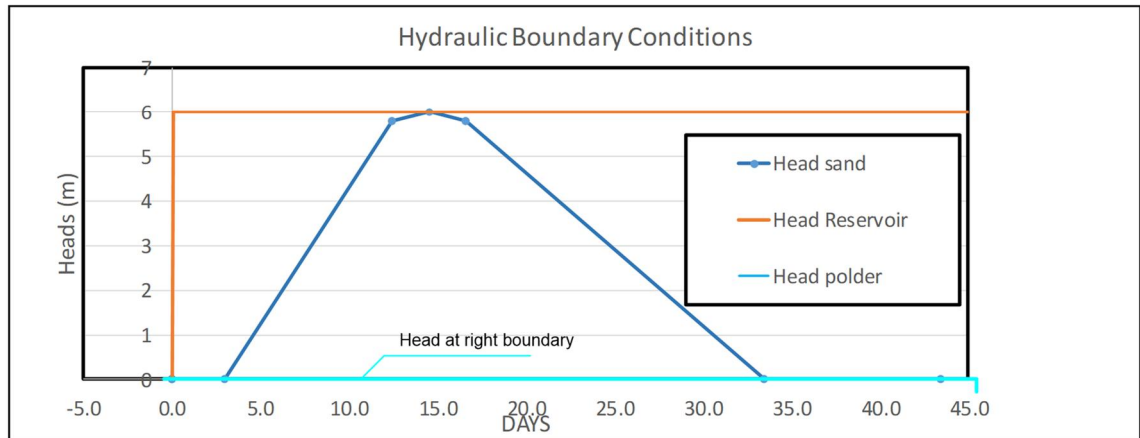
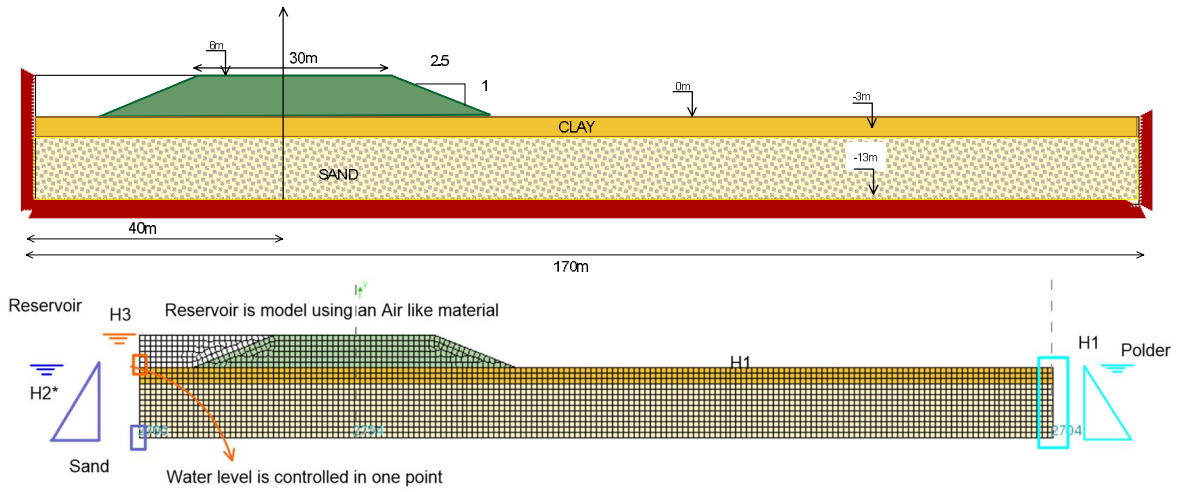
- Door middel een geometrisch niet-lineaire (*Total Lagrange*) analyse wordt nagegaan of bij opdrijven onder invloed van de drukkracht ook uitknikken van de deklaag kan plaatsvinden.
- De berekening bestaat uit twee rekenfasen. In de eerste rekenfase bestaat de dijk nog niet en worden de spanningen in zand en deklaag geïnitieerd. In de tweede rekenfase wordt eerst de dijk toegevoegd via een toenemende zwaartekrachtbelasting. Vervolgens wordt de stijghoogte in de zandlaag aan waterzijde opgevoerd in de tijd. De indrukking door het aanbrengen van het dijkgewicht in tweede rekenfase zorgt ervoor dat de gehanteerde constante grenswaarde voor het inwerking treden van de horizontale geleidbaarheid in de interface ook toereikend is nabij de teen en onder de dijk.

### 2.2.3 Aspecten die afwijken van fase 2a

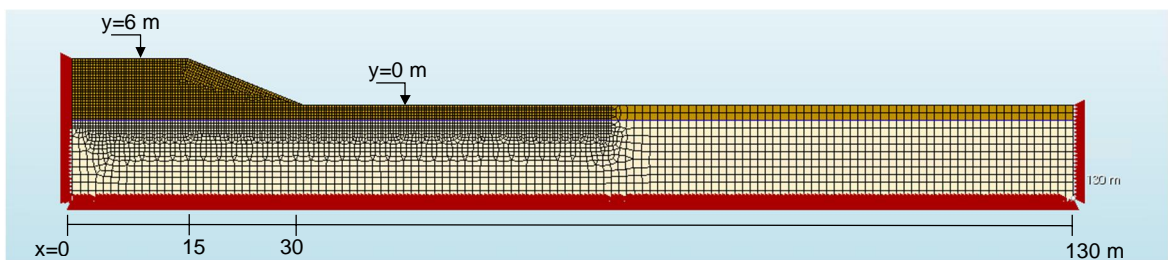
Ten opzichte van de eerder gerapporteerde numerieke analyse in fase 2a [9] is de schematisering in fase 2b aangepast en/of uitgebreid op de volgende onderdelen.

- Het eindige-elementenmodel begint nu ter plaatse van het midden van de kruin. Het talud aan waterzijde wordt dus niet meer gemodelleerd, omdat dit niet nodig is voor het doel van de berekening.
- De tijdafhankelijke stijghoogte in de zandlaag wordt vanwege bovengenoemde aanpassing nu aangebracht ter plaatse van het kruinmidden, over de volle hoogte van de zandlaag, waarna het verdere verloop van de waterdrukken in de zandlaag, tussen de randvoorwaarden aan weerszijden, weer wordt berekend net zoals in fase 2a.
- In deklaag en dijk worden de waterspanningen niet langer gelijktijdig met de verplaatsingen berekend, maar wordt nu een hydrostatisch verloop voorgeschreven, met een freatische lijn gelijk aan maaiveld. Deze opgegeven stijghoogtes worden niet beïnvloed door de stijghoogte in het zand. Er wordt dus geen indringing berekend. De reden om voor deze vereenvoudiging te kiezen is dat het leidt tot snellere berekeningen en betere numerieke stabiliteit, terwijl nog steeds kan worden bestudeerd wat er gebeurt met de ongedraineerd gemodelleerde deklaag tijdens verhoging van de stijghoogte in het zand.
- In combinatie met bovenstaande worden het materiaal van de dijk en deklaag nu gemodelleerd als vrijwel onsamendrukbaar, door toepassing van een ongedraineerde dwarscontractiecoëfficiënt van 0,495. Daarbij wordt elasticiteitsmodulus zo aangepast dat eenzelfde glijdingsmodulus resulteert als met de combinatie van de gedraineerde elasticiteitsmodulus met een gedraineerde dwarscontractiecoëfficiënt van 0,3.
- Het elementennet is verfijnd in de zone waar afschuiven, opdrijven en buiging wordt verwacht, om de numerieke nauwkeurigheid van het rekenresultaat te verhogen.
- In een aantal varianten is in de deklaag nu ook een sloot gemodelleerd. Deze sloot heeft een diepte van 1 m, een bodembreedte van 1 m en een hellingshoek van 1:2,5. Voor de afstand van de sloot tot de dijkteen zijn in de variatiestudie verschillende waardes gehanteerd.

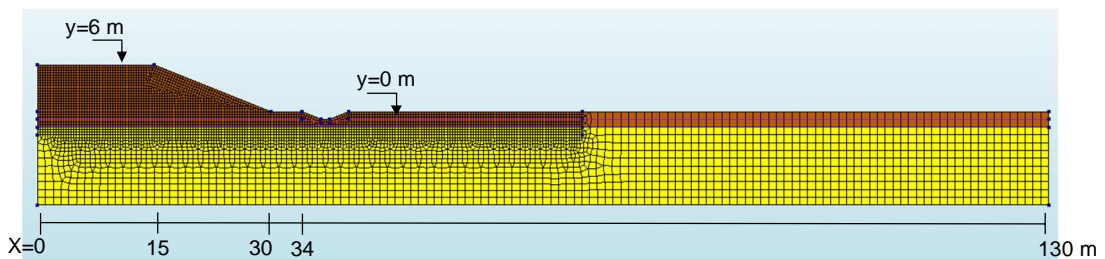
De aangepaste schematisering maakt het mogelijk om elke afzonderlijke variant in beperkte tijd tot aan numerieke instabiliteit door te rekenen (10 tot 15 minuten). Het opstellen van de invoer voor de varianten is via een script bovendien volledig geparametriseerd, zodat de invoer voor de verschillende varianten daarmee eenvoudig kan worden gegenereerd.



Figuur 2-2 Schematisering zoals toegepast in fase 2a [9].

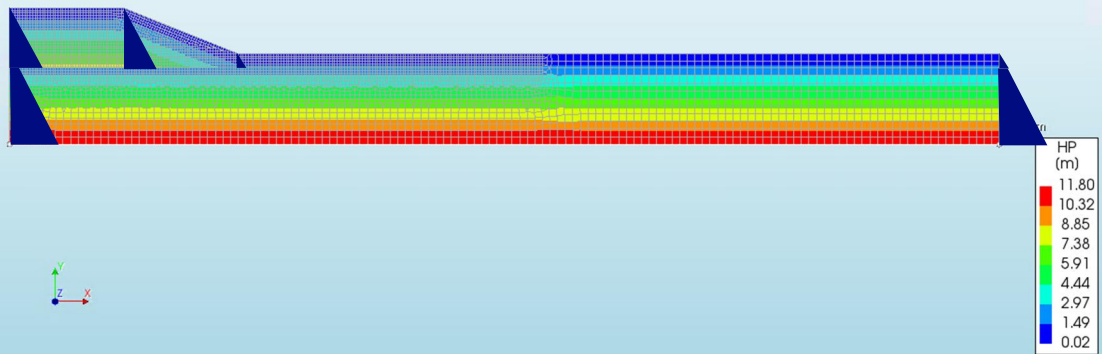


Figuur 2-3 Voorbeeld van het nu in fase 2b toegepaste elementennet zonder sloot. In dit geval voor een geometrie met een deklaagdikte van 2 meter. Altijd startend vanaf  $x=0$ . Altijd met een zandlaagdikte van 10m. Altijd met een dijkhoogte van 6 m en een taludhelling van 1:2,5. Altijd met de bovenkant van de deklaag ter plaatse van  $y=0$  m. Voor zandlaag, deklaag en dijk altijd met 8-knoops vierhoekige vlakke-rek elementen (CQ16E).

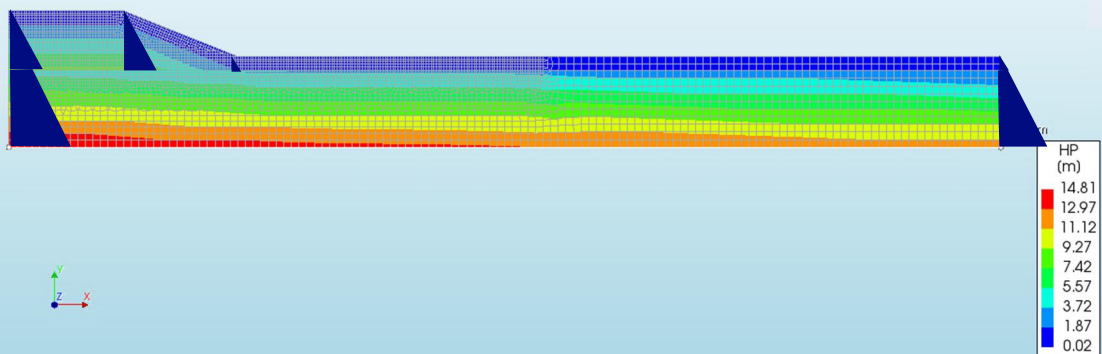


Figuur 2-4 Voorbeeld van het nu in fase 2b toegepaste elementennet met sloot. In dit geval voor een geometrie met een deklaagdikte van 2 m en een start van de sloot op  $x=34$  m. De sloot heeft altijd een diepte van 1 m, een bodembreedte van 1 m en een helling van 1:2,5. In de sloot is steeds gerekend met een waterpeil gelijk aan  $y = 0$ .

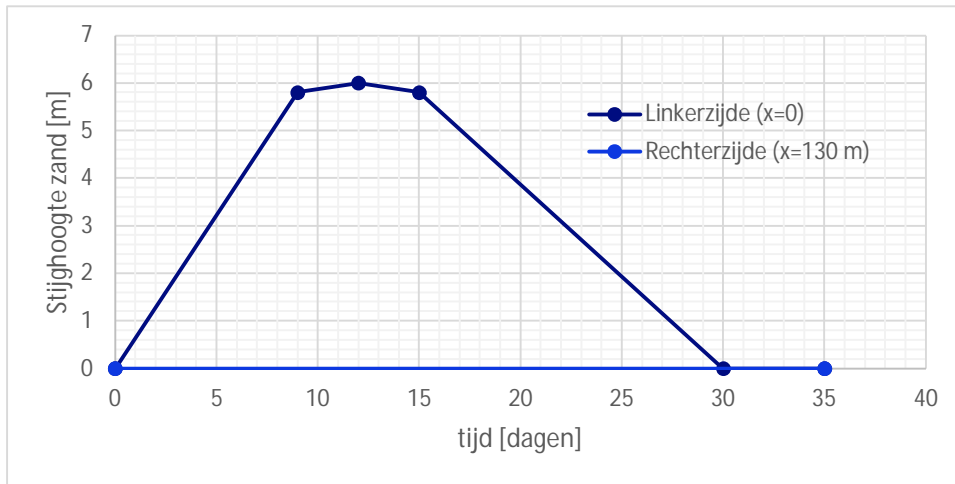
Uplift analysis  
Phase 2, Start-step 6, Load-factor 1.0000  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 11.80m



Uplift analysis  
Phase 2, Time-step 59, Time 4 day 17 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 14.81m



Figuur 2-5 Voorbeeld voor de nu in fase 2b gemodelleerde drukhoogte in dijk en deklaag en in de zandlaag. Bovenin voor  $t=0$ . Onderin voor  $t=4$  dagen en 17 uur. De waterspanning in dijk en deklaag is hydrostatisch en onveranderlijk, met de freatische lijn op maaiveld. De drukhoogte in de zandlaag wordt door DIANA berekend als functie van de randvoorwaarden aan weerszijden. Dat wil zeggen: op  $x=0$  m een tijdsafhankelijke stijghoogte startend bij  $y=0$  en op  $x=130$  m een constante stijghoogte gelijk aan  $y=0$ . Zie ook Figuur 2-6. Als een sloot aanwezig is, is de ligging van het waterpeil daarin onveranderlijk aangenomen op  $y = 0$



Figuur 2-6 Het tijdsafhankelijke verloop van de in fase 2b opgegeven randvoorwaarden voor de stijghoogte aan beide randen van de zandlaag.

#### 2.2.4 Oplosmethode

Voor de numerieke oplossing van het gekoppelde stelsel van verplaatsingen en waterdrukken op basis van de geometrisch niet-lineaire *Total Lagrange* methode is per belastingstap en tijdstap gebruik gemaakt van een standaard iteratieve tangente methode (*Newton-Raphson*), met per iteratie een niet-symmetrische oplossing van het stelsel vergelijkingen. Binnen de belastingstappen (tijdens het aanbrengen van de dijk) is het maximaal aantal iteraties beperkt tot 20. Binnen de daarop volgende tijdstappen (waarin de stijghoogte in het zand wordt opgevoerd) is het maximaal aantal iteraties beperkt tot 10.

#### 2.2.5 Beperkingen

Uit de in totaal gehanteerde schematiseringsprincipes en oplosmethode volgen op voorhand de volgende beperkingen:

- Ter plaatse van de linkerzijde is de horizontale verplaatsing verhinderd. In werkelijkheid zal daar bij hoogwaterbelasting echter wel horizontale verplaatsing kunnen optreden. Dit betekent ook dat in de dijk tijdens beperkte taludafschuiving eerder de treksterkte zal worden bereikt dan in werkelijkheid het geval is. Dit wordt acceptabel geacht zolang het doel vooral is om vanuit de dijk een horizontale drukbelasting op de deklaag te laten ontstaan.
- De aangenomen constante waterspanning in deklaag en kleilaag, met een freatische lijn gelijk aan maaiveld en met een hydrostatisch verloop, is fysisch niet realistisch. In werkelijkheid worden de freatische lijn en waterdruk in dijk en deklaag beïnvloed door de in de tijd veranderende buitenwaterstand en door de daarop reagerende stijghoogte in het zand. In de deklaag wordt dus ook geen indringing gemodelleerd en eveneens geen invloed op het verloop in de zandlaag door lek via de deklaag. Bij scheurvorming in de deklaag wordt verder dus ook geen effect daarvan op de grondwaterstroming in het zand beschreven. Het talud zal in deze schematisering wel een druk tegen de deklaag leveren, waardoor de deklaag op verschillende manieren kan bezwijken. In werkelijkheid zal de druk tegen de deklaag tijdens een hoogwater een hogere mate van tijdsafhankelijkheid hebben.
- De uniforme ongedraineerde schuifsterktemodellering in deklaag en dijk is eenvoudig en houdt geen rekening met de invloed van de van plaats tot plaats verschillende initiële effectieve spanning en met de invloed van overconsolidatie. Bovendien houdt een ongedraineerde schuifsterktemodellering ook geen rekening met het optreden van wateroverspanningen en -onderspanning door compactie/dilatantie tijdens afschuiven en met het effect van dissipatie van waterspanningen.

- De eenvoudige ongedraineerde modellering van een intacte verzadigde deklaag houdt ten slotte geen rekening met de gestructureerdheid en de scheuren die bestaan in deklagen die niet altijd met water verzadigd zijn, zoals in het oosten van Nederland.
- De geschematiseerde dwarsdoorsnede is tweedimensionaal en veronderstelt homogene eigenschappen van deklaag. Er wordt dus geen rekening gehouden met ruimtelijke variatie binnen de dwarsdoorsnede. Vanwege de tweedimensionale schematisering wordt bovendien ook geen rekening gehouden met mogelijke lokale verzwakkingen of scheuren die in dijkasrichting slechts beperkte afmeting hebben (veel kleiner dan de aannemelijk breedte van een afschuifvlak).
- Het gebruik van een uniforme en constante elasticiteitsmodulus voor de deklaag, dijk en zandlaag is eenvoudig en houdt geen rekening met de invloed van de van plaats tot plaats verschillende effectieve spanning, die bovendien in de tijd verandert.
- De toegepaste geometrisch niet-lineaire *Total Lagrange* analyse is wel geschikt om de geometrisch niet-lineaire effecten van grote verplaatsing beschrijven (zoals uitknikken bij uitbuiging), maar minder geschikt om de effecten van grote elementvervorming te beschrijven (zoals na afschuiving). Verder zijn de binnen de geometrisch niet-lineaire berekening toegepaste interface-elementen niet in staat om rekening te houden met het feit dat de aanliggende elementen in de zand- en deklaag na een langsverschuiving niet meer precies tegenover elkaar liggen.

Het opheffen van bovengenoemde beperkingen zal de complexiteit doen toenemen. Voor een betere beschrijving van het geometrisch niet lineaire gedrag op het grensvlak van zand en deklaag geldt bovendien dat de benodigde modellering in combinatie met de modellering van alle verder benodigde fenomenen niet door de software wordt ondersteund.

In het huidige stadium is het toevoegen van meer complexiteit nog niet nodig, omdat het doel vooral is om inzicht te geven in de mogelijke instabiliteitsvormen en in de parameters die daarop invloed hebben. Deze studie heeft een aftastend en experimenteel karakter. Zodra het doel echter wordt om de werkelijkheid tijdens het oplopen van de buitenwaterstand zo precies mogelijk na te bootsen zal in de toekomst wellicht extra complexiteit moeten worden toegevoegd. Bovendien is in alle gevallen ook validatie aan proefresultaten nodig.

## 2.3 Overzicht van de doorgerekende gevallen

Tabel 2-4 toont de gehanteerde eigenschappen voor de drie basisgevallen. Op die basisgevallen is gevarieerd (zie hierna) met de in zwart aangegeven eigenschappen. De eigenschappen waarmee niet is gevarieerd zijn weergegeven in het grijs.

Tabel 2-4 Overzicht van de eigenschappen voor de drie basisgevallen. De eigenschappen waarmee in fase 2b niet verder is gevarieerd zijn weergegeven in het grijs.

Parameter		Basisgeval		
		1	2	3
Deklaagdikte	[m]	1	2	3
Zandlaagdikte	[m]	10	10	10
Dijkhoogte	[m]	6	6	6
Taludhelling	[-]	1:2,5	1:2,5	1:2,5
Horizontale coördinaat op de overgang van kruin naar talud	[m]	15	15	15
Sloot: Horizontale x coördinaat start sloot	[m]	-	-	-
Sloot: taludhelling	[-]	1:2,5	1:2,5	1:2,5
Sloot: diepte	[m]	1	1	1
Sloot: bodembreedte	[m]	1	1	1
Dijk en deklaag: Cohesie $c$	[kPa]	14	15	18
Dijk en deklaag: effectieve wrijvingshoek $\phi$	[deg]	3	3	3
Dijk en deklaag: Treksterkte	[kPa]	3	3	3
Dijk en deklaag: Verzadigd soortelijke gewicht $\gamma_{\text{nat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	17	17	17
Dijk en deklaag: Gedraineerde elasticiteitsmodulus $E$	[MPa]	3	3	3
Dijk en deklaag: Gedraineerde dwarscontractiecoëfficiënt $\nu_{\text{drained}}$	[-]	0,3	0,3	0,3
Dijk en deklaag: Ongedraineerde dwarscontractiecoëfficiënt $\nu_{\text{undrained}}$	[-]	0,495	0,495	0,495
Deklaag: Scheurvorming met softening na bereiken treksterkte	[-]	ja	ja	ja
Zandlaag: Verzadigd soortelijke gewicht $\gamma_{\text{nat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	20
Zandlaag: Effectieve wrijvingshoek $\phi$	[deg]	32	32	32
Zandlaag: Verzadigd soortelijke gewicht $\gamma_{\text{nat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	20
Zandlaag: Gedraineerde elasticiteitsmodulus $E$	[MPa]	10	10	10
Zandlaag: Verzadigd soortelijke gewicht $\gamma_{\text{nat}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	20
Zandlaag: Gedraineerde dwarscontractiecoëfficiënt $\nu_{\text{drained}}$	[-]	0,3	0,3	0,3
Zandlaag: Permeabiliteit $k$	[m/s]	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03
Deklaag en zandlaag: $K_0$	[-]	0,4	0,4	0,4



Tabel 2-2 geeft een overzicht van de 42 varianten die zijn doorgerekend. De van het basisgeval afwijkende eigenschappen zijn in deze tabel grijs gemarkeerd.

Tabel 2-5 Overzicht van alle berekende basisgevallen en varianten.

deklaag-dikte	cohesie	locatie start sloot	E-mod	k_zand	Treksterkte
[m]	[kPa]	[m]	[Mpa]	m/s	[kPa]
1	13	nvt	3	1,00E-03	3
1	14	nvt	3	1,00E-03	3
1	15	nvt	3	1,00E-03	3
2	14	nvt	3	1,00E-03	3
2	15	nvt	3	1,00E-03	3
2	16	nvt	3	1,00E-03	3
2	17	nvt	3	1,00E-03	3
3	15	nvt	3	1,00E-03	3
3	16	nvt	3	1,00E-03	3
3	17	nvt	3	1,00E-03	3
3	18	nvt	3	1,00E-03	3
3	19	nvt	3	1,00E-03	3
3	20	nvt	3	1,00E-03	3
4	18	nvt	3	1,00E-03	3
1	14	nvt	1	1,00E-03	3
2	15	nvt	1	1,00E-03	3
3	18	nvt	1	1,00E-03	3
1	14	nvt	5	1,00E-03	3
2	15	nvt	5	1,00E-03	3
3	18	nvt	5	1,00E-03	3
1	14	nvt	10	1,00E-03	3
2	15	nvt	10	1,00E-03	3
3	18	nvt	10	1,00E-03	3
1	14	nvt	3	1,00E-04	3
2	15	nvt	3	1,00E-04	3
3	18	nvt	3	1,00E-04	3
2	15	34	3	1,00E-03	3
2	16	34	3	1,00E-03	3
2	17	34	3	1,00E-03	3
3	16	36	3	1,00E-03	3
3	17	36	3	1,00E-03	3
3	18	36	3	1,00E-03	3
3	19	36	3	1,00E-03	
3	20	36	3	1,00E-03	
2	15	40	3	1,00E-03	
3	18	45	3	1,00E-03	
1	14	nvt	3	1,00E-03	1
1	14	nvt	3	1,00E-03	5
2	15	nvt	3	1,00E-03	1
2	15	nvt	3	1,00E-03	5
3	18	nvt	3	1,00E-03	1
3	18	nvt	3	1,00E-03	5

## 2.4 Resultaten

### 2.4.1 Overzichtstabel

Tabel 2-6 geeft een overzicht van de meest karakteristieke resultaten voor alle beschouwde gevallen. De van het basisgeval afwijkende eigenschappen zijn in deze tabel weer grijs gemarkeerd.

In de tabel is aangegeven:

- Het tijdstip waarop opdrijven begint.
- Het tijdstip waarop nog juist een stabiele oplossing werd gevonden (nabij falen)
- De faalmodus. De volgende faalmodi zijn gevonden, soms in combinatie.
  - Indrukken van de deklaag (als een veer, zonder bezwijken)
  - Afschuiven van de deklaag bij of net achter de teen
  - Opdrukken van de deklaag bij het sloottalud
  - Opbarsten, bij grote uitbuiging inclusief buigscheuren.
- De ligging van de oprijfzone.
- De maximale verschilverplaatsing tussen deklaag en zandlaag in verticale richting (openstand) op het tijdstip nabij falen
- De ligging van de zone waarlangs de deklaag over de zandlaag schuift.
- De maximale verschilplaatsing tussen deklaag en zandlaag in horizontale richting (schuifverplaatsing) op het tijdstip nabij falen

Tabel 2-6 Overzicht van resultaten voor alle berekende gevallen

deklaag- dikte [m]	cohesie [kPa]	locatie start sloot [m]	E-mod [Mpa]	k_zand m/s	trek- sterkte [kPa]	tijd begin opdrijven [h:m]	tijd nabij falen d-h	faalmodus	locatie oprijfzone [m]	max openstand bij falen [cm]	locatie schuifzone [m]	max schuif- verplaatsing nabij teen bij falen [cm]
1	13	nvt	3	1,00E-03	3	1d14h	1d21h	indrukken/opbarsten	49-32		4,4 72-25	19,5
1	14	nvt	3	1,00E-03	3	1d14h	2d2h	opbarsten/indrukken	54-31		14 73-25	18
1	15	nvt	3	1,00E-03	3	1d14h	2d6h	opbarsten	56-31		22 72-25	15
2	14	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d8h	indrukken	46-33		1,5 72-24	24
2	15	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d8h	indrukken	47-33		1,2 70-24	20,9
2	16	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d10h	indrukken	52-32		2 73-24	20
2	17	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d10h	indrukken	52-32		1,6 71-25	18
3	15	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	4d13h	indrukken	nvt	nvt	63-25	17,7
3	16	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	4d16h	indrukken	nvt	nvt	67-22	21
3	17	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	4d20h	indrukken	nvt	nvt	67-22	21
3	18	nvt	3	1,00E-03	3	4d20h	4d21h	indrukken	44-33		0,7 67-22	19
3	19	nvt	3	1,00E-03	3	4d20h	4d21h	indrukken	44-33		0,7 65-24	16,4
3	20	nvt	3	1,00E-03	3	4d20h	4d23h	indrukken	48-33		0,9 62-24	12,1
4	18	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	5d1h	indrukken	nvt	nvt	52-26	12,2
1	14	nvt	1	1,00E-03	3	nvt	1d11h	indrukken	nvt	nvt	50-26	15
2	15	nvt	1	1,00E-03	3	nvt	1d	afschuiven bij teen	nvt	nvt	33-26	2,5
3	18	nvt	1	1,00E-03	3	nvt	2d	afschuiven net achter teen	nvt	nvt	nvt	nvt
1	14	nvt	5	1,00E-03	3	1d13h	2d14h	opbarsten, incl. buigscheuren	52-31		73 76-25	20,9
2	15	nvt	5	1,00E-03	3	3d5h	3d16h	indrukken/opbarsten	54-32		7,3 81-22	21,7
3	18	nvt	5	1,00E-03	3	4d21h	5d7h	indrukken	62-32		2,6 82-22	20,9
1	14	nvt	10	1,00E-03	3	1d13h	2d17h	opbarsten, incl. buigscheuren	61-30		56,7 76-25	8,6
2	15	nvt	10	1,00E-03	3	3d5h	4d19h	opbarsten, incl. buigscheuren	60-31		60,1 85-22	26,6
3	18	nvt	10	1,00E-03	3	4d21h	6d22h	opbarsten, incl. buigscheuren	76-31		50,7 98-22	25,8
1	14	nvt	3	1,00E-04	3	1d17h	2d0h	indrukken	44-32		1,3 66-25	15
2	15	nvt	3	1,00E-04	3	3d9h	3d9h	indrukken	40-34		0,5 68-24	21
3	18	nvt	3	1,00E-04	3	nvt	4d22h	indrukken	nvt	nvt	62-24	16
2	15	34	3	1,00E-03	3	2d3h	2d6h	opdrukken bij sloot	35-34		1,6 42-26	10
2	16	34	3	1,00E-03	3	2d9h	2d12h	opdrukken bij sloot	36-34		0,9 44-26	8,9
2	17	34	3	1,00E-03	3	2d13h	2d17h	opdrukken bij sloot	36-34		0,7 46-26	7,9
3	16	36	3	1,00E-03	3	3d15h	3d15h	opdrukken bij sloot	36-34	36-34	50-26	14,4
3	17	36	3	1,00E-03	3	niet	3d20h	opdrukken bij sloot/indrukken	nvt	nvt	52-26	12,8
3	18	36	3	1,00E-03	3	4d3h	4d3h	opdrukken bij sloot/indrukken	37-33		1,1 57-22	18,1
3	19	36	3	1,00E-03	3	4d6h	4d6h	opdrukken bij sloot/indrukken	37-34		0,6 56-25	13,5
3	20	36	3	1,00E-03	3	4d8h	4d9h	opdrukken bij sloot/indrukken	38-33		0,7 57-25	12,7
2	15	40	3	1,00E-03	3	2d1h	2d12h	opdrukken bij sloot	42-40		1 51-26	13,8
3	18	45	3	1,00E-03	3	nvt	4d5h	indrukken	nvt	nvt	58-25	14,3
1	14	nvt	3	1,00E-03	1	1d14h	1d23h	indrukken/opbarsten	52-31		8,5 73-25	19
2	15	nvt	3	1,00E-03	1	3d5h	3d7h	indrukken	45-34		0,8 69-24	20,7
3	18	nvt	3	1,00E-03	1	4d20h	4d19h	indrukken	nvt	nvt	62-24	15,3
1	14	nvt	3	1,00E-03	5	1d14h	2d1h	opbarsten/indrukken	51-31		17,1 73-24	21,1
2	15	nvt	3	1,00E-03	5	3d5h	3d7h	indrukken	45-33		0,9 67-24	17,2
3	18	nvt	3	1,00E-03	5	4d20h	4d21h	indrukken	45-33		0,8 65-24	16,8

Bijlage A bevat per berekende variant verder ook uitgebreide visualisaties van verschillende deelresultaten, in de vorm van contourplots, vectorplots en grafieken. In § 2.4.3 tot en met § 2.4.5 zijn enkele van deze visualisaties ter illustratie overgenomen, voor drie verschillende gevallen, met drie verschillende faalmodi (opbarsten van de deklaag, indrukken van de deklaag en opdrukken van het sloottalud).

## 2.4.2 Algemene observaties

Tijdens de tijdstappen blijkt in het algemeen geen volledige convergentie meer te worden bereikt zodra het opdrijven begint. De aannemelijke oorzaak daarvoor is de sprongsgewijze verandering die in de interface-elementen bij opdrijven optreedt voor zowel de elastische stijfheid in normaalrichting (van zeer groot naar nul) als voor de horizontale doorlatendheid (van minimaal naar zeer groot).

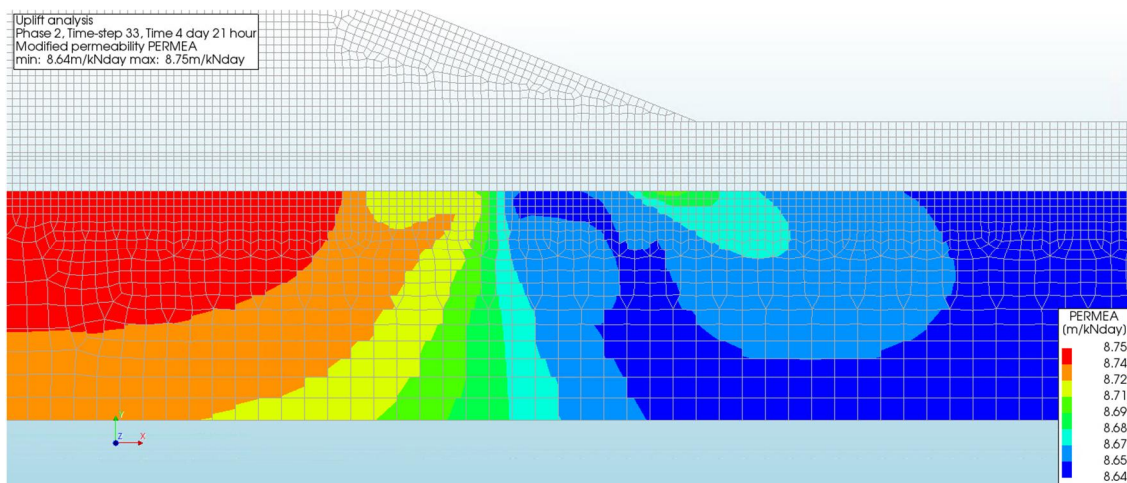
In alle gevallen treedt numerieke instabiliteit ruimschoots op voordat de stijghoogte in zandlaag ter plaatse van het kruinmidden gelijk is geworden aan de (in praktijk op die locatie nooit te verwachten) maximale waarde gelijk aan de dijkhoogte, die zou optreden na 12 dagen. De berekening kan wel steeds verder worden doorgezet naarmate de dikte, sterkte en stijfheid van de deklaag toenemen.

Nabij numerieke instabiliteit ligt de maximale horizontale verschilverplaatsing tussen de deklaag en kleilaag in vrijwel gevallen in de orde van 1 tot 2 decimeter, ook in de vele gevallen waarin andere instabiliteitsvormen dan opbarsten zijn vastgesteld.

Bij een proef op de som bleek het in rekening brengen van geometrische niet-lineariteit en van de softening die na scheurvorming in de deklaag optreedt van negatieve invloed op de numerieke stabiliteit. Dit geldt ook voor de vele gevallen waarin als faalmodus geen opbarsten/uitknikken is vastgesteld en waarbij de invloed van geometrische niet-lineariteit en scheurvorming fysisch gezien niet wordt verwacht. Bij het toepassen van een geometrisch lineaire berekening en het niet toepassen van softening na scheurvorming zal de tijdsafhankelijke berekening zeker verder kunnen worden doorgezet, met verdere verhoging van de waterspanningen in de zandlaag en met meer berekende schuifverplaatsing tussen deklaag en zandlaag als gevolg.

Vanwege de op voorhand al bekende beperkingen in de schematisering (zie § 2.2.5) en het initieel al relatief fijne elementennet is niet onderzocht wat het mogelijke effect zou zijn van verdere netverfijning of van het toepassen van andere oplosmethoden.

Ten slotte viel tijdens de analyse van de stromingsbeelden op dat de permeabiliteitstensor in een geometrisch niet-lineaire DIANA berekening een functie wordt van de vervorming. De schijnbare doorlatendheid in de onvervormde situatie neemt toe in de richting(en) waarin verkorting optreedt en neemt af in de richting(en) waarin verlenging optreedt. Dit wordt gedaan om bij een vast potentiaalverschil met de aangepaste permeabiliteitstensor in het onvervormde geval hetzelfde specifiek debiet te vinden als in het vervormde geval met de oorspronkelijke permeabiliteitstensor. In werkelijkheid zal verkleining van volume overigens leiden tot een (hier niet gemodelleerde) afname van de fysische doorlatendheid.



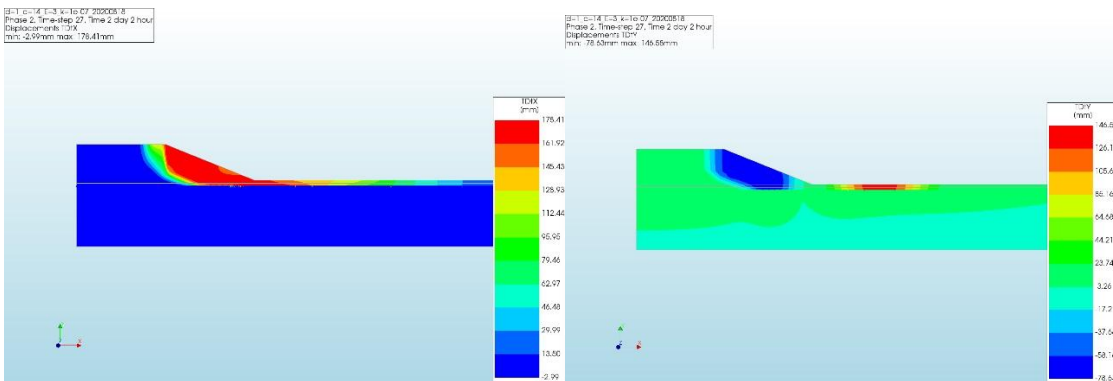
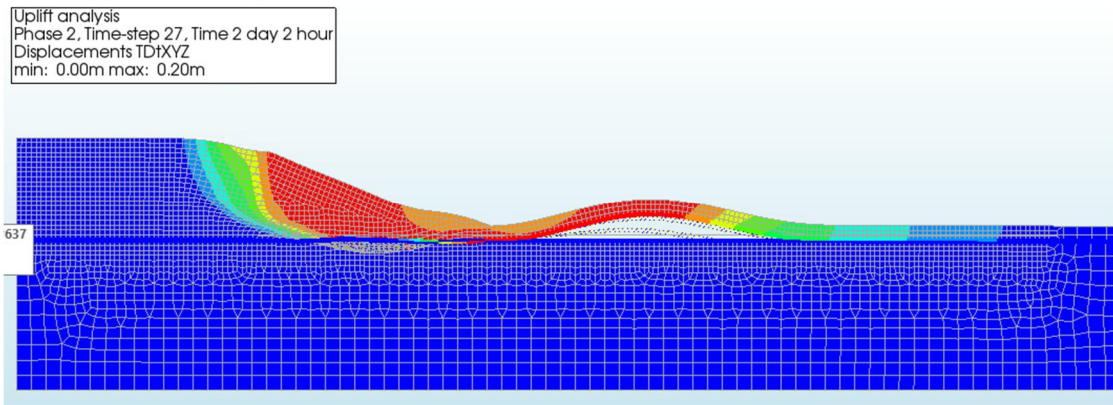
Figuur 2-7 De aanpassing van de grootste component van de permeabiliteitstensor in het zand onder de dijk (in verticale richting), als gevolg van vervorming. De toename blijft in dit geval beperkt tot maximaal 1,3 %.

### 2.4.3 Resultaten voor een deklaagdikte van 1 m (opbarsten)

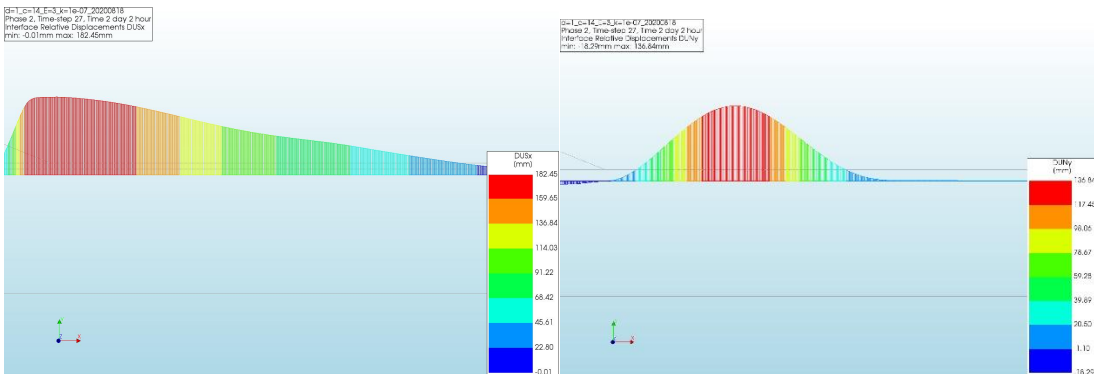
In deze subparagraaf worden enkele illustratieve resultaten getoond voor het geval met een deklaagdikte van 1 m.

In het als eerste getoonde basisgeval (cohesie dijk en dijklaag gelijk aan 14 kPa, elasticiteitsmodulus deklaag gelijk aan 3 MPa, doorlatenheid zand gelijk aan  $1E-3$  m/s) treedt een combinatie van opbarsten en indrukking op. Er worden voor dit basisgeval bij numerieke instabiliteit nog geen buigscheuren waargenomen. Zie Figuur 2-8 tot en met Figuur 2-15.

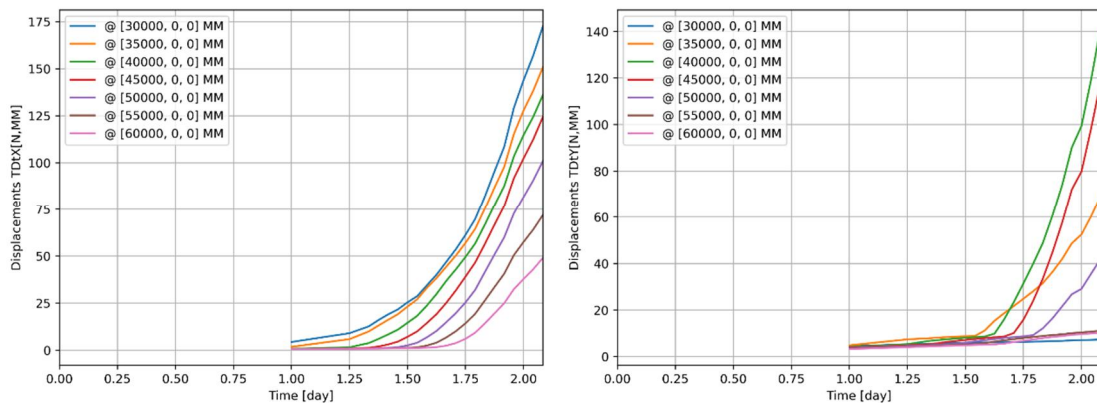
Voor het geval van een tot 5 MPa verhoogde elasticiteitsmodulus treedt nabij instabiliteit veel meer openstand op. De faalmodus 'Opbarsten' is dan duidelijk dominant geworden. Voor dit geval worden daarom aanvullend de dan nabij numerieke instabiliteit grotere openstand getoond, met dan ook optredende buigscheuren. Zie Figuur 2-16.



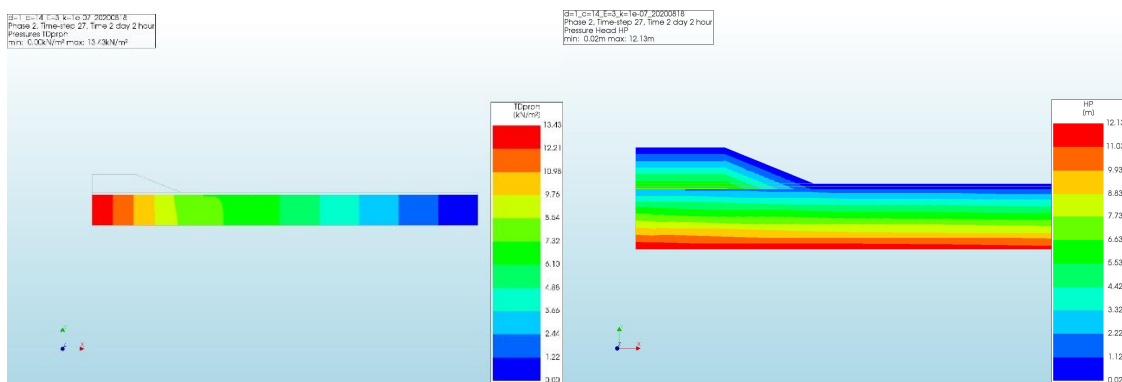
Figuur 2-8 Basisgeval. Totale verplaatsingen nabij stabiliteit. Boven een vervormd model, met opgeschaalde verplaatsing. Linksonder de horizontale component (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechtsonder de verticale component (openstand in de oprijfzone).



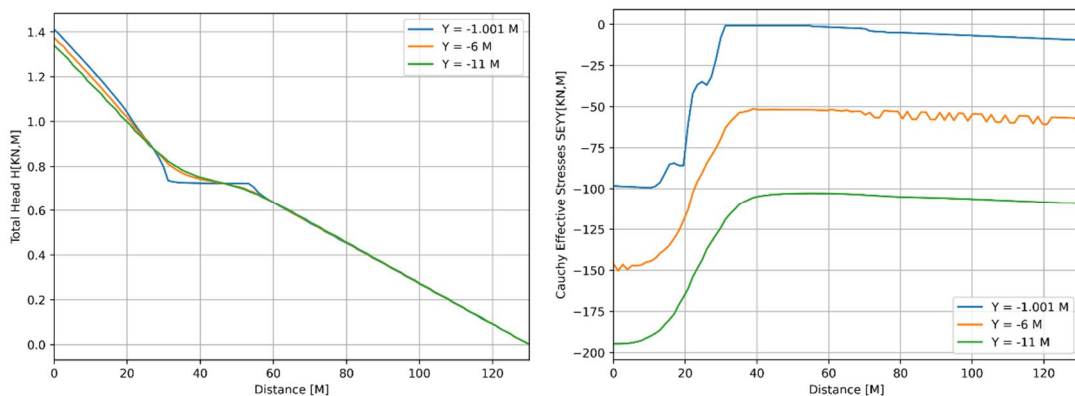
Figuur 2-9 Basisgeval. Verschilverplaatsing tussen de deklaag en zandlaag nabij stabiliteit. Links de component in langrichting (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechts de component in normaalrichting (openstand).



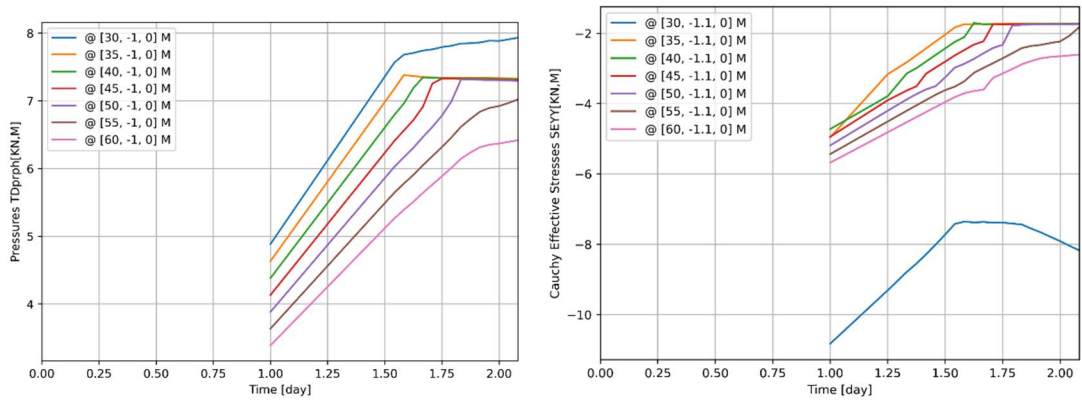
*Figuur 2-10 Basisgeval. Ontwikkeling van de verplaatsing ter plaatse van de bovenkant van de deklaag in de tijd, voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Links de component in langsrichting (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechts de component in normaalrichting (opbuiging).*



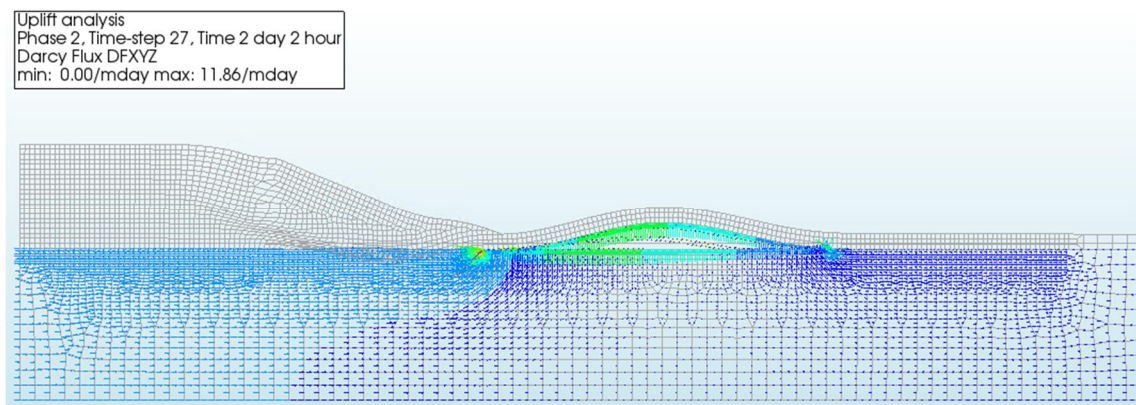
*Figuur 2-11 Basisgeval. Links de nabij instabiliteit berekende stijghoogte [kPa] in de zandlaag. Rechts de bijbehorende drukhoogte [m], inclusief het opgegeven constante veld in de dijk en deklaag.*



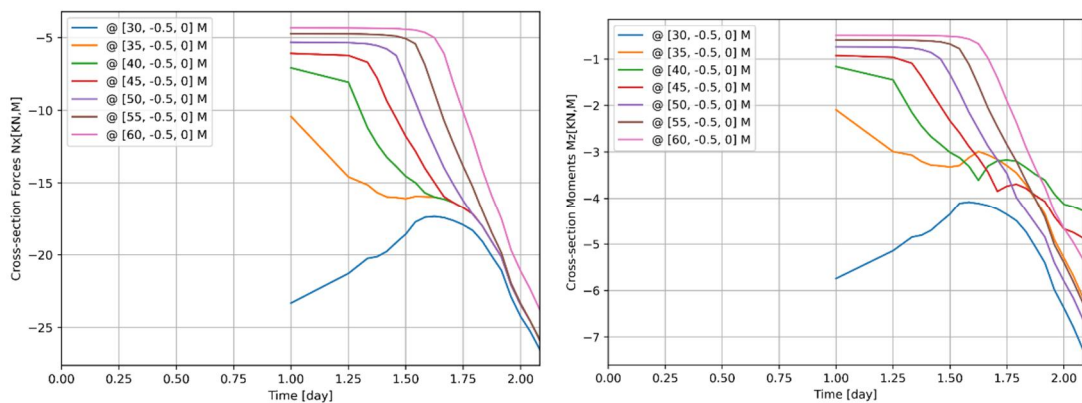
*Figuur 2-12 Basisgeval. Links de stijghoogte [m] in de zandlaag nabij bezwijken, op drie verschillende hoogtes. De blauwe lijn beschrijft het verloop net onder de deklaag. Rechts de verticale effectieve spanning [kPa] in de zandlaag nabij bezwijken, op dezelfde hoogtes. Het effect van de uniforme druk in de opgedreven zone is goed zichtbaar.*



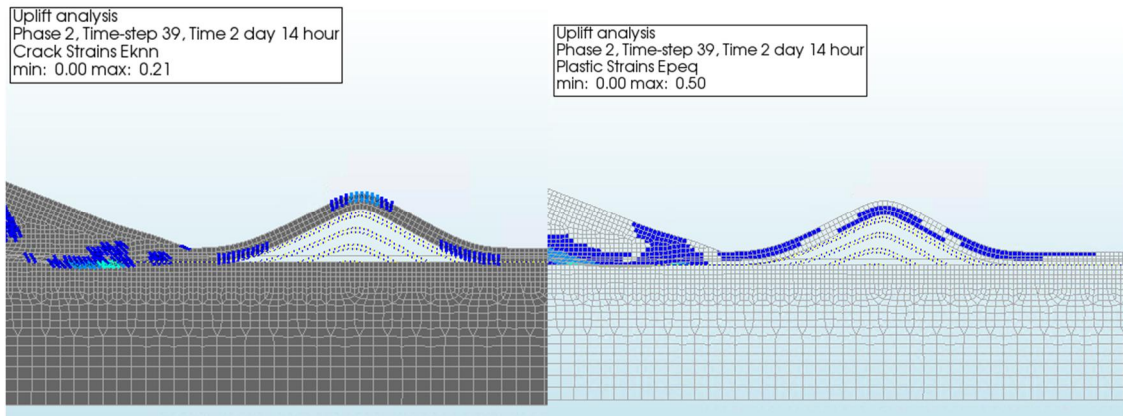
*Figuur 2-13 Basisgeval. Ontwikkeling van de stijghoogte [kPa] (links) en de verticale effectieve spanning [kPa] (rechts) in de tijd, ter plaatse van de bovenkant van de zandlaag, voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Het begrenzend effect van het deklaag gewicht in de opgedreven zone is goed zichtbaar.*



*Figuur 2-14 Basisgeval. De specifieke debieten in de zandlaag, nabij instabiliteit. Het effect van de uniforme waterdruk in de opgedreven zone is goed zichtbaar. In de opdrijfzone is de toestroom van water evenredig met de vergroting van de openstand in de tijd.*



*Figuur 2-15 Basisgeval. Links de ontwikkeling van de normaalkracht [kN] in de deklaag voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Rechts de ontwikkeling het buigend moment [kNm] ten opzichte van het deklaag midden. In de tijd nemen zowel de normaalkracht als het moment toe achter de binnenteen.*

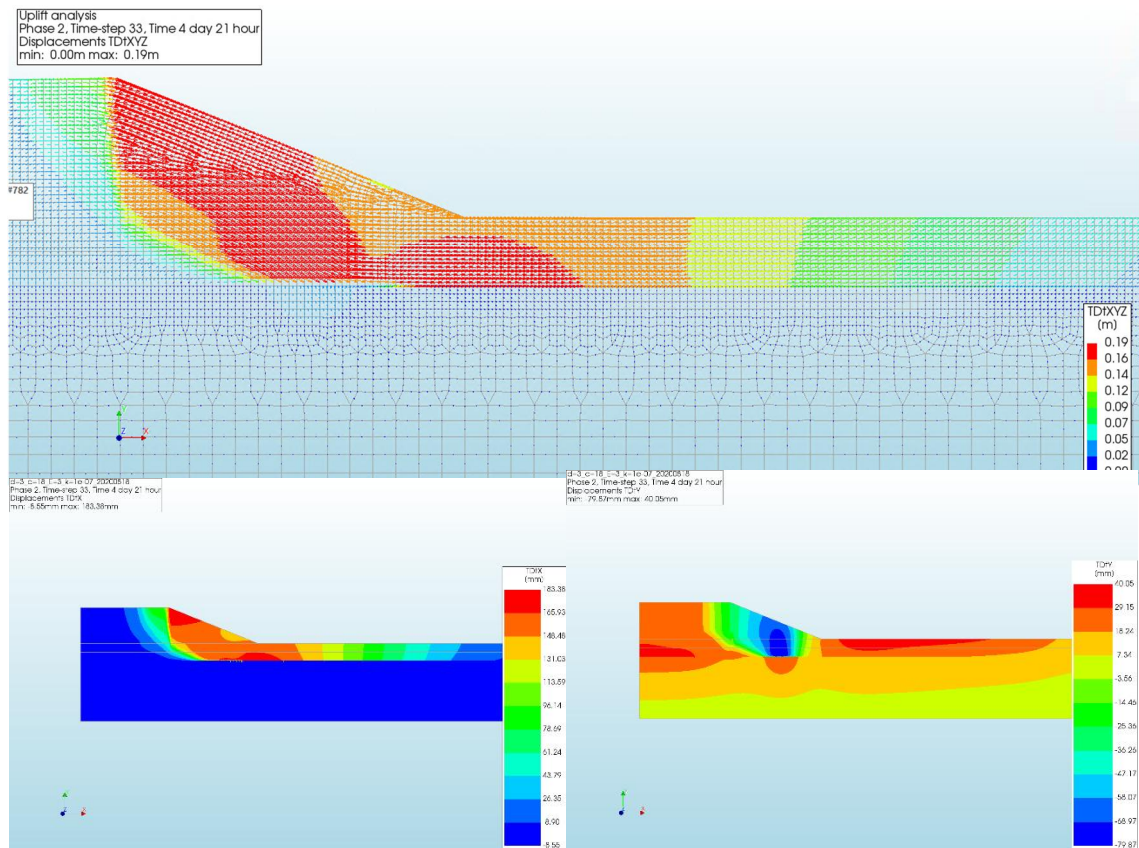


*Figuur 2-16 Voor een ten opzichte van het basisgeval van 3 tot 5 MPa verhoogde elasticiteitsmodulus: links de buigscheuren nabij bezwijken vanwege trekspanning door buiging en rechts de plastische zones vanwege drukspanning door buiging. De scheurvorming en plasticiteit reduceren de buigstijfheid. De scheurvorming reduceert ook het opneembaar moment.*

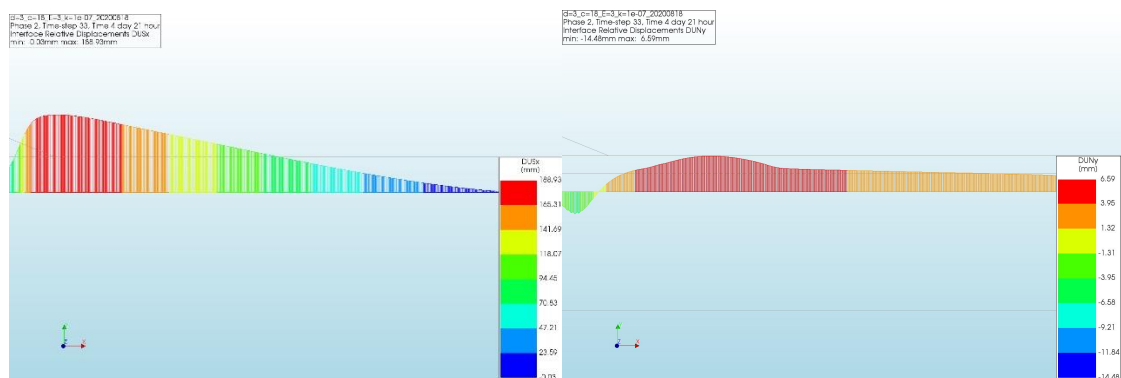
#### **2.4.4 Resultaten voor het basisgeval met deklaagdikte 3 m (indrukken)**

In deze subparagraaf worden enkele illustratieve resultaten getoond voor het basisgeval met een deklaagdikte van 3 m. In dit geval treedt uitsluitend indrukken van de deklaag op.

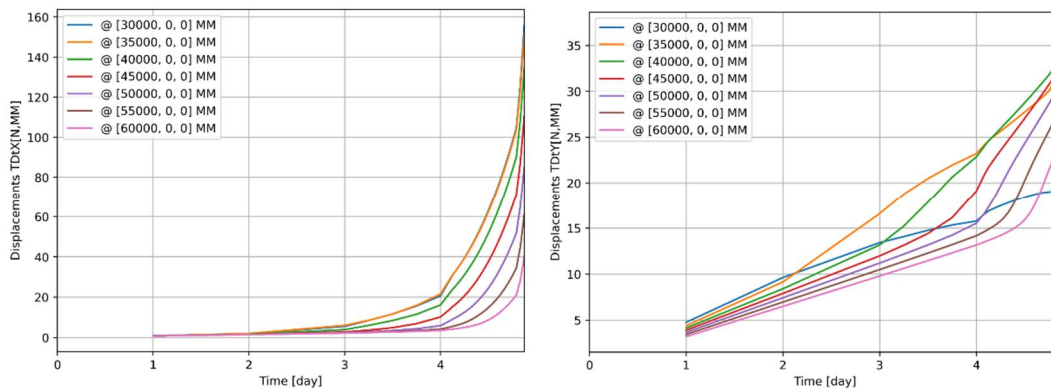




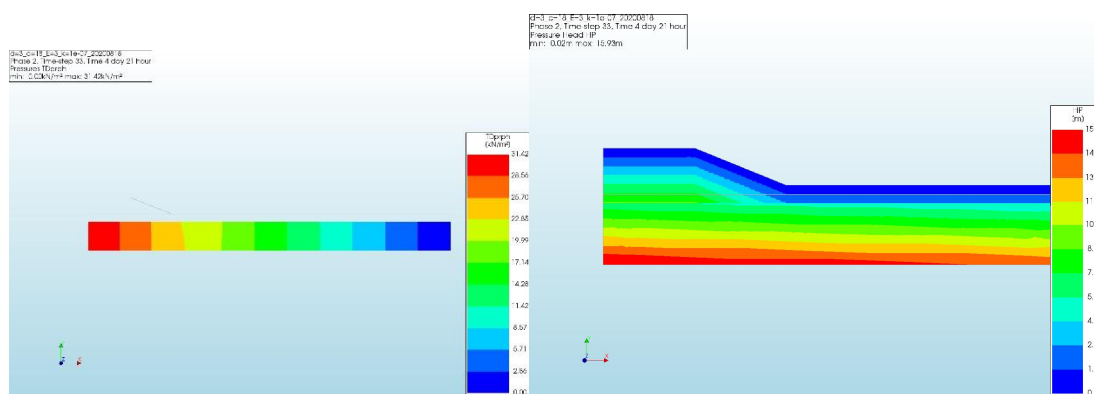
*Figuur 2-17 Totale verplaatsingen nabij stabiliteit. Boven een vector plot. Linksonder de horizontale component (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechtsonder de verticale component (openstand in de oprijfzone).*



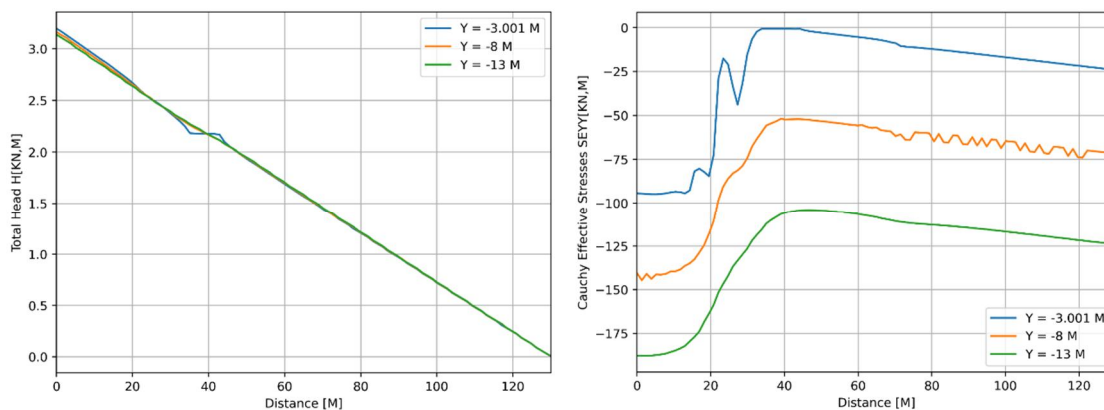
*Figuur 2-18 Verschilverplaatsing tussen de deklaag en zandlaag nabij stabiliteit. Links de component in langsrichting (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechts de component in normaalrichting (openstand).*



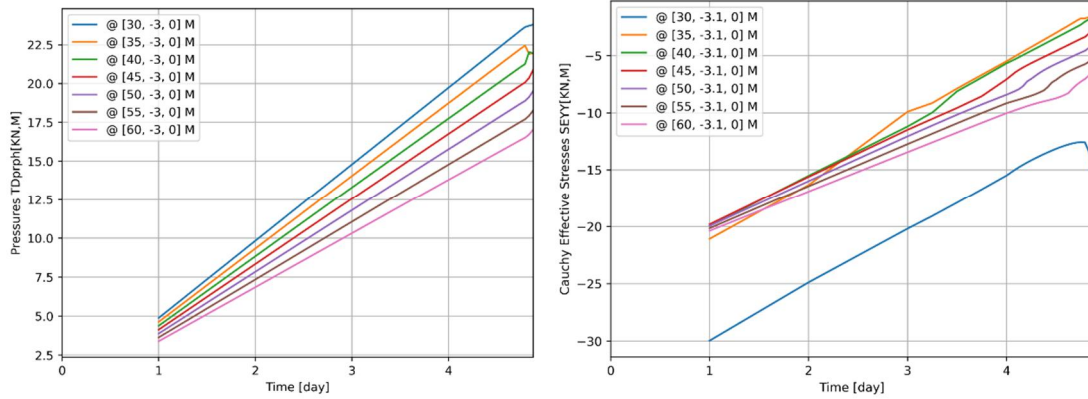
*Figuur 2-19 Ontwikkeling van de verplaatsing ter plaatse van de bovenkant van de deklaag in de tijd, voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Links de component in langsrichting (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechts de component in normaalrichting (opbuiging).*



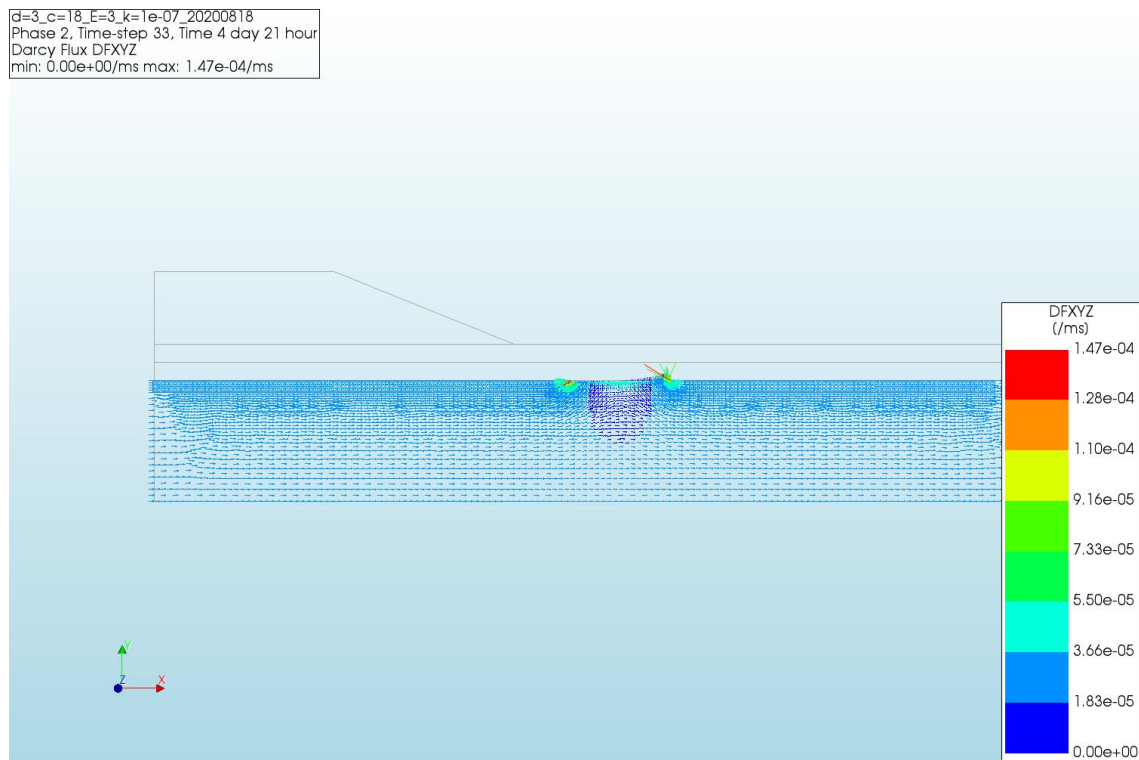
*Figuur 2-20 Links de nabij instabiliteit berekende stijghoogte [kPa] in de zandlaag. Rechts de bijbehorende drukhoogte [m], inclusief het opgegeven constante veld in de dijk en deklaag.*



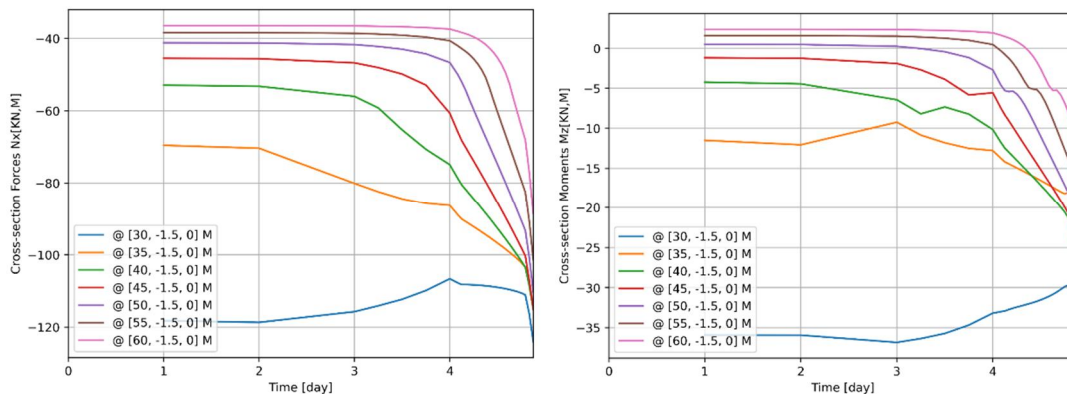
*Figuur 2-21 Links de stijghoogte [m] in de zandlaag nabij bezwijken, op drie verschillende hoogtes. Rechts de verticale effectieve spanning [kPa] in de zandlaag nabij bezwijken, op dezelfde hoogtes. Het effect van de uniforme druk in de opgedreven zone is goed zichtbaar.*



Figuur 2-22 Ontwikkeling van de stijghoogte [kPa] (links) en de verticale effectieve spanning [kPa] (rechts) in de tijd, ter plaatse van de bovenkant van de zandlaag, voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Het begrenzend effect van het deklaaggewicht in de opgedreven zone begint nabij de laatste tijdstap.



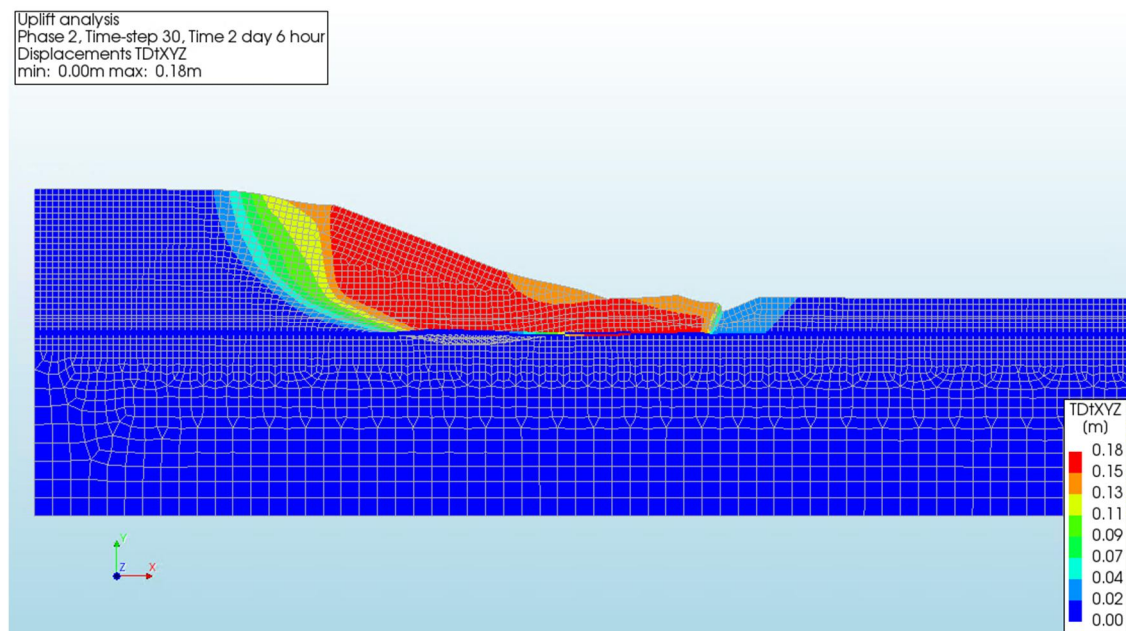
Figuur 2-23 De specifieke debieten in de zandlaag, nabij instabiliteit. Het effect van de uniforme waterdruk in de opgedreven zone is goed zichtbaar. In de opdrijfzone is de toestroom van water evenredig met de vergroting van de openstand in de tijd.



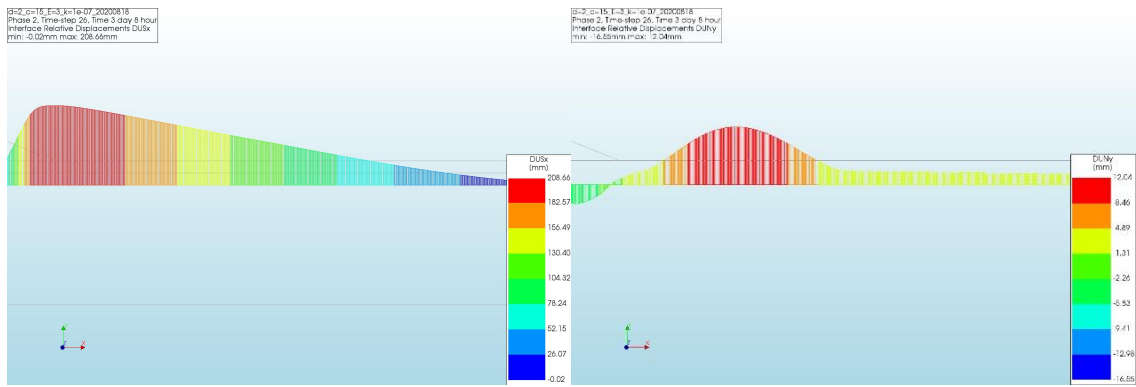
Figuur 2-24 Links de ontwikkeling van de normaalkracht [kN] in de deklaag voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Rechts de ontwikkeling het buigend moment [kNm] ten opzichte van het deklaagmidden. In de tijd nemen zowel de normaalkracht als het moment toe achter de binnenteen.

## 2.4.5 Resultaten voor een deklaagdikte van 2 m en een sloot op x=34 m (opdrukken bij sloot)

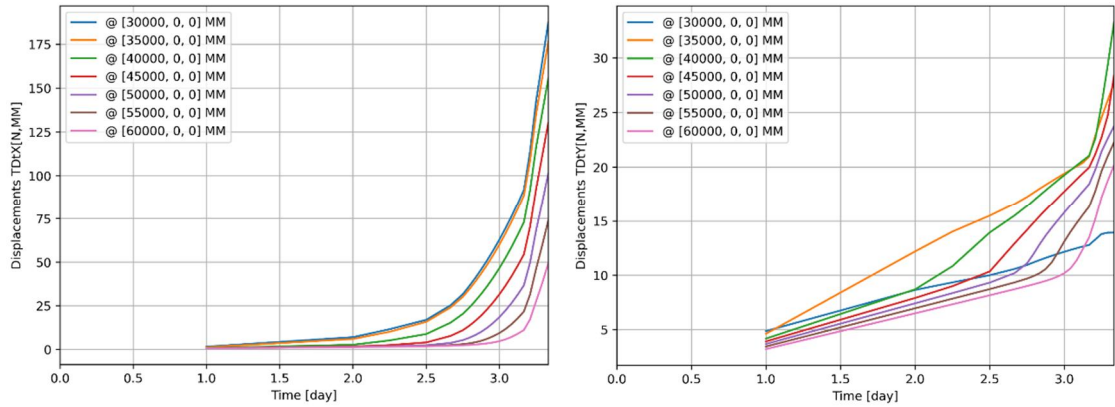
In deze subparagraaf worden enkele illustratieve resultaten getoond voor het geval van een deklaagdikte van 2 m en een sloot op x=34 m (4 meter achter de binnenteen), in combinatie met een cohesie in klei en deklaag van 15 kPa en een doorlatendheid in het zand van 1E-3 m/s. In dit geval treedt opdrukken bij de sloot op.



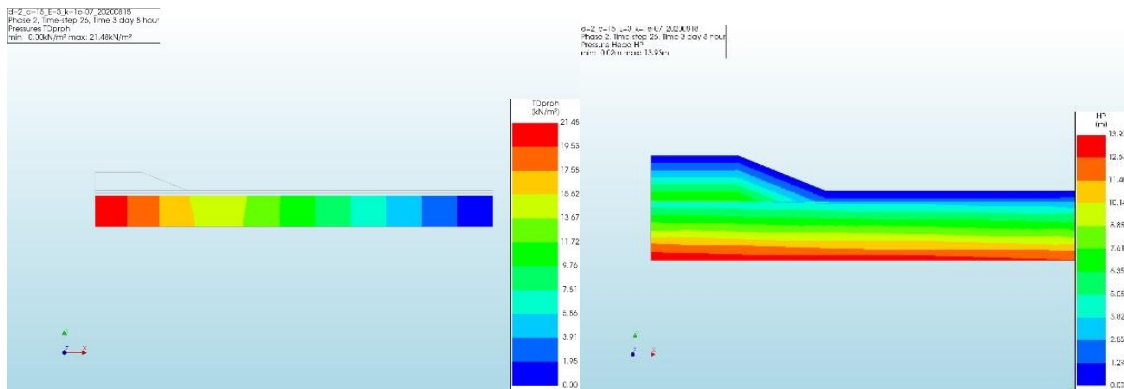
Figuur 2-25 Totale verplaatsingen nabij stabiliteit.



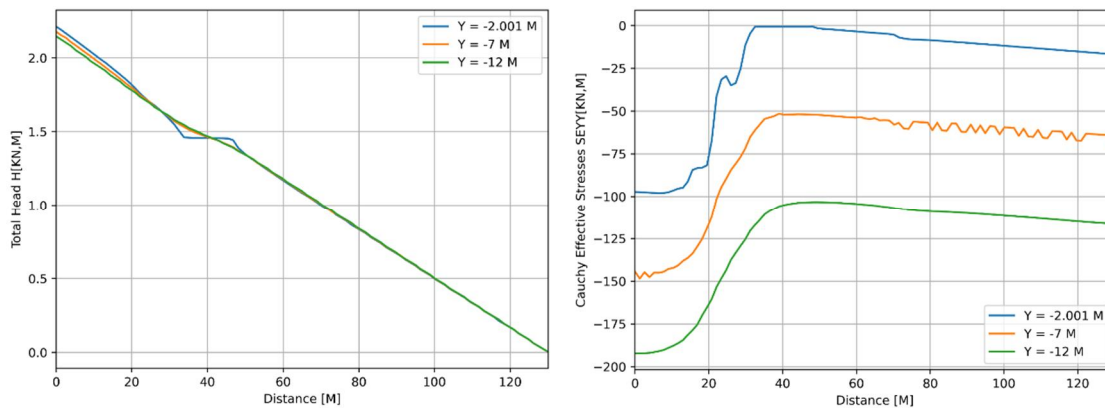
Figuur 2-26 Verschilverplaatsing tussen de deklaag en zandlaag nabij stabiliteit. Links de component in langsrichting (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechts de component in normaalrichting (openstand).



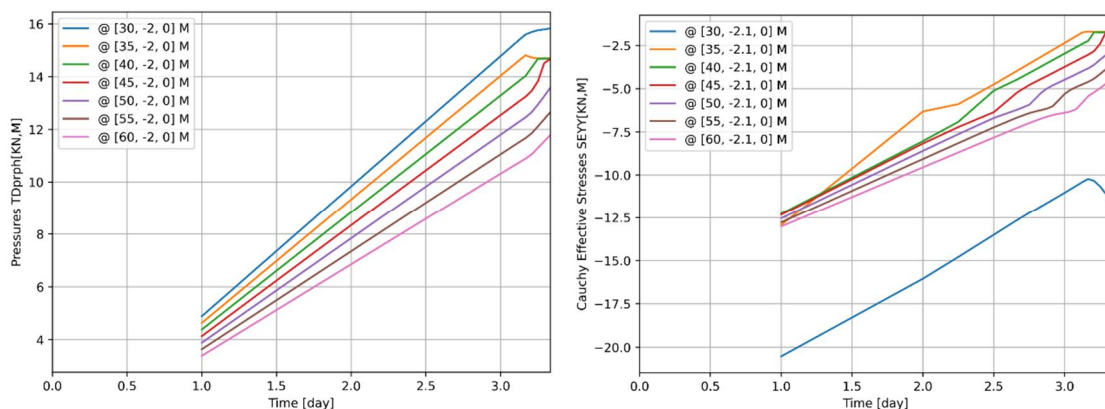
Figuur 2-27 Ontwikkeling van de verplaatsing ter plaatse van de bovenkant van de deklaag in de tijd, voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Links de component in langsrichting (schuiven van de deklaag over de zandlaag). Rechts de component in normaalrichting (opbuiging).



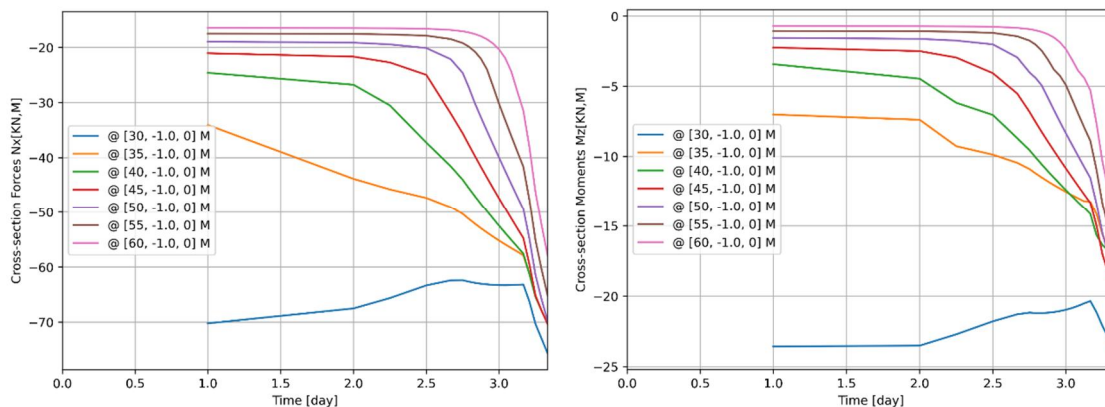
Figuur 2-28 Links de nabij instabiliteit berekende stijghoogte [kPa] in de zandlaag. Rechts de bijbehorende drukhoogte [m], inclusief het opgegeven constante veld in de dijk en deklaag.



Figuur 2-29 Links de stijghoogte [m] in de zandlaag nabij bezwijken, op drie verschillende hoogtes. Rechts de verticale effectieve spanning [kPa] in de zandlaag nabij bezwijken, op dezelfde hoogtes. Het effect van de uniforme druk in de opgedreven zone is goed zichtbaar.



Figuur 2-30 Ontwikkeling van de stijghoogte [kPa] (links) en de verticale effectieve spanning [kPa] (rechts) in de tijd, ter plaatse van de bovenkant van de zandlaag, voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Het begrenzend effect van het deklaaggewicht in de opgedreven zone wordt zichtbaar na ruim 3 dagen.



Figuur 2-31 Links de ontwikkeling van de normaalkracht [kN] in de deklaag voor een aantal verschillende locaties in horizontale richting. Rechts de ontwikkeling het buigend moment [kNm] ten opzichte van het deklaagmidden. In de tijd nemen zowel de normaalkracht als het moment toe achter de binnenteen.

## 2.4.6 Invloed van de gevarieerde eigenschappen op opbarsten

Binnen de drie basisgevallen treedt (een begin van) opbarsten alleen op voor een deklaagdikte van 1 m. Zoals al aangegeven in § 2.3 hebben deze basisgevallen een elasticiteitsmodulus van dijk en deklaag gelijk aan 3 MPa en een doorlatendheid van het zand gelijk aan  $1E-3$  m/s. De maximale openstand nabij falen voor het basisgeval met een deklaagdikte van 1 m is 0,14 m, terwijl de maximale schuifverplaatsing dan 0,18 m is. Er lijkt sprake van een gecombineerd falen door opbarsten en indrukken.

Ten opzichte van dit basisgeval (deklaagdikte 1 m, cohesie 14 kPa) nemen de openstand en de lengte van de opdrijfzone af bij verlaging van de cohesie tot 13 kPa, waarbij de indrukking wat toeneemt. Bij vergroting van de cohesie tot 15 kPa wordt omgekeerd meer openstand dan indrukking waargenomen. In dat geval neemt ook de lengte van de opdrijfzone toe. Verhoging van de cohesie vergroot dus de openstand en de lengte van de opdrijfzone en vermindert de indrukking.

Ten opzichte van voorgenoemd basisgeval treedt opbarsten niet meer op bij het verlagen van de doorlatendheid van de 10 meter dikke zandlaag met een factor 10 (tot  $1E-4$  m/s). De faalmodus wordt dan 'Indrukken'. De aannemelijke verklaring daarvoor is dat de toevoer van water die in de tijd nodig is voor verdere openstand bij geringe doorlatendheid significant wordt belemmerd.

De invloed van de elasticiteitsmodulus van de dijk en deklaag blijkt groot. Ten opzichte van voorgenoemd basisgeval treedt opbarsten niet meer op bij verlaging van de elasticiteitsmodulus van de deklaag en dijk tot 1 MPa. Zoals getoond in § 2.4.3 wordt opbarsten de dominante faalmodus wanneer de elasticiteitsmodulus wordt vergroot van 3 naar 5 MPa. Daarbij treden dan ook buigscheuren op. Bij een verhoging van de elasticiteitsmodulus van 3 naar 5 MPa treedt opbarsten (inclusief buigscheuren) bovendien ook op bij een deklaagdikte van 2 m. Bij een (onrealistische) verhoging naar 10 MPa treedt opbarsten tenslotte ook op voor een deklaagdikte van 3 m. Wederom inclusief buigscheuren. Een grotere elasticiteitsmodulus van de deklaag bevordert dus opbarsten en vermindert de indrukking. De aannemelijke verklaring daarvoor is dat een grotere buigstijfheid in de buigzones eerder leidt tot het overschrijden van de druk- en treksterkte. Bij het overschrijden van de materiaalsterkte is het maximaal opneembare moment bereikt en zal bij de dan aanwezige horizontale drukkracht vanuit de dijk een doorgaande aangroei van de openstand kunnen optreden (uitknikken), die in de tijd alleen nog wordt beperkt door wat er binnen die tijd aan water kan binnenstromen.

Het vergroten en verkleinen van de treksterkte in de dijk en de deklaag (1 kPa en 5kPa) heeft ten opzichte van de basisgevallen (treksterkte 3 kPa) een beperkt effect, dat overeenkomt met de verwachting. De treksterkte in en onder de dijk wordt in alle basisgevallen wel bereikt maar er treden vanwege de beperkte opbolling nog geen buigscheuren in de deklaag op. Dit blijft zo wanneer de treksterkte wordt verkleind of vergroot. Een hogere treksterkte leidt in de dijk bij afschuiven tot een hogere trekspanning in (vooral) horizontale richting. Bij afschuiven van het talud is de horizontale drukkracht in de deklaag daarom wat kleiner. Bij een lagere treksterkte is de drukkracht wat groter. Bij een hogere treksterkte kan daarom iets verder worden doorgerekend en bij een lagere treksterkte iets minder ver. Voor de vervormingen van de deklaag nabij falen blijft het effect beperkt. Overigens zal de treksterkte in en onder de dijk in de simulatie eerder worden bereikt dan in werkelijkheid het geval is, omdat in de simulatie de horizontale verplaatsing verhinderd wordt ter plaatse van het kruinmidden.

Opbarsten/uitknikken treedt in de numerieke simulaties nooit op bij aanwezigheid van een sloot. In de aanwezigheid van een sloot wordt het sloottalud bij een twee meter dikke deklaag opgedrukt (passief bezwijken). Bij een drie meter dikke deklaag ontstaat een combinatie van opdrukken van het sloottalud en indrukken van de deklaag.

## 2.5 Conclusies

Wanneer bij geringe oprijfveiligheid een horizontale drukkracht in de deklaag nodig is voor taludstabiliteit, suggereren de resultaten van de numerieke variatiestudie dat opbarsten/uitknikken slechts in een (zeer) beperkt aantal gevallen het dominante faalmechanisme kan worden. Dit zijn gevallen waarin nabij de binnenteen geen sloot aanwezig is, waarin de deklaag dun en stijf is (dunner

dan 2 m en/of met een elasticiteitsmodulus groter dan 3 MPa), en waarin de zandlaag voldoende doorlatend is (transmissiviteit<sup>2</sup>  $kD$  groter dan  $1E-3$  m<sup>2</sup>/s).

Belangrijke kanttekening daarbij is wel dat aan de gehanteerde schematisering nog te veel beperkingen kleven (zie § 2.2.5) om deze getallen al zonder verdere validatie te kunnen toepassen.

Zoals in fase 2a ook al voorzichtig vastgesteld, suggereren de resultaten verder dat in geval van dunnere deklagen bij geringe opdrijfveiligheid wellicht ook rekening moet gaan worden gehouden met het mechanisme 'Indrukken', in combinatie met taludafschuiving. Het optreden van dit mechanisme is overigens ook al bekend van de 'standaard' eindige-elementenanalyses, zoals tegenwoordig toegepast voor het ontwerp en de beoordeling van stabiliteitsverhogende constructies [11].

---

<sup>2</sup> De transmissiviteit is gelijk aan de doorlatendheid keer de laagdikte



# 3 Raamwerk voor controle bij geringe opdrijfveiligheid

## 3.1 Scenario's voor het verloop van binnenwaartse macro-instabiliteit

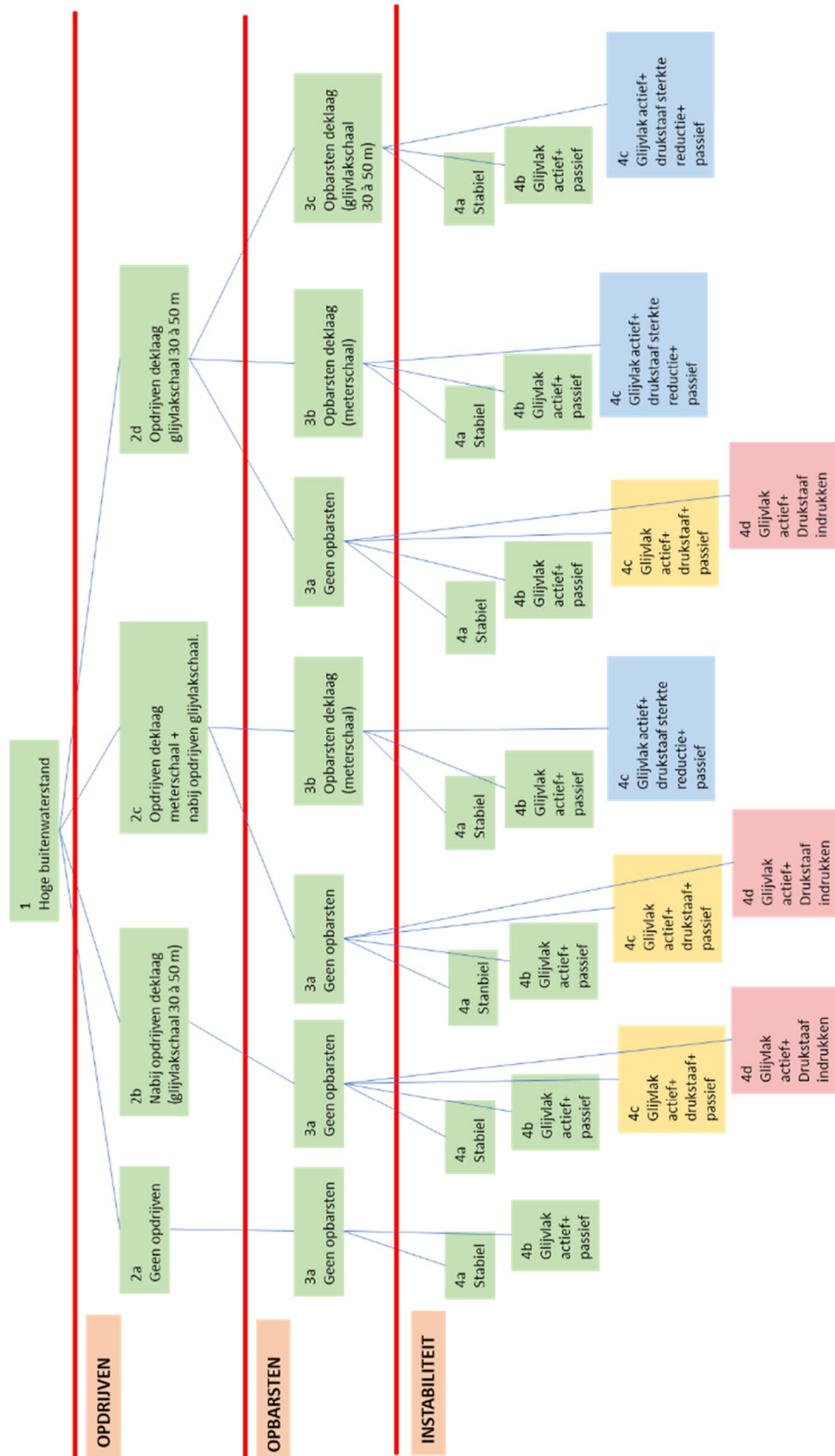
### 3.1.1 Inleiding

Een hoge waterstand kan op verschillende manieren leiden tot een binnenwaartse taludinstabiliteit. In het onderstaande schema zijn de verschillende denkbare scenario's weergegeven in relatie tot het al dan niet opdrijven, het al dan niet opbarsten en de vormen van instabiliteit die in relatie daarmee kunnen optreden (Figuur 3-1). Verschillende vormen van taludinstabiliteit vereisen verschillende punten van aandacht bij de beoordeling van het mechanisme.

De stappen tussen een hoge waterstand en een taludinstabiliteit (of niet) zijn onderverdeeld in:

- 1) Hoge buitenwaterstand
- 2) Opdrijven (of niet)
- 3) Opbarsten (of niet)
- 4) Taludinstabiliteit (of niet)

In het schema wordt enkel de fysica beschreven. Er wordt in dit hoofdstuk nog niet gekeken naar de veiligheidsfilosofie die uiteindelijk moet borgen dat wordt voldaan aan de norm voor de overstromingskans. Bij de bepaling van de overstromingskans moet de hoge waterstand aan het begin van het schema niet als een enkele waterstand worden gezien (bijvoorbeeld de waterstand bij de norm), maar moet de hele statistiek van waterstanden (en golfcondities) worden beschouwd. Hierbij zijn de lagere waterstanden, die allicht al zijn opgetreden in de levensduur van de dijk en/of die niet significant hoger zijn dan het achterland, vanzelfsprekend niet interessant. Overigens zijn ook de waterstanden met een zeer lage kans eveneens oninteressant, omdat de kans zodanig laag kan zijn dat dijkfalen door taludinstabiliteit, gegeven deze waterstand, niet meer significant is ten opzichte van de normwaarde voor de overstromingskans.



Figuur 3-1 Schematische weergave scenario's talud instabiliteit binnenwaarts bij een hoge buitenwaterstand.

### 3.1.2 Oprijven

Bij oprijven blijft de deklaag intact en reduceert de korrelspanning op het contactvlak tussen het zand en de deklaag als gevolg van de toename van waterspanningen in de zandlaag. Hierna wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende scenario's:

- 2a geen oprijven
- 2b nabij oprijven (glijvlakschaal)
- 2c oprijven meterschaal (nabij oprijven op glijvlakschaal)
- 2d oprijven glijvlakschaal

De veiligheid tegen oprijven (geen oprijven/ nabij oprijven/ oprijven) wordt gekenmerkt door de verhouding  $n$  (-) tussen het gewicht van de deklaag  $\sigma$  (kN/m<sup>2</sup>) en de waterspanning in het zandpakket  $p$  (kN/m<sup>2</sup>). Deze verhouding wordt de oprijfveiligheid of soms ook opbarstveiligheid genoemd. Opgemerkt wordt dat bij piping een andere definitie wordt gehanteerd. Zie hiervoor bijlage D.

$$n = \frac{\sigma}{p} \quad (1)$$

Bij oprijven is  $n$  gelijk aan 1 en is de waterspanning gelijk aan het gewicht van de deklaag. Er kan dan een waterlaagje ontstaan tussen de deklaag en het zandpakket.

Bij  $n > 1$  blijft er contactdruk en ontstaat er geen waterlaagje. Bij  $n$  nabij 1 is er wel sprake van een verminderde contactdruk tussen de deklaag en het zand, waardoor dit een zwakke plek wordt. Opbarsten zal in dit geval niet kunnen optreden, maar het potentiële glijvlak kan wel langgerekt worden. Het talud heeft steun nodig van meer polderwaartse afdracht van schuifspanningen naar het zandpakket. Deze extra lengte betekent echter ook slapte: de drukstaaf kan inveren, zonder te bezwijken. Momenteel wordt hier in het WBI2017 niet expliciet rekening mee gehouden, maar bij toepassing van numerieke berekeningen, waarbij stijfheden van grond in rekening worden gebracht, wordt dit mechanisme wel gezien.

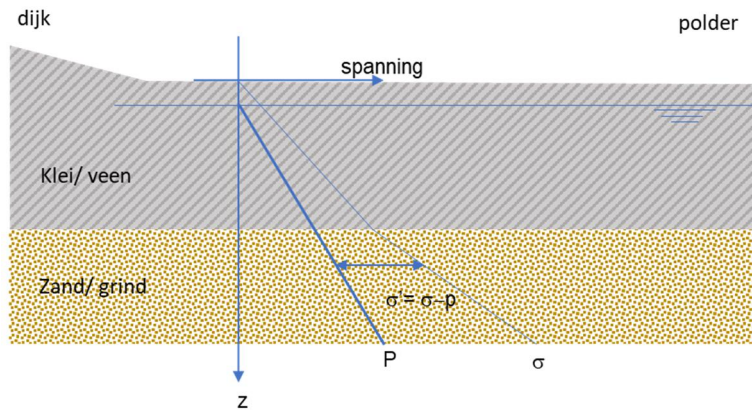
Welke definitie van 'nabij' zou moeten worden gehanteerd ligt niet vast. Vóór de komst van WBI2017 werd de grens gelegd bij  $n = 1,2$ . Boven deze oprijfveiligheid hoefde geen controle met de drukstaafmethode (momenteel LiftVan) te worden uitgevoerd. In het WBI2017 is de methode LiftVan echter het standaard toegepaste model, zodat de controle op een zwakke plek op het grensvlak altijd een onderdeel is van de beoordeling. Er wordt hierbij zoals gezegd echter niet expliciet rekening gehouden met inzakking van het talud door enkel vervorming van de drukstaaf.

Naast de mate van oprijven wordt onderscheid gemaakt naar de lengteschaal in dijksasrichting waarop dit optreedt (meterschaal/ glijvlakschaal). De (ruimtelijke) omvang of schaal wordt gerelateerd aan de aannemelijke breedte van een afschuiving, waarvoor een waarde wordt aangenomen van 30 à 50 m dijk lengte bij dunne deklaag, oplopend tot 100 m bij dikke deklaag. Oprijven op meterschaal, ter plaatse van een zeer lokale anomalie in het maaiveld of de deklaag zal daarom een beperkte invloed hebben op de macro-stabiliteit van het talud. Gedacht wordt aan kopsloten, waarbij in de lengterichting van de dijk maar zeer plaatselijk de deklaag minder dik en zwaar is. Bij teensloten parallel aan de dijk is de deklaagreductie ook van een meterschaal, maar in de glijvlak richting is dit wel relevant.

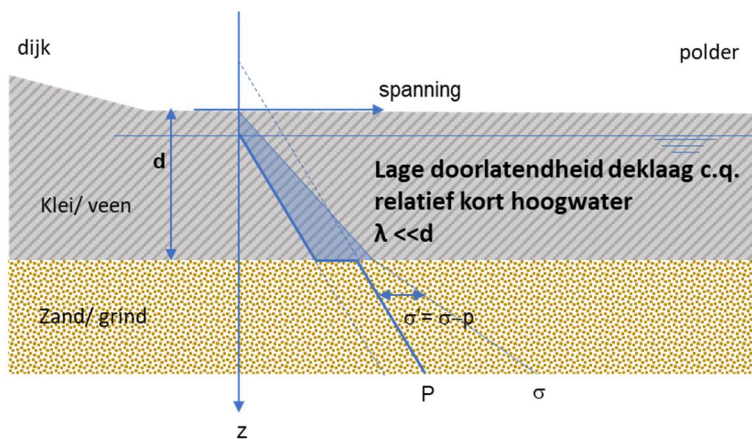
De waterspanning in de deklaag kan op verschillende manieren reageren op de waterspanningsverhoging in het zandpakket. In het schema wordt hier niet expliciet rekening mee gehouden, omdat het niet leidt tot differentiatie in de beoordeling van de faalmodus van het talud. Voor de schematisering van de waterspanningen in de deklaag bij de beoordeling van de taludstabiliteit is het echter wel van belang.

De hoge waterdruk in het zand zal in de deklaag indringen met een karakteristieke indringingslengte  $\lambda$  (m), die afhankelijk is van de stijfheid en doorlatendheid van de deklaag en de duur van het hoogwater. De indringingslengte kan ten opzichte van de deklaagdikte  $d$ (m) variëren van klein tot aan dezelfde orde of zelfs groter.

Bij een zeer ondoorlatende deklaag en een relatieve korte hoogwaterduur is  $\lambda \ll d$ . De deklaag reageert ongedraineerd op de waterspanningsverandering in het zandpakket en de effectieve spanningen in de deklaag blijven ongeveer gelijk aan de beginsituatie zonder hoogwater (Figuur 3-2 en Figuur 3-3). Dit is ook de aanname geweest in voor de numerieke simulaties, zoals gerapporteerd in hoofdstuk 2. Op het contactvlak tussen het zand en de deklaag neemt de effectieve spanning  $\sigma'$  wel af. Als de waterspanning in het zand gelijk wordt aan de verticale grondspanning onderin de deklaag, dan zal de deklaag opdrijven. Er kan dan een waterlaag ontstaan tussen het zandpakket en de deklaag, de deklaag drijft op.



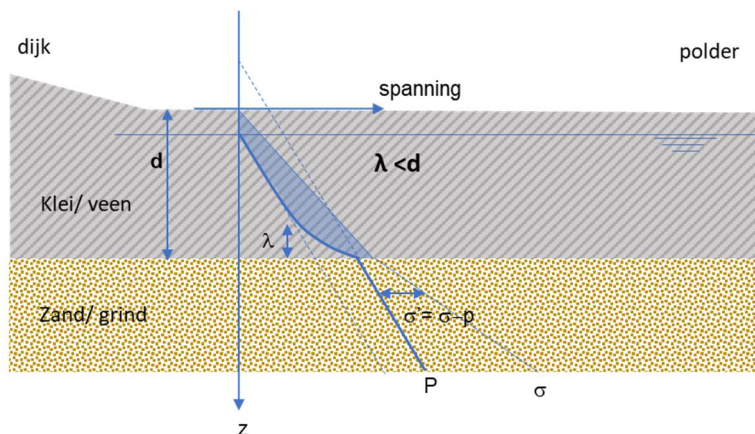
Figuur 3-2 Voorbeeld van grond-, water- en korrelspanningen (kPa) resp.  $\sigma$ ,  $\sigma'$  en  $p$  in de deklaag en het zandpakket voor hoogwater.



Figuur 3-3 Voorbeeld van water- en korrelspanningen (kPa) in de deklaag en het zandpakket tijdens hoogwater voor  $\lambda \ll d$ .

In veel gevallen is de indringingslengte kleiner dan de deklaagdikte, maar heeft deze wel een lengte in de orde van één of enkele meters. Dit scenario is weergegeven in Figuur 3-4. De waterspanningen onderin de deklaag nemen toe tijdens het hoogwater. De deklaag zal hier zwellen als gevolg van afnemende korrelspanningen. Indien de waterspanning in het zand gelijk wordt aan de verticale grondspanning onderin de deklaag, dan kan een waterlaag ontstaan tussen het zandpakket en de deklaag. De deklaag drijft op.

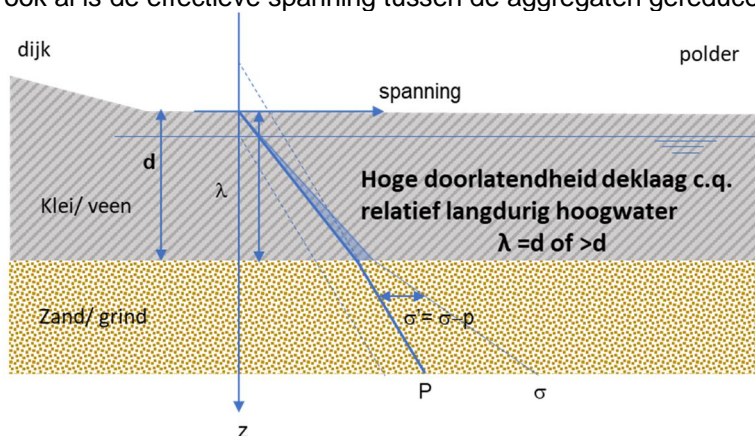
Opgemerkt wordt dat de instroom van water uit het zand in de deklaag de waterspanningen in het zandpakket ook weer beïnvloedt. Deze vorm van waterberging dempt en vertraagt de voortplanting van waterspanningen in het zand richting de polder.



Figuur 3-4 Voorbeeld van water- en korrelspanningen (kPa) in de deklaag en het zandpakket tijdens hoogwater voor  $\lambda < d$ .

Bij dunne en relatief doorlatende deklaagen en/of relatief langdurige hoogwaterperioden is de grootte van  $\lambda$  vergelijkbaar met - of rekenkundig groter - dan de deklaagdikte. Dit kan bijvoorbeeld voorkomen bij dunne deklaagen in het Oosten van het land langs de rivieren. Daar staat de deklaag in droge periodes (grotendeels) droog en is daardoor voorzien van een ontwikkelde bodemstructuur, mogelijk over de hele deklaagdikte. Klei met een ontwikkelde bodemstructuur is relatief doorlatend. In dat geval reageert de waterspanning in de deklaag gedraineerd op de toenemende waterspanning in het zand. Het water lekt vanuit het zand naar het maaiveld en verlaagt de korrelspanningen over de hele deklaagdikte (Figuur 3-5).

Indien de waterspanning in het zandpakket even groot wordt als de verticale grondspanning in de deklaag, dan zal bij een homogene doorlatendheid van de deklaag, de verticale korrelspanning over de hele deklaag reduceren tot nul. Daarmee zal ook de schuifsterkte van de deklaag tot nul indien er geen cohesie is. De schuifsterkte van (doorgaans) onverzadigde grond wordt momenteel in het kader van Kennis voor Keringen onderzocht. De mogelijkheid bestaat dat in de spleten en scheuren van grond met een ontwikkelde bodemstructuur de waterspanningen hoog zijn, terwijl de aggregaten sterkte houden door een blijvende zuigspanning, of door het effect een eerdere hoge zuigspanning. De schuifsterkte van de bulk, het stelsel van scheuren en aggregaten, zou groter dan nul kunnen zijn, ook al is de effectieve spanning tussen de aggregaten gereduceerd tot nul.



Figuur 3-5 Voorbeeld van water- en korrelspanningen (kPa) in de deklaag en het zandpakket tijdens hoogwater voor  $\lambda = d$  of  $\lambda > d$ .

### 3.1.3 Opbarsten

Vanuit de stap opdrijven (of niet opdrijven) kan de deklaag opbarsten (of niet opbarsten):

- 3a Geen opbarsten.
- 3b Opbarsten deklaag meterschaal
- 3c Opbarsten glijvlakschaal.

Een voorwaarde voor opbarsten is het voordien optreden van opdrijven. Als opdrijven optreedt, dan kan opbarsten optreden, maar dat hoeft niet. Zoals in hoofdstuk 2 al vastgesteld is het al dan niet opbarsten afhankelijk van de mate van wateraanvoer door het zandpakket, de dikte en stijfheid van de deklaag, de eventuele variabiliteit hierin, de drukspanning vanuit het talud in de deklaag en dergelijke. Tot dusver wordt voor de controle op opbarsten een criterium gebruikt van een oprijfveiligheid  $n < 1,2$  (-) en een deklaagdikte kleiner dan 4 m. In § 2.5 wordt gesuggereerd dat opbarsten/uitknikken alleen het dominante faalmechanisme kan worden wanneer nabij de binnenteen geen sloot aanwezig is, wanneer de deklaag dun en stijf is (dunner dan 2 m en/of met een elasticiteitsmodulus groter dan 3 MPa), en wanneer de zandlaag voldoende doorlatend is (transmissiviteit<sup>3</sup>  $kD$  groter dan  $1E-3$  m<sup>2</sup>/s).

Verder wordt onderscheid gemaakt naar de schaal van het opbarsten. Onderscheidend is hierbij ,net als bij opdrijven, de schaal van het opbarsten ten opzichte van de veronderstelde breedte van een afschuifvlak in dijkasrichting (30 tot 50 m voor dunne deklagen, oplopend tot 100 m voor dikke deklagen).

Evenals bij opdrijven kan opbarsten op een meterschaal optreden bij een anomalie in de deklaag, bijvoorbeeld bij een kopsloot. Opdrijven op meterschaal kan hier leiden tot opbarsten. Vanwege de geringe afmeting vormt dit een beperkt risico voor macroinstabiliteit. Het is theoretisch zelfs mogelijk dat plaatselijk opbarsten leidt tot een verminderde waterdruk in het zand, waardoor de taludstabiliteit toeneemt. Het plaatselijk opbarsten werkt dan als een soort ontlastput. In hoeverre dit in praktijk ook zo werkt is onvoldoende bekend.

Opdrijven over de breedte van een glijvlak kan leiden tot opbarsten op glijvlakschaal of tot opbarsten op meterschaal. Dat laatste is ook mogelijk, omdat zelfs ogenschijnlijk homogene deklagen toch een zwakke plek kunnen hebben, waar lokaal opbarsten kan optreden. De daaruit resulterende ontlasting van de waterdruk kan opbarsten op glijvlakschaal mogelijk voorkomen. Of en hoe dit werkt is echter nog onvoldoende duidelijk. In fase 2a is met hulp van grondwaterstromingsberekeningen al wel geïllustreerd dat een geperforeerde deklaag initieel zal leiden tot een (voor stabiliteit gunstige) drukval. Daarbij is echter ook aangetekend dat dit gunstige effect weer teniet wordt gedaan door opwellend zand (piping), omdat de perforaties dan verstopt raken.

### 3.1.4 Taludinstabiliteit

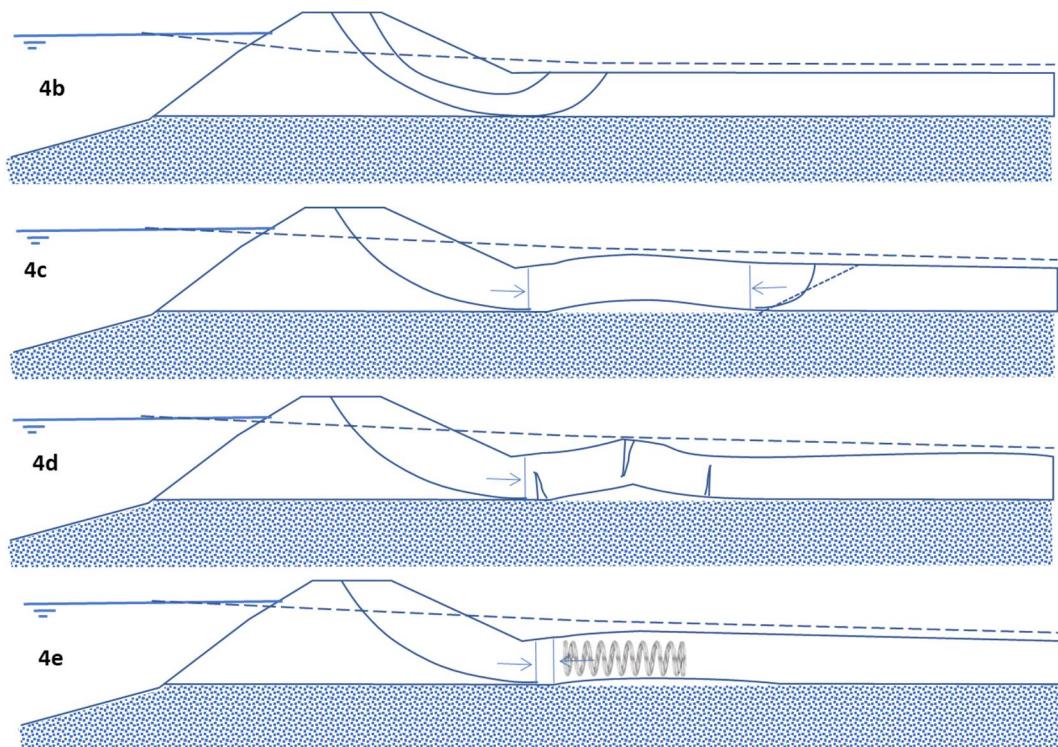
De situaties met (al dan niet) opdrijven en opbarsten kunnen leiden tot een taludinstabiliteit (of niet). De in § 1.4 al opgesomde mogelijk instabiliteitsvormen worden hierna nog eens herhaald, maar nu met een codering die aansluit op het schema in Figuur 3-1.

- 4a Geen instabiliteit
- 4b Glijvlak actief+passief: 'regulier' glijvlak. Passief glijvlak dicht bij de dijk, geen sprake van drukstaaf. Glijvlak kan relatief ondiep zijn en hoeft niet langs de grens met het zandpakket te gaan.
- 4c Glijvlak actief+drukstaaf+passief: drukstaaf is voldoende sterk en stijf voor krachtsoverdracht naar passieve zone. Glijvlak beïnvloed door zwakke plek op grensvlak deklaag/ zand.
- 4d Glijvlak actief+drukstaaf sterktereductie+passief: drukstaaf en of passief glijvlakdeel worden beïnvloed door opbarsten. De passieve weerstand wordt niet gehaald, omdat door opbarsten de grond minder sterk is, of het mechanisme verandert naar uitknikken of scheuren in plaats van een passief uittredend glijvlak.

---

<sup>3</sup> De transmissiviteit is gelijk aan de doorlatendheid keer de laagdikte

- 4e Glijvlak actief+ drukstaaf indrukken: drukstaaf is relatief slap en veert in. De passieve weerstand wordt niet volledig benut, maar vervorming van actief deel glijvlak door indrukken drukstaaf dat sprake is van taludinstabiliteit, zonder doorgaand glijvlak aan passieve zijde.



Figuur 3-6 Vormen van instabiliteit (herhaling van de eerdere Figuur 1-2)

## 3.2 Toe te passen controles en modellen

### 3.2.1 Te doorlopen stappen

In de volgende subparagrafen worden de toe te passen controles op macrostabiliteit uitgewerkt voor situaties zonder en met een lage oprijfveiligheid. De totale controle behelst uitvoering van de volgende stappen.

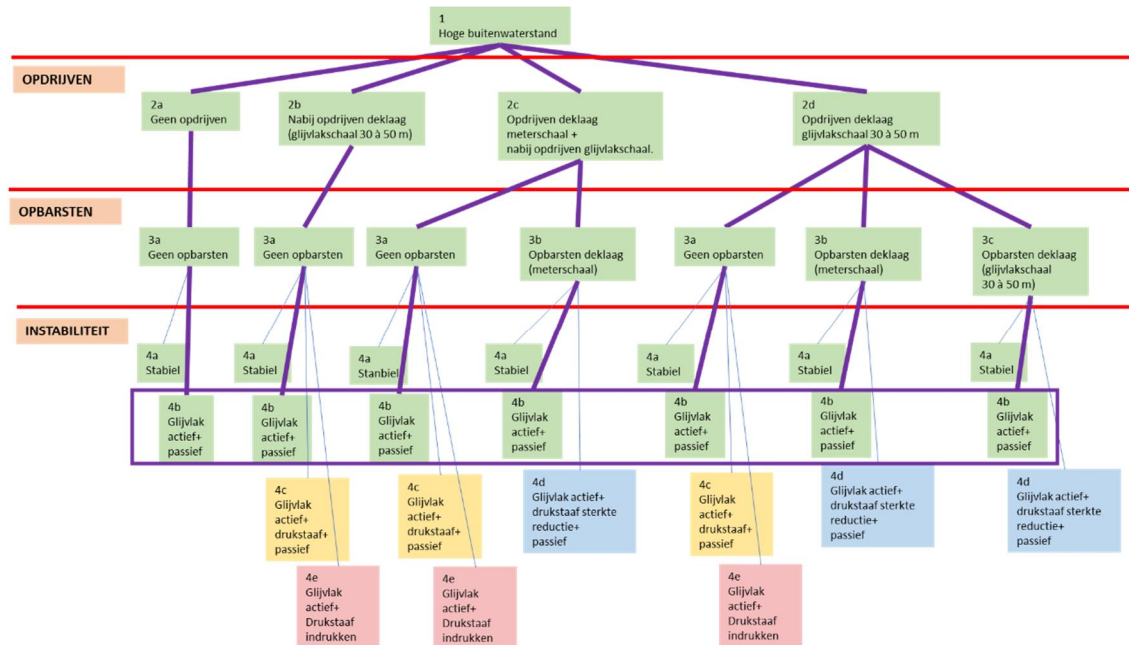
1. Bepaal op basis van oprijfveiligheid of rekening moet worden gehouden met een mogelijk glijvlak langs het grensvlak tussen zand en deklaag en of opbarsten daarbij kan worden uitgesloten. Zie § 3.2.3.1.
2. Indien het eindantwoord in stap 1 nee is (opbarsten kan niet worden uitgesloten): Voer een glijvlakberekening uit waarin de deklaagsterkte niet wordt meegenomen. Zie § 3.2.3.2.
3. Indien het eindantwoord in stap 1 ja is (opbarsten kan wel worden uitgesloten):
  - a. Controleer met een daarvoor geschikt glijvlakmodel op een glijvlak dat kan uittreden nabij de teen (§ 3.2.2) of dat, in geval van een lage oprijfveiligheid, ook langs het grensvlak tussen zand en deklaag kan lopen (§ 3.2.3.3). Daarbij wordt de deklaagsterkte wel meegenomen.
  - b. Controleer bij het optreden van een glijvlak tussen zand en deklaag in het geval van dunnere deklaag ook op indrukking van de deklaag. Zowel voor wat betreft ontoelaatbare vervorming bij karakteristieke grondsterkte (initiatie van andere mechanismen dan macrostabiliteit) als voor macrostabiliteit bij rekenwaarden voor de grondsterkte. Zie § 3.2.3.3.

Deze stappen sluiten grotendeels aan op de huidige praktijk. Naar verwachting zal echter gebruik kunnen worden gemaakt van minder conservatieve beslisregels voor het uitsluiten van opbarsten.

Anderzijds zal waar nodig wel gecontroleerd moeten gaan worden op het effect van het indrukken van de deklaag. Voor het laatste is inzet nodig van andere modellen dan alleen de klassieke glijvlakmodellen.

### 3.2.2 Controle op een glijvlak dat uitreedt nabij de teen

De eerste vorm van taludinstabiliteit **4b** (uittreden van het glijvlak nabij de teen) kan altijd maatgevend zijn, ook bij lage oprijfveiligheid. Op deze vorm van instabiliteit moet daarom altijd worden gecontroleerd (Figuur 3-7). Vooral bij relatief doorlatende dijken of dijken met een vrij hoge kans op golfoverslag bij hoogwateromstandigheden zullen de dan ongunstige waterspanningen onder het binnentalud bijdragen aan het ontstaan van dergelijke glijvlakken.



Figuur 3-7 Controle stabiliteit scenario **4b** regulier glijvlak (altijd controleren)

De controle op **4b** kan plaatsvinden met glijvlakmodellen LiftVan (tangent lines ook in de deklaag), Bishop en Spencer. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van het bestaande raamwerk van veiligheidsfactoren voor een semi-probabilistische beoordeling (WBI2017).

### 3.2.3 Controle op een glijvlak langs de grens tussen zand en deklaag

#### 3.2.3.1 Controle op kritieke oprijfveiligheid

Zodra er sprake is van 'nabij' opdrijven (scenario **2b**), opdrijven op meterschaal (scenario **2b**) of opdrijven op de schaal van de breedte van een afschuifvlak (scenario **2d**), moet ook worden gekeken naar het scenario waarbij afschuiven optreedt langs de grens tussen deklaag en het zandpakket (instabiliteitsscenario's **4c**, **4d** en **4e**). Voor controle van deze scenario's voldoet het cirkelvormige glijvlak van de methode Bishop niet.



Het moment vanaf wanneer bij afschuiven langs de grens tussen zand en deklaag ook een controle op indrukken of opbarsten nodig is kan in een semi-probabilistische berekening worden gerelateerd aan een nog vast te stellen grenswaarde voor de oprijfveiligheid  $n$ . Via een grenswaarde groter dan 1 (momenteel 1,2) wordt impliciet rekening gehouden met de invloed van de onzekerheid in het geschematiseerde stijghoogteverloop en deklaaggewicht op de kans dat taludinstabiliteit optreedt (de faalkans). De impliciete aanname is daarbij dus ook dat voornoemde onzekerheden verder niet via schematiseringsscenario's in rekening worden gebracht.

Aanbevolen wordt om een geschikte grenswaarde af te leiden door middel van een probabilistische kalibratiestudie, op basis van geschikte modellen en op basis van een realistische kwantificering van de bepalende onzekerheden. Binnen een dergelijke kalibratiestudie moet de bijdrage van de deklaag aan de taludstabiliteit modelmatig afhankelijk worden gesteld van opdrijven over een zekere lengte. Dit wil zeggen dat de kalibratie in principe al kan worden uitgevoerd bij de huidige eenvoudige beslisregel (geen schuifsterkte bij opdrijven en een deklaagdikte kleiner dan 4 meter). Na uitbreiding/verbetering van deze beslisregel zal echter opnieuw een kalibratie moeten plaatsvinden.

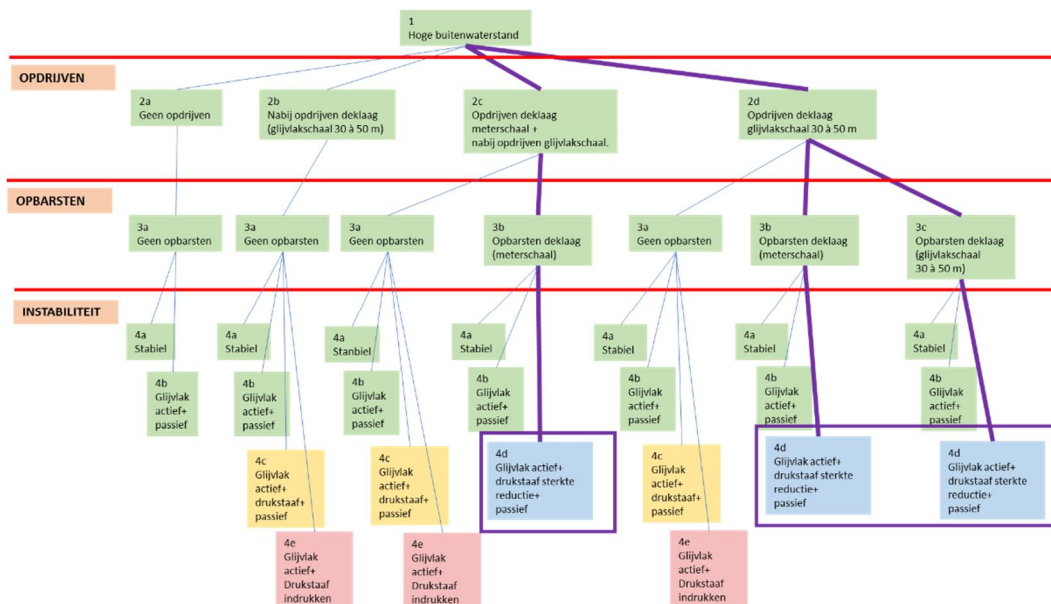
In theorie zou macrostabiliteit, inclusief indrukken en opbarsten onder invloed van opdrijven, ook volledig probabilistisch kunnen worden doorgerekend met hulp van een allesomvattend model. In dat geval zou een (gekalibreerde) grenswaarde niet meer nodig zijn. Voor praktijktoepassingen zijn allesomvattende modellen voorsnog echter nog te beperkt en/of te rekenintensief om al in combinatie met een probabilistische berekening te kunnen worden gebruikt.

Zie voor enige verdere achtergrond omtrent de kalibratie ten slotte ook bijlage D.1.

Bij onderschrijding van deze grenswaarde geeft § 2.5 een indicatie voor de verdere criteria waarmee opbarsten kan worden uitgesloten (slappere en dikkere deklagen of een aanwezige sloot). De in § 2.5 genoemde criteria zijn minder conservatief dan de momenteel gehanteerde beslisregel. Er zijn echter wel verdere numerieke simulaties en experimentele validatie nodig voordat dergelijke criteria voldoende onderbouwd vastgesteld kunnen worden.

### 3.2.3.2 Opbarsten kan niet worden uitgesloten

Voor de gevallen waarin opbarsten (scenario **4d**) niet met voldoende zekerheid kan worden uitgesloten moet, net zoals voorheen, een glijvlakberekening worden uitgevoerd waarin de deklaagsterkte veiligheidshalve niet wordt meegenomen (Figuur 3-8). Misschien is het ook mogelijk om in plaats daarvan een gereduceerde schuifsterkte toe te passen. De resultaten uit de huidige numerieke analyses geven daarvoor echter geen onderbouwing. Binnen de in § 2.1 bepaalde onder- en bovengrens voor de schuifsterkte treedt in de numerieke berekeningen tijdens het opvoeren van de stijghoogte in de zandlaag namelijk altijd instabiliteit op, zie § 2.4.



Figuur 3-8 Controle stabiliteit scenario 4d drukstaaf met gereduceerde sterkte door (lokaal) opbarsten

### 3.2.3.3 Opbarsten kan wel worden uitgesloten

Zodra opbarsten wel met voldoende zekerheid kan worden uitgesloten is bij geringe oprijfveiligheid een controle op scenario 4c mogelijk met hulp van de glijvlakmodellen LiftVan of Spencer. Daarmee wordt alleen gecontroleerd op het ontstaan van een passief glijvlak aan het eind van de zone waarover de deklaag over de zandlaag schuift. De waterspanningen moeten daarbij handmatig worden gekozen, waarbij de waterspanningen op het grensvlak in ieder geval niet het deklaaggewicht mogen overschrijden.

Bij dunnere dekragen zal deze stabiliteitscontrole volgens de huidige inzichten moeten worden aangevuld met een controle op het indrukken van de deklaag (scenario 4e). Door indrukken van de deklaag zal het actieve glijvlakdeel in de dijk namelijk eerder kunnen optreden dan het optreden van een passief glijvlak in de deklaag.

In combinatie met de vast te stellen grenswaarde voor de oprijfveiligheid wordt aanbevolen om op basis van nadere numerieke analyses ook een criterium vast te stellen voor de gevallen waarin een controle op (de effecten van) indrukking van de deklaag zal worden vereist. Bijvoorbeeld: een deklaagdikte van 4 meter of minder.

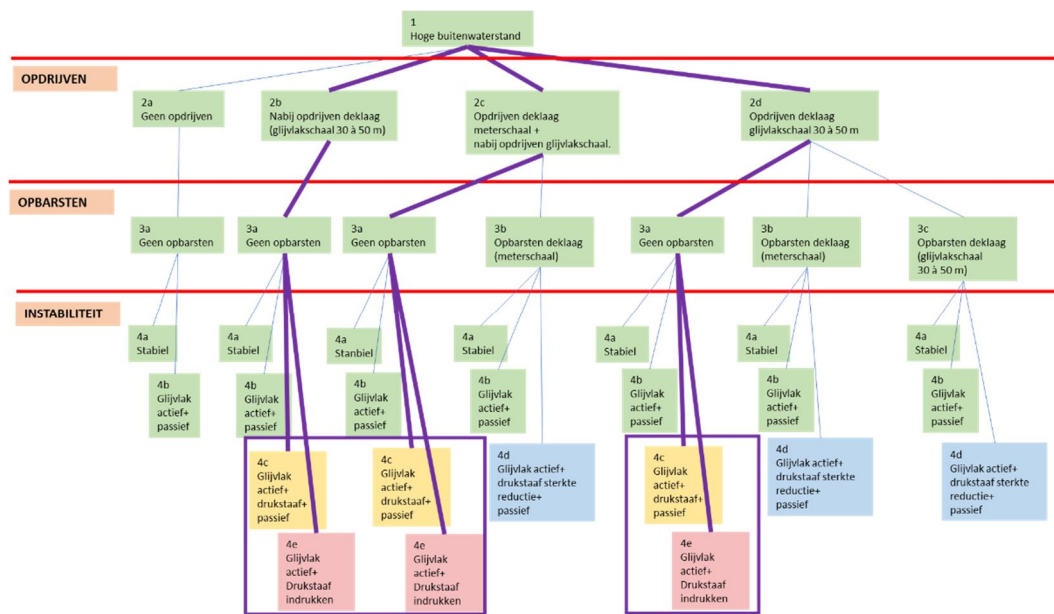
Voor de controle op indrukken bestaan twee mogelijkheden.

**Eindige-Elementen.** Een eindige-elementenmodellering wordt in praktijk al standaard toegepast voor stabiliteits- en vervormingsanalyses van constructief versterkte dijken. Daarvoor is in POVM verband een publicatie opgesteld [11]. De daarin opgenomen aanwijzingen zijn grotendeels ook toepasbaar voor een eindige-elementenanalyse zonder aanwezigheid van een constructie. Ten opzichte van de in dit rapport gepresenteerde DIANA simulaties gaat de in de POVM publicatie beschreven eindige-elementenmodellering uit van een opgegeven waterspanningsverloop in de zandlaag, in plaats van een berekend verloop. Voor een eventuele oprijfzone wordt daarbij een aangenomen lengte gebruikt. Daarmee kan wel het effect van indrukken worden gesimuleerd, maar niet wat er na opdrijven gebeurt met de deklaag en met de waterspanning op het grensvlak. In de publicatie wordt aangegeven hoe de ongedraineerde sterkte kan worden gebaseerd op dezelfde SHANSEP parameters als volgens het WBI toe te passen binnen glijvlakberekeningen, evenals hoe de aanvullende stijfheidsparameters moeten worden bepaald. Op de POVM publicatie kan ook worden teruggevallen voor de benodigde grenswaarde die geldt voor de maximaal toelaatbare horizontale verplaatsing van de binnenteen. Volgens de POVM publicatie moet die

verplaatsing worden bepaald bij karakteristieke waarden voor de sterkte en stijfheid van de grond, om te controleren of de verplaatsing andere faalmechanismen dan macrostabiliteit kan initiëren (bijvoorbeeld door beschadiging van de bekleding op het binnentalud). Verder mag bij de rekenwaarden voor de grondsterkte door het indrukken van de deklaag geen instabiliteit (met doorgaande vervorming) ontstaan. De in te voeren waterspanningen moeten logischerwijs overeenkomen met de keuzes die ook zijn gemaakt voor LiftVan of Spencer. Vanwege de spanningsafhankelijke stijfheid en sterkte in het eindige-elementenmodel is het voor numerieke stabiliteit echter wel nodig dat er op de grenslaag een beperkte effectieve verticale spanning resteert (maximaal 2 kPa). Binnen een dergelijke eindige-elementenberekening wordt tijdens de stabiliteitscontrole impliciet gecontroleerd op alle mogelijke instabiliteitsvormen, uitgezonderd opbarsten. Als te controleren voorwaarde geldt daarbij dat de met de eindige-elementen gevonden stabiliteitsfactor nooit hoger mag uitvallen dan de waarde die is gevonden met LiftVan of Spencer.

- Een semi-analytische vervormingsberekening door middel van lamellen, zoals beschreven in bijlage B. In het verleden werd de controle volgens bijlage B uitgevoerd, maar bleek deze zelden maatgevend. De controle is daarom niet meer in het WBI2017 opgenomen. Uit de resultaten van meer recente eindige elementen berekeningen blijkt echter dat indrukken van de deklaag wél tot ontoelaatbare verplaatsing of zelfs tot instabiliteit kan leiden. Ook in het geval van een semi-analytische berekening zullen, net zoals voor een eindige-elementenberekening, aanwijzingen nodig zijn voor het bepalen van de stijfheid van deklaag en voor de verder relevante parameters.

Anno 2020 lijkt eindige-elementtoepassing het meest voor de hand te liggen.



Figuur 3-9 Controle stabiliteit scenario 4c en 4e drukstaaf en indrukken drukstaaf, wel opdrijven of 'nabij' opdrijven, maar geen opbarsten

## 4 Conclusies en aanbevelingen

Wanneer bij geringe oprijfveiligheid een horizontale drukkracht in de deklaag nodig is voor taludstabiliteit, suggereren de resultaten van de in hoofdstuk 2 gerapporteerde numerieke variatiestudie dat opbarsten/uitknikken slechts in een (zeer) beperkt aantal gevallen het dominante faalmechanisme kan worden. Dit zijn gevallen waarin nabij de binnenteen geen sloot aanwezig is, waarin de deklaag dun en stijf is (dunner dan 2 m en/of met een elasticiteitsmodulus groter dan 3 MPa), en waarin de zandlaag voldoende doorlatend is (transmissiviteit<sup>4</sup>  $kD$  groter dan  $1E-3$  m<sup>2</sup>/s).

Belangrijke kanttekening daarbij is dat aan de gehanteerde schematisering nog te veel beperkingen kleven (zie § 2.2.5) om deze getallen zonder verdere validatie te kunnen toepassen voor aanpassing van de huidige beslisregel. Aanbeveling is daarom om validatie aan proefresultaten uit te voeren, in combinatie met verdere numerieke modellering. Beperkingen die de validatie in de weg blijken staan moeten daarbij waar nodig worden opgelost. Bijlage C bevat een voorstel voor de uit te voeren proeven.

De numerieke resultaten suggereren verder dat in geval van dunnere deklagen bij geringe oprijfveiligheid wellicht ook rekening moet gaan worden gehouden met het mechanisme 'Indrukken' van de deklaag, in combinatie met taludafschuiving. Het optreden van dit mechanisme is al bekend van de 'standaard' eindige-elementenanalyses, zoals tegenwoordig toegepast voor het ontwerp en de beoordeling van stabiliteitsverhogende constructies [11].

In § 3.2 worden de stappen en methoden beschreven die nodig zijn voor de beoordeling van macrostabiliteit bij geringe oprijfveiligheid. Deze stappen en methoden sluiten grotendeels aan op de huidige praktijk, inclusief het verwaarlozen van de deklaagsterkte zodra opbarsten niet kan worden uitgesloten. In vergelijking tot de huidige praktijk wordt echter het gebruik voorzien van minder conservatieve beslisregels om opbarsten te mogen uitsluiten. Anderzijds wordt voorgesteld om in voorkomende situaties te gaan controleren op het effect van het indrukken van de deklaag. Voor deze controle op indrukken zijn andere modellen nodig dan de klassieke glijvlakmodellen. In § 3.2.3 wordt daarvoor de toepassing van eindige-elementenmodellen gesuggereerd, als alternatief voor de vroeger toegepaste semi-analytische methode. Deze eindige-elemententoepassing is al gangbaar in het geval van constructief versterkte dijken, ook voor situaties met geringe oprijfveiligheid. Vanwege de spanningsafhankelijke stijfheid en sterkte in het eindige-elementenmodel is het voor numerieke stabiliteit echter wel nodig dat er op de grenslaag een beperkte effectieve verticale spanning resteert (maximaal 2 kPa).

In relatie tot de in § 3.2 beschreven stappen wordt geadviseerd om in een vervolgfase van dit onderzoek voldoende onderbouwde criteria en/of grenswaarden op te stellen voor de volgende punten.

- De grenswaarde van de oprijfveiligheid (de verhouding tussen deklaaggewicht en waterdruk) en de verdere vervolgcriteria op basis waarvan opbarsten mag worden uitgesloten. Zie § 3.2.3.1 en de eerste twee alinea's van dit hoofdstuk.
- De criteria op basis waarvan een aanvullende controle op indrukken nodig is bij het optreden van de glijvlak langs de grens van zand en deklaag.

---

<sup>4</sup> De transmissiviteit is gelijk aan de doorlatendheid keer de laagdikte

Opdrijven en opbarsten is ook van belang voor het mechanisme 'piping'. In bijlage D worden daaromtrent de volgende aanbevelingen gedaan en/of kunnen daaruit de volgende aanbevelingen worden afgeleid.

- Probabilistische kalibratie van de benodigde deterministische grenswaarde voor de oprijfveiligheid. Met de notie dat voor macrostabiliteit een andere grenswaarde kan resulteren dan voor piping.
- De verschillende betekenis van de term 'opbarsten' voor 'piping' en voor macrostabiliteit verduidelijken, en daarvoor in naamgeving ook onderscheid gaan aanbrengen. Bij macrostabiliteit wordt de term 'opbarsten' namelijk geassocieerd met het uitknikken van een onder druk staande deklaag, over de breedte van een afschuifvlak. Daarbij zullen buigscheuren optreden. Bij piping wordt de term 'opbarsten' daarnaast echter ook geassocieerd met het ontstaan van lokale gaten of trekscheuren in de deklaag, waardoor zandmeevoerende wellen kunnen ontstaan.
- Nagaan wat voor 'piping' de betekenis is van de in het voorliggende document gerapporteerde numerieke resultaten.
- Integraal vervolgonderzoek programmeren naar opbarsten en naar de invloed daarvan op waterdrukken in de zandlaag, voor zowel het effect op macrostabiliteit als op het mogelijk optreden van 'piping'. Dit zal leiden tot doelmatiger besteding van onderzoeksmiddelen.

De samenvattende eindconclusie is ten slotte dat de huidige beslisregel voor het uitsluiten van opbarsten op grond van de numerieke resultaten significant aangescherpt lijkt te kunnen worden, maar dat een nog uit te voeren validatie aan proefresultaten nodig is om op deze numerieke resultaten te mogen vertrouwen. Het in een vervolgfase uitvoeren van het in bijlage C beschreven experimentele onderzoek wordt daarom sterk aanbevolen.

# Referenties

- [1] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS-DWW, ISBN 90-369-3776-0, zie [www.enwinfo.nl](http://www.enwinfo.nl). Delft, juni 2001.
- [2] *POVM Macrostabilliteit Opbarsten, Literatuur*, A. van Hoven, december 2016, Deltares projectnummer 1220504
- [3] *POVM Macrostabilliteit Opbarsten, Conceptueel model*, dr. Ir. G.J.C.M. Hoffmans, mei 2016, Deltares projectnummer 1220504
- [4] [POVM Macrostabilliteit Opbarsten, Consequentie-analyse en vervolgonderzoek, Arcadis R. Koopmans, J. van Zuijlen, Deltares A. van Hoven, december 2016, Deltares projectnummer 1220504](#)
- [5] *POVM Macrostabilliteit Opbarsten, Managementsamenvatting*, A. van Hoven, maart 2017, Deltares projectnummer 1220504
- [6] Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI, Robert 't Hart. Deltares projectnummer 11200574-007, versie C2, maart 2018
- [7] Leidraad voor het ontwerp van rivierdijken, deel 2 benedenrivierengebied, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Uitgeverij Waltman Delft, 1989
- [8] Technische Rapport Zandmeevoerende wellen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Maart 1999
- [9] [FEM Analysis of uplift, POV Macrostabilliteit, cluster rekentechnieken, C. Hoffman, Diana FEA, M.A.T. Visschedijk, Deltares, versie 1.0, juli 2019](#)
- [10] [POVM Opbarsten, Cluster Rekentechnieken, A. van Hoven, A. Noordam, A. Wierma, versie 1.0, juli 2019](#)
- [11] [POVM Publicatie Eindige-elementenmethode](#), 2020.

# A Resultaten numerieke variatiestudie

## A.1 Overzichtstabel

De volgende tabel (ook opgenomen in § 2.4.1) geeft een overzicht van de resultaten voor alle berekende varianten. De variaties op de basisgevallen zijn grijs gemarkeerd. In de tabel is aangegeven welke faalmodus is geobserveerd, vanaf welk moment opdrijven werd geobserveerd, tot welk moment nog een stabiele oplossing mogelijk bleek (genoemd: nabij falen) en welke ligging de zones hebben waarlangs op dat moment afschuiving en opdrijven plaatsvindt op het grensvlak tussen deklaag en zand.

Tabel A-1

deklaag- dikte [m]	cohesie [kPa]	locatie start sloot [m]	E-mod [Mpa]	k_zand m/s	trek- sterkte [kPa]	tijd begin opdrijven d-h	tijd nabij falen d-h	faalmodus	locatie opdrijfzone [m]	max openstand bij falen [cm]	locatie schuifzone [m]	max schuif- verplaatsing nabij teen bij falen [cm]
1	13	nvt	3	1,00E-03	3	1d14h	1d21h	indrukken/opbarsten	49-32	4,4	72-25	19,5
1	14	nvt	3	1,00E-03	3	1d14h	2d2h	opbarsten/indrukken	54-31	14	73-25	18
1	15	nvt	3	1,00E-03	3	1d14h	2d6h	opbarsten	56-31	22	72-25	15
2	14	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d8h	indrukken	46-33	1,5	72-24	24
2	15	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d8h	indrukken	47-33	1,2	70-24	20,9
2	16	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d10h	indrukken	52-32	2	73-24	20
2	17	nvt	3	1,00E-03	3	3d5h	3d10h	indrukken	52-32	1,6	71-25	18
3	15	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	4d13h	indrukken	nvt	nvt	63-25	17,7
3	16	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	4d16h	indrukken	nvt	nvt	67-22	21
3	17	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	4d20h	indrukken	nvt	nvt	67-22	21
3	18	nvt	3	1,00E-03	3	4d20h	4d21h	indrukken	44-33	0,7	67-22	19
3	19	nvt	3	1,00E-03	3	4d20h	4d21h	indrukken	44-33	0,7	65-24	16,4
3	20	nvt	3	1,00E-03	3	4d20h	4d23h	indrukken	48-33	0,9	62-24	12,1
4	18	nvt	3	1,00E-03	3	nvt	5d1h	indrukken	nvt	nvt	52-26	12,2
1	14	nvt	1	1,00E-03	3	nvt	1d11h	indrukken	nvt	nvt	50-26	15
2	15	nvt	1	1,00E-03	3	nvt	1d	afschuiven bij teen	nvt	nvt	33-26	2,5
3	18	nvt	1	1,00E-03	3	nvt	2d	afschuiven net achter teen	nvt	nvt	nvt	nvt
1	14	nvt	5	1,00E-03	3	1d13h	2d14h	opbarsten, incl. buigscheuren	52-31	7,3	76-25	20,9
2	15	nvt	5	1,00E-03	3	3d5h	3d16h	indrukken/opbarsten	54-32	7,3	81-22	21,7
3	18	nvt	5	1,00E-03	3	4d21h	5d7h	indrukken	62-32	2,6	82-22	20,9
1	14	nvt	10	1,00E-03	3	1d13h	2d17h	opbarsten, incl. buigscheuren	61-30	56,7	76-25	8,6
2	15	nvt	10	1,00E-03	3	3d5h	4d19h	opbarsten, incl. buigscheuren	60-31	60,1	85-22	26,6
3	18	nvt	10	1,00E-03	3	4d21h	6d22h	opbarsten, incl. buigscheuren	76-31	50,7	98-22	25,8
1	14	nvt	3	1,00E-04	3	1d17h	2d0h	indrukken	44-32	1,3	66-25	15
2	15	nvt	3	1,00E-04	3	3d9h	3d9h	indrukken	40-34	0,5	68-24	21
3	18	nvt	3	1,00E-04	3	nvt	4d22h	indrukken	nvt	nvt	62-24	16
2	15	34	3	1,00E-03	3	2d3h	2d6h	opdrukken bij sloot	35-34	1,6	42-26	10
2	16	34	3	1,00E-03	3	2d9h	2d12h	opdrukken bij sloot	36-34	0,9	44-26	8,9
2	17	34	3	1,00E-03	3	2d13h	2d17h	opdrukken bij sloot	36-34	0,7	46-26	7,9
3	16	36	3	1,00E-03	3	3d15h	3d15h	opdrukken bij sloot	36-34	36-34	50-26	14,4
3	17	36	3	1,00E-03	3	niet	3d20h	opdrukken bij sloot/indrukken	nvt	nvt	52-26	12,8
3	18	36	3	1,00E-03	3	4d3h	4d3h	opdrukken bij sloot/indrukken	37-33	1,1	57-22	18,1
3	19	36	3	1,00E-03	3	4d6h	4d6h	opdrukken bij sloot/indrukken	37-34	0,6	56-25	13,5
3	20	36	3	1,00E-03	3	4d8h	4d9h	opdrukken bij sloot/indrukken	38-33	0,7	57-25	12,7
2	15	40	3	1,00E-03	3	2d1h	2d12h	opdrukken bij sloot	42-40	1	51-26	13,8
3	18	45	3	1,00E-03	3	nvt	4d5h	indrukken	nvt	nvt	58-25	14,3
1	14	nvt	3	1,00E-03	1	1d14h	1d23h	indrukken/opbarsten	52-31	8,5	73-25	19
2	15	nvt	3	1,00E-03	1	3d5h	3d7h	indrukken	45-34	0,8	69-24	20,7
3	18	nvt	3	1,00E-03	1	4d20h	4d19h	indrukken	nvt	nvt	62-24	15,3
1	14	nvt	3	1,00E-03	5	1d14h	2d1h	opbarsten/indrukken	51-31	17,1	73-24	21,1
2	15	nvt	3	1,00E-03	5	3d5h	3d7h	indrukken	45-33	0,9	67-24	17,2
3	18	nvt	3	1,00E-03	5	4d20h	4d21h	indrukken	45-33	0,8	65-24	16,8

## A.2 Resultaten voor de afzonderlijke varianten

### A.2.1 Inleiding

In de volgende paragrafen worden geselecteerde resultaten gepresenteerd voor alle verschillende varianten, uitgezonderd de varianten waarin de treksterkte is aangepast. Zie § A.3 voor laatstgenoemde varianten.

## A.2.2 Legenda

De betekenis van de aanduidingen voor de in de volgende paragrafen gepresenteerde DIANA-resultaten is opgenomen in de volgende tabel. In het algemeen geldt verder de conventie dat trekspanningen en -rekken een positief teken krijgen en dat waterdrukken een positief teken krijgen. Alle plots als functie van plaats hebben betrekking op het tijdstip nabij falen.

Tabel A-2

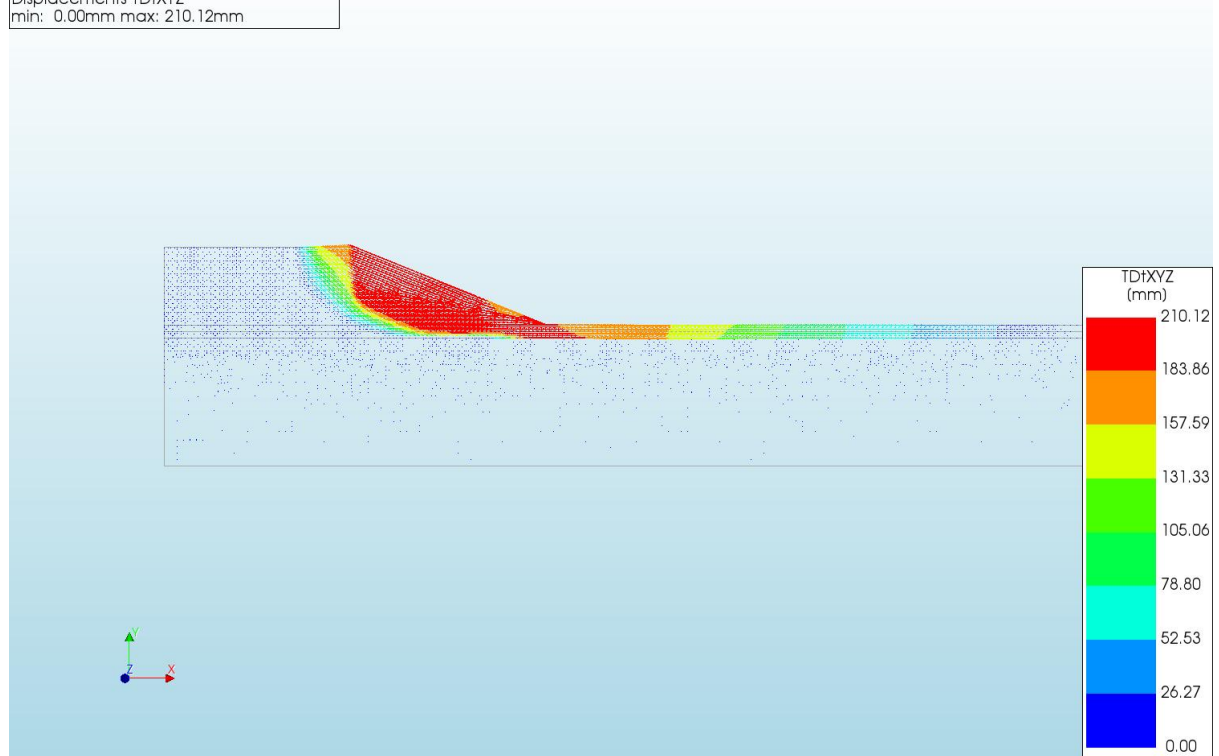
Displacements	TDtXYZ	Totale verplaatsingen in knopen (vector)	[mm]
Displacements	TDtX	Horizontale component van totale verplaatsingen in knopen	[mm]
Displacements	TDtY	Verticale component van totale verplaatsingen in knopen	[mm]
Displacements	IDtXYZ	Incrementele verplaatsingen in knopen binnen 1 stap (vector)	[mm]
Displacements	IDtX	Horizontale component van incrementele verplaatsingen in knopen binnen 1 stap	[mm]
Displacements	IDtY	Verticale component van incrementele verplaatsingen in knopen binnen 1 stap	[mm]
Pressures	TDprph	Stijghoogte keer zwaartekrachtversnelling keer dichtheid water	[kPa]
Pore Pressure	PRpo	Waterdruk in elementen	[kPa]
Total Head	H	Stijghoogte in elementen	[m]
Pressure Head	HP	Drukhoogte in elementen	[m]
Darcy Flux	DFXYZ	Specifiek debiet (flux) in elementen (vector)	m/s
Cauchy Effective Stresses	SEXX	Horizontale effectieve normaalspanning in elementen	[kPa]
Cauchy Effective Stresses	SEYY	Verticale effectieve normaalspanning in elementen	[kPa]
Cauchy Total Stresses	S1	Grootste hoofdspanningscomponent (trek is positief)	[kPa]
Total Strains	E1	Grootste totale hoofdrek (trek is positief)	[-]
Plastic Strains	Epeq	Equivalenten plastische rek	[-]
Interface Relative Displacements	DUSx	Schuifverplaatsing interface-elementen (relatieve verplaatsing langs het element)	[mm]
Interface Relative Displacements	DUNy	Openstand interface-elementen (relatieve verplaatsing loodrecht op het element)	[mm]
Interface Effective Traction	STESx	Schuifspanning langs interface-elementen	[kPa]
Interface Effective Traction	STENy	Effectieve normaalspanning loodrecht op interface-elementen	[kPa]
Interface Total Traction	STTSx	Schuifspanning langs interface-elementen	[kPa]
Interface Total Traction	STTNy	Totale normaalspanning loodrecht op interface-elementen	[kPa]
Cross-section Forces	Nx	Normaalkracht in de deklaag	[kN]
Cross-section Forces	Mz	Moment in het midden van de deklaag	[kNm]



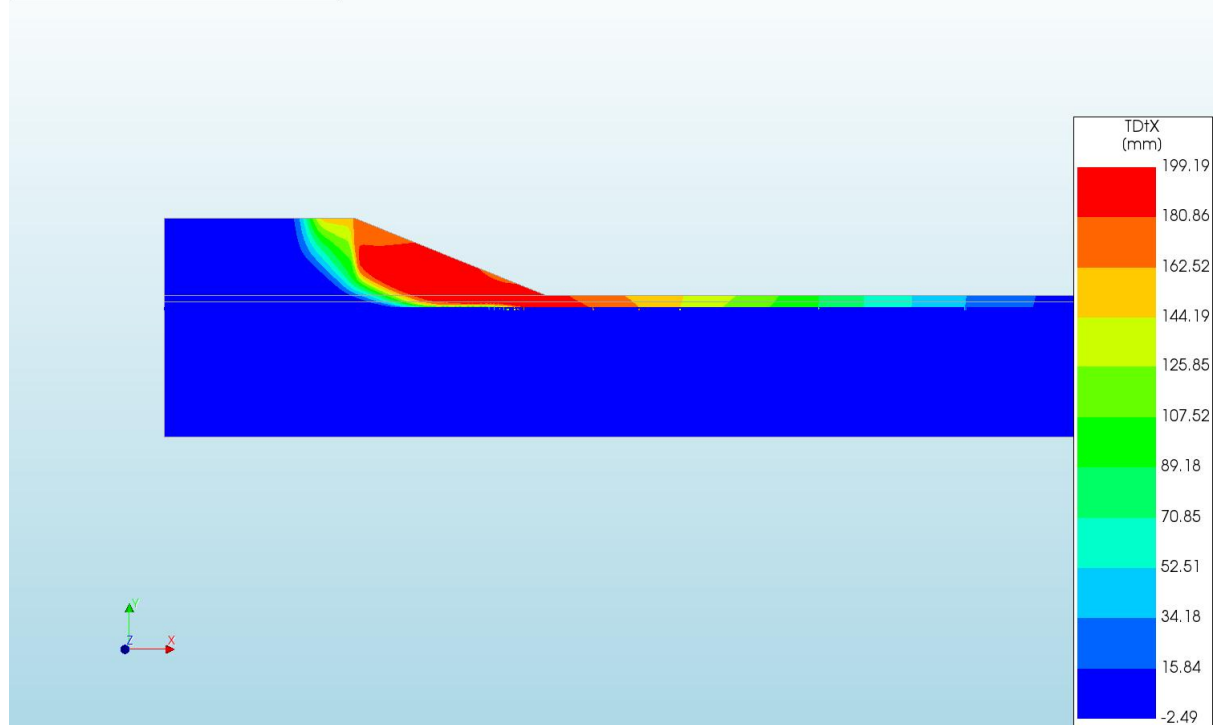
A.2.3

Output d=1 c=13 E=3 k=1e-07\_20200818'

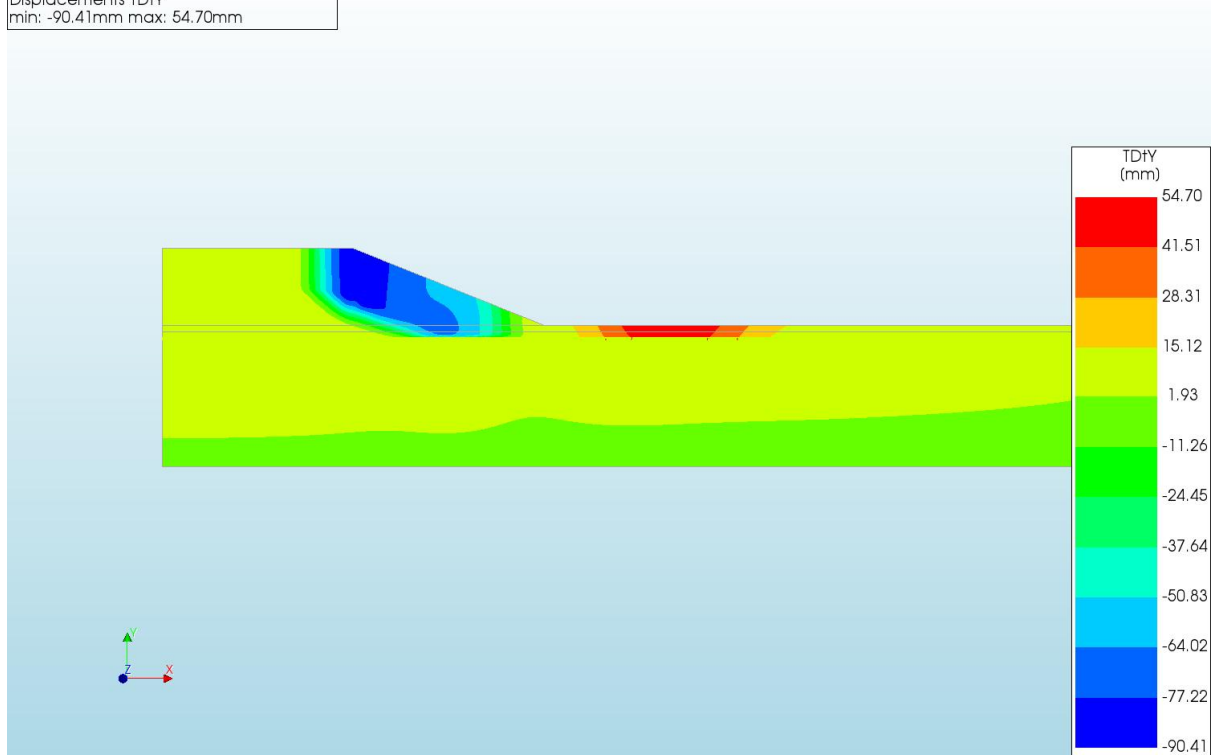
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 210.12mm



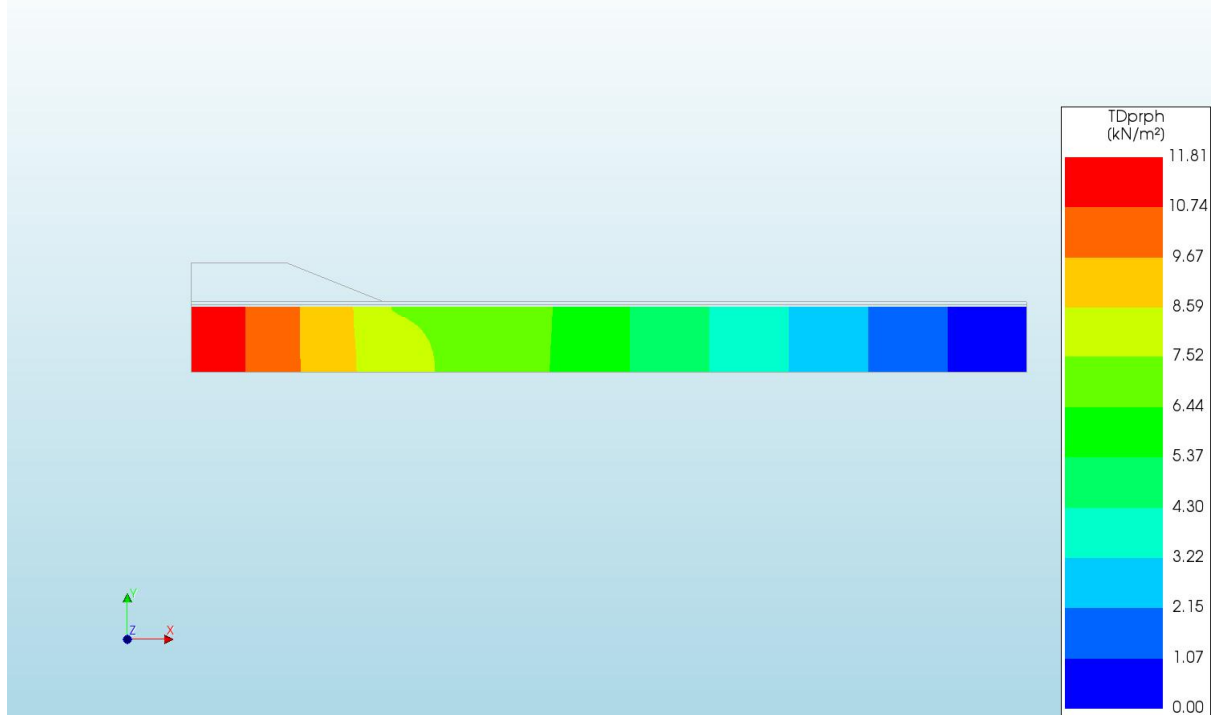
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Displacements TDtX  
min: -2.49mm max: 199.19mm



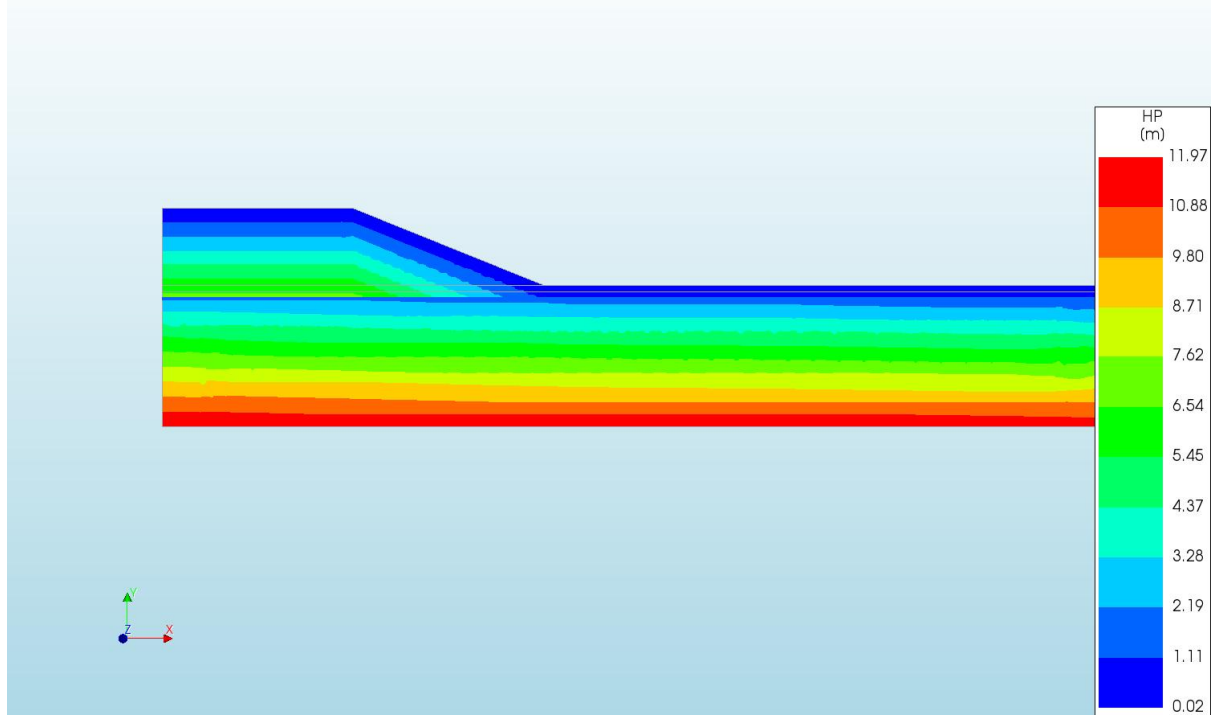
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Displacements TDtY  
min: -90.41mm max: 54.70mm



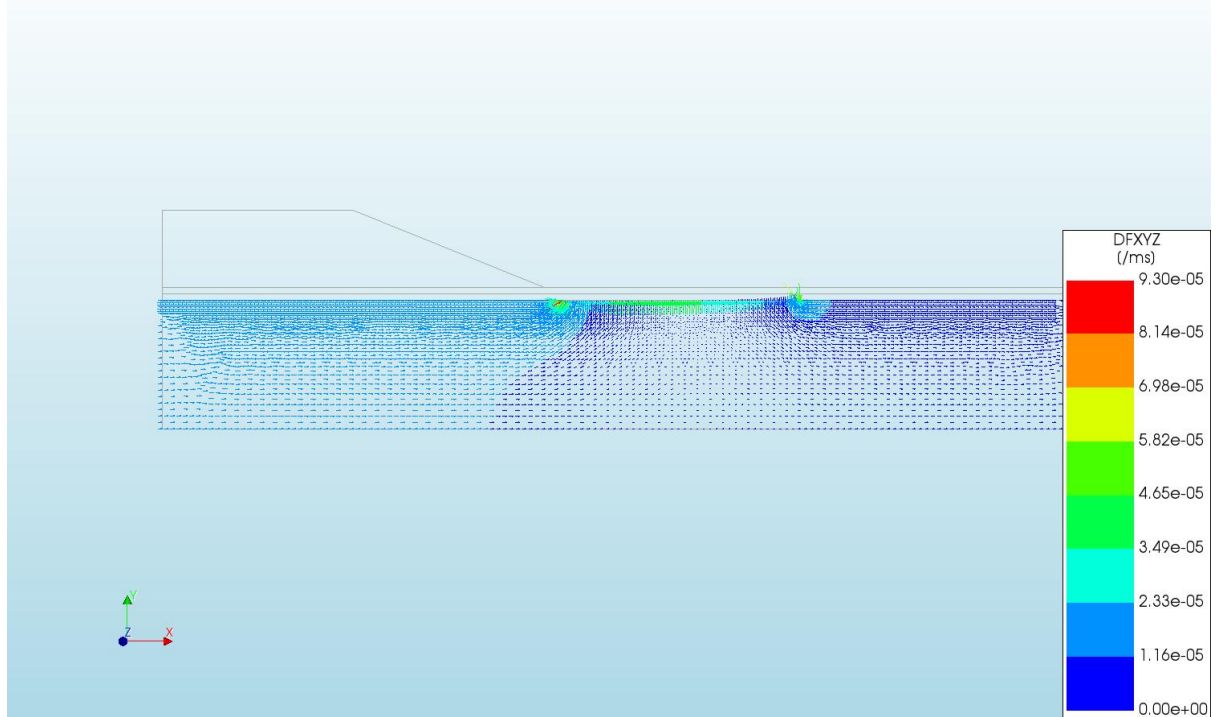
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 11.81kN/m<sup>2</sup>



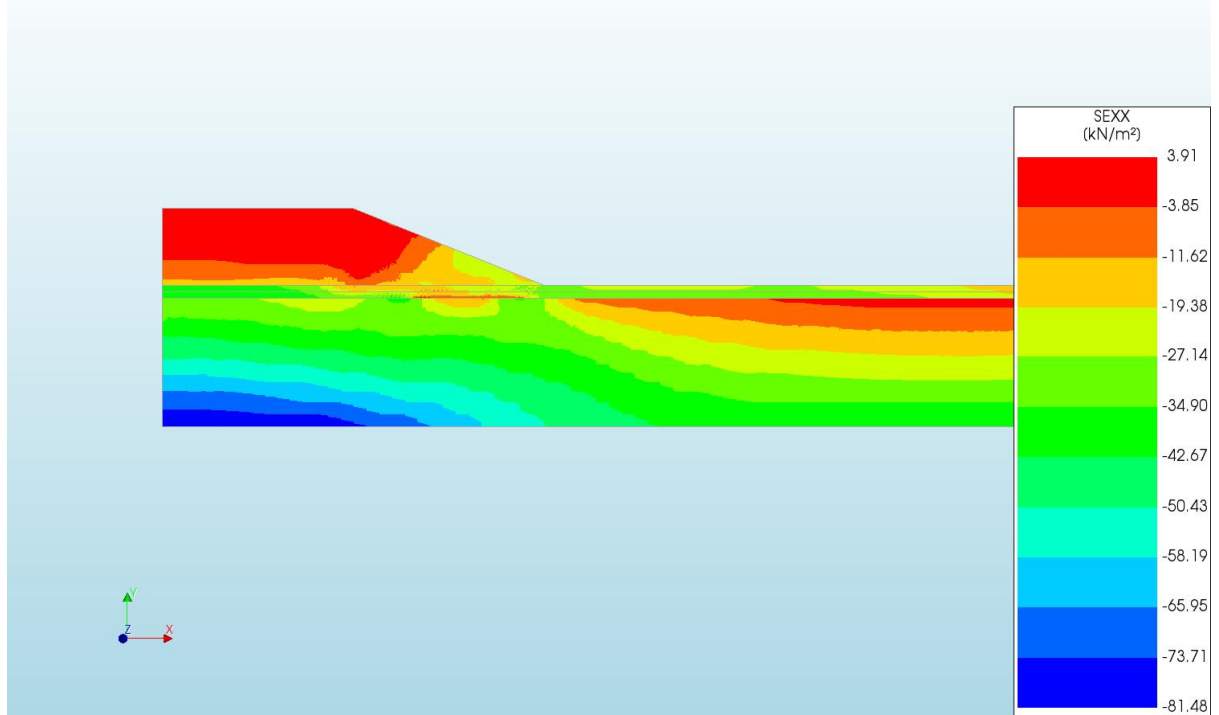
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 11.97m



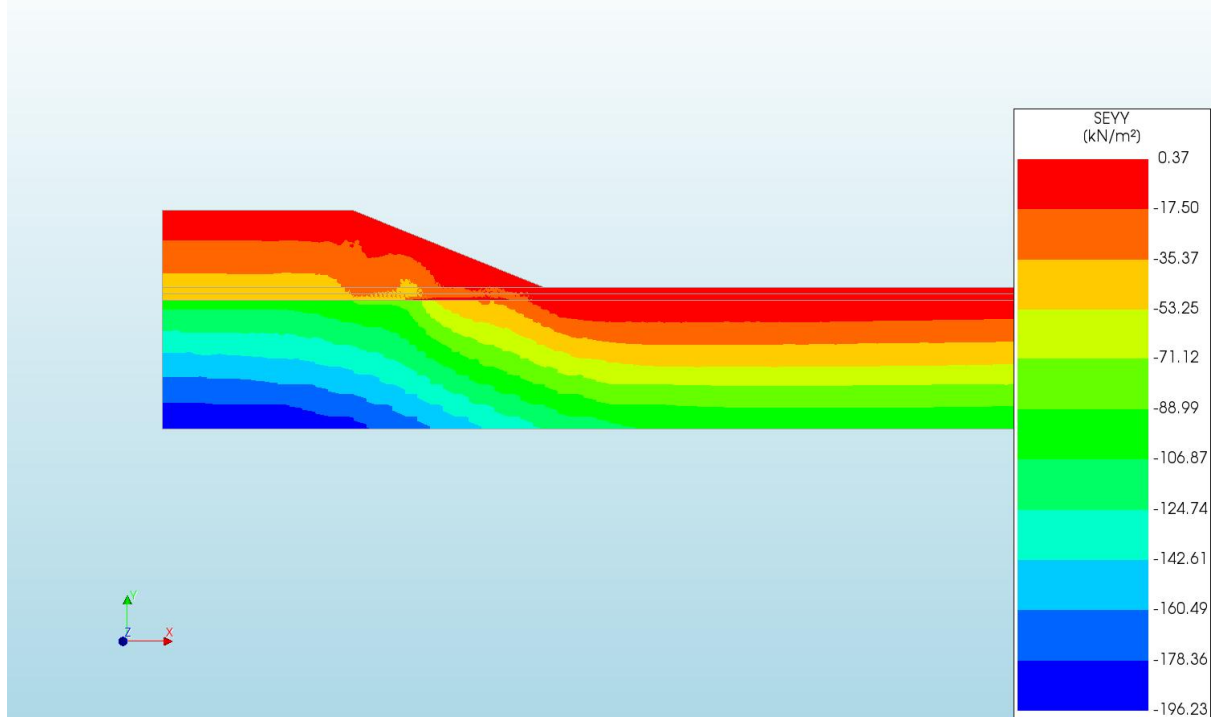
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 9.30e-05/ms



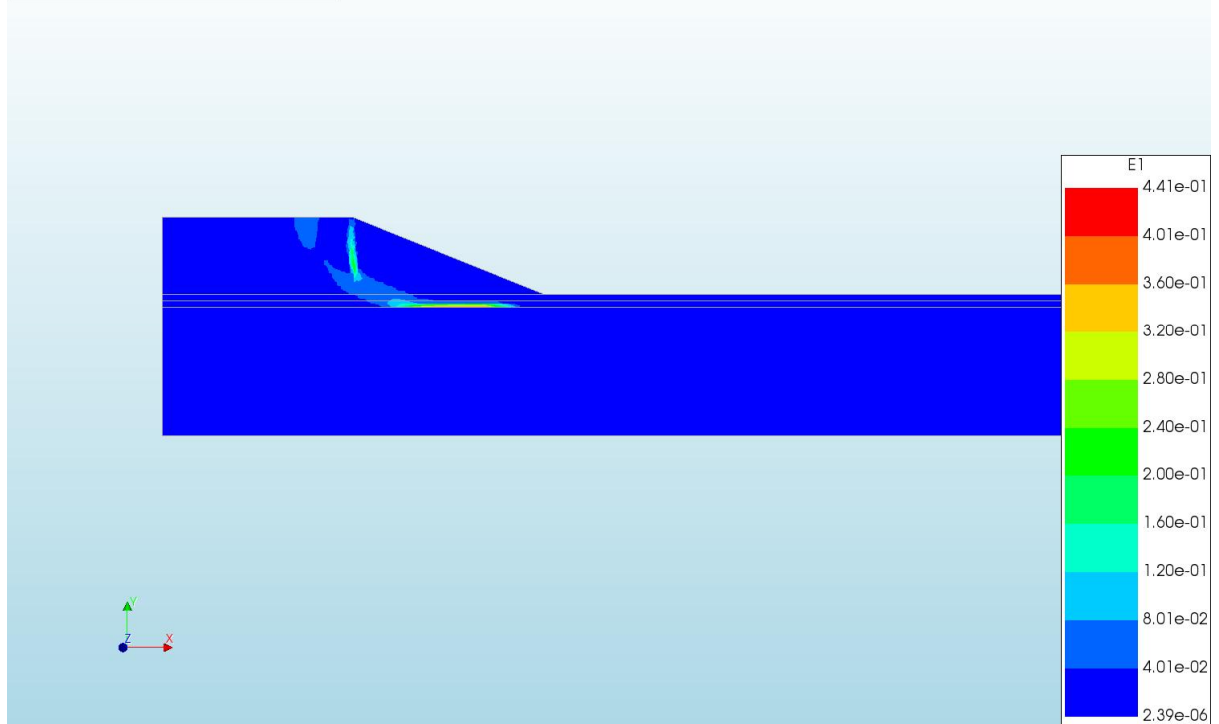
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -81.48kN/m<sup>2</sup> max: 3.91kN/m<sup>2</sup>



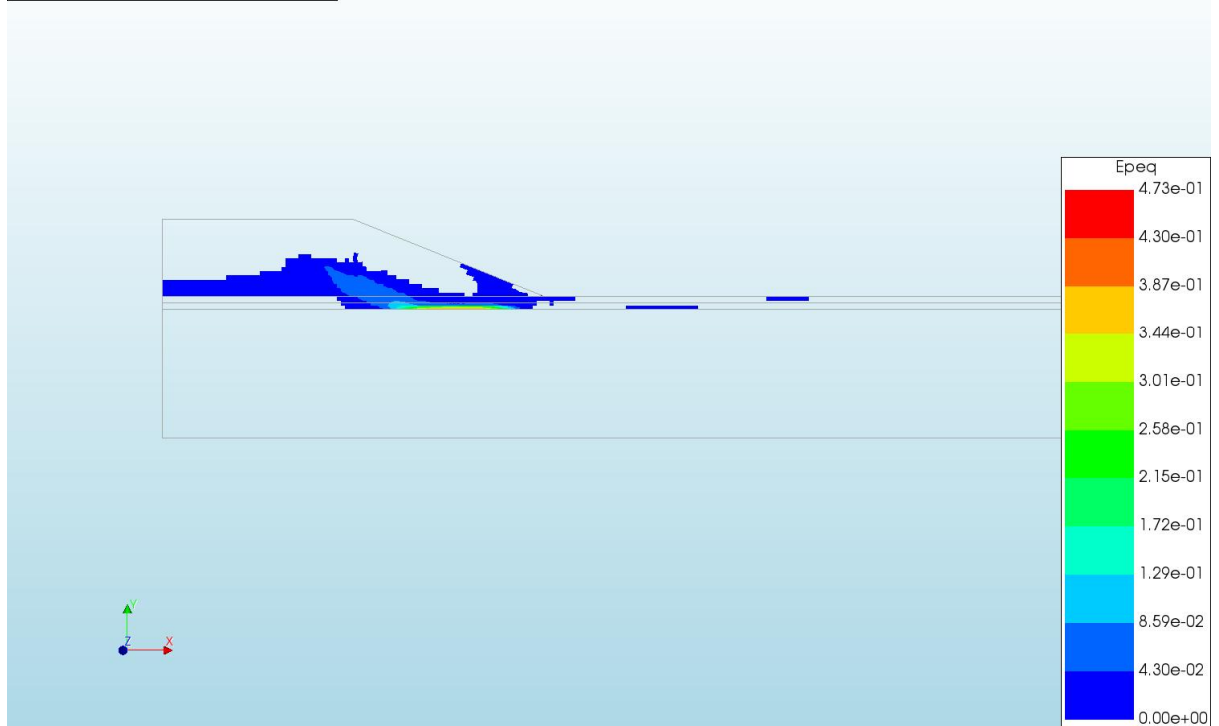
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -196.23kN/m<sup>2</sup> max: 0.37kN/m<sup>2</sup>



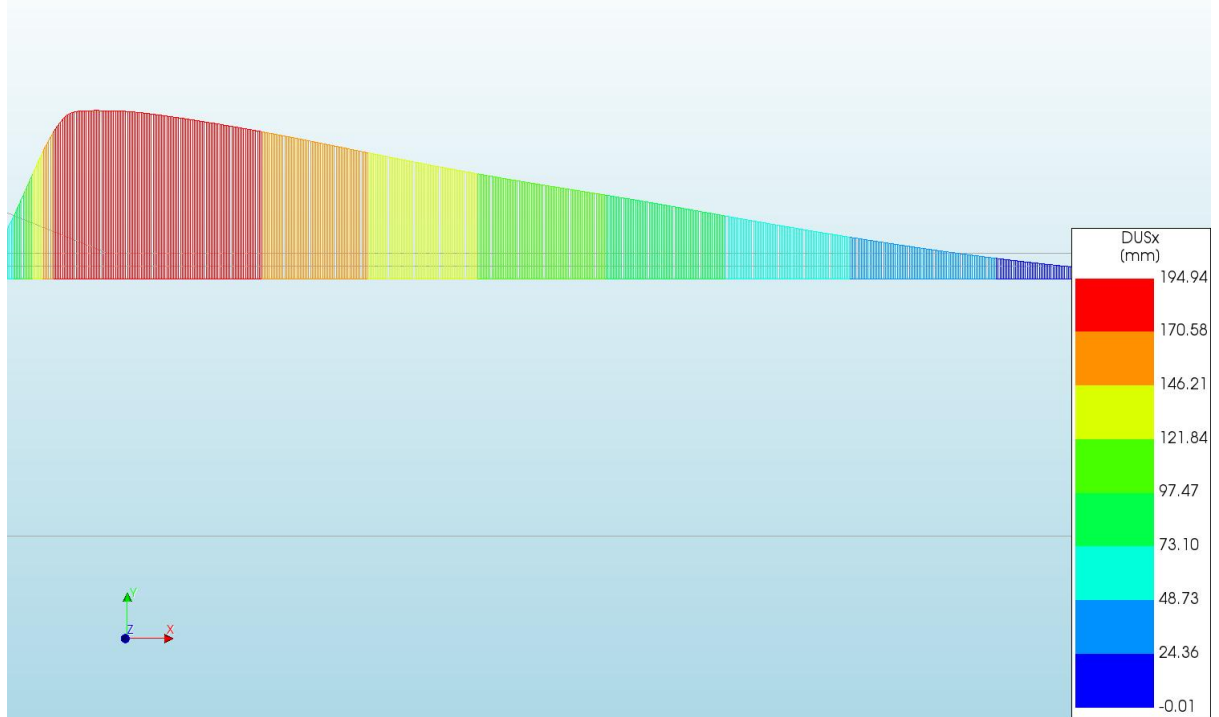
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Total Strains E1  
min: 2.39e-06 max: 4.41e-01



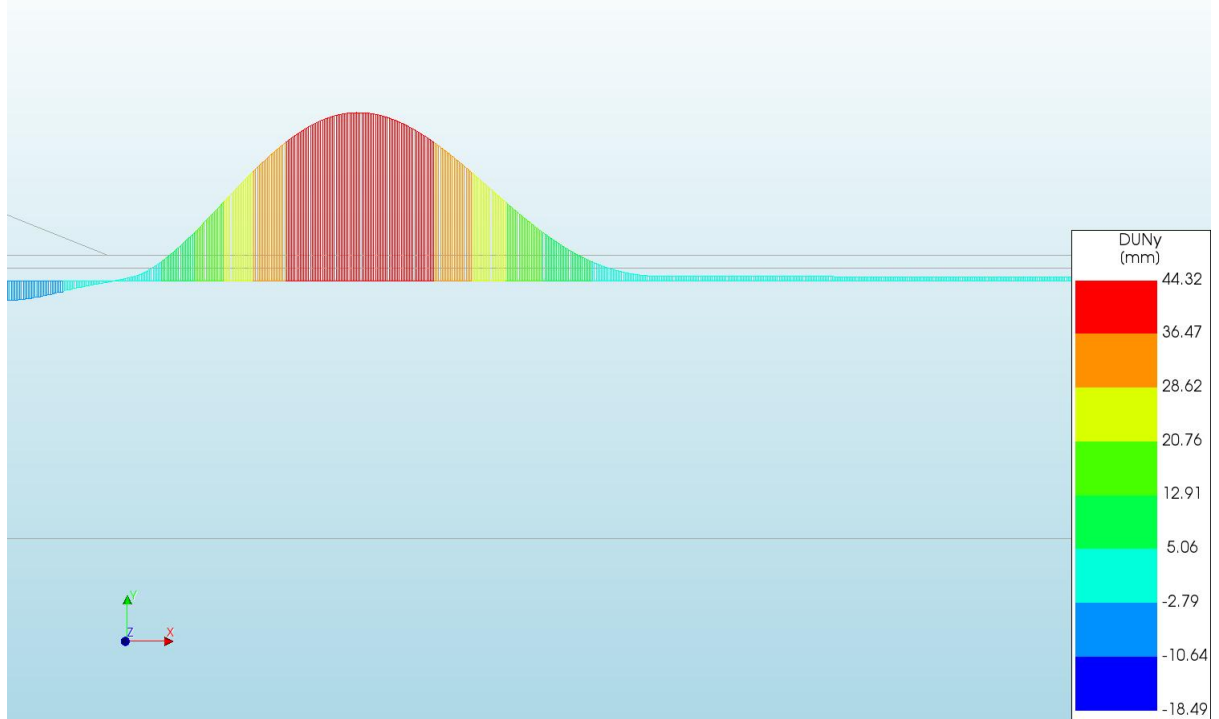
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.73e-01



d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.01mm max: 194.94mm



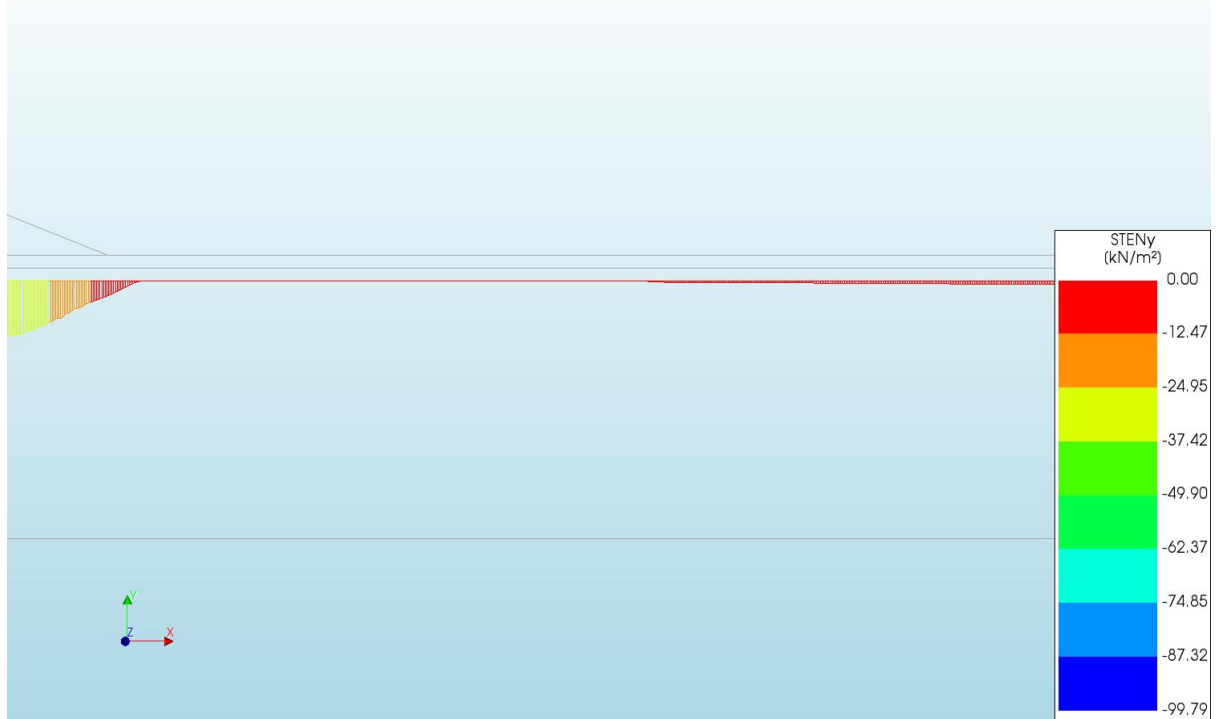
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -18.49mm max: 44.32mm

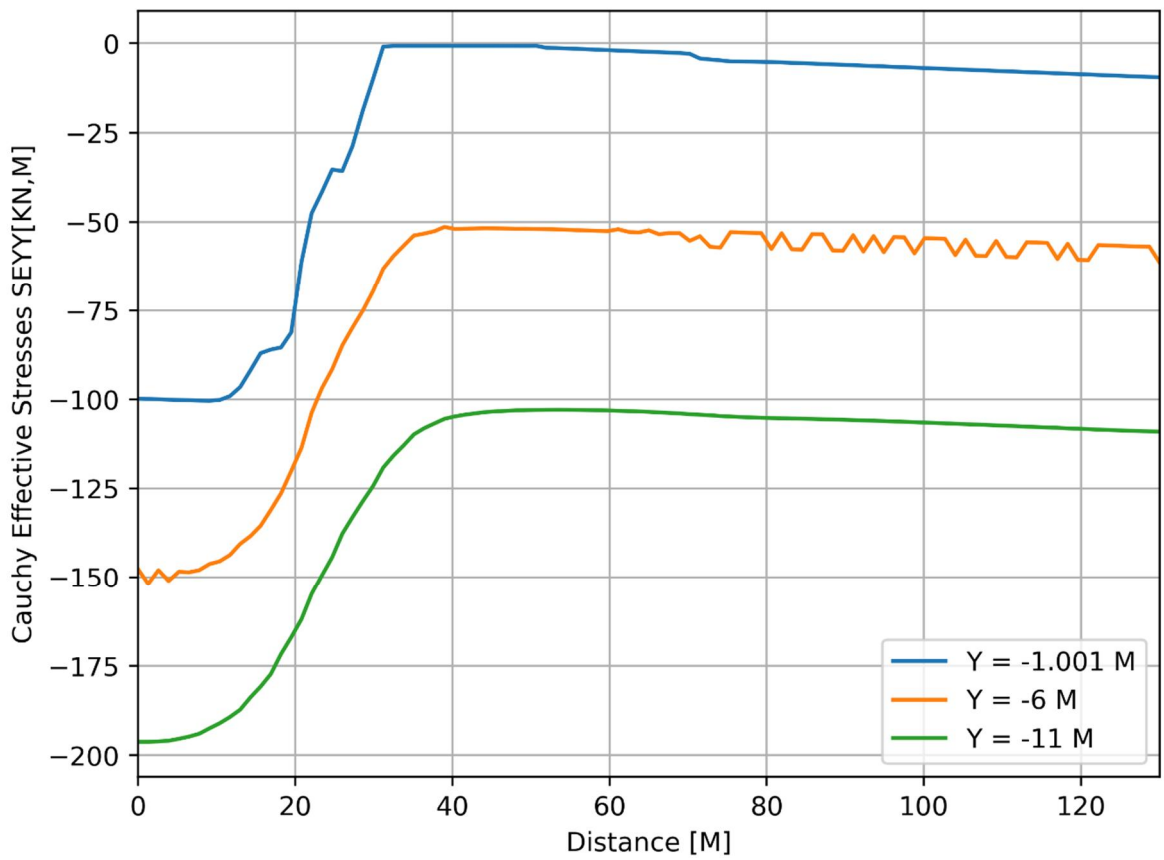
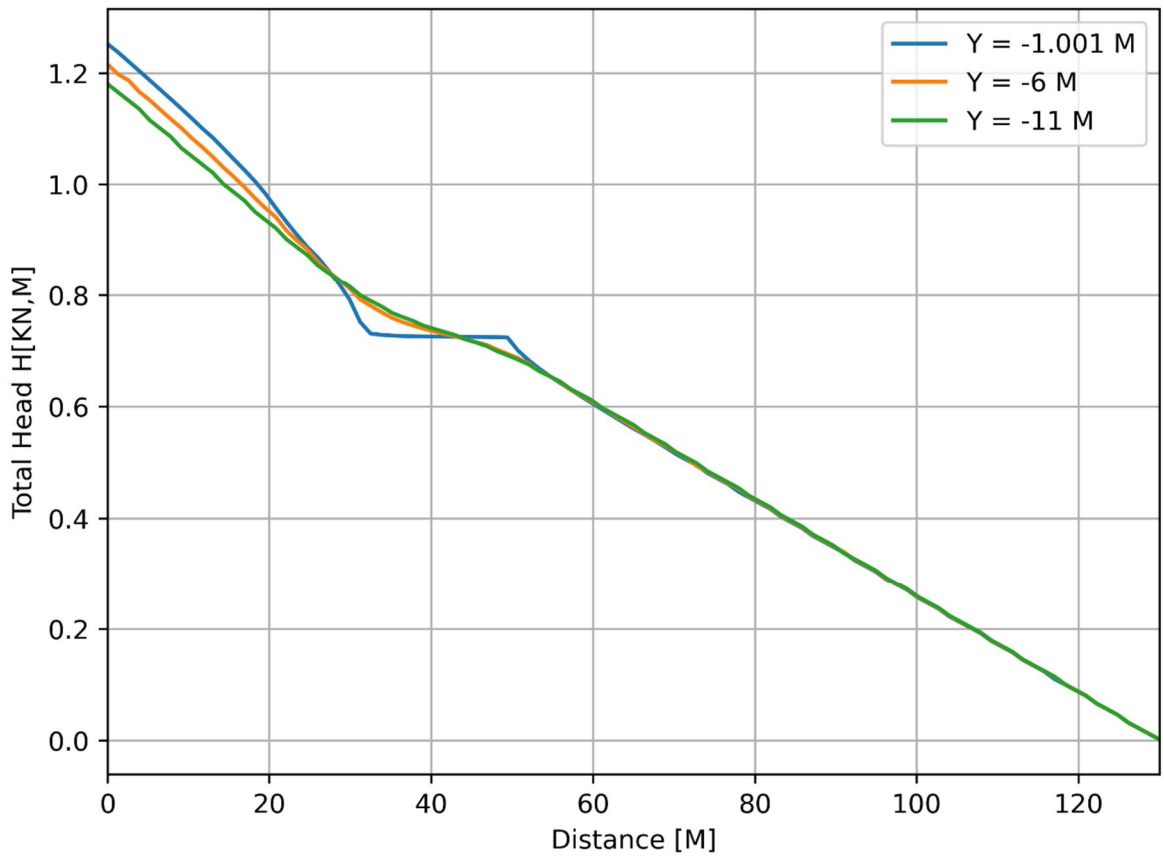


d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.03kN/m<sup>2</sup> max: 22.50kN/m<sup>2</sup>

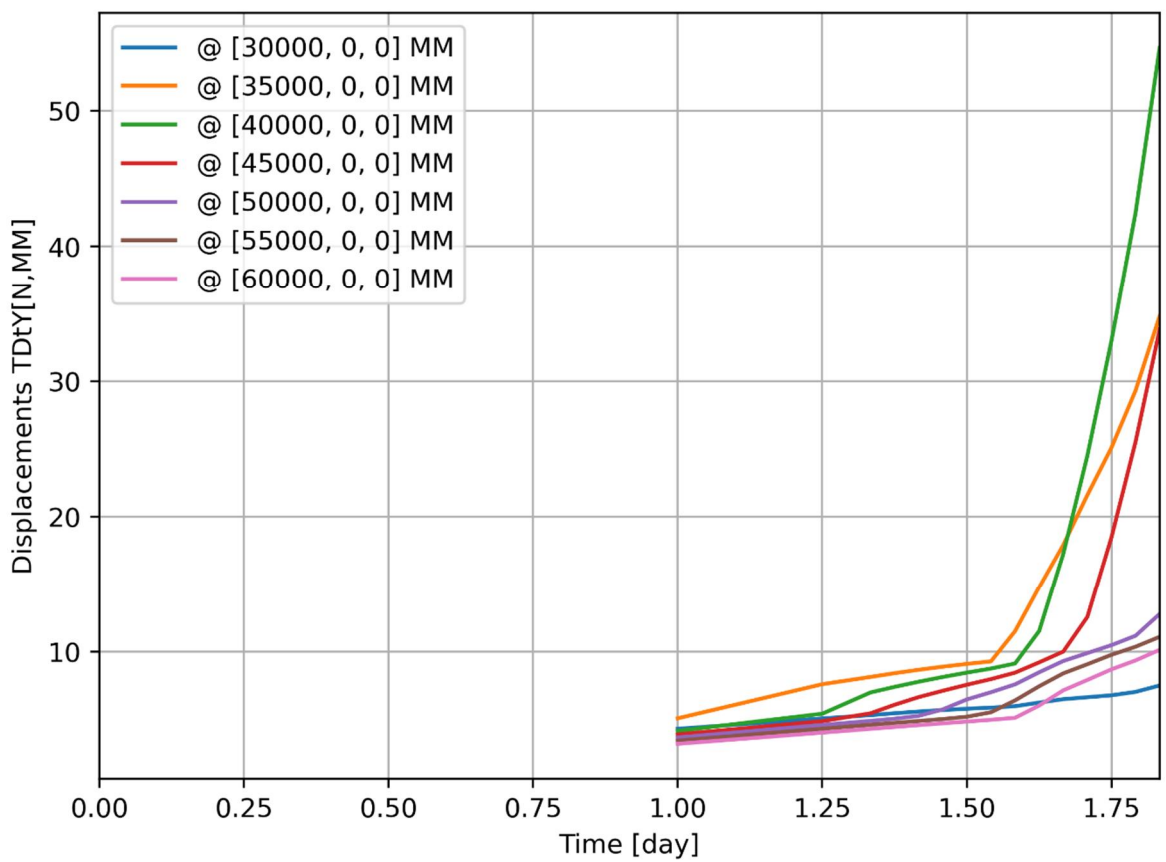
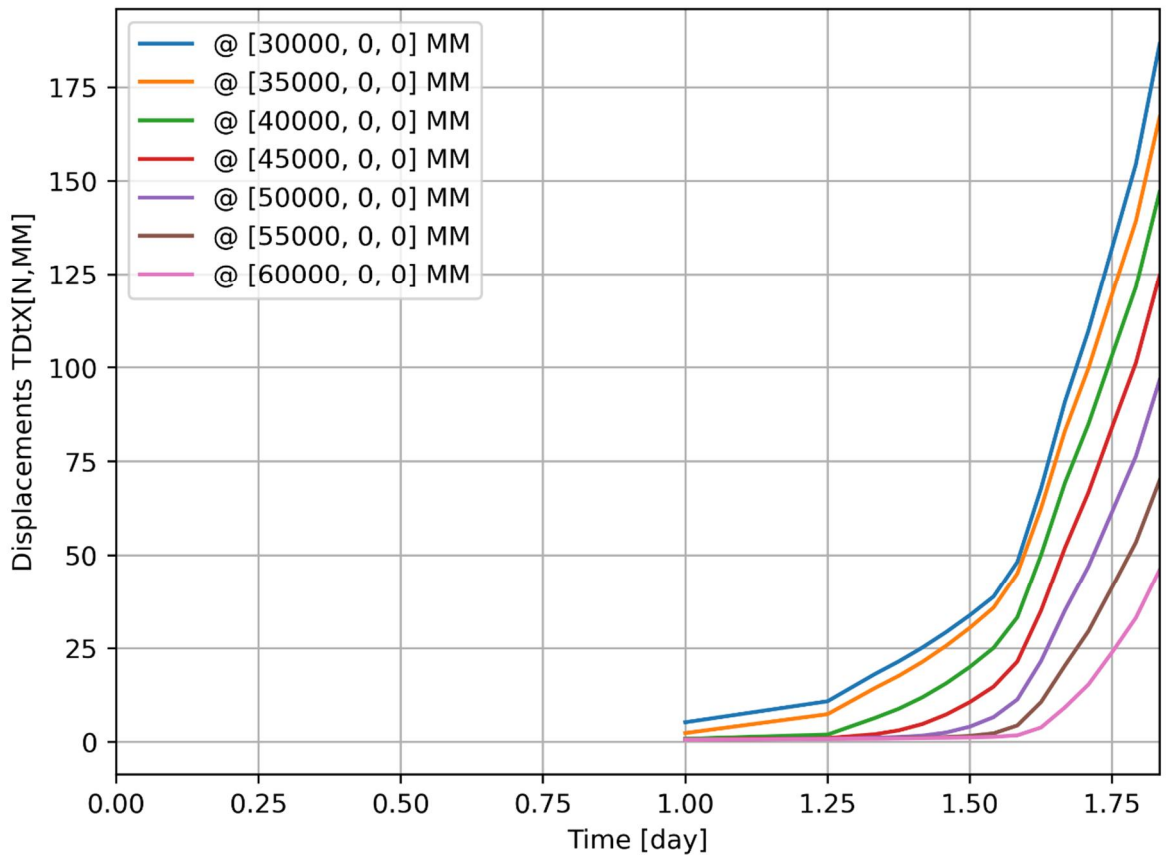


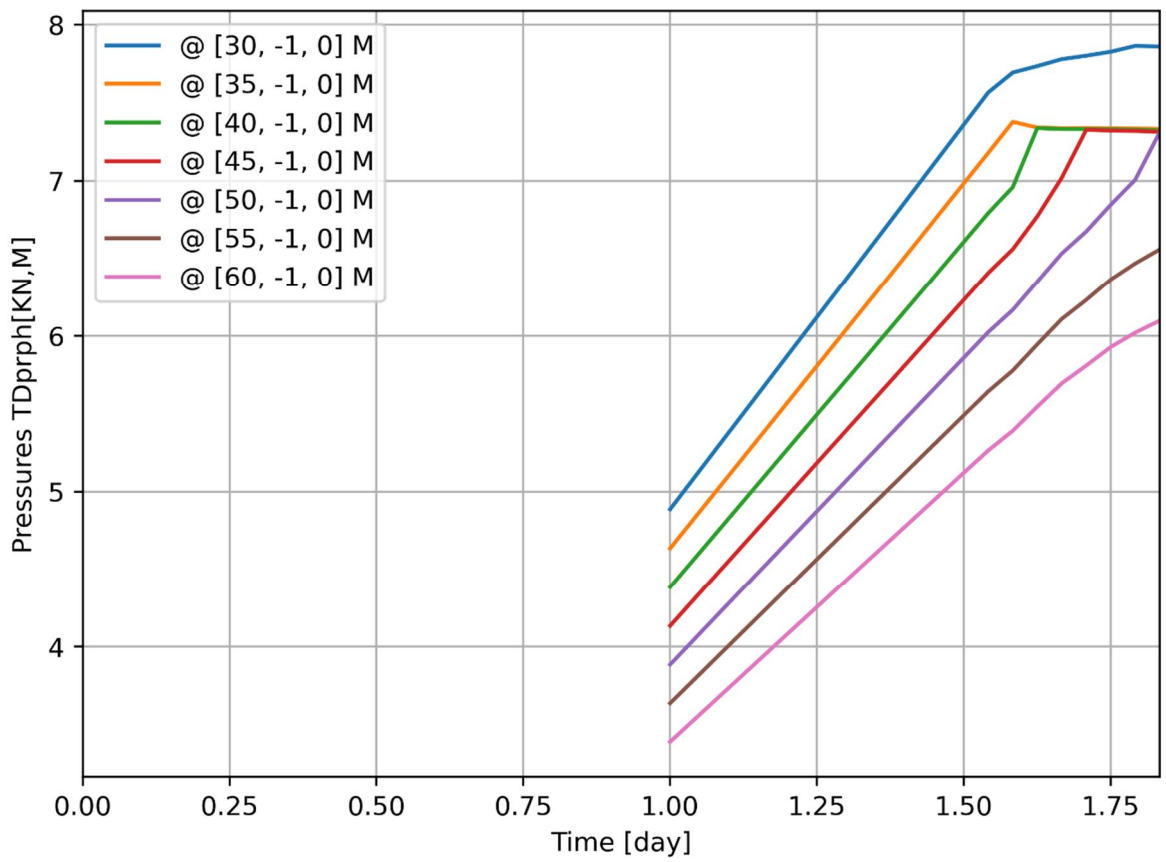
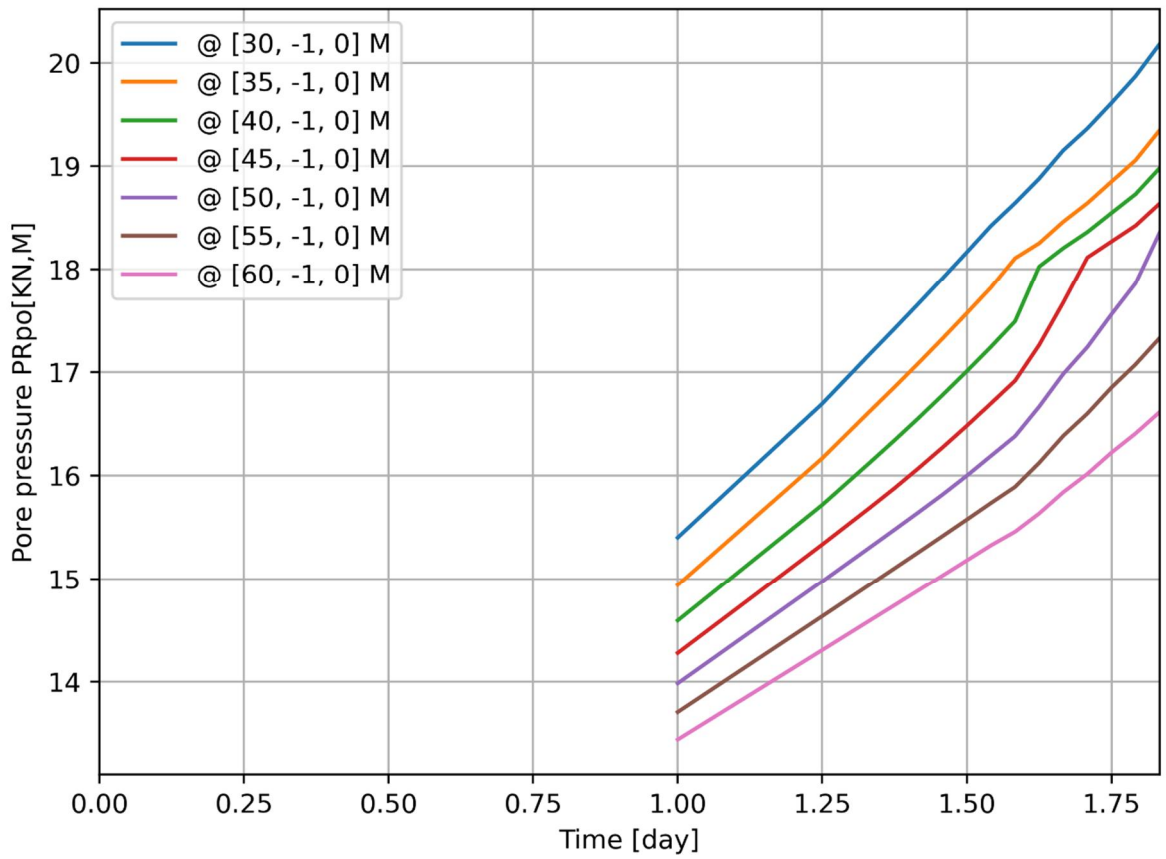
d=1\_c=13\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 21, Time 1 day 20 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -99.79kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

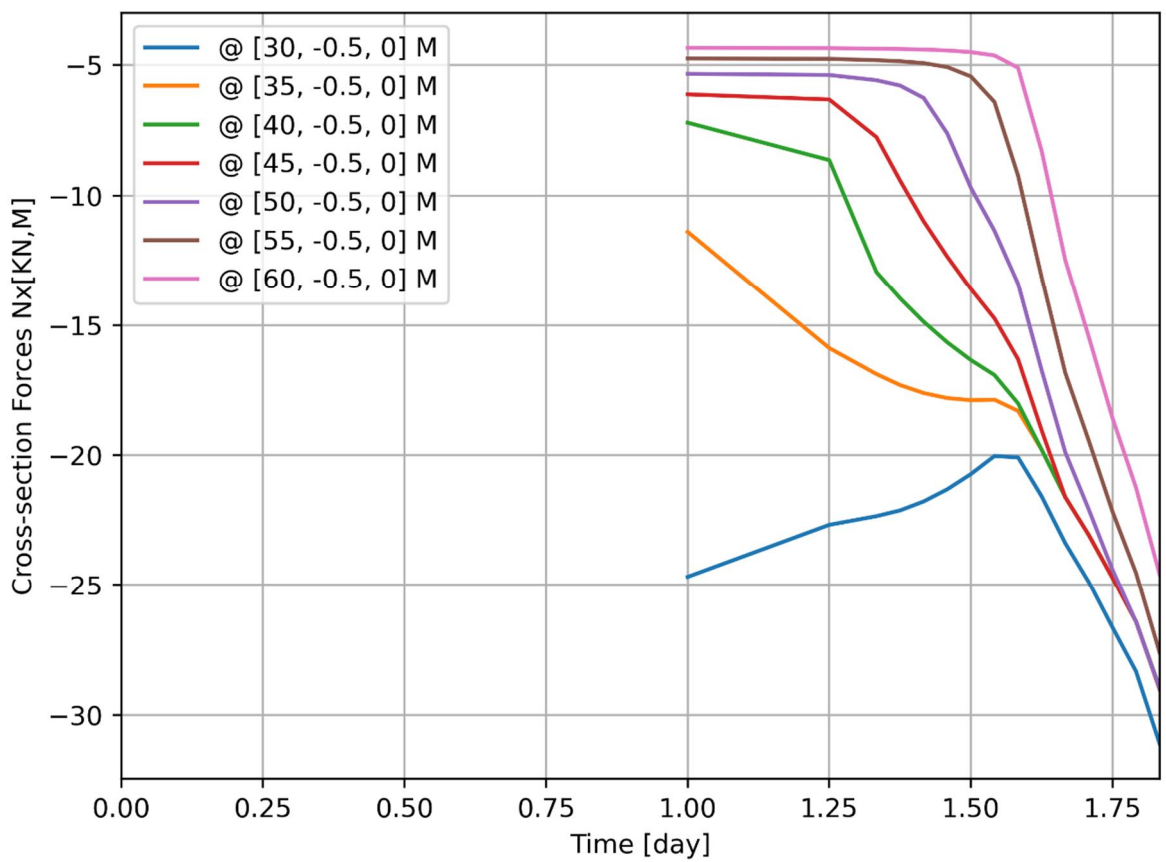
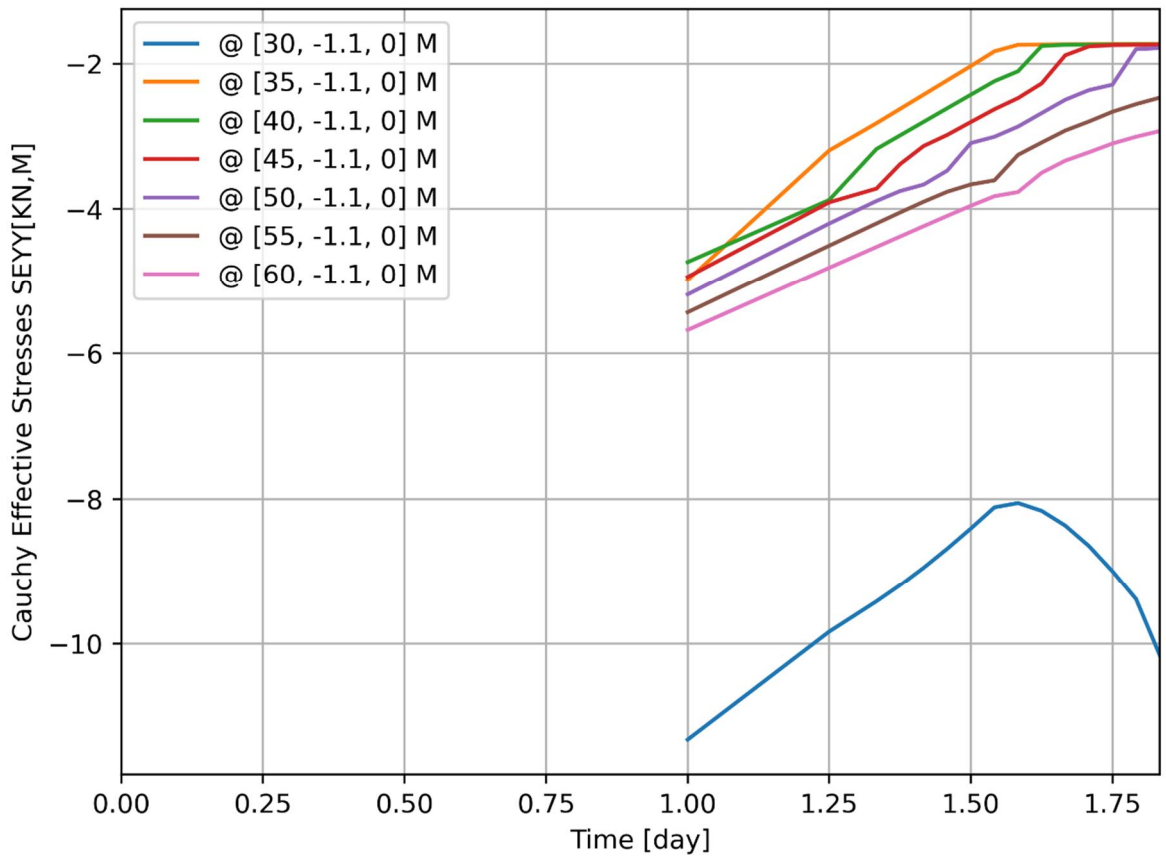


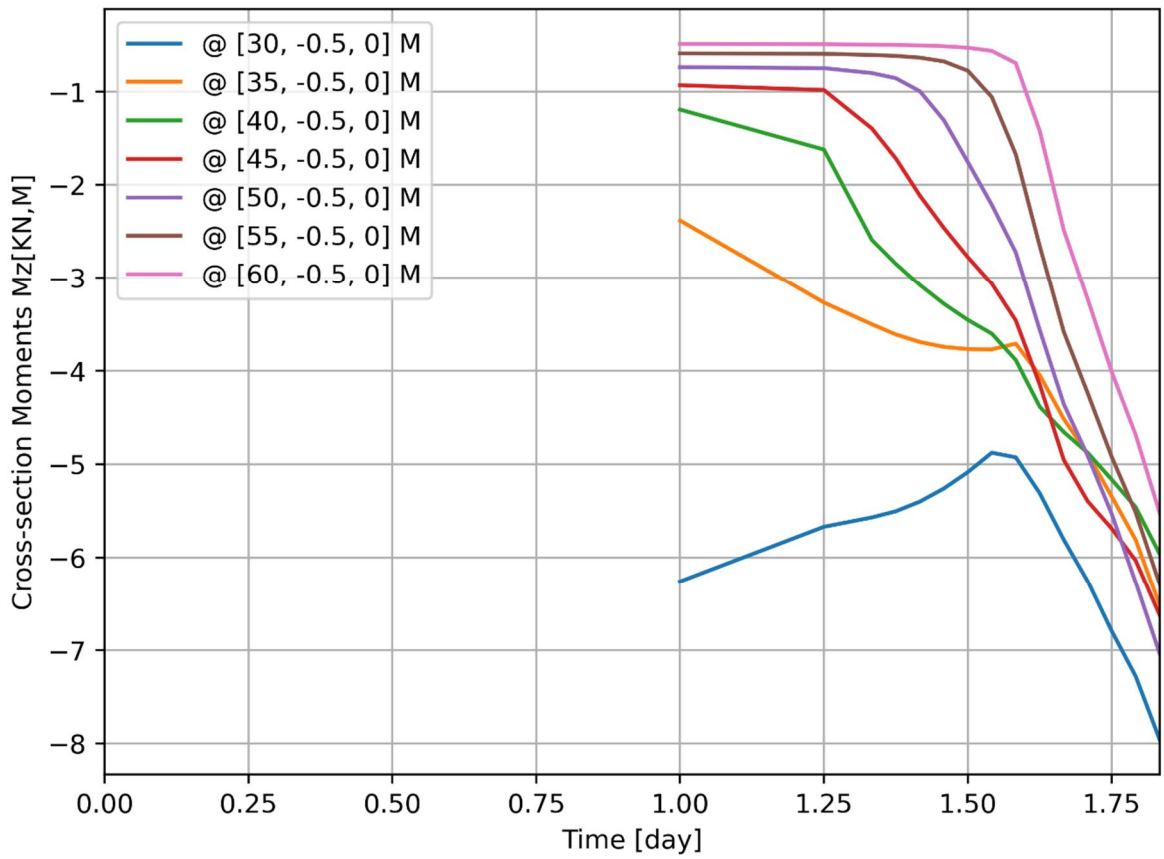








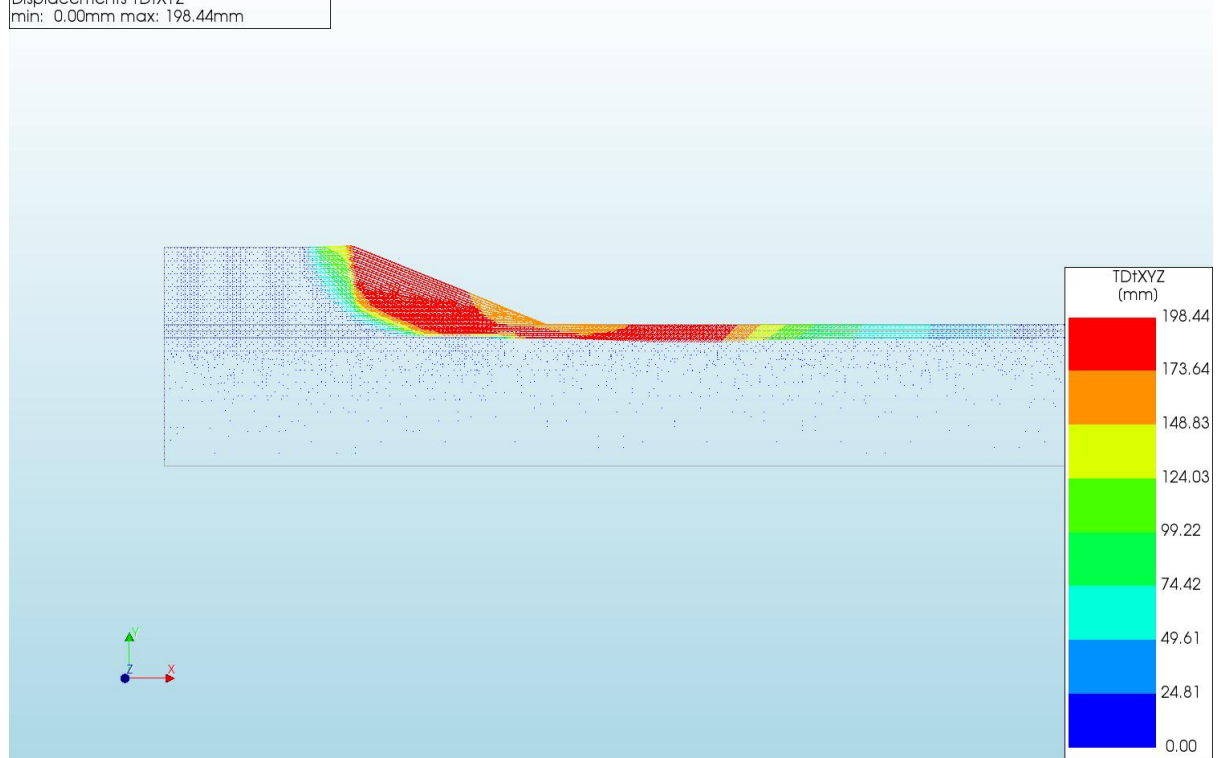




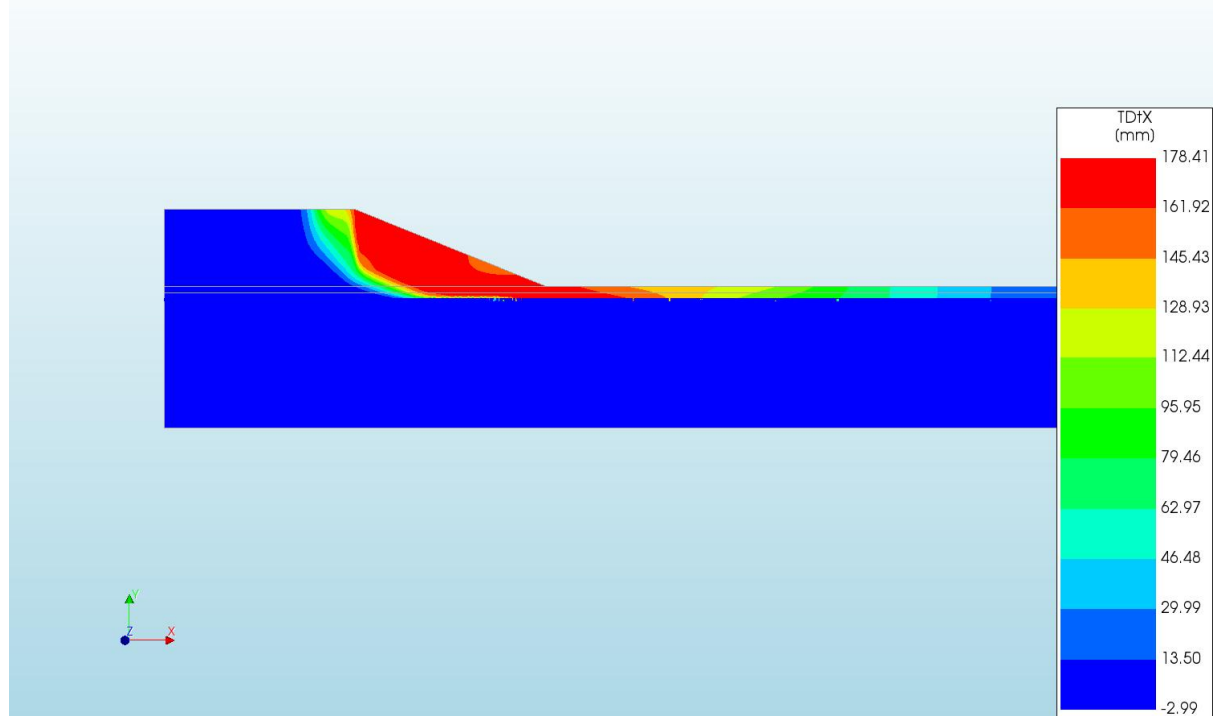
A.2.4

'Output\_d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

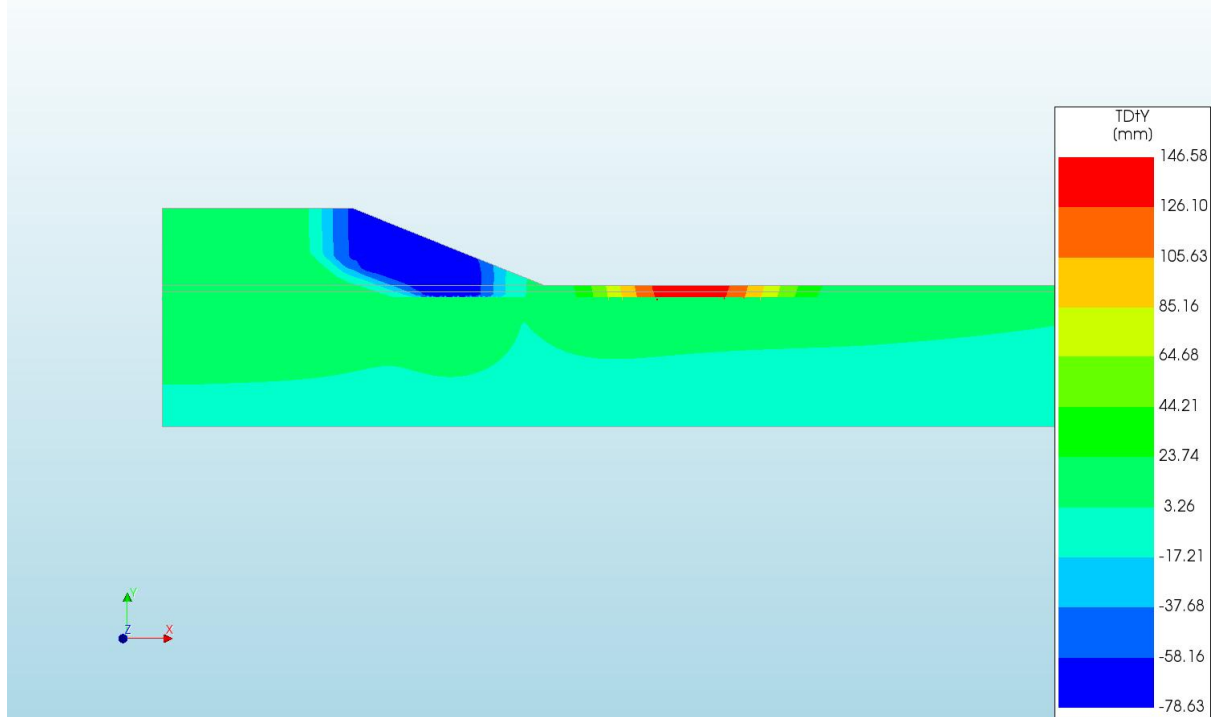
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Displacements TDiXYZ  
min: 0.00mm max: 198.44mm



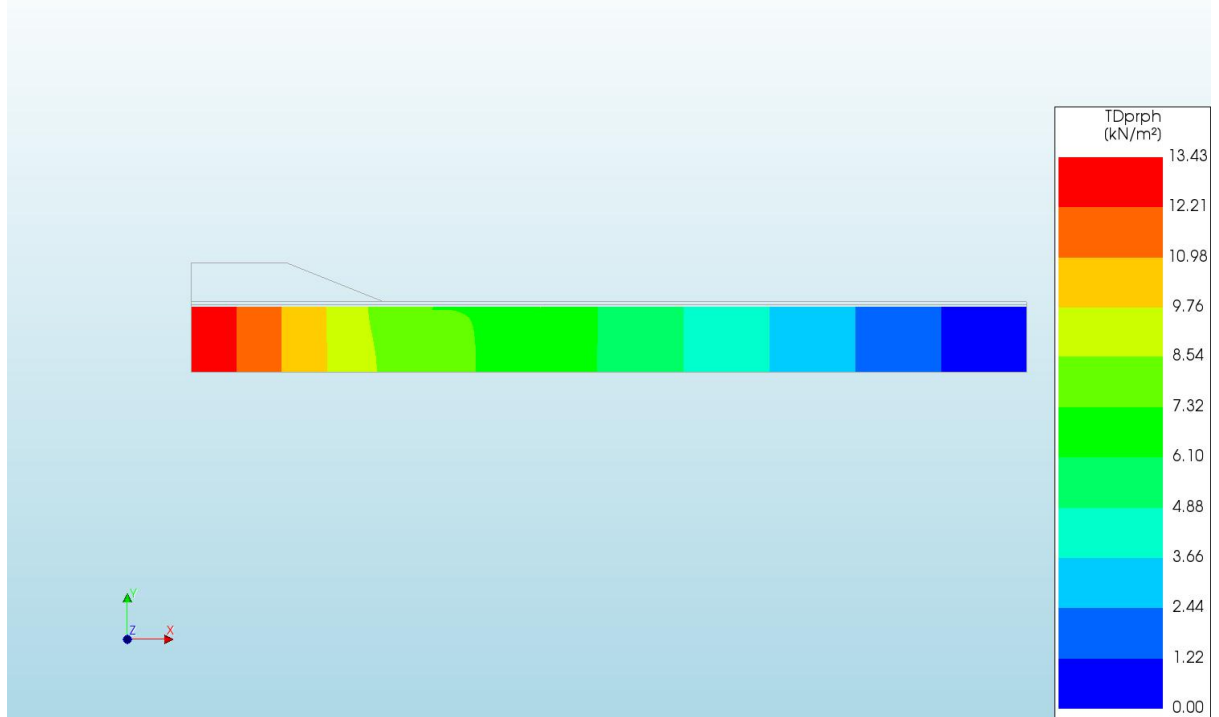
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Displacements TDfX  
min: -2.99mm max: 178.41mm



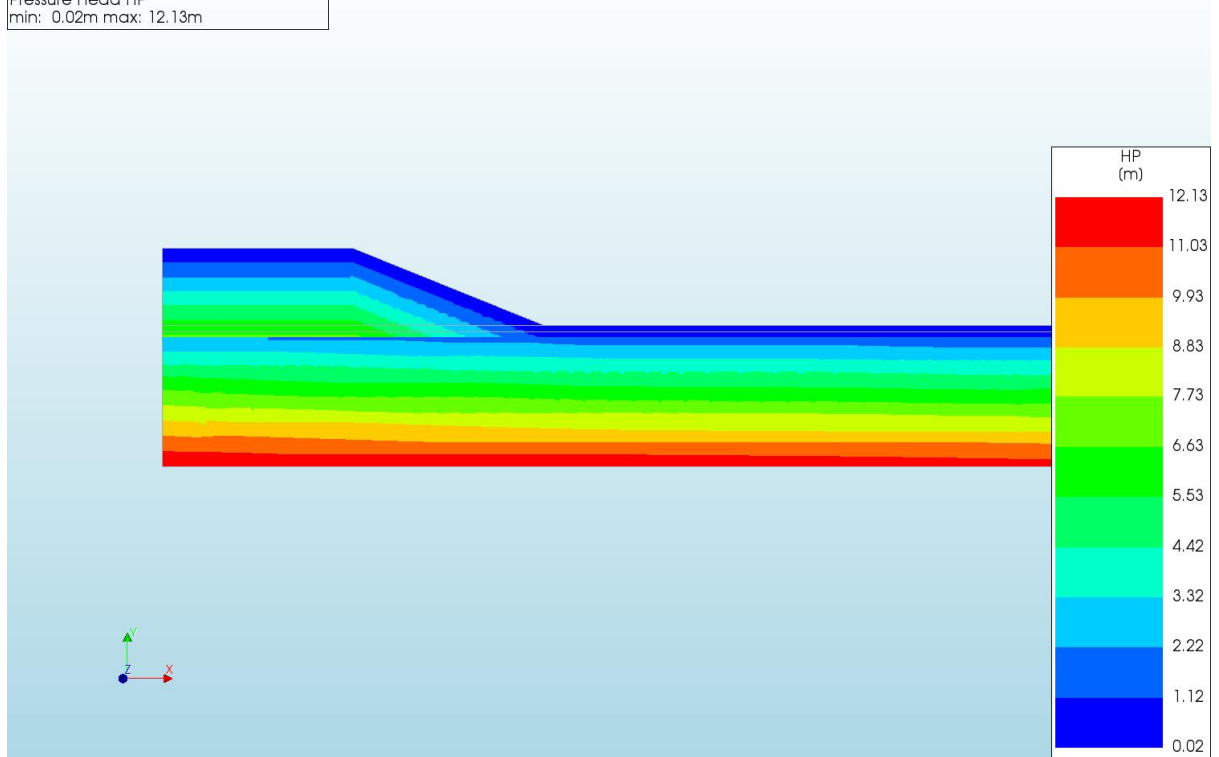
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
 Displacements TDtY  
 min: -78.63mm max: 146.58mm



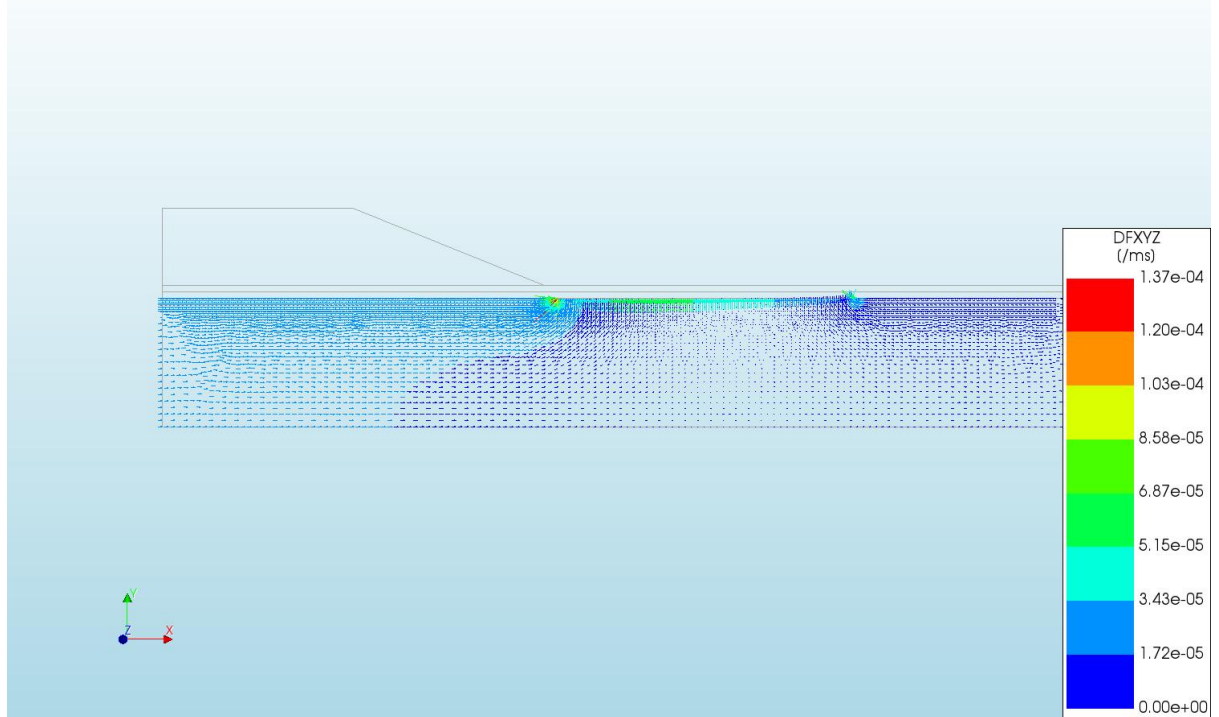
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
 Pressures TDprph  
 min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 13.43kN/m<sup>2</sup>



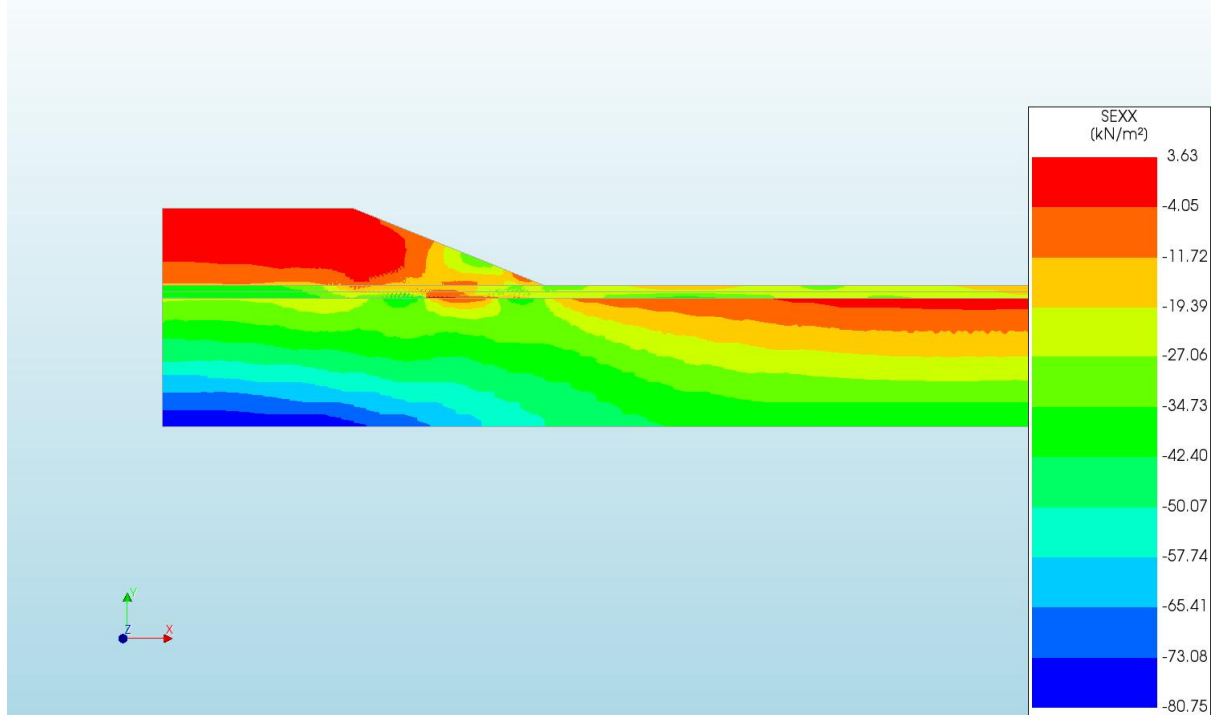
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.13m



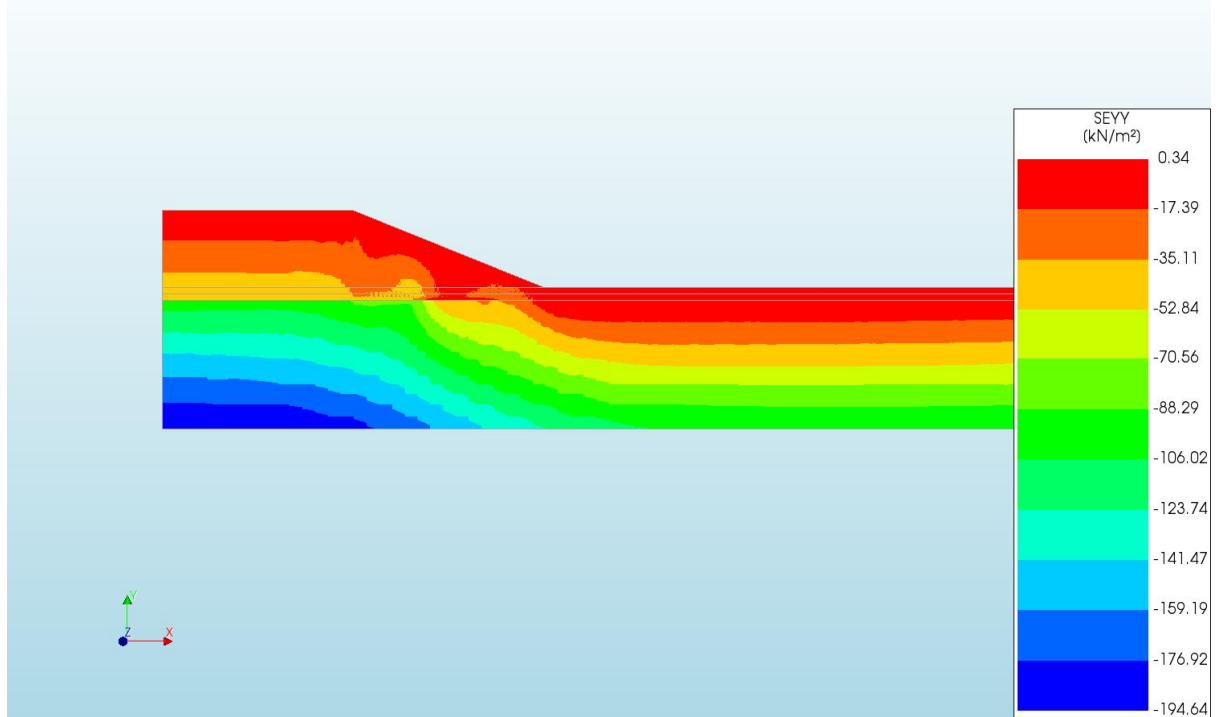
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.37e-04/ms



d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -80.75kN/m<sup>2</sup> max: 3.63kN/m<sup>2</sup>

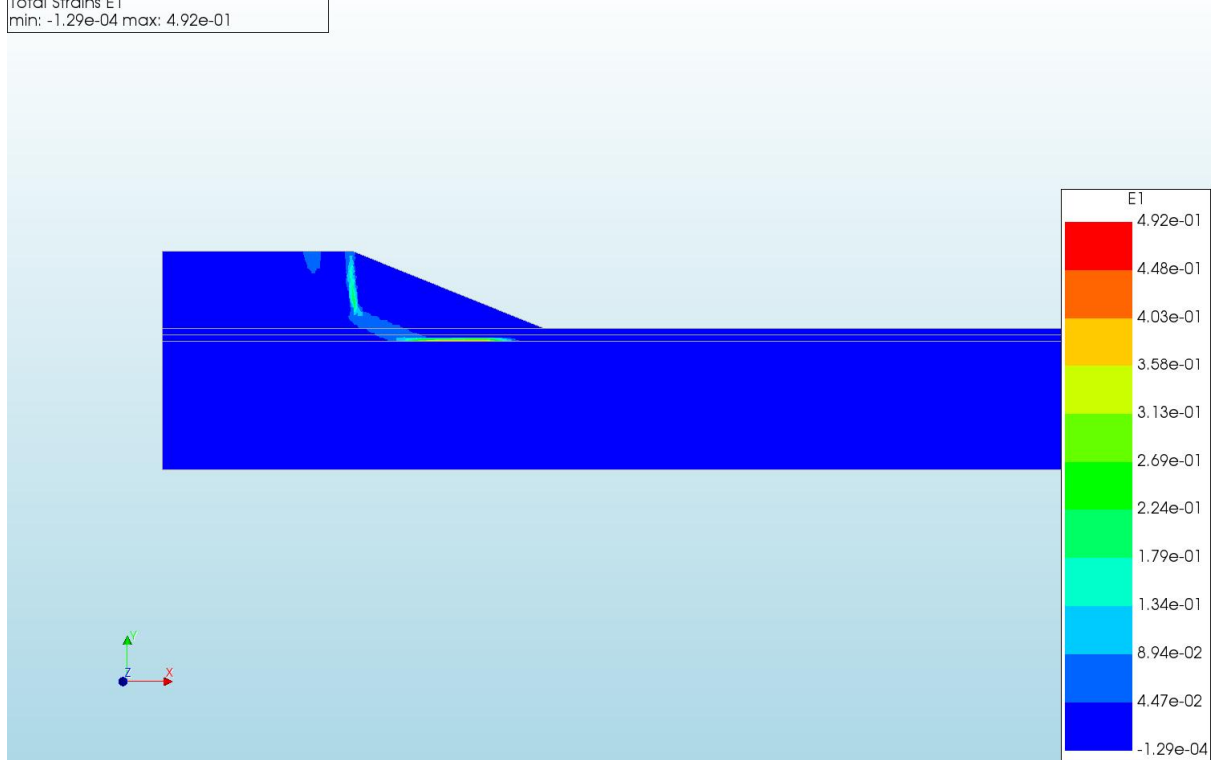


d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -194.64kN/m<sup>2</sup> max: 0.34kN/m<sup>2</sup>





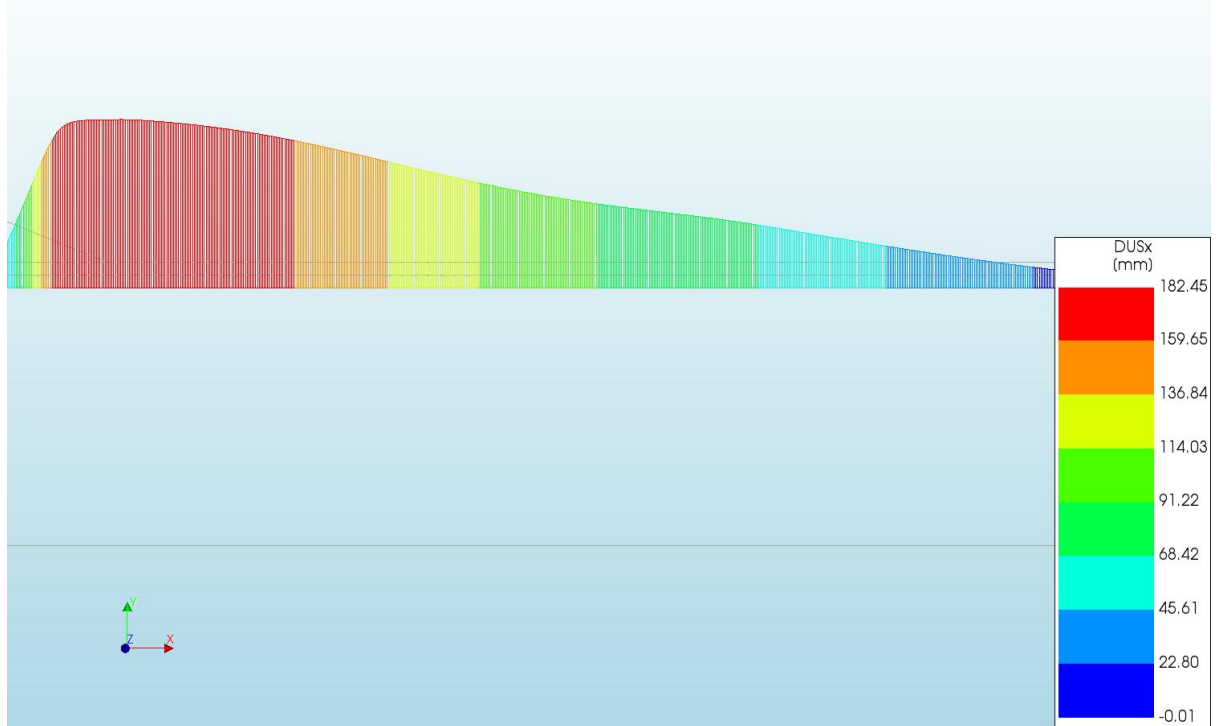
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Total Strains E1  
min: -1.29e-04 max: 4.92e-01



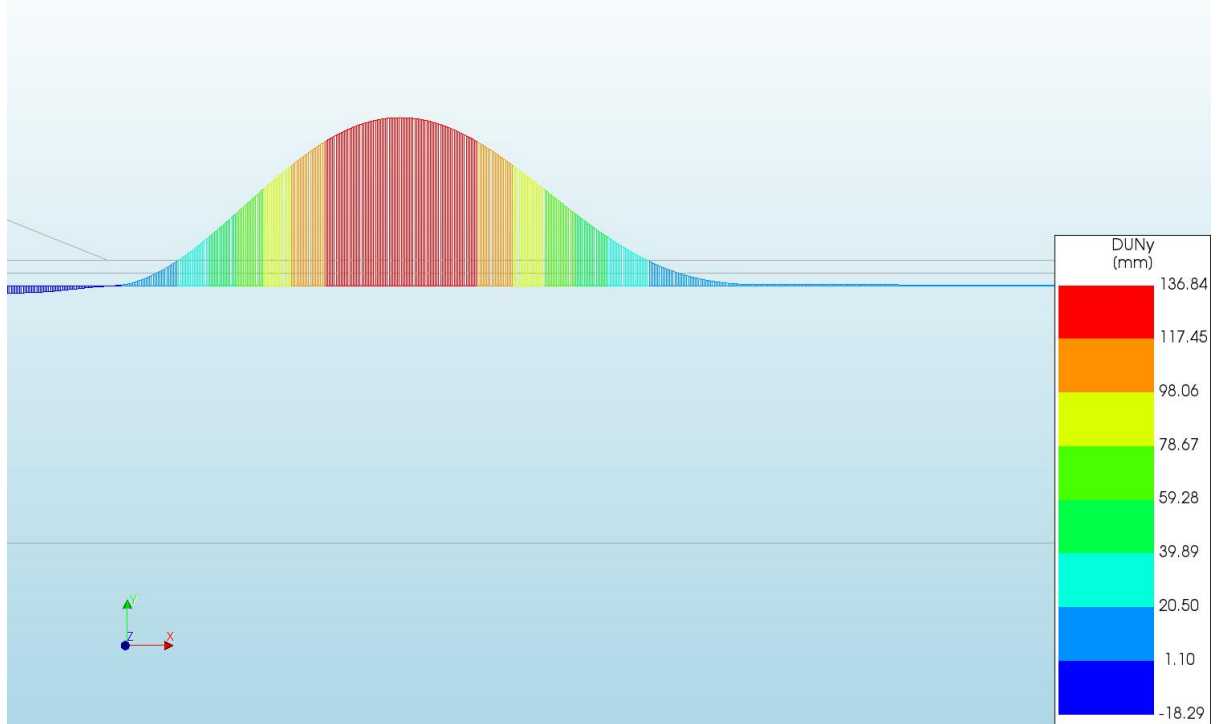
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.13e-01



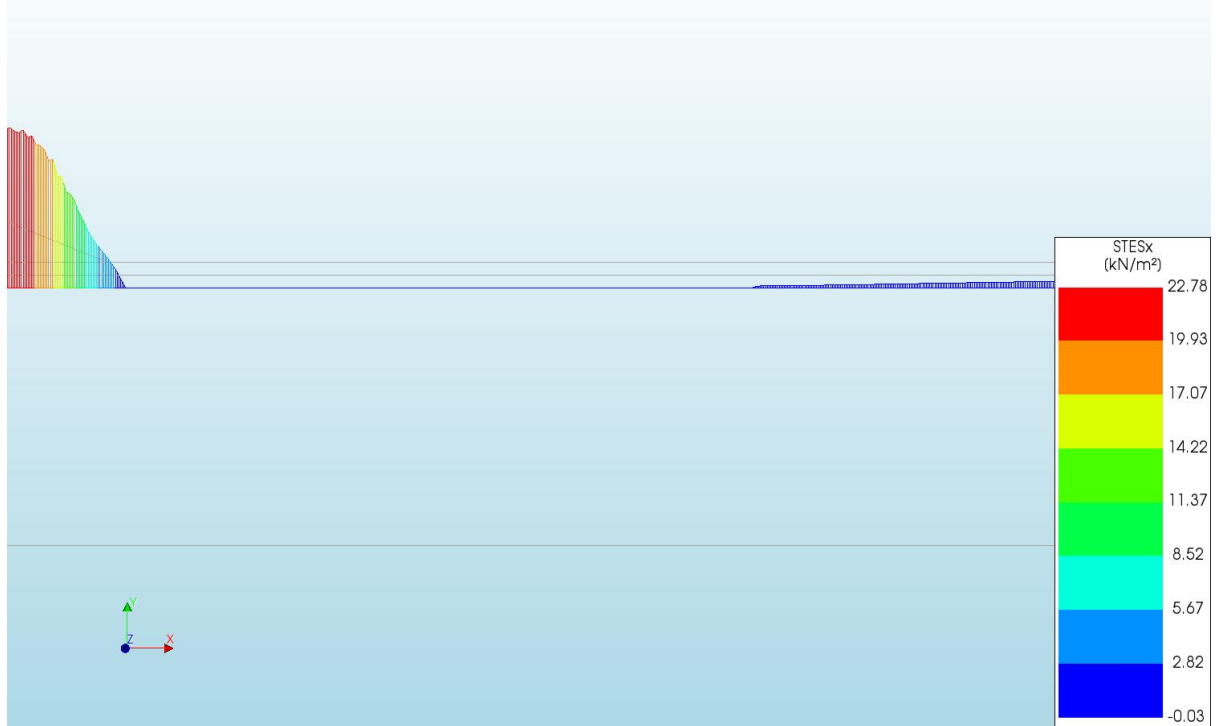
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 182.45mm



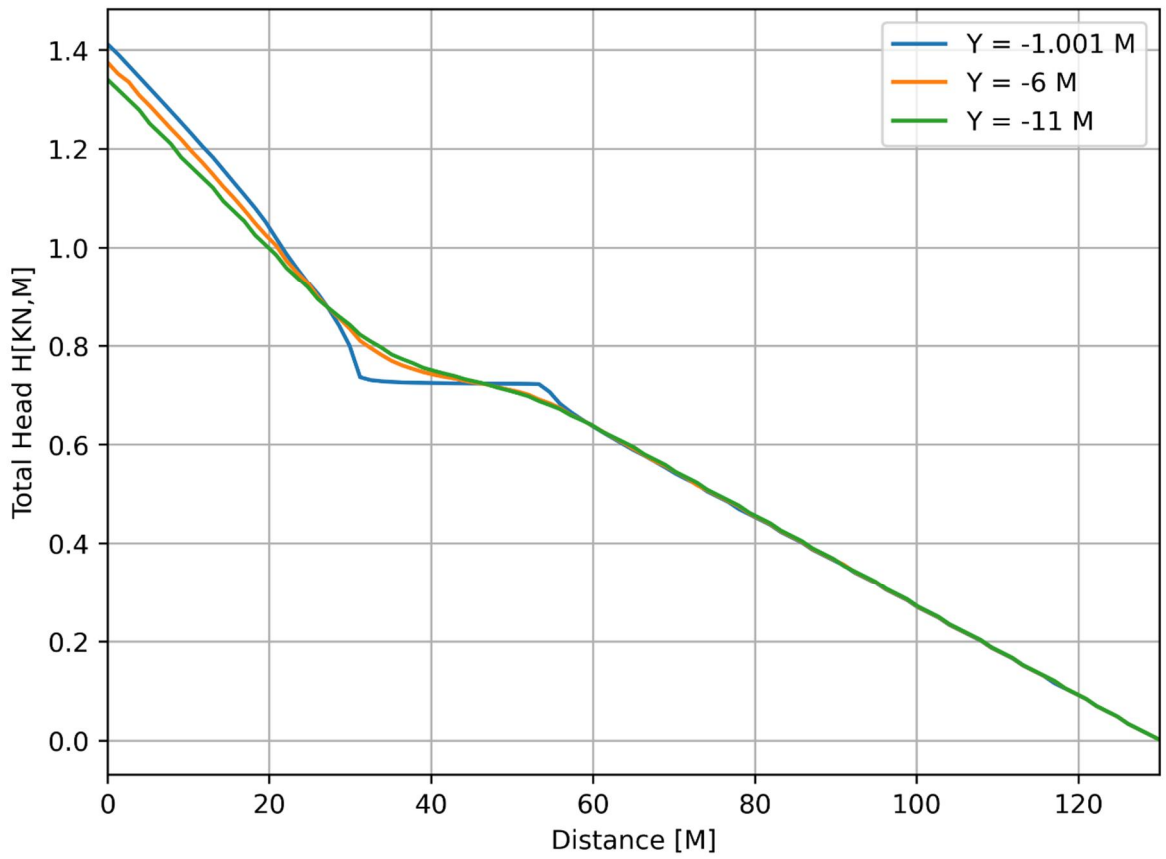
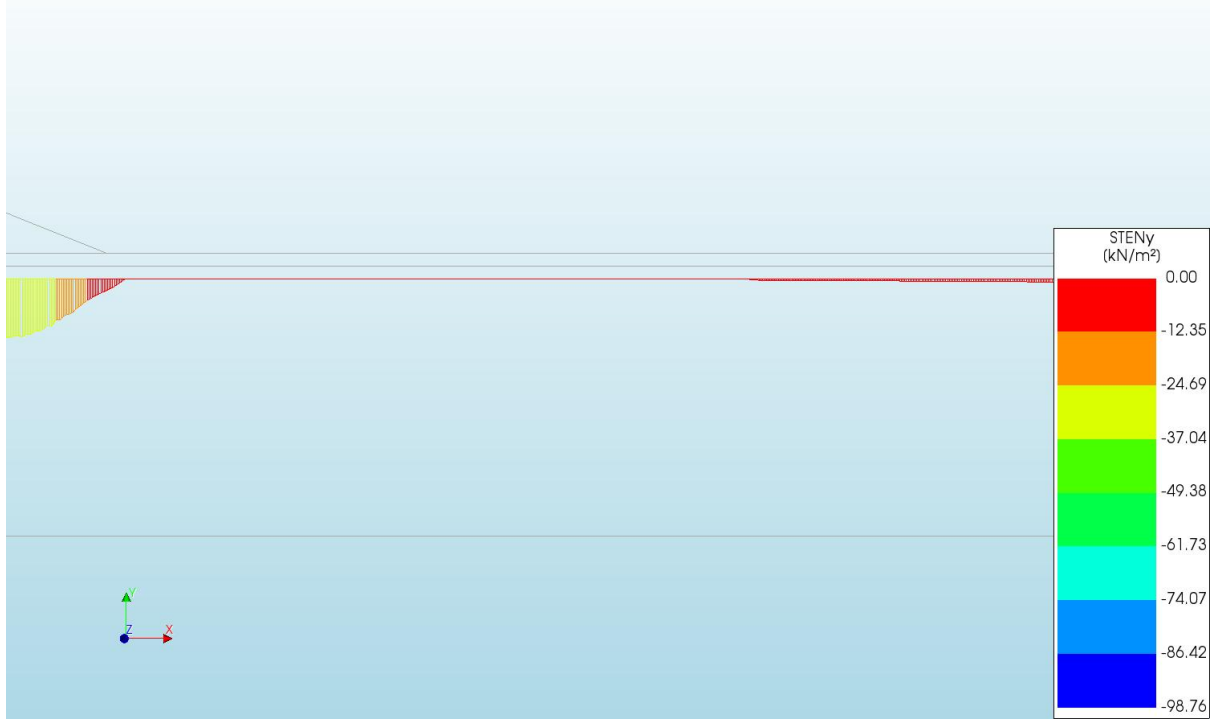
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -18.29mm max: 136.84mm

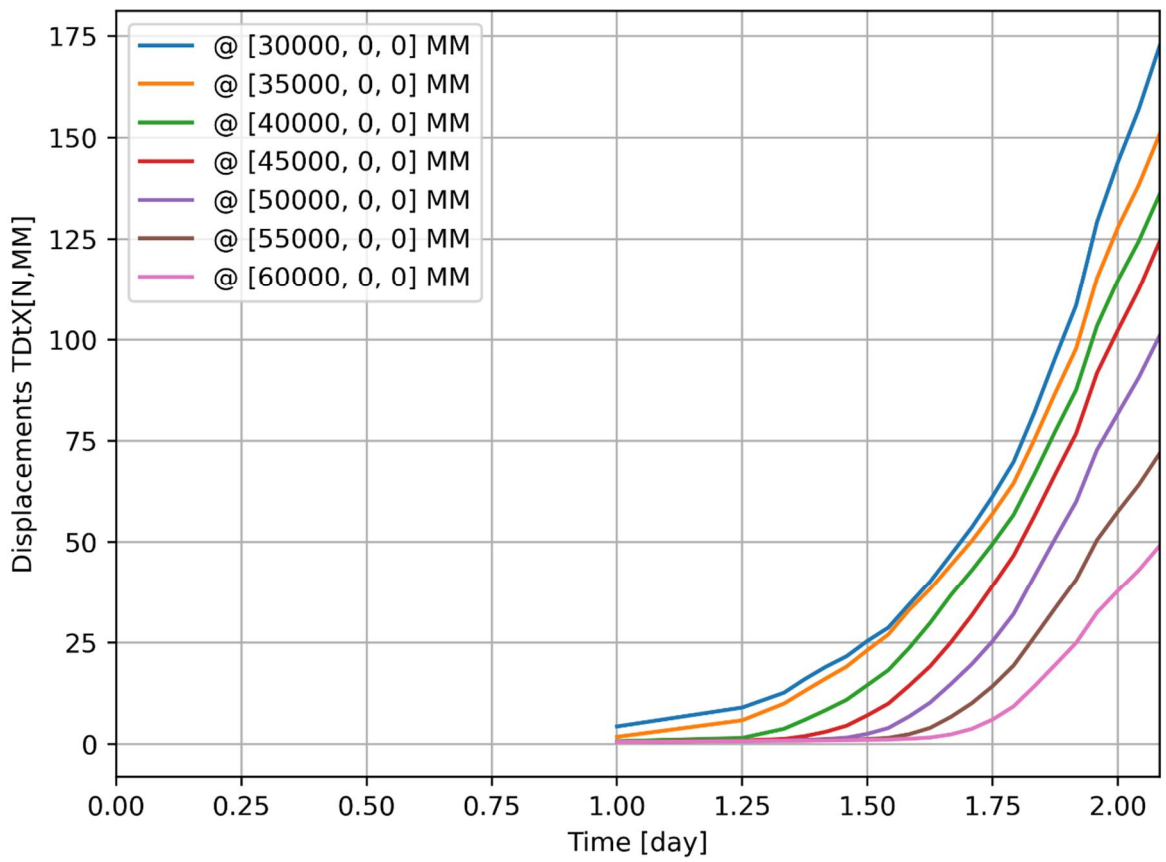
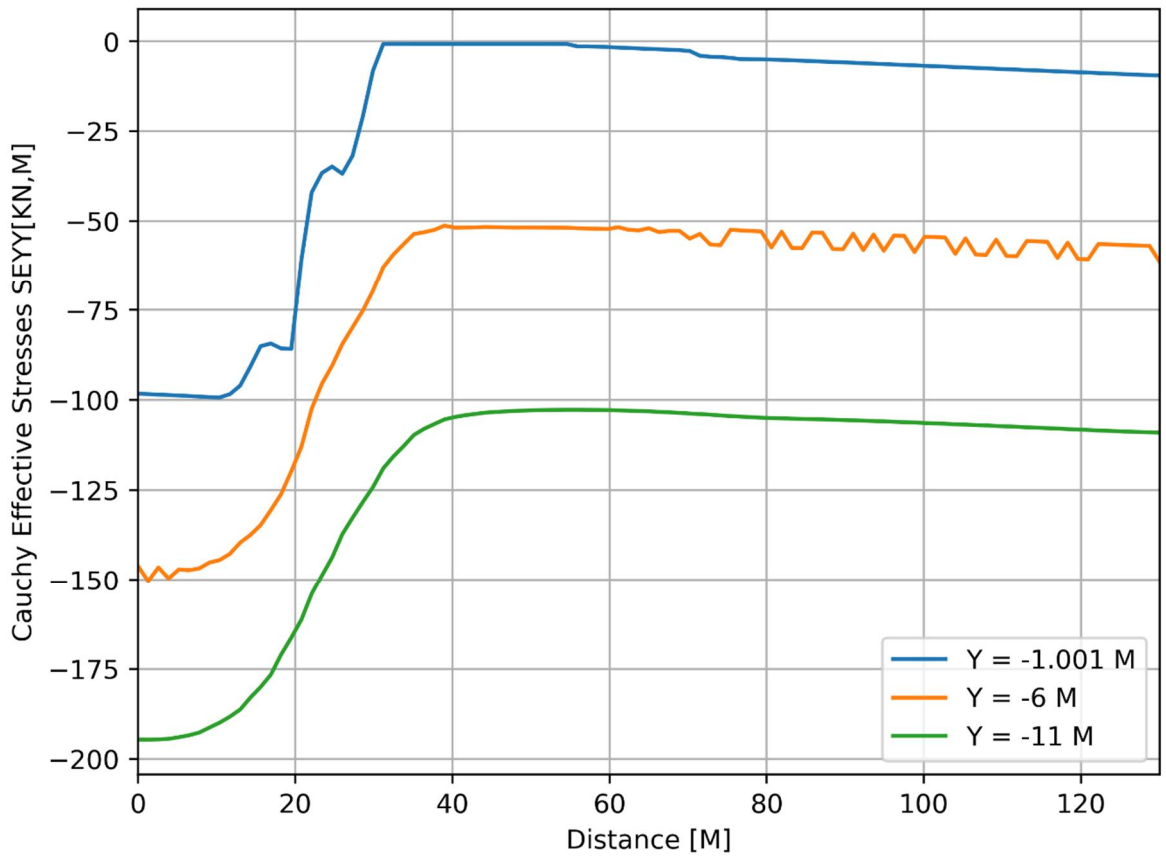


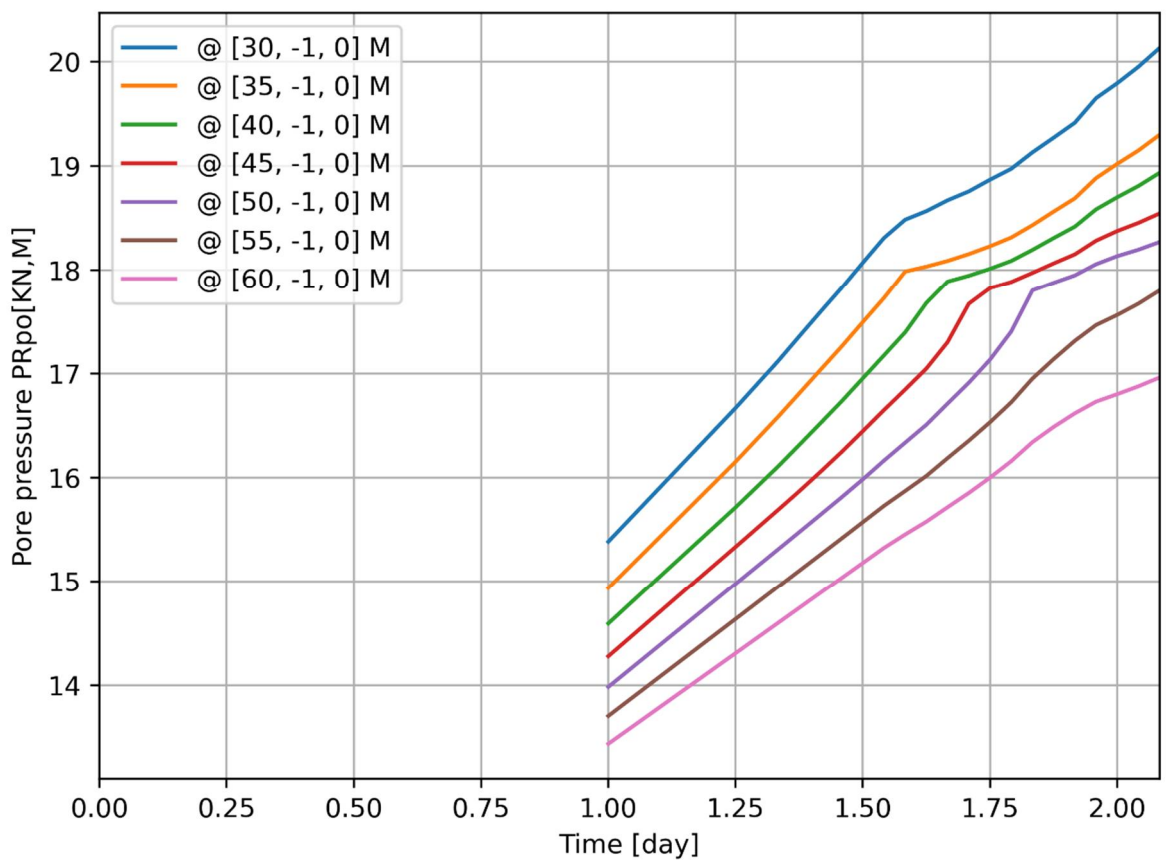
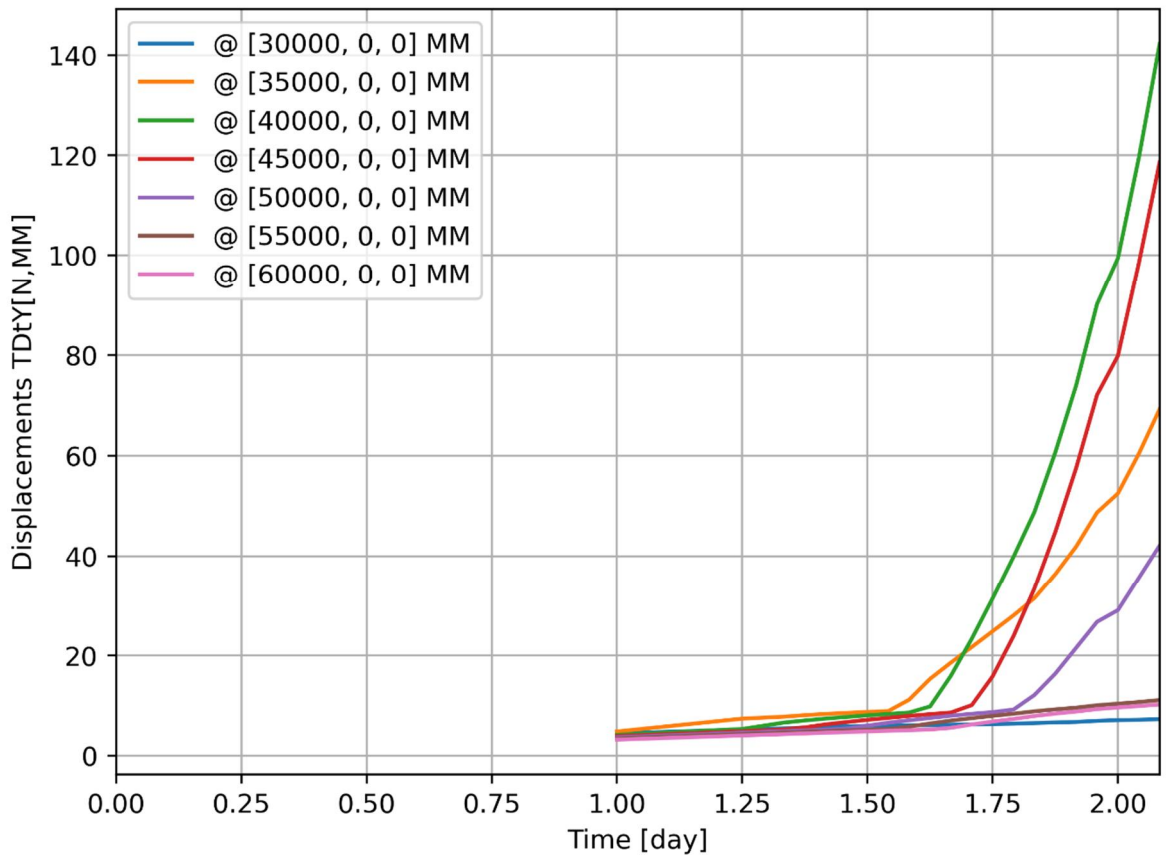
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.03kN/m<sup>2</sup> max: 22.78kN/m<sup>2</sup>

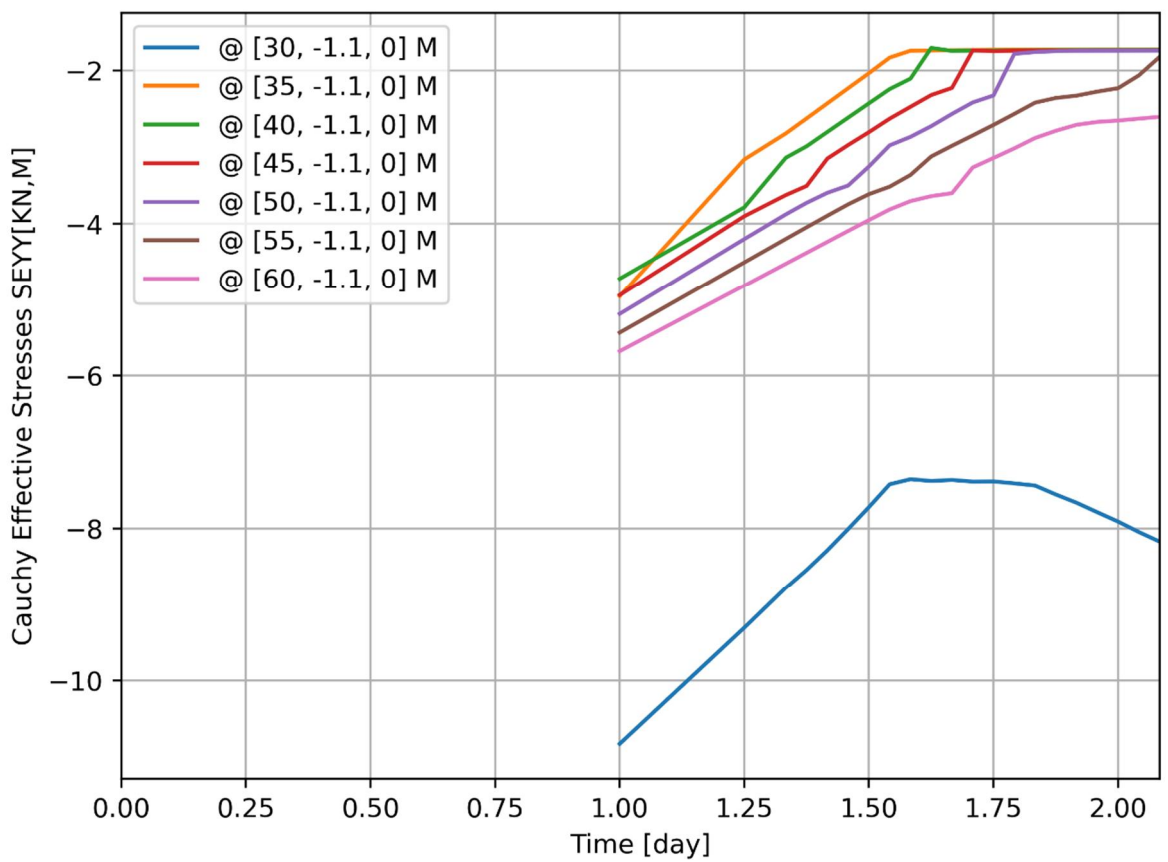
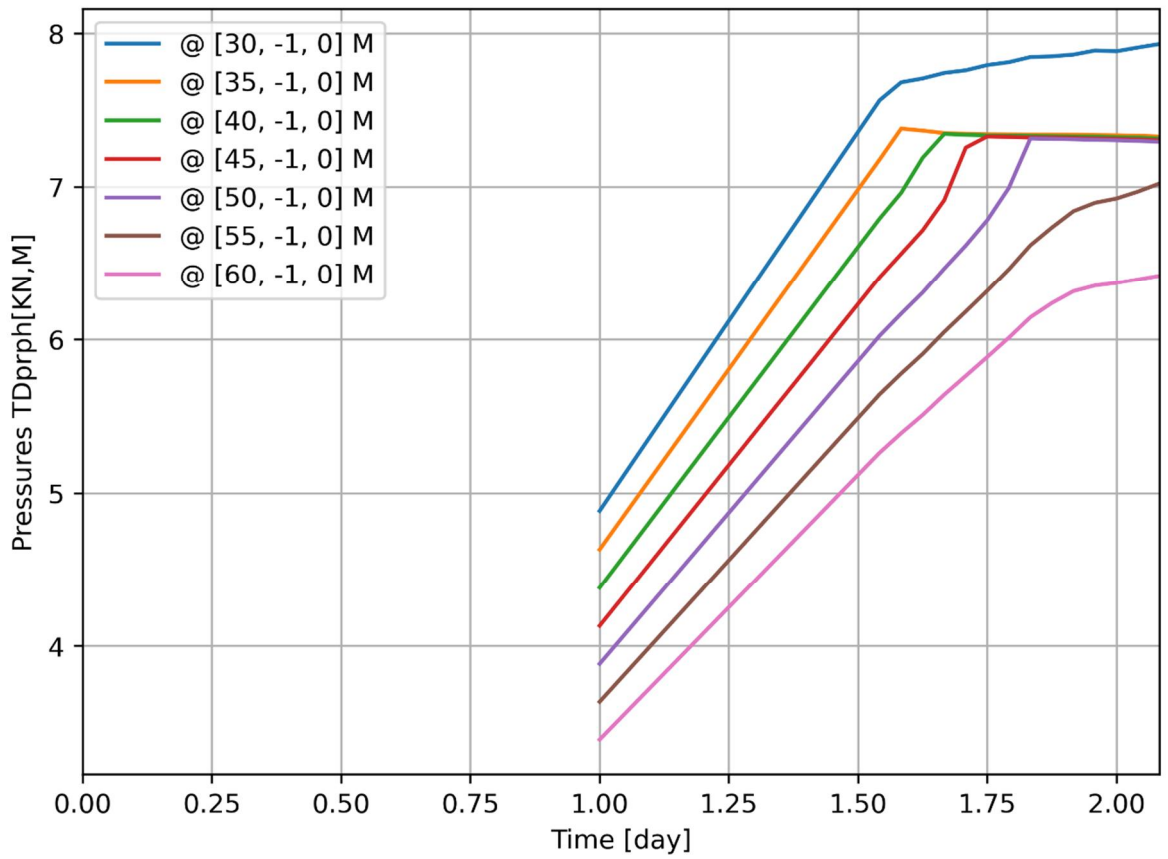


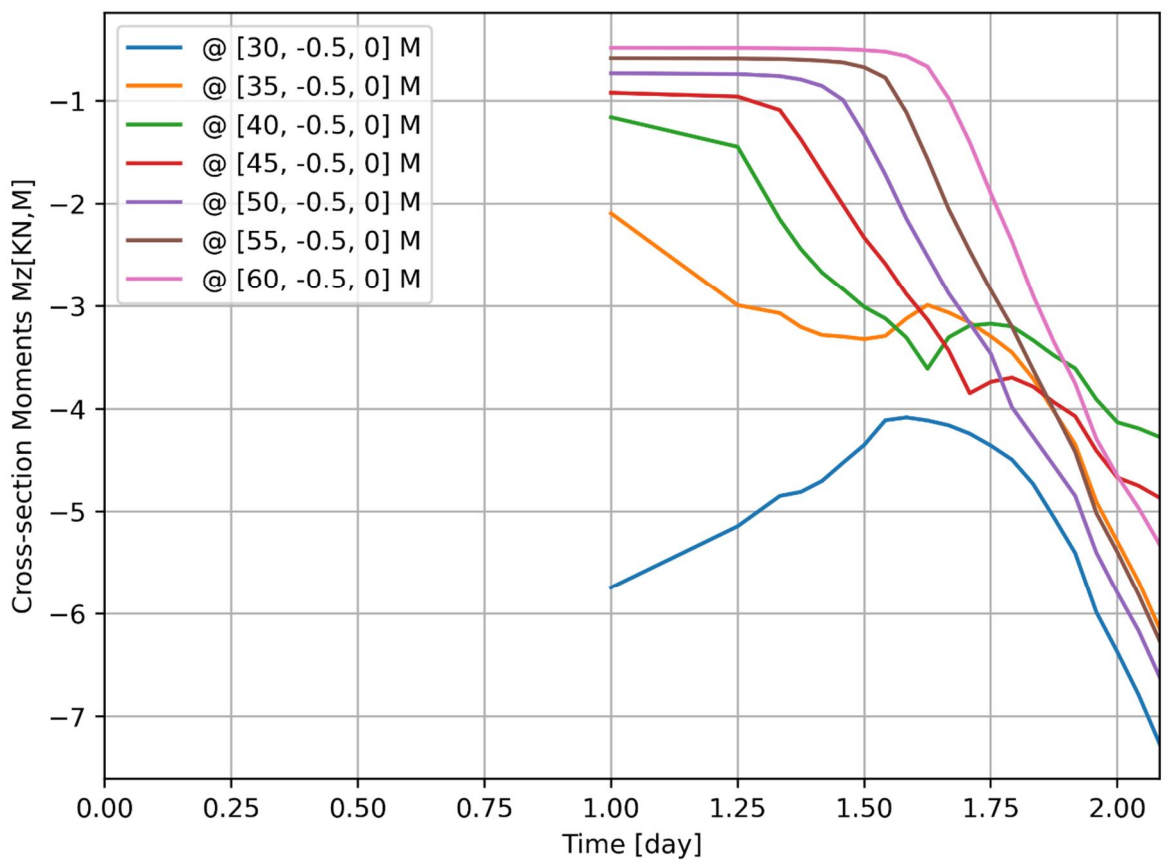
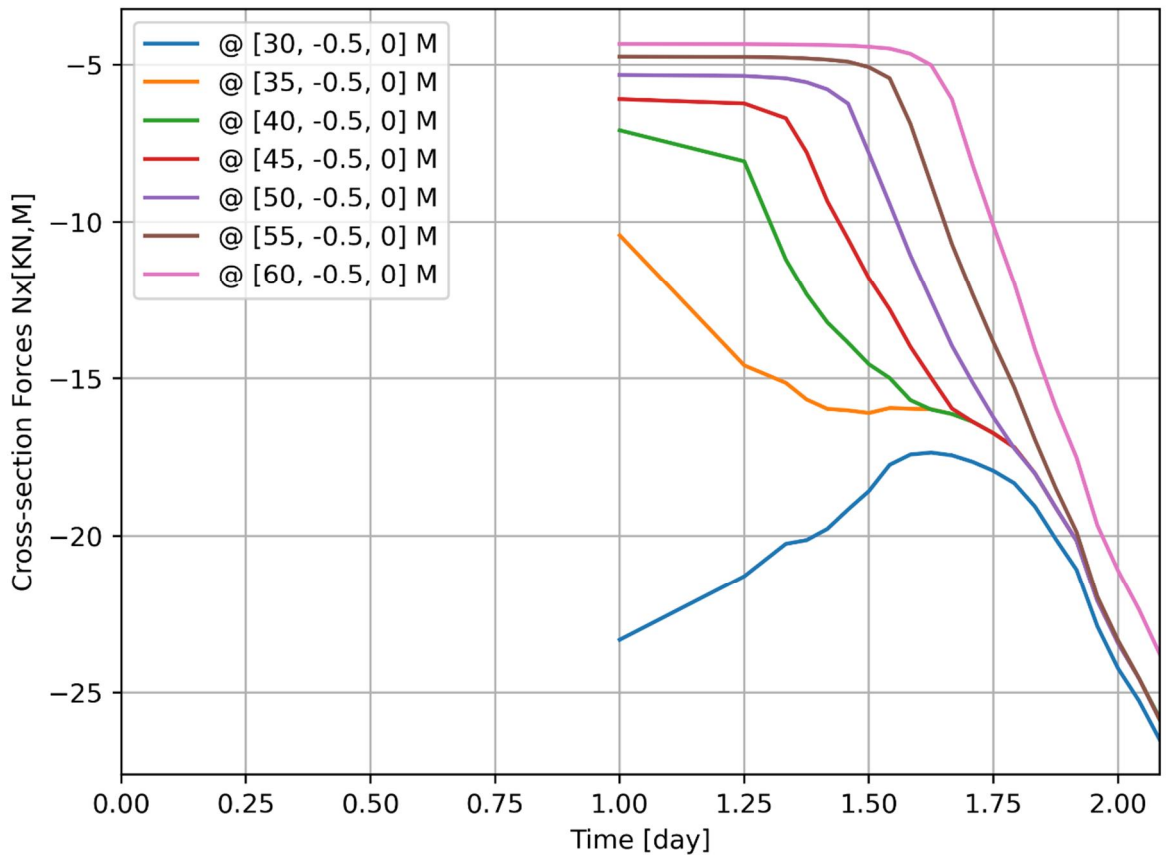
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -98.76kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>









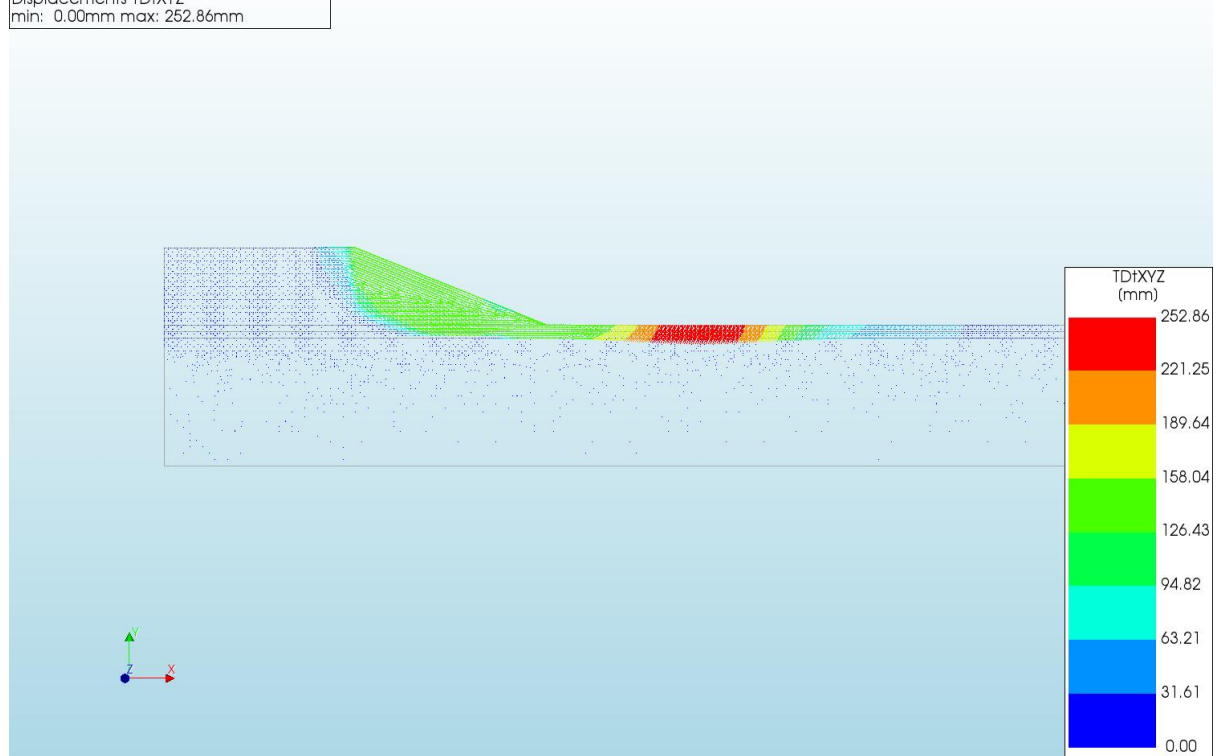




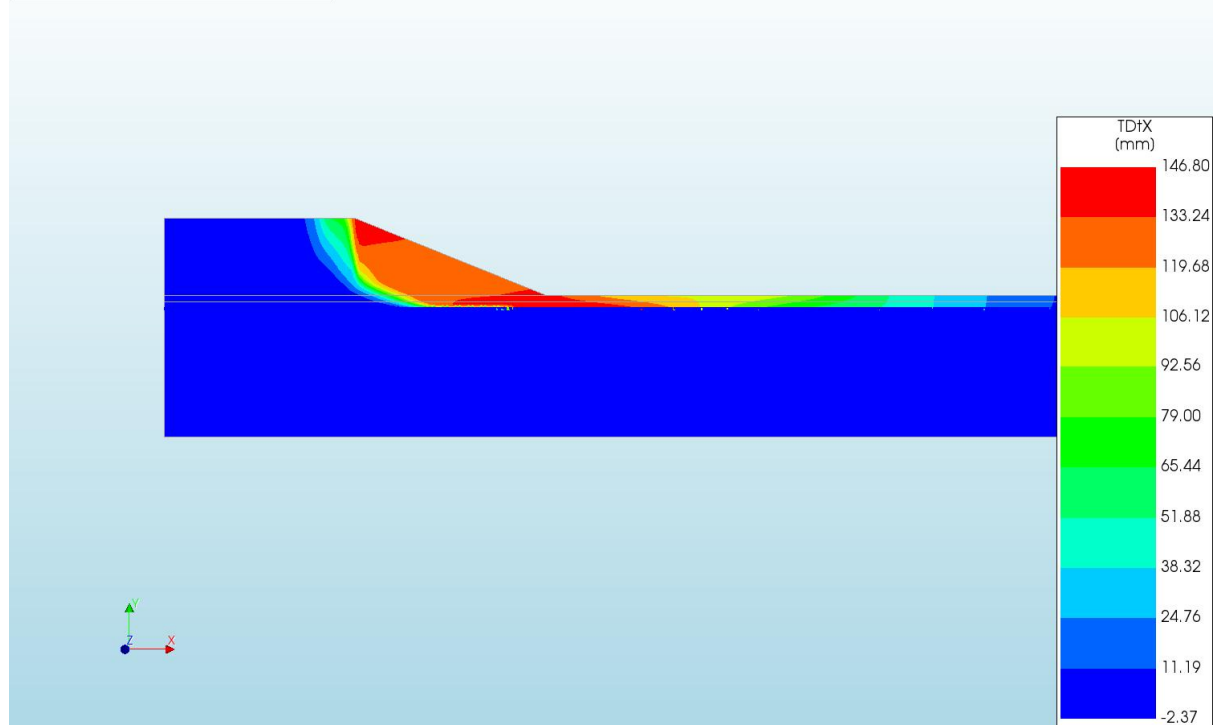
A.2.5

'Output\_d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

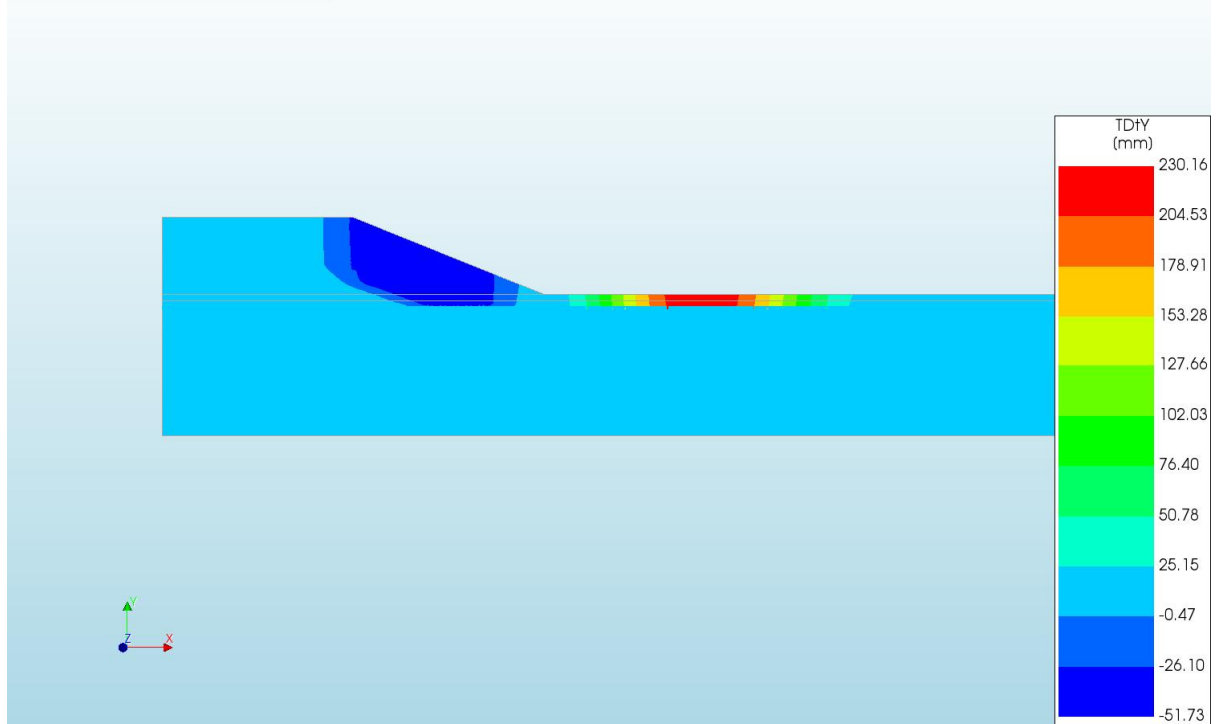
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 252.86mm



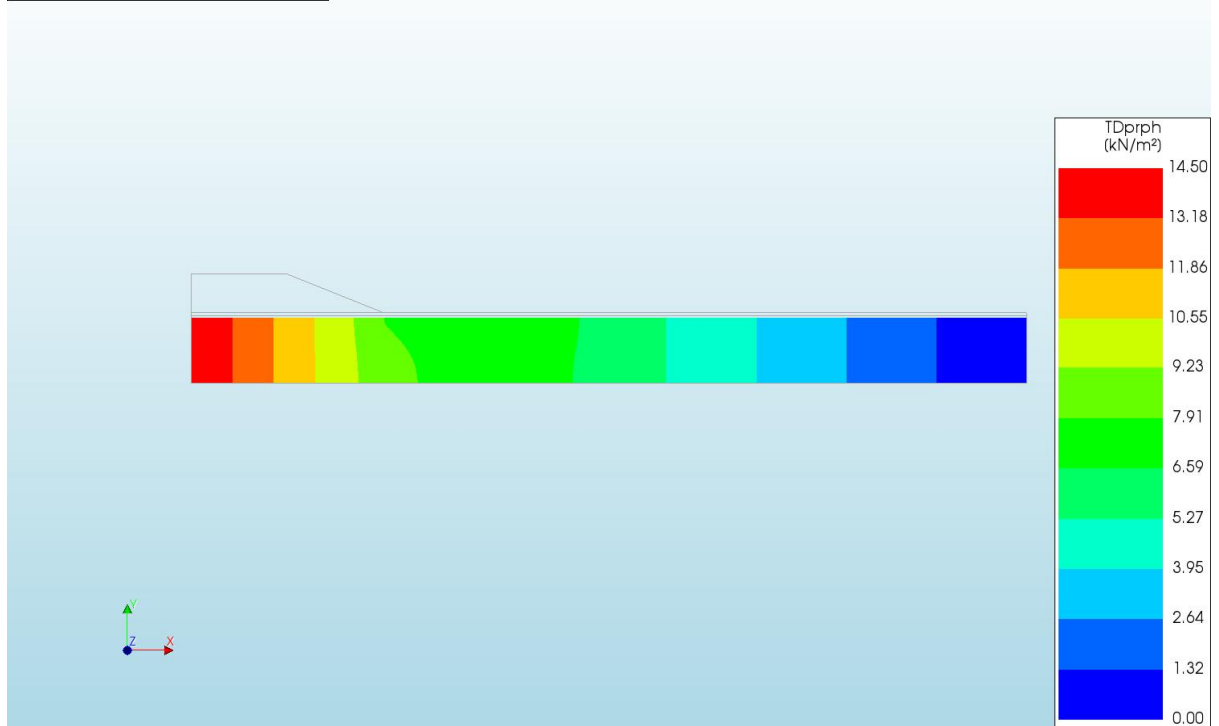
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -2.37mm max: 146.80mm



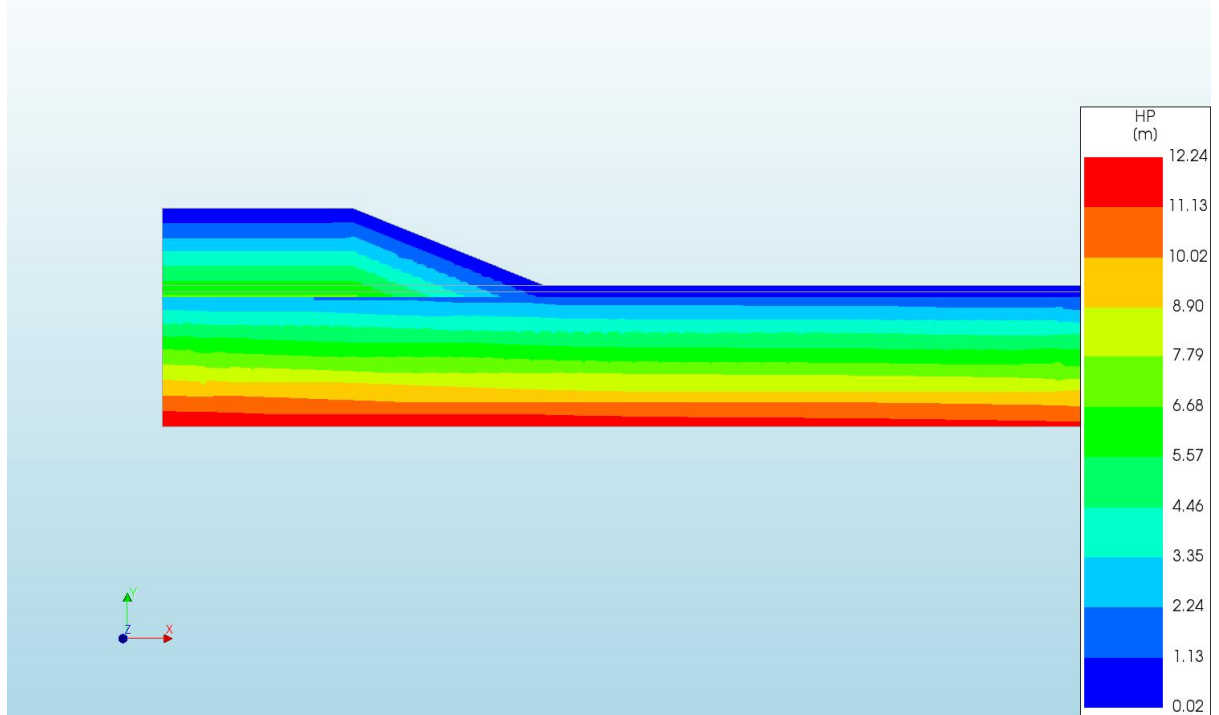
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Displacements TDY  
min: -51.73mm max: 230.16mm



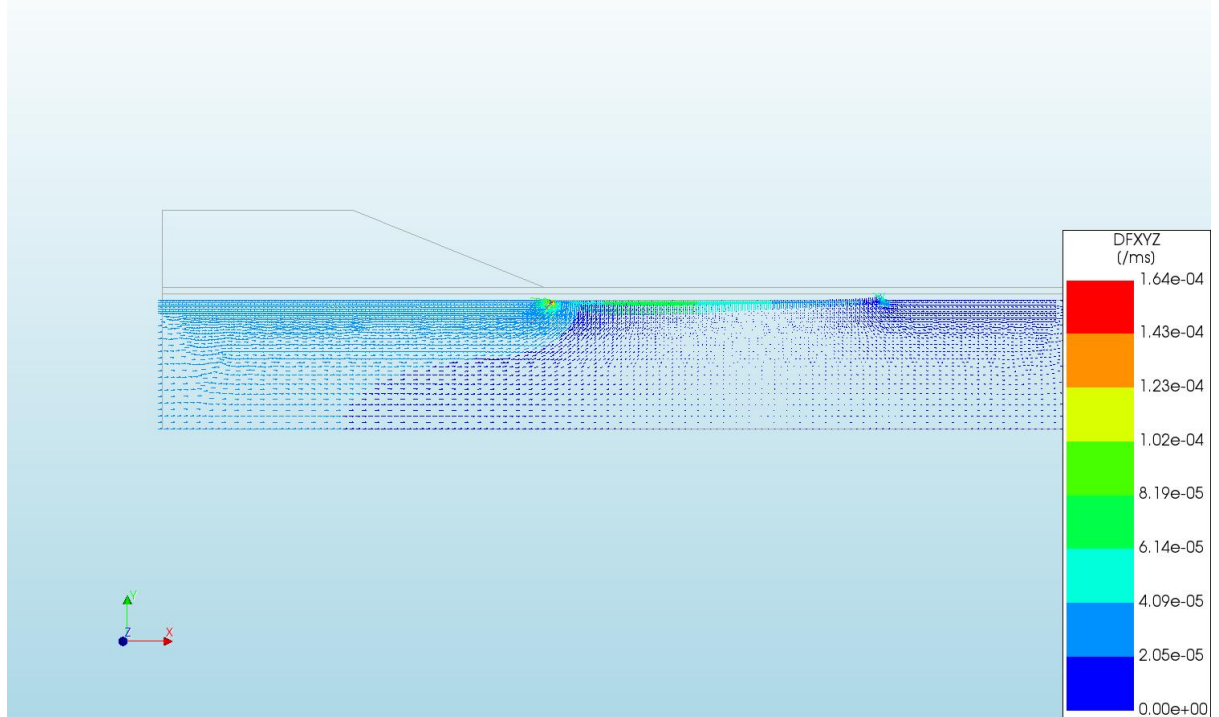
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 14.50kN/m<sup>2</sup>



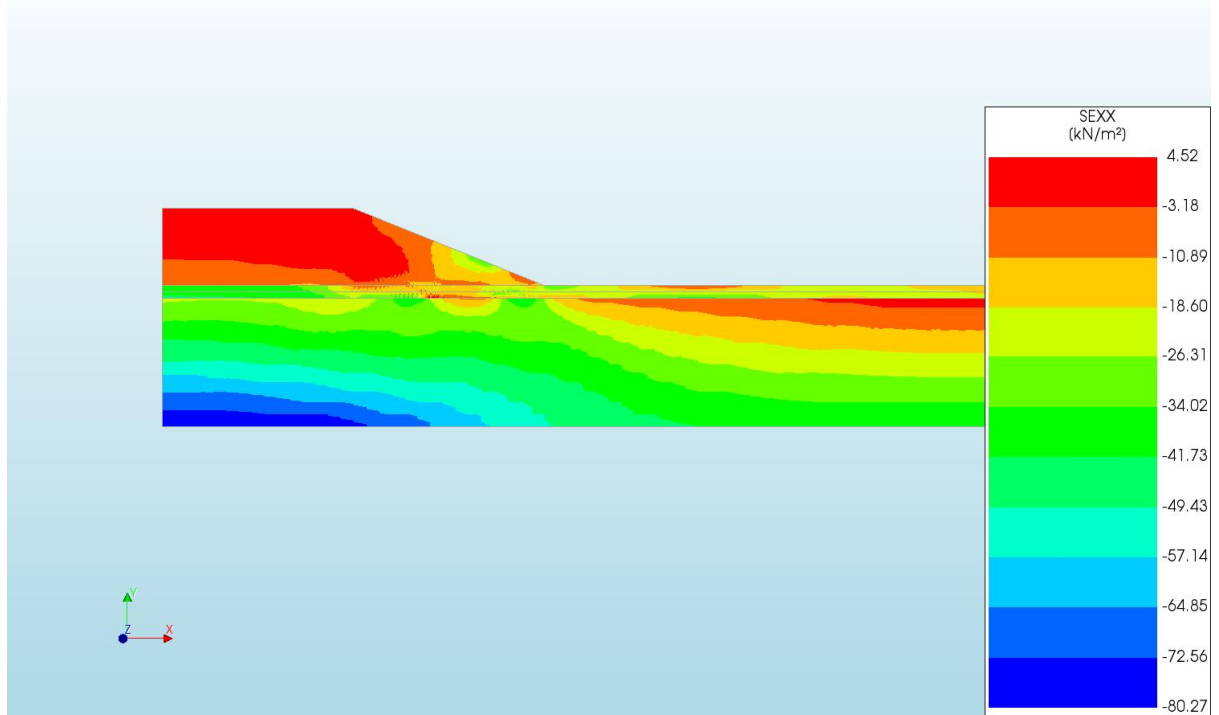
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.24m



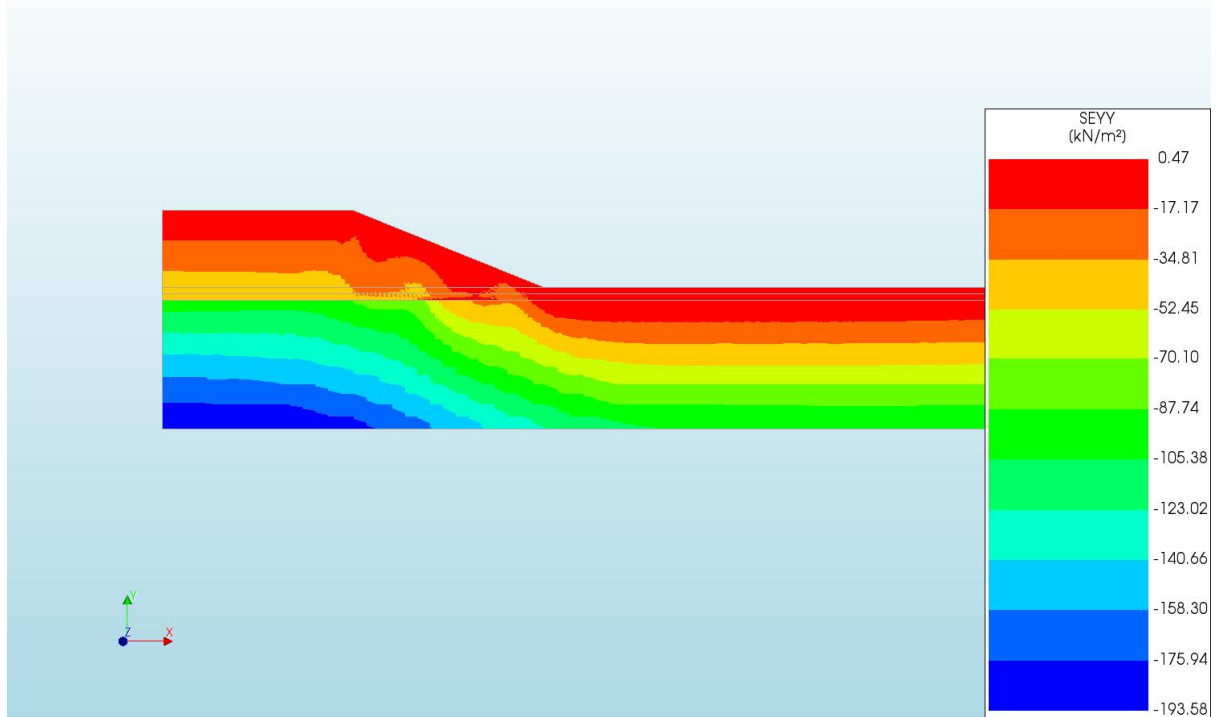
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.64e-04/ms



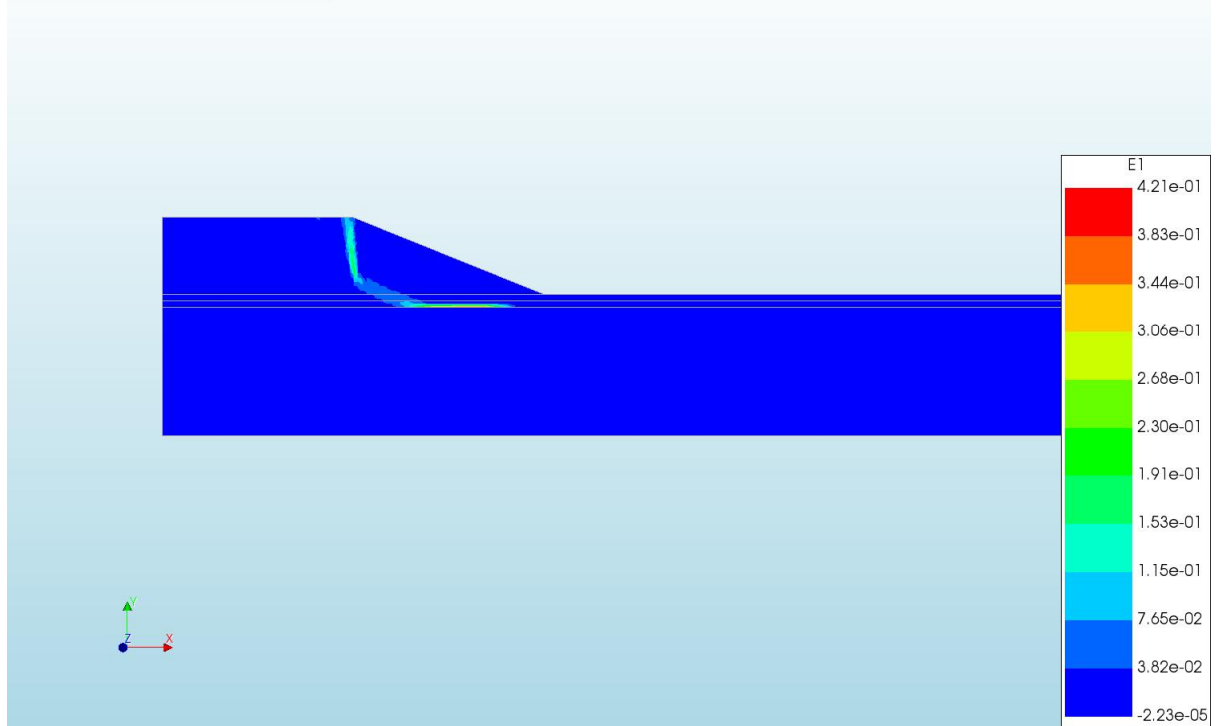
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -80.27kN/m<sup>2</sup> max: 4.52kN/m<sup>2</sup>



d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -193.58kN/m<sup>2</sup> max: 0.47kN/m<sup>2</sup>



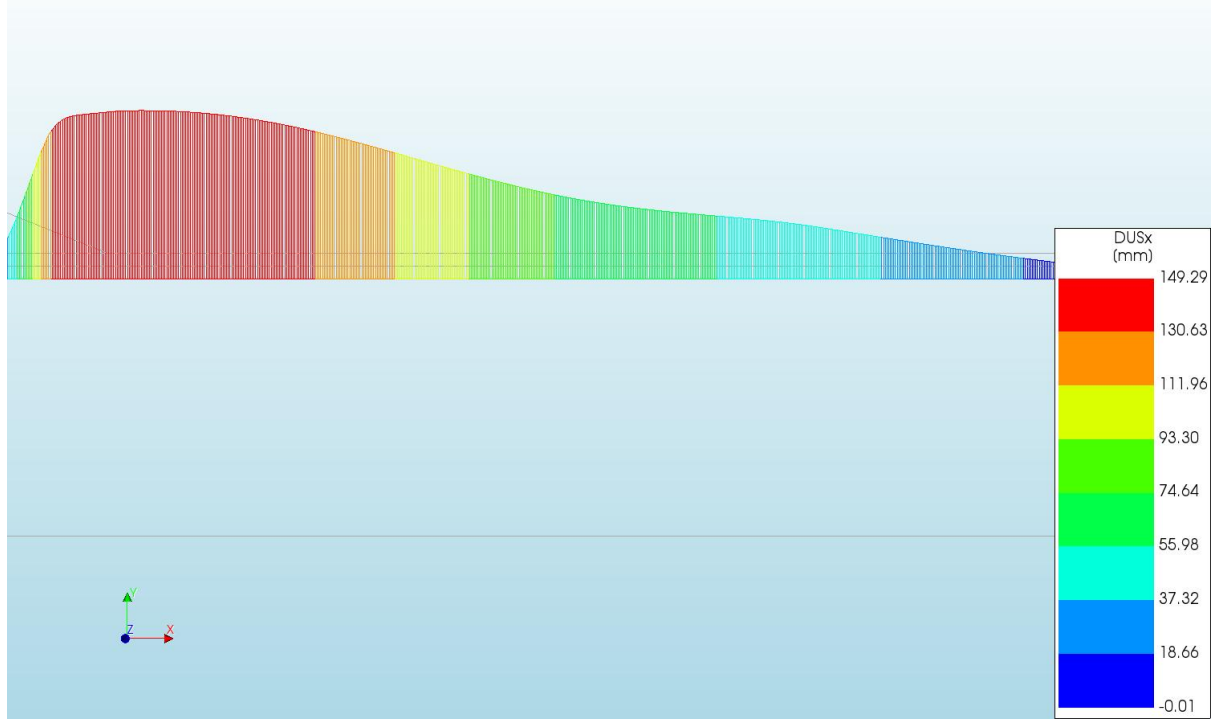
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Total Strains E1  
min: -2.23e-05 max: 4.21e-01



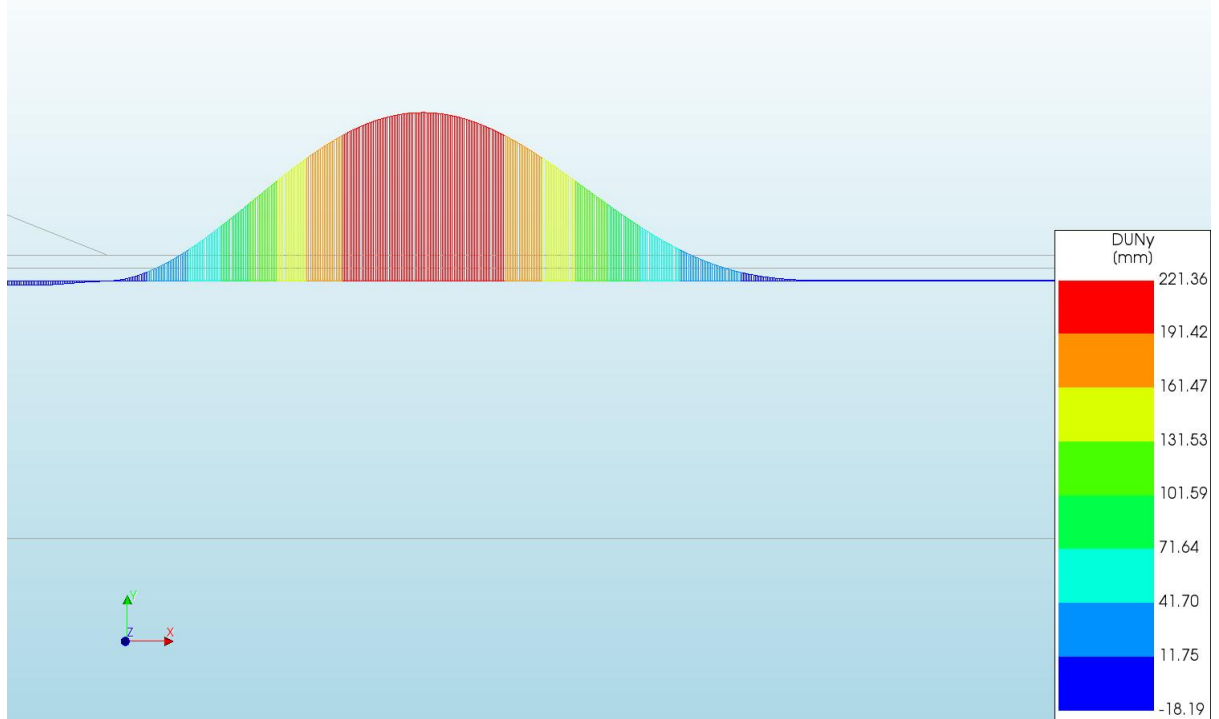
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.53e-01



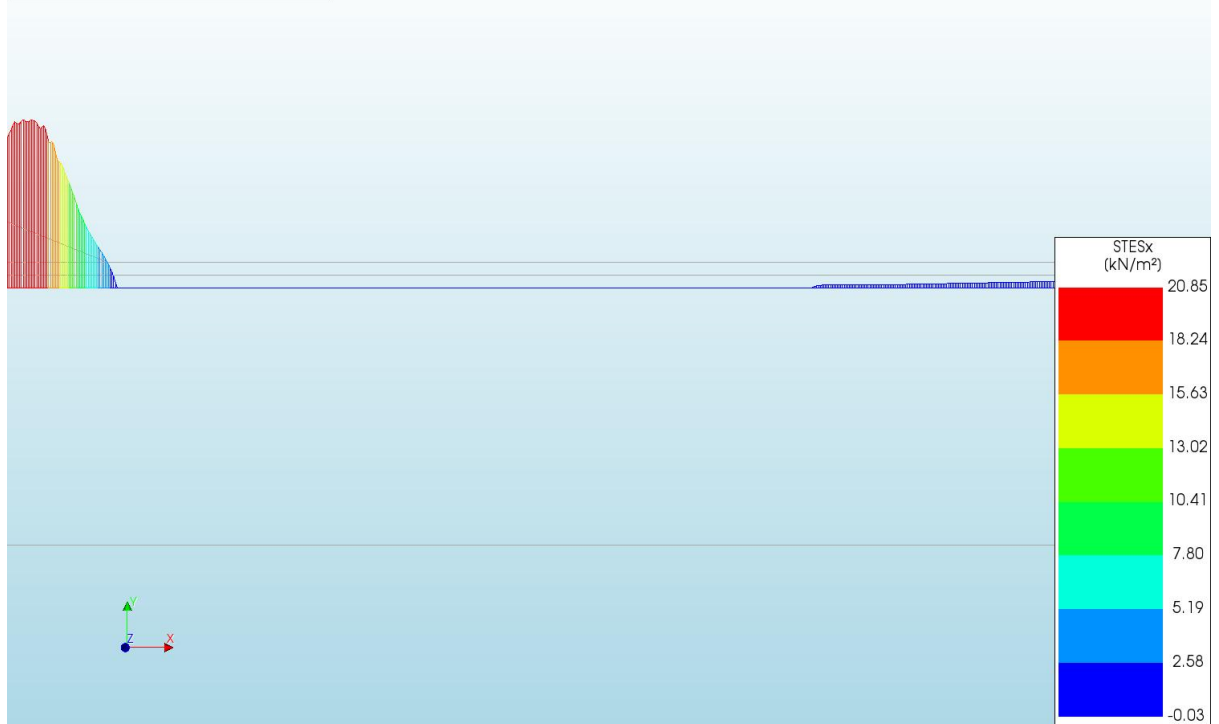
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.01mm max: 149.29mm



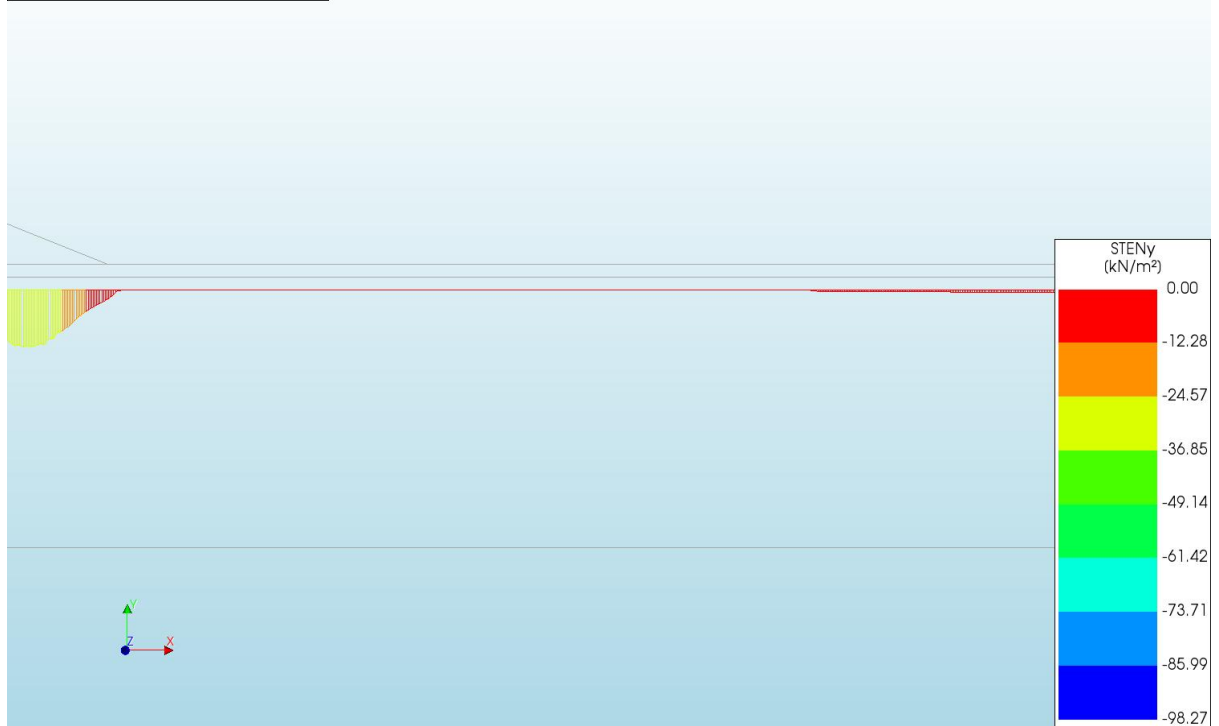
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -18.19mm max: 221.36mm

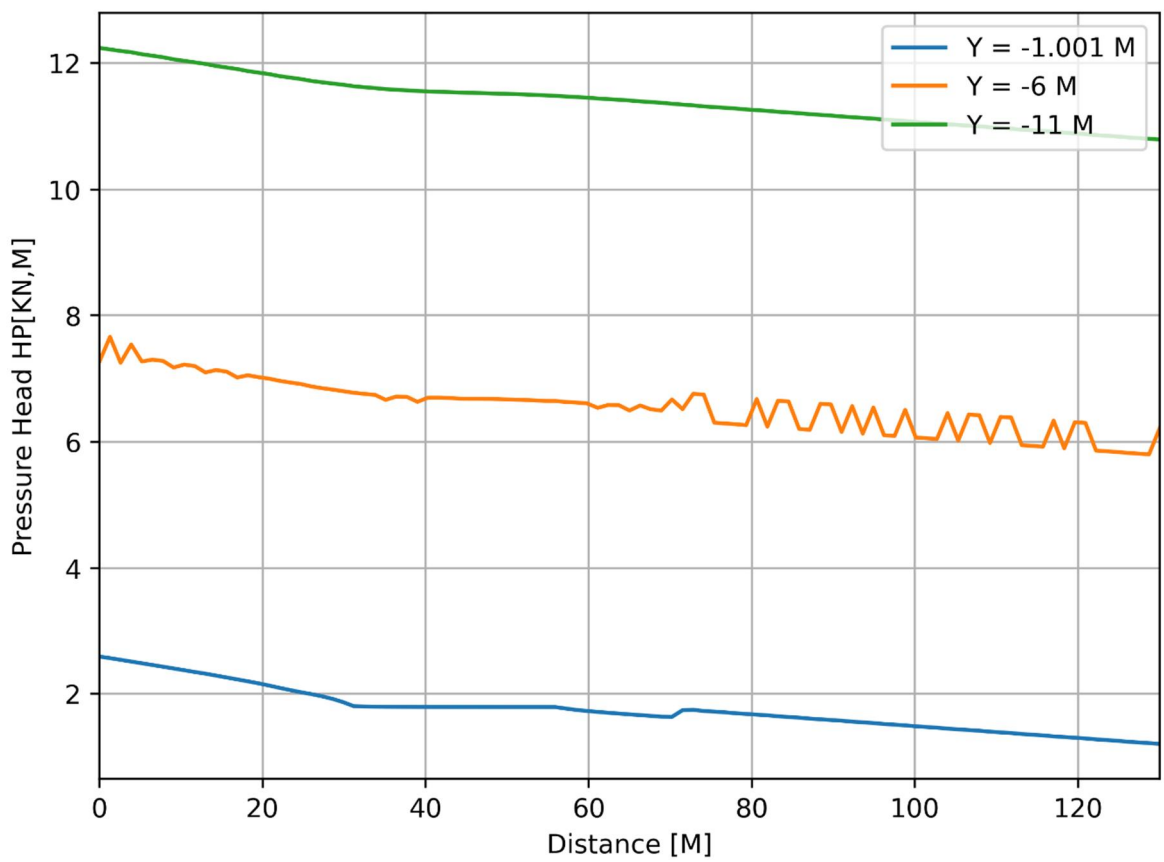
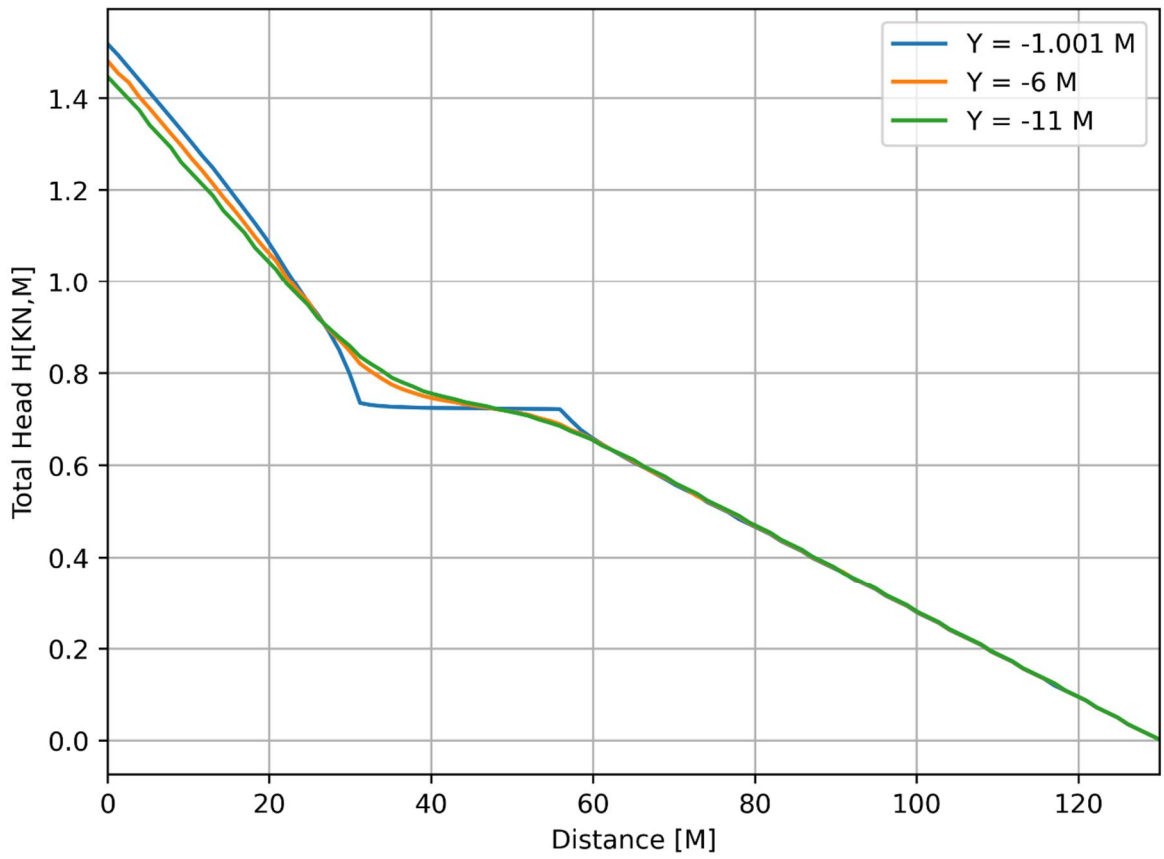


d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.03kN/m<sup>2</sup> max: 20.85kN/m<sup>2</sup>

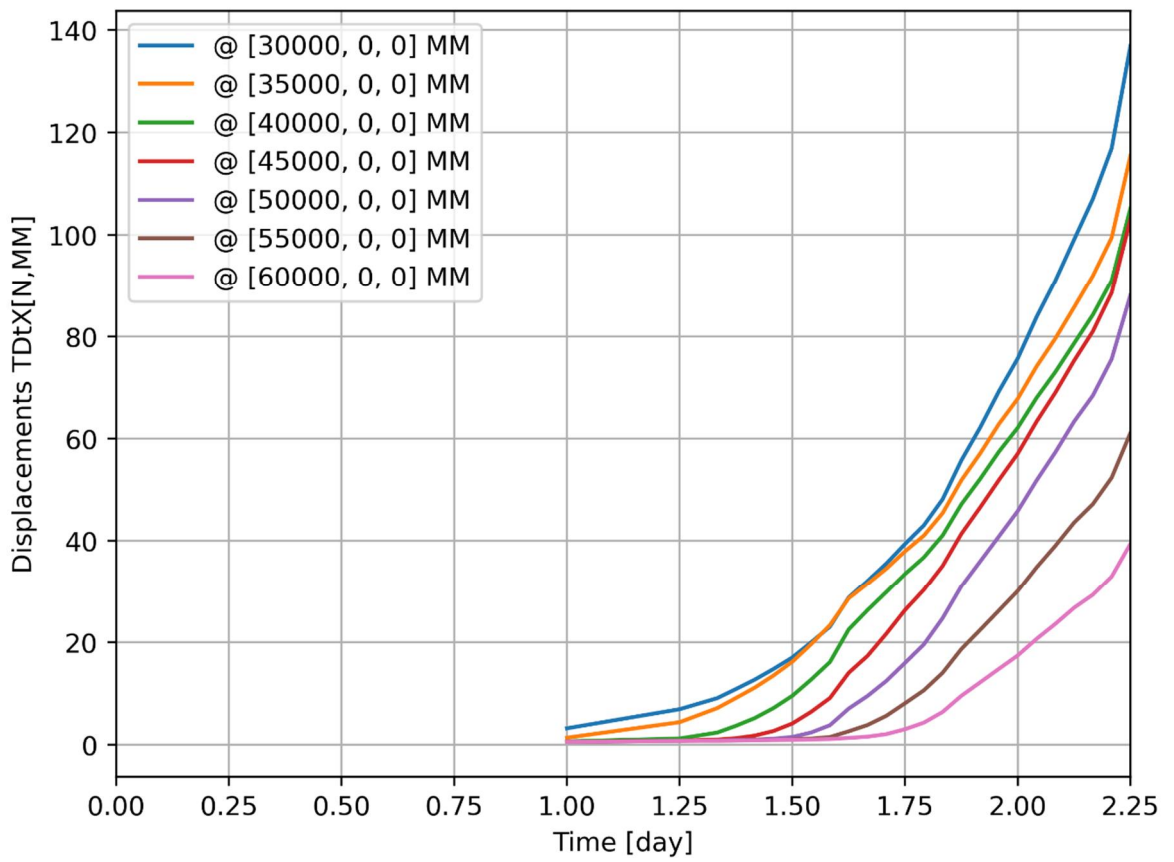
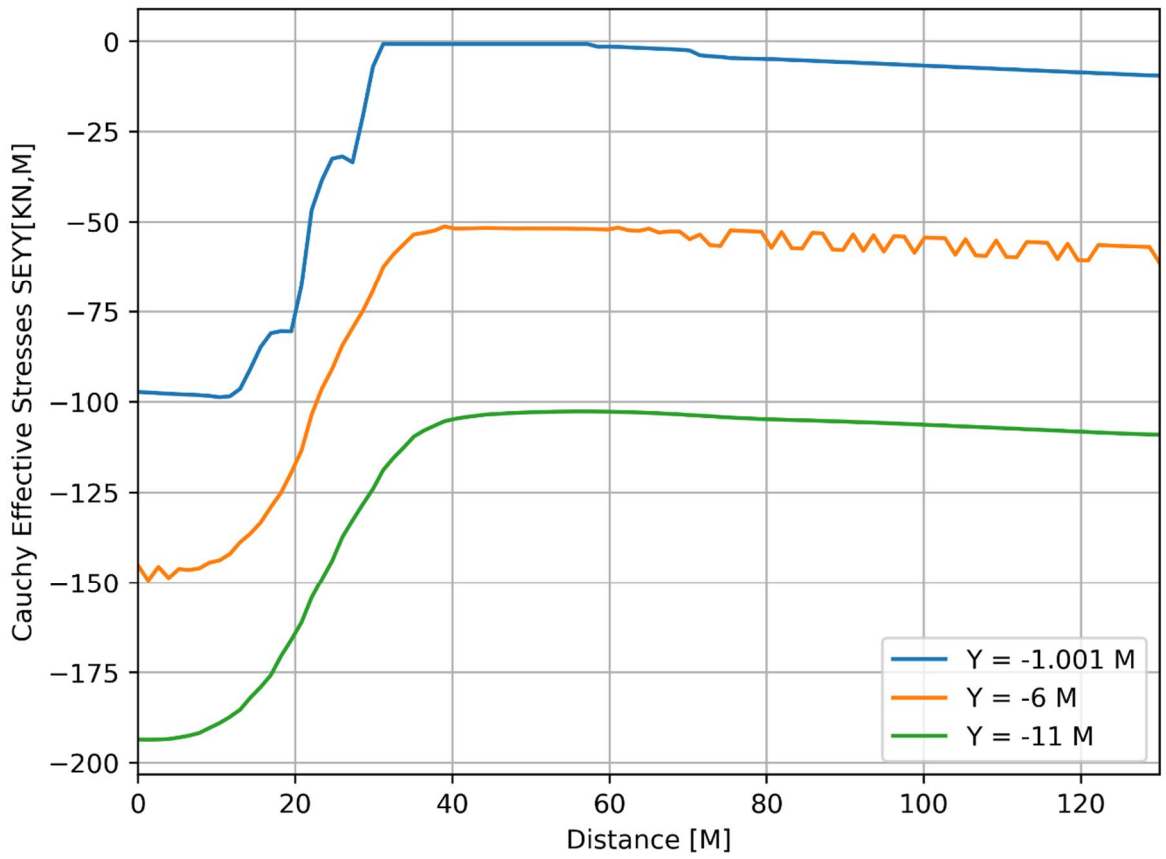


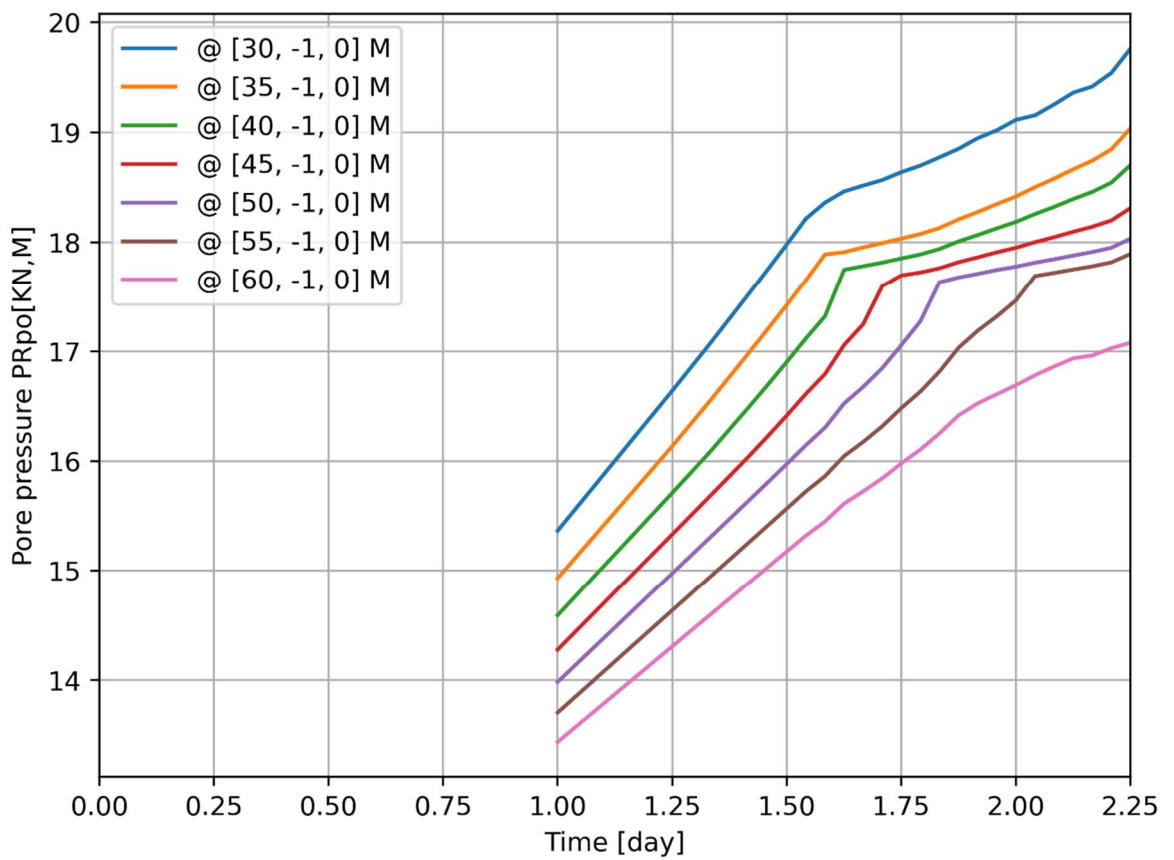
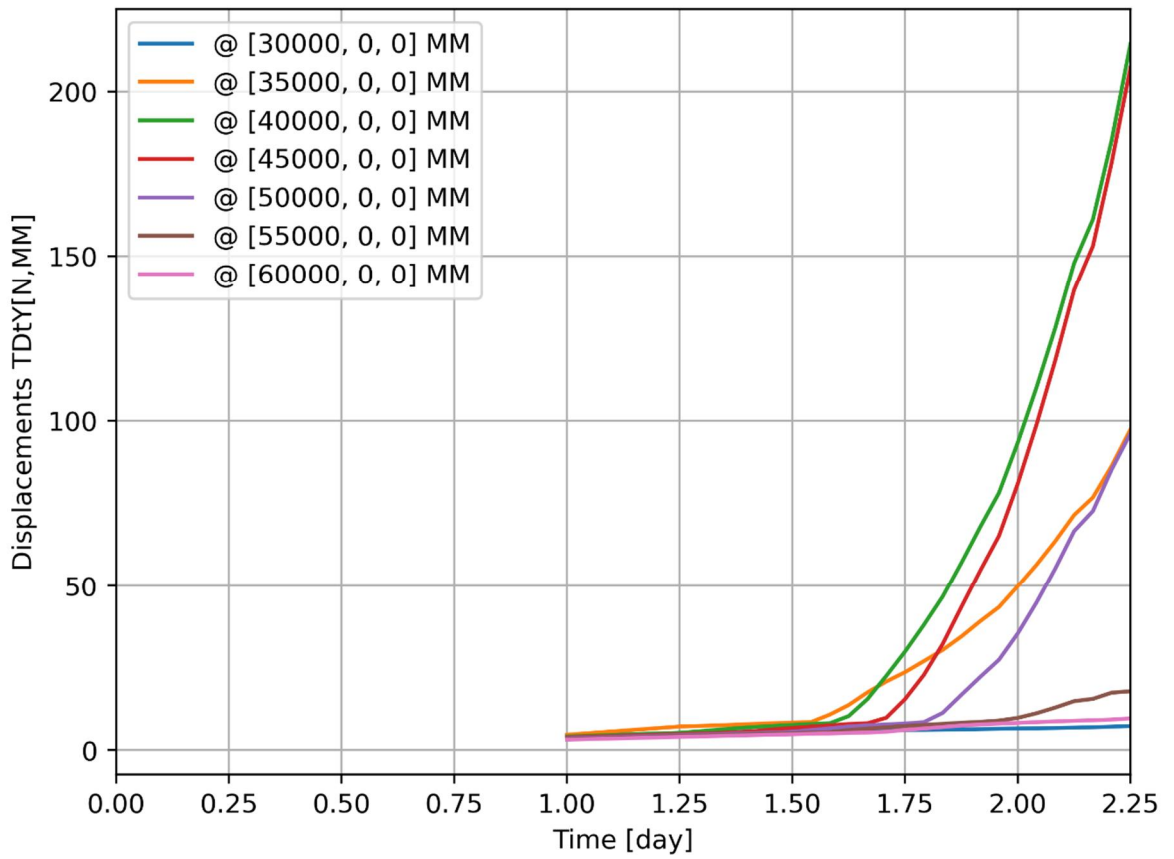
d=1\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 2 day 6 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -98.27kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

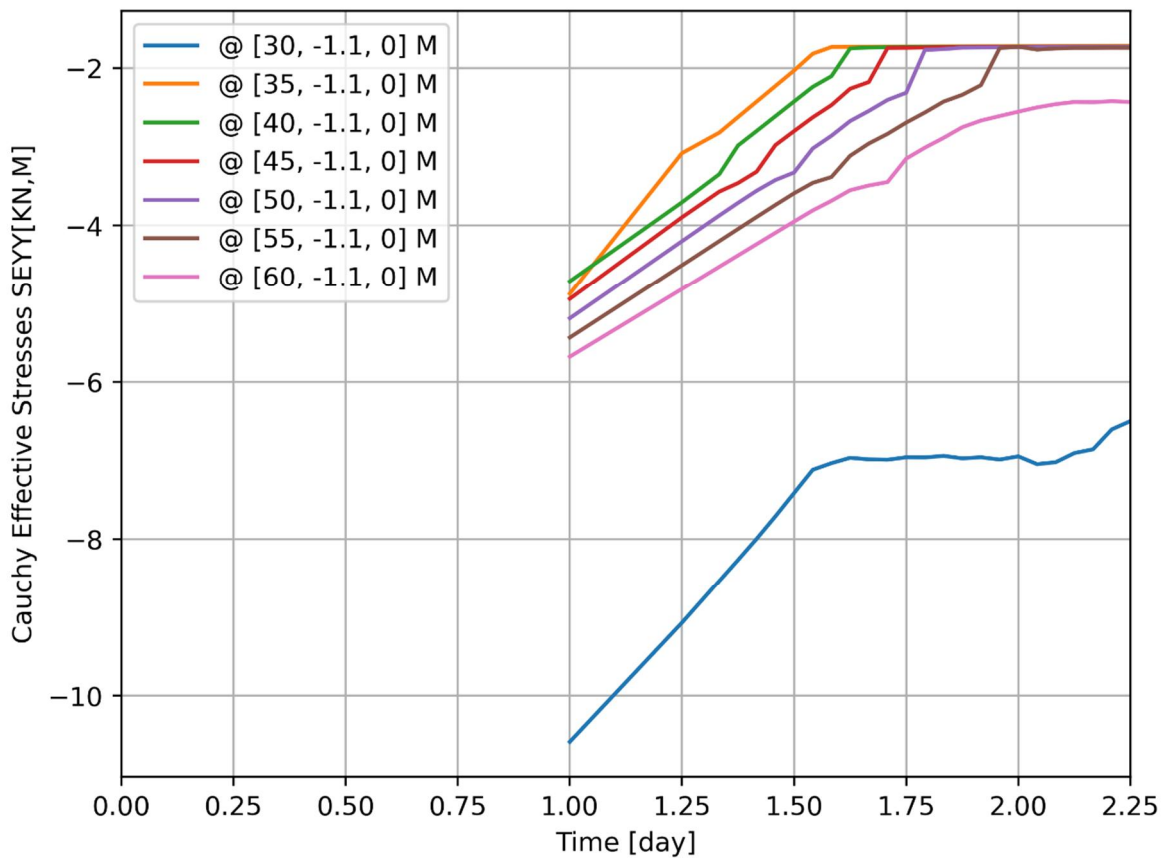
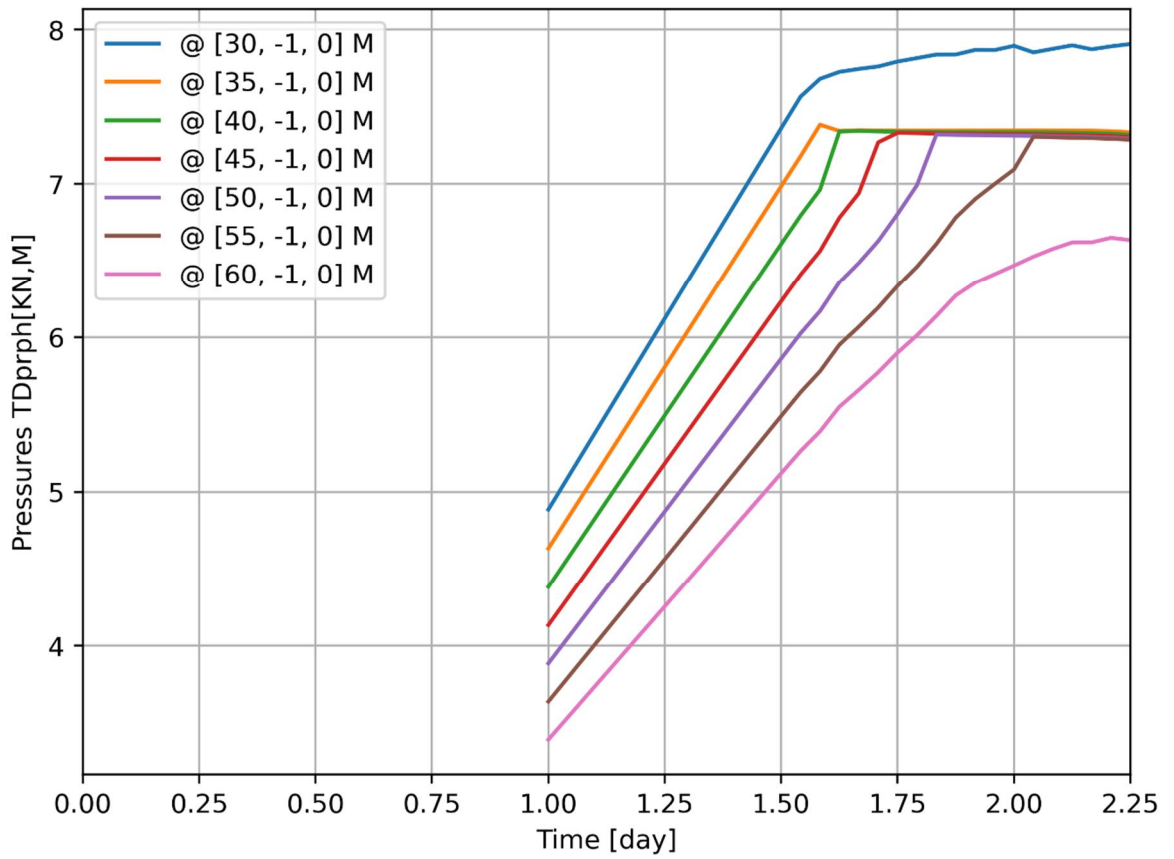


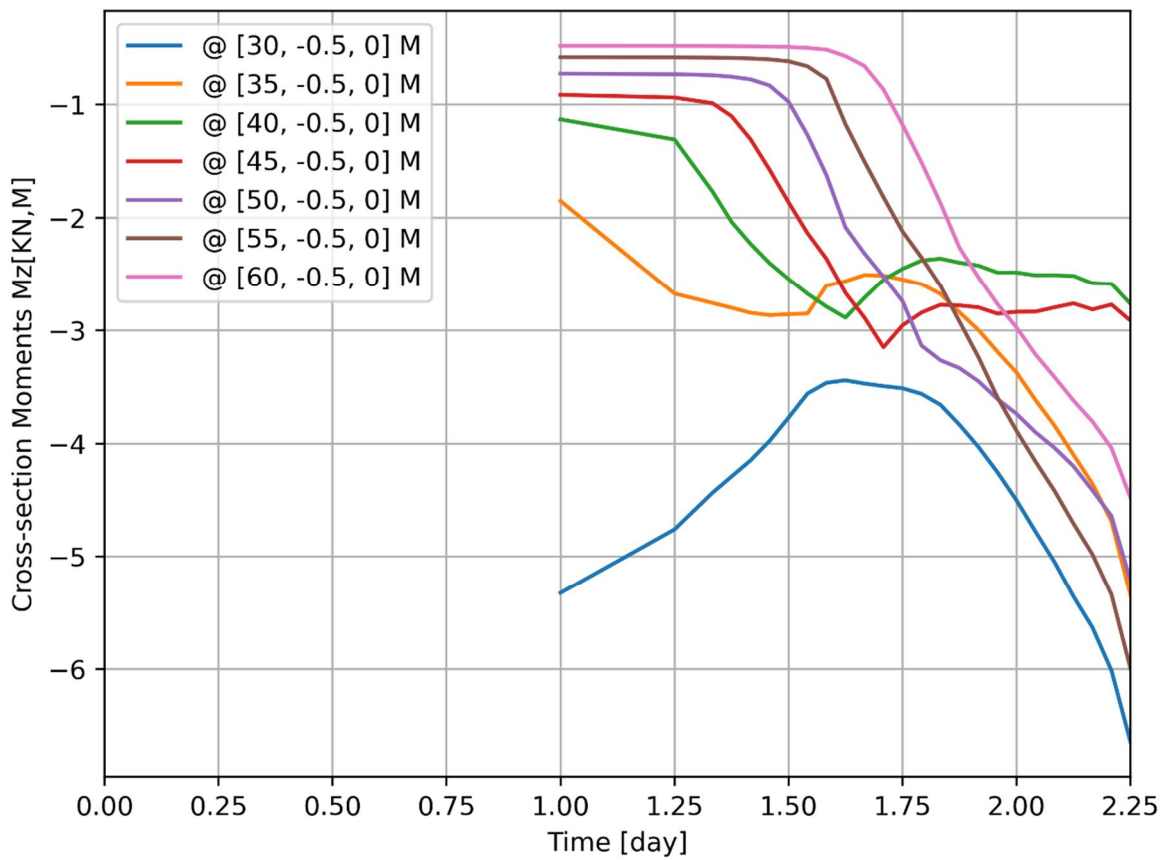
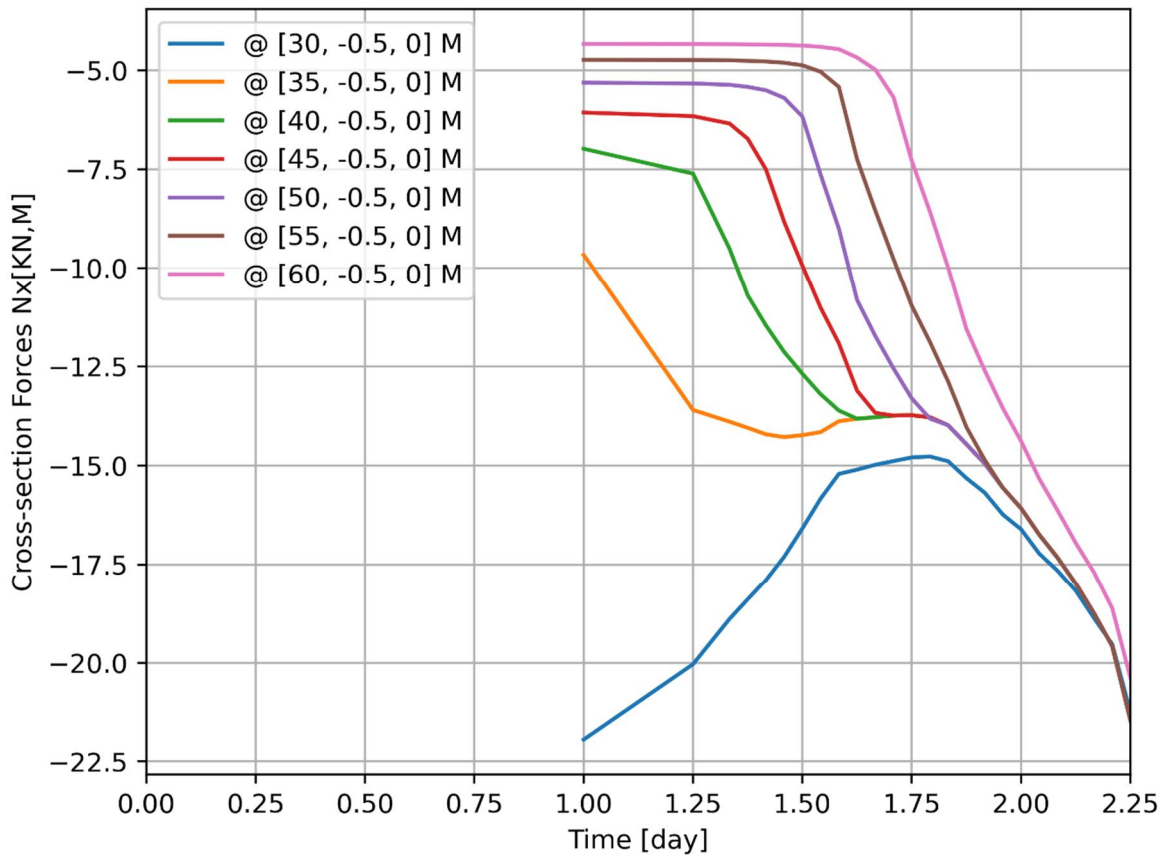








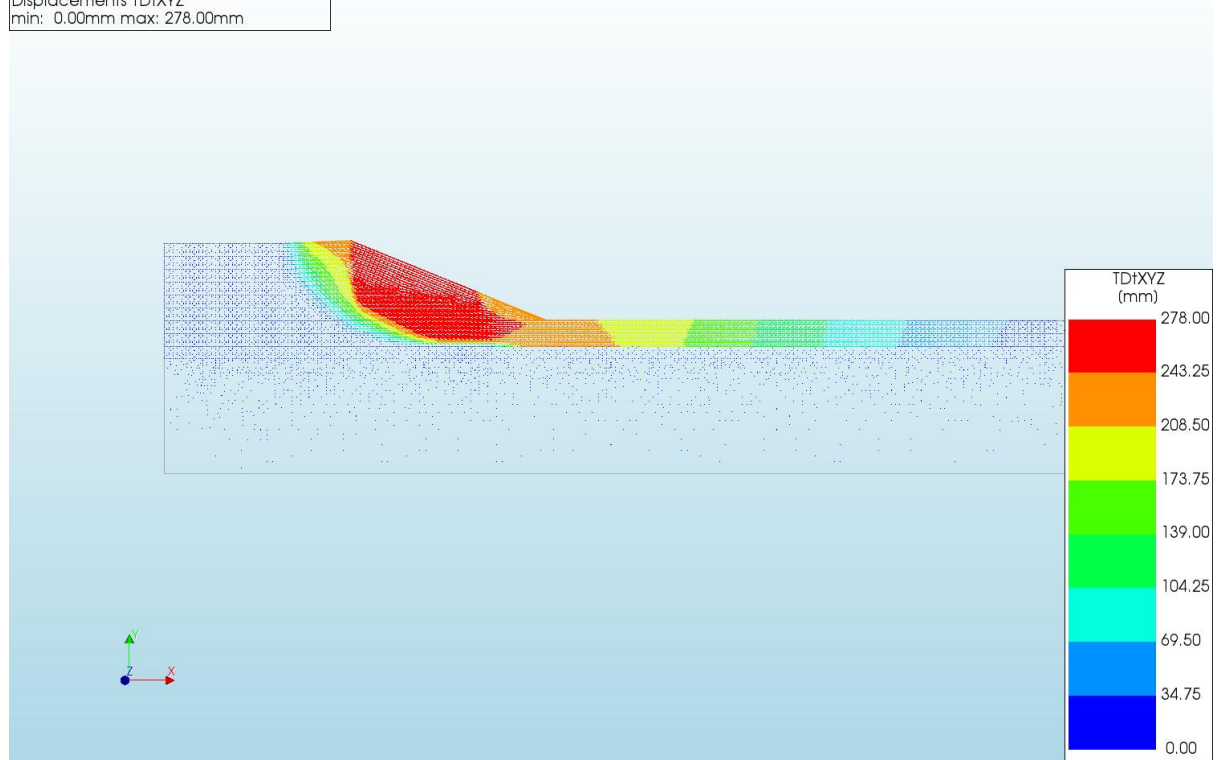




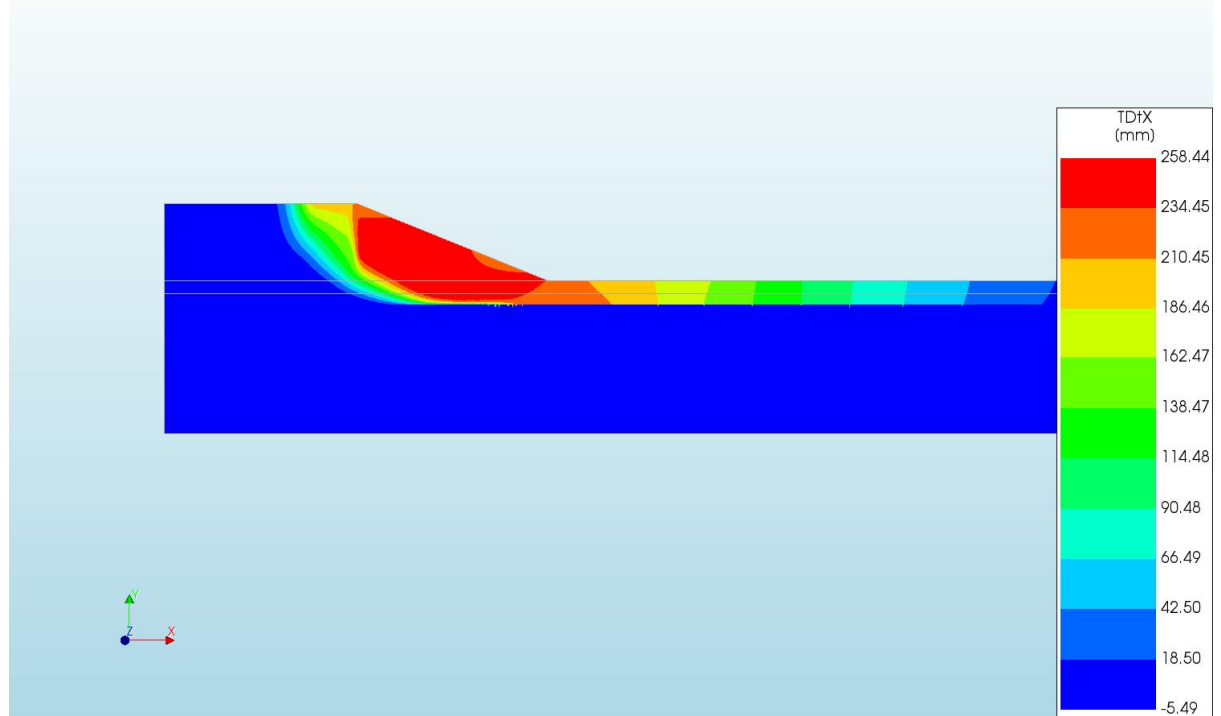
A.2.6

'Output\_d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

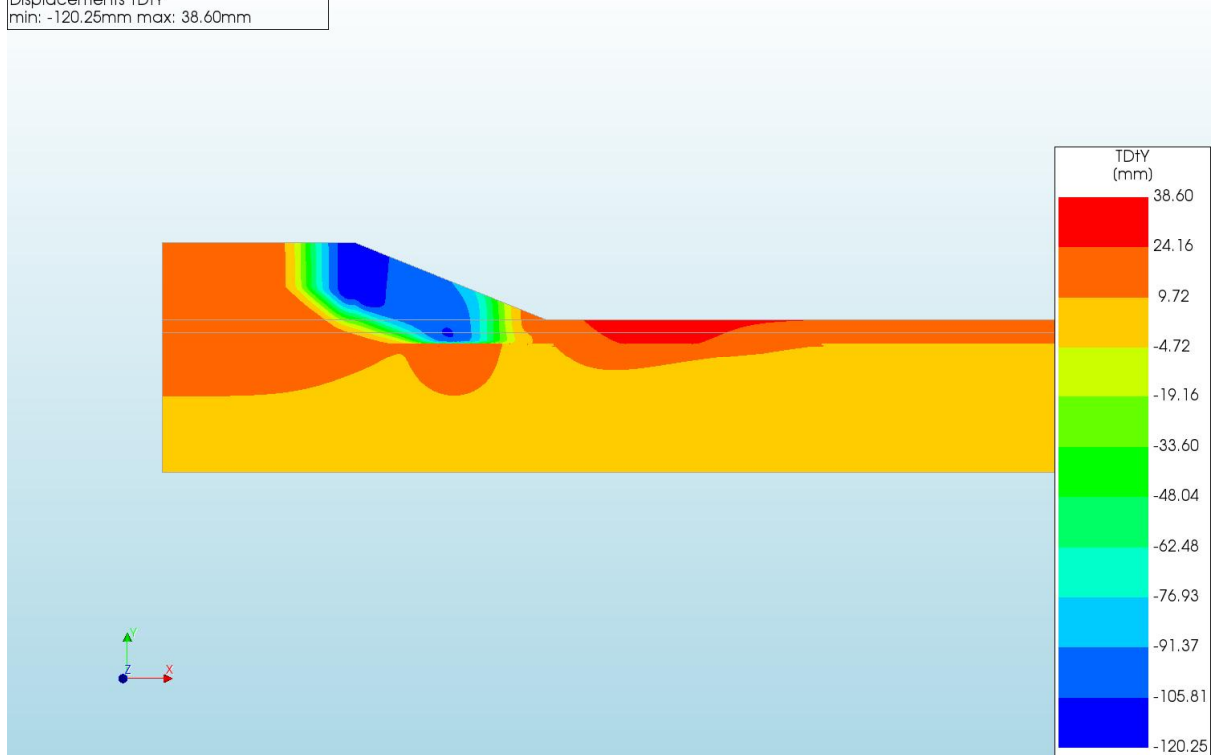
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 278.00mm



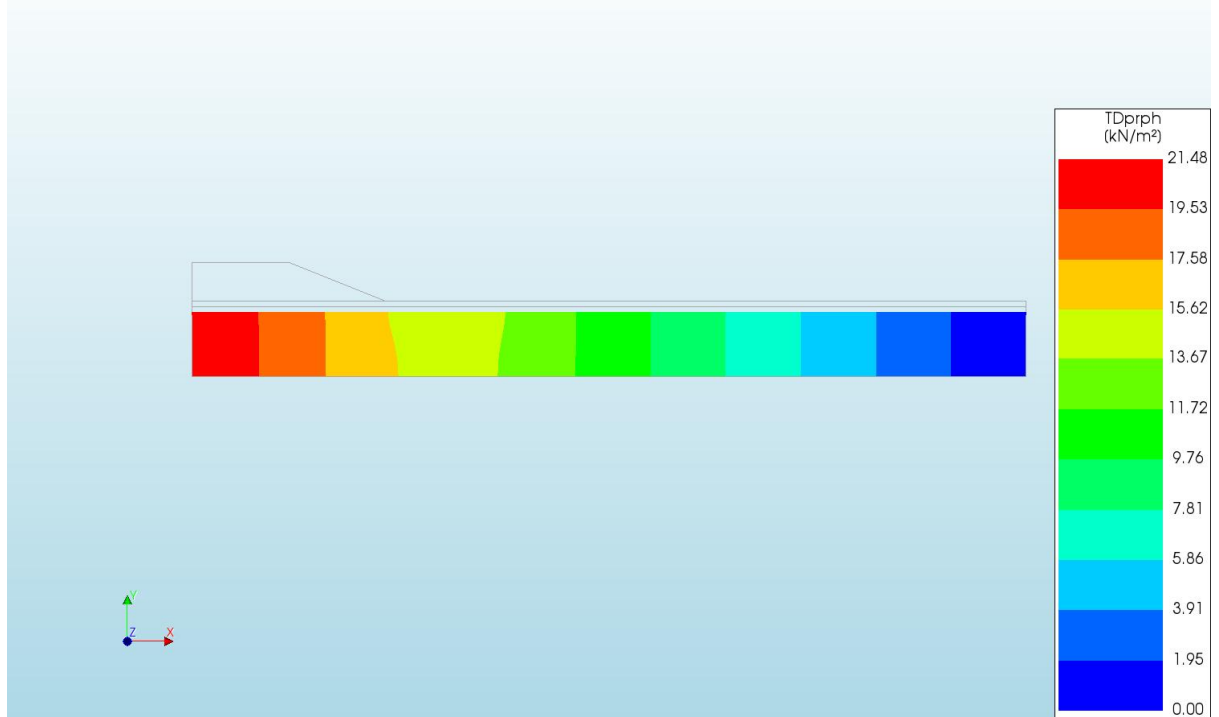
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtX  
min: -5.49mm max: 258.44mm



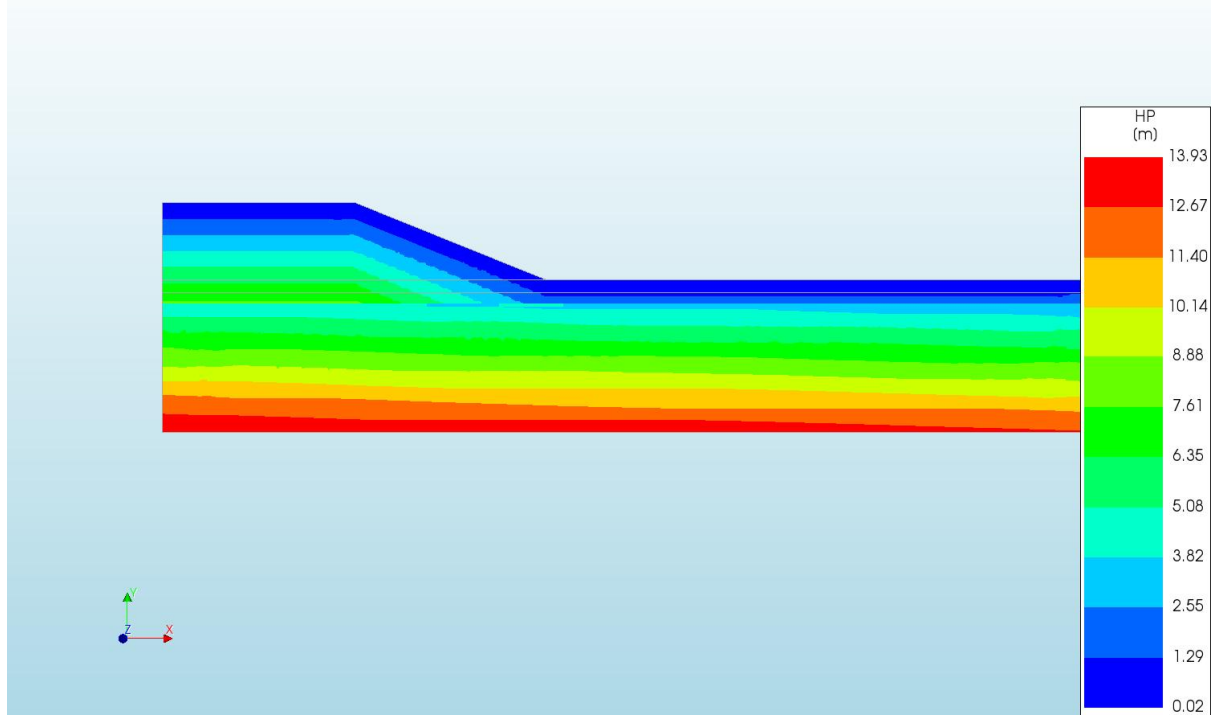
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDfY  
min: -120.25mm max: 38.60mm



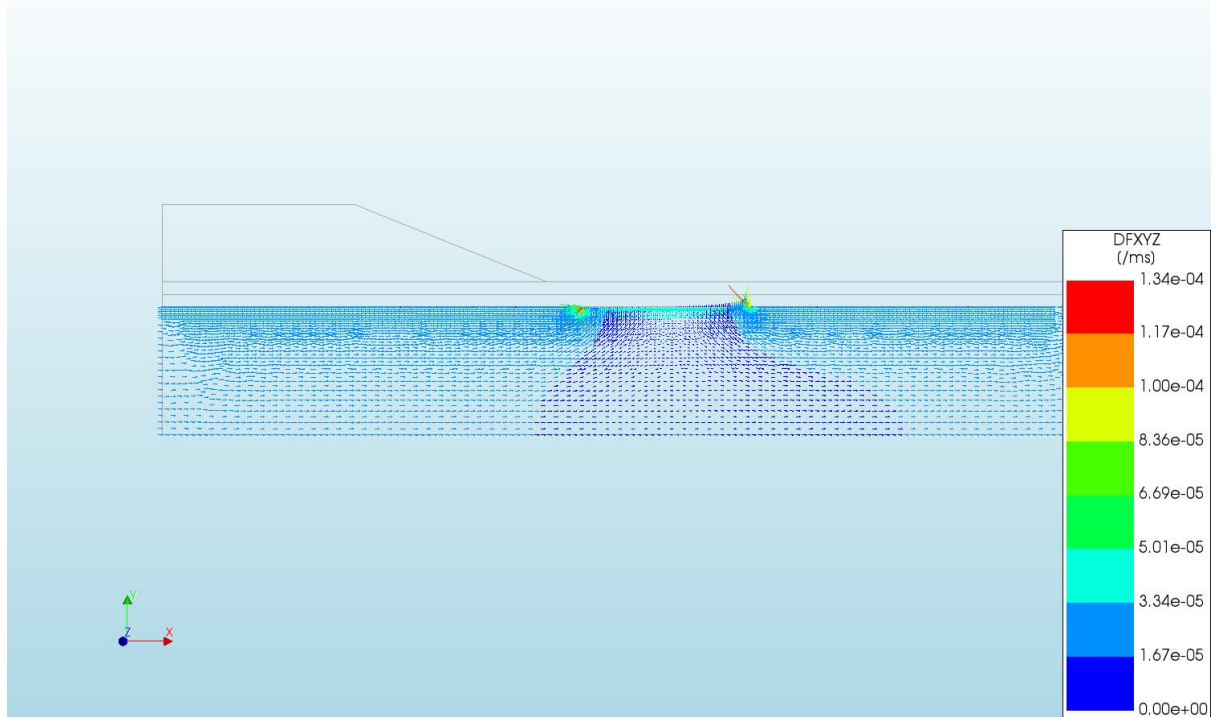
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 21.48kN/m<sup>2</sup>



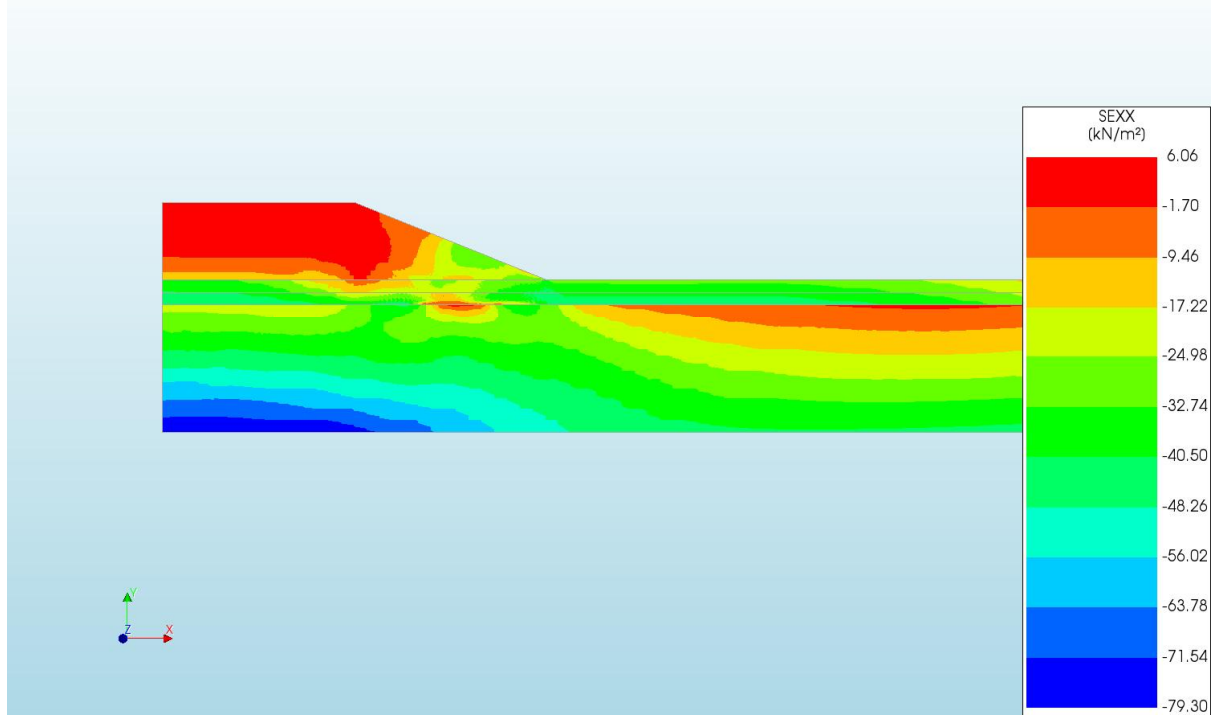
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.93m



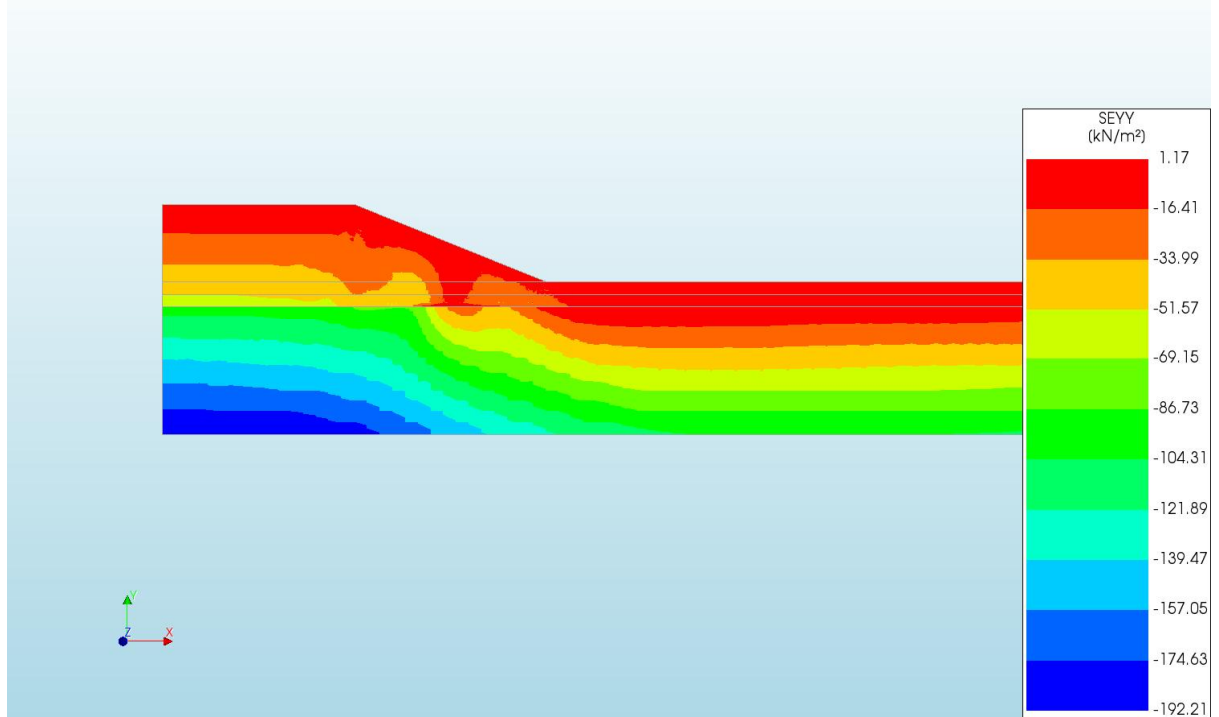
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.34e-04/ms



d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.30kN/m<sup>2</sup> max: 6.06kN/m<sup>2</sup>

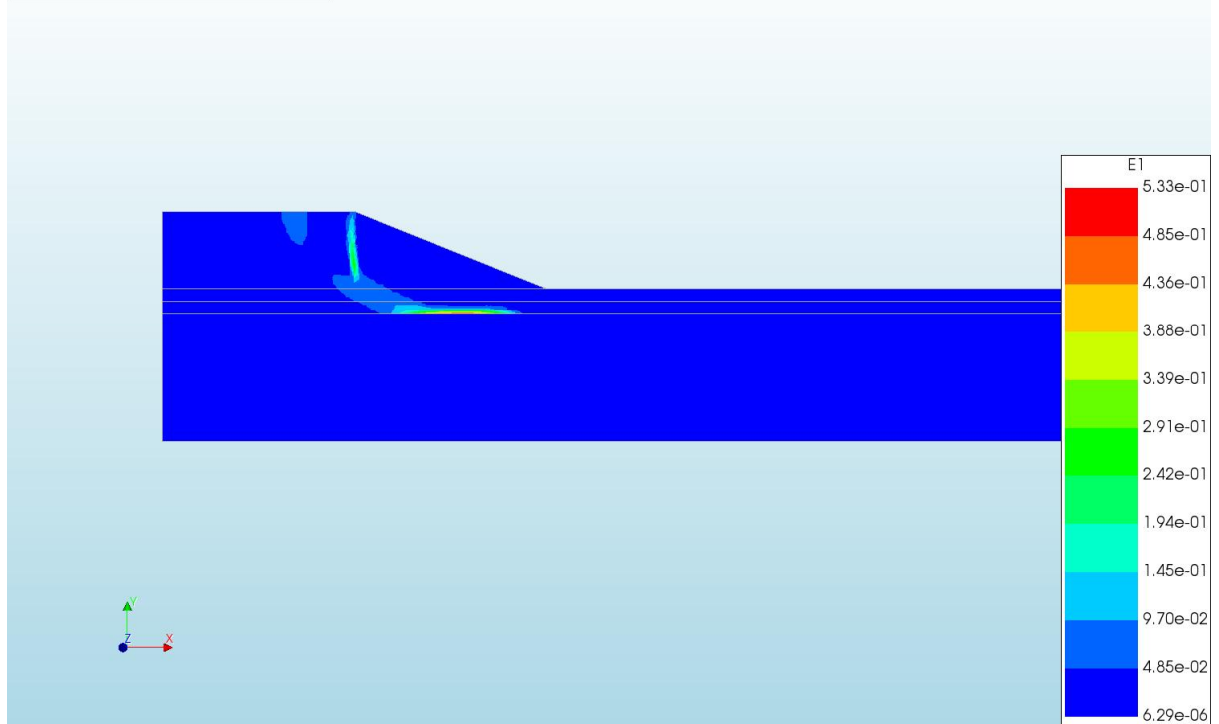


d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.21kN/m<sup>2</sup> max: 1.17kN/m<sup>2</sup>

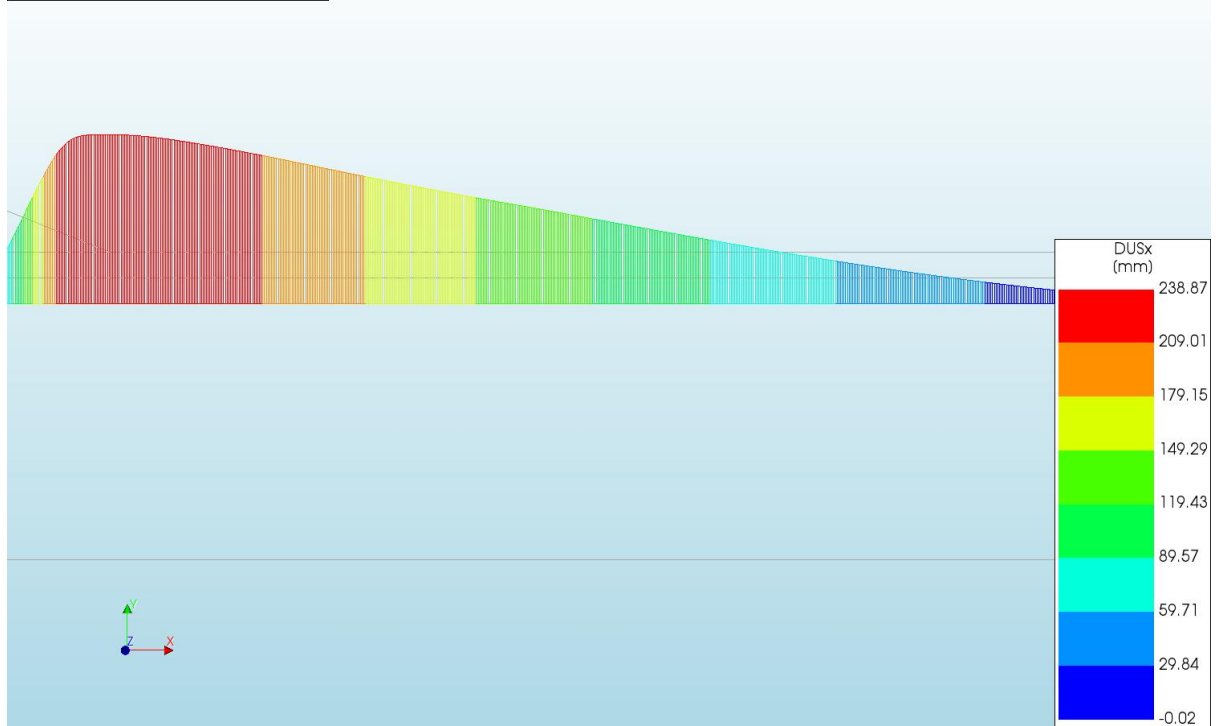




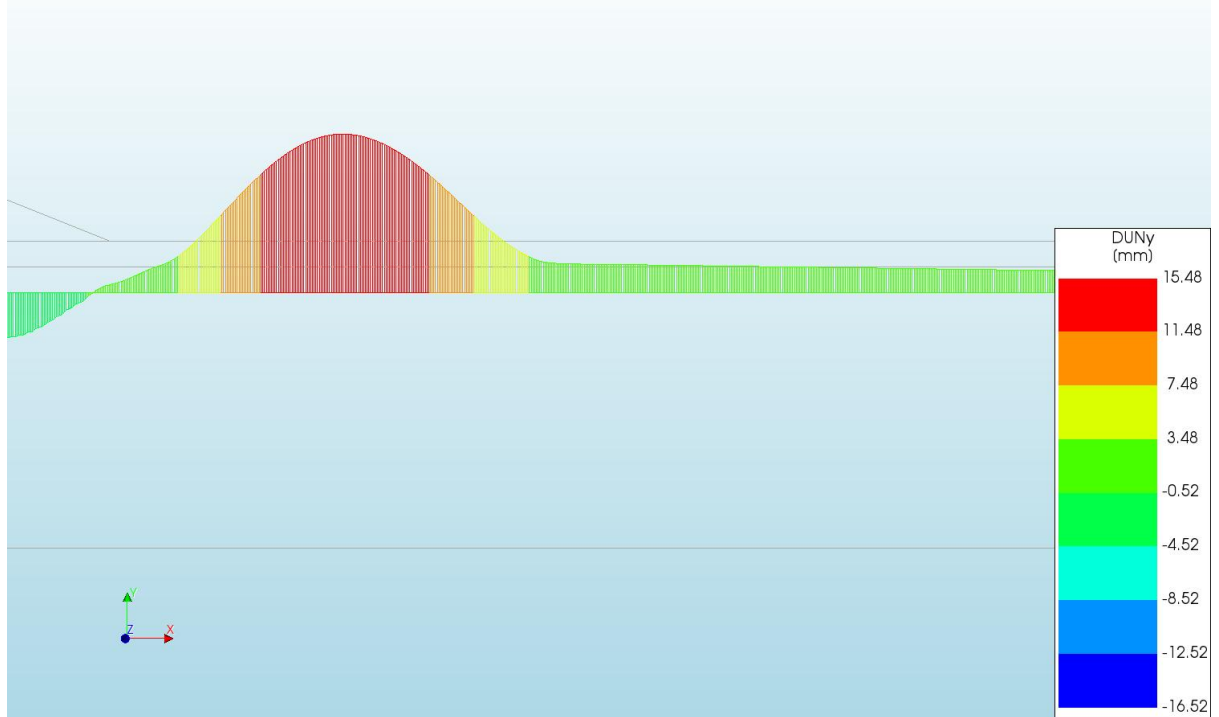
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Total Strains E1  
min: 6.29e-06 max: 5.33e-01



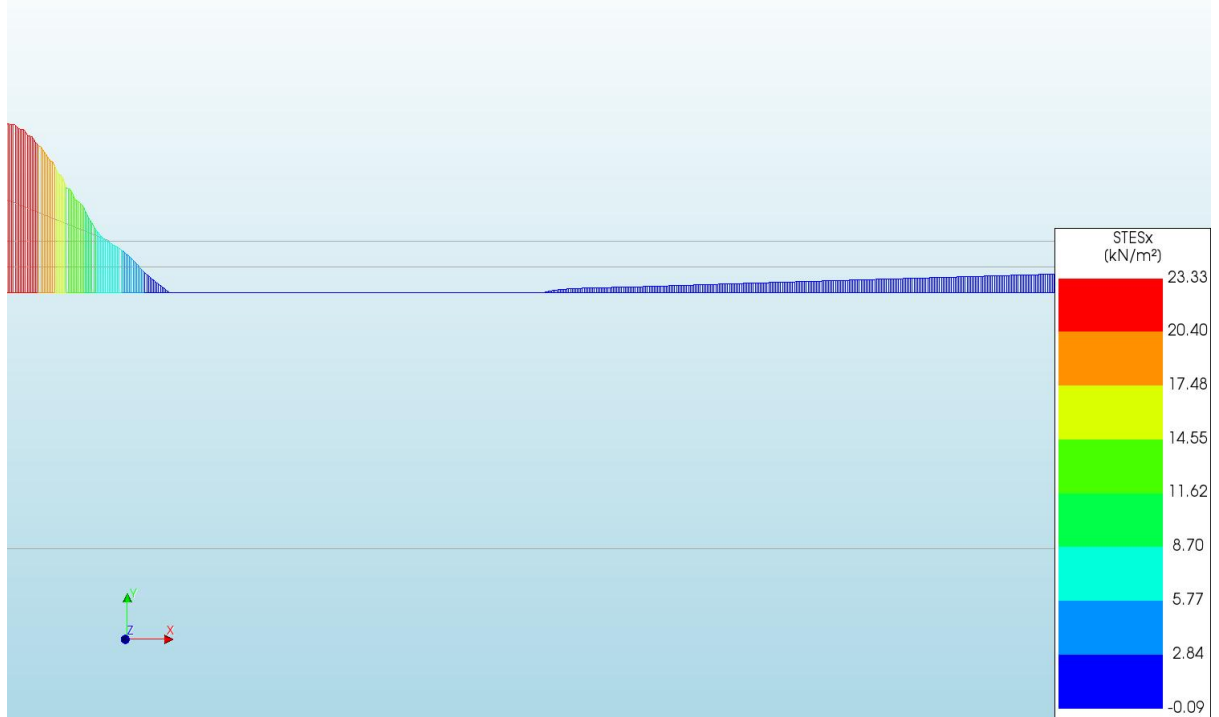
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 238.87mm



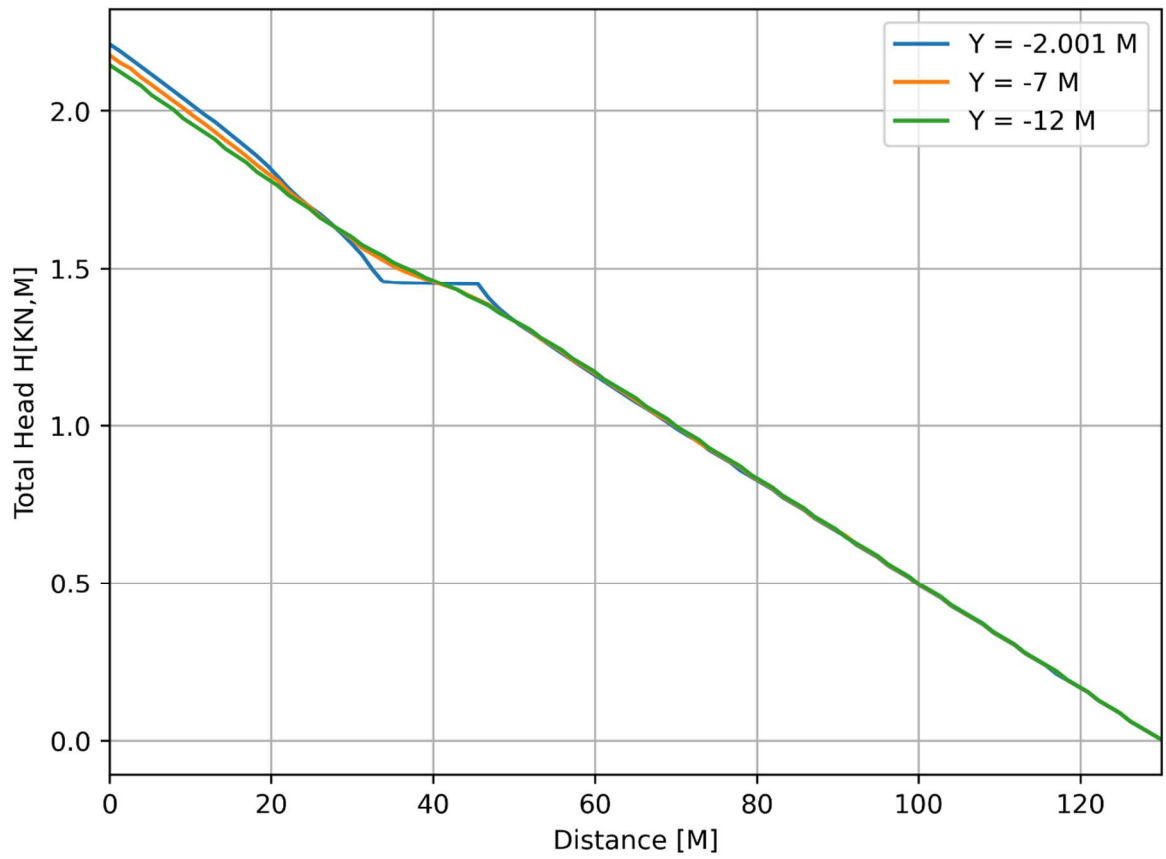
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.52mm max: 15.48mm

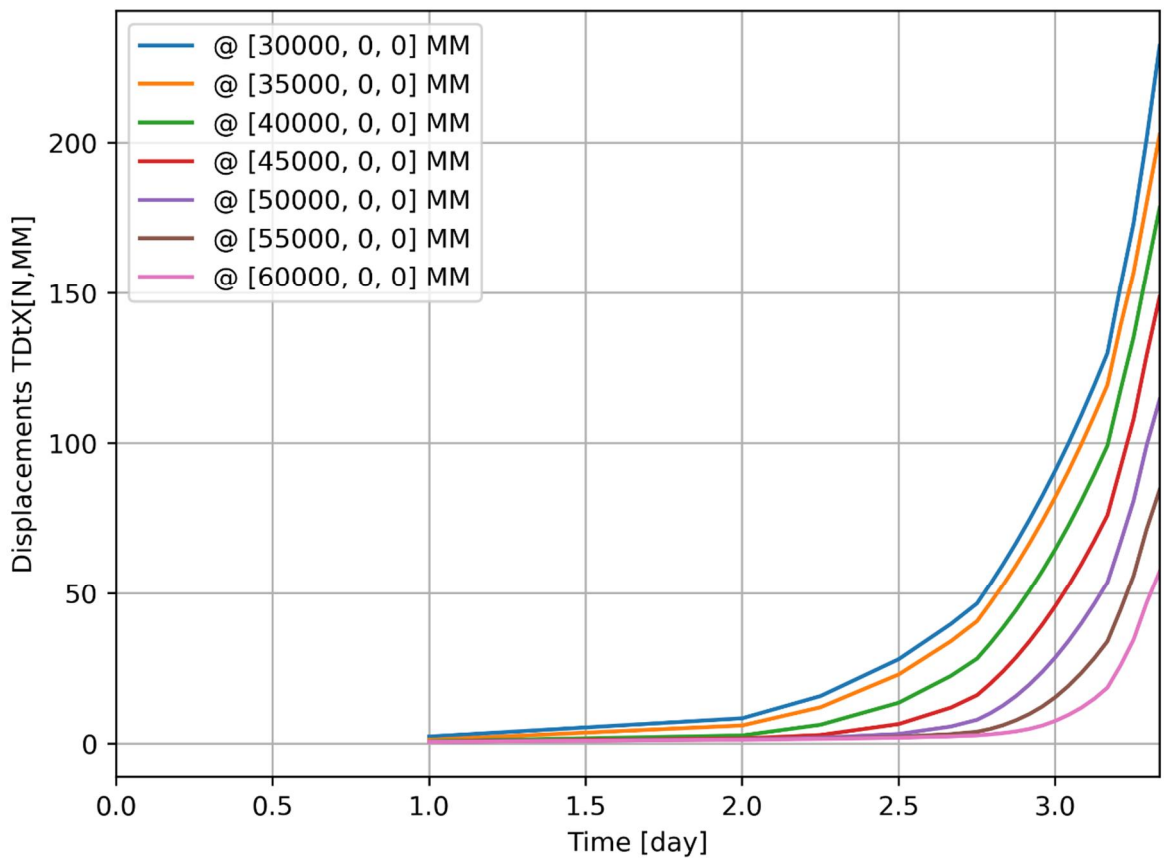
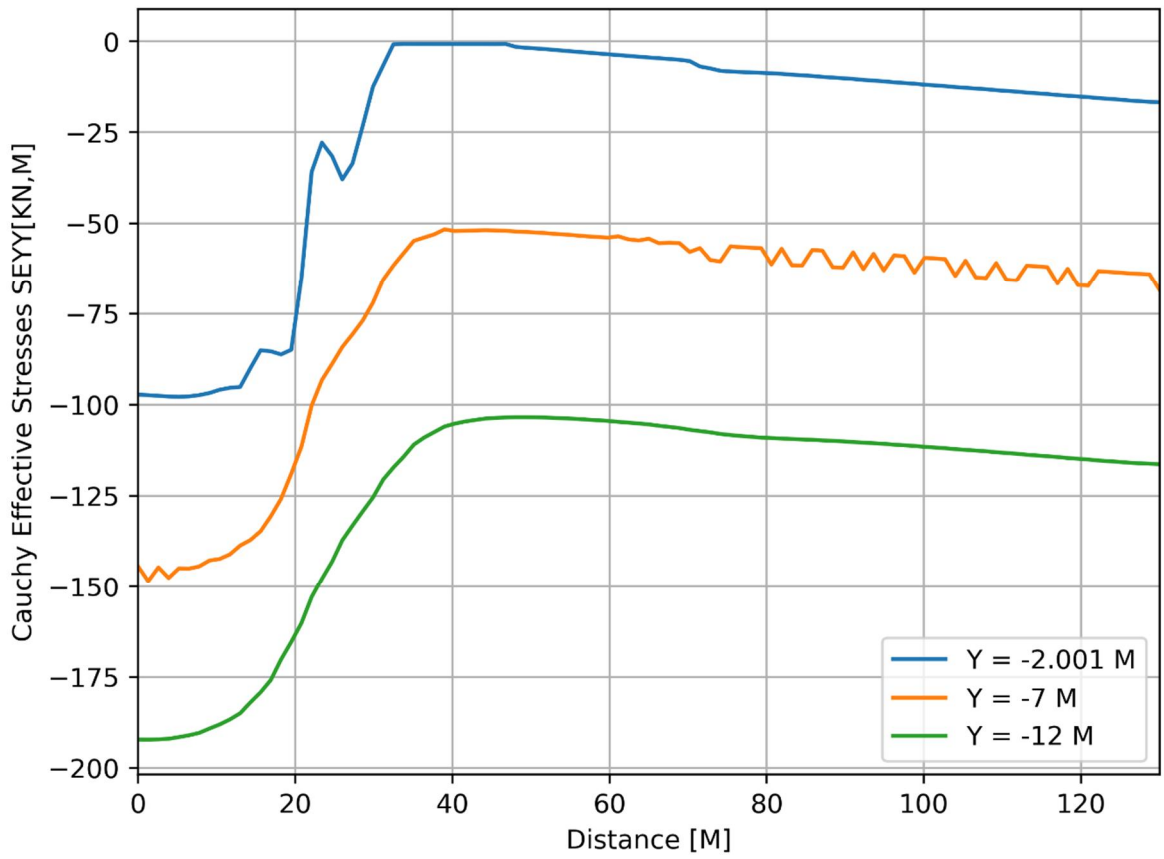


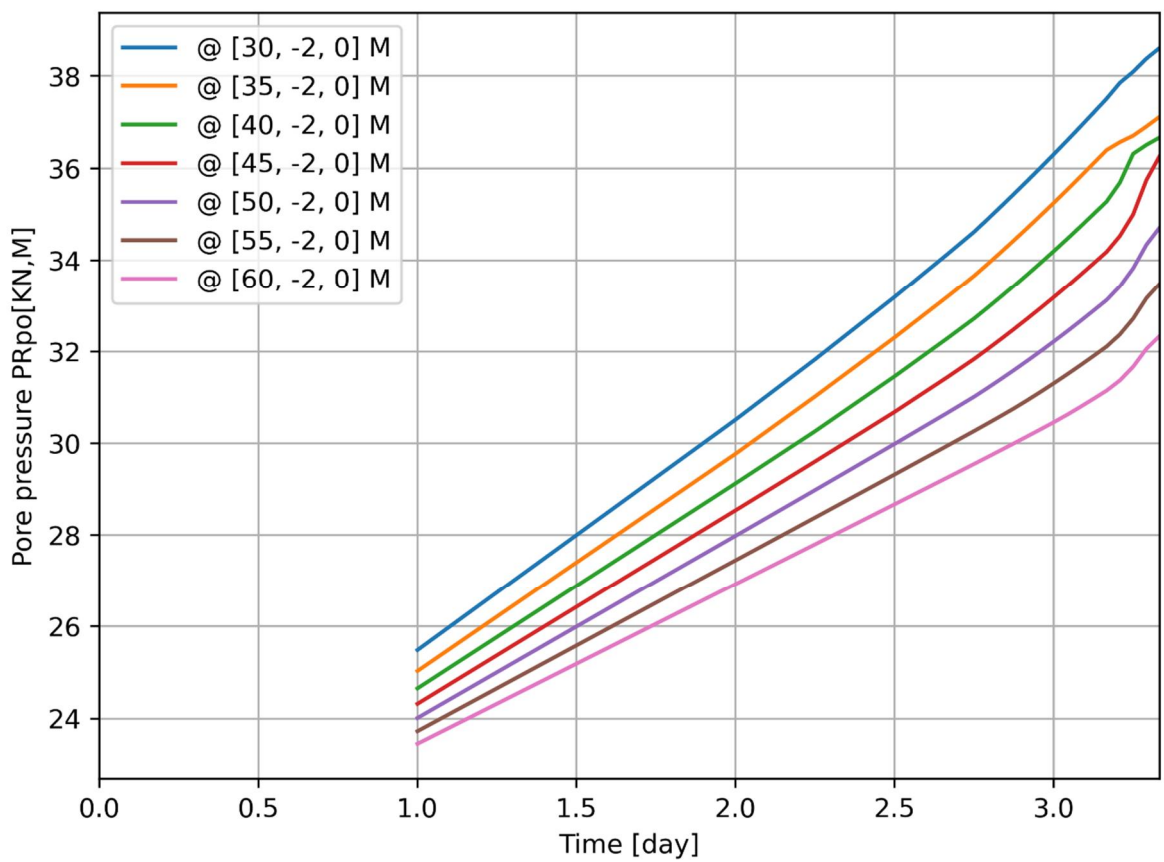
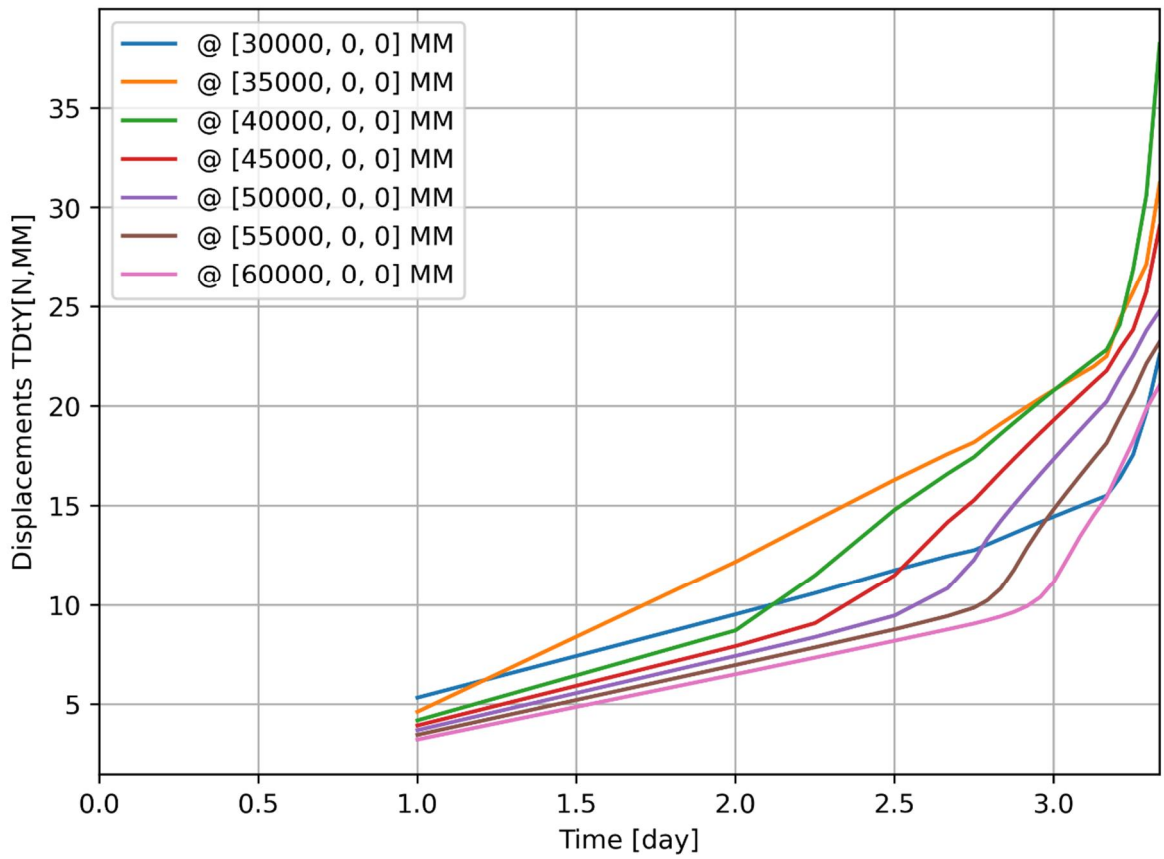
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.09kN/m<sup>2</sup> max: 23.33kN/m<sup>2</sup>

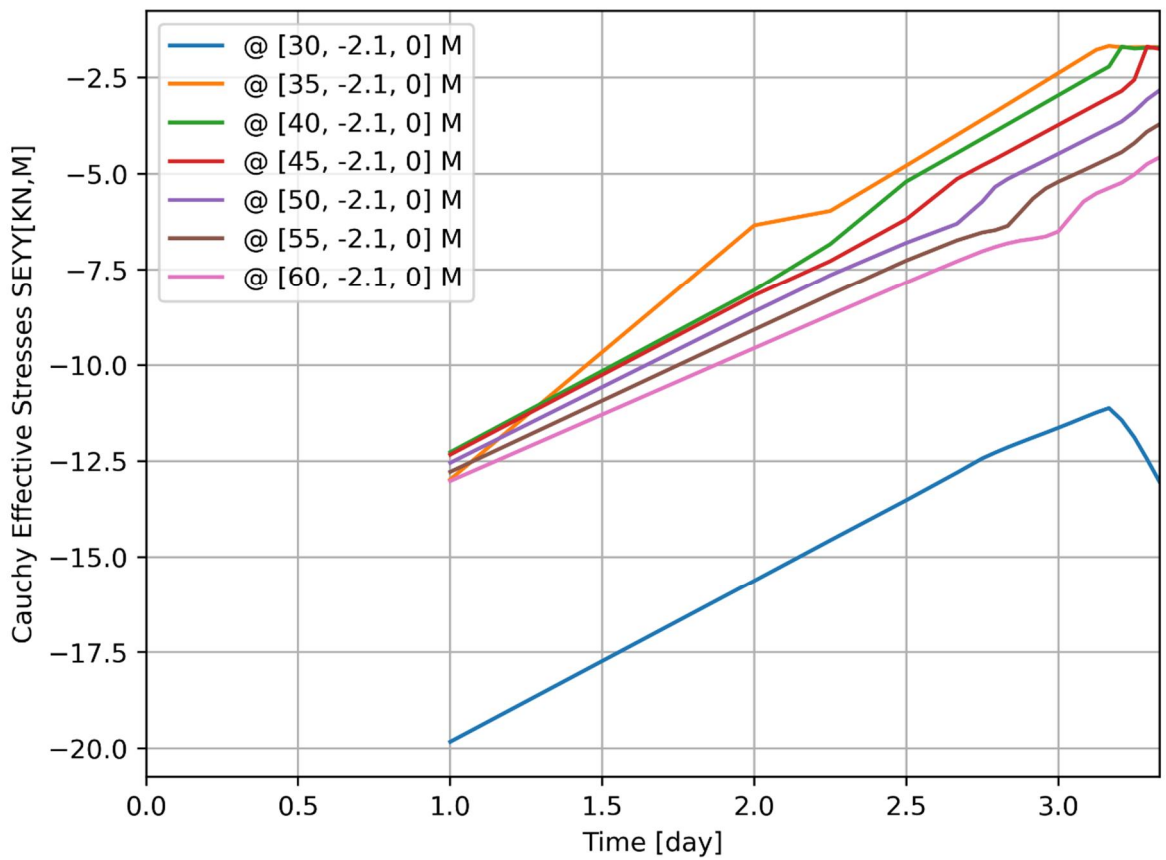
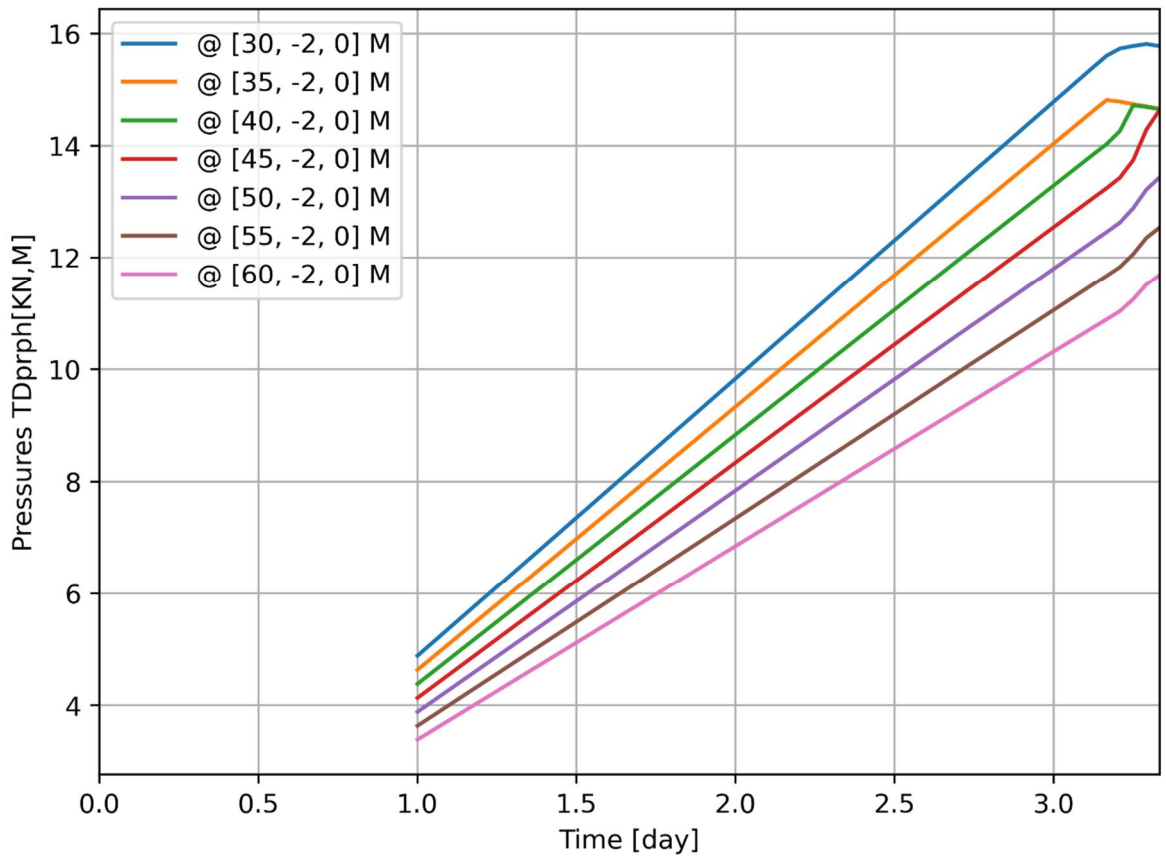


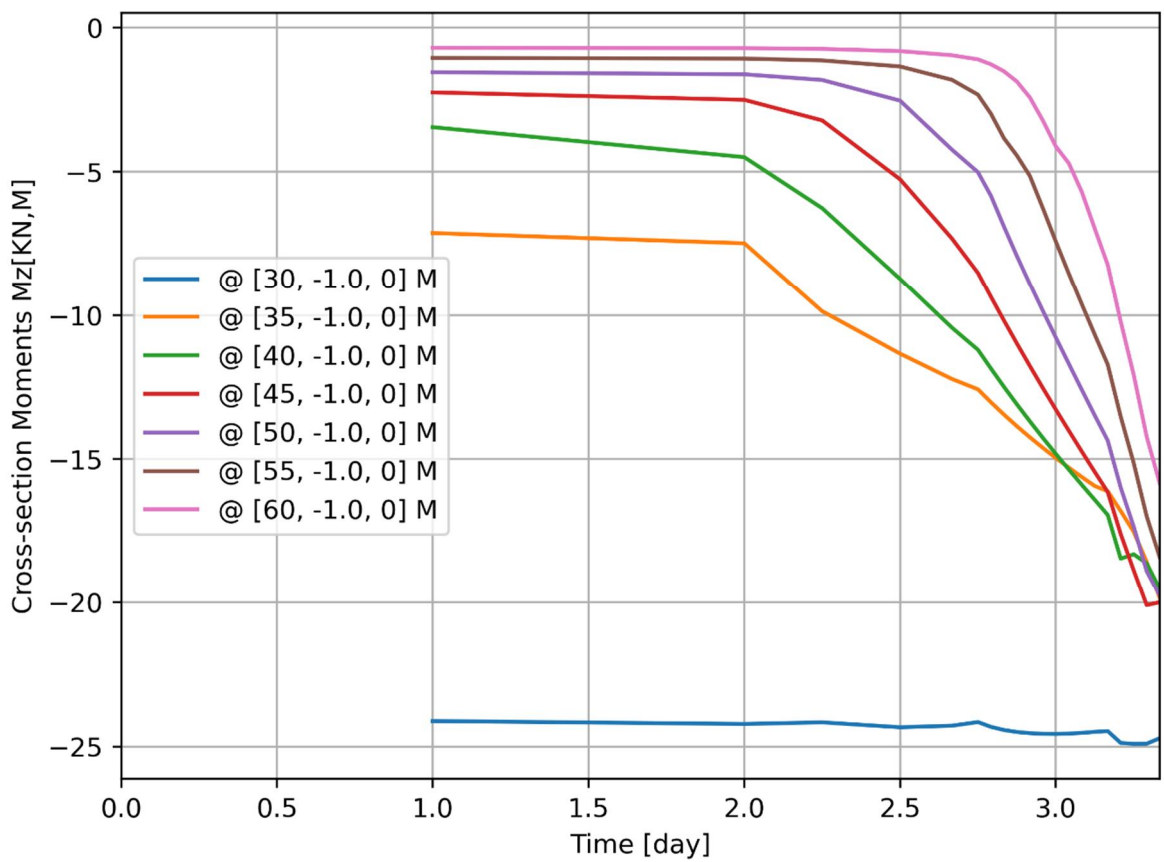
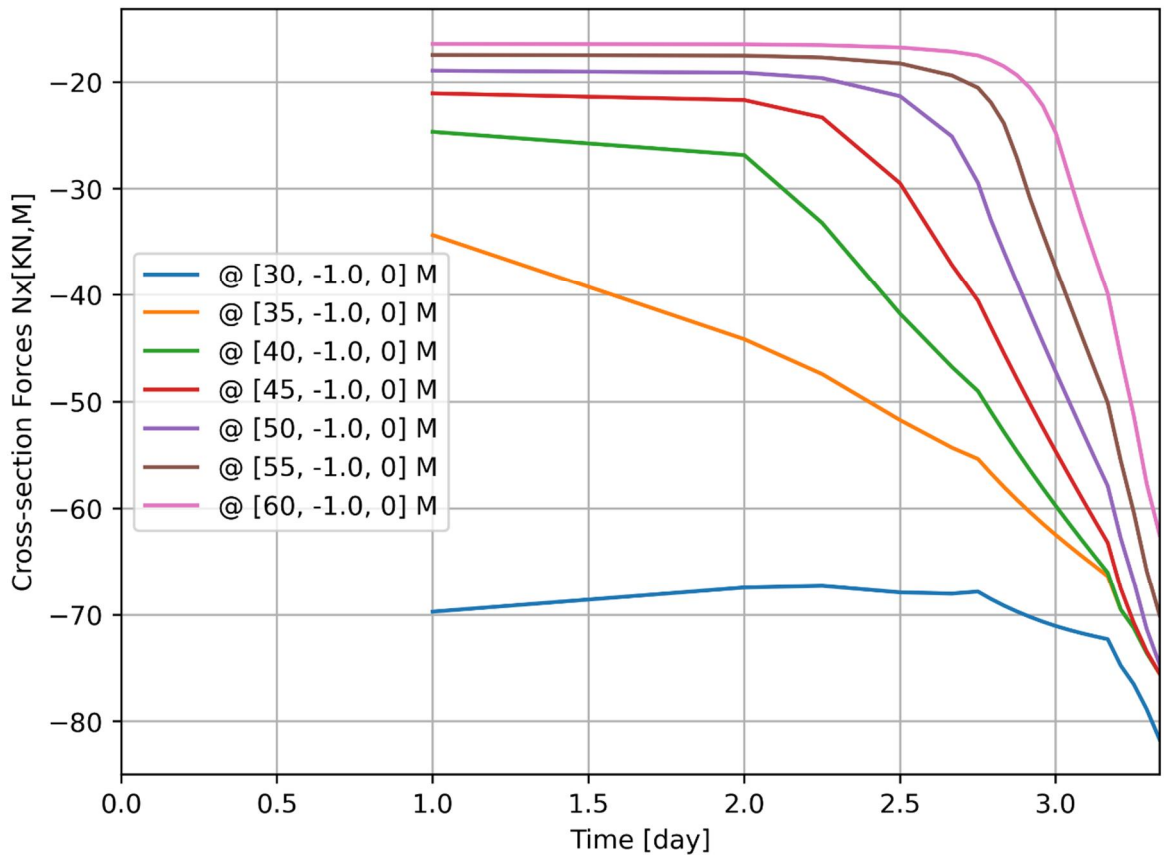
d=2\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Interface Effective Tractions STENy  
 min: -97.27kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







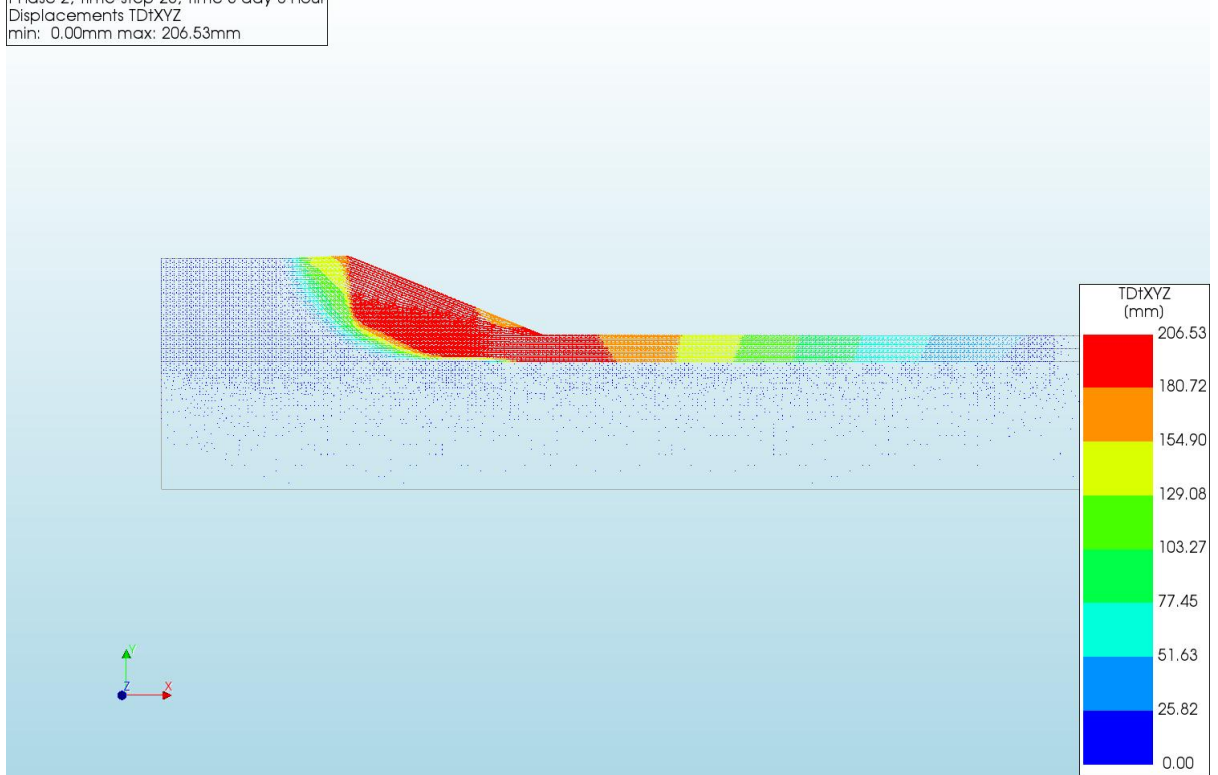




A.2.7

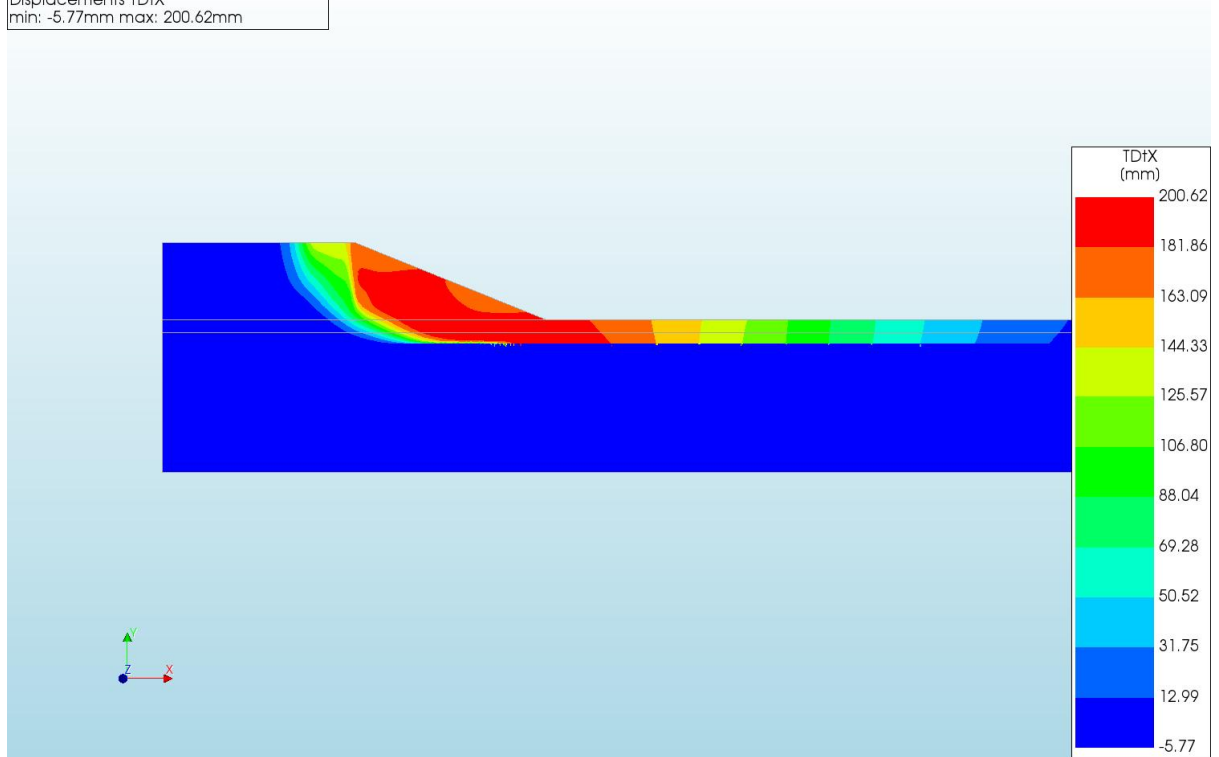
'Output\_d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 206.53mm

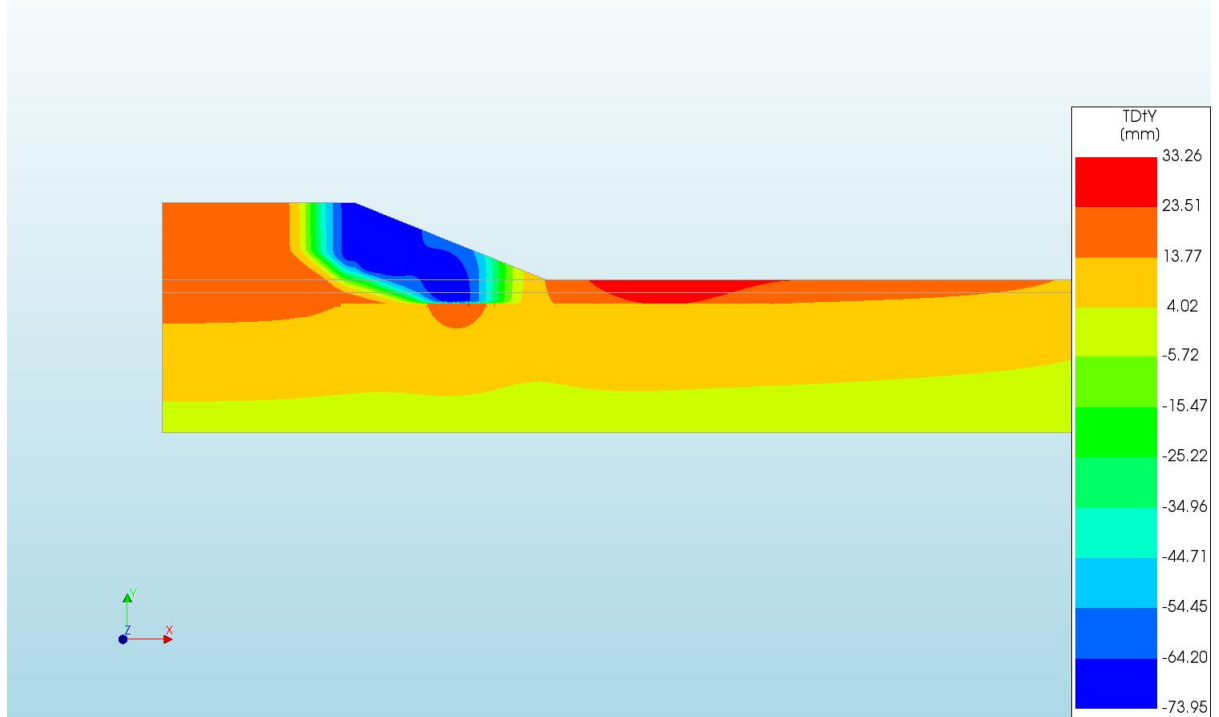




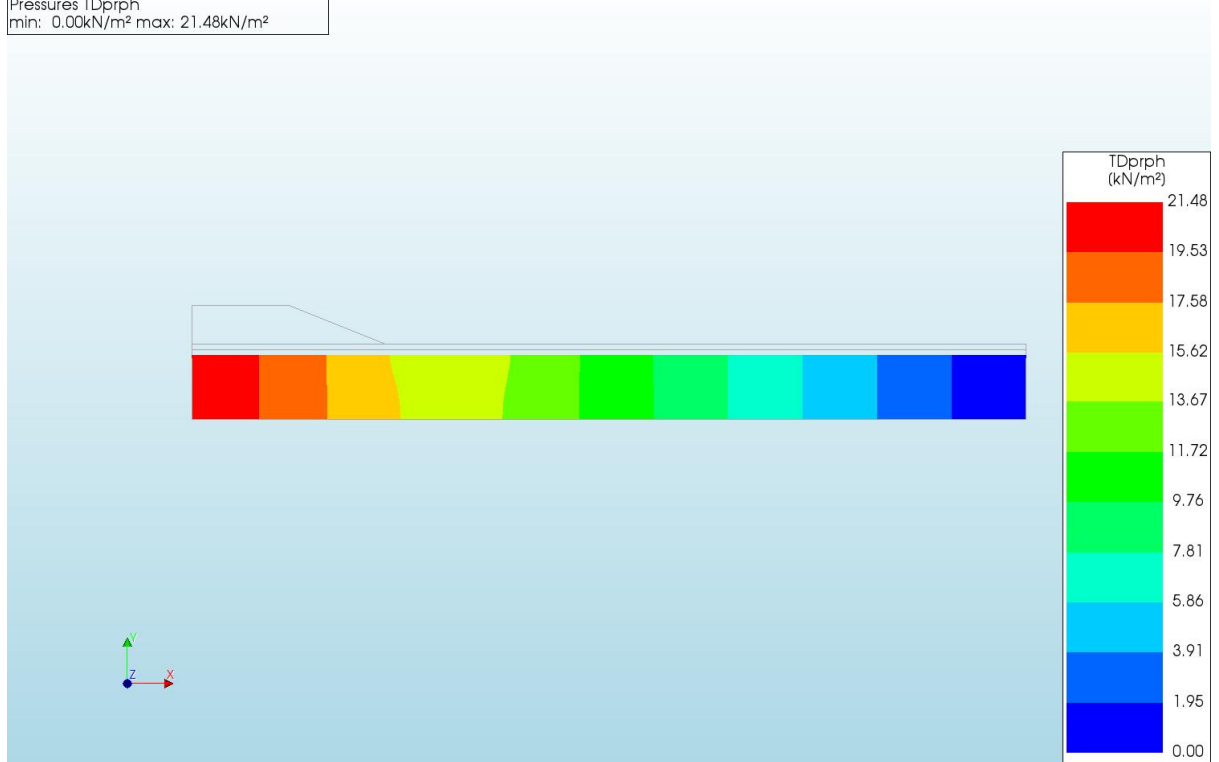
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtX  
min: -5.77mm max: 200.62mm



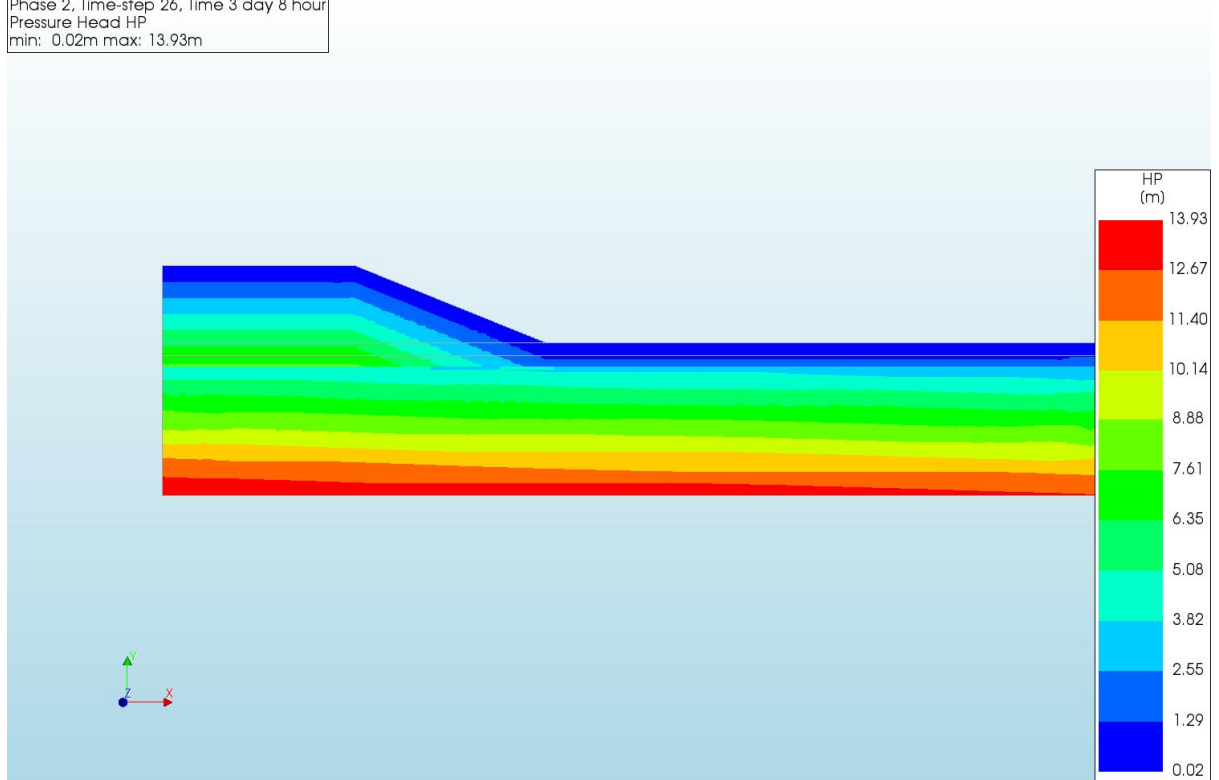
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtY  
min: -73.95mm max: 33.26mm



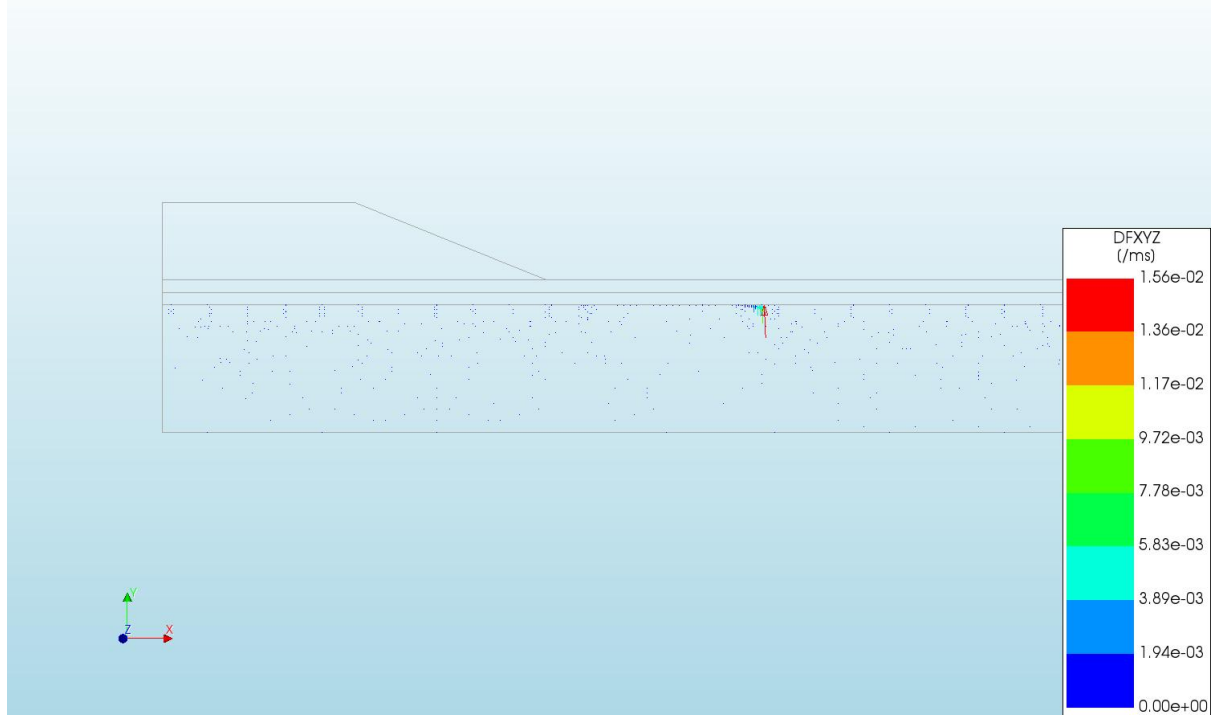
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 21.48kN/m<sup>2</sup>



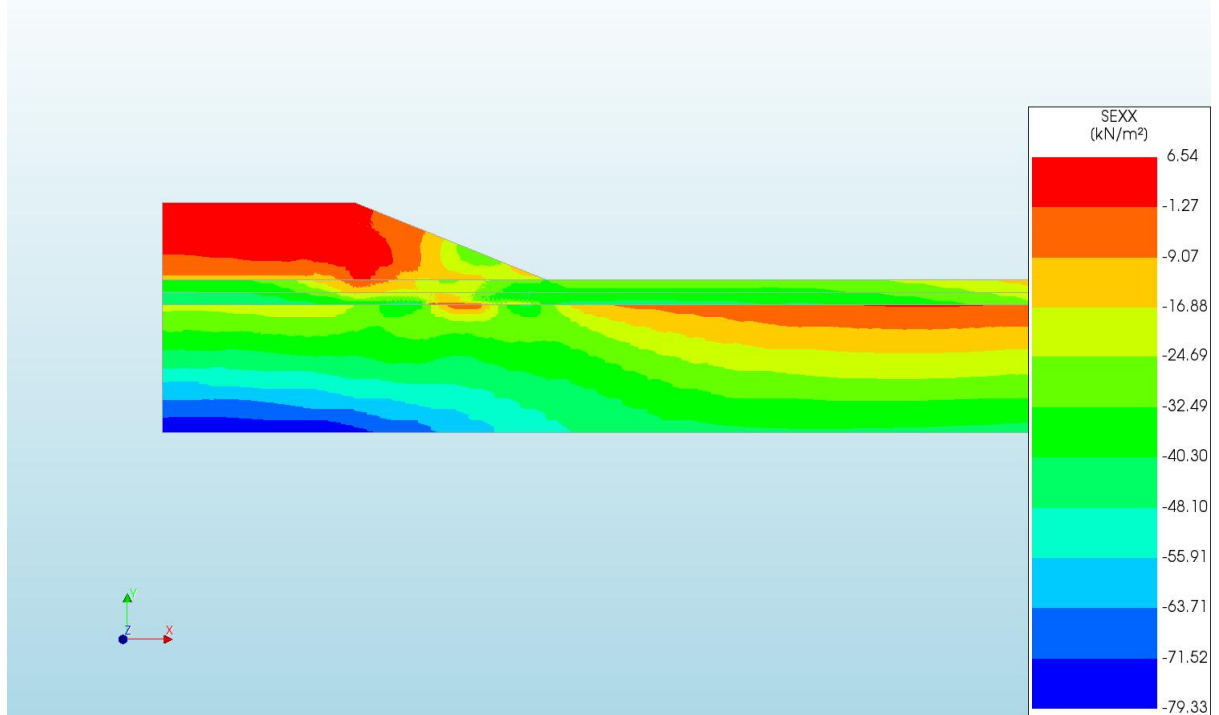
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.93m



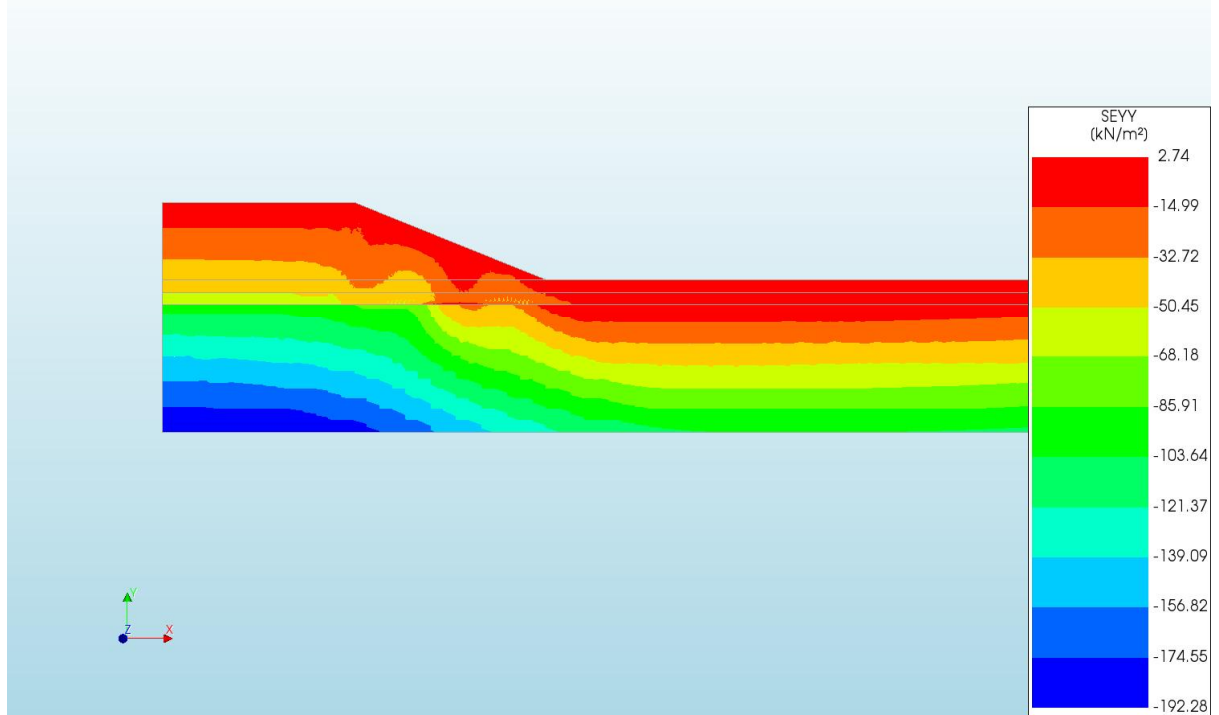
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.56e-02/ms



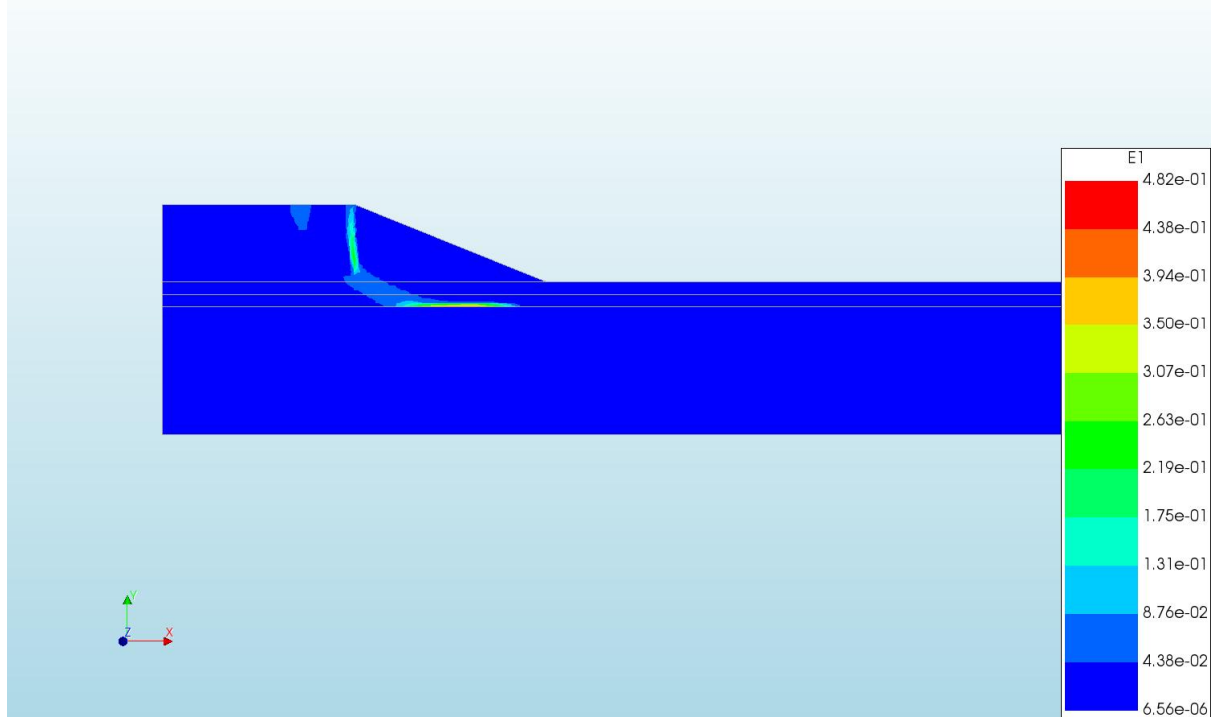
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.33kN/m<sup>2</sup> max: 6.54kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.28kN/m<sup>2</sup> max: 2.74kN/m<sup>2</sup>



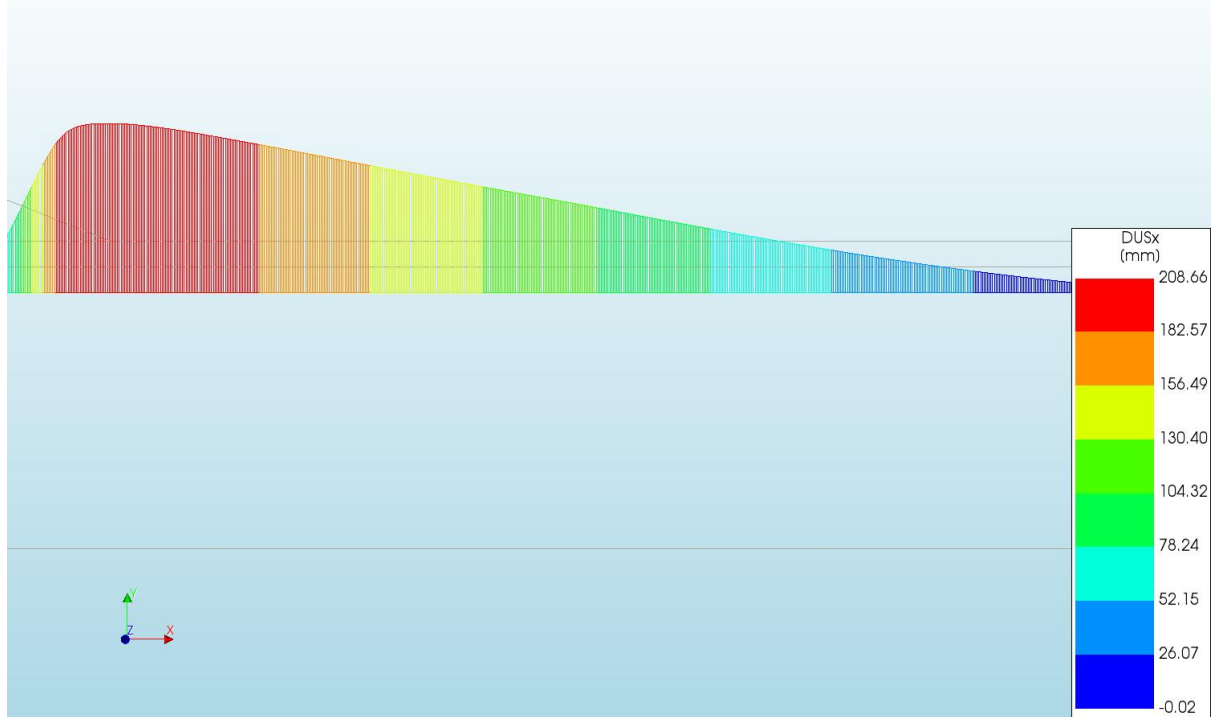
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Total Strains E1  
min: 6.56e-06 max: 4.82e-01



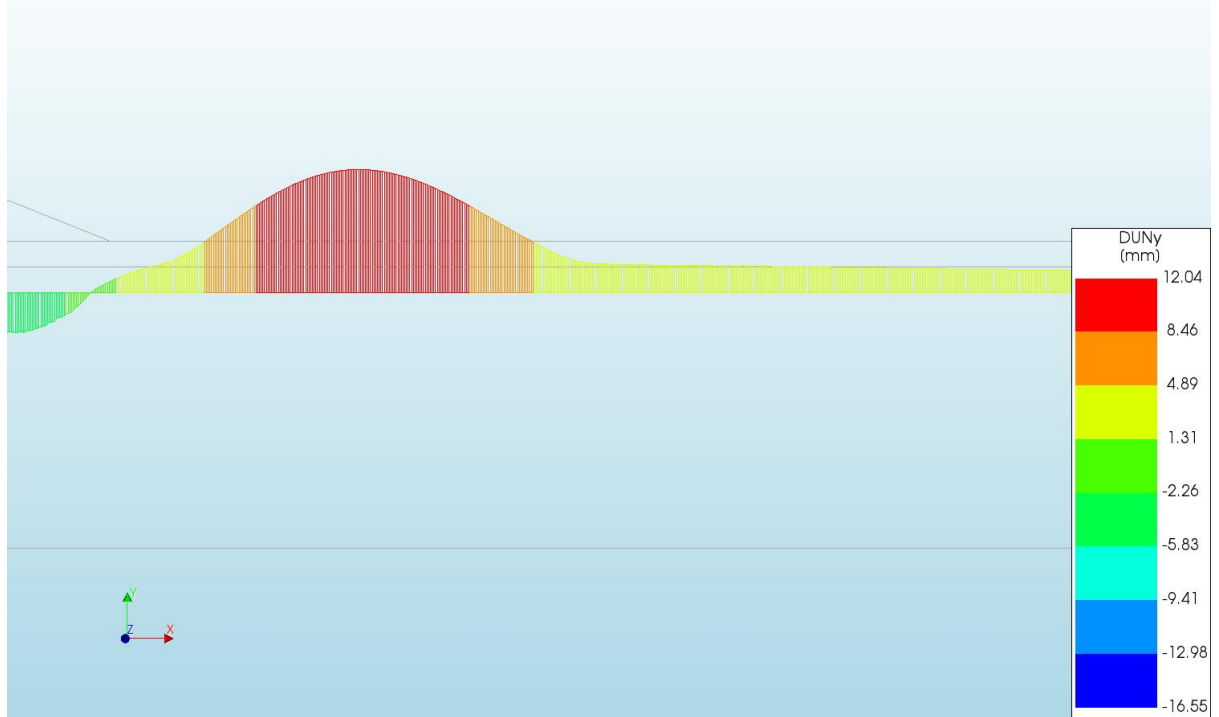
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.03e-01



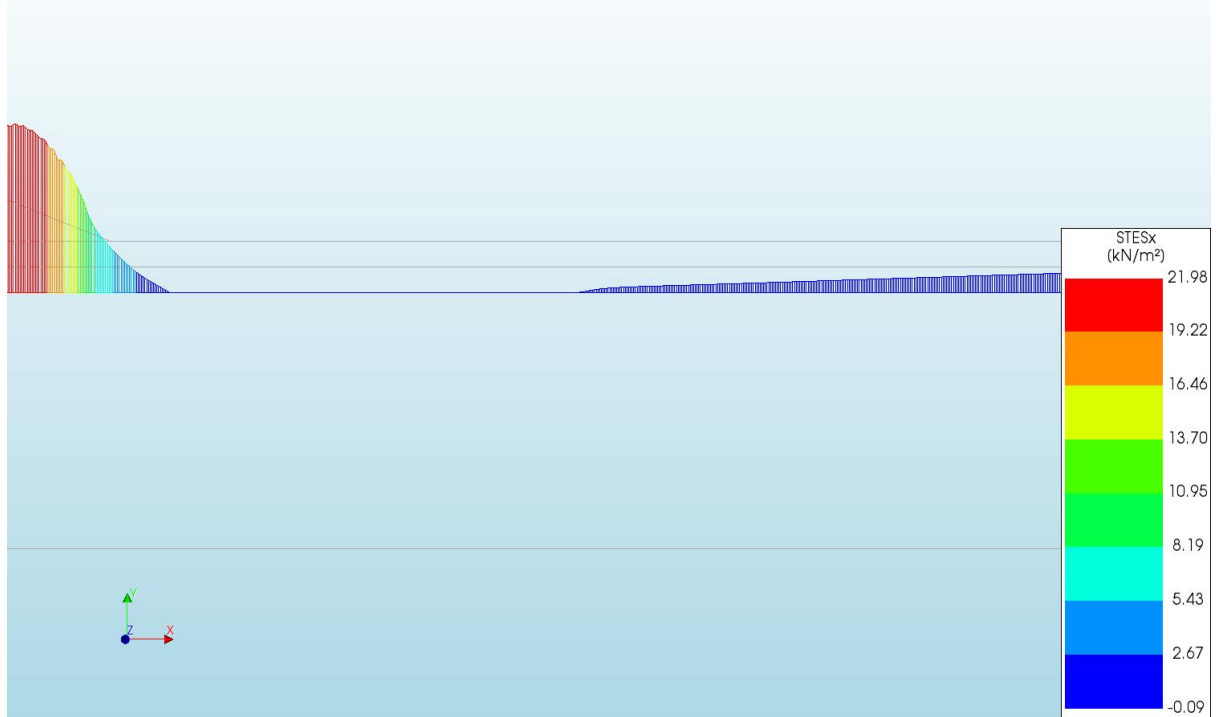
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 208.66mm



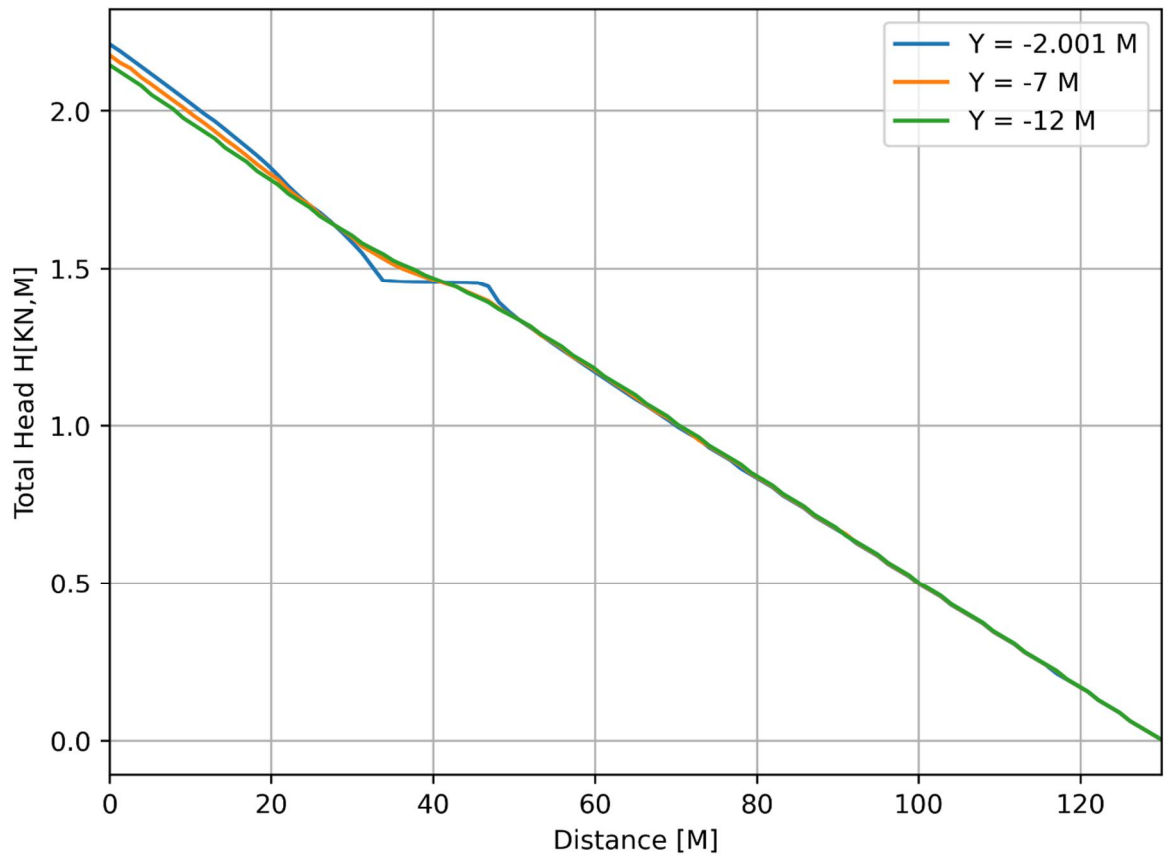
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.55mm max: 12.04mm

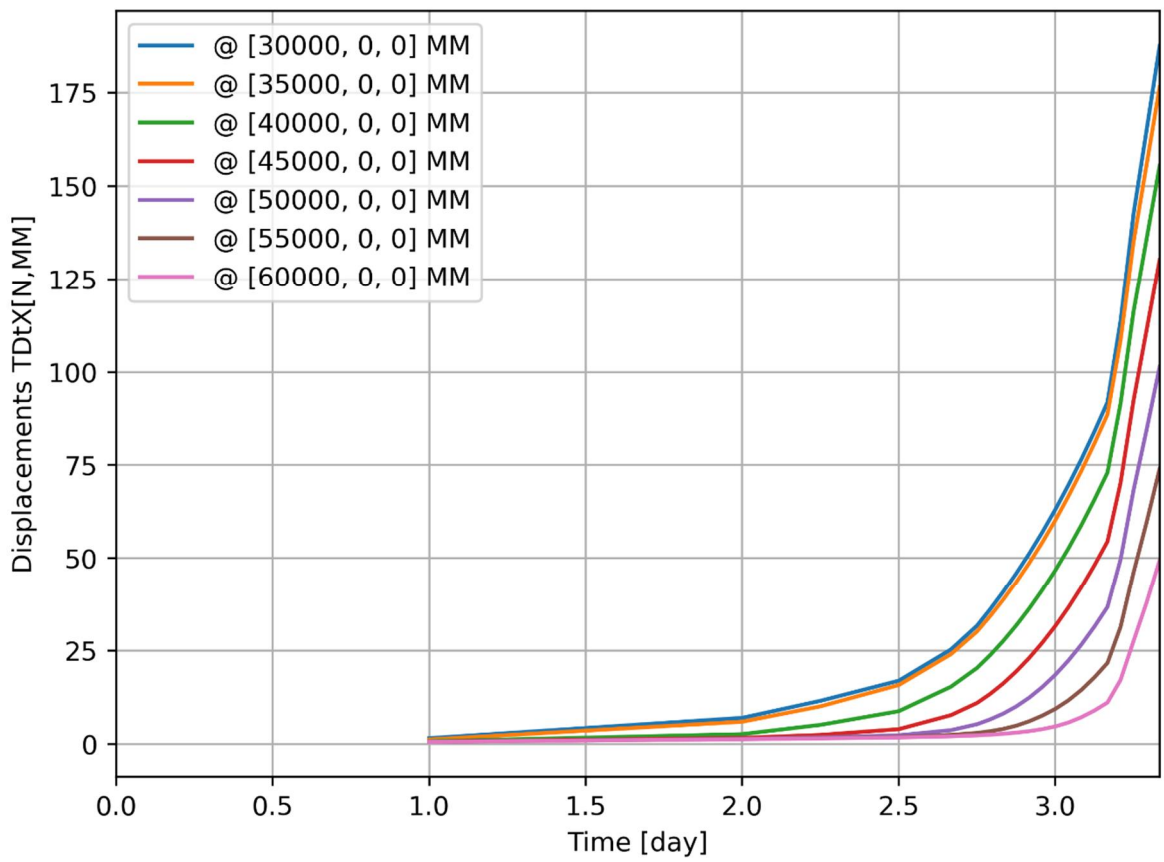
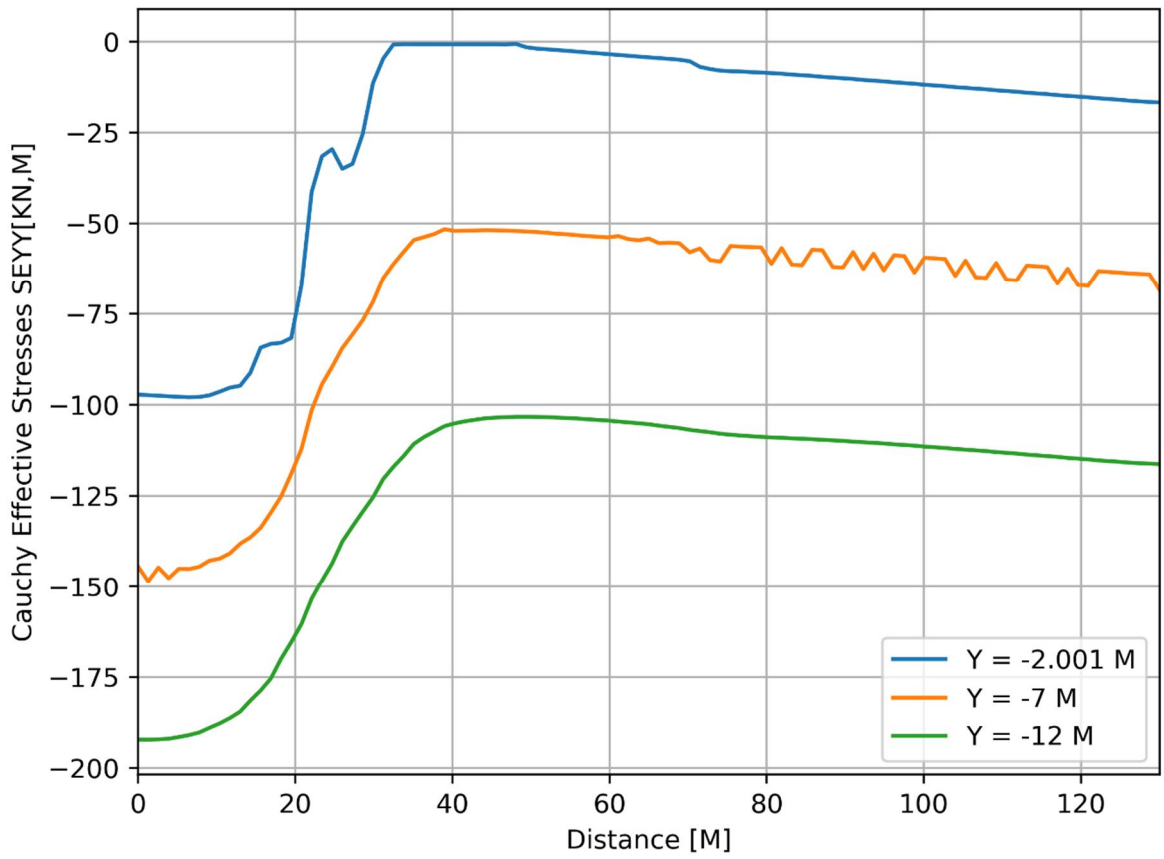


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.09kN/m<sup>2</sup> max: 21.98kN/m<sup>2</sup>

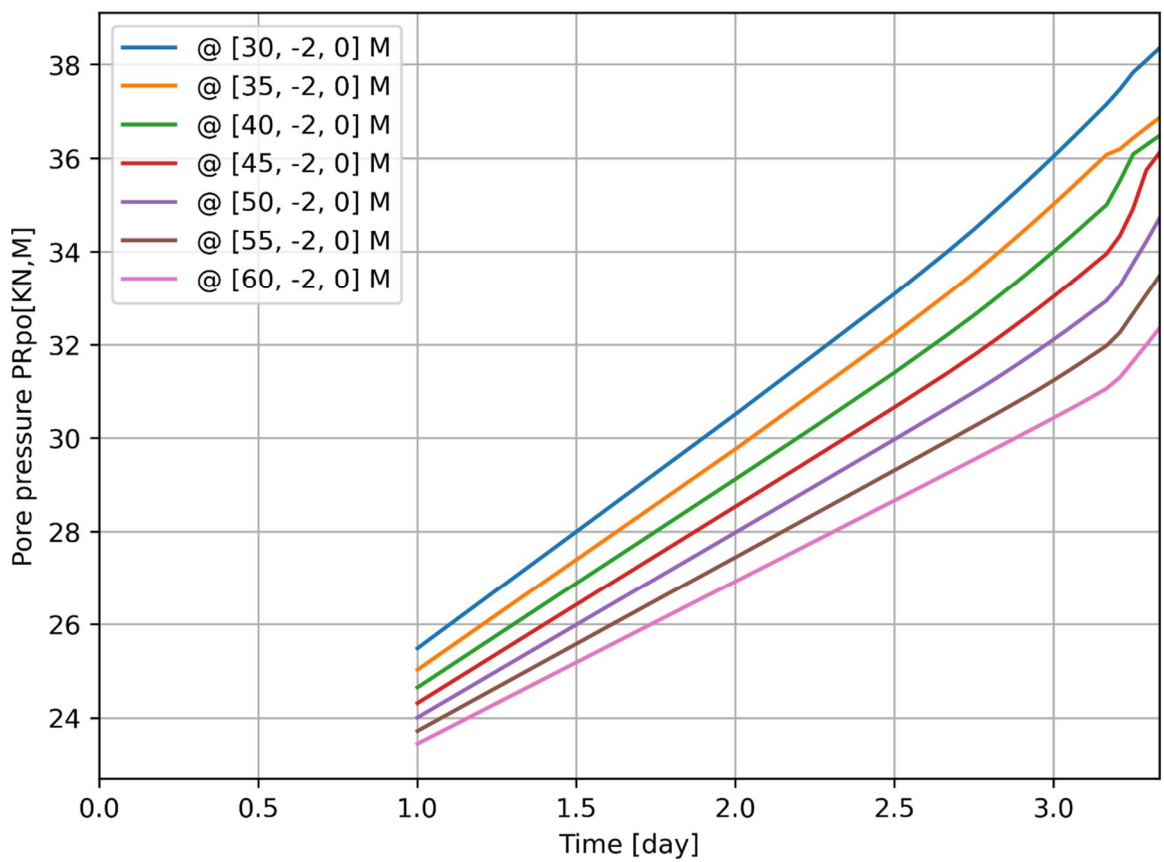
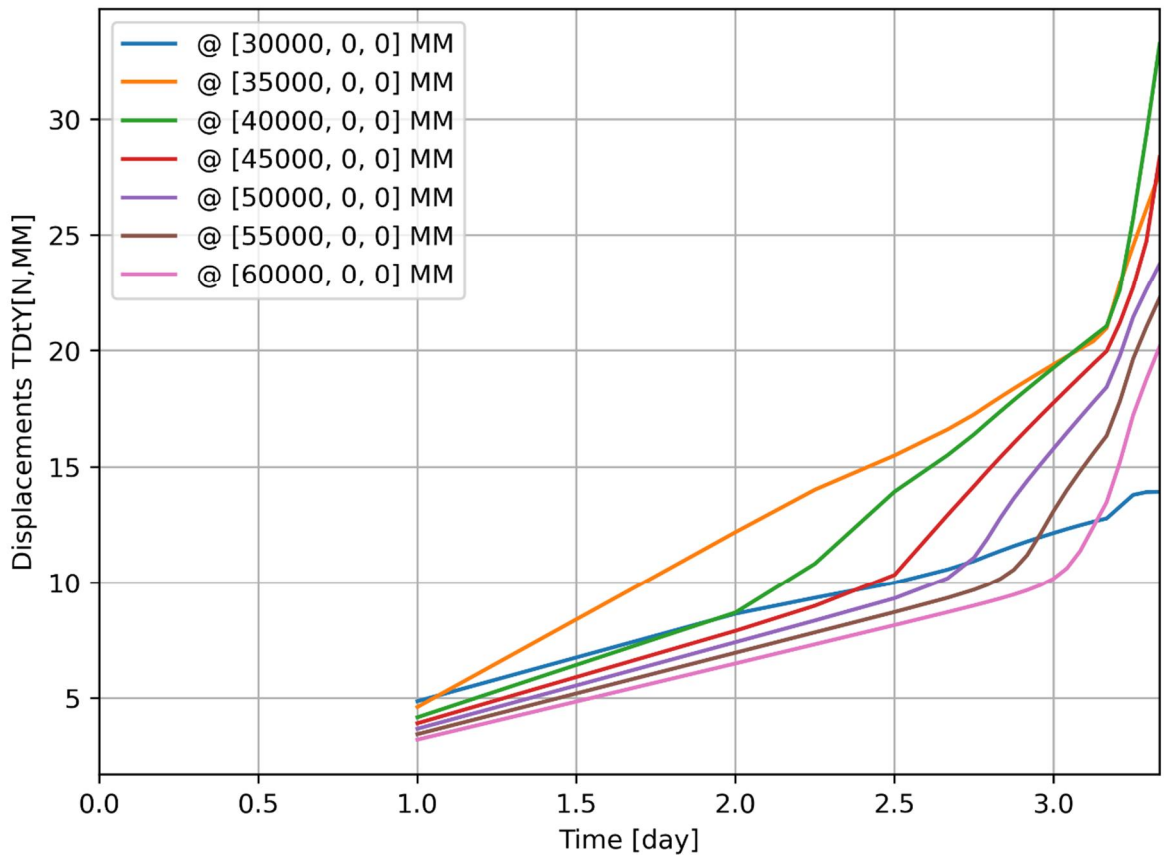


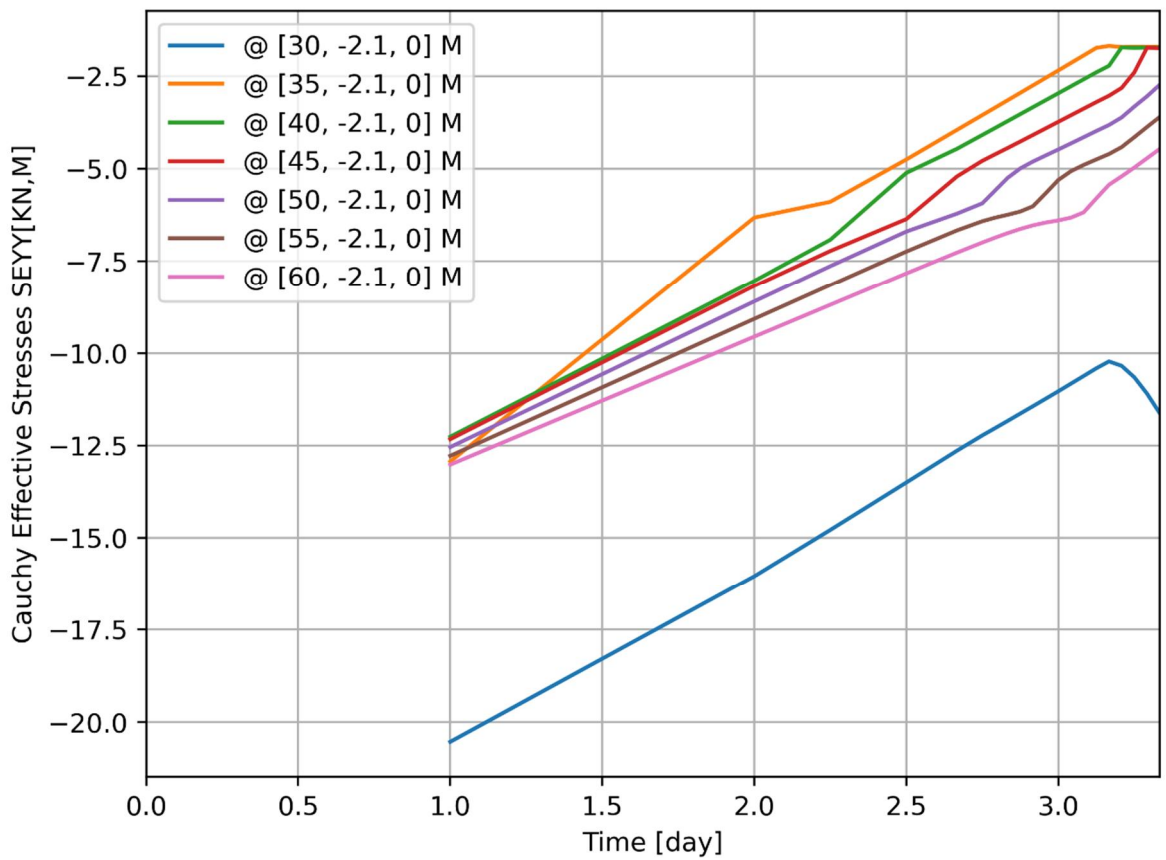
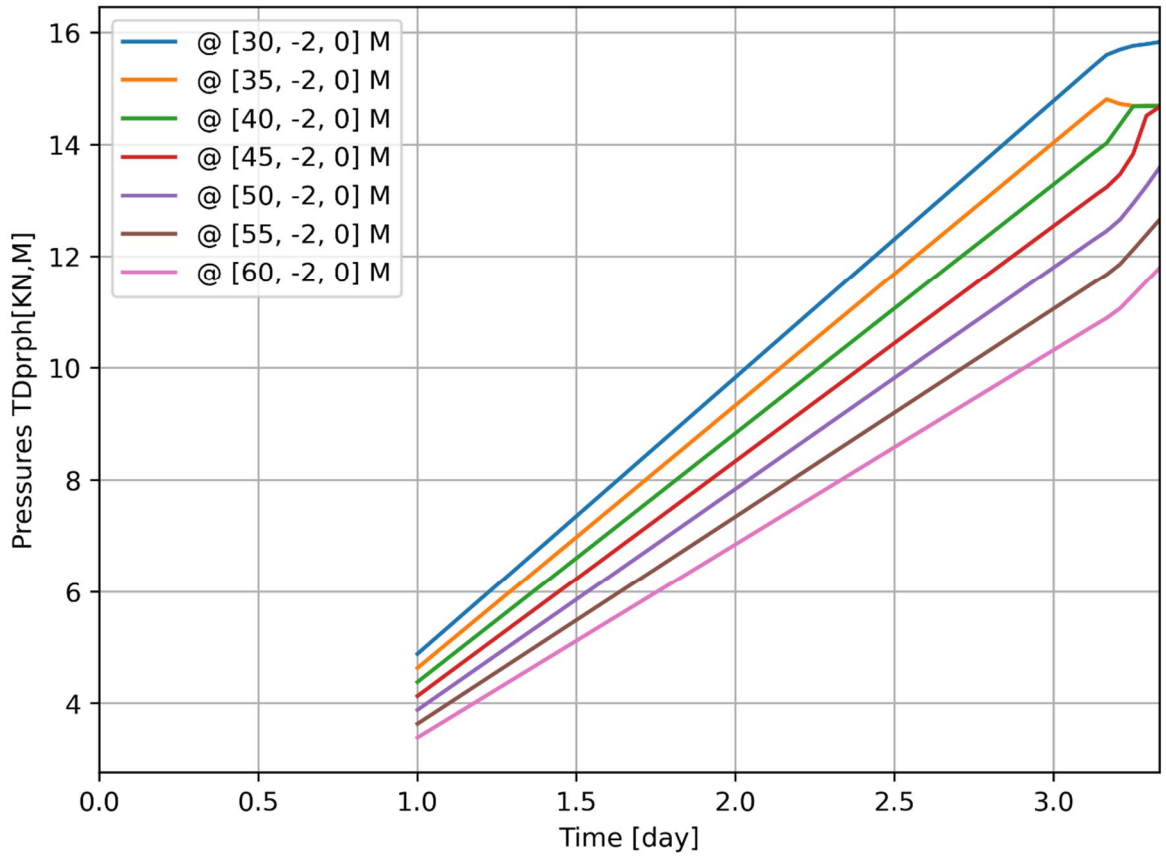
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Interface Effective Tractions STENy  
 min: -97.42kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

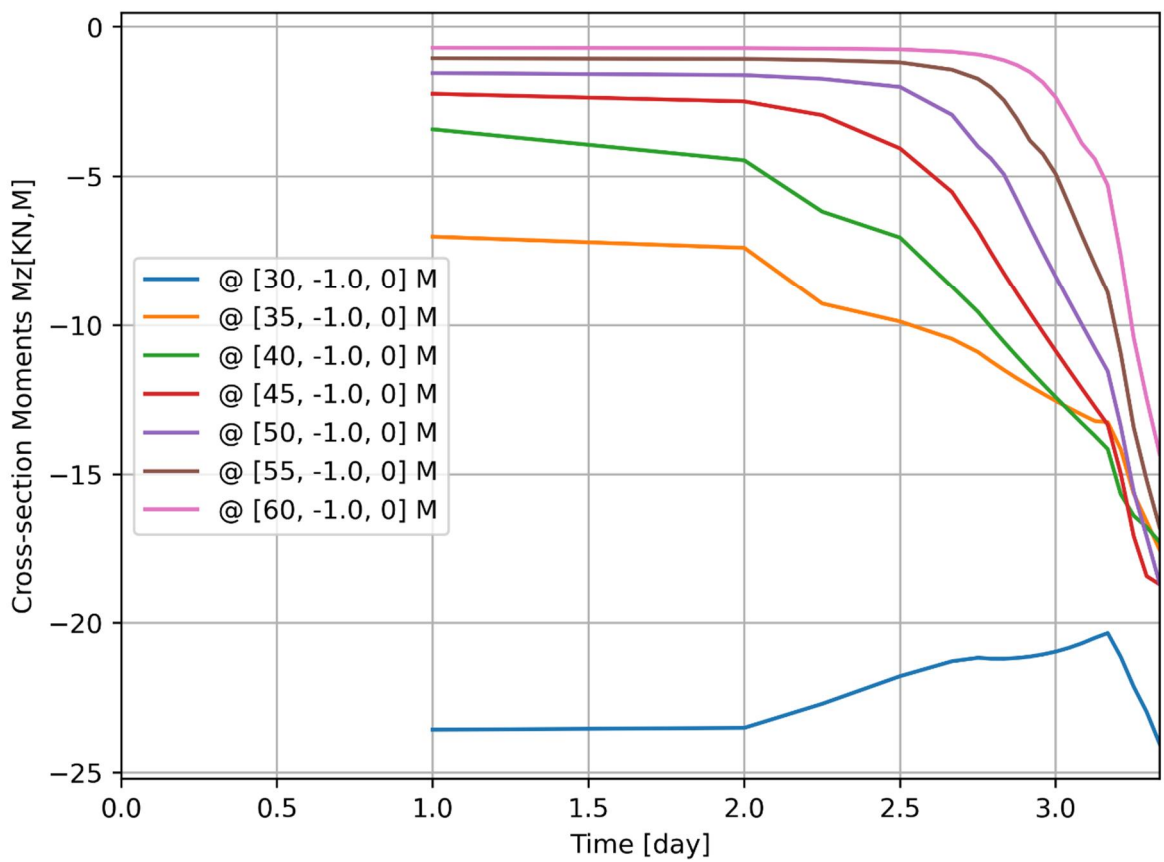
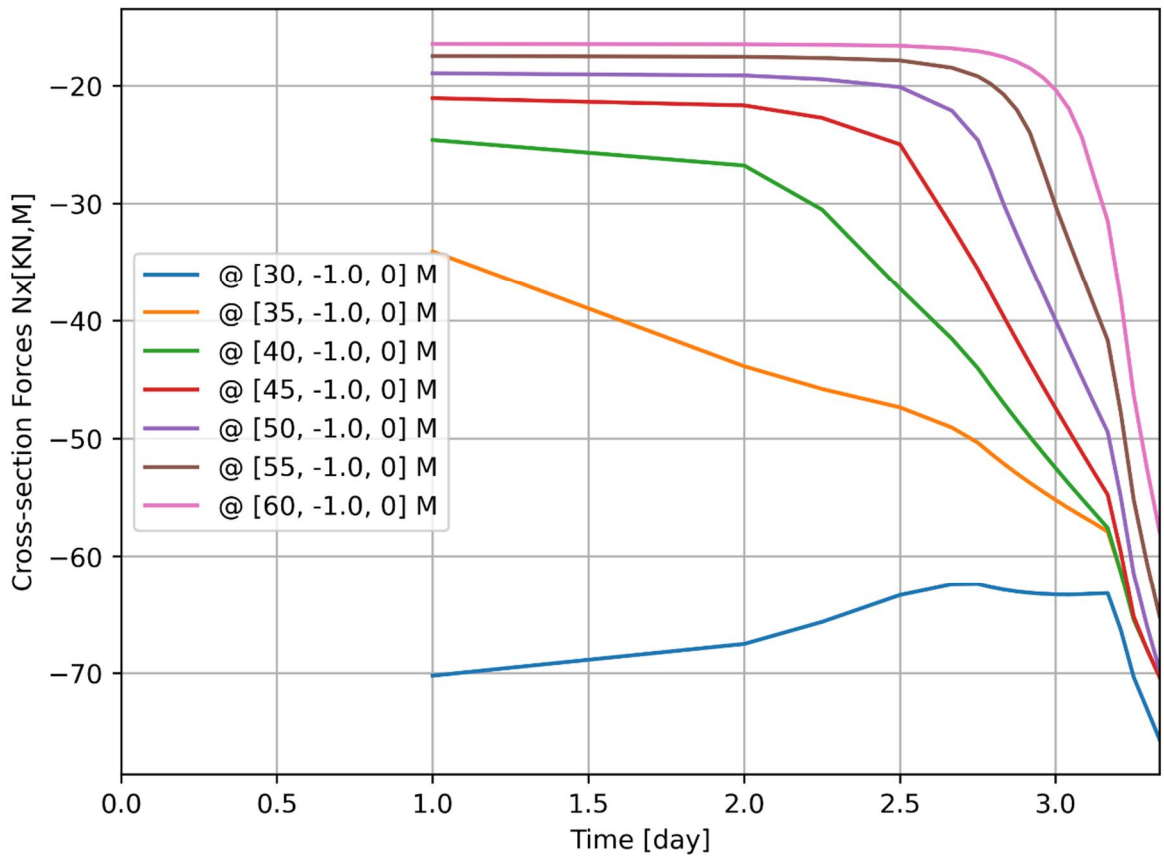








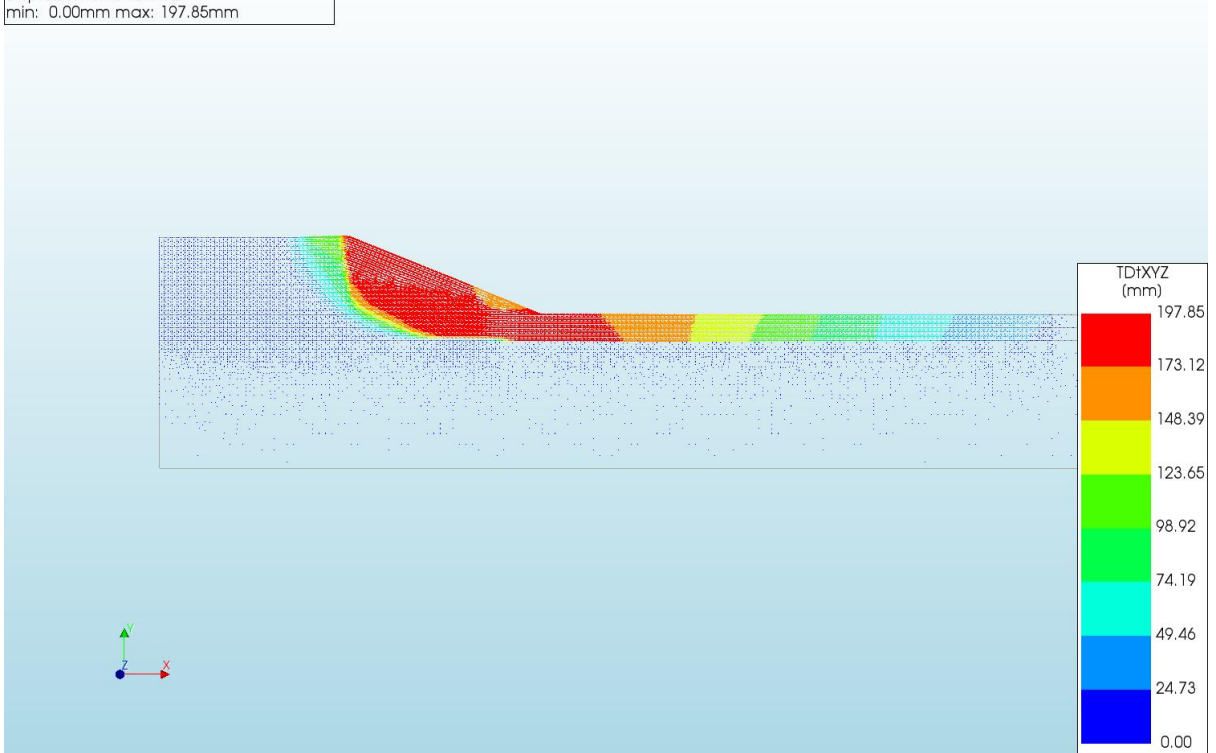




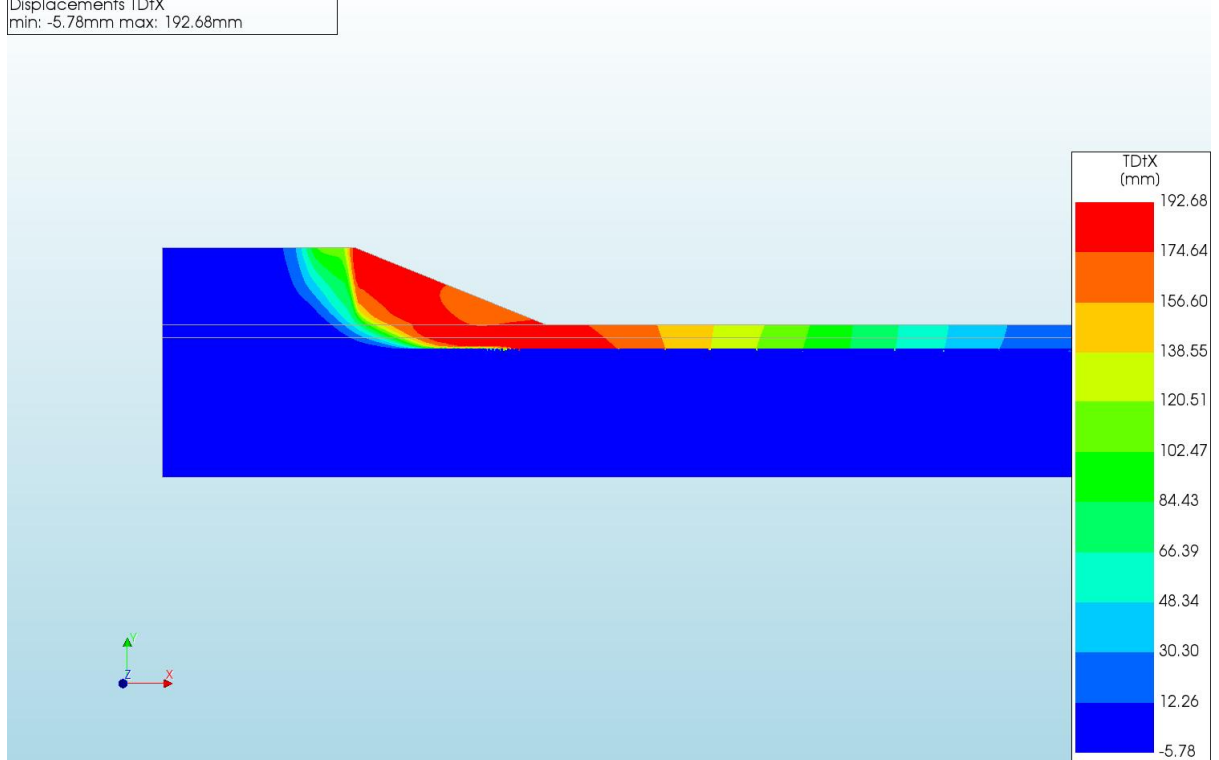
A.2.8

'Output\_d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

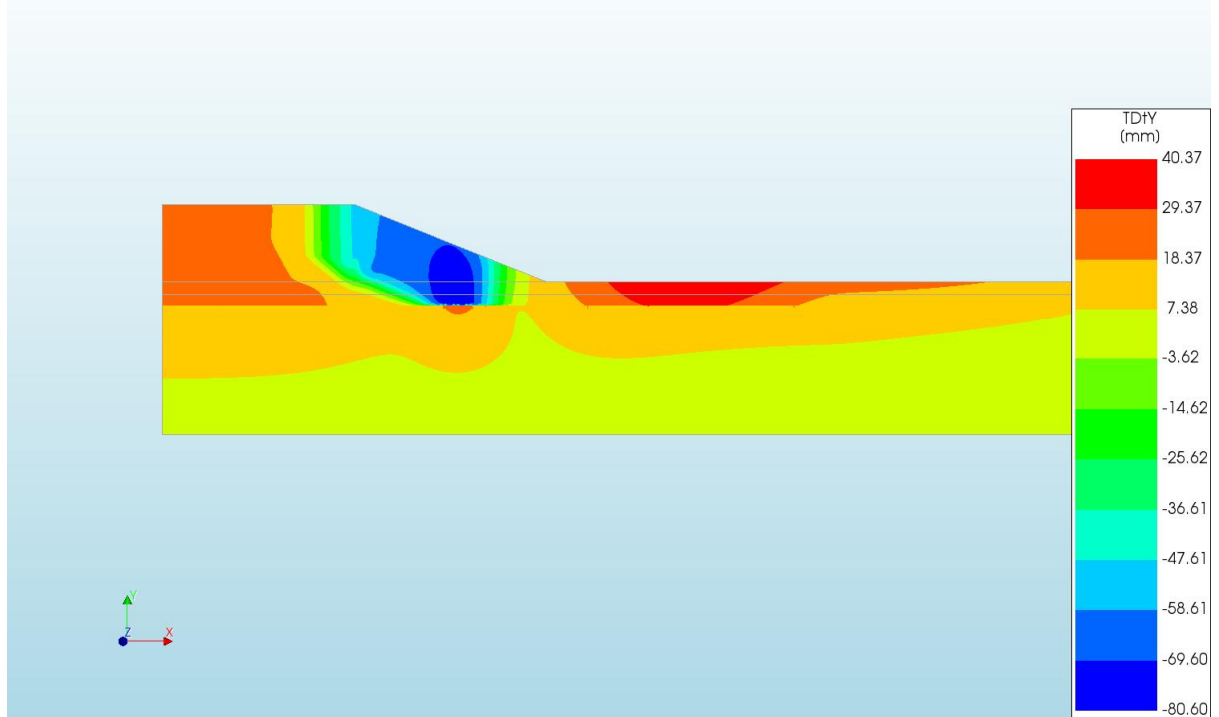
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 197.85mm



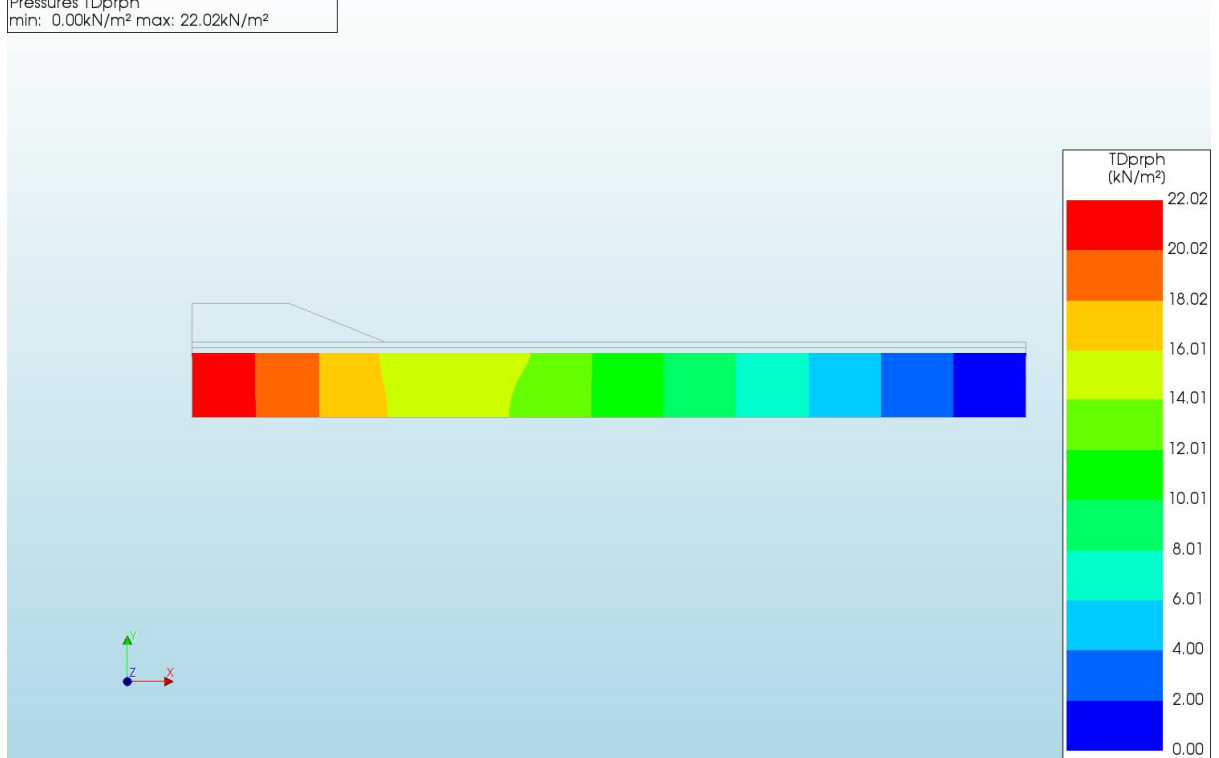
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Displacements TDtX  
min: -5.78mm max: 192.68mm



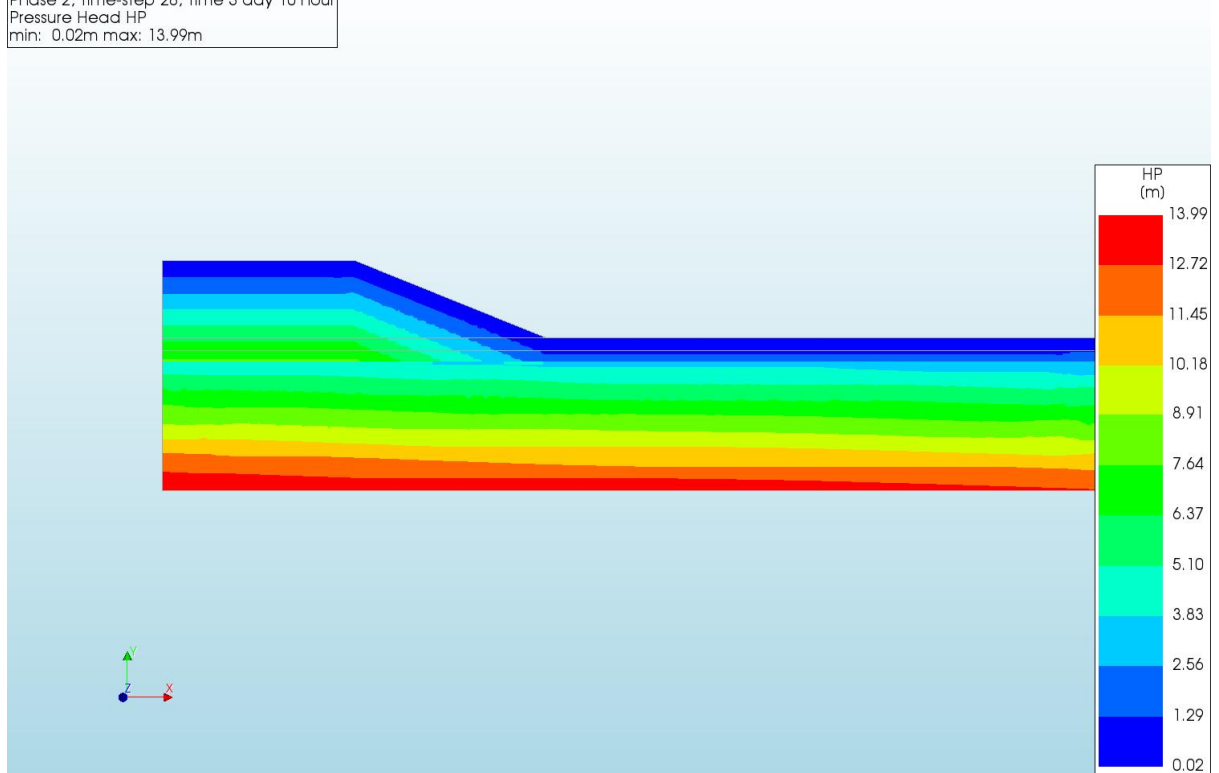
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Displacements TDtY  
min: -80.60mm max: 40.37mm



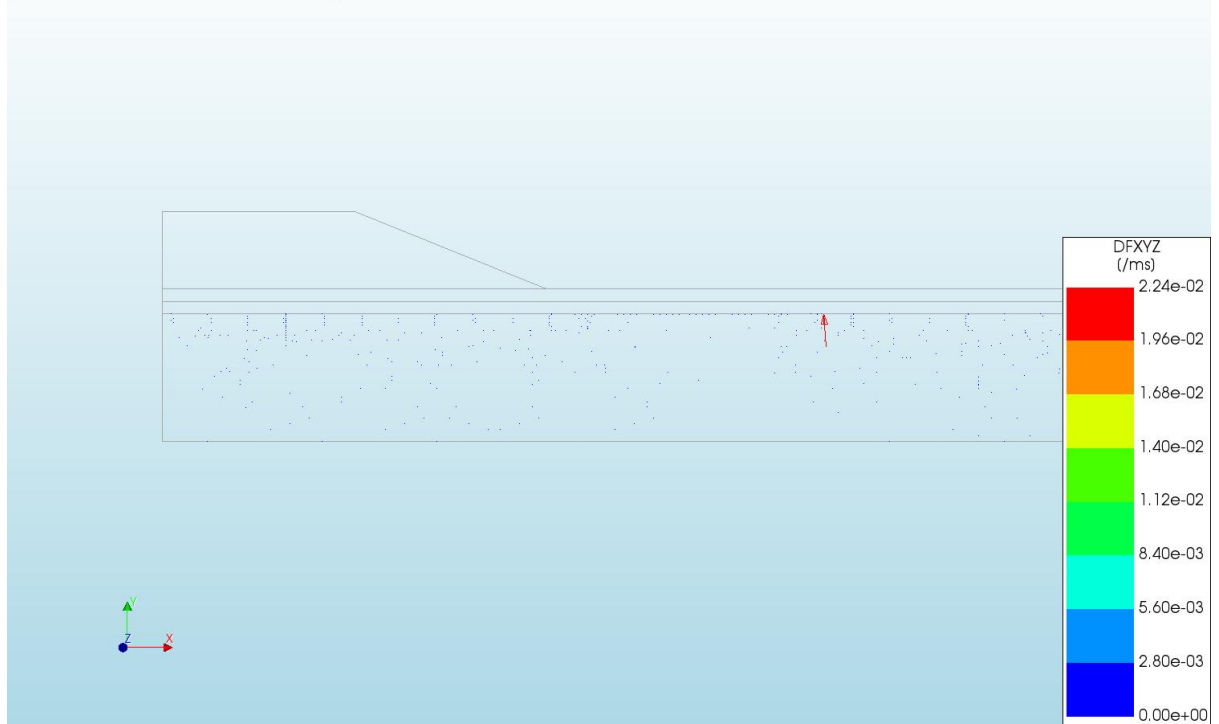
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 22.02kN/m<sup>2</sup>



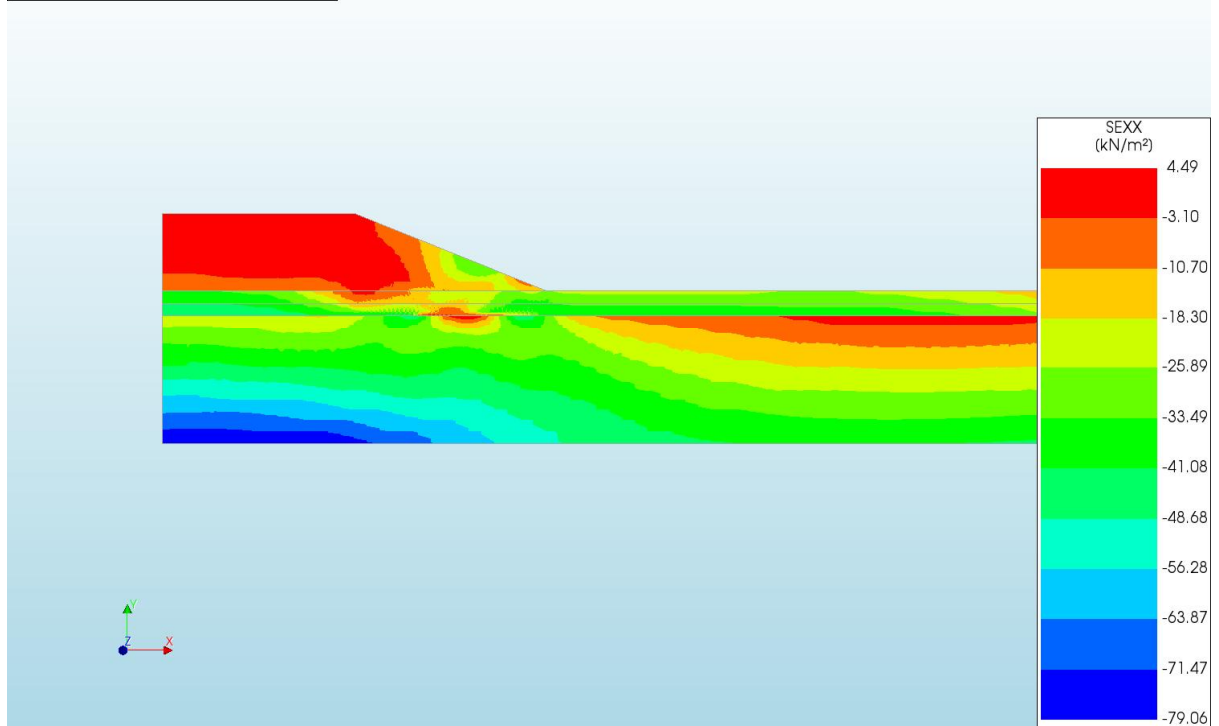
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.99m



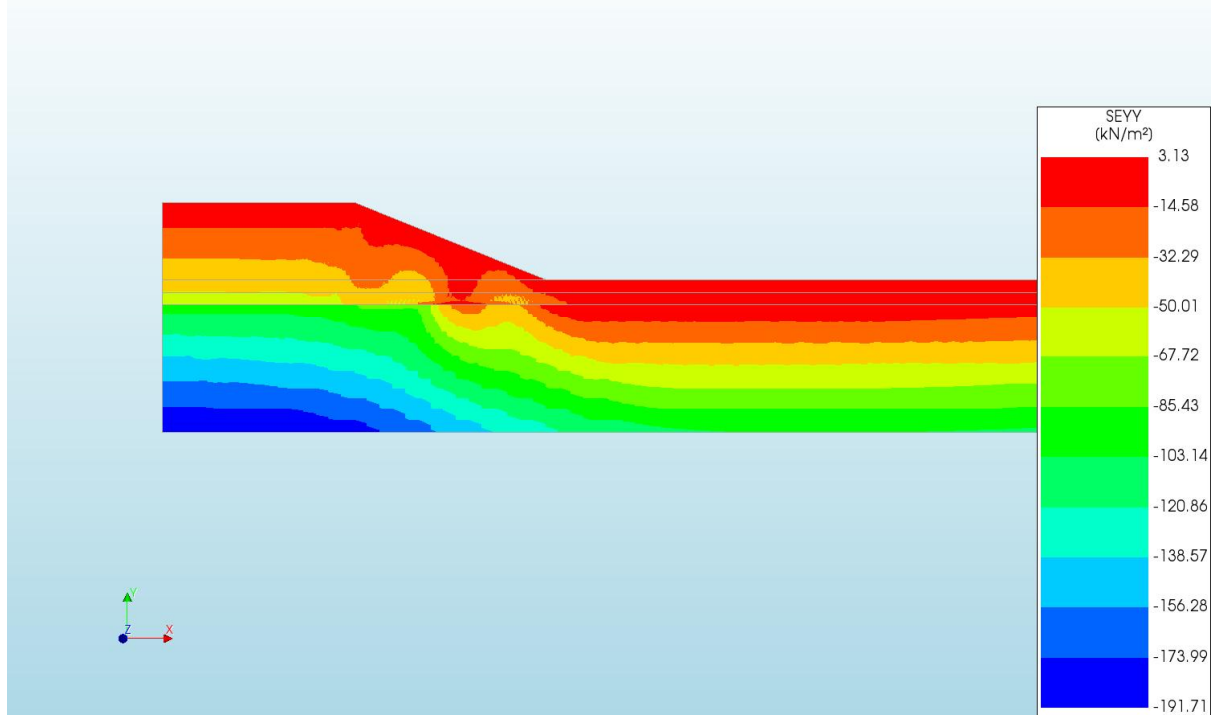
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.24e-02/ms



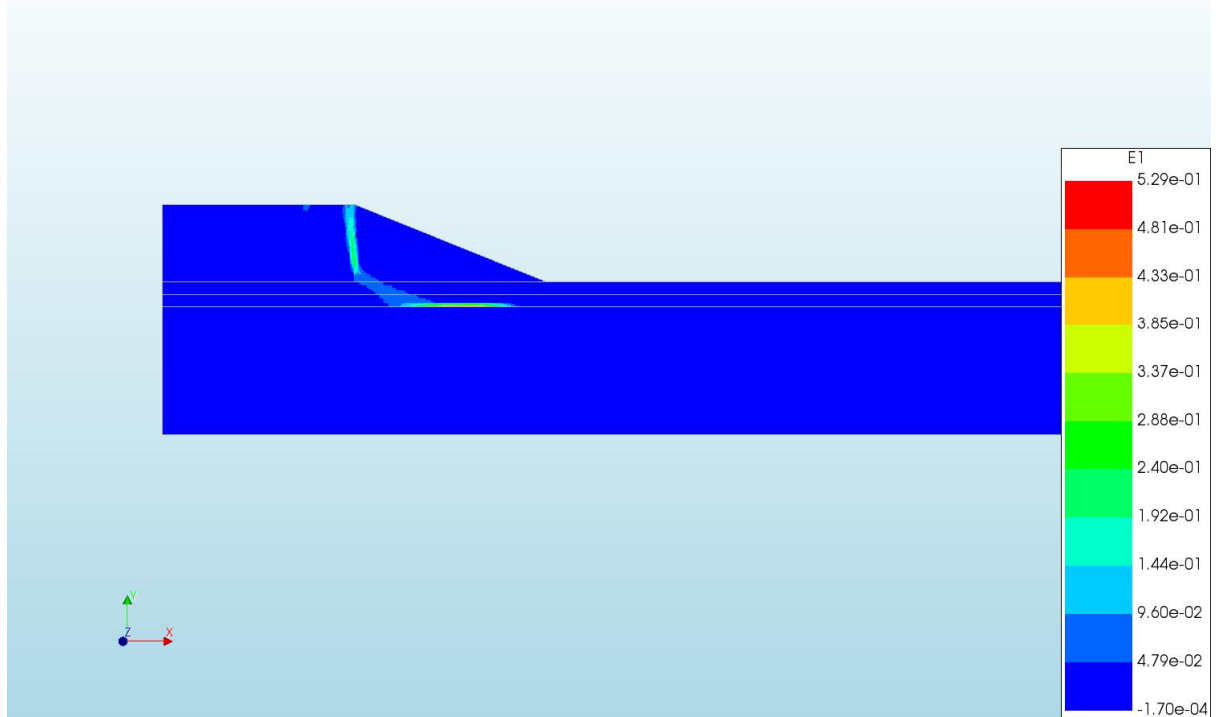
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.06kN/m<sup>2</sup> max: 4.49kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -191.71kN/m<sup>2</sup> max: 3.13kN/m<sup>2</sup>

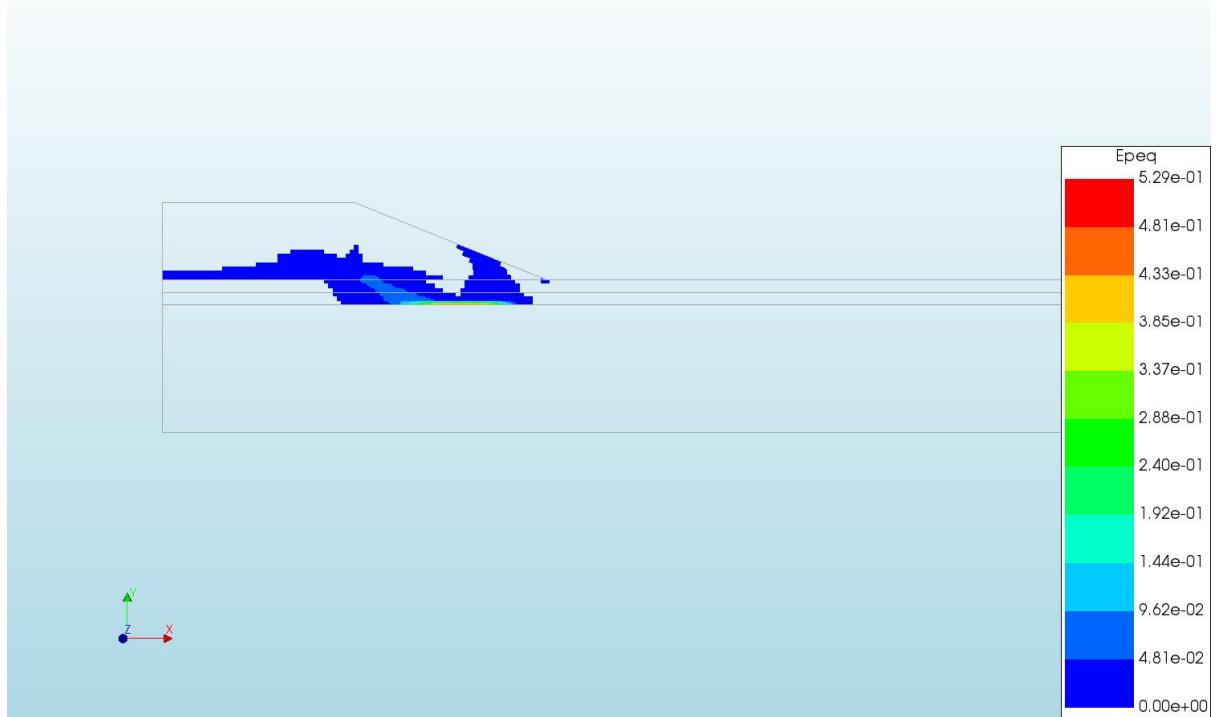


d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Total Strains E1  
min: -1.70e-04 max: 5.29e-01

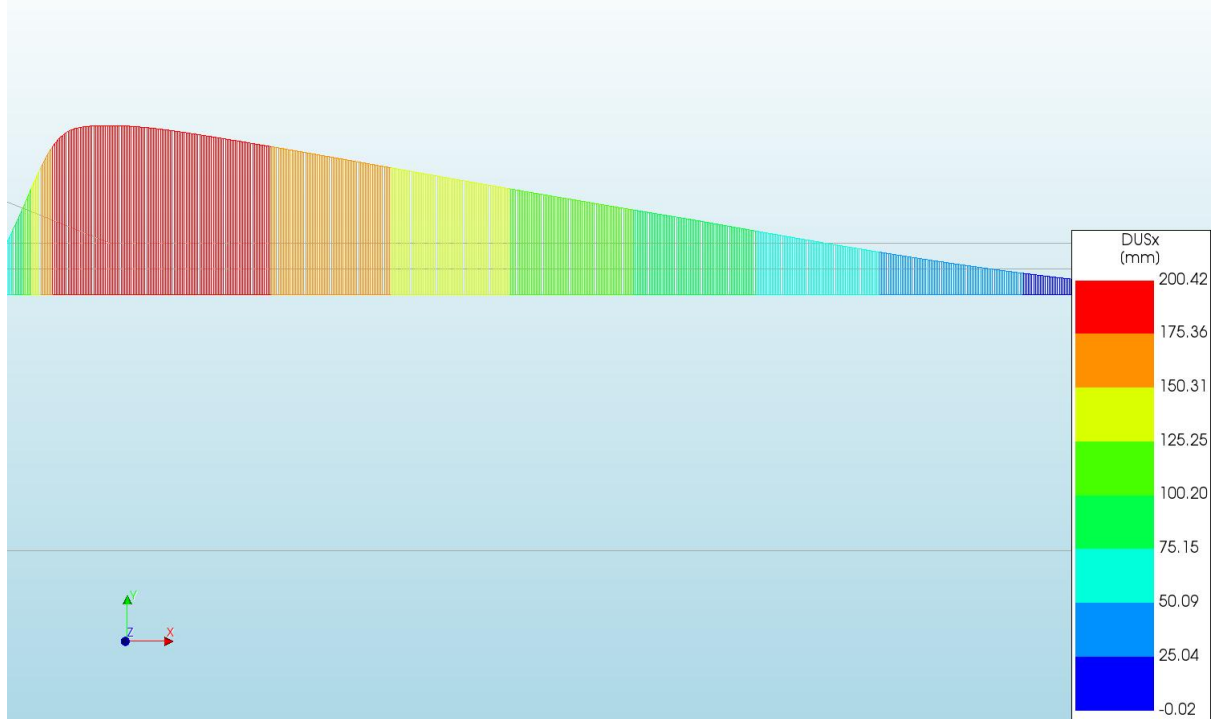




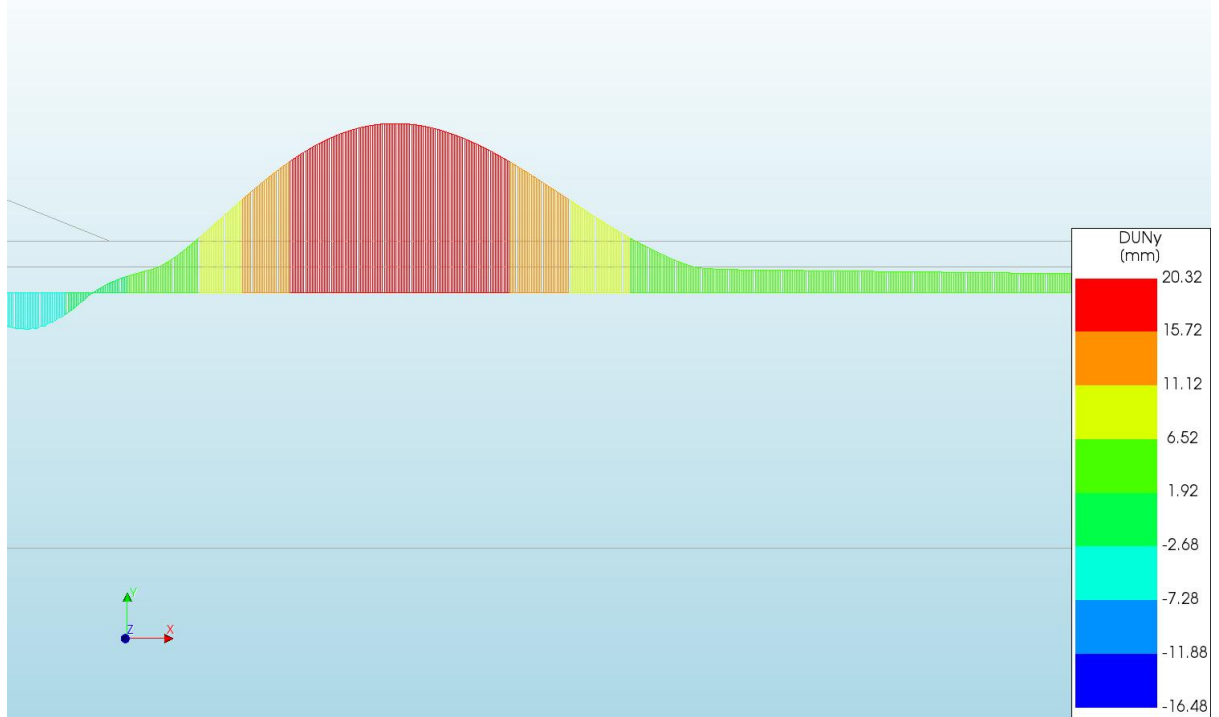
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.29e-01



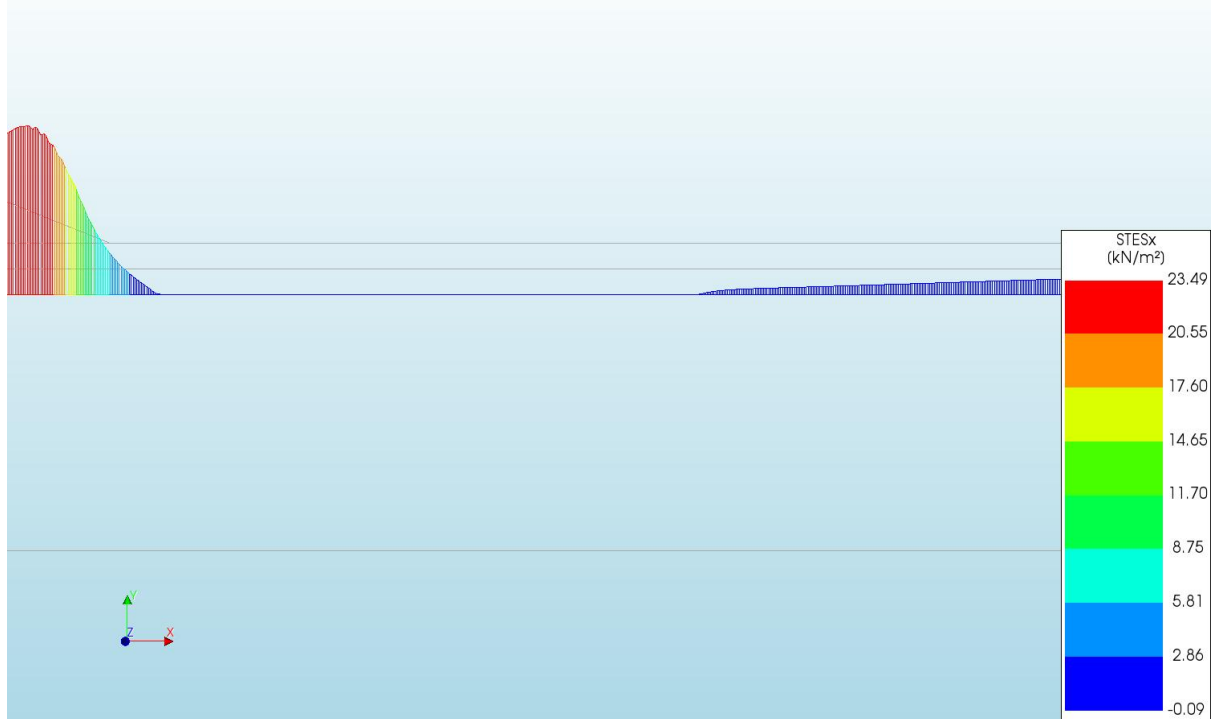
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 200.42mm



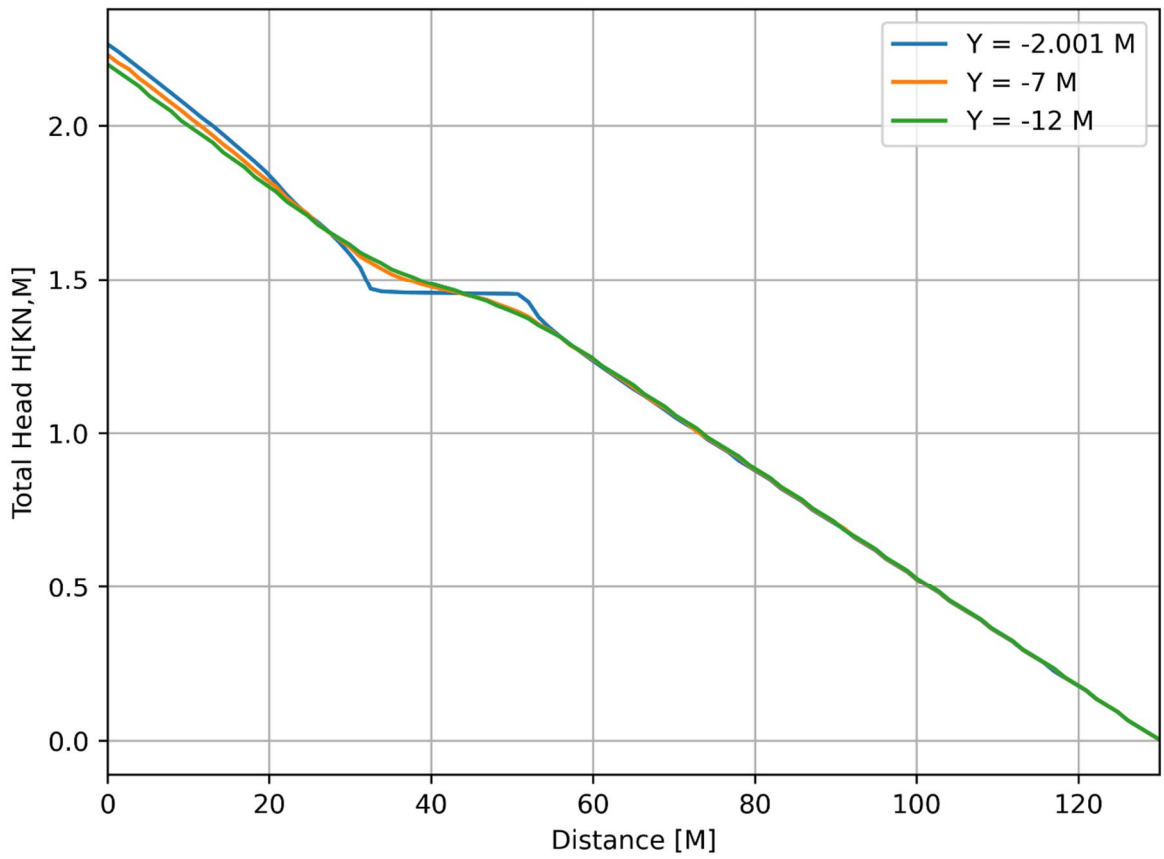
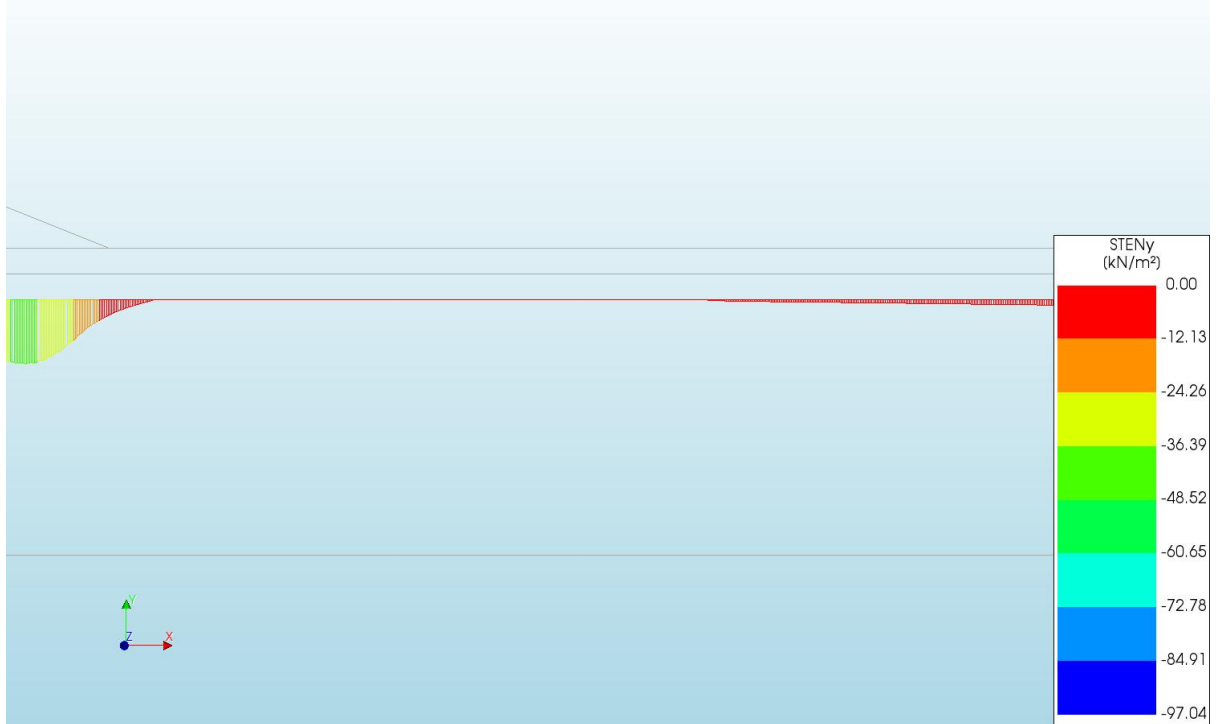
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -16.48mm max: 20.32mm

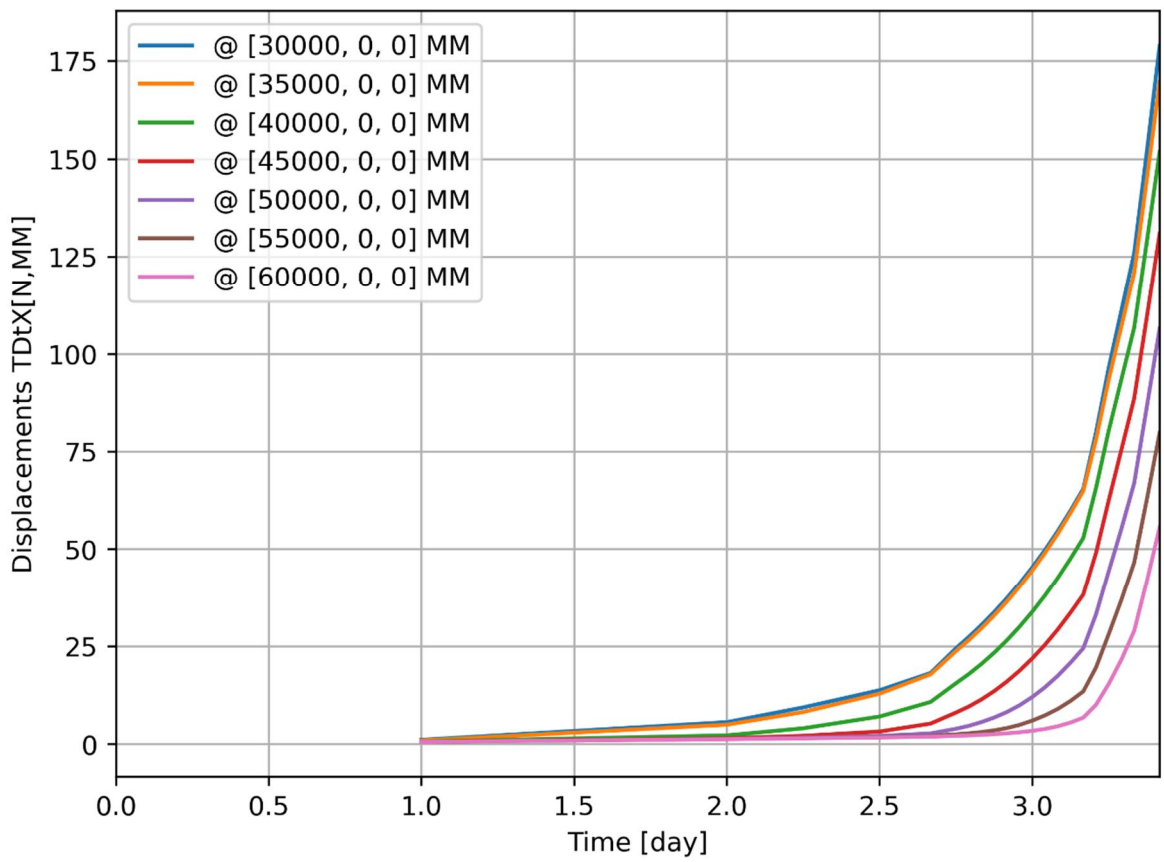
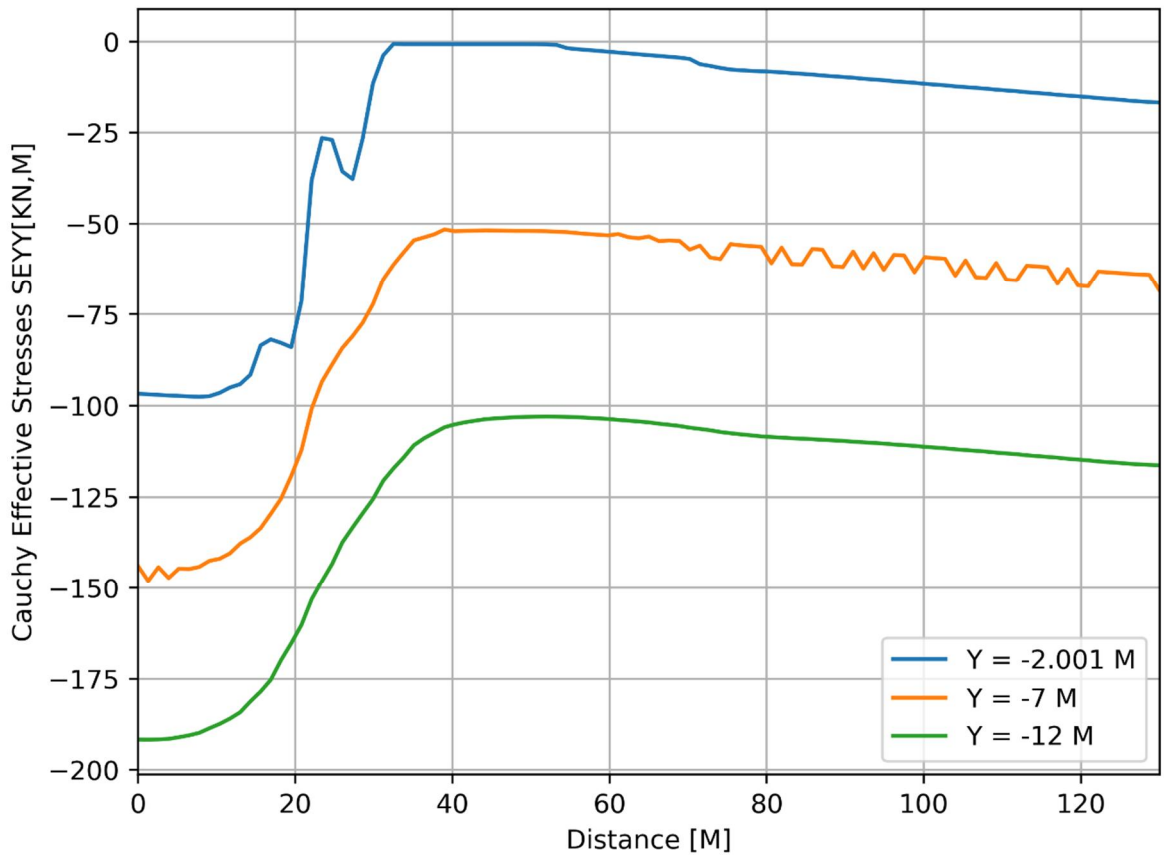


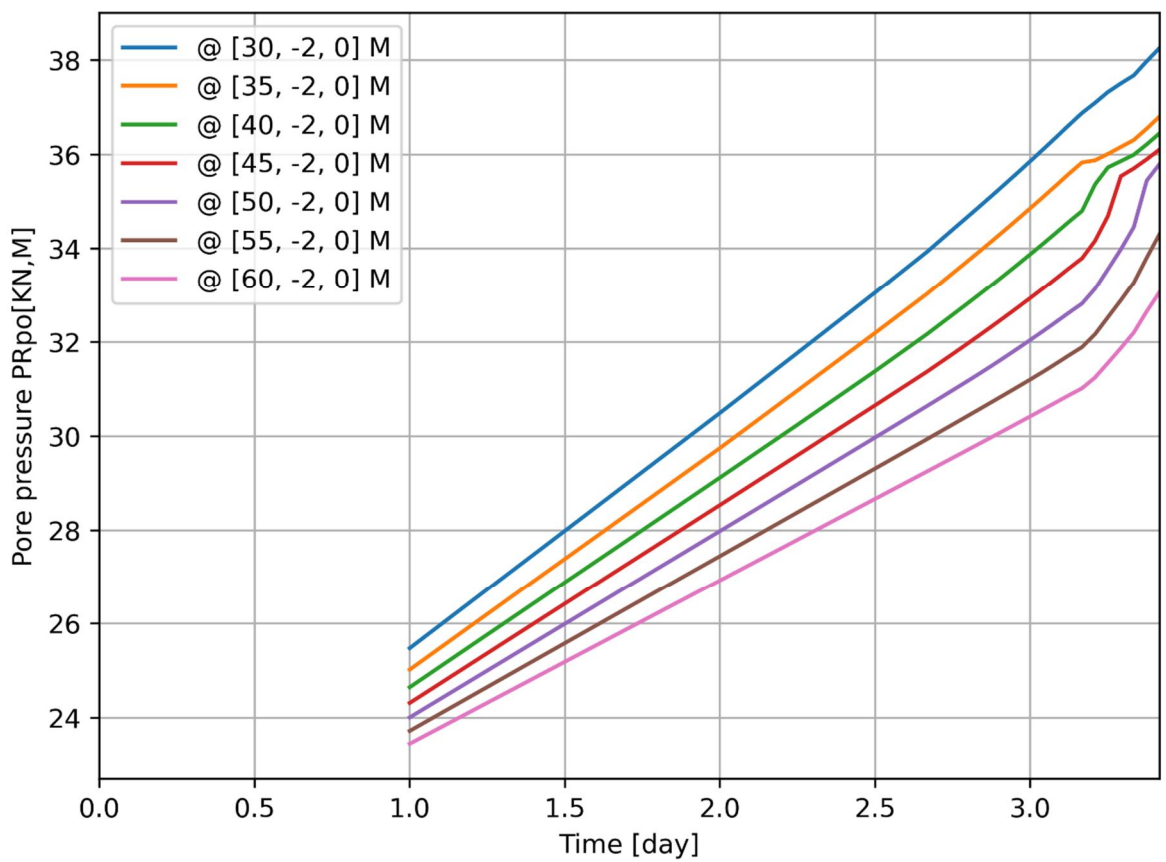
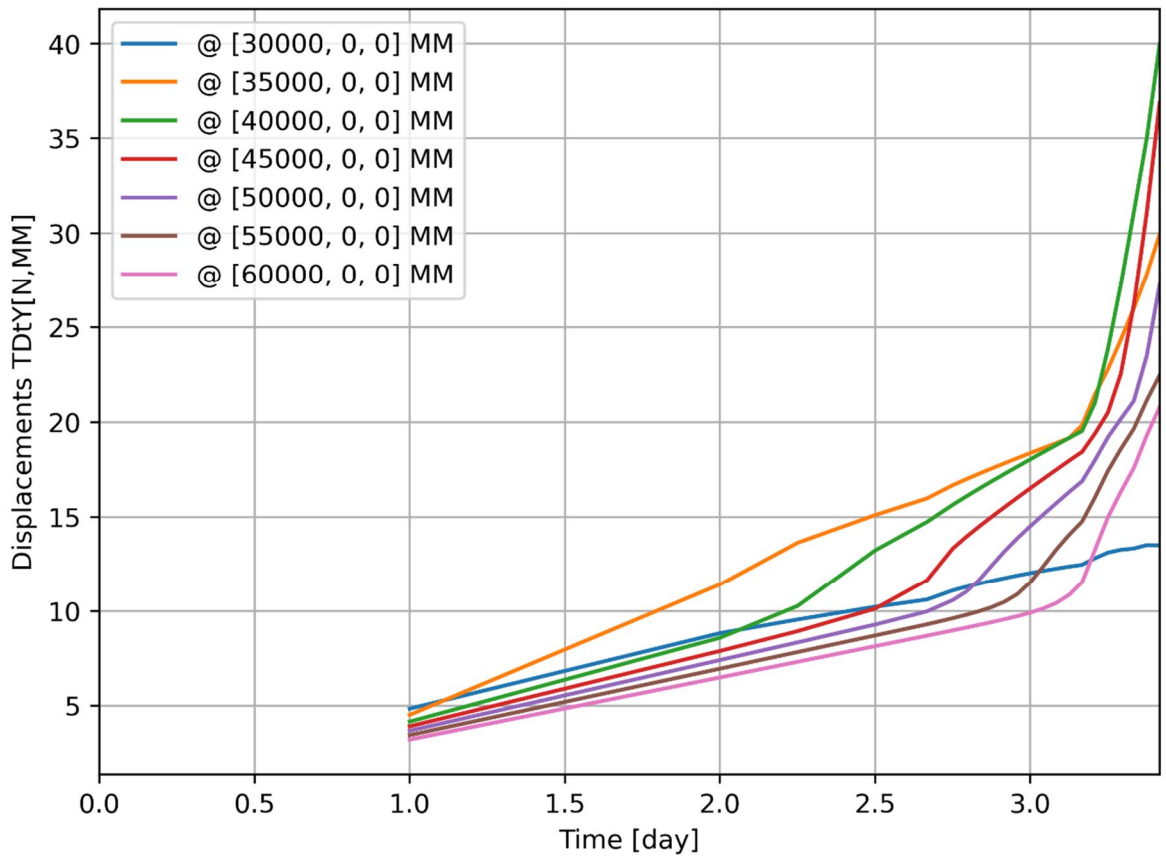
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.09kN/m<sup>2</sup> max: 23.49kN/m<sup>2</sup>

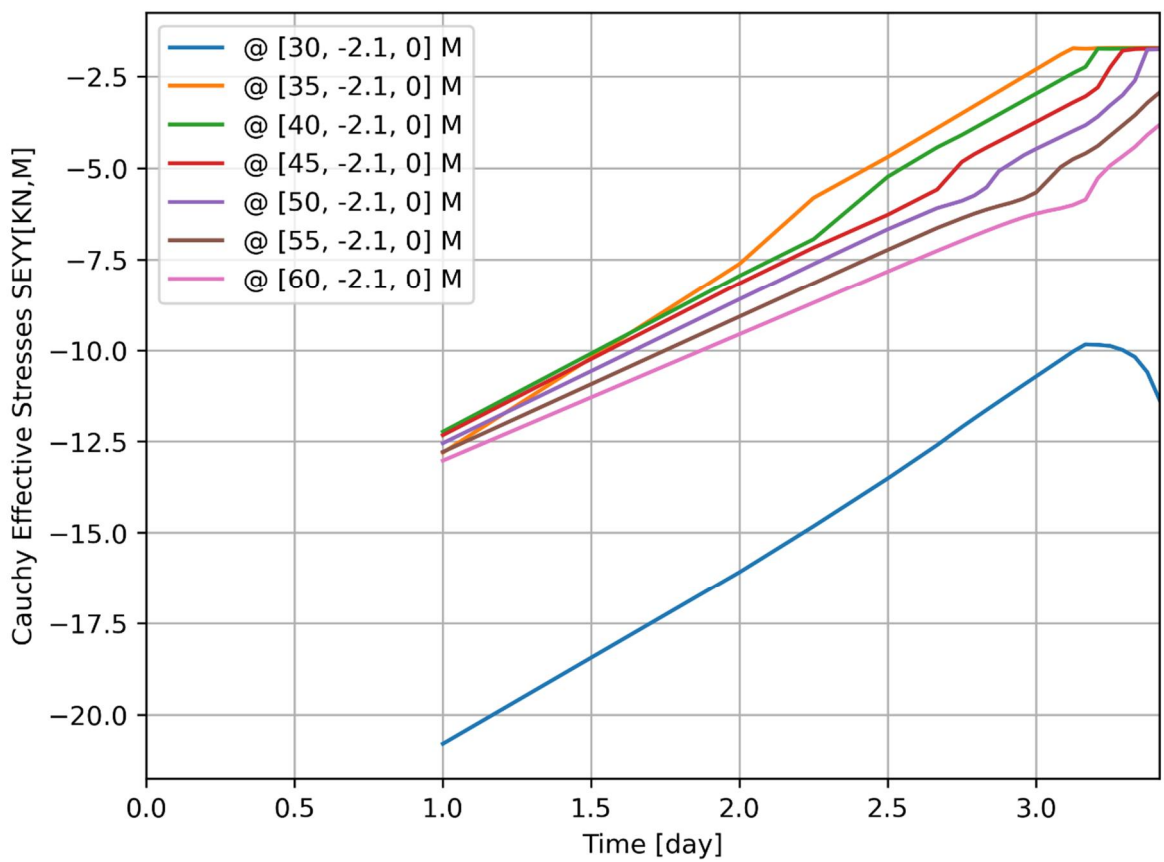
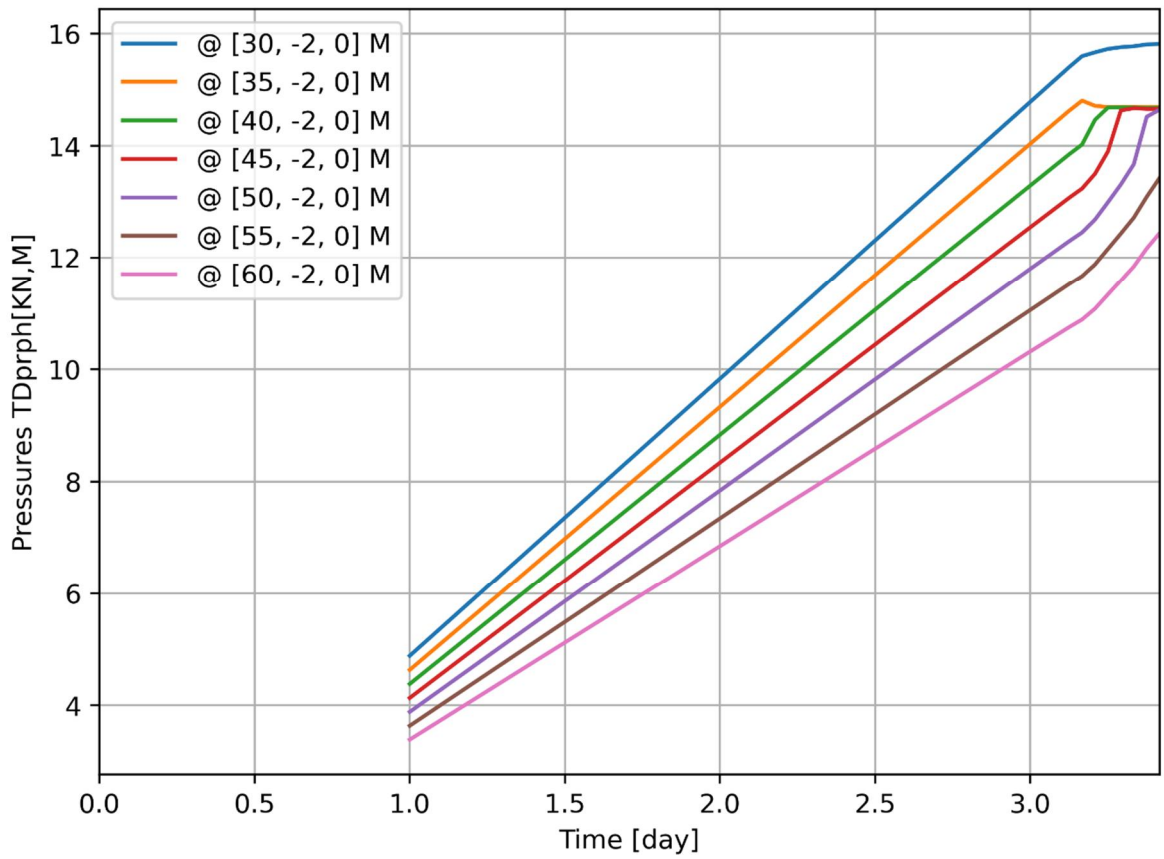


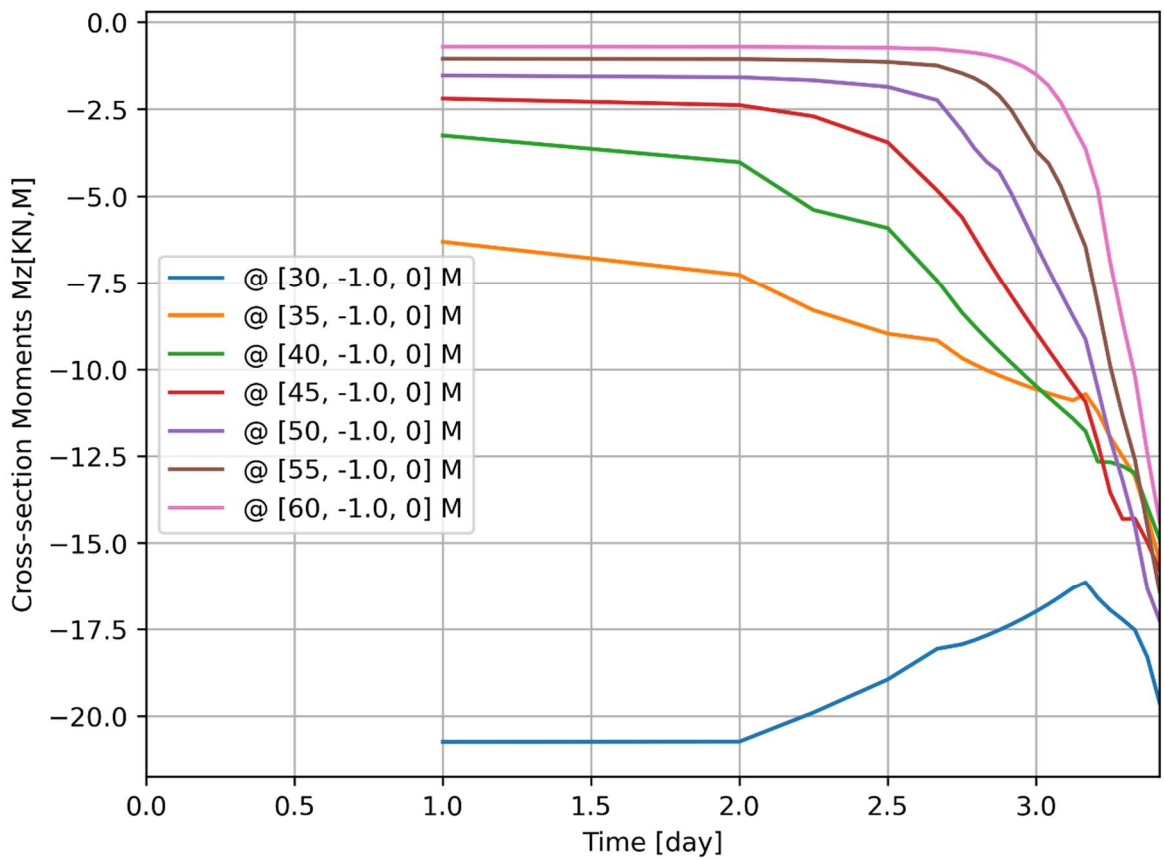
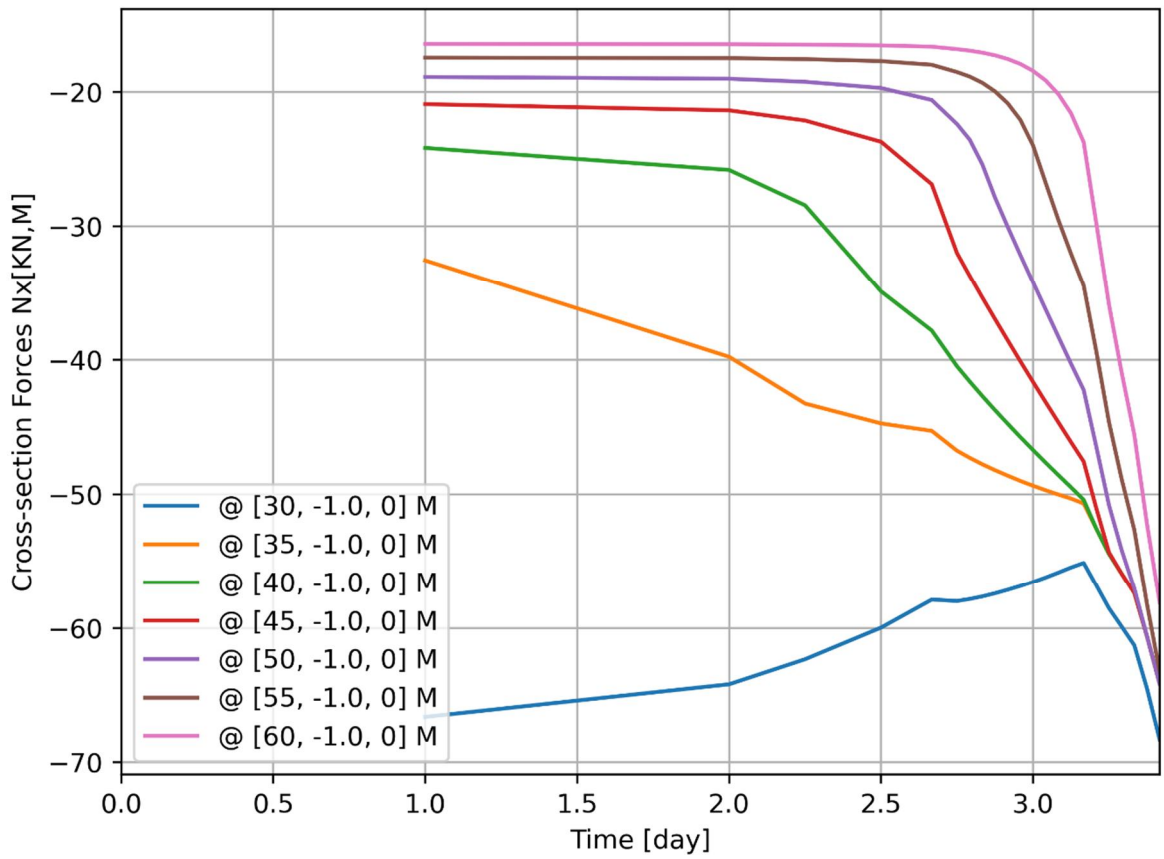
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
 Interface Effective Tractions STENy  
 min: -97.04kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







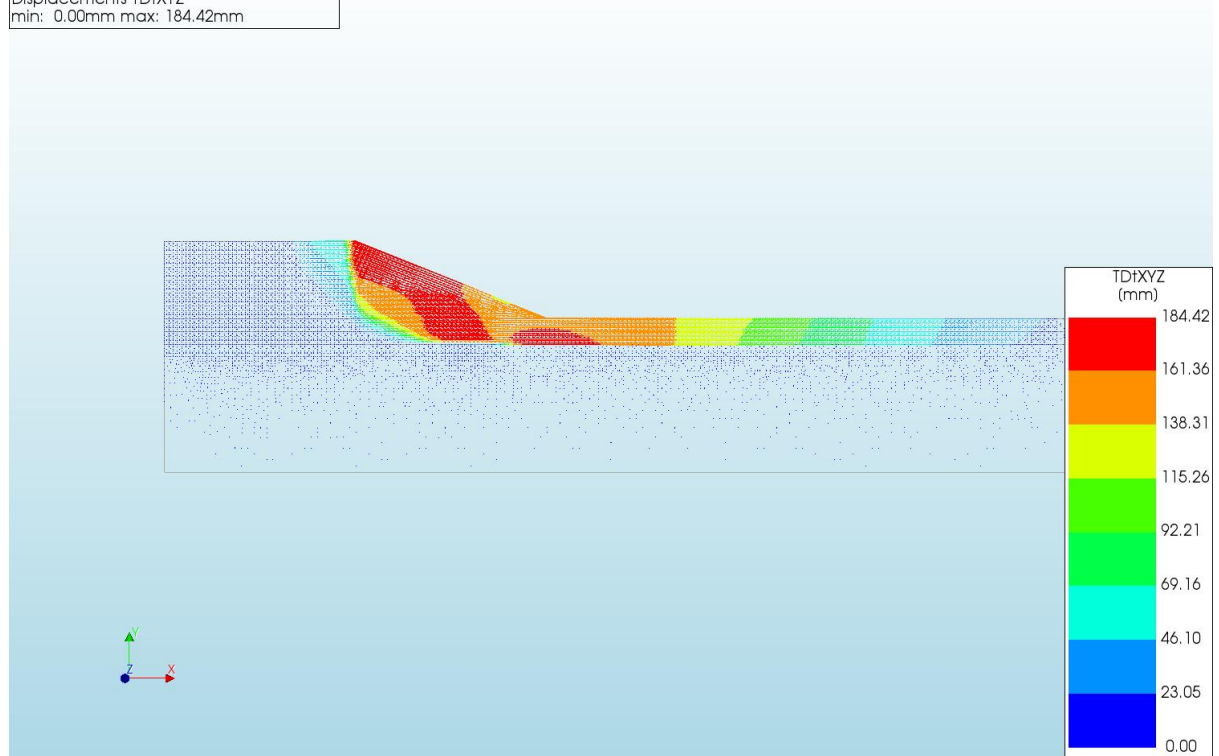




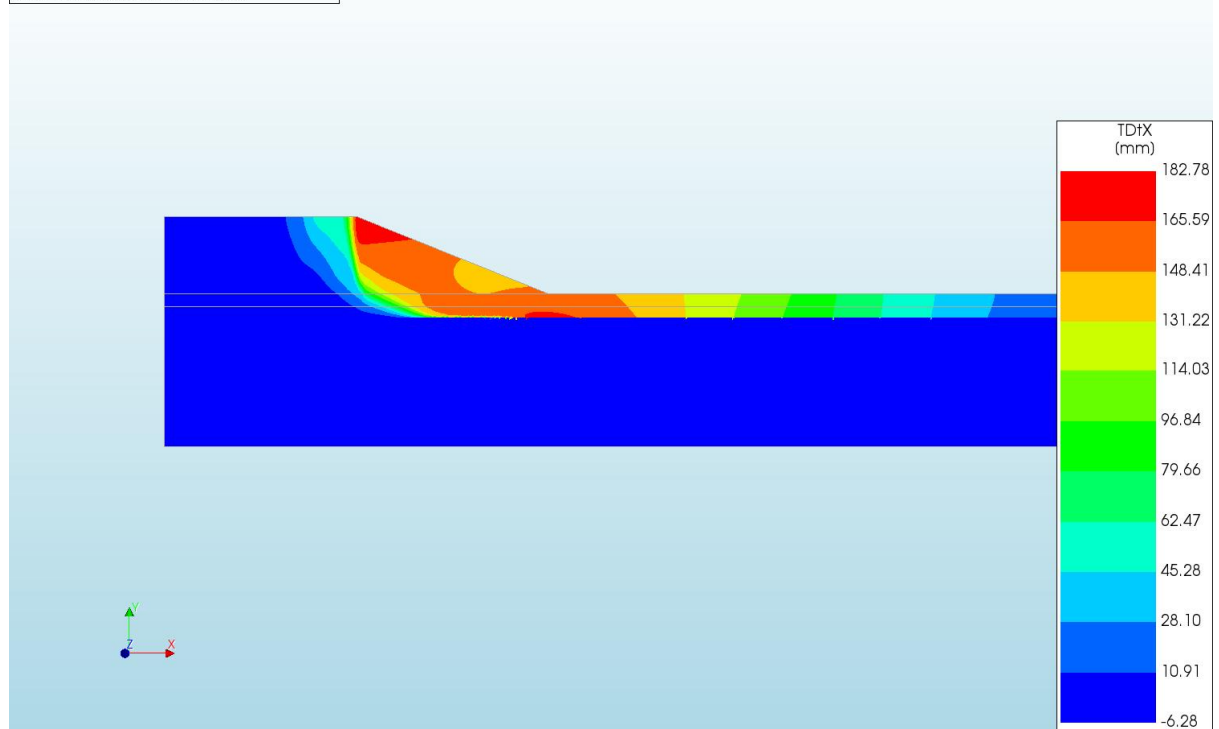
A.2.9

'Output\_d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Displacements TDiXYZ  
min: 0.00mm max: 184.42mm

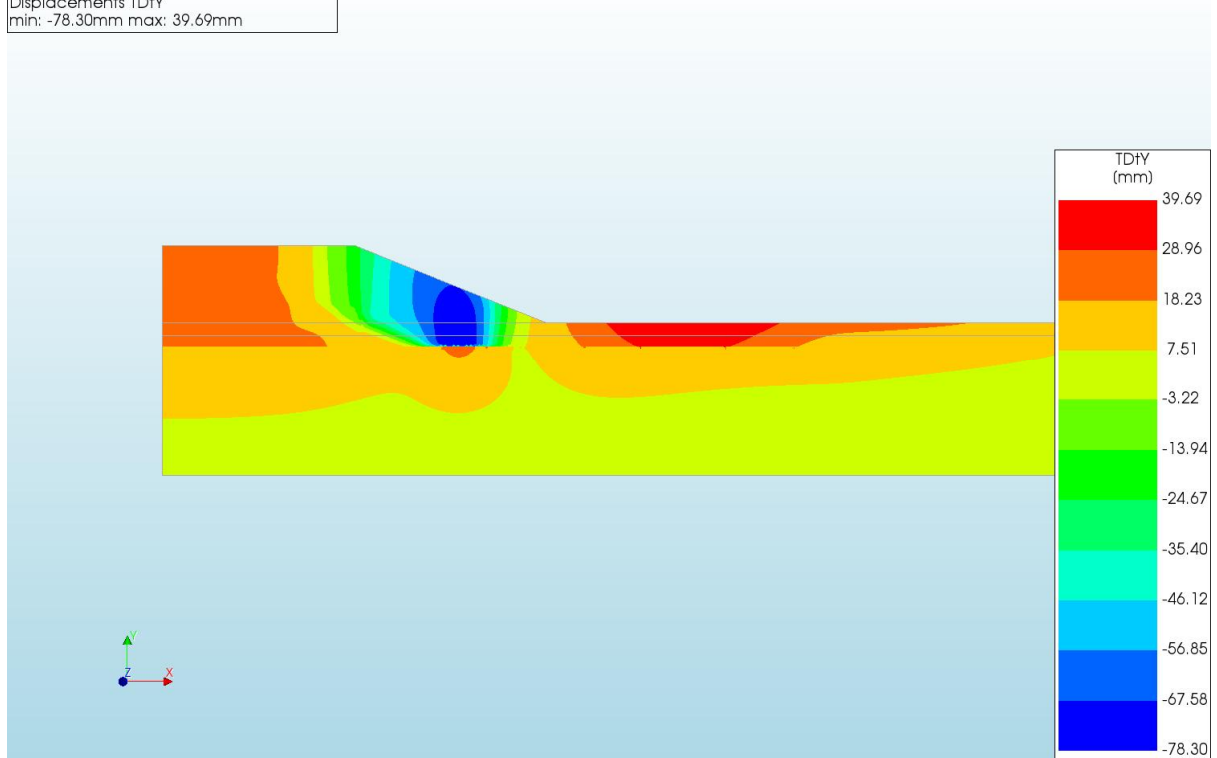


d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Displacements TDtX  
min: -6.28mm max: 182.78mm

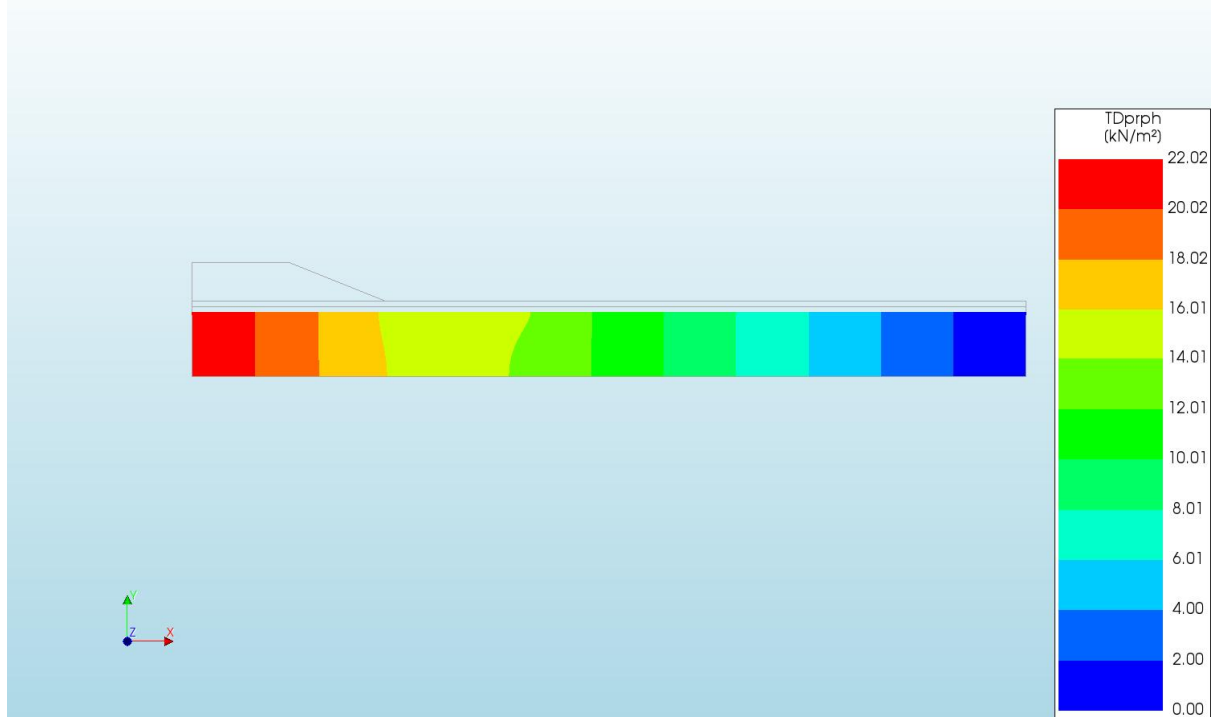




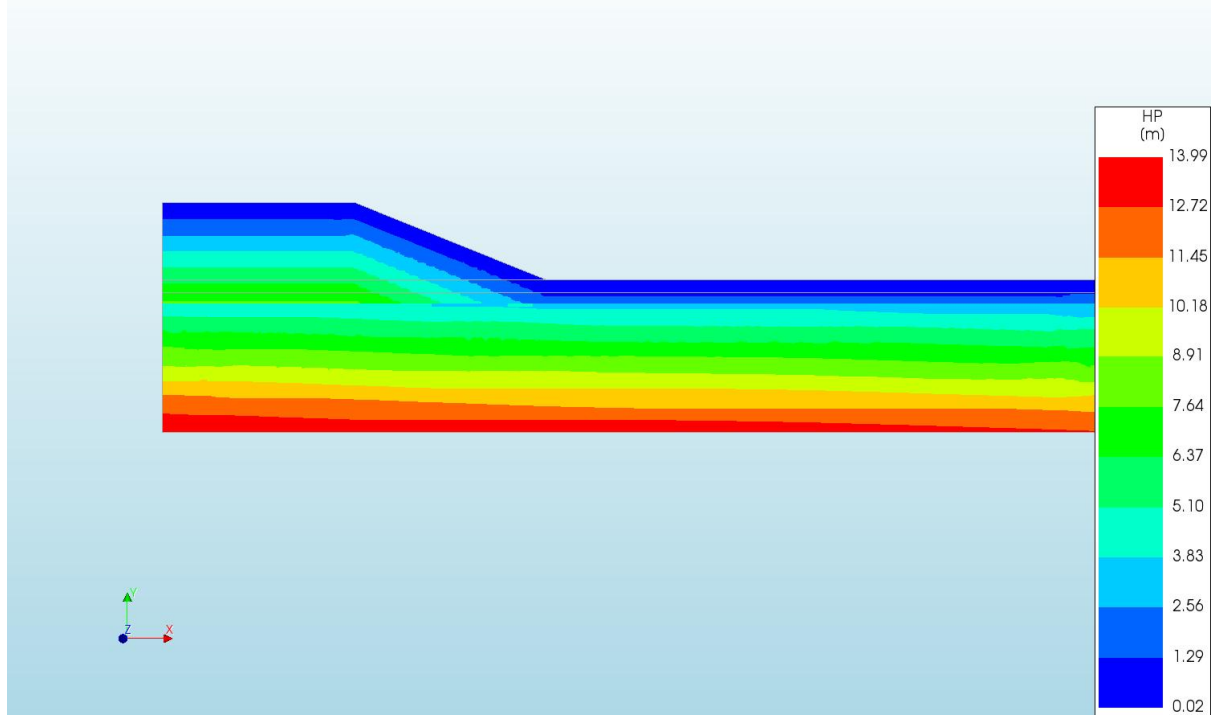
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Displacements TDtY  
min: -78.30mm max: 39.69mm



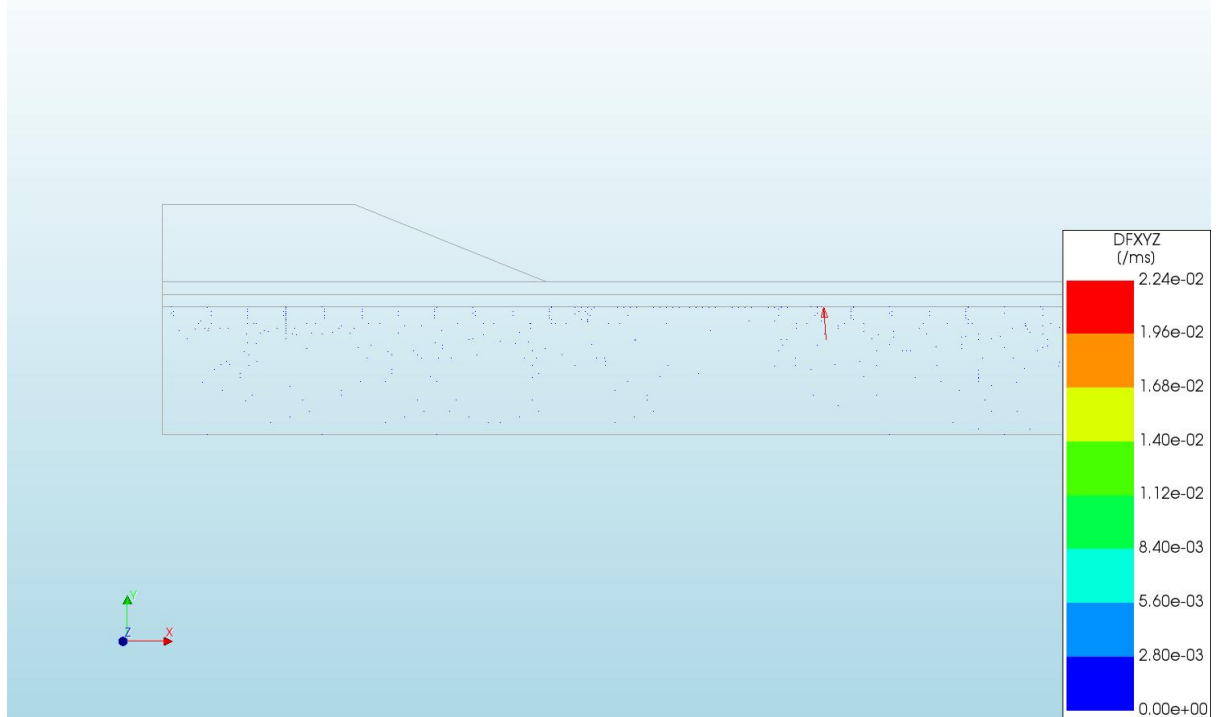
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 22.02kN/m<sup>2</sup>



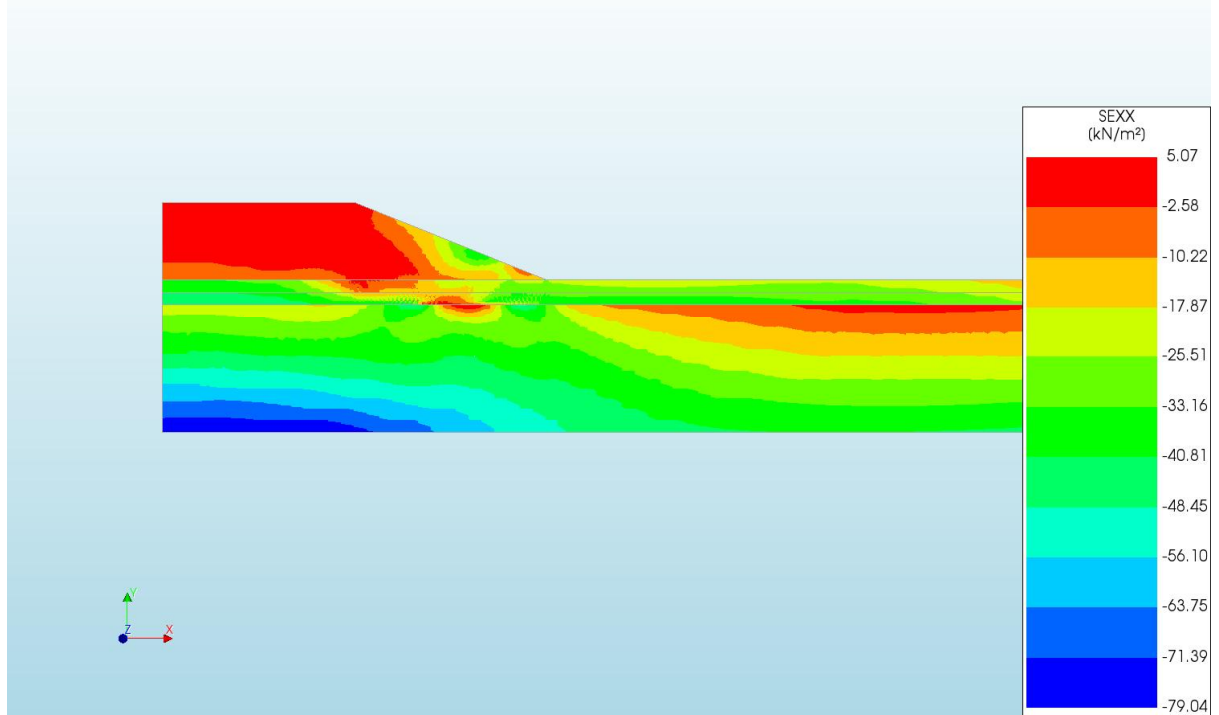
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.99m



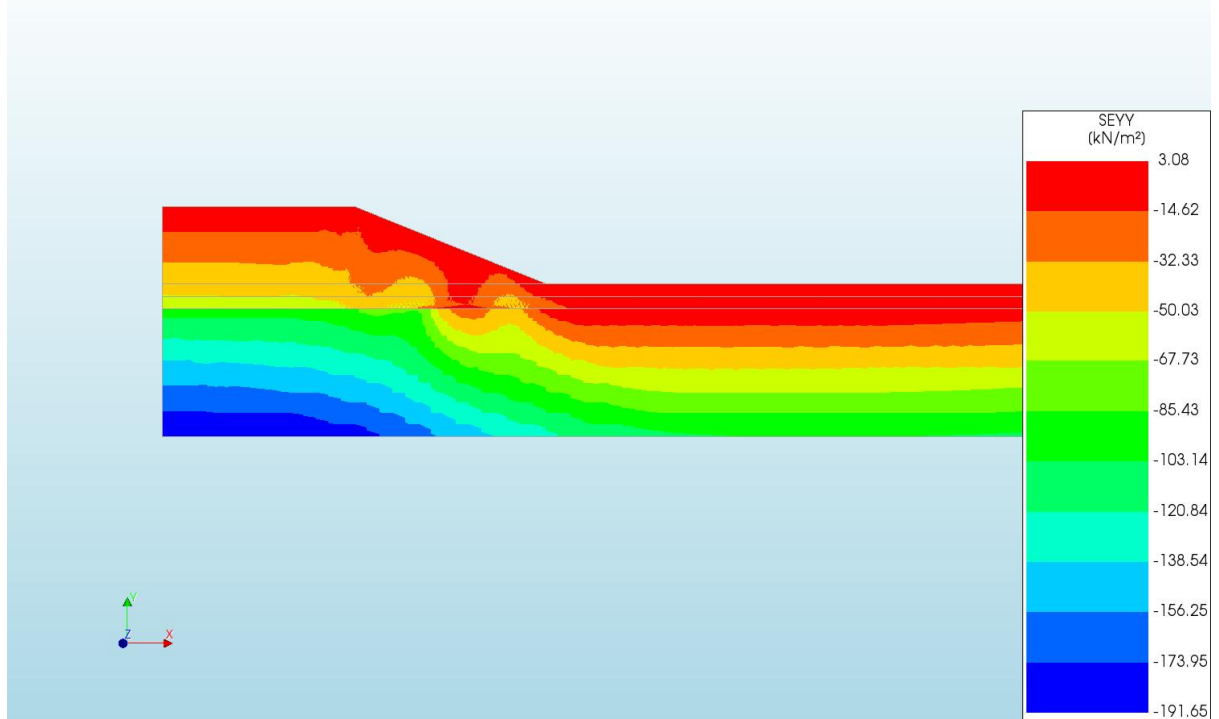
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.24e-02/ms



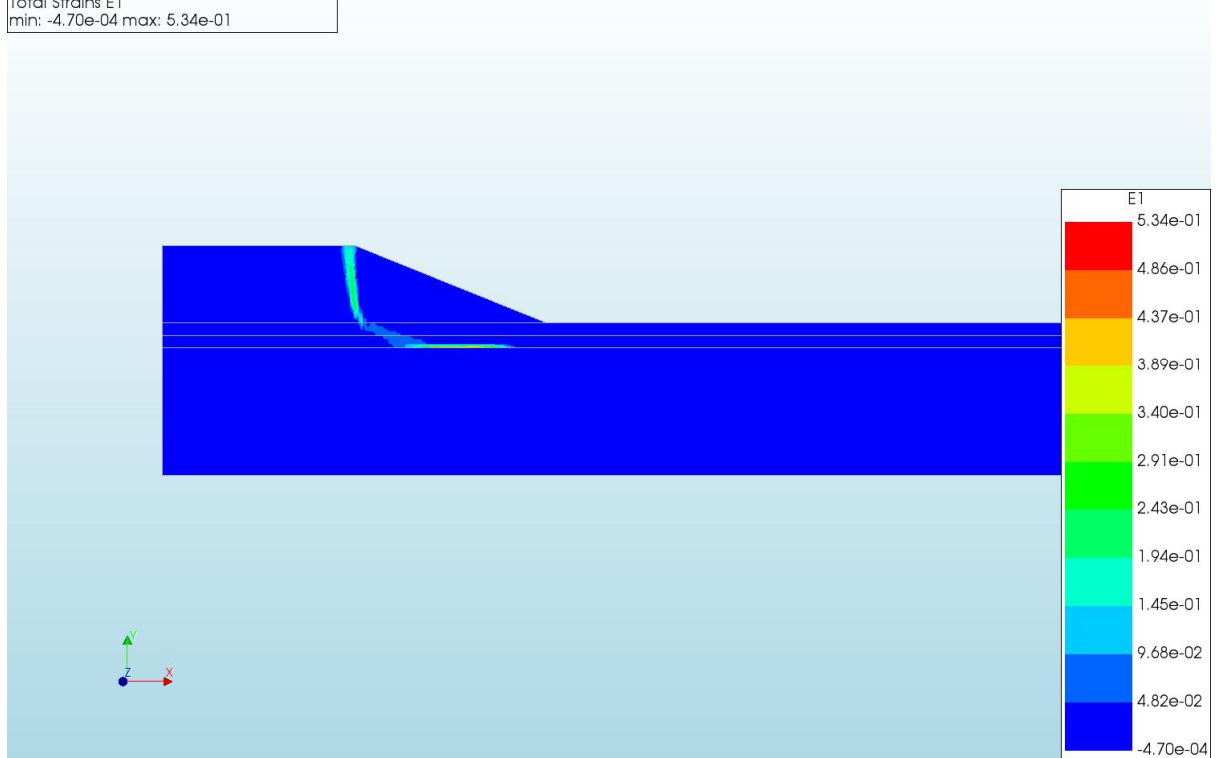
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.04kN/m<sup>2</sup> max: 5.07kN/m<sup>2</sup>



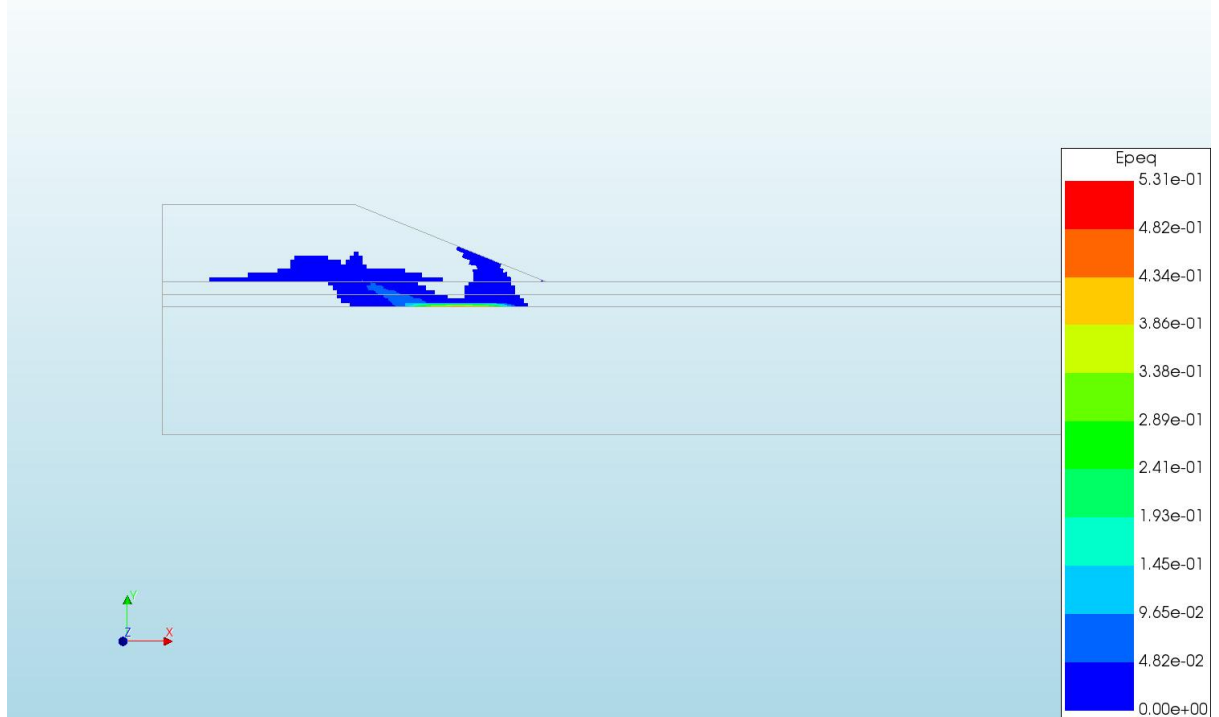
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -191.65kN/m<sup>2</sup> max: 3.08kN/m<sup>2</sup>



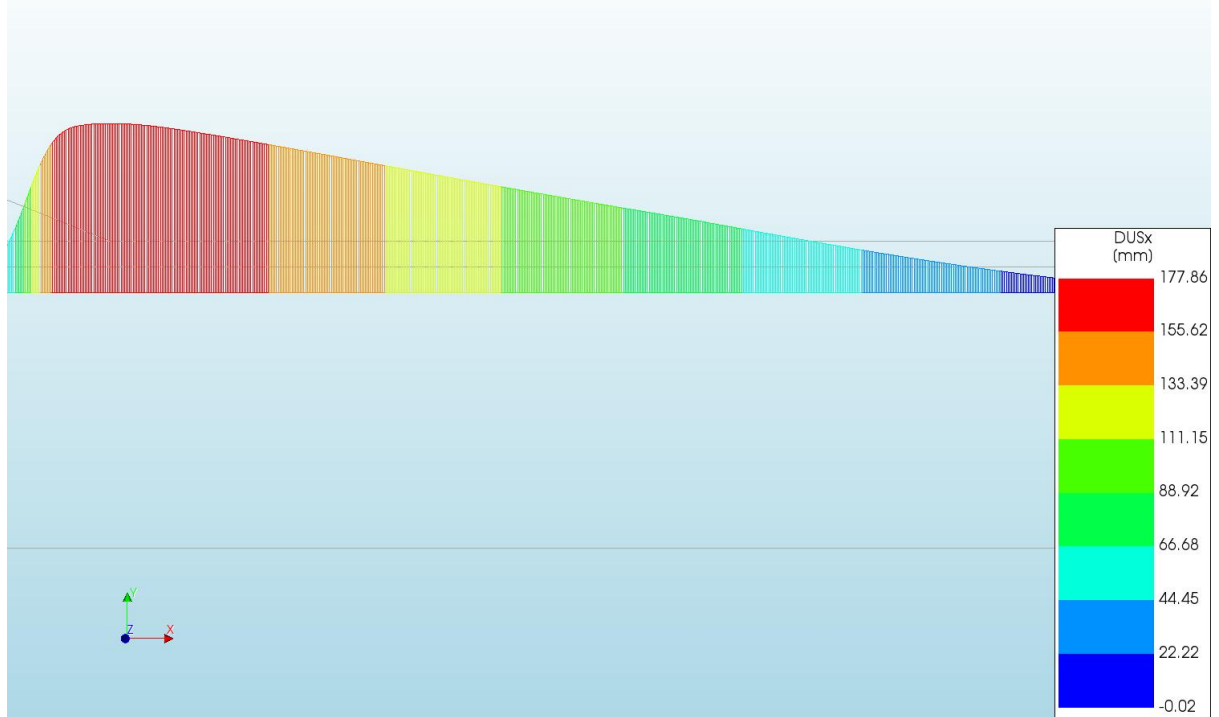
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Total Strains E1  
min: -4.70e-04 max: 5.34e-01



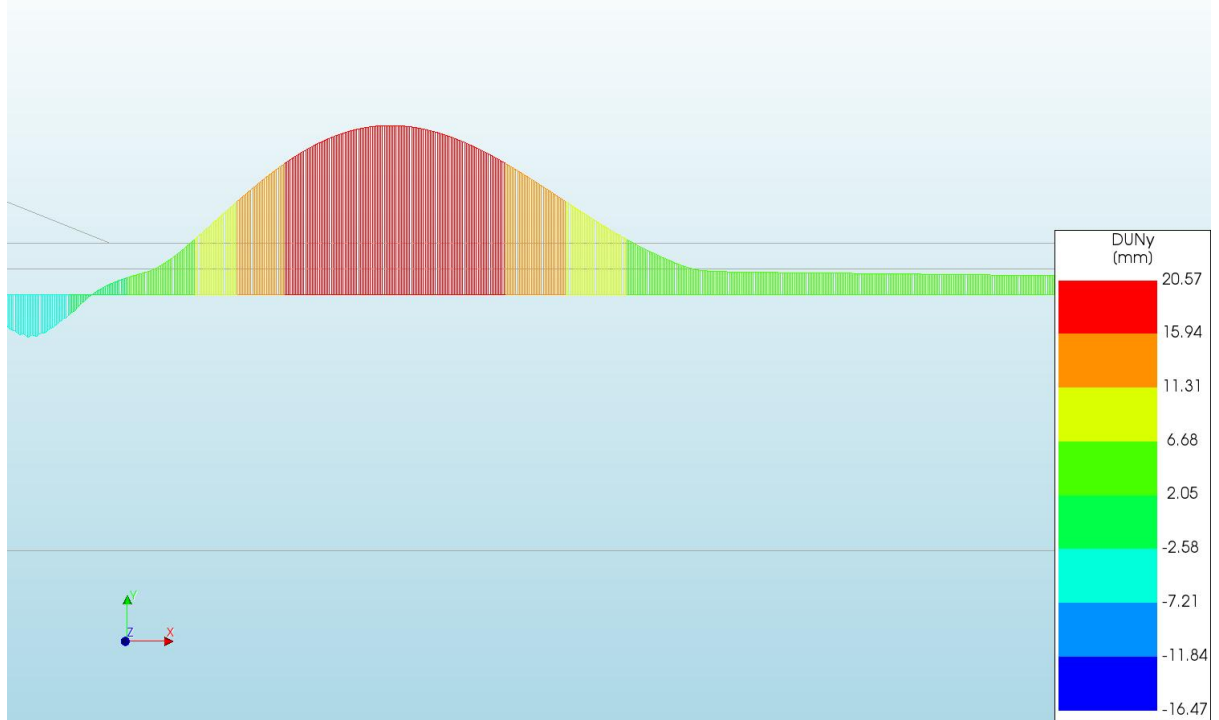
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.31e-01



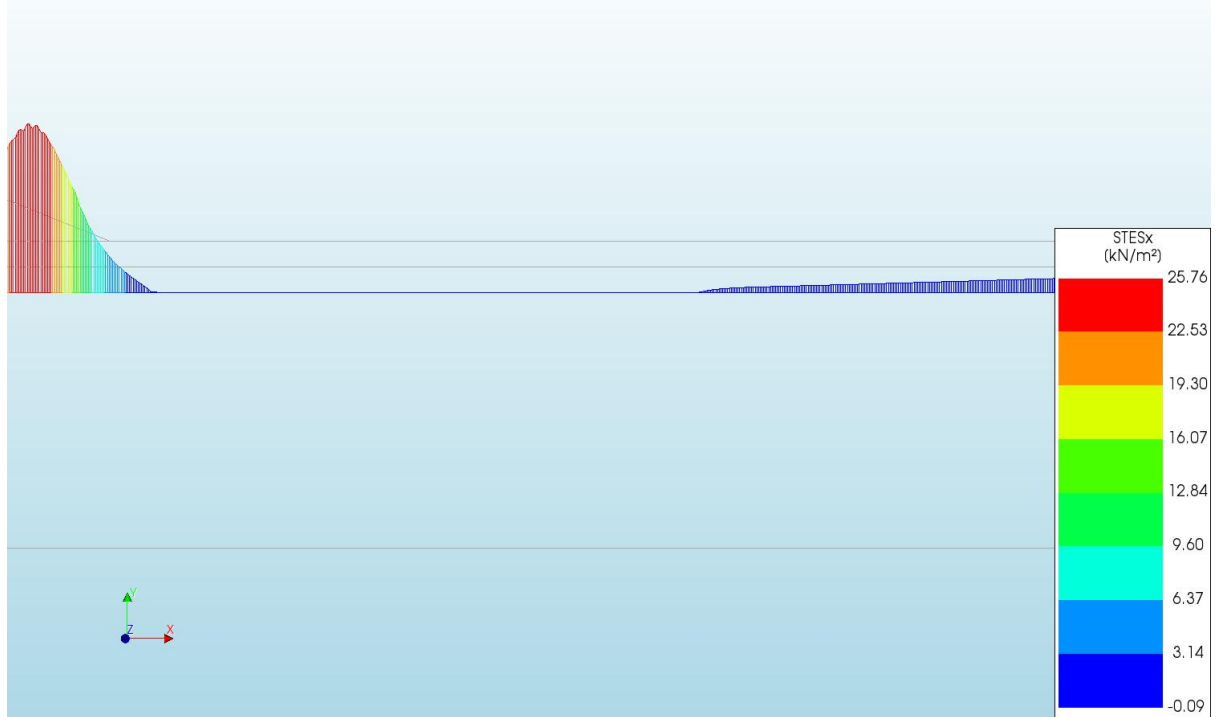
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 177.86mm



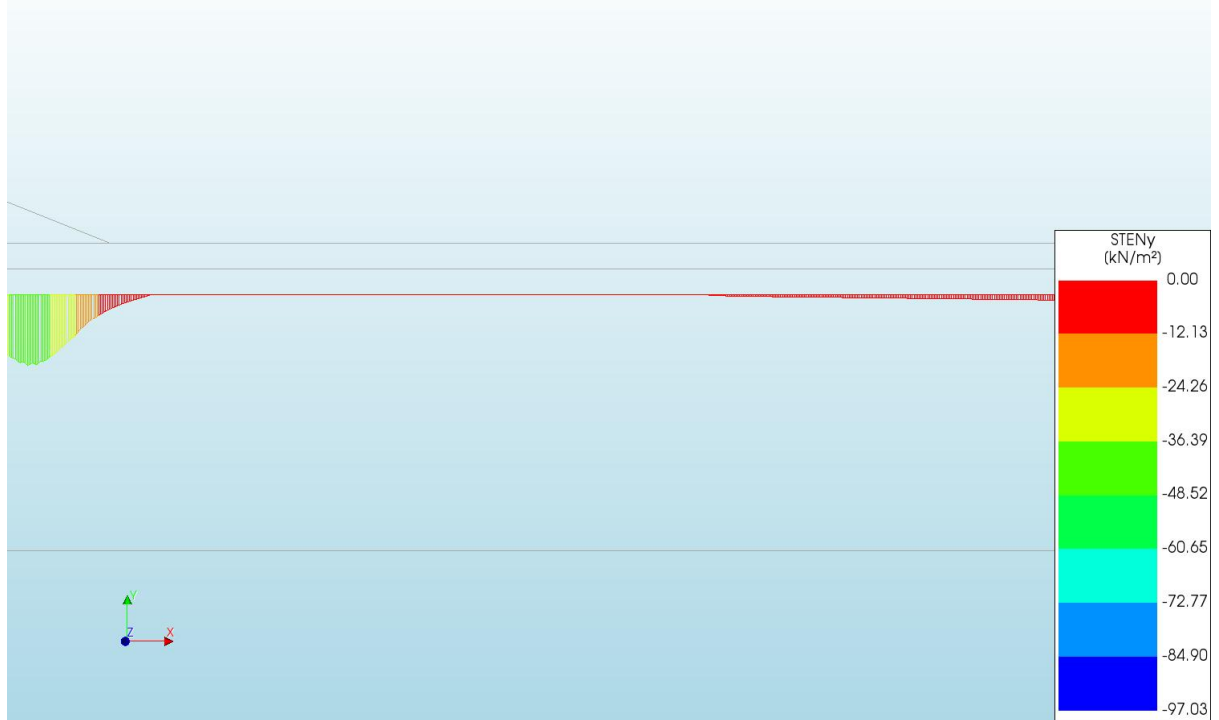
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.47mm max: 20.57mm

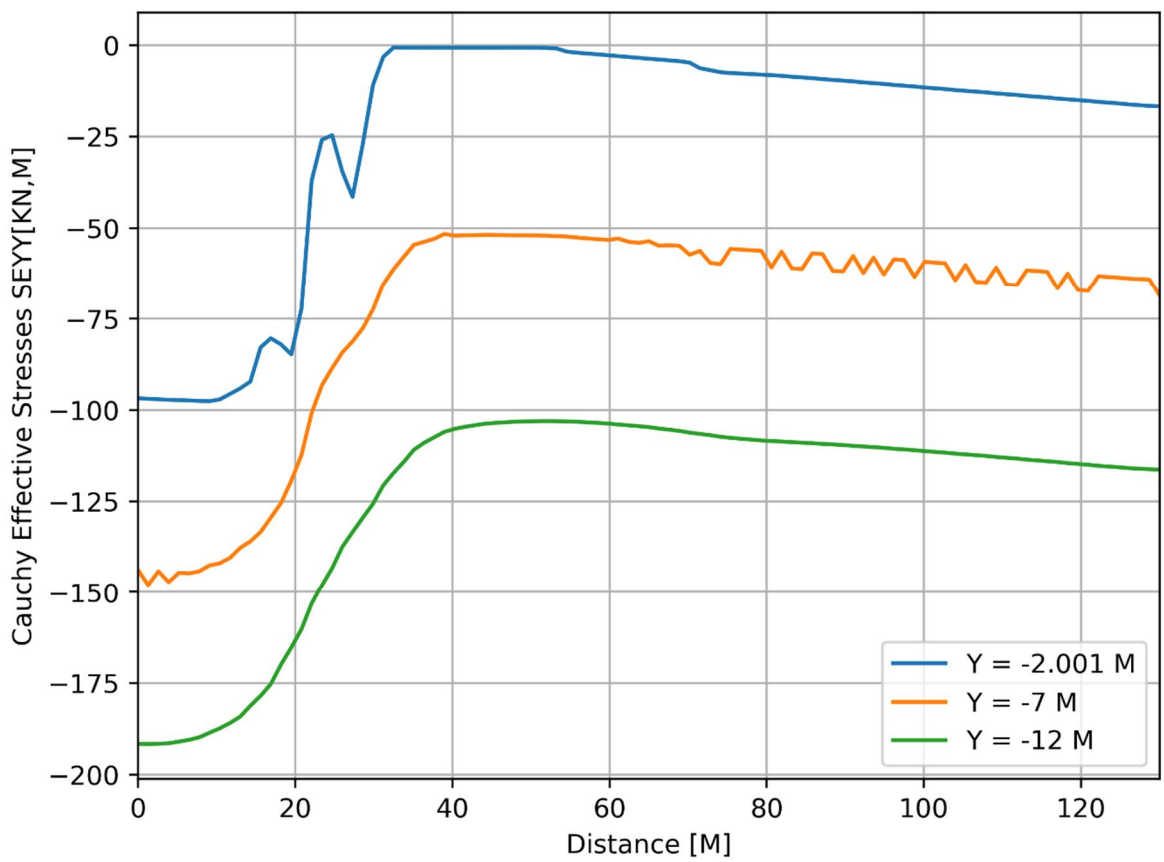
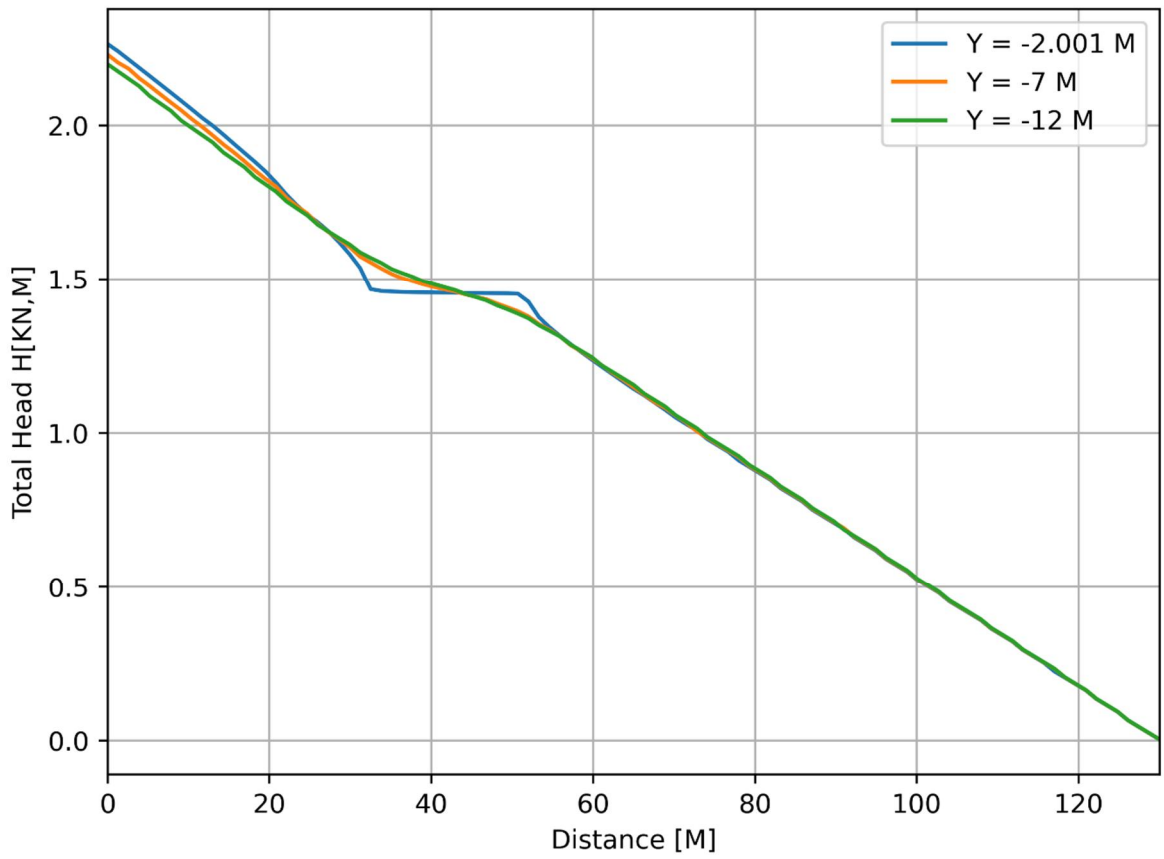


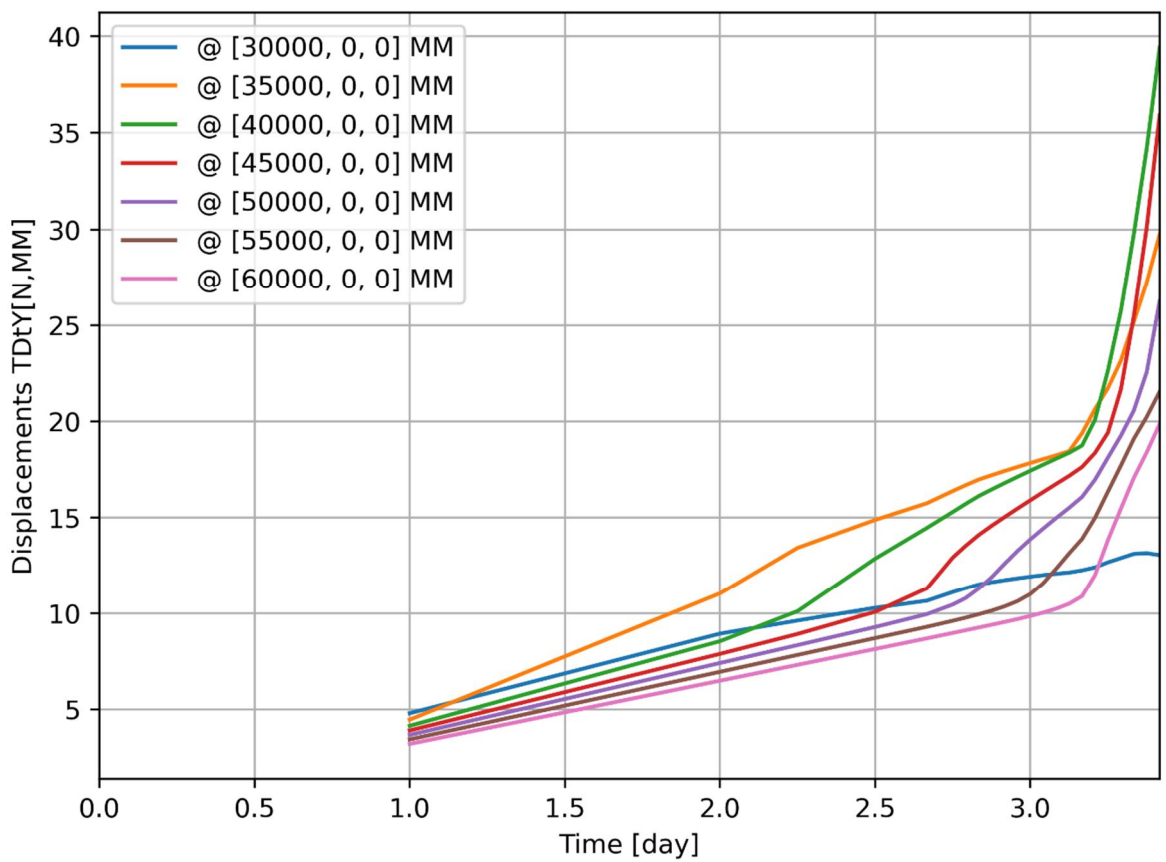
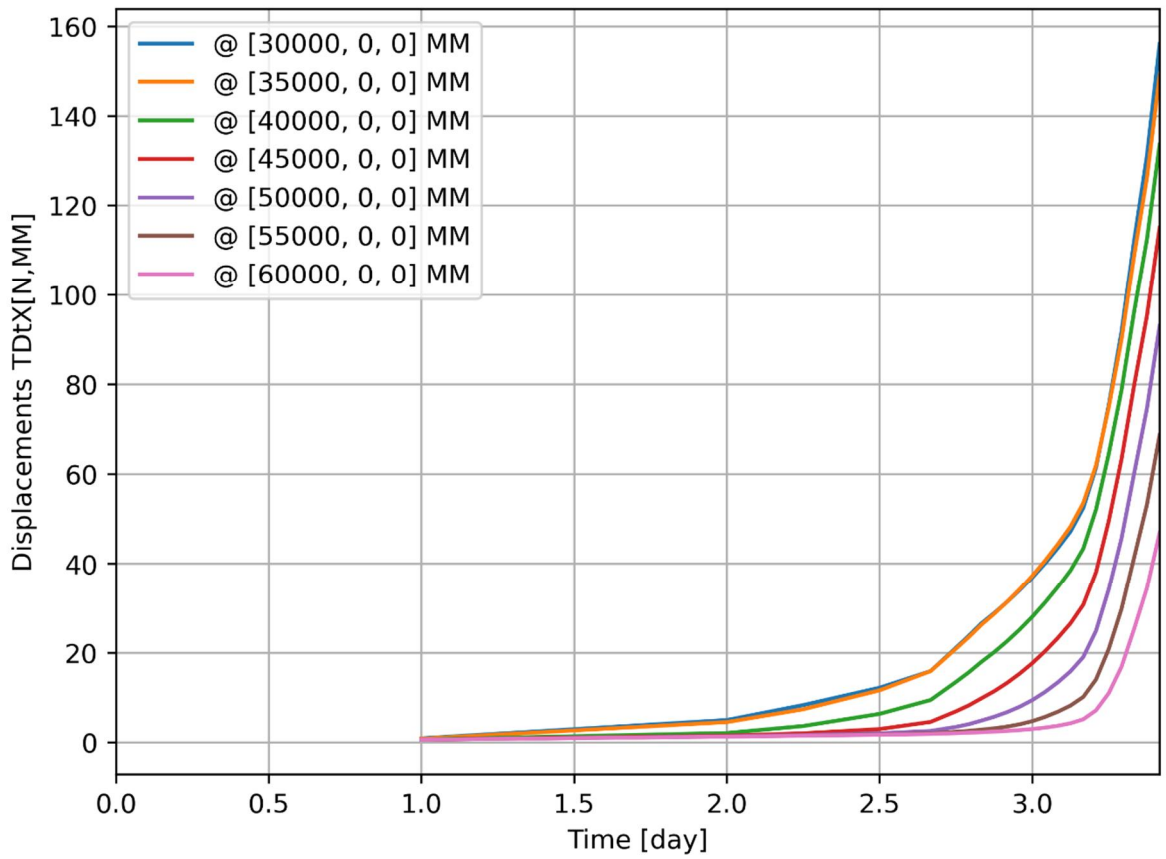
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.09kN/m<sup>2</sup> max: 25.76kN/m<sup>2</sup>



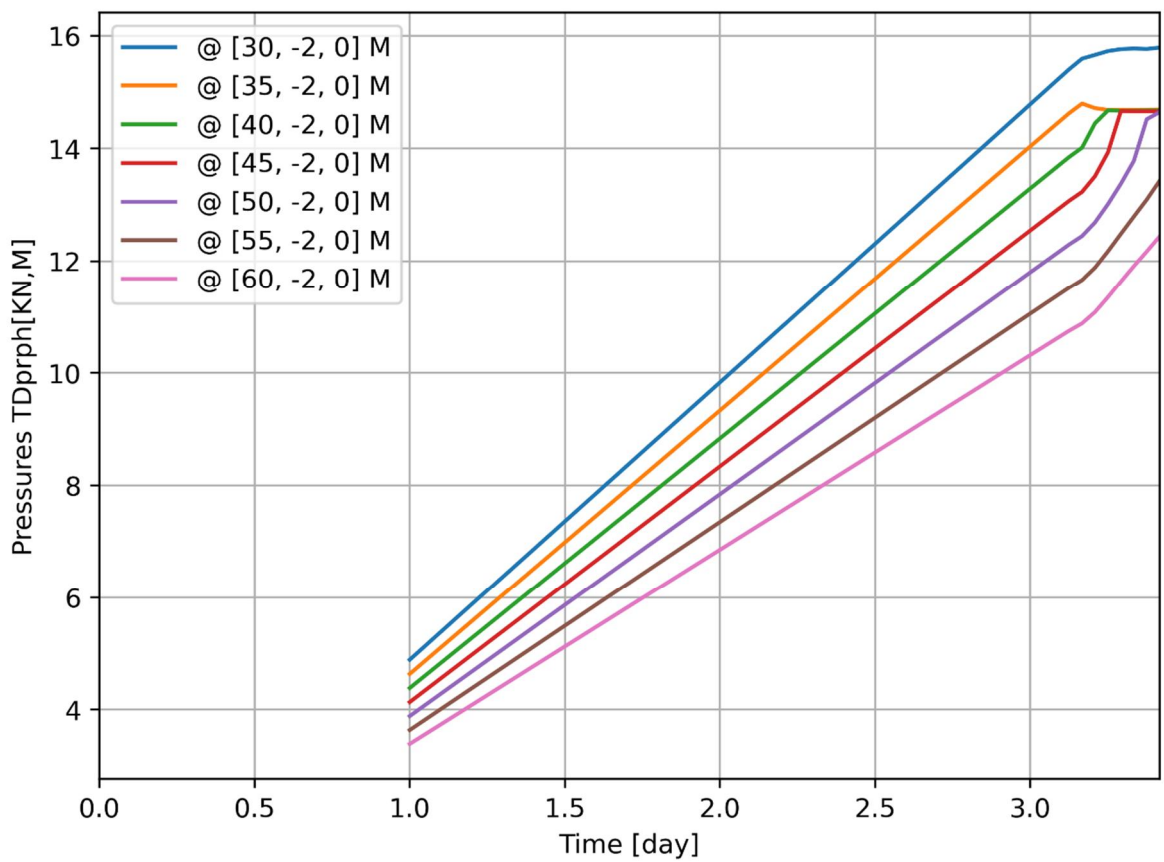
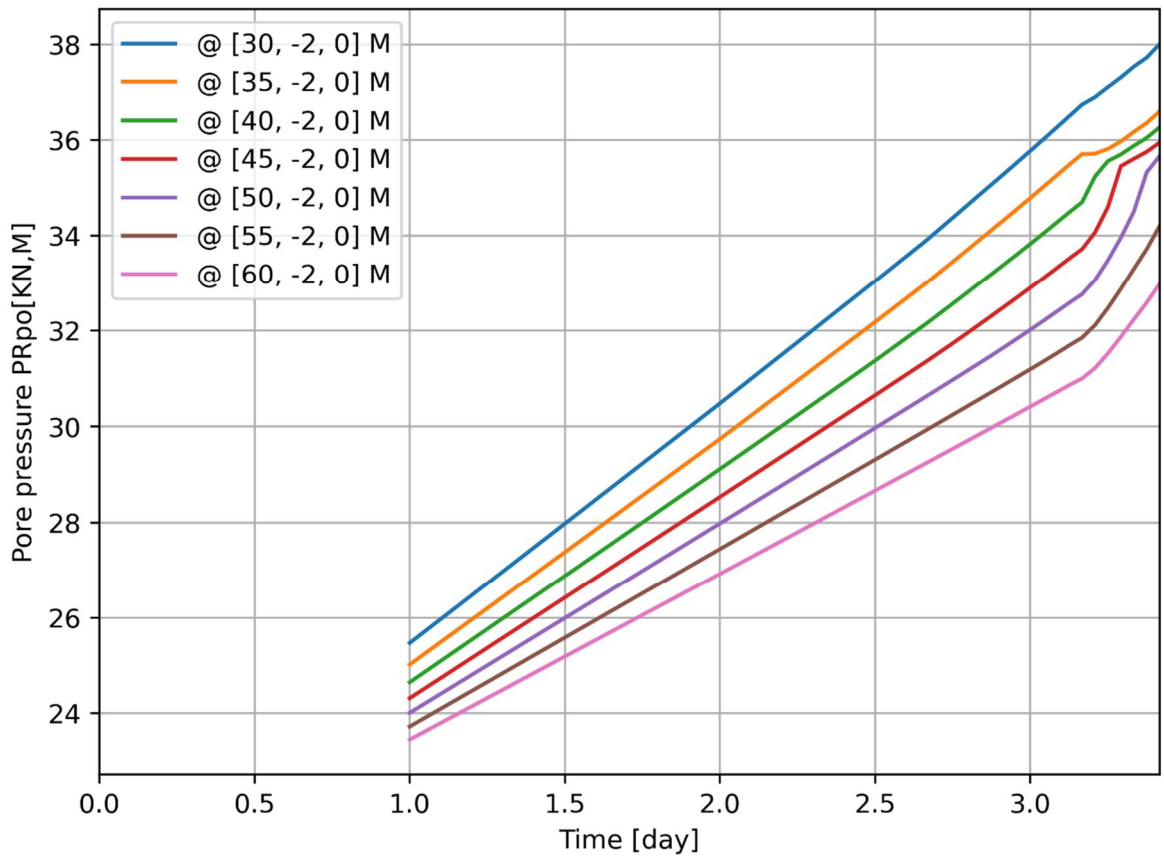
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 28, Time 3 day 10 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -97.03kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

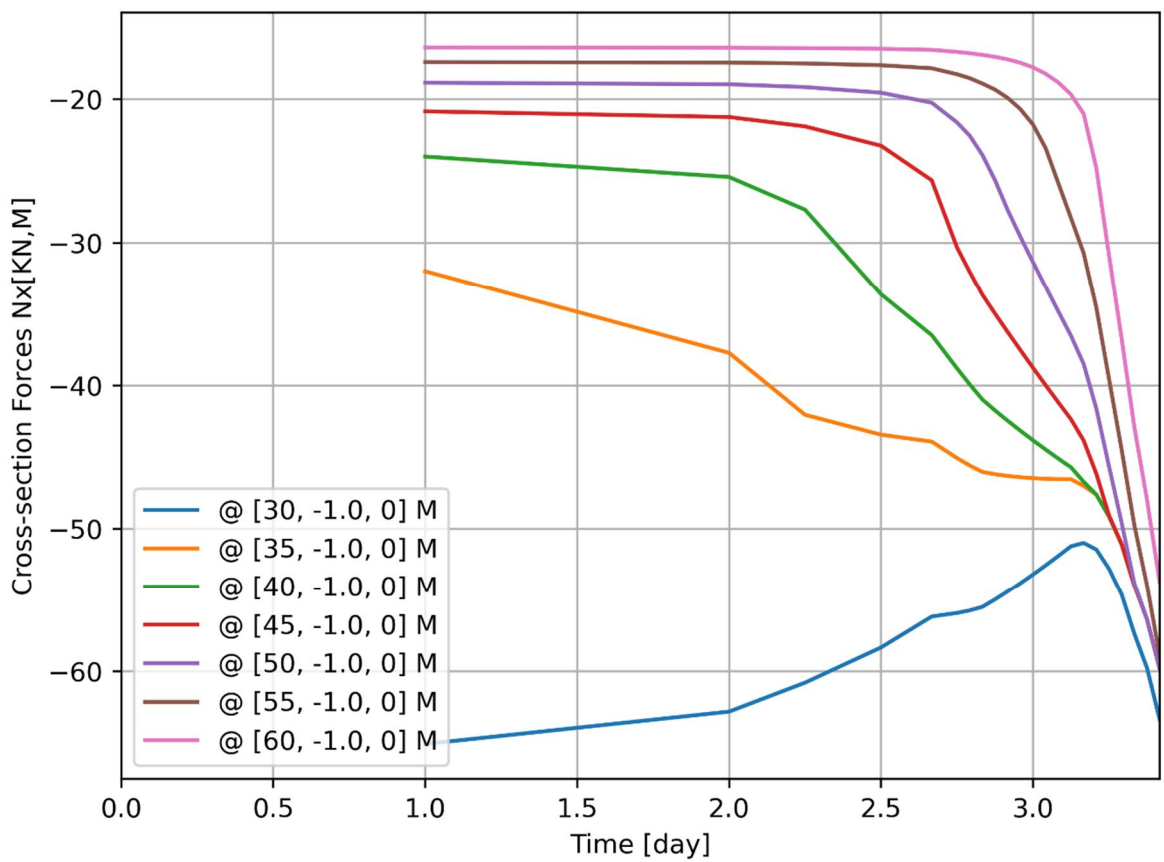
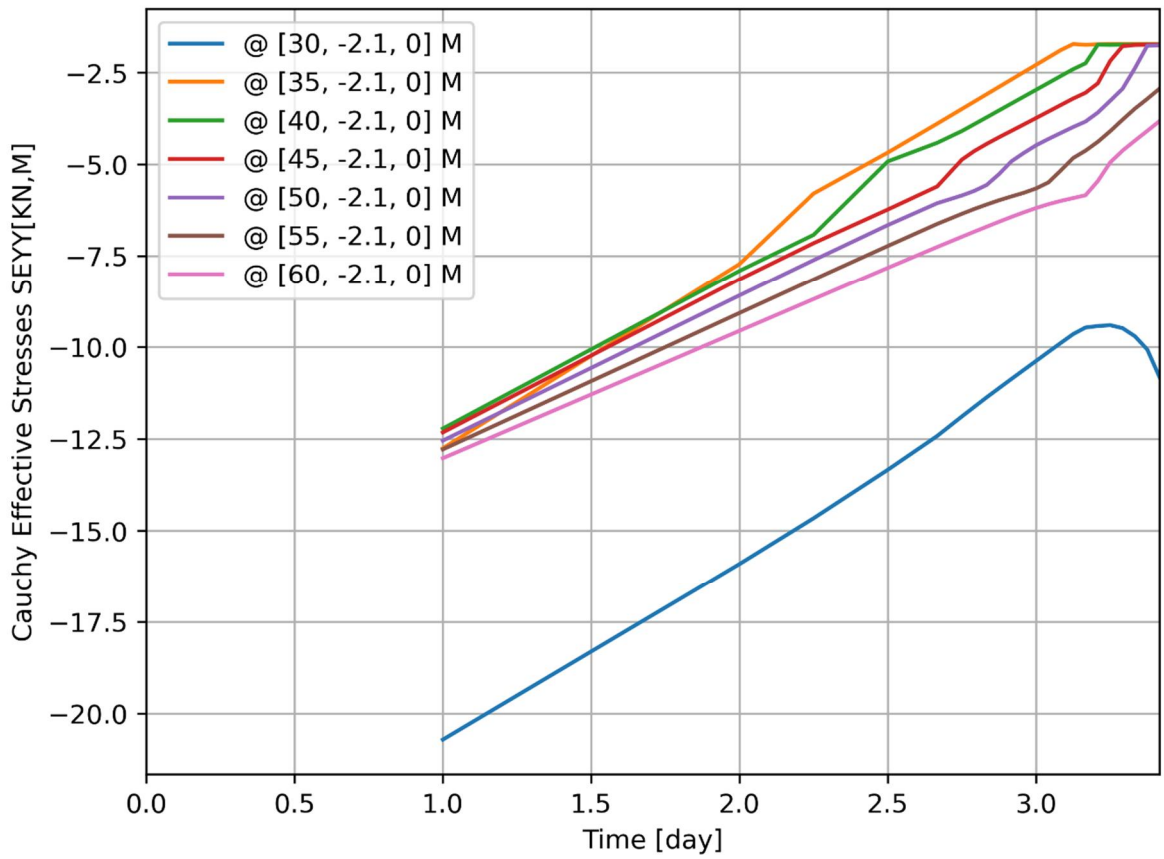


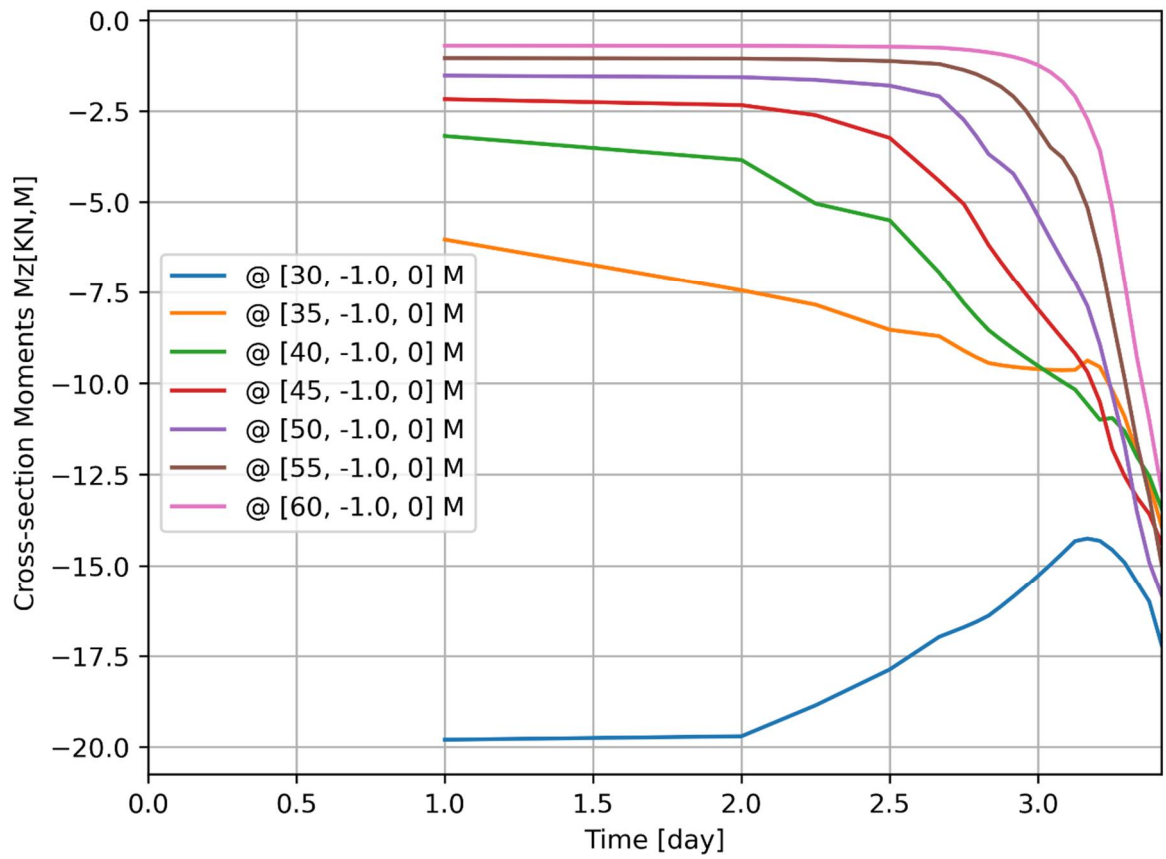








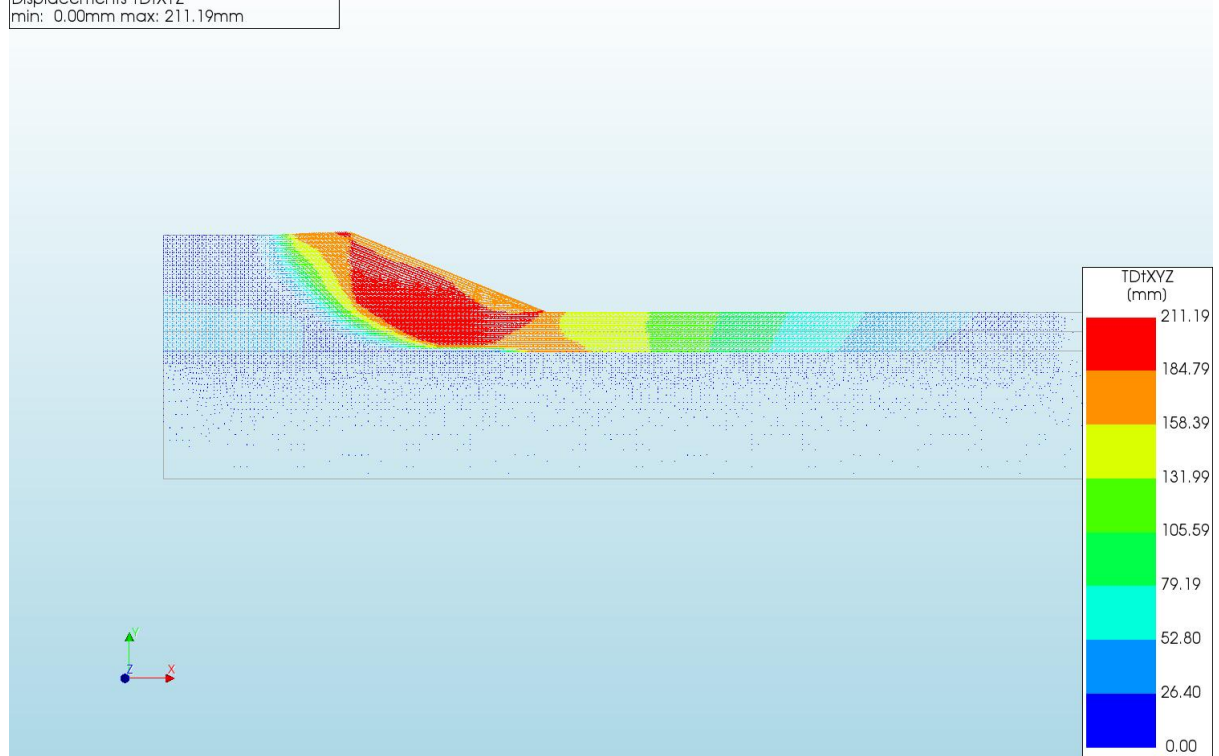




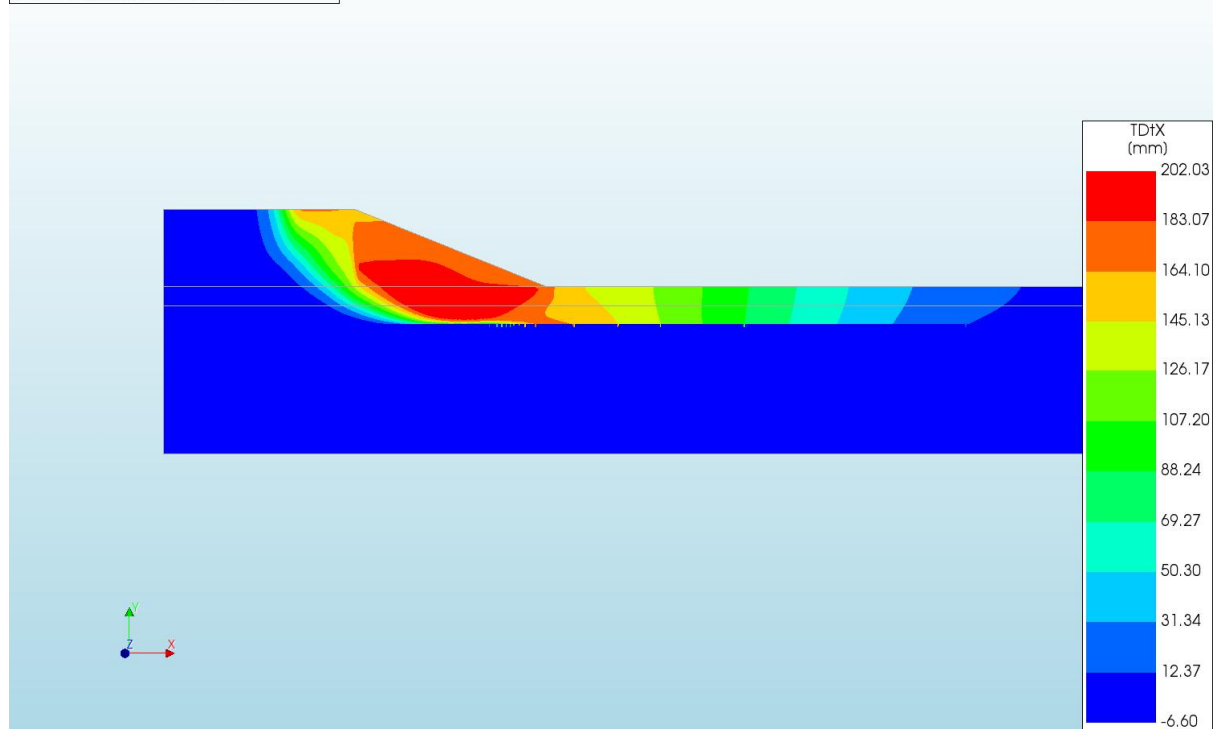
A.2.10

'Output\_d=3 c=15 E=3 k=1e-07 20200818'

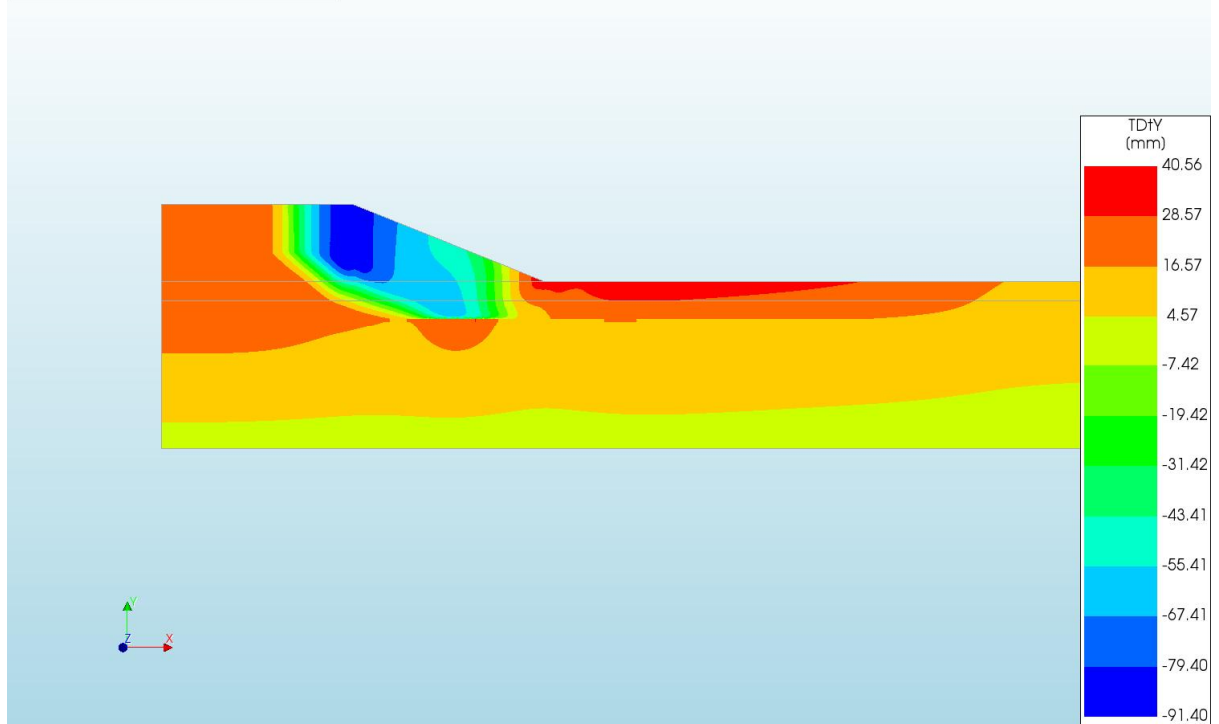
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 211.19mm



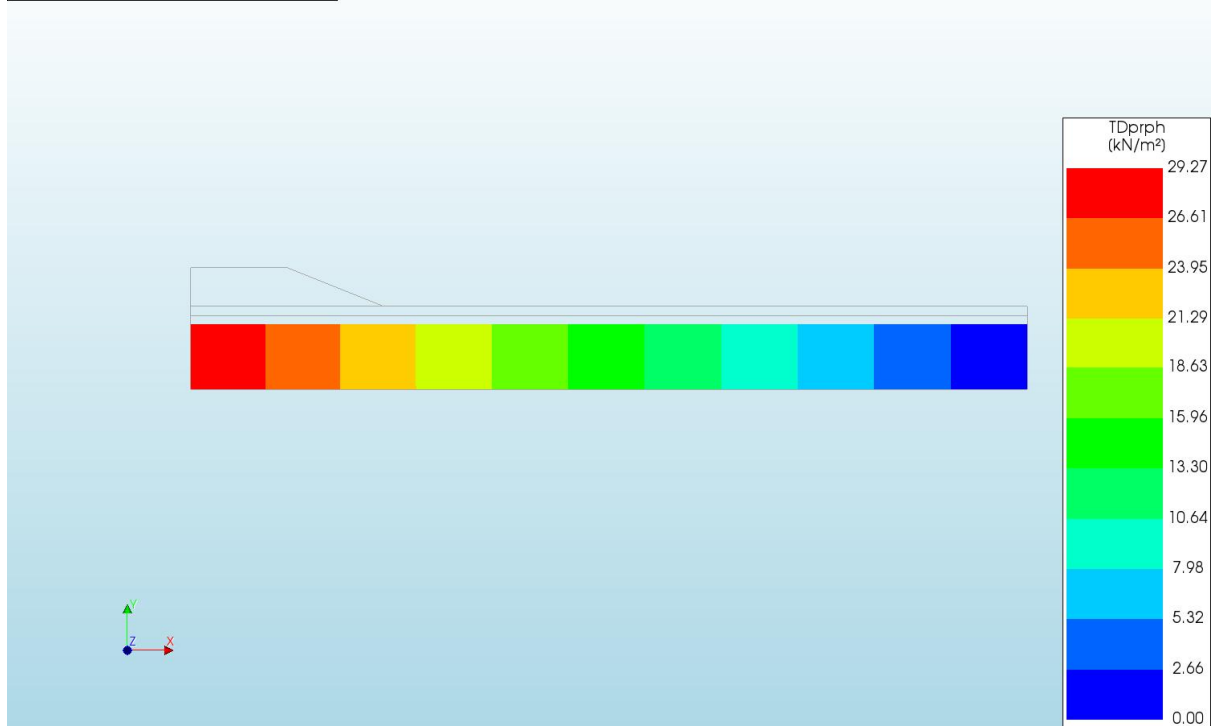
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -6.60mm max: 202.03mm



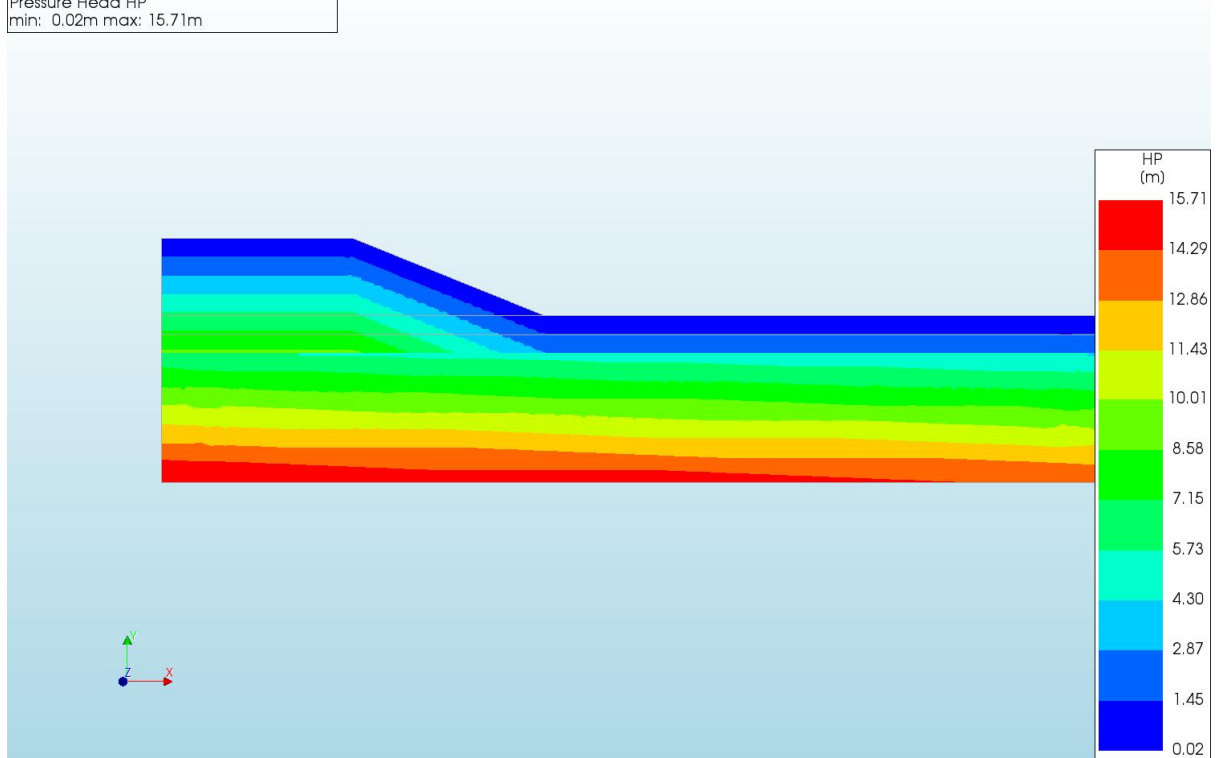
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Displacements TDtY  
min: -91.40mm max: 40.56mm



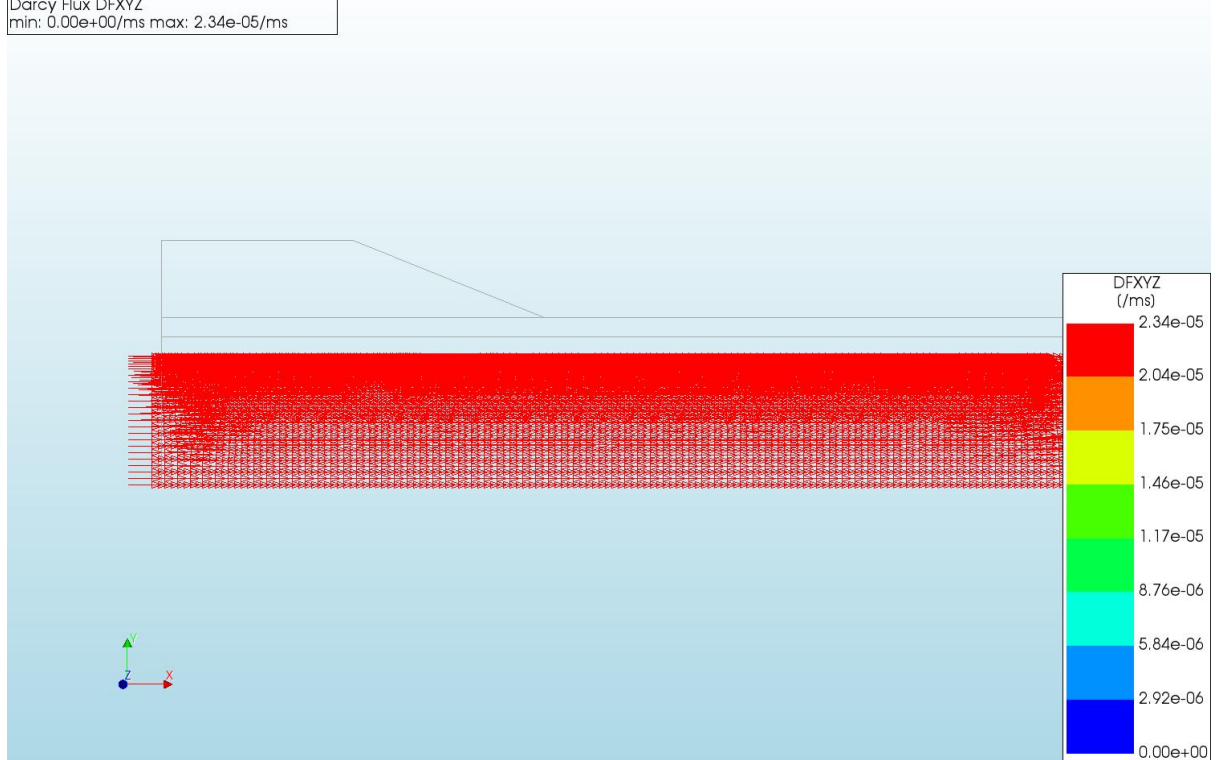
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 29.27kN/m<sup>2</sup>



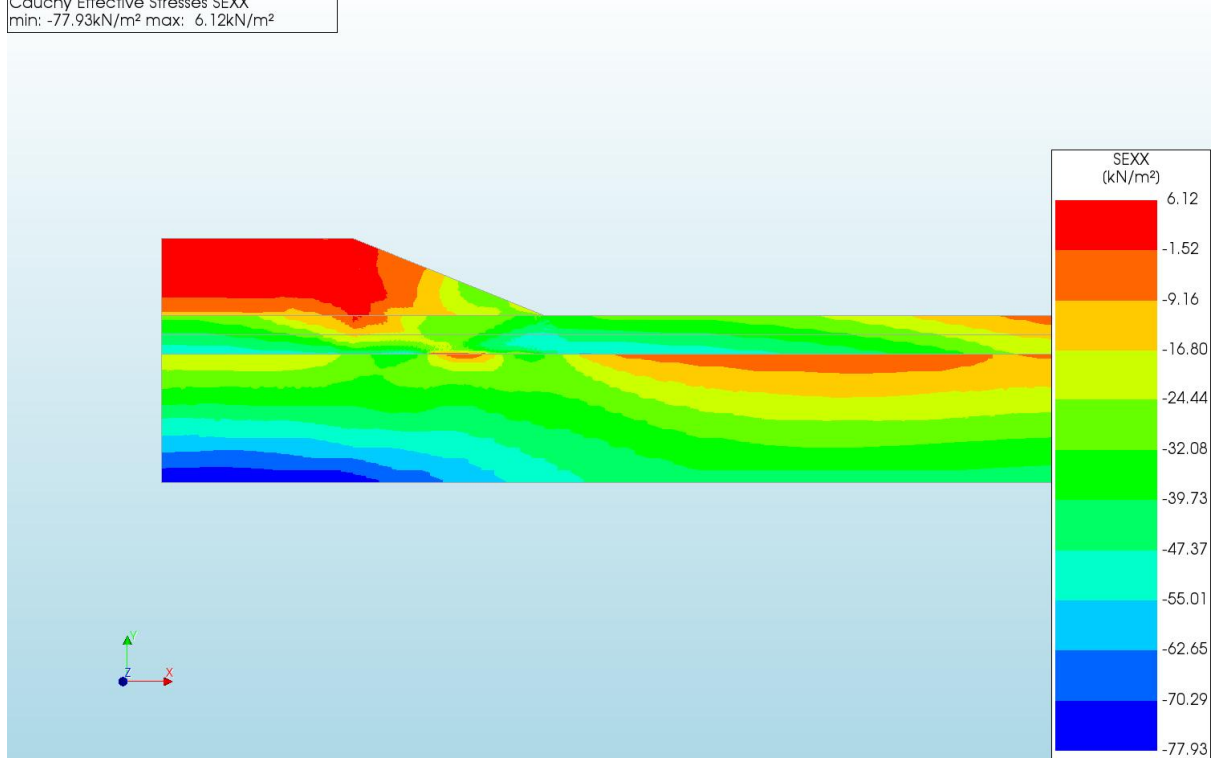
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.71m



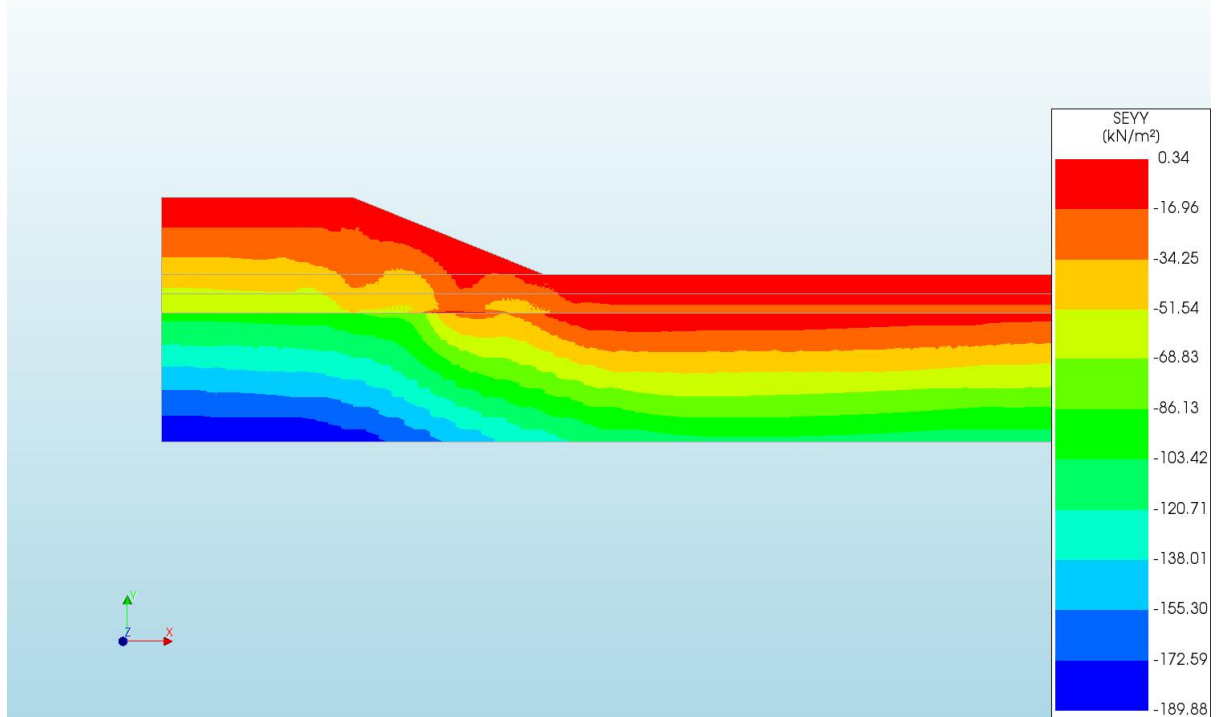
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.34e-05/ms



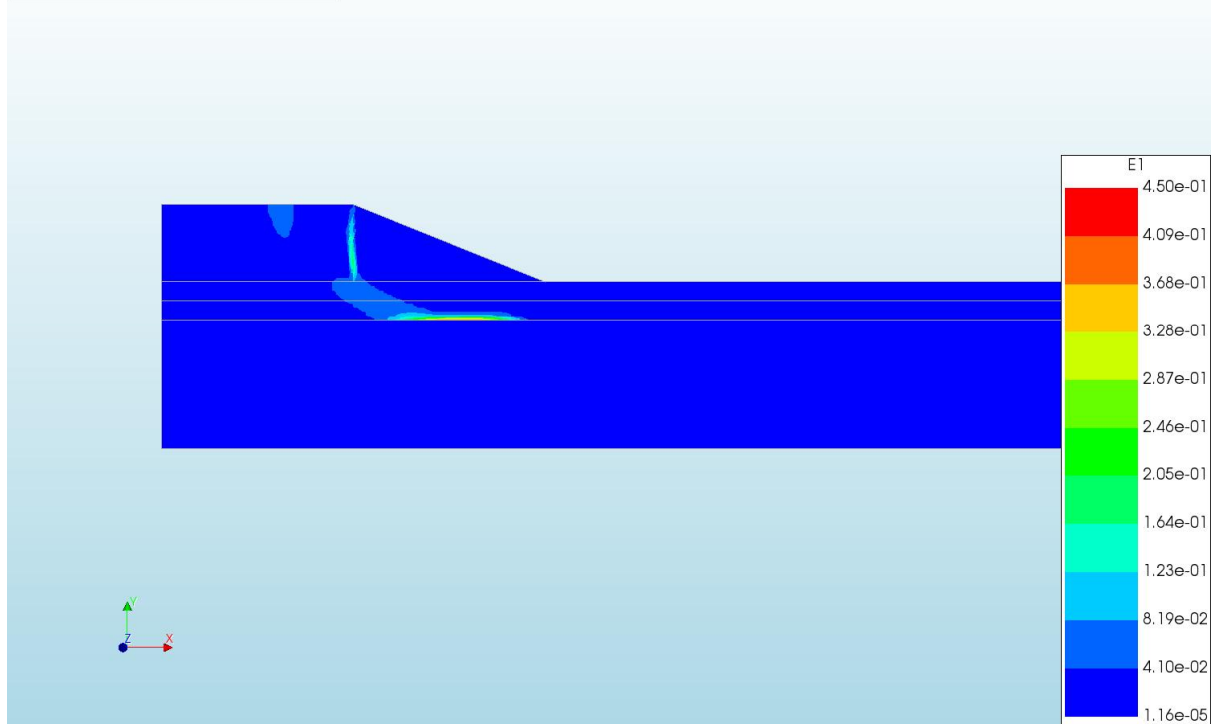
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -77.93kN/m<sup>2</sup> max: 6.12kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -189.88kN/m<sup>2</sup> max: 0.34kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Total Strains E1  
min: 1.16e-05 max: 4.50e-01

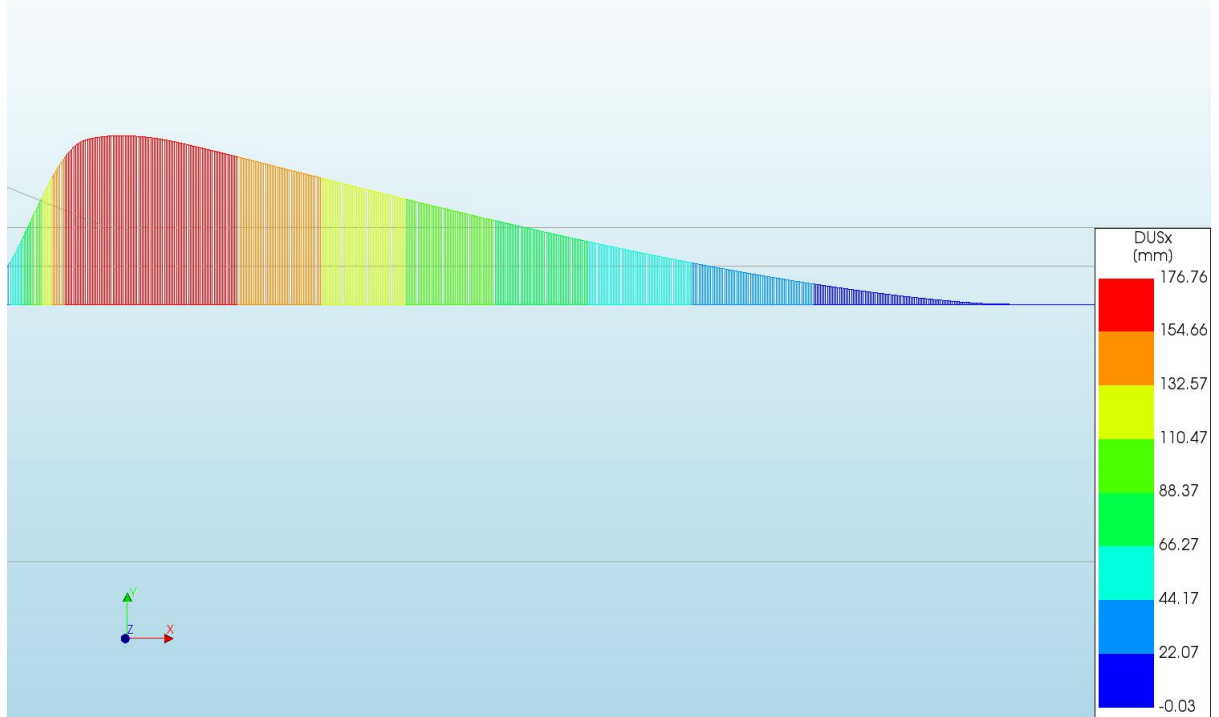


d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.93e-01

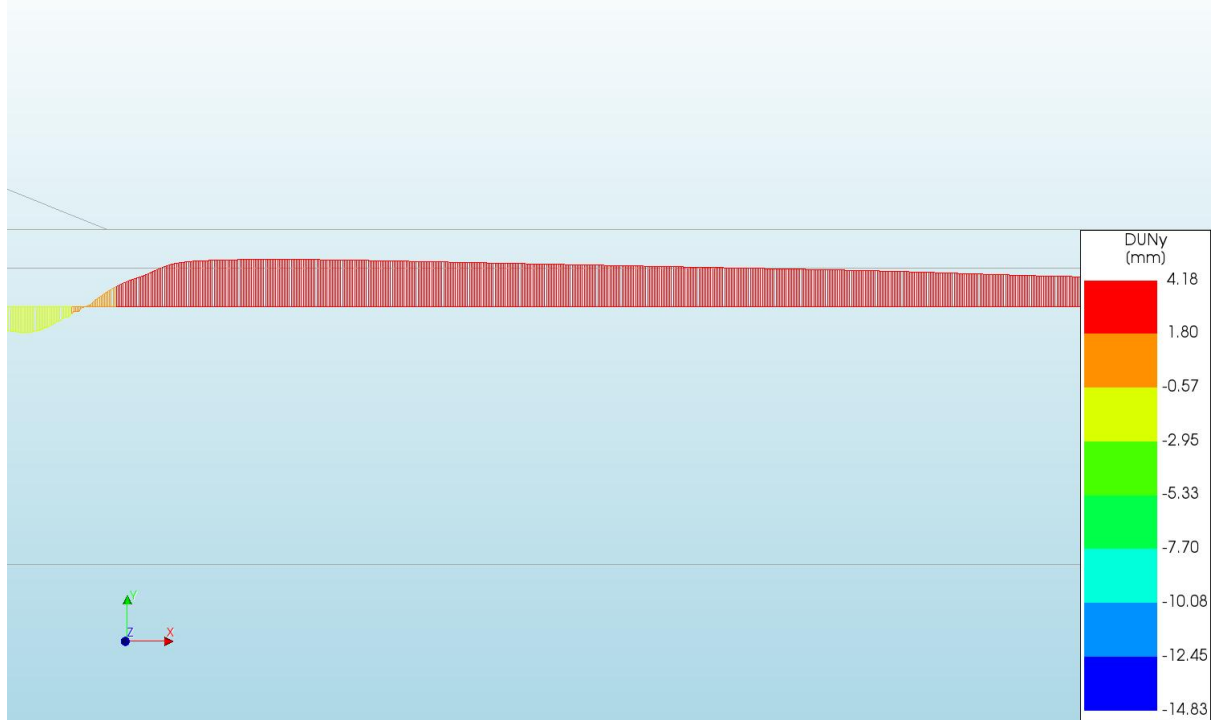




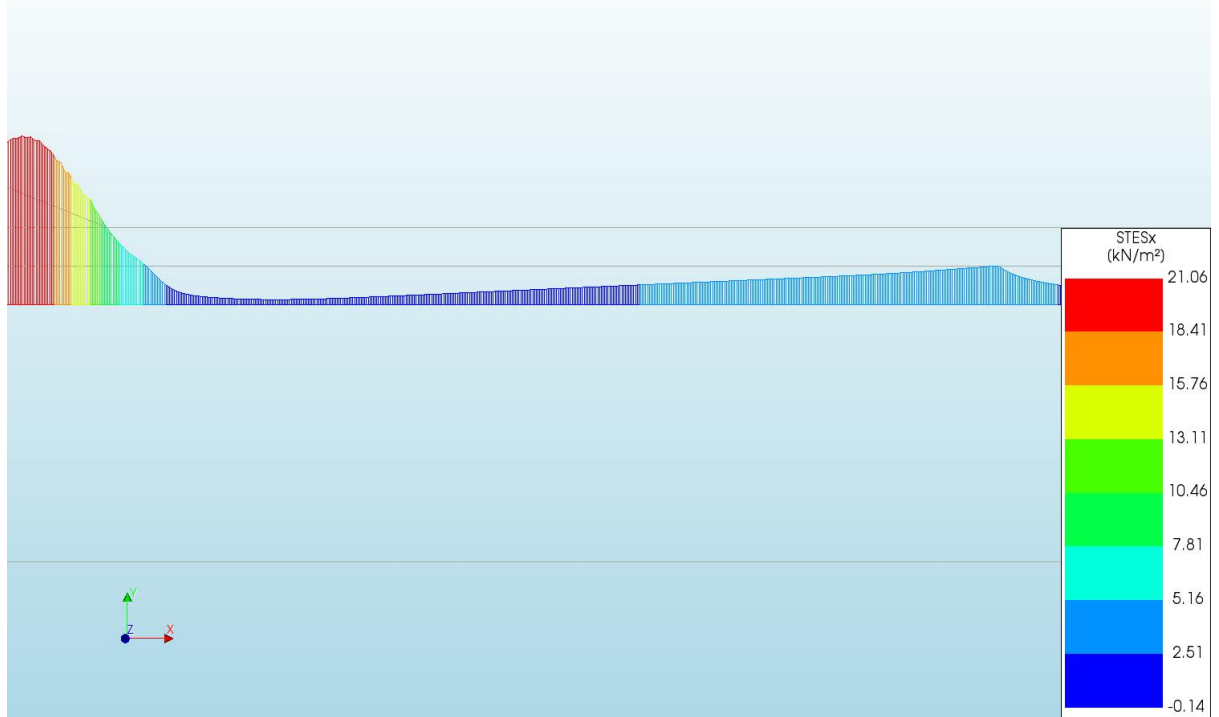
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 176.76mm



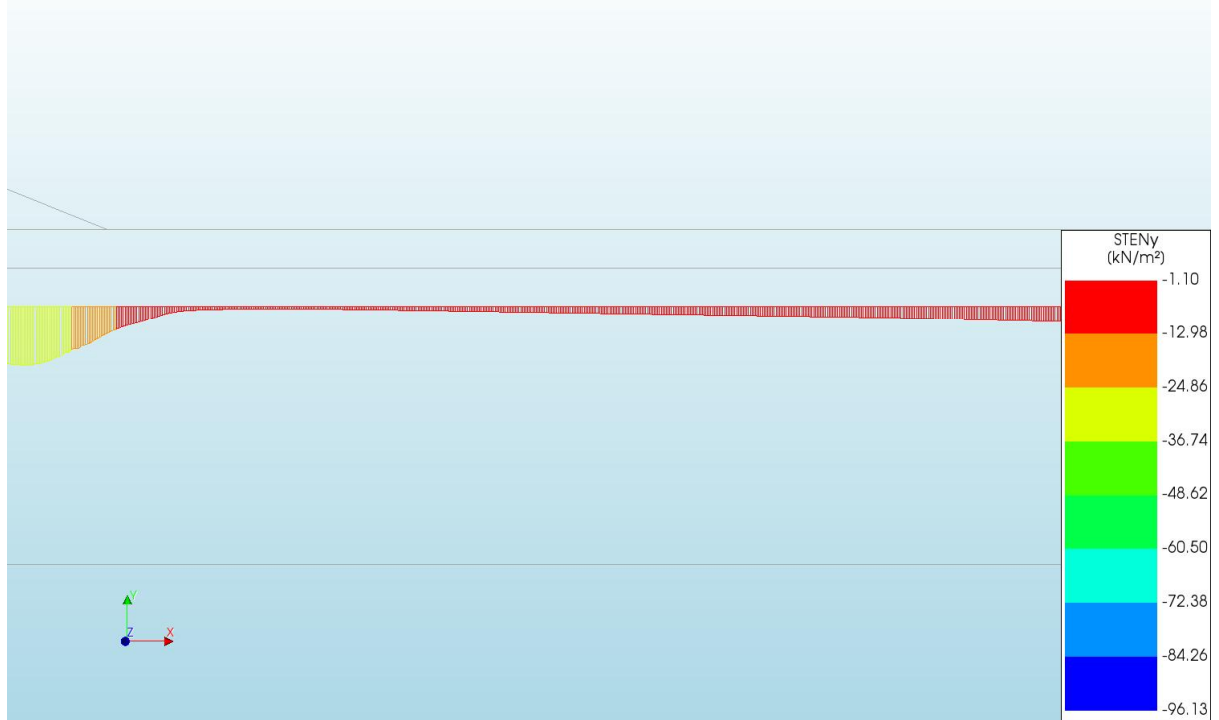
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.83mm max: 4.18mm

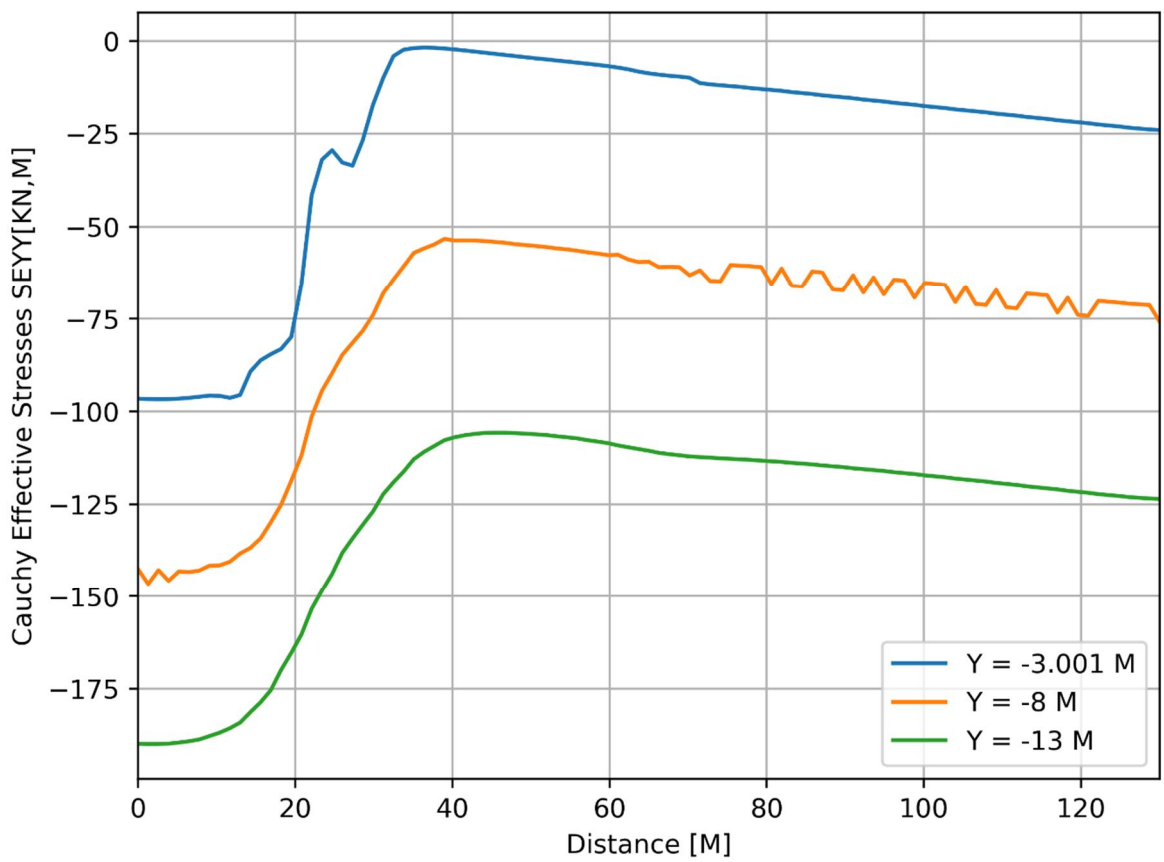
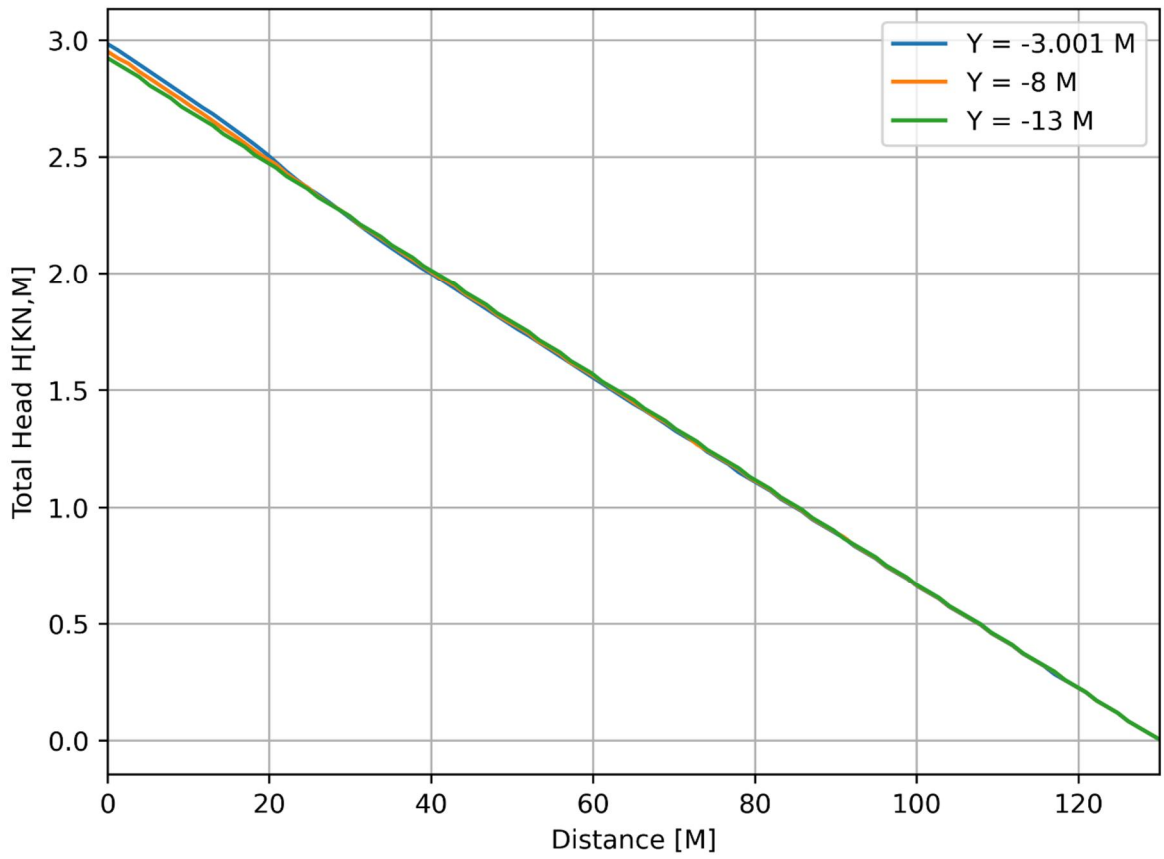


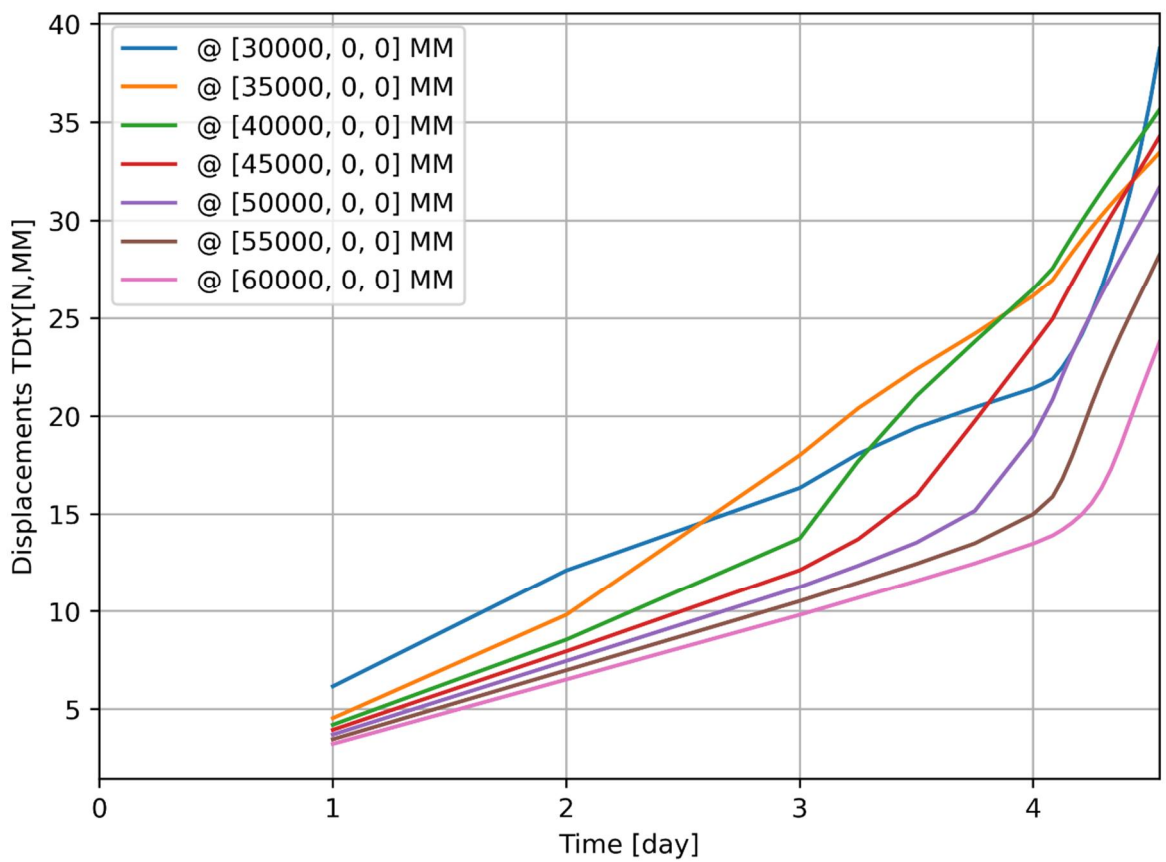
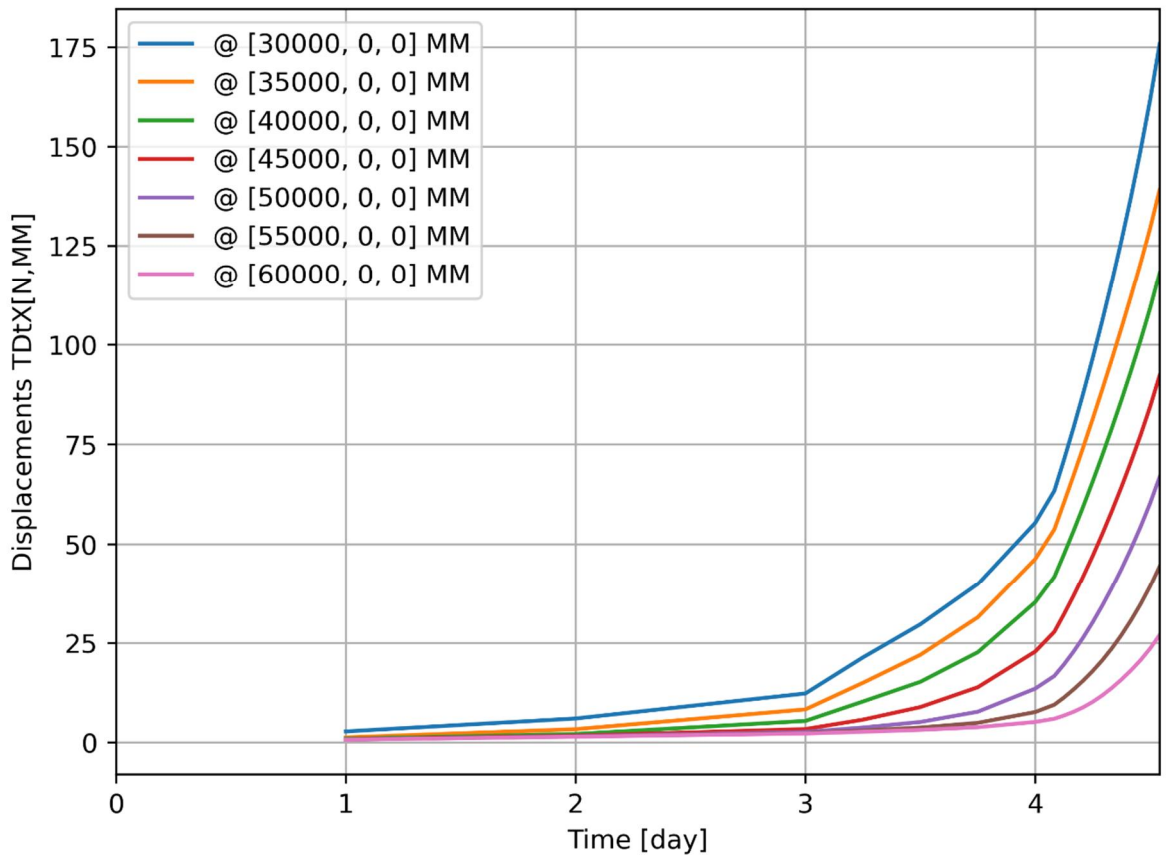
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.14kN/m<sup>2</sup> max: 21.06kN/m<sup>2</sup>

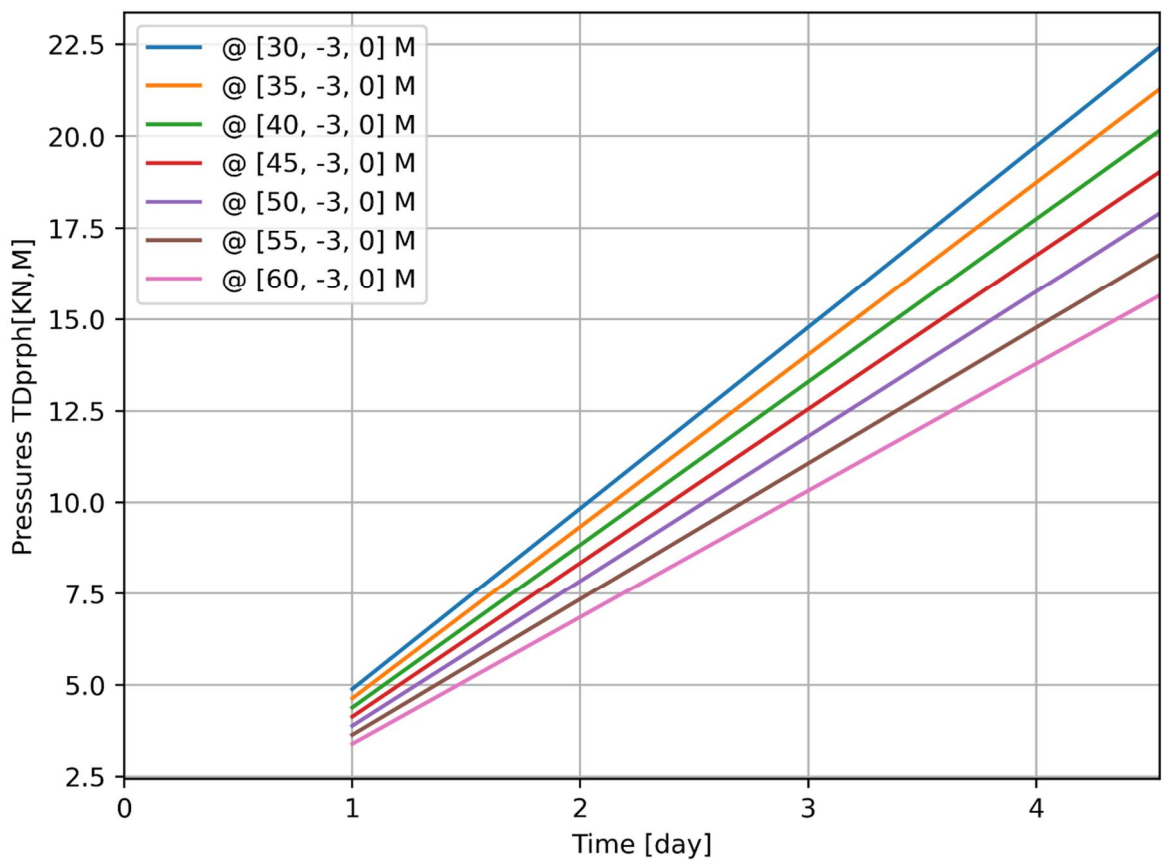
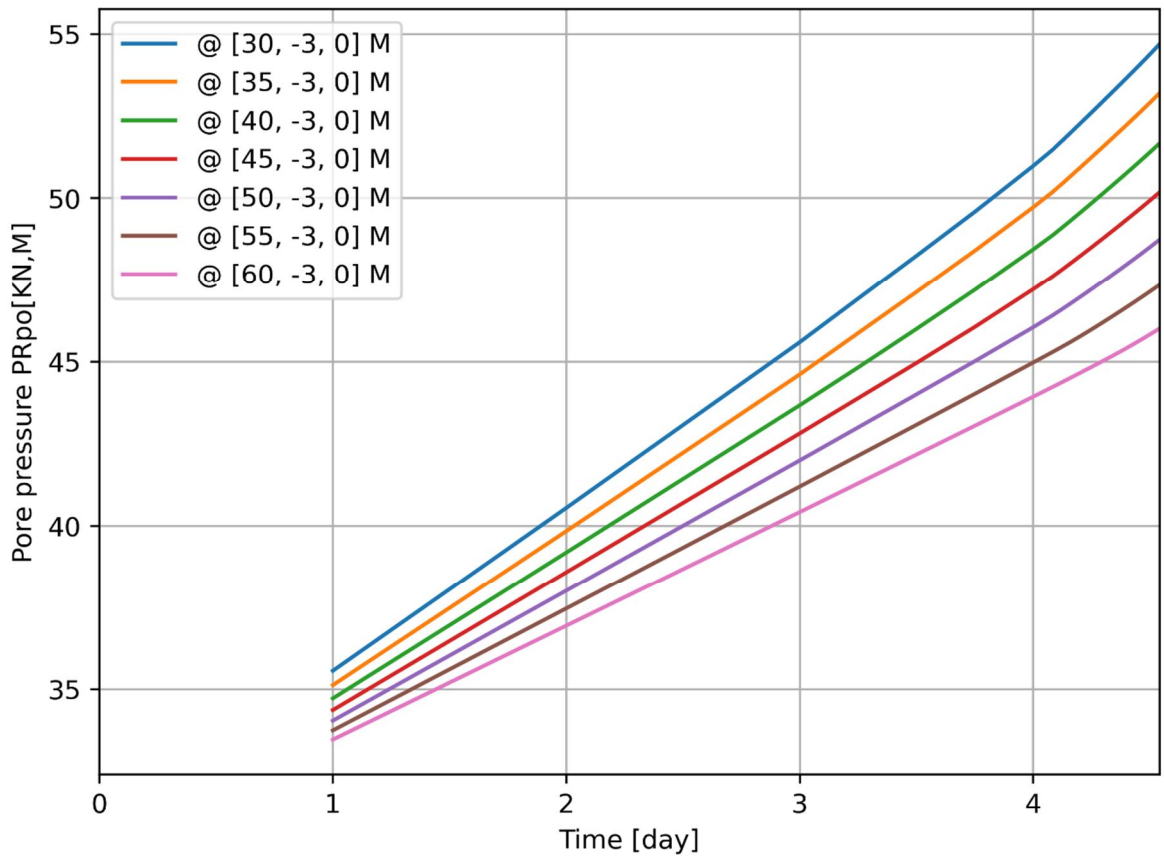


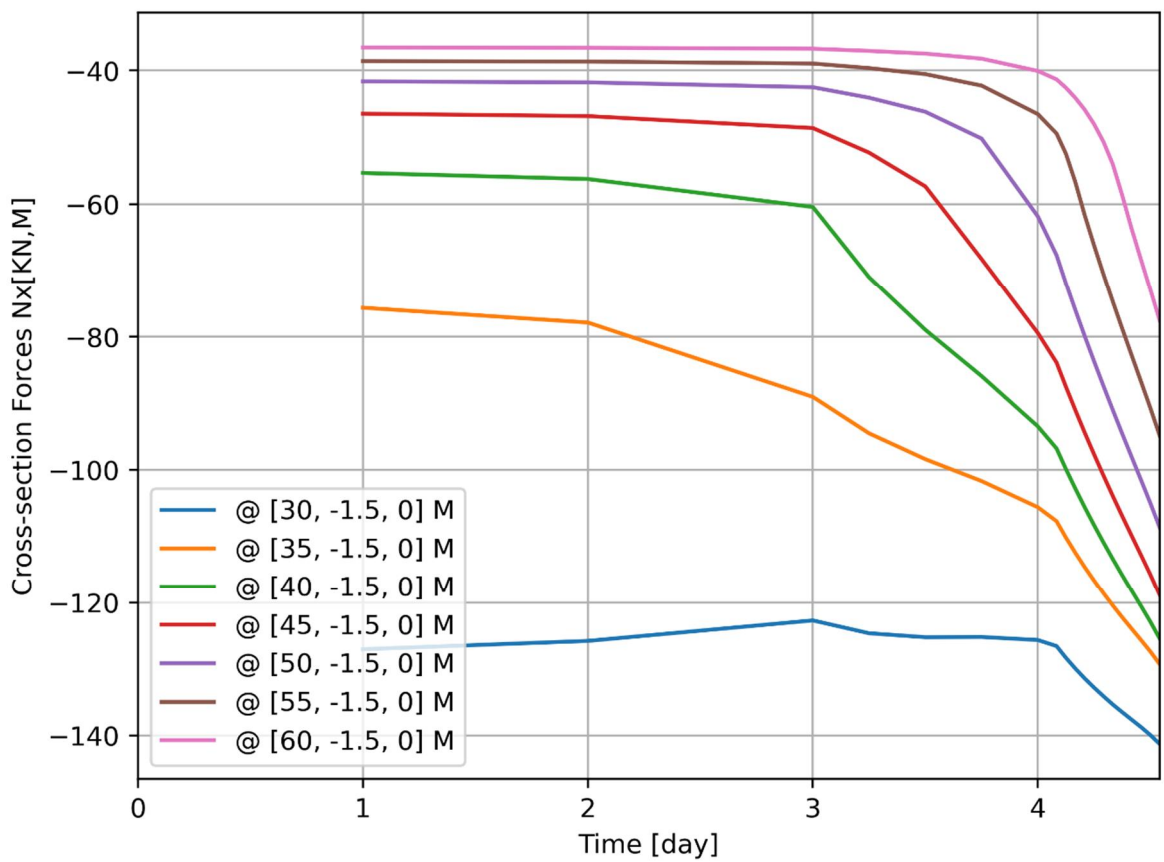
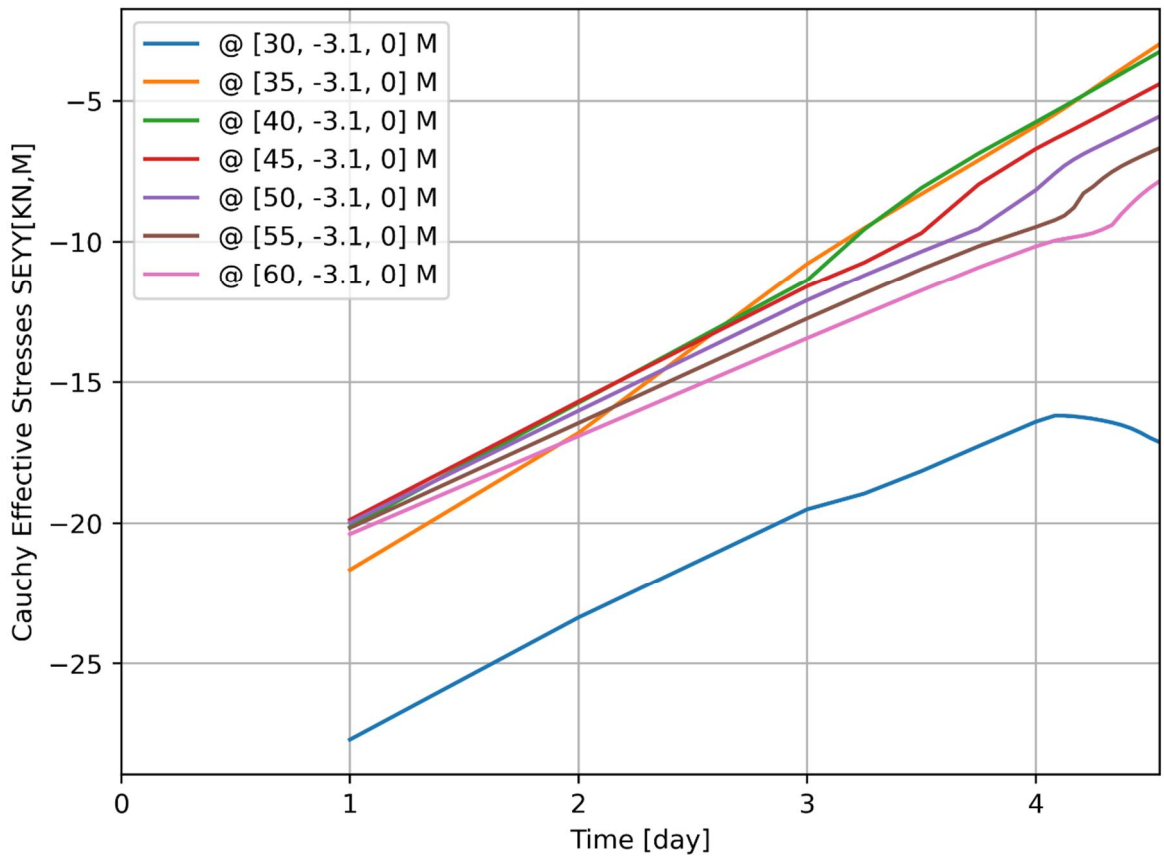
d=3\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 25, Time 4 day 13 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -96.13kN/m<sup>2</sup> max: -1.10kN/m<sup>2</sup>

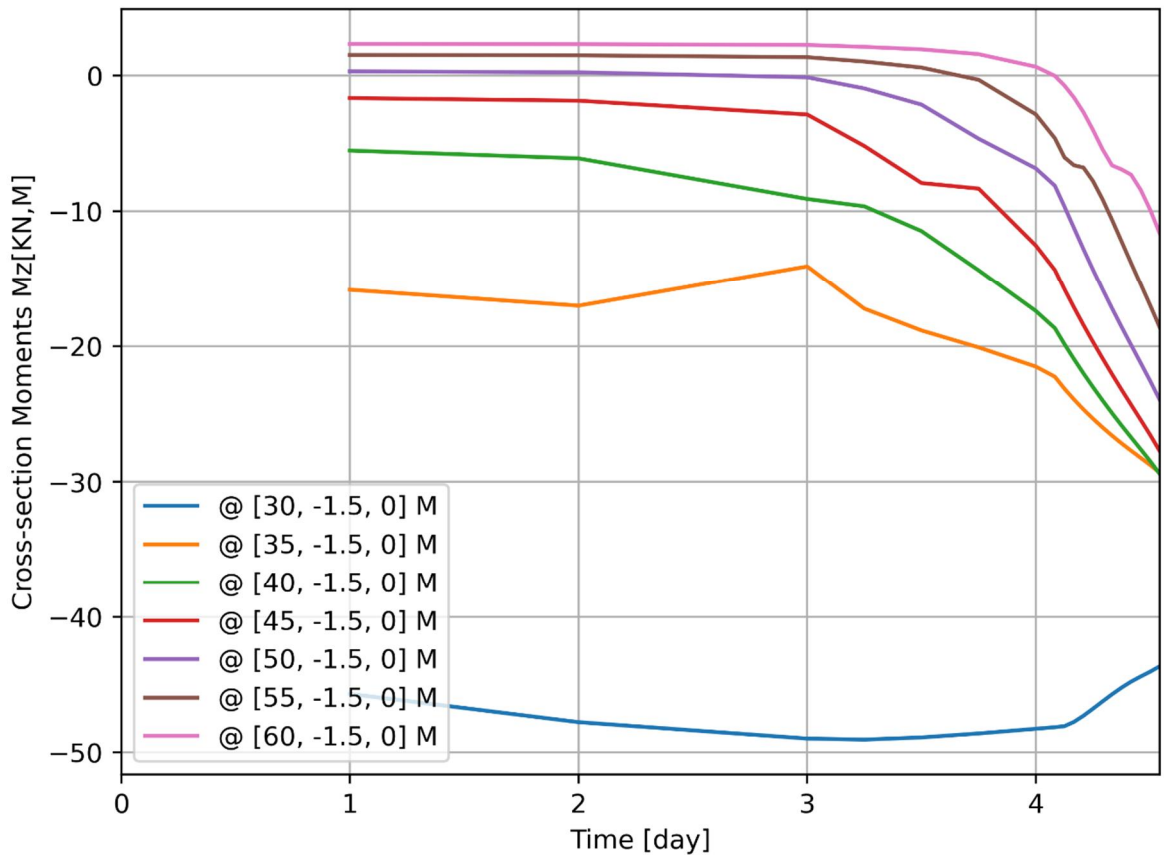








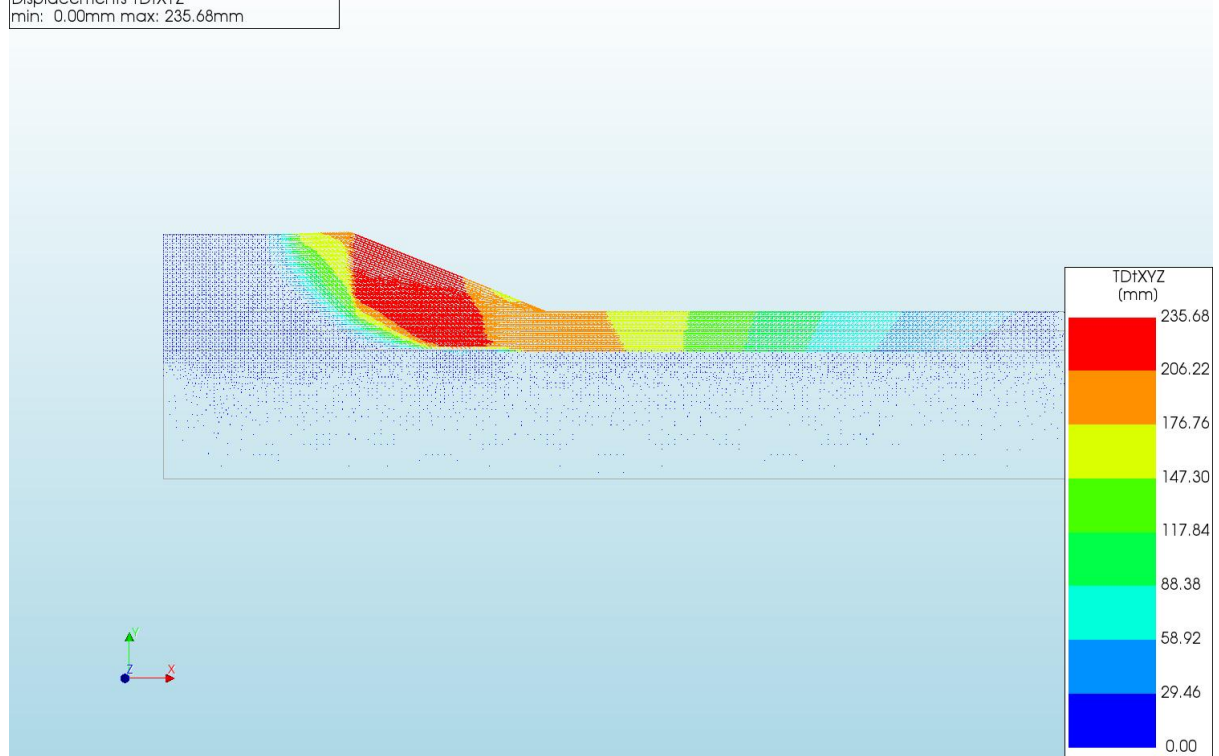




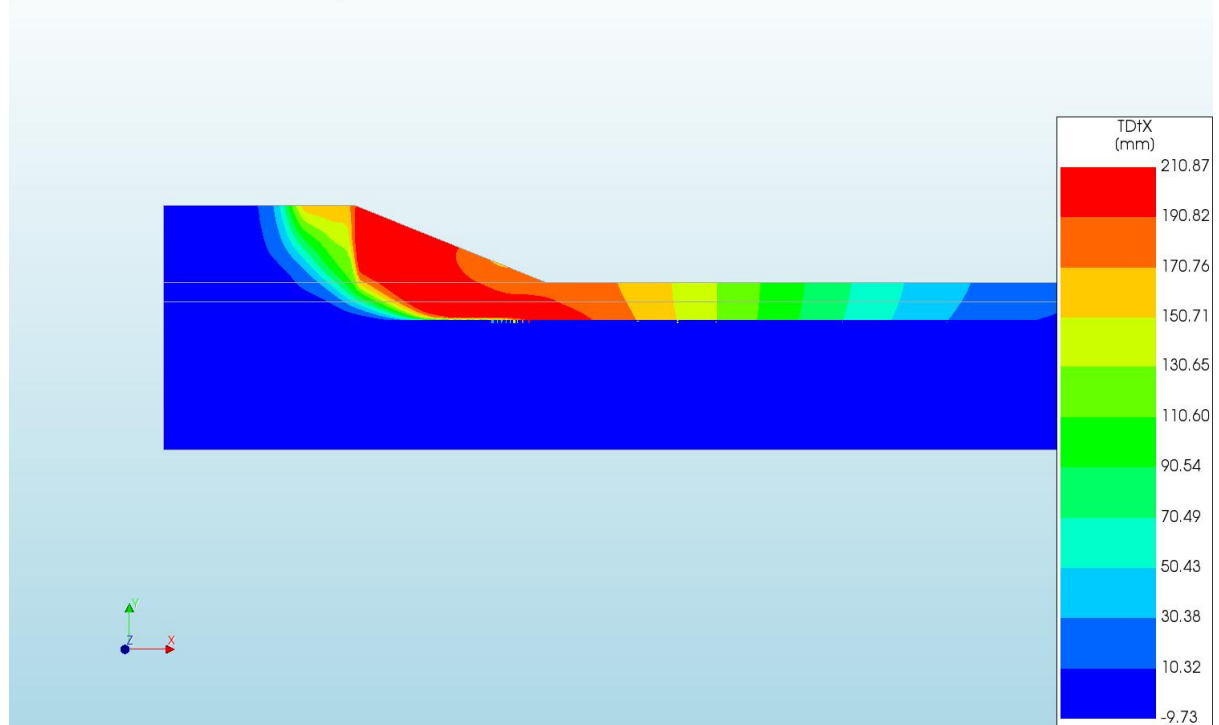
A.2.11

'Output\_d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 235.68mm

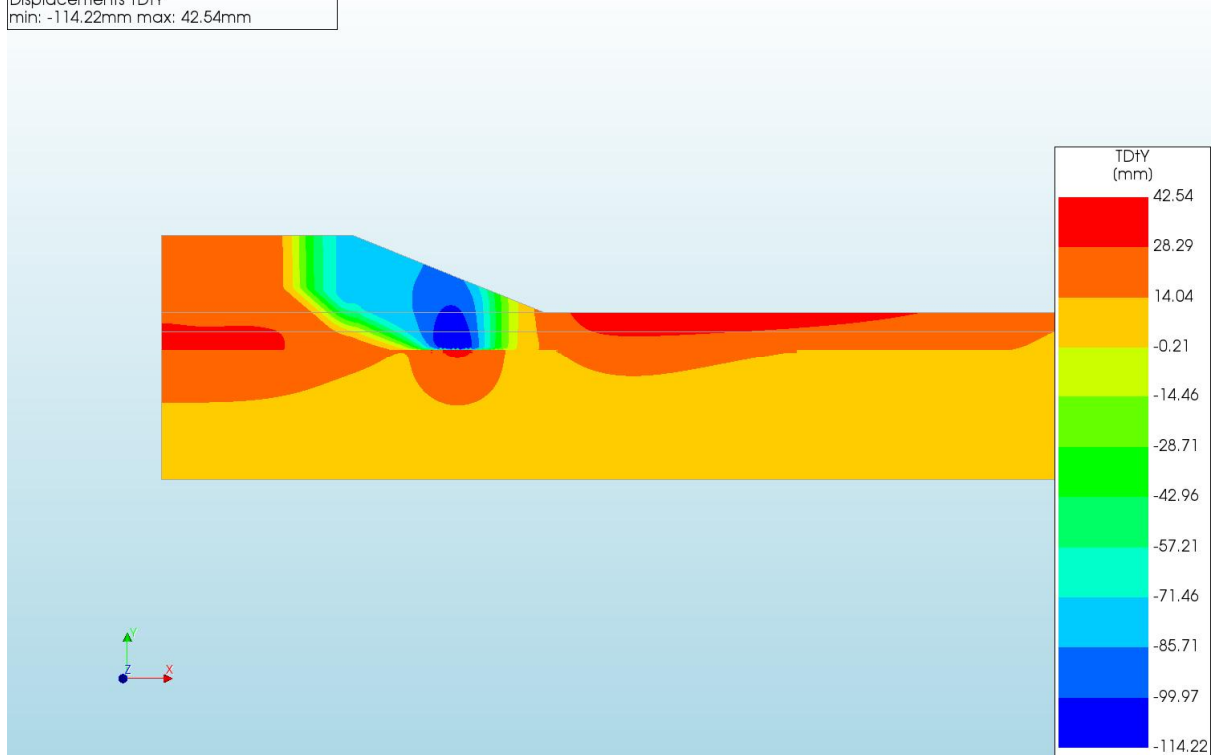


d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -9.73mm max: 210.87mm

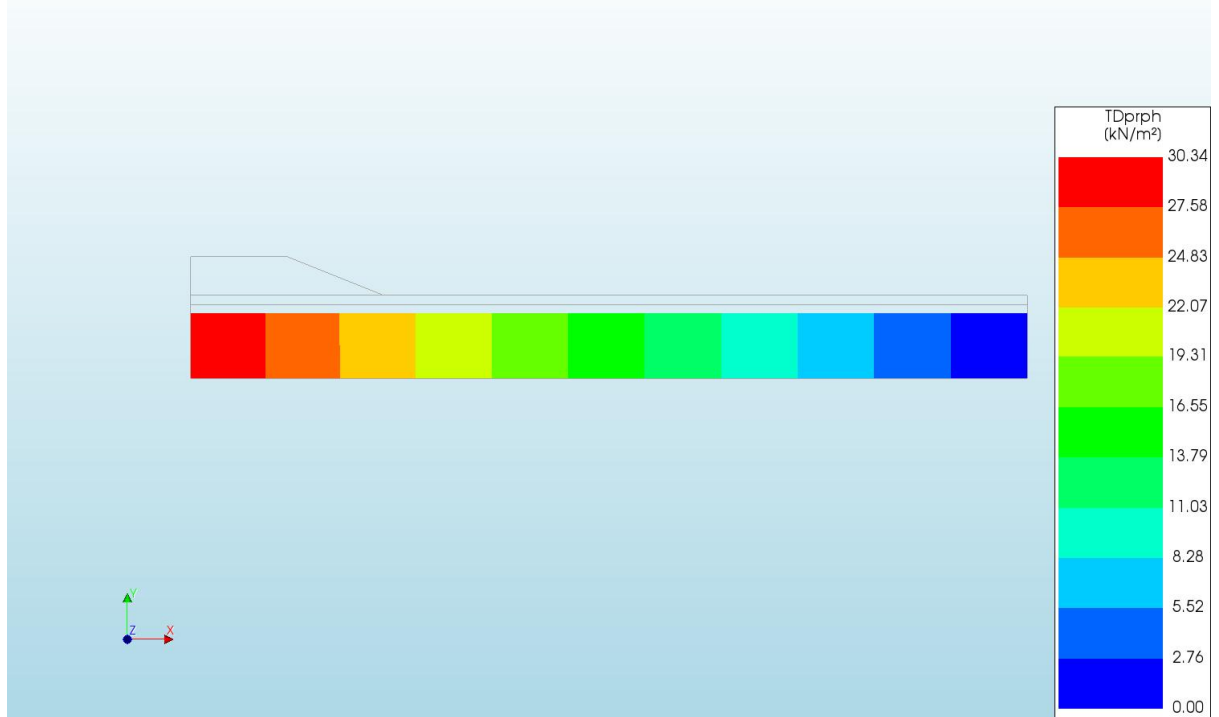




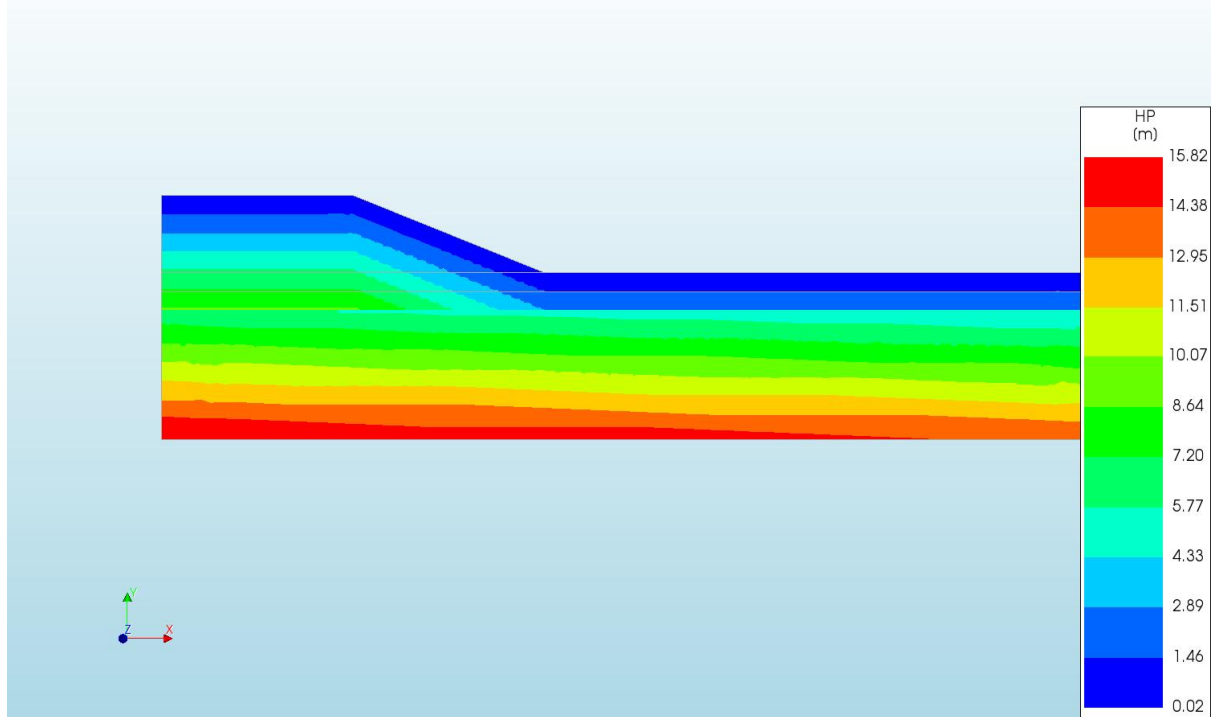
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
Displacements TDY  
min: -114.22mm max: 42.54mm



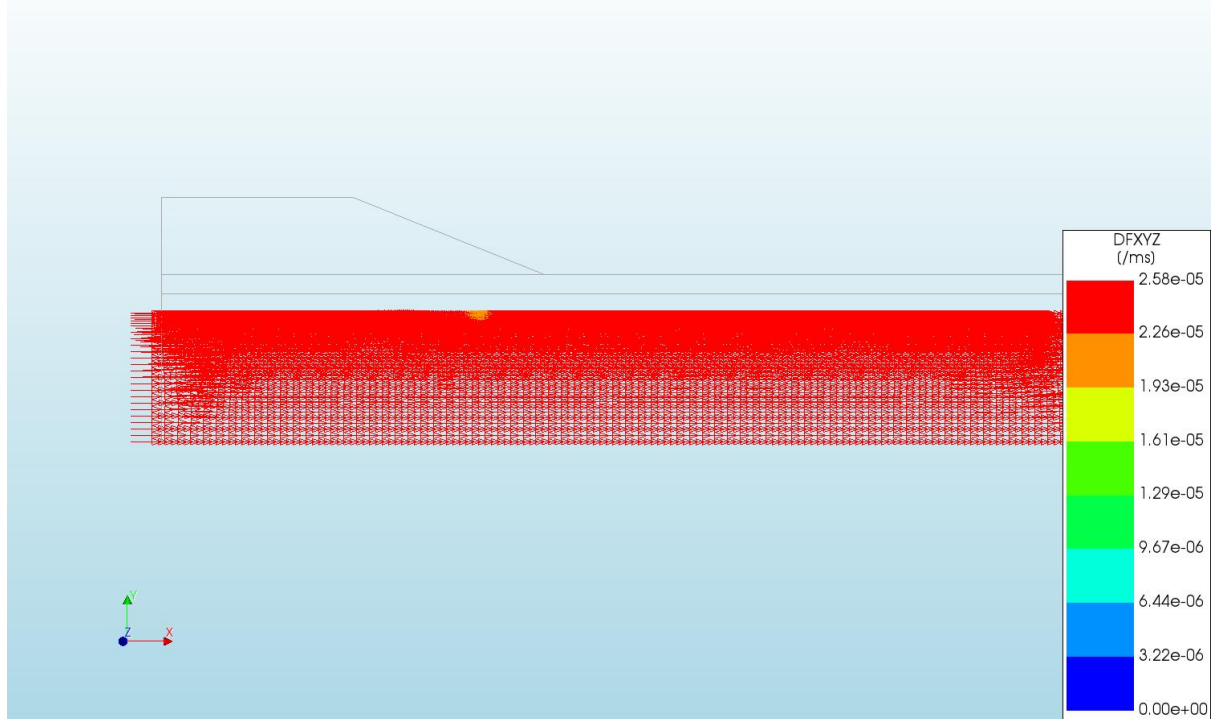
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 30.34kN/m<sup>2</sup>



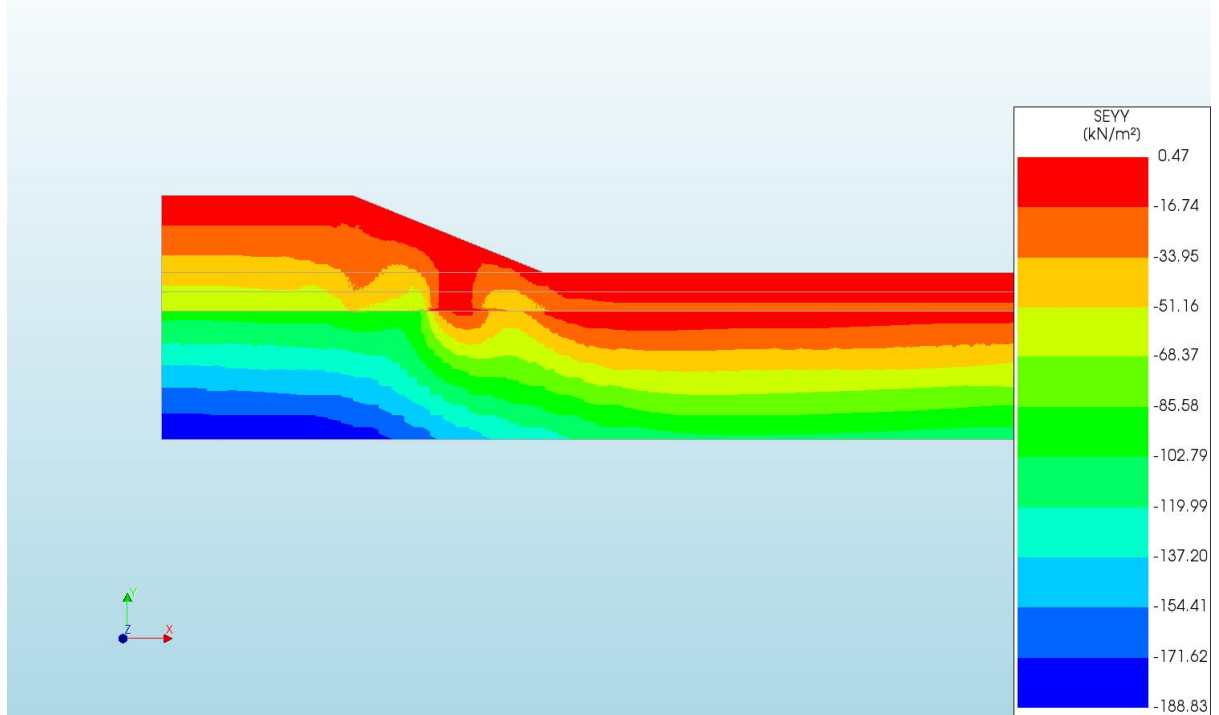
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.82m



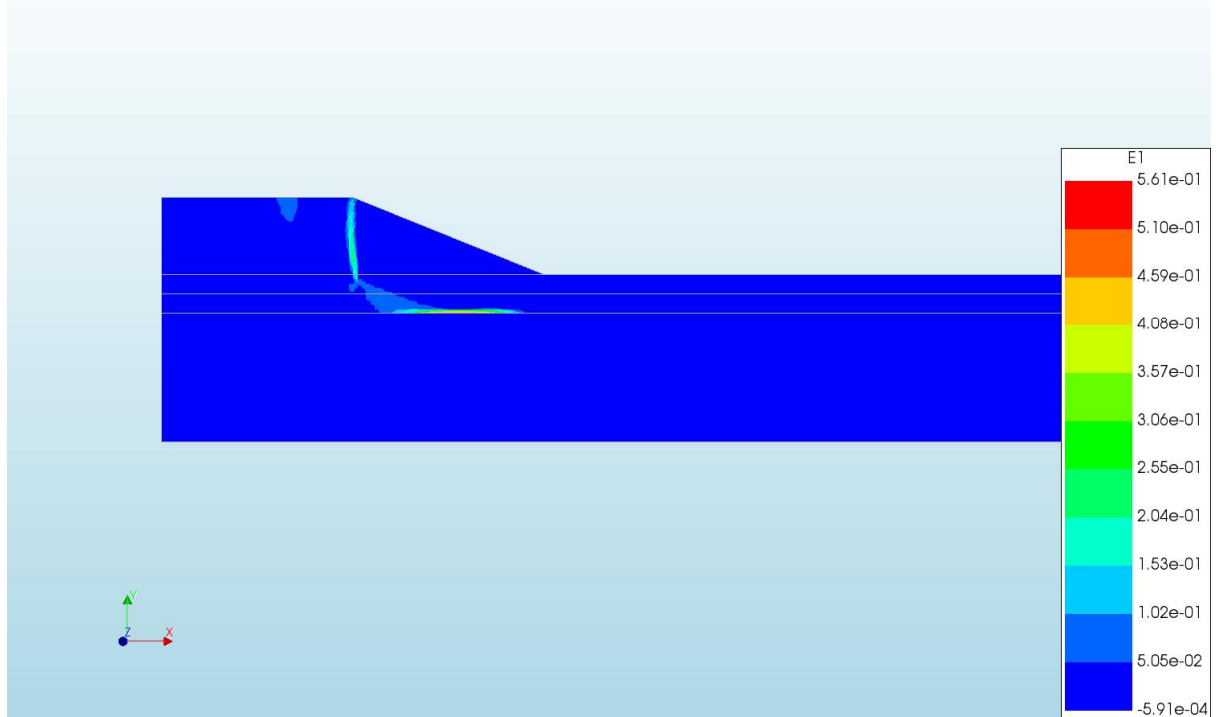
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.58e-05/ms



d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -188,83kN/m<sup>2</sup> max: 0.47kN/m<sup>2</sup>



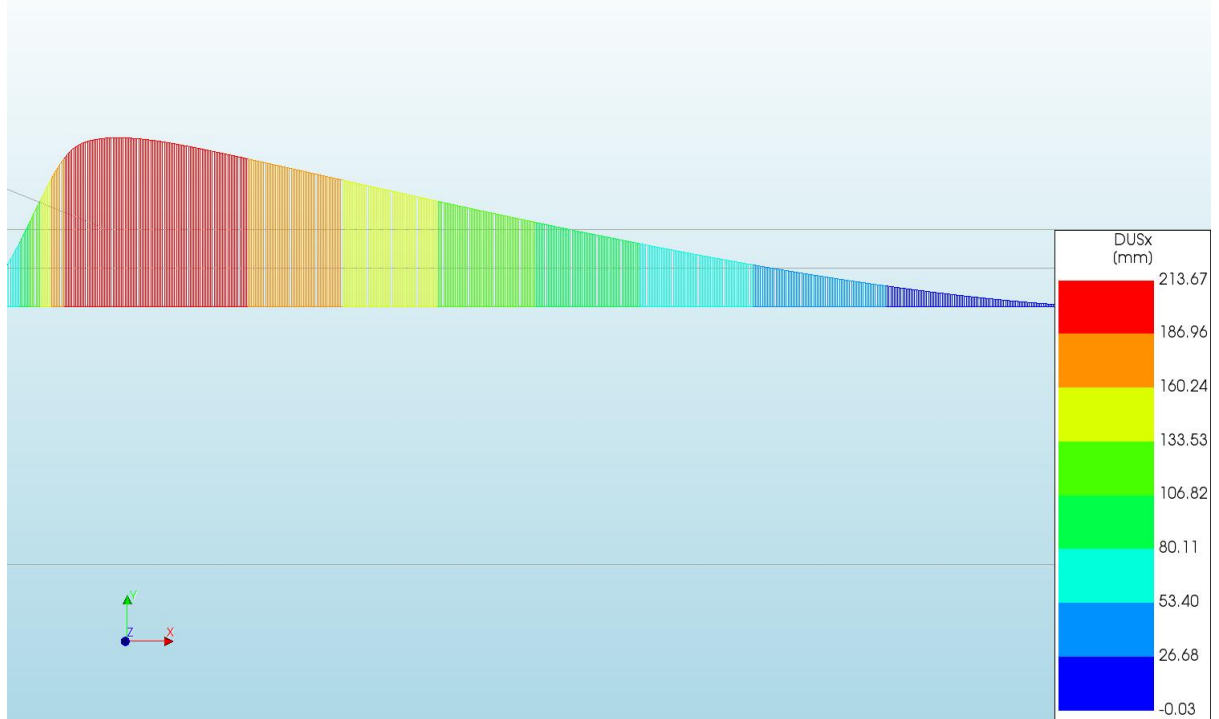
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
Total Strains E1  
min: -5.91e-04 max: 5.61e-01



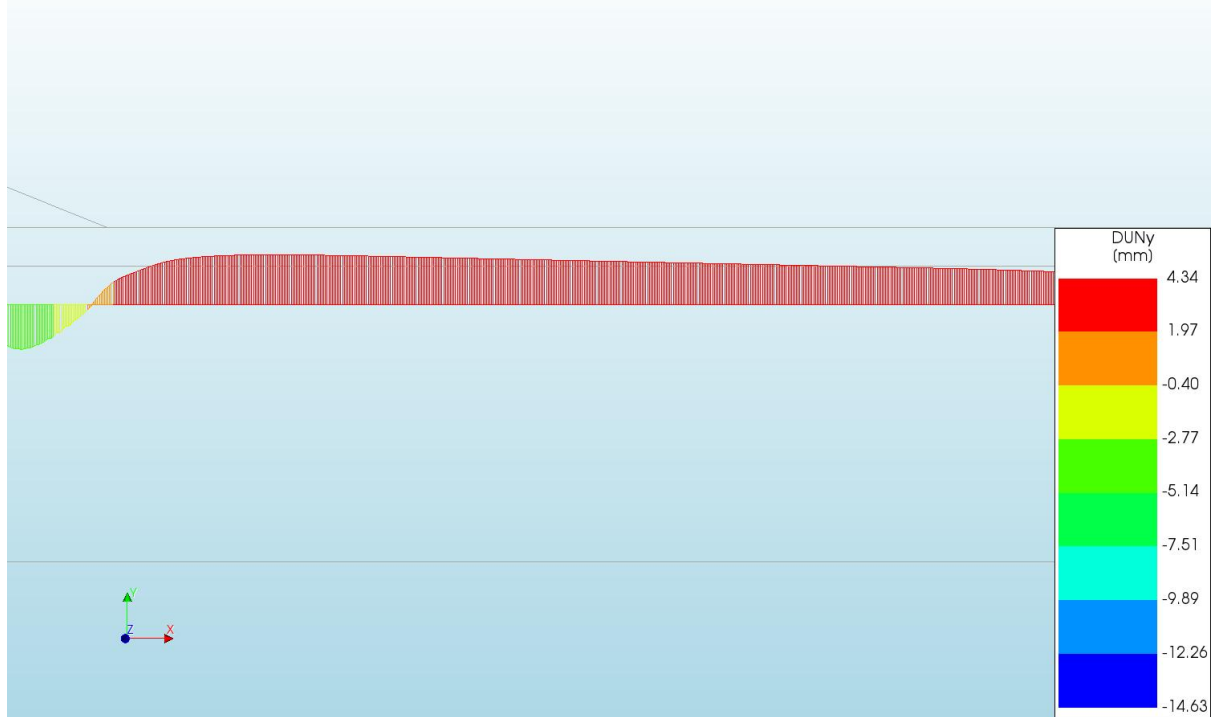
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Plastic Strains Epeq  
 min: 0.00e+00 max: 5.67e-01



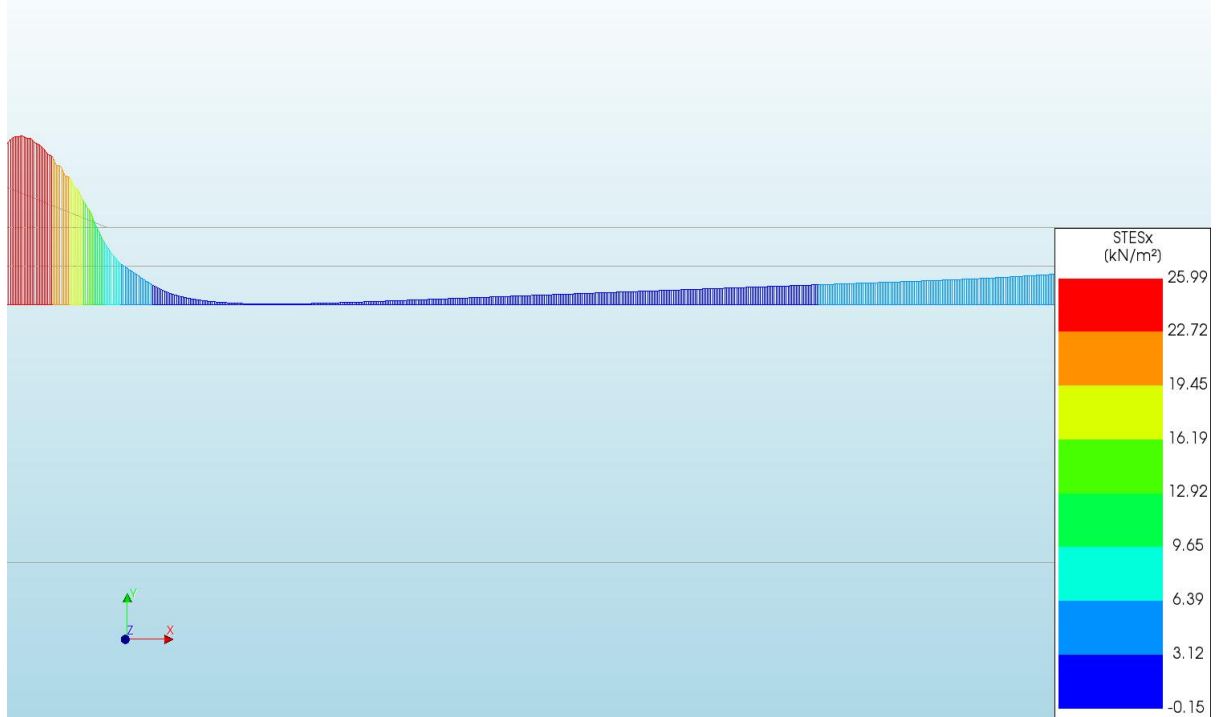
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.03mm max: 213.67mm



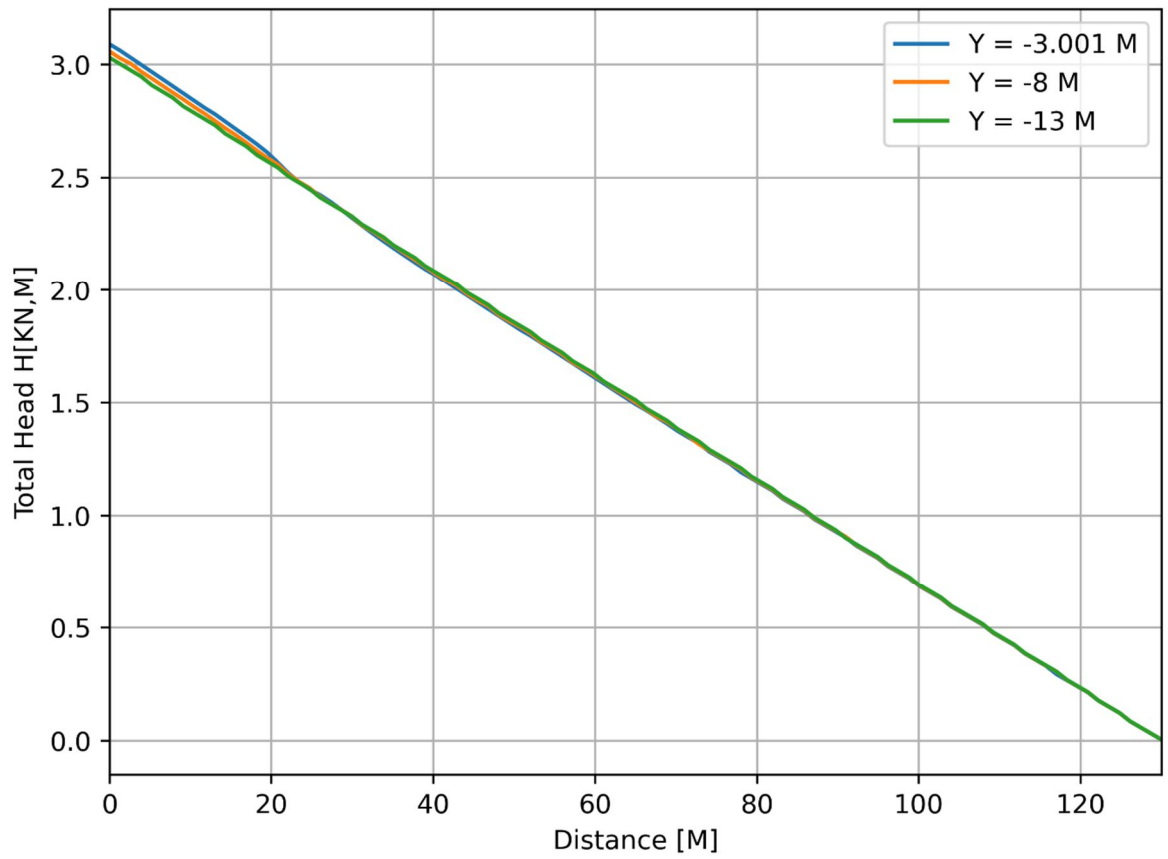
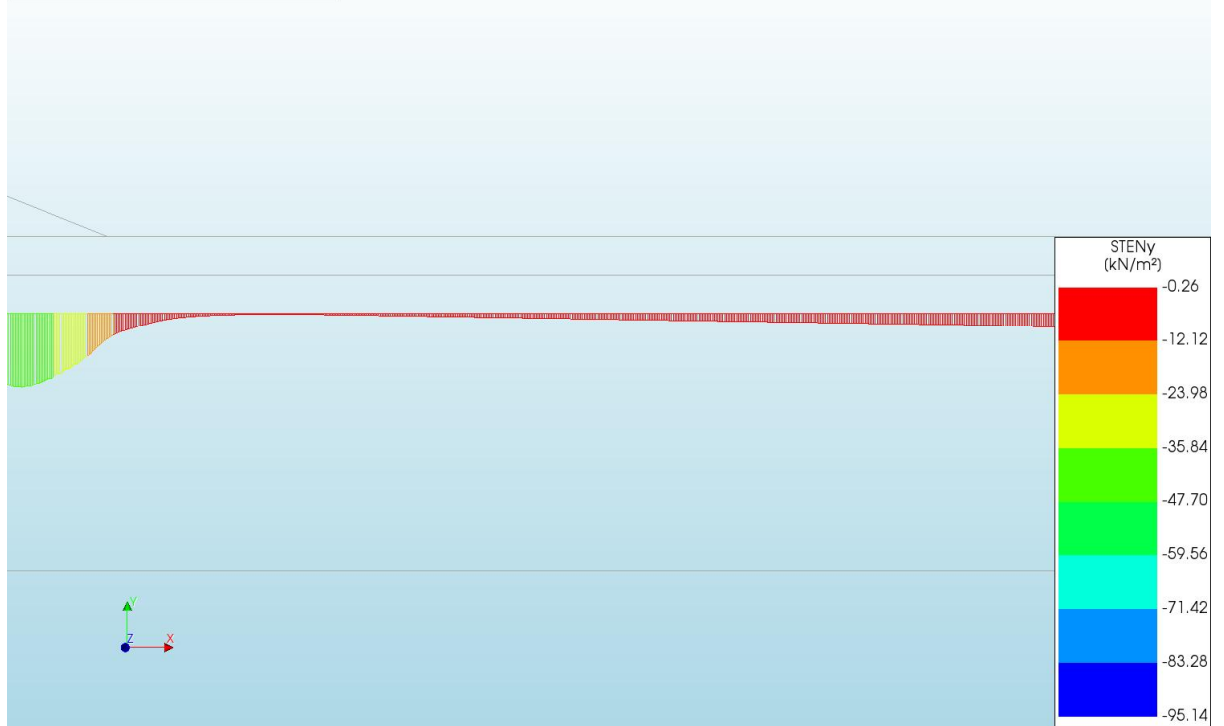
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -14.63mm max: 4.34mm

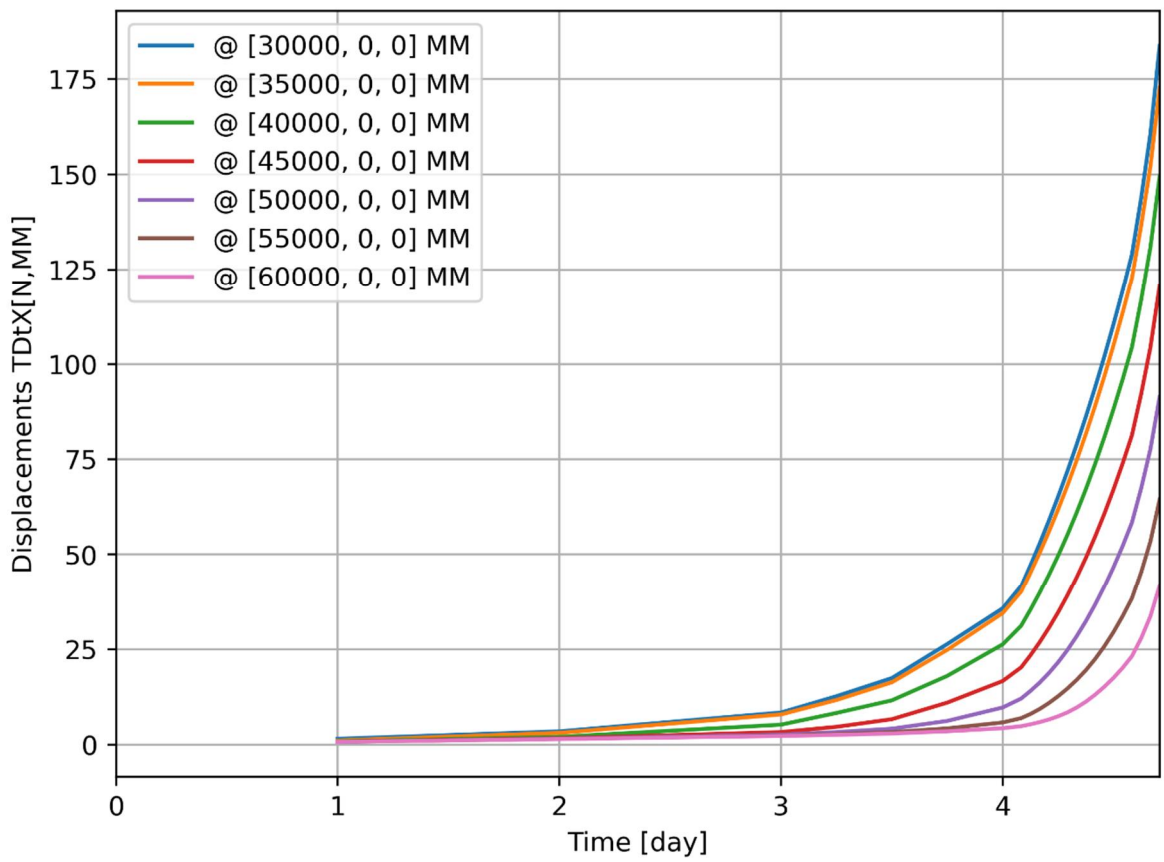
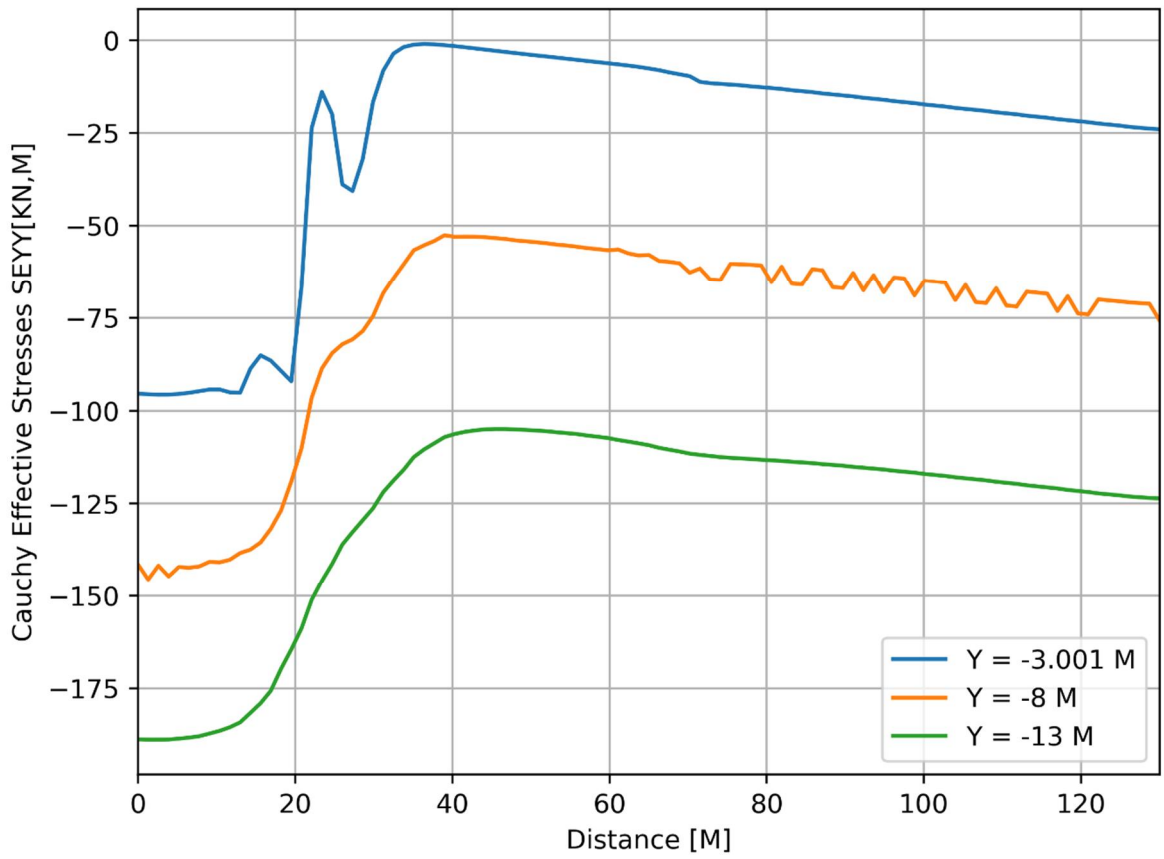


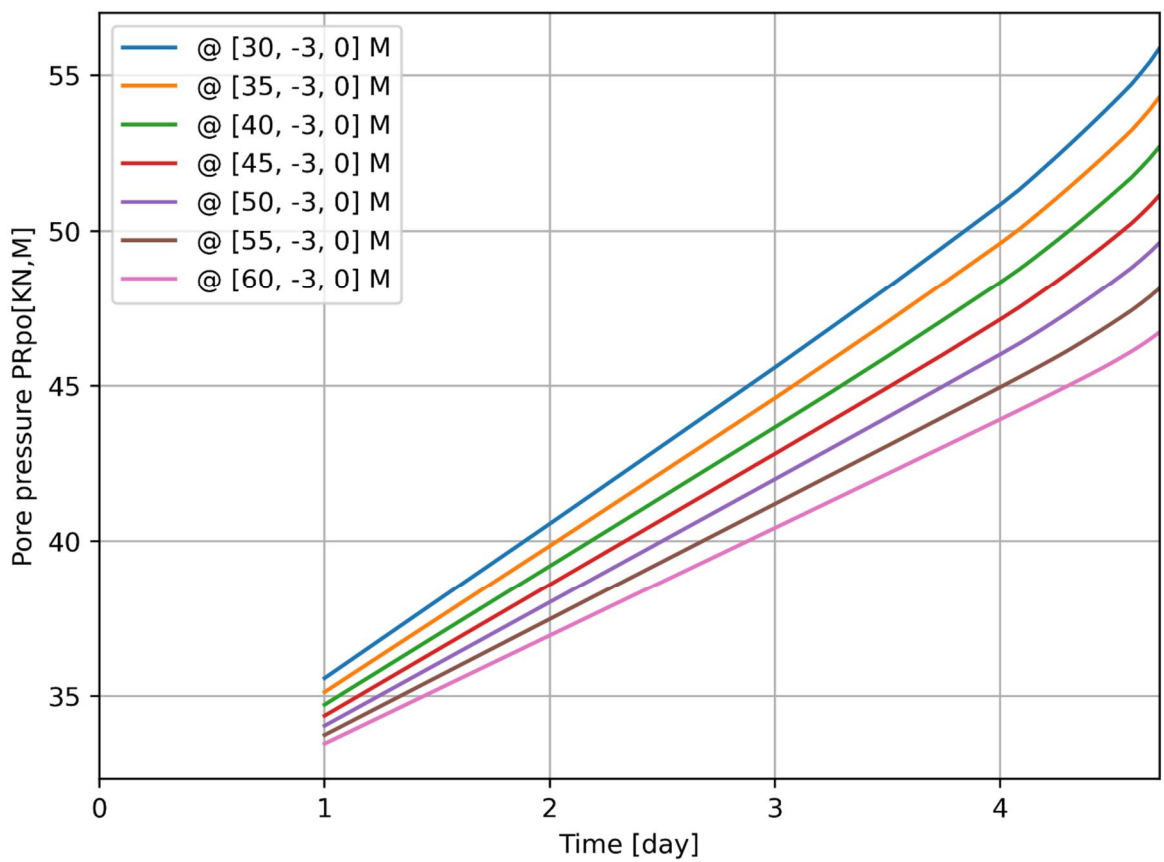
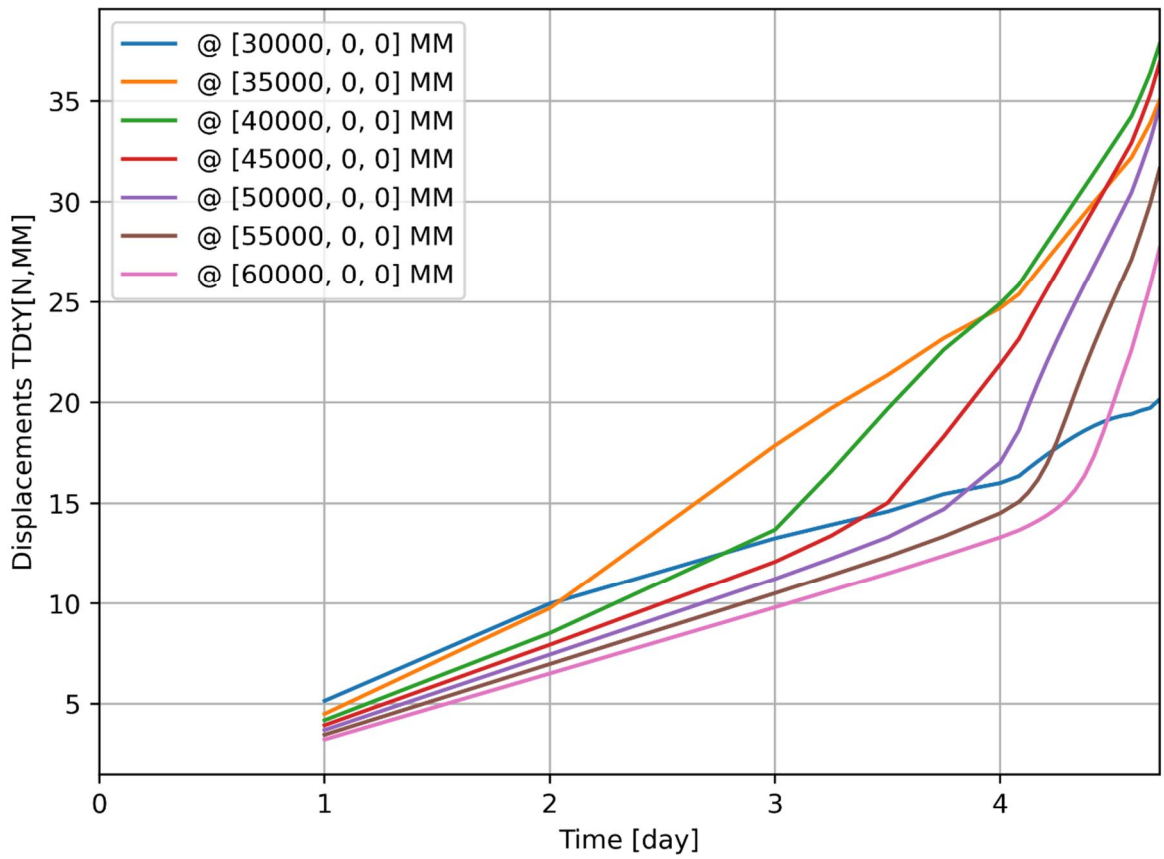
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.15kN/m<sup>2</sup> max: 25.99kN/m<sup>2</sup>



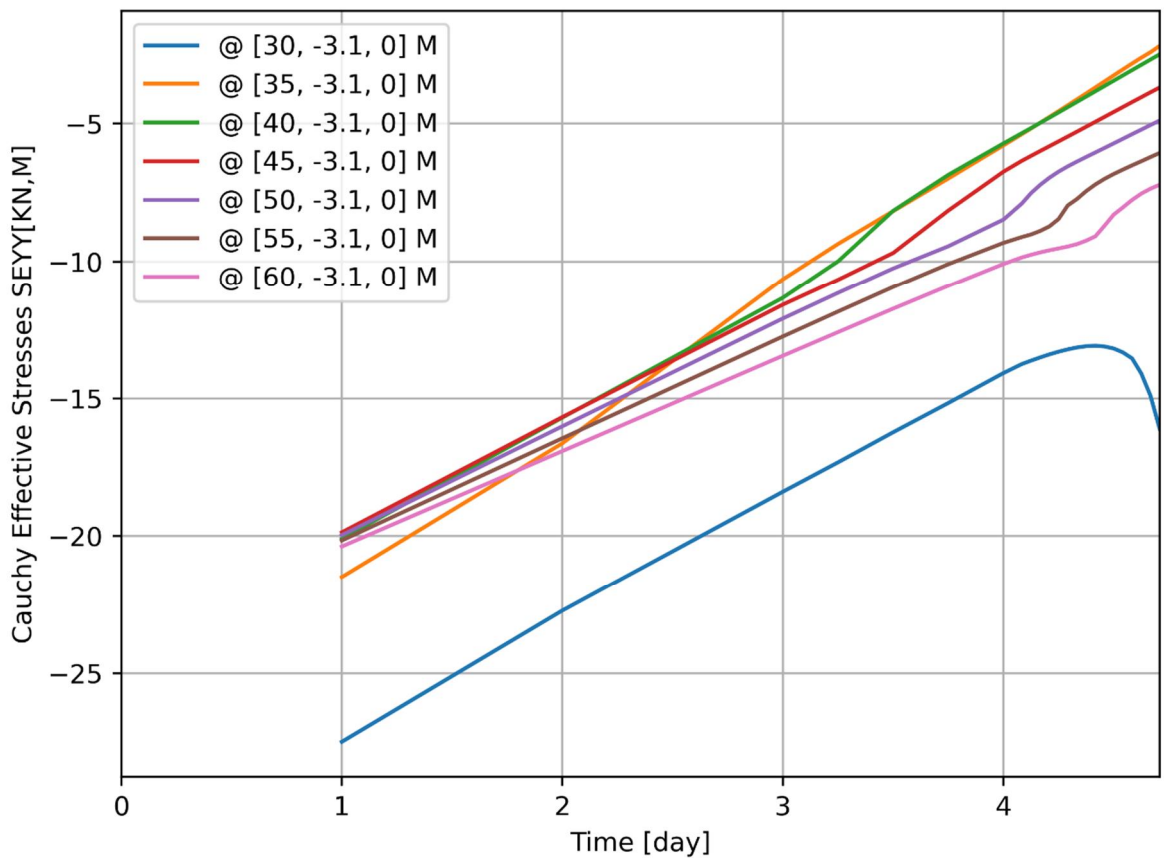
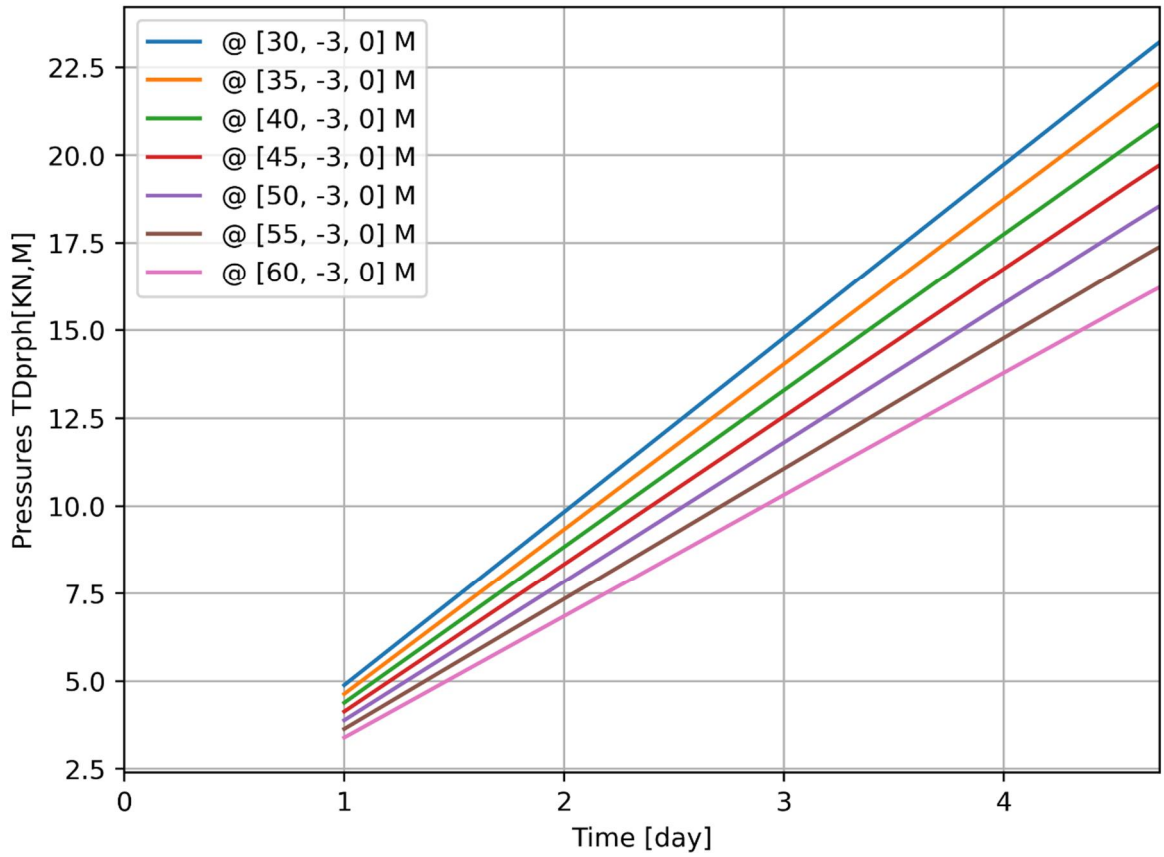
d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 29, Time 4 day 17 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -95.14kN/m<sup>2</sup> max: -0.26kN/m<sup>2</sup>

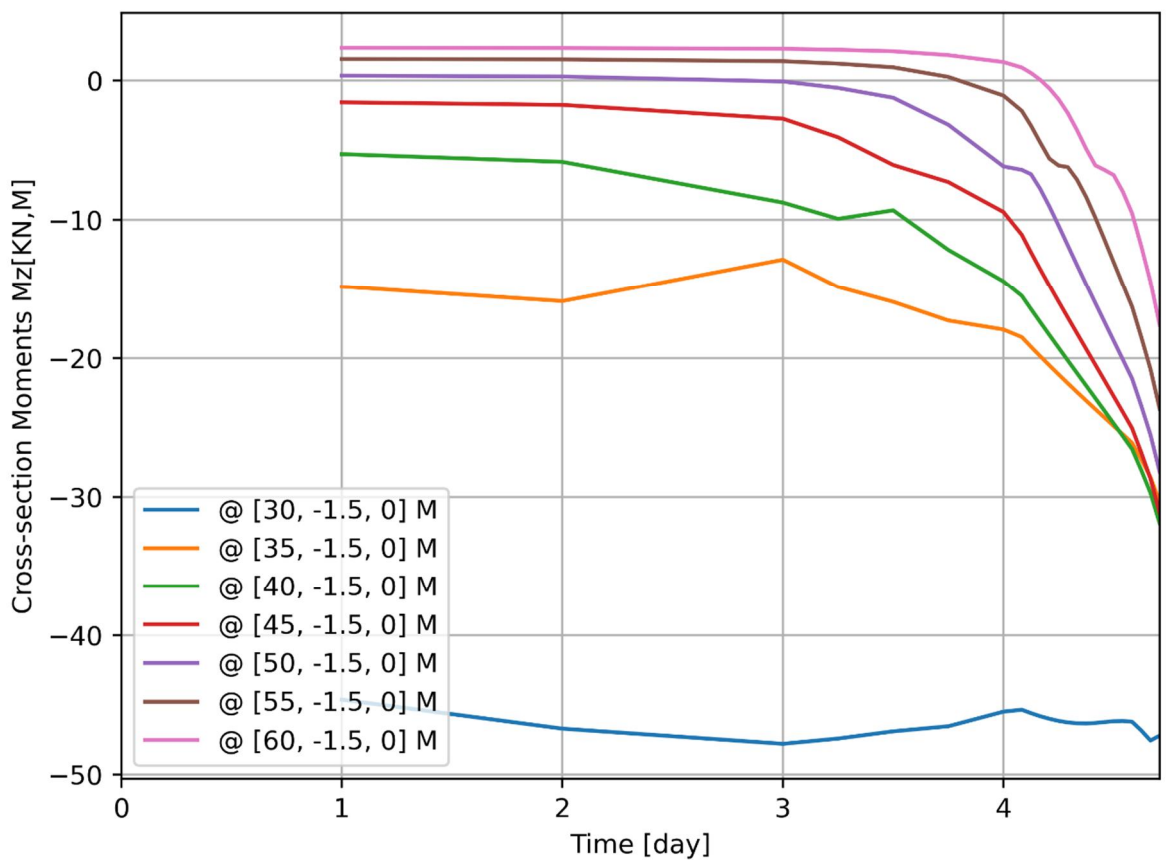
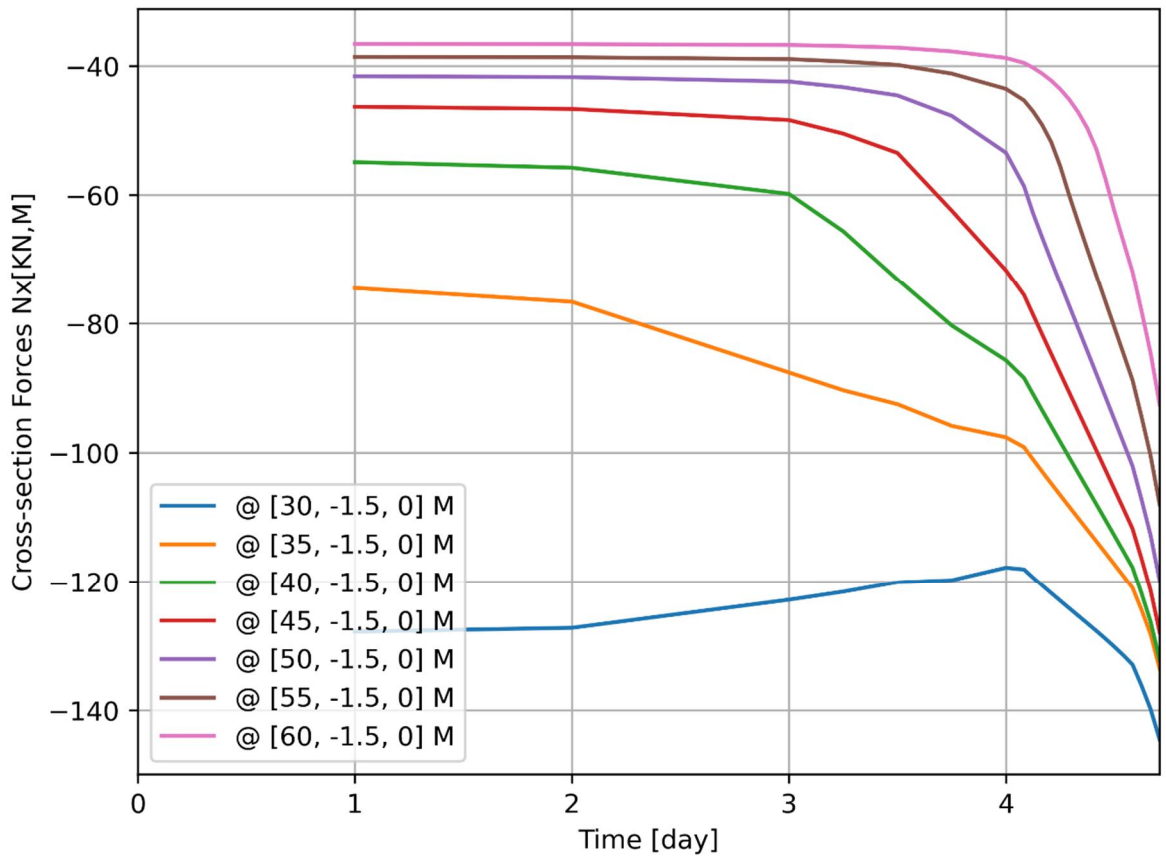








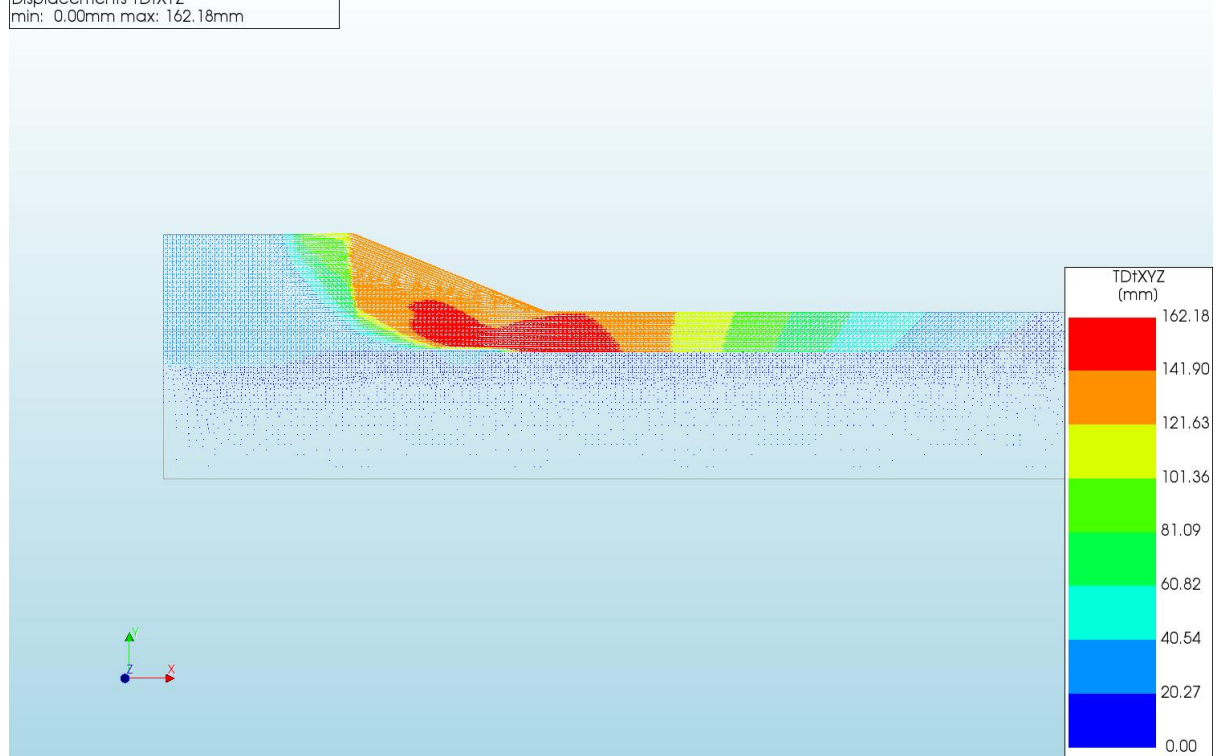




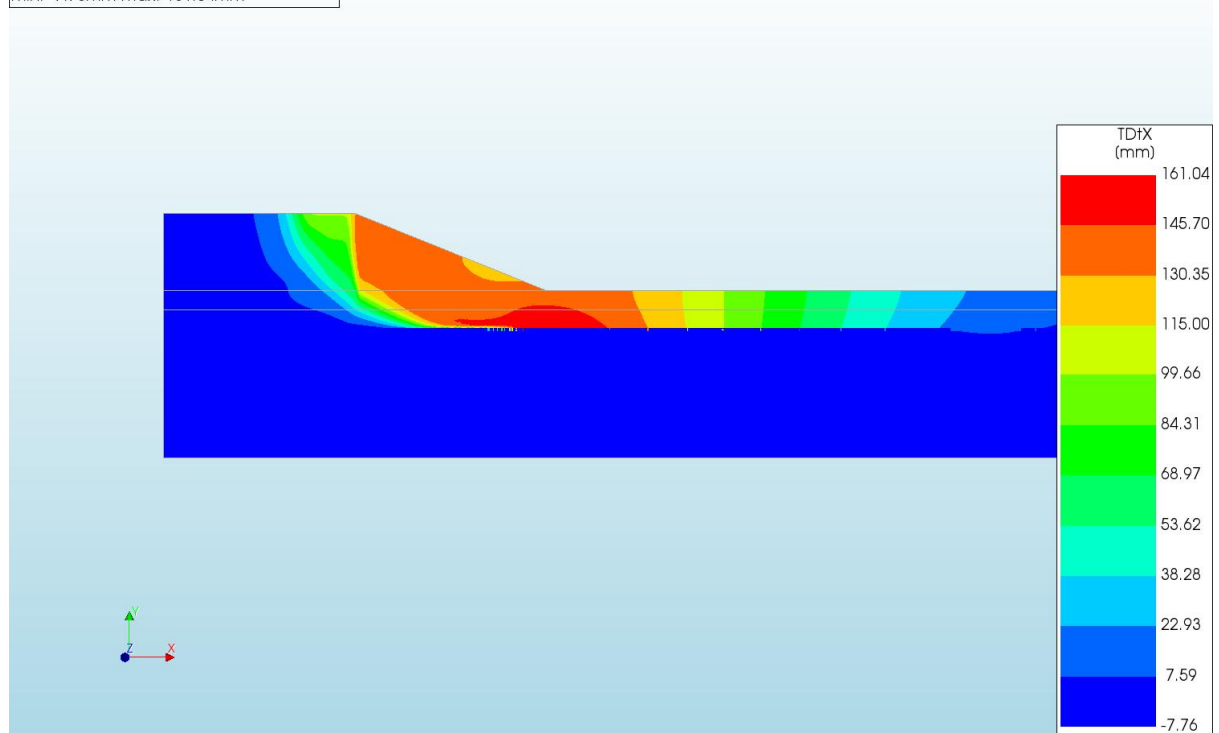
A.2.12

'Output d=3 c=17 E=3 k=1e-07 20200818'

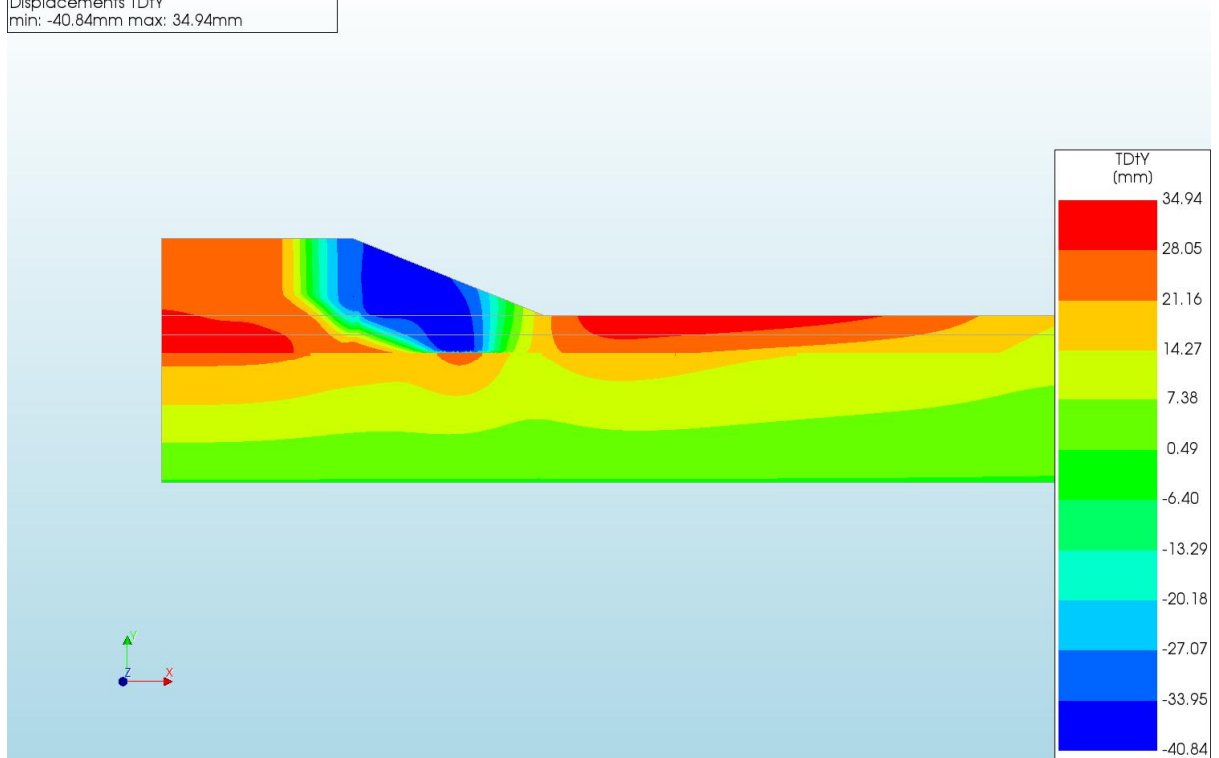
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
 Displacements TdXYZ  
 min: 0.00mm max: 162.18mm



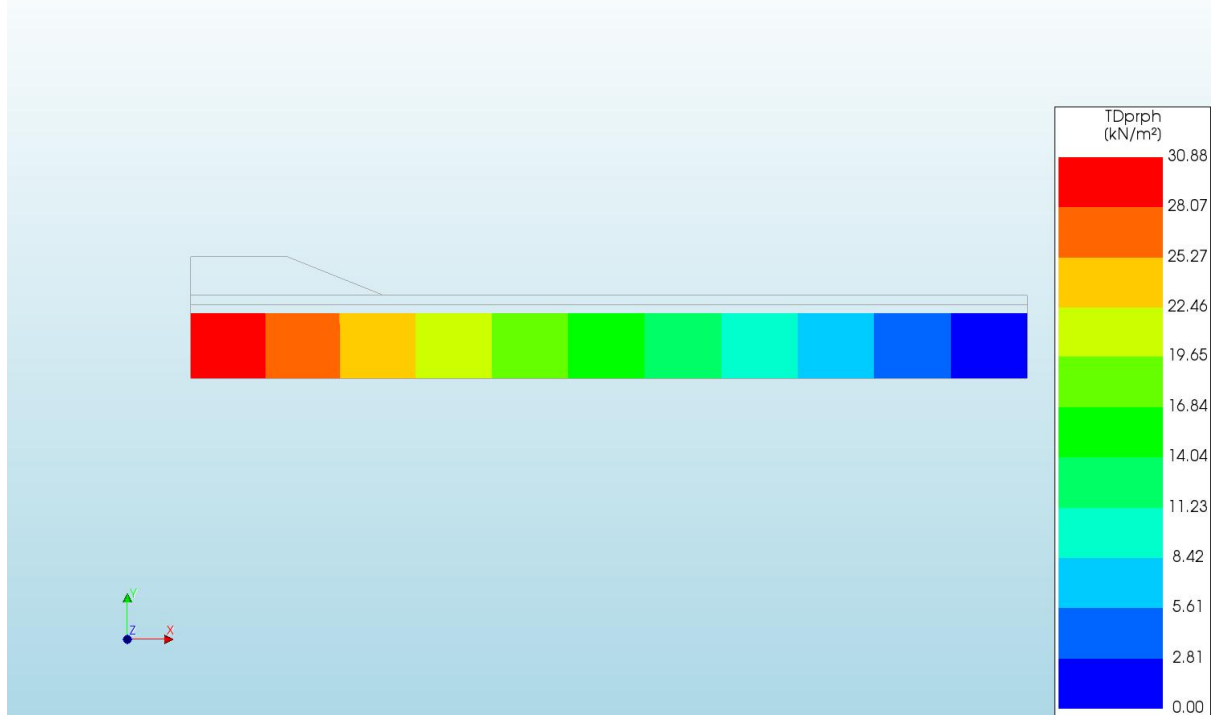
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
 Displacements TdX  
 min: -7.76mm max: 161.04mm



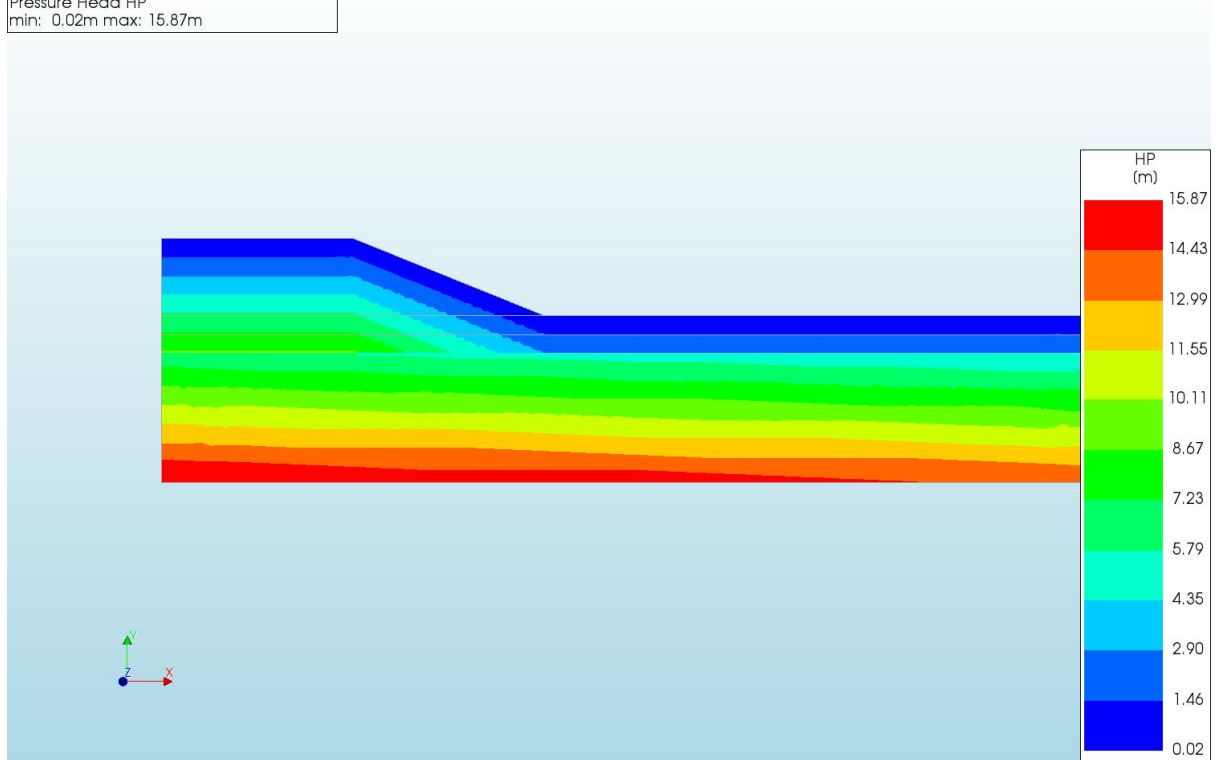
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Displacements TDtY  
min: -40.84mm max: 34.94mm



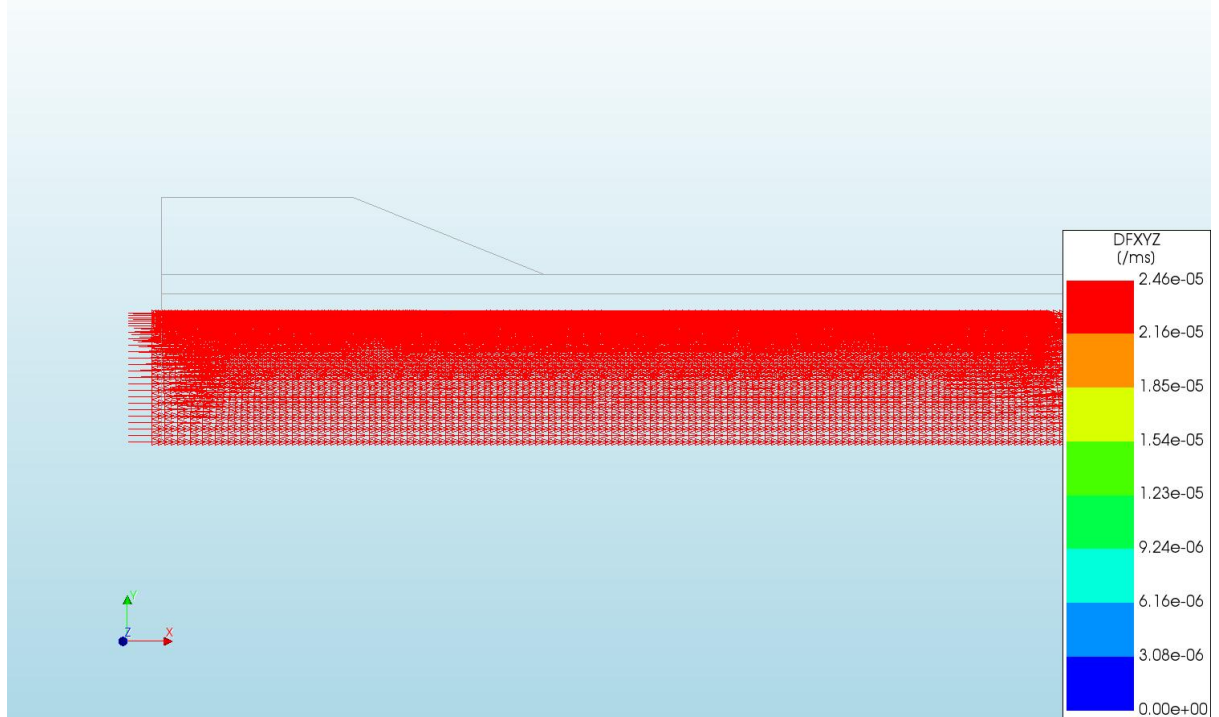
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 30.88kN/m<sup>2</sup>



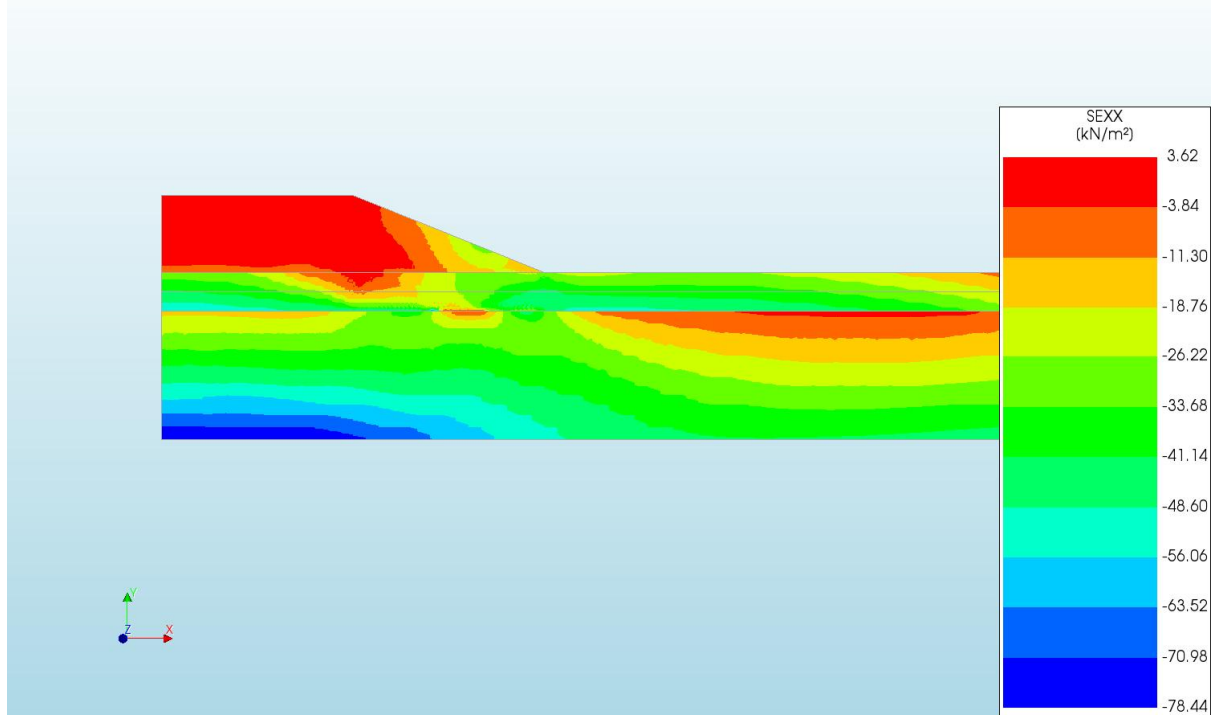
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.87m



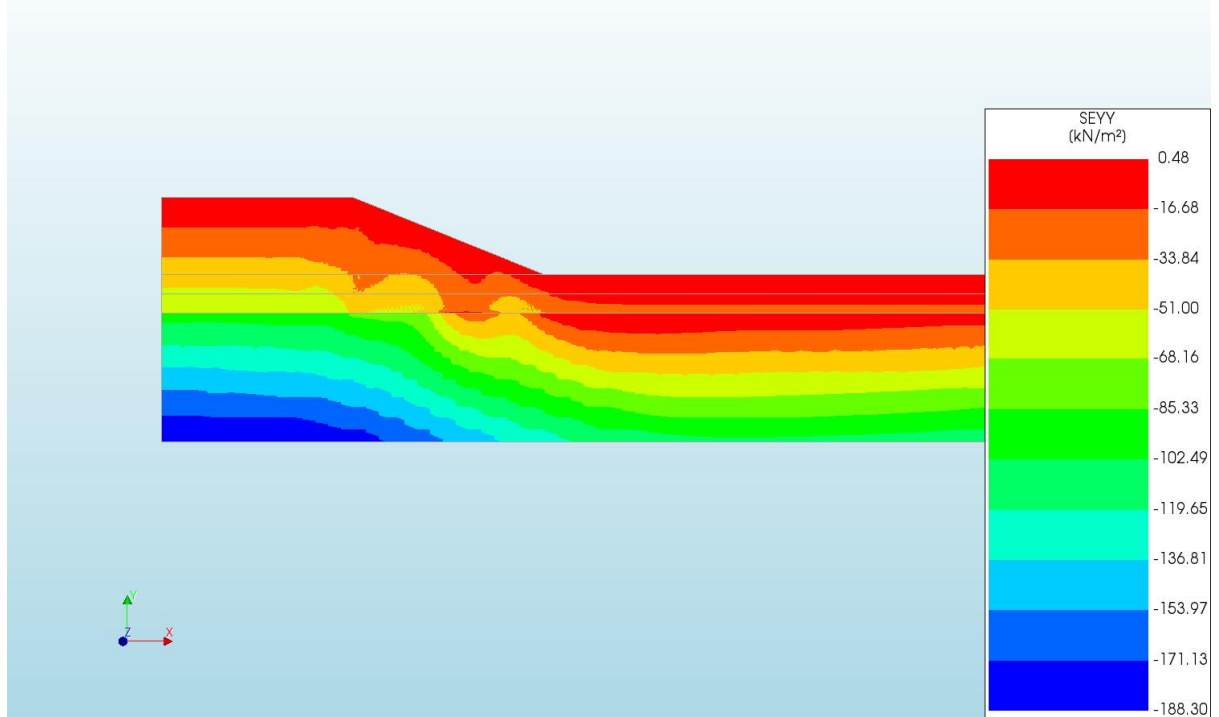
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.46e-05/ms



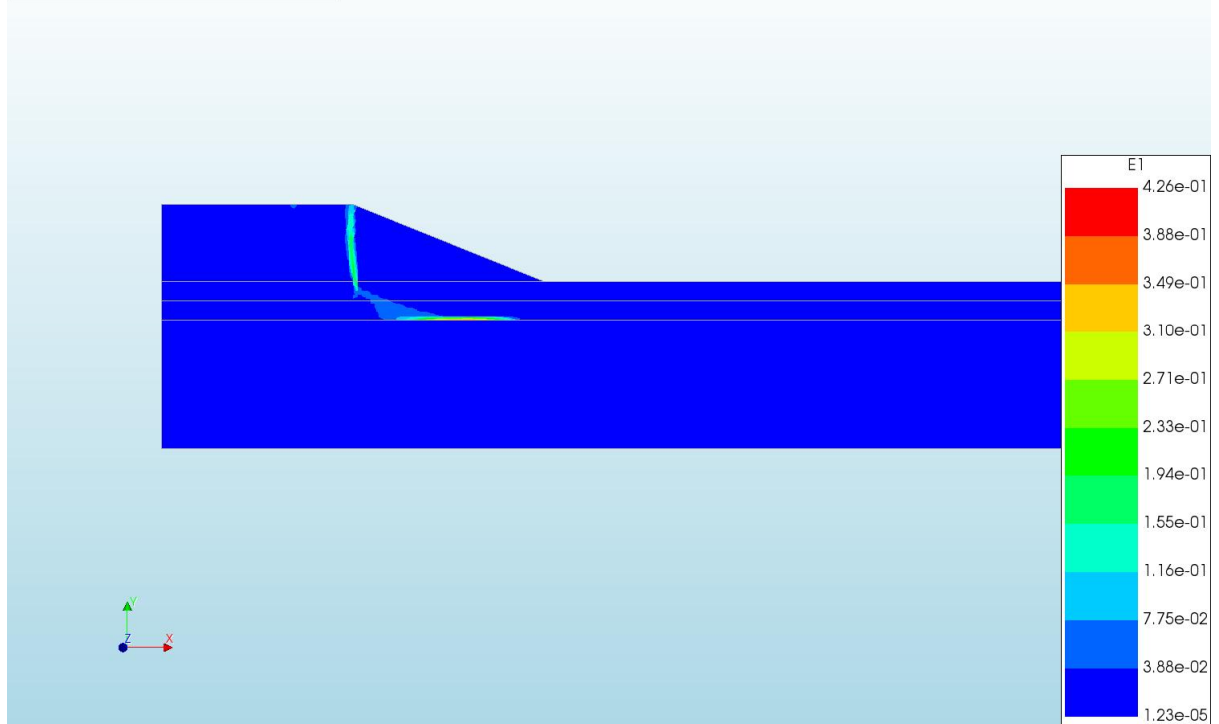
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -78.44kN/m<sup>2</sup> max: 3.62kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -188.30kN/m<sup>2</sup> max: 0.48kN/m<sup>2</sup>



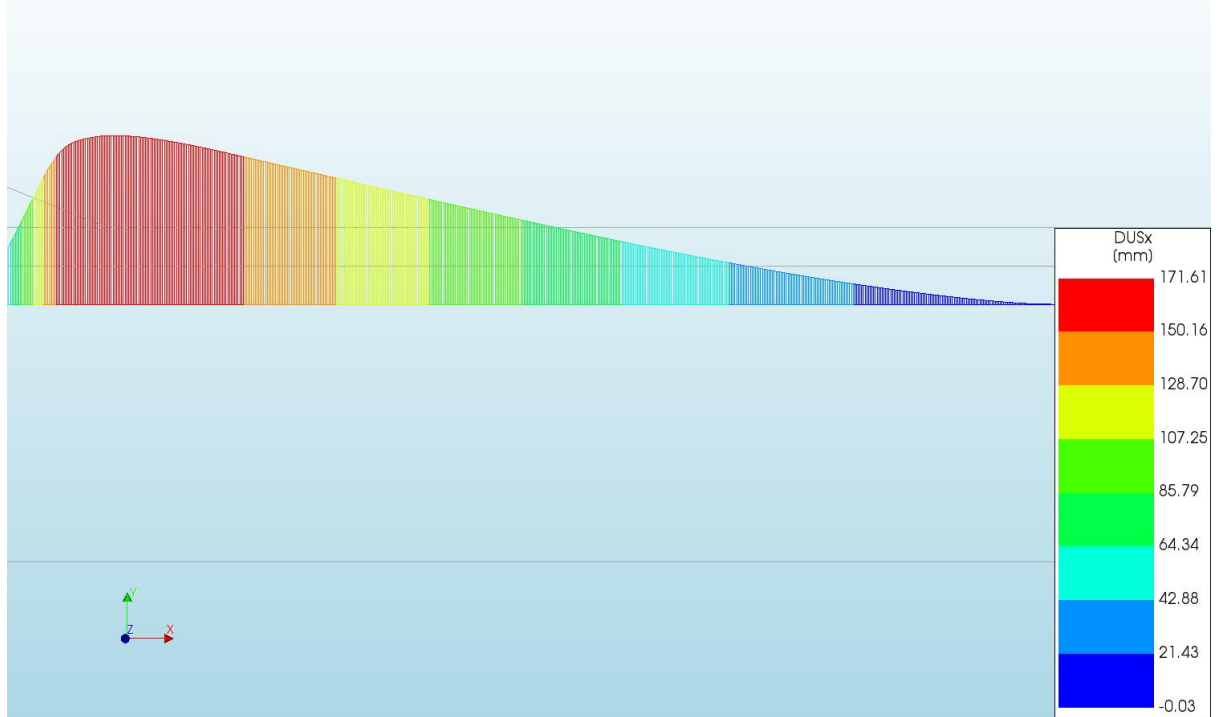
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Total Strains E1  
min: 1.23e-05 max: 4.26e-01



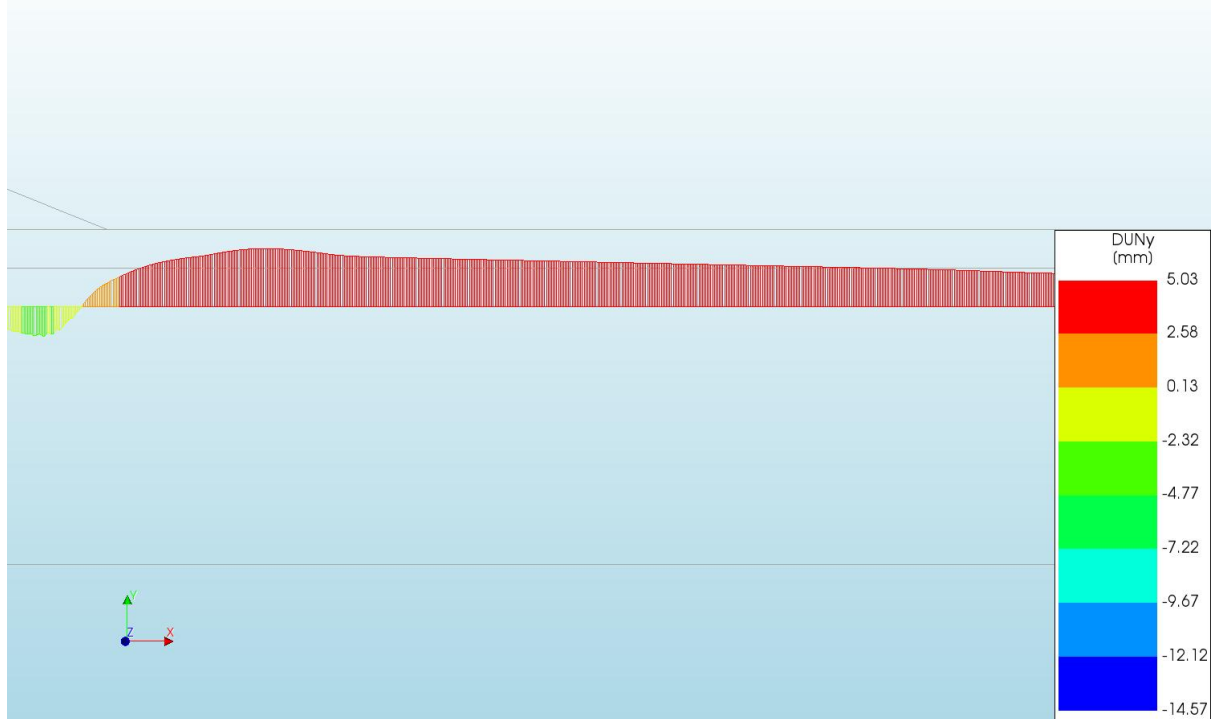
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.62e-01



d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.03mm max: 171.61mm

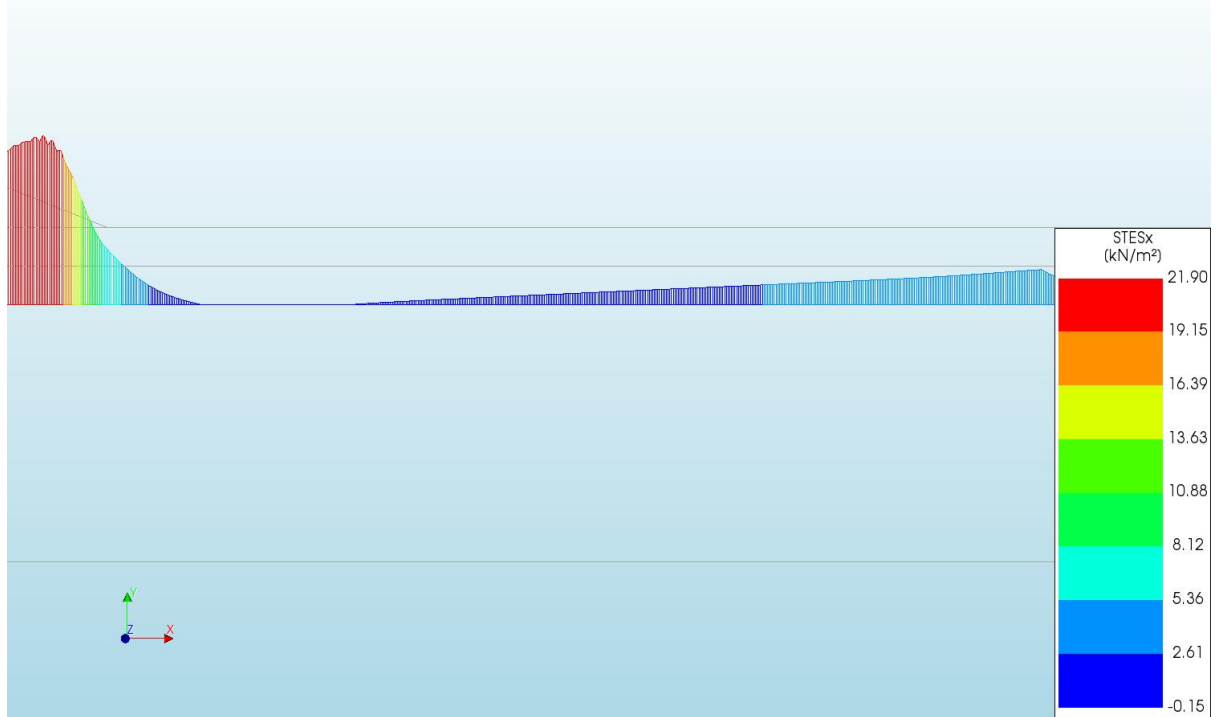


d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -14.57mm max: 5.03mm



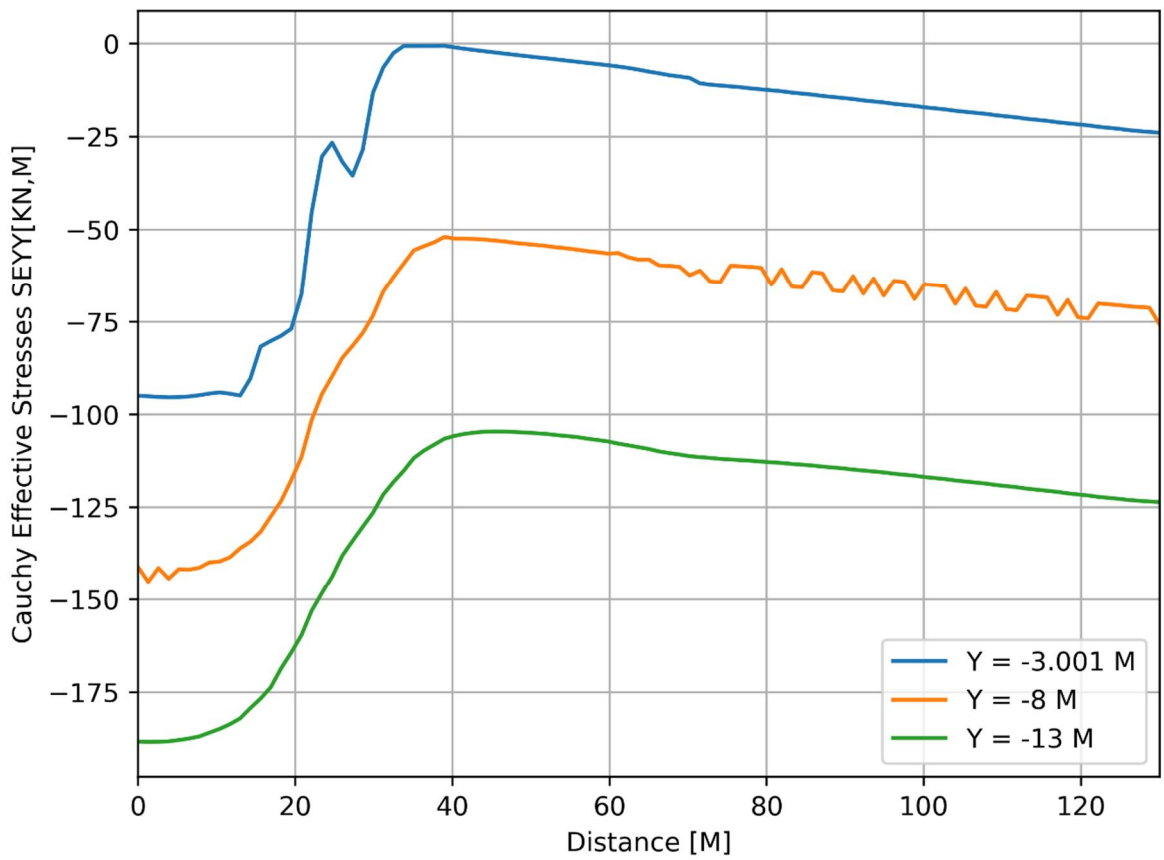
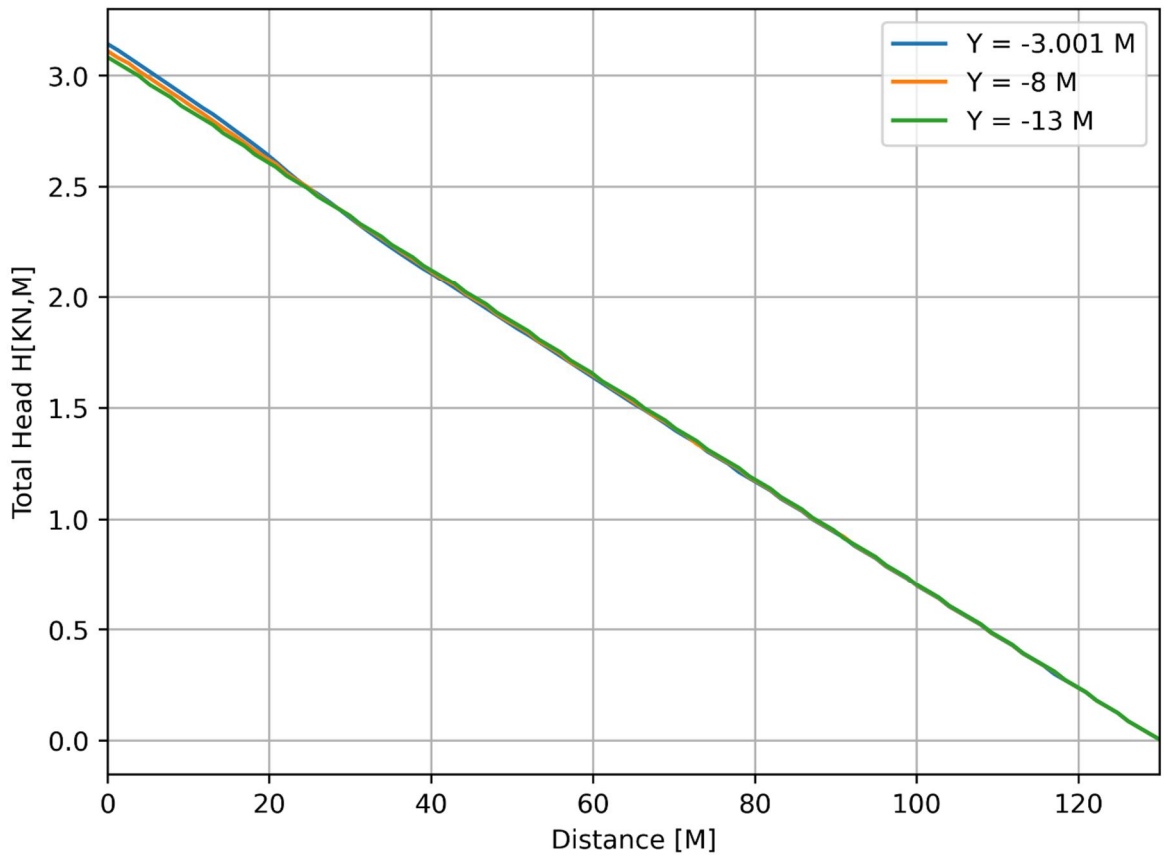


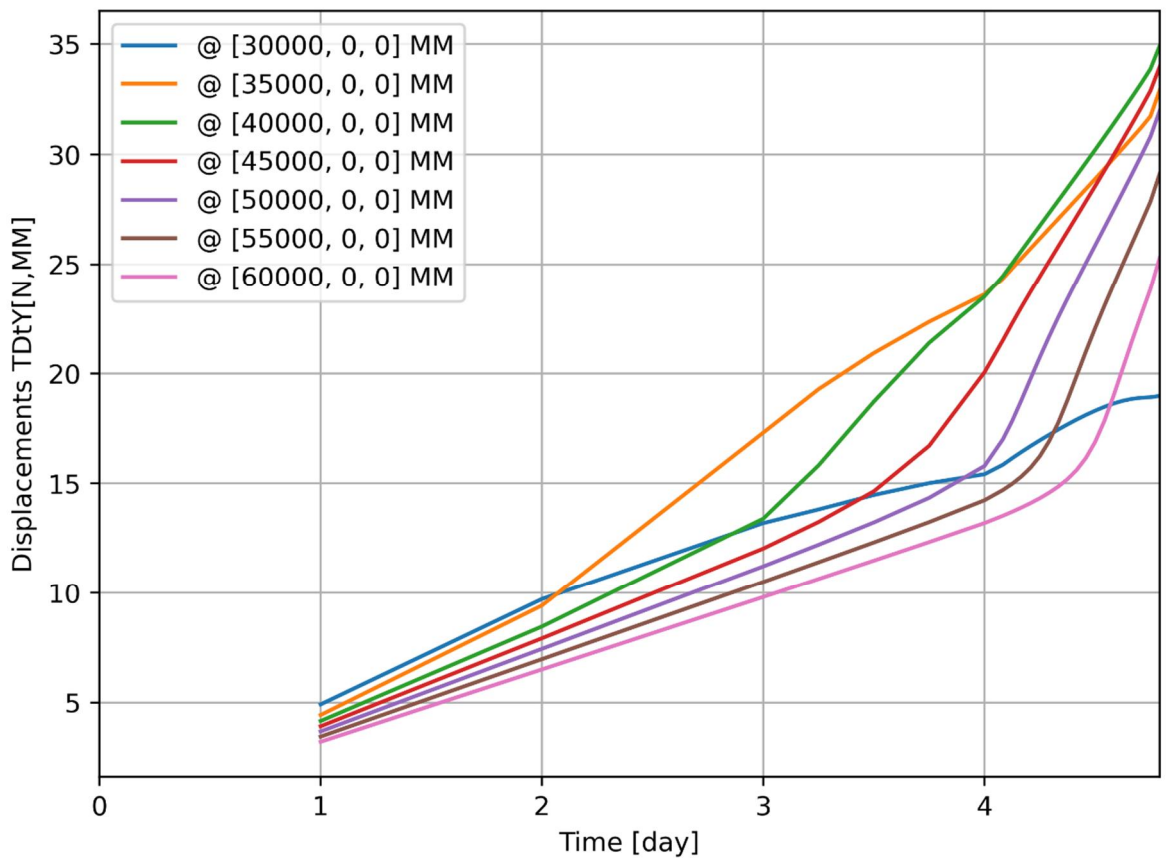
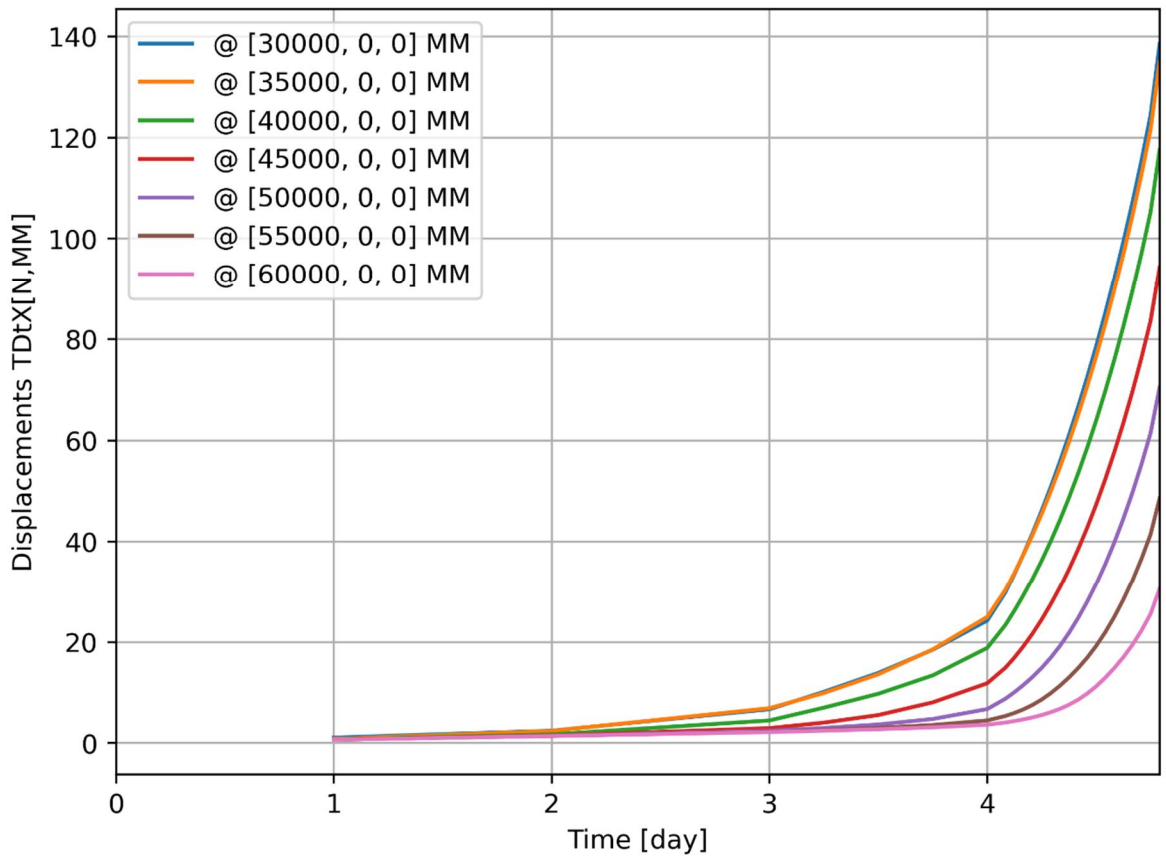
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.15kN/m<sup>2</sup> max: 21.90kN/m<sup>2</sup>

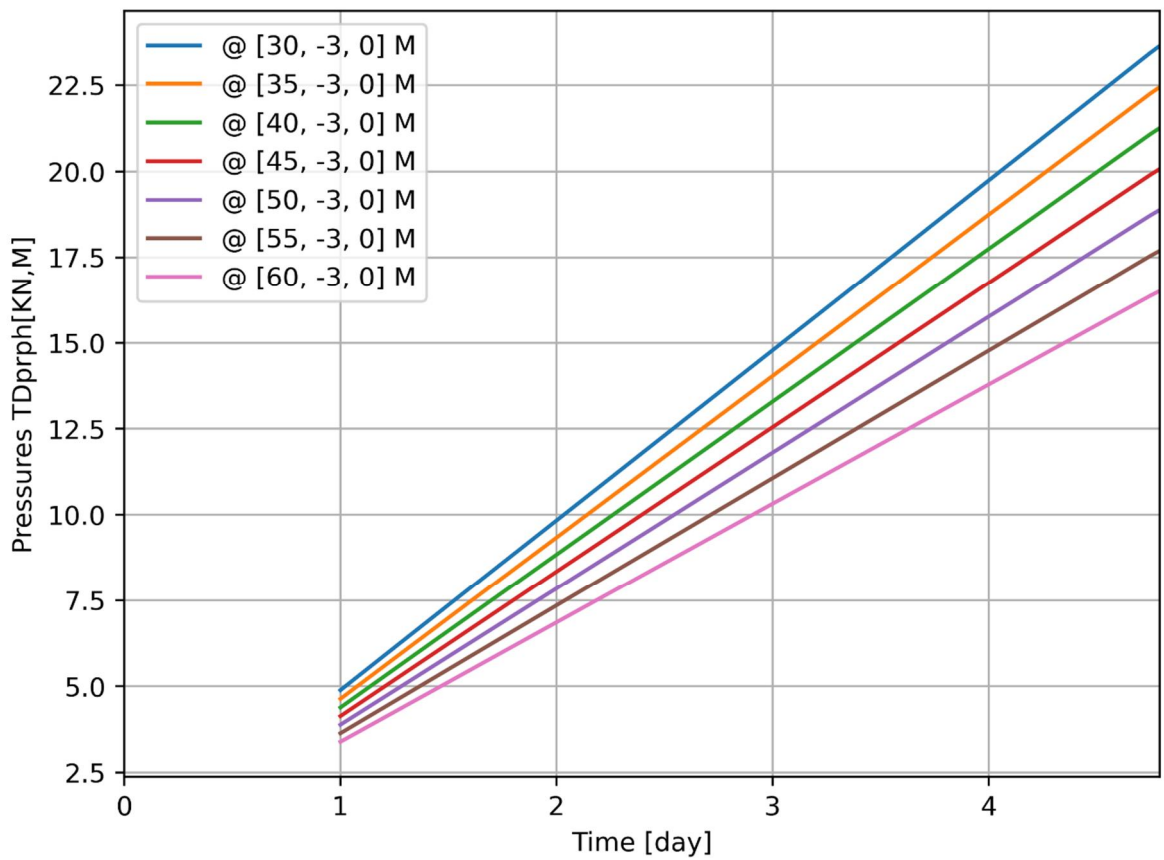
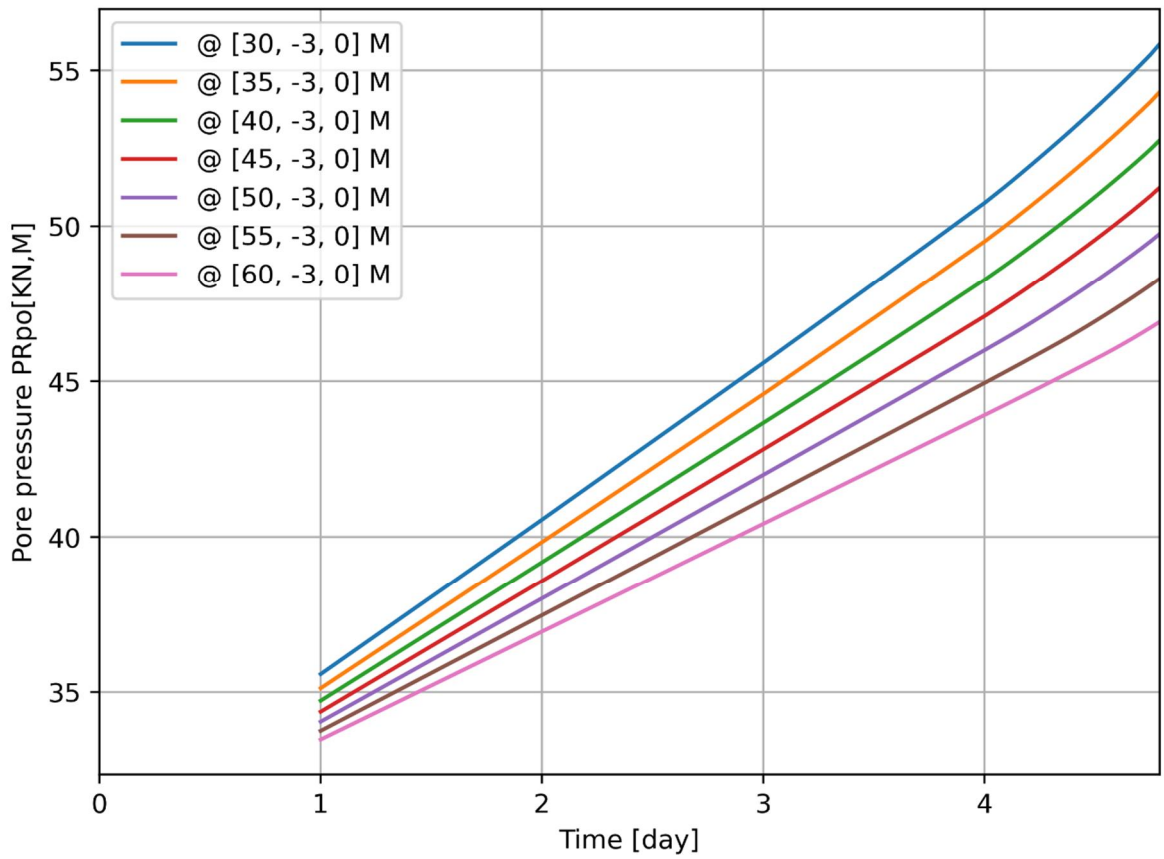


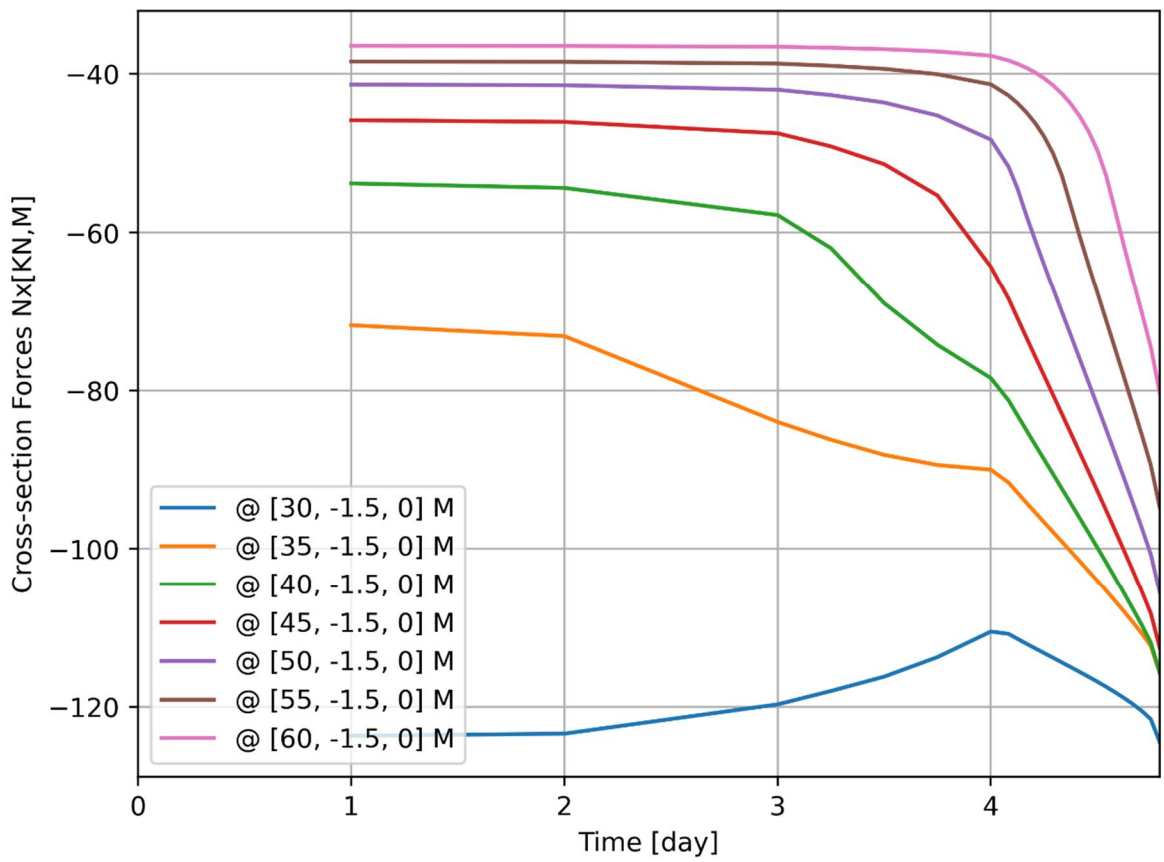
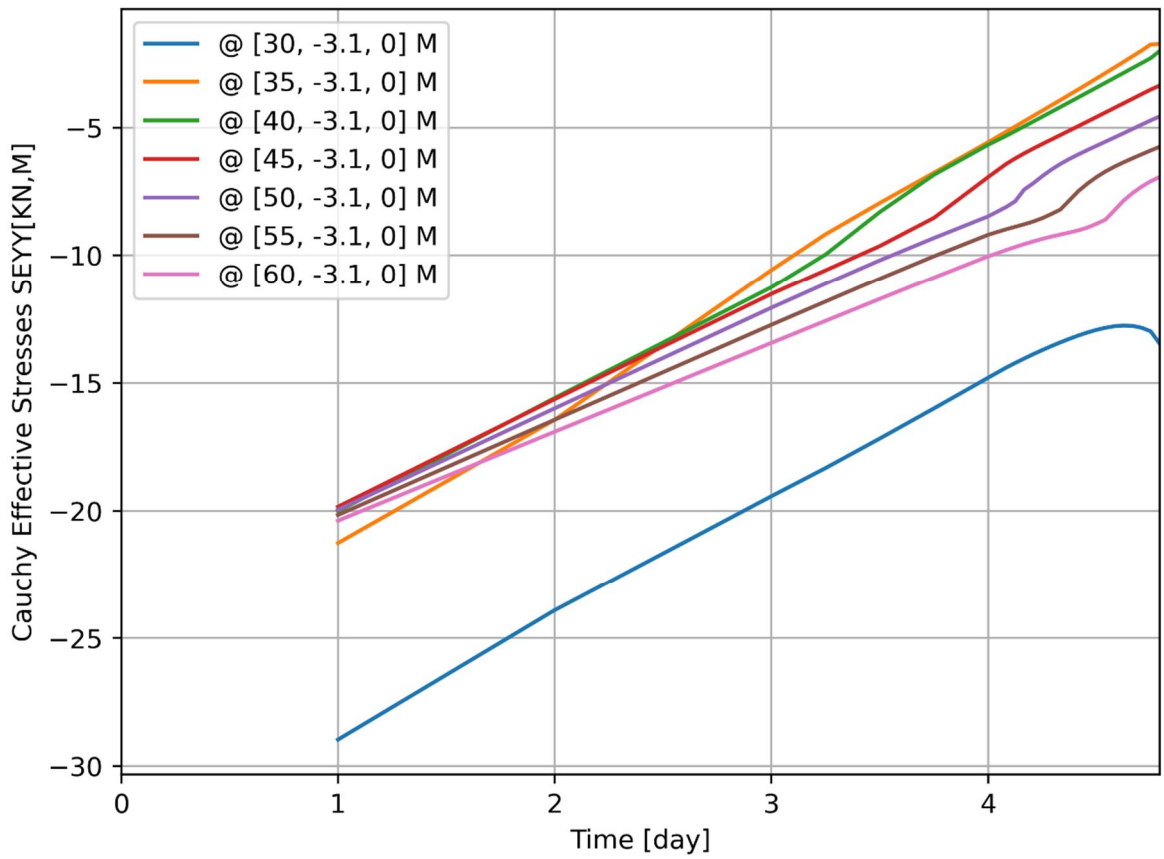
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -94.84kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

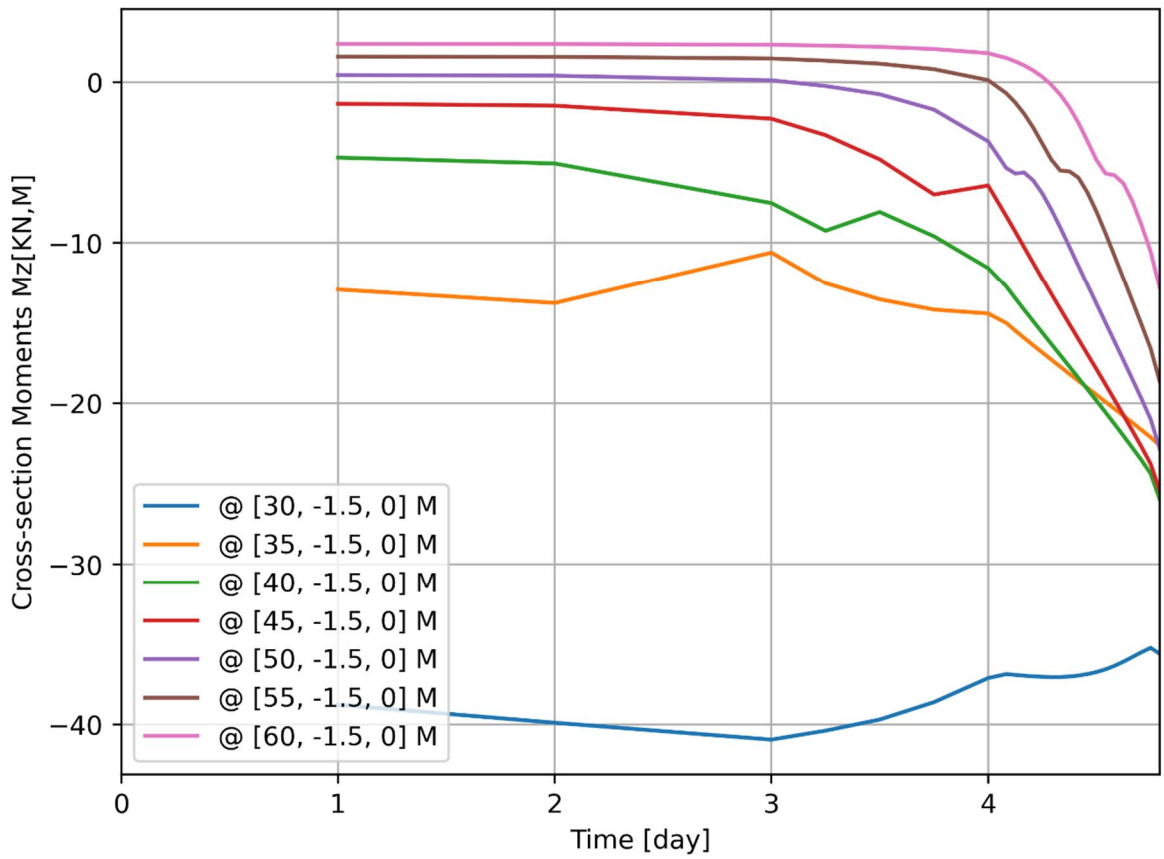








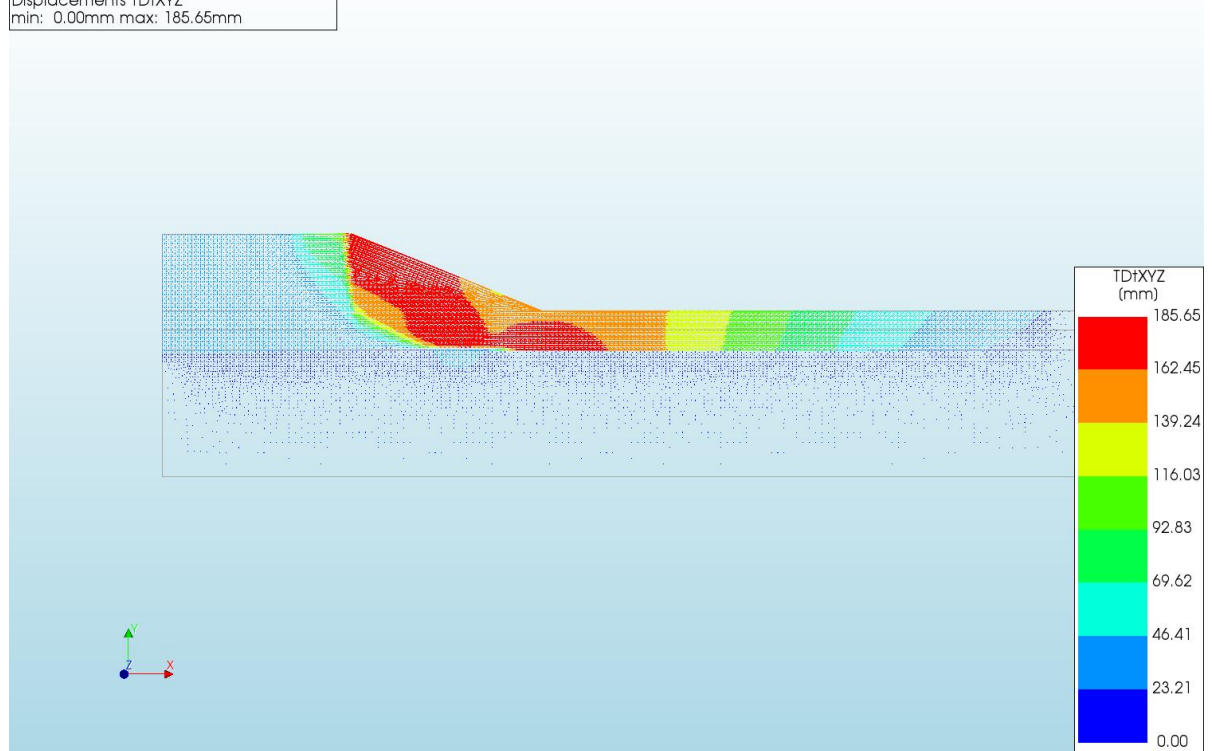




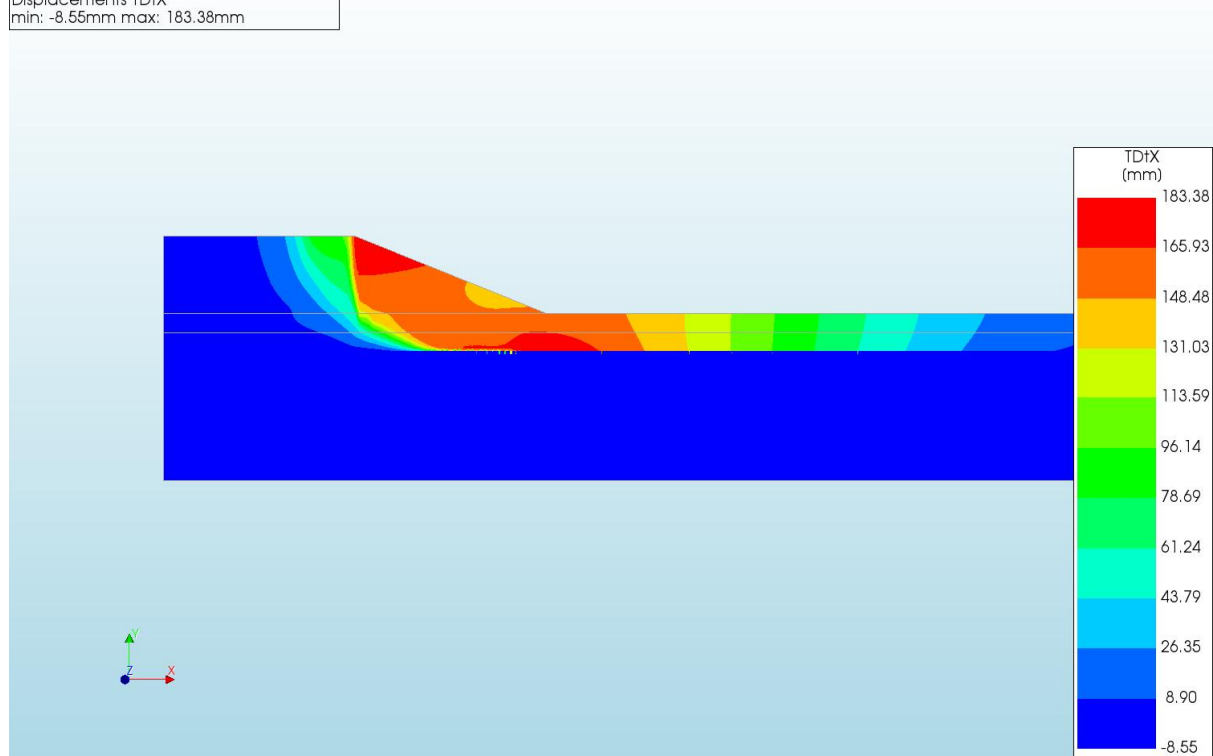
A.2.13

'Output d=3 c=18 E=3 k=1e-07 20200818'

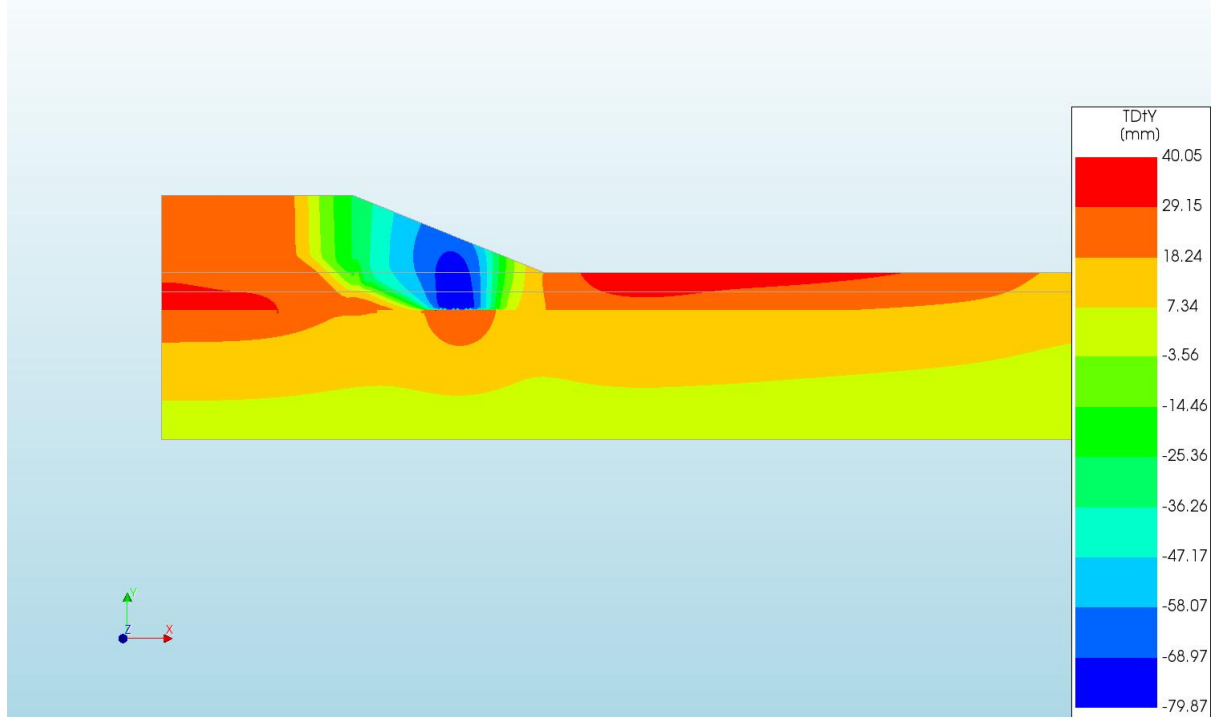
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDiXYZ  
min: 0.00mm max: 185.65mm



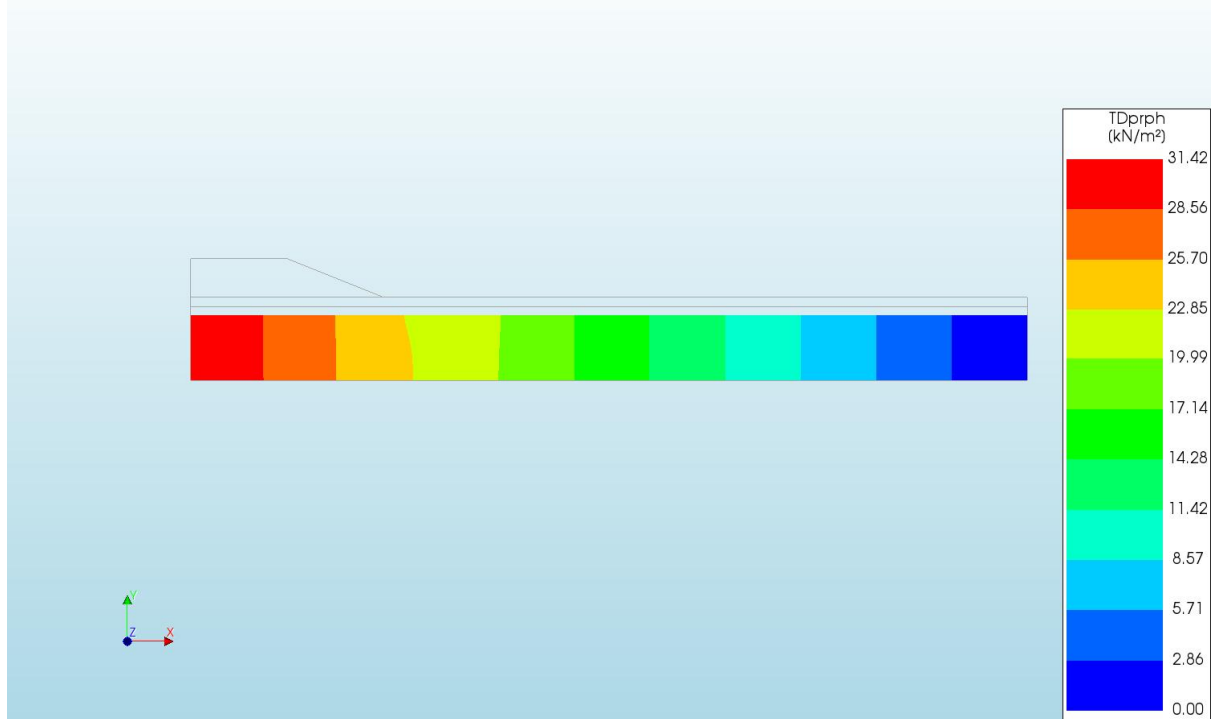
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDtX  
min: -8.55mm max: 183.38mm



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDtY  
min: -79.87mm max: 40.05mm

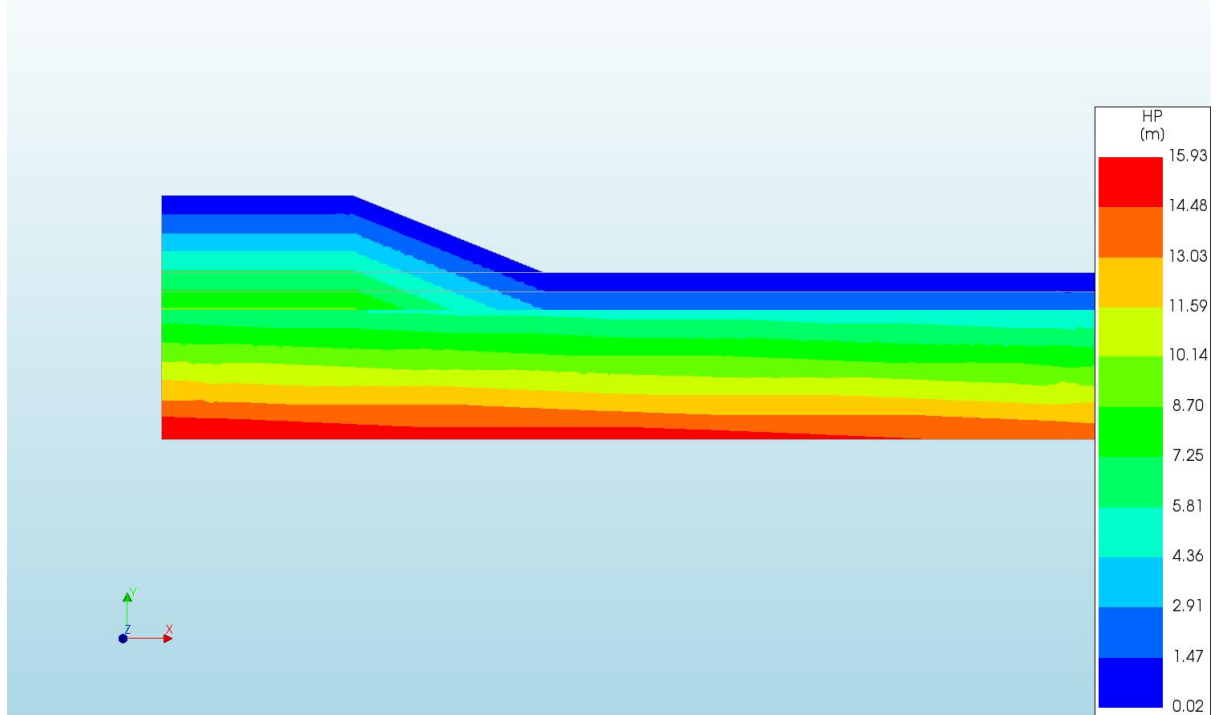


d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 31.42kN/m<sup>2</sup>

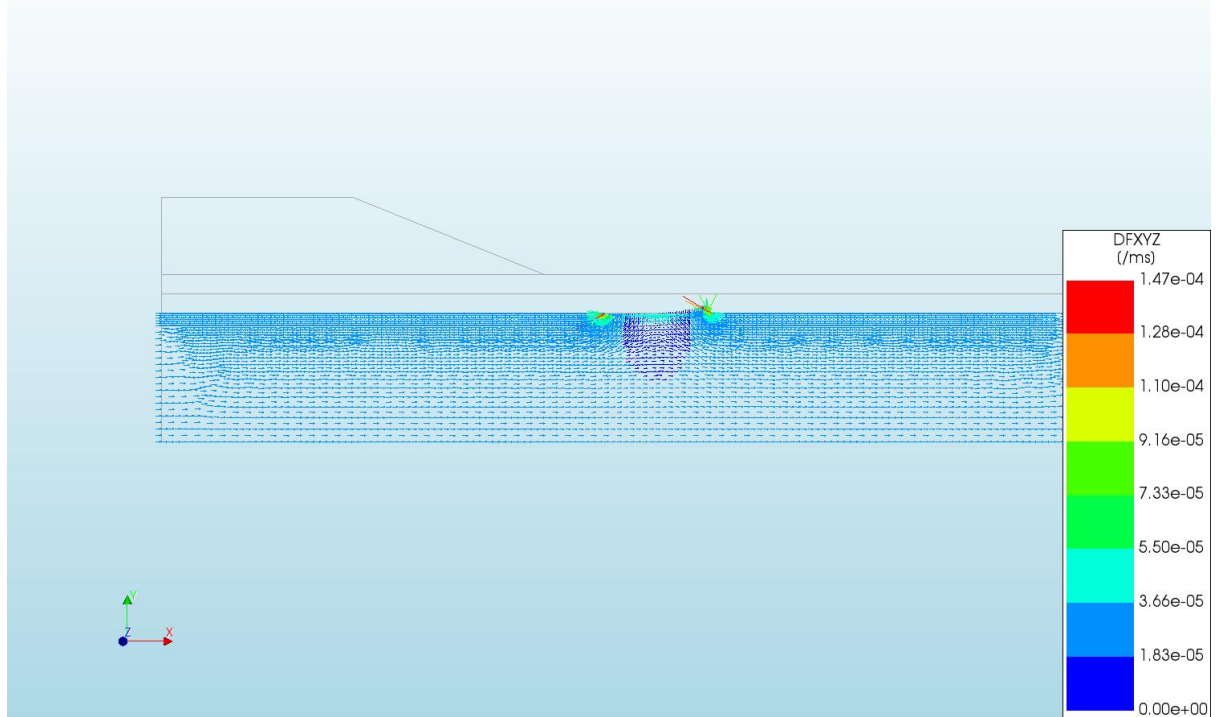




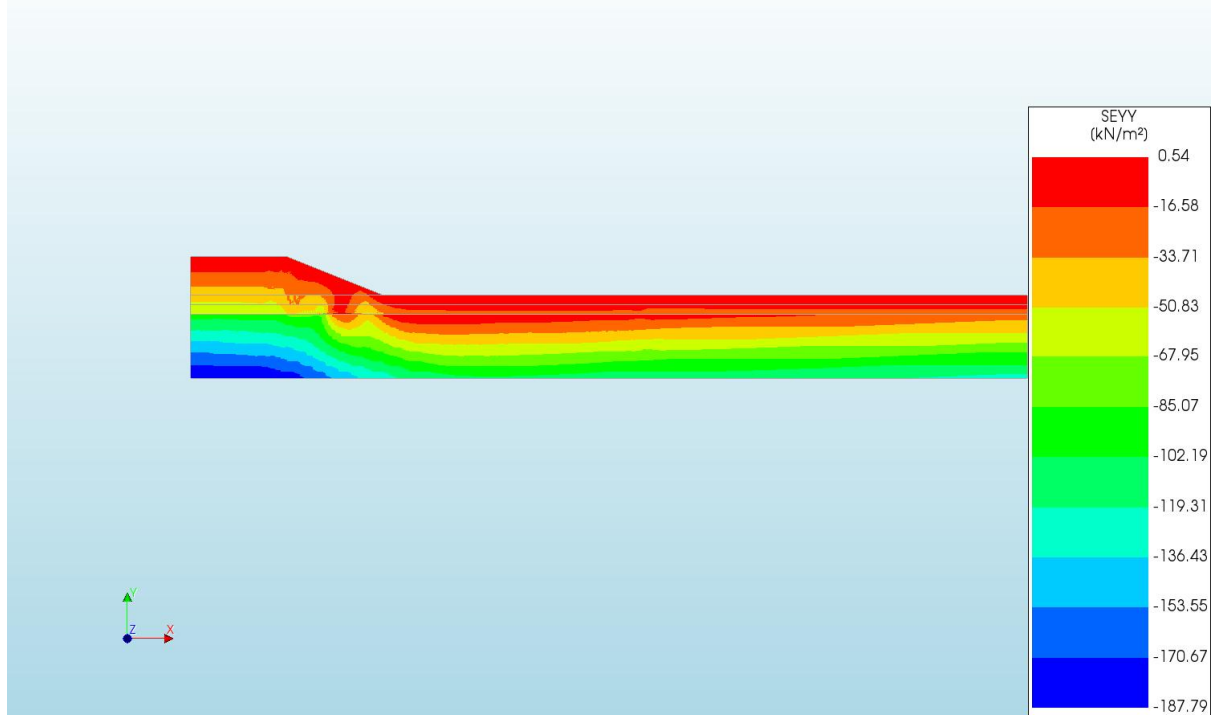
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.93m



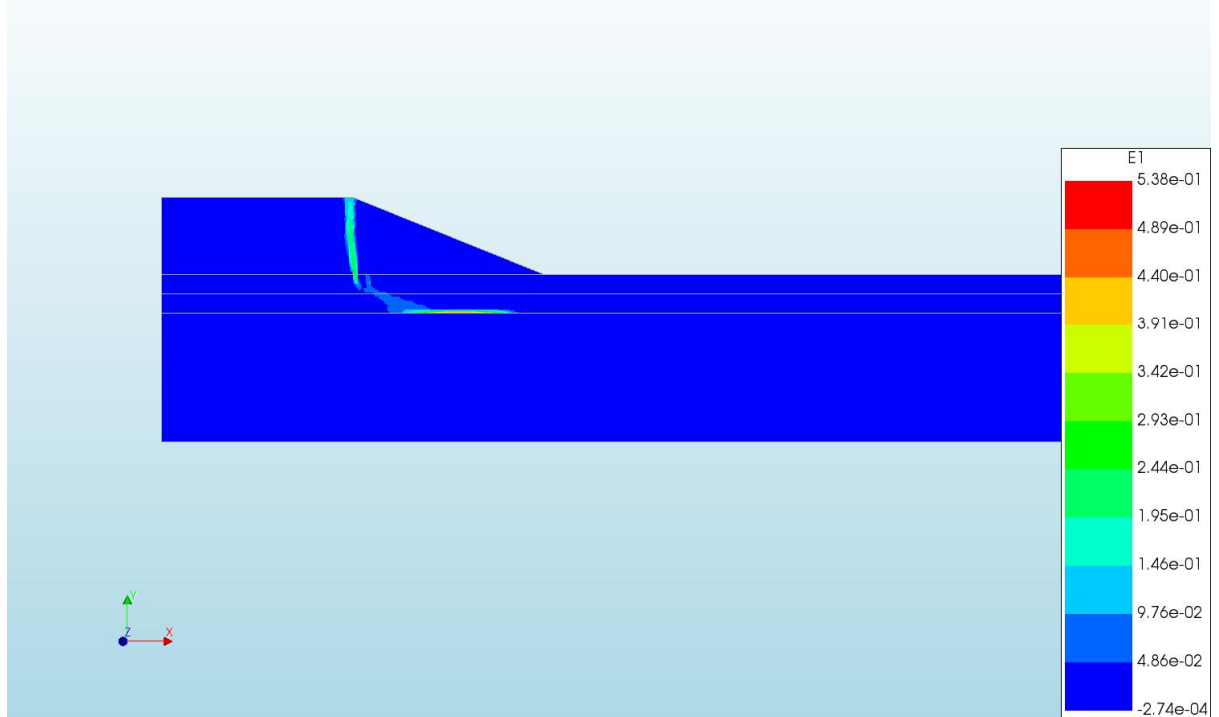
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.47e-04/ms



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -187.79kN/m<sup>2</sup> max: 0.54kN/m<sup>2</sup>



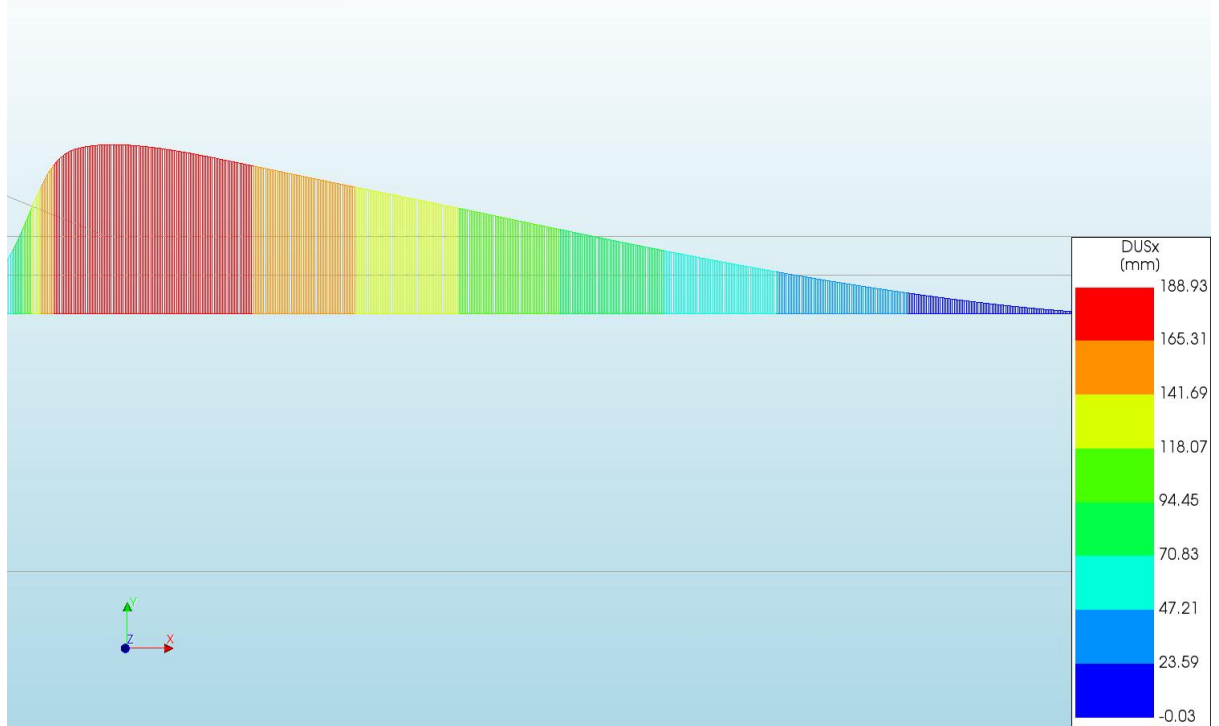
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Total Strains E1  
min: -2.74e-04 max: 5.38e-01



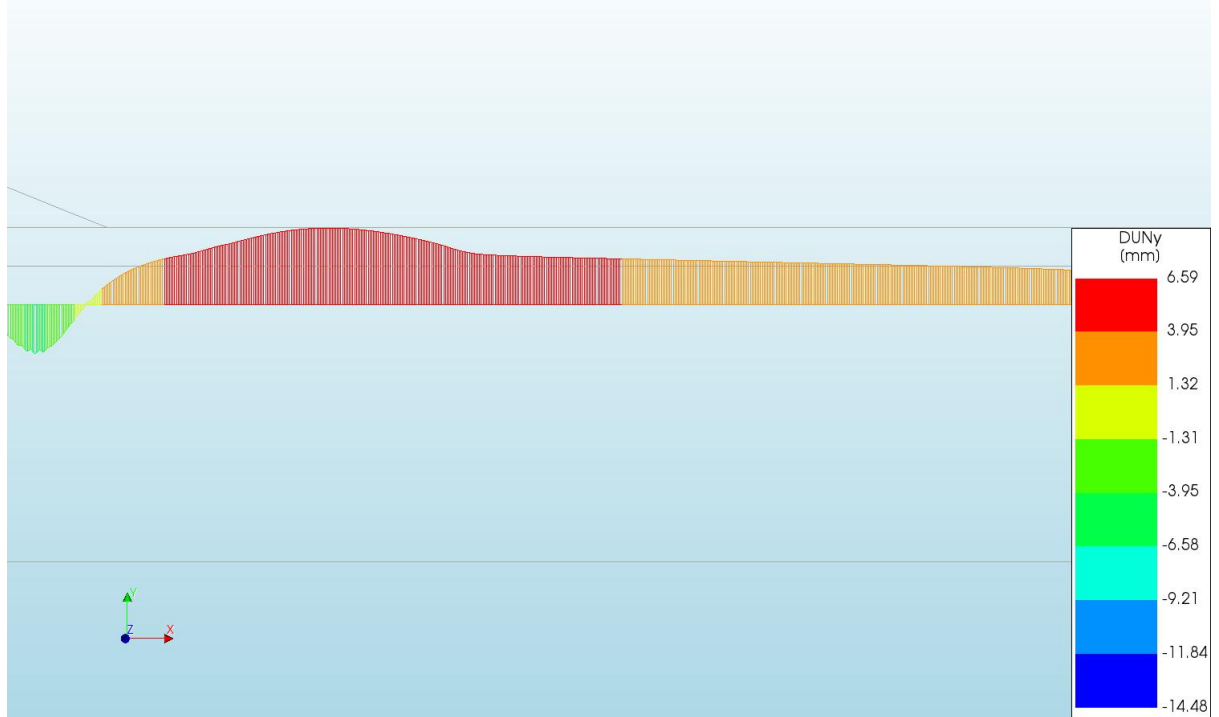
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.45e-01



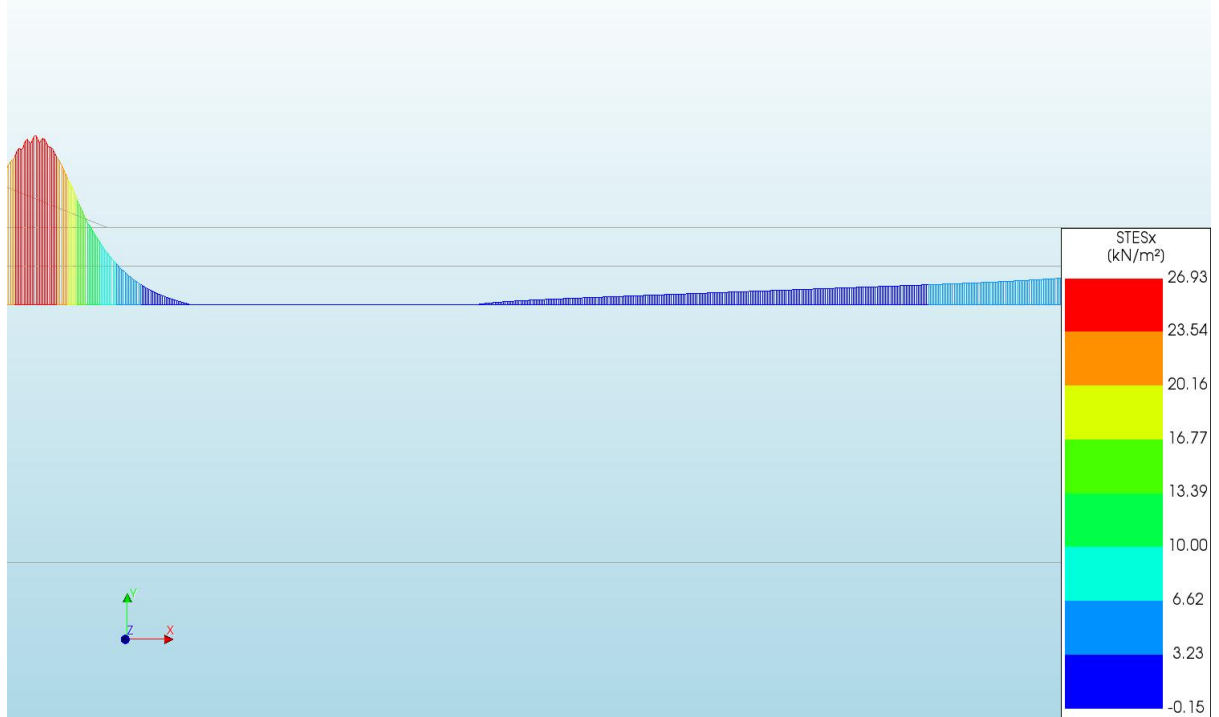
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 188.93mm



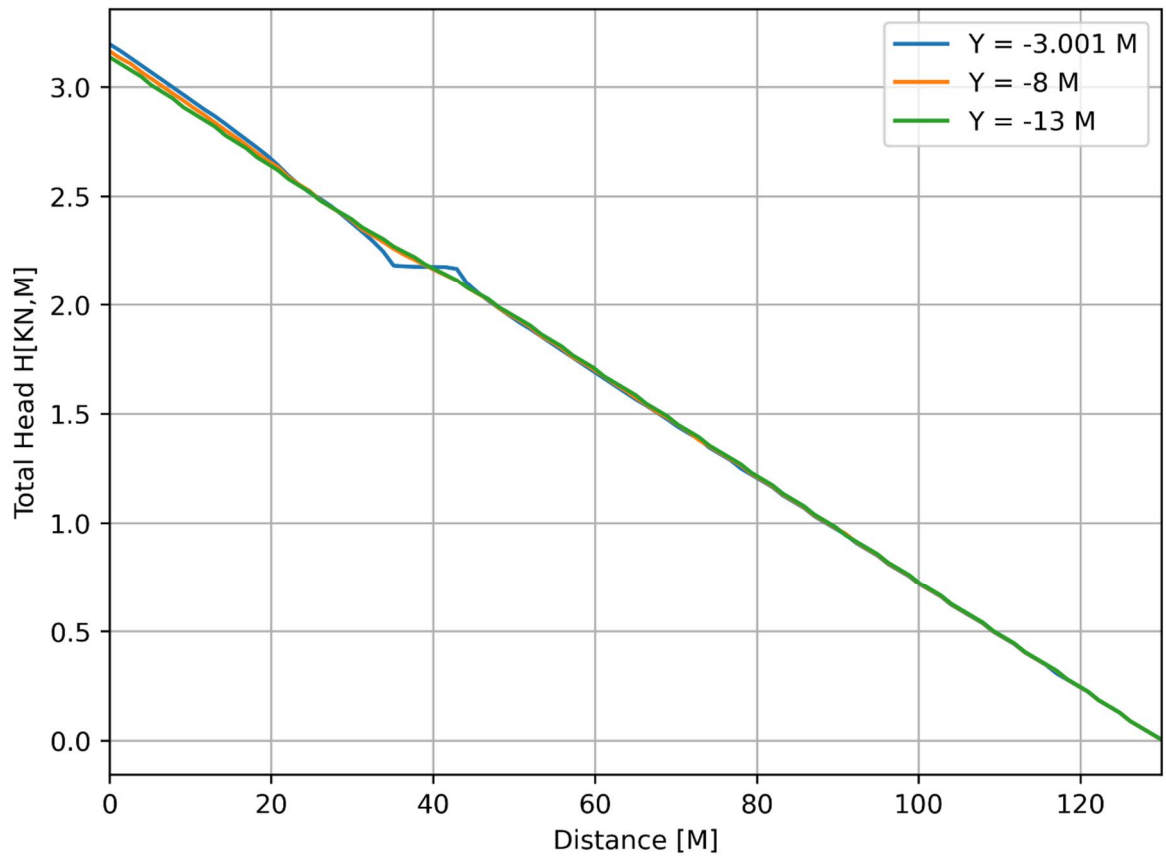
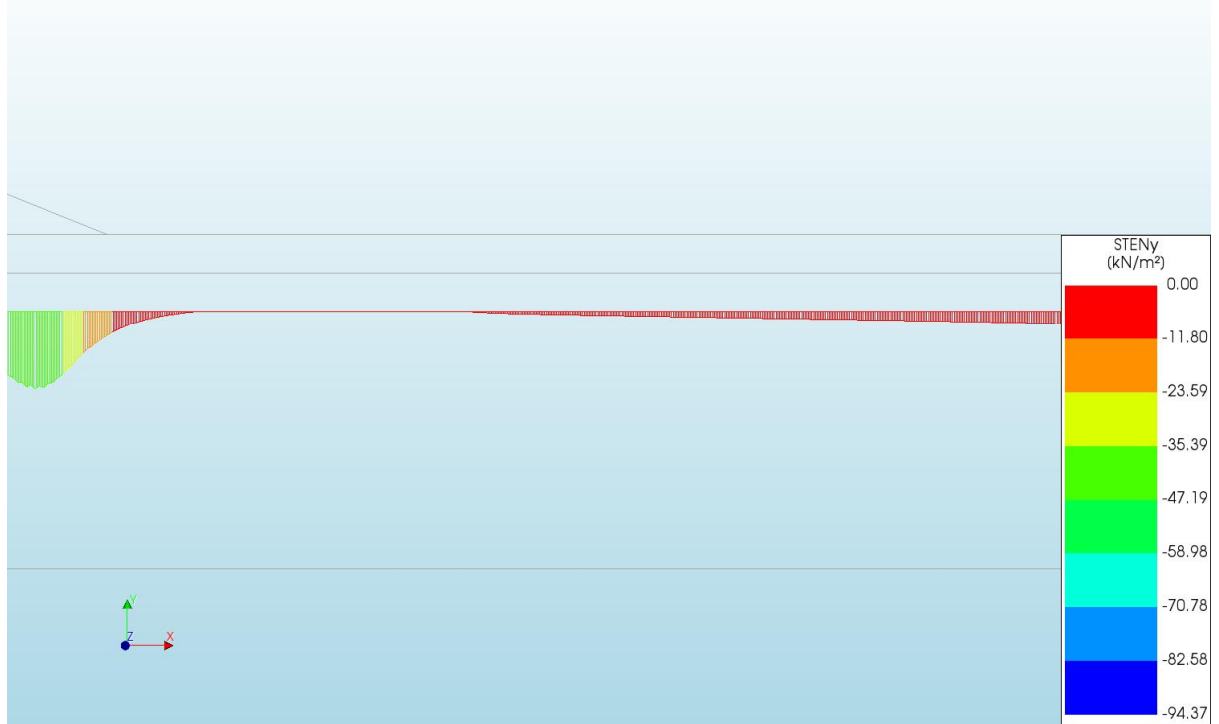
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -14.48mm max: 6.59mm

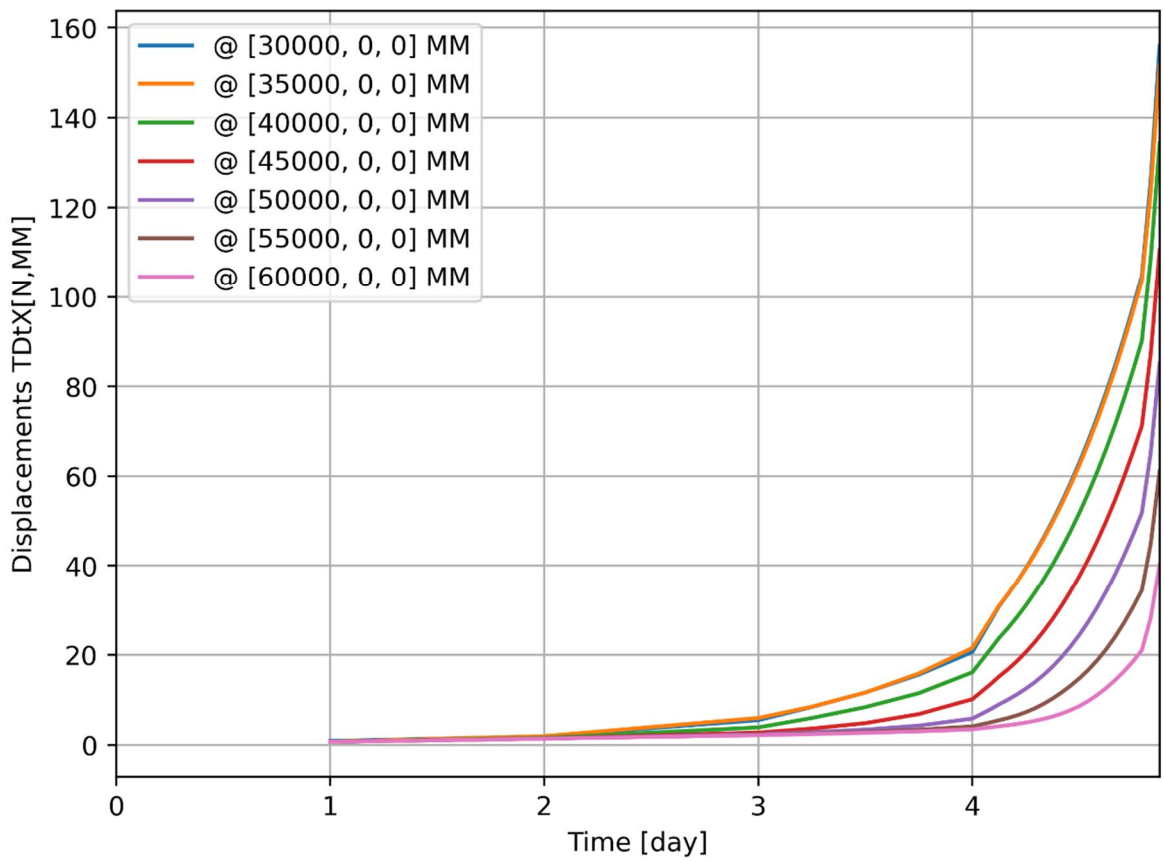
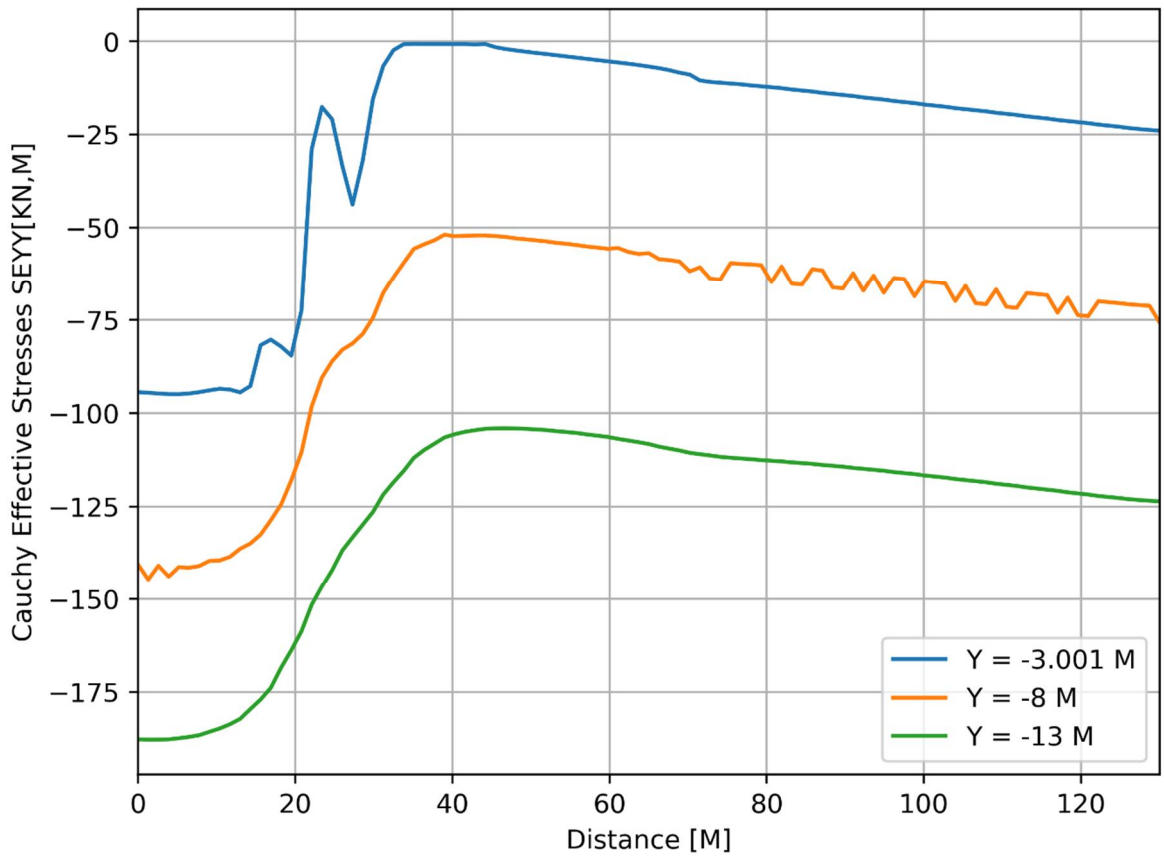


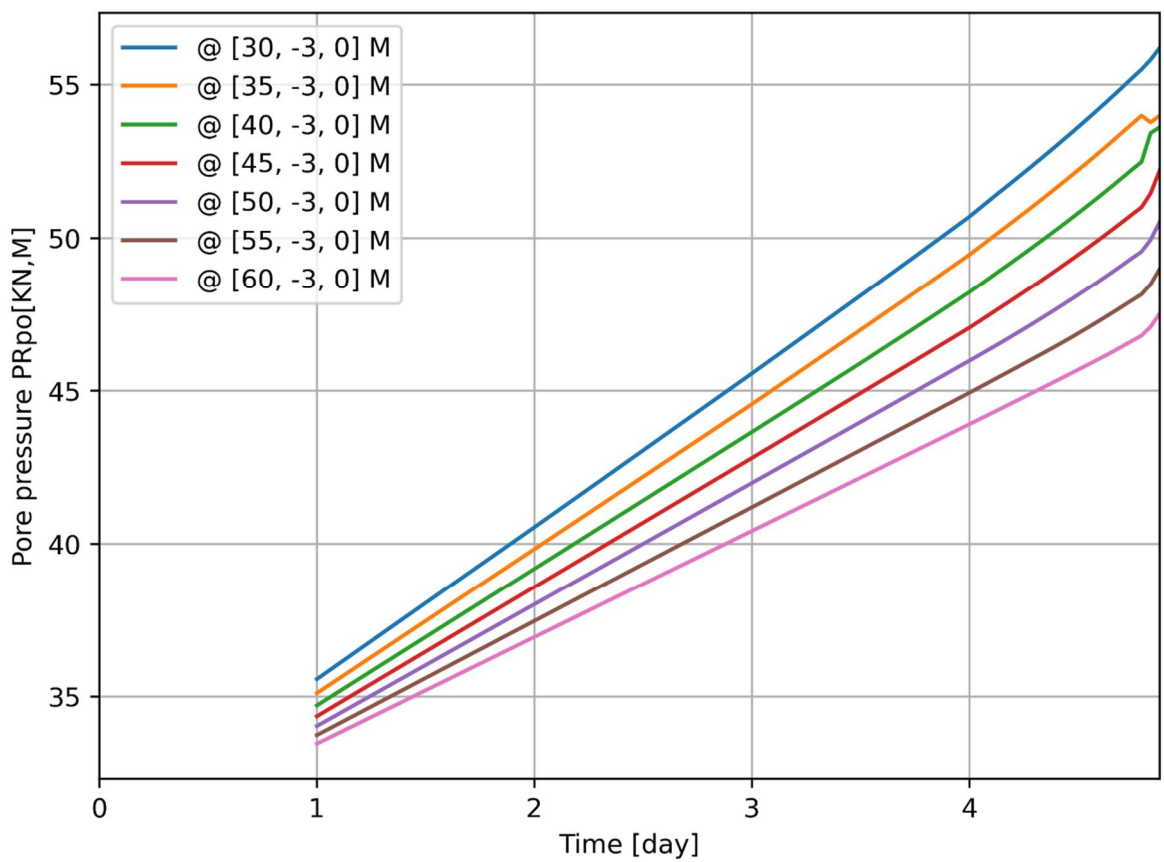
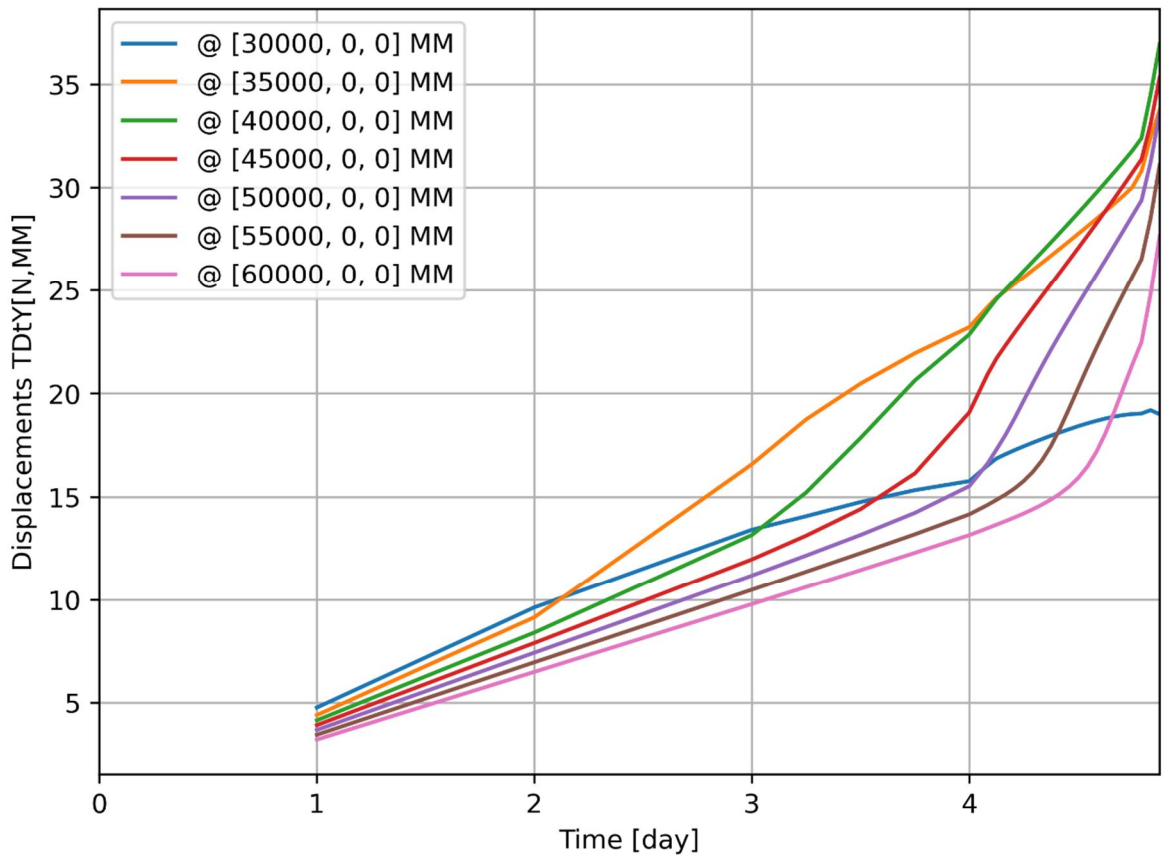
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.15kN/m<sup>2</sup> max: 26.93kN/m<sup>2</sup>

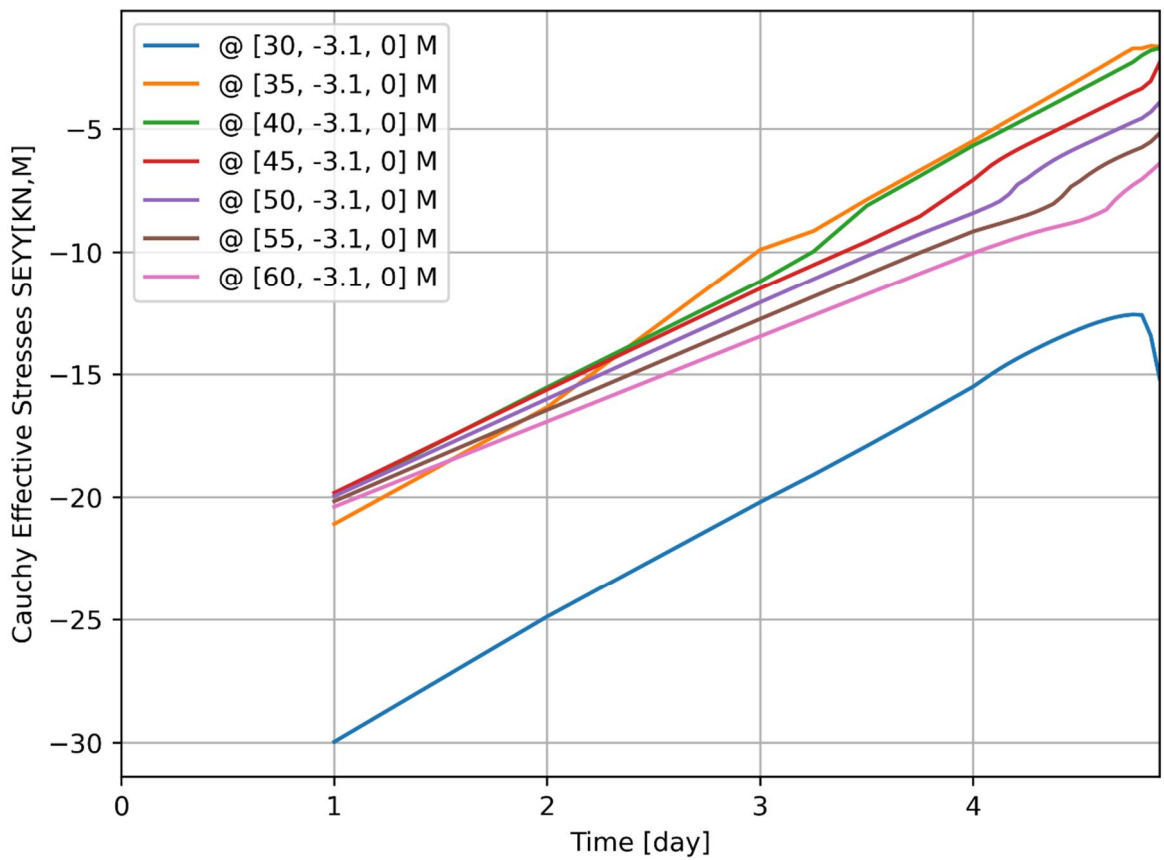
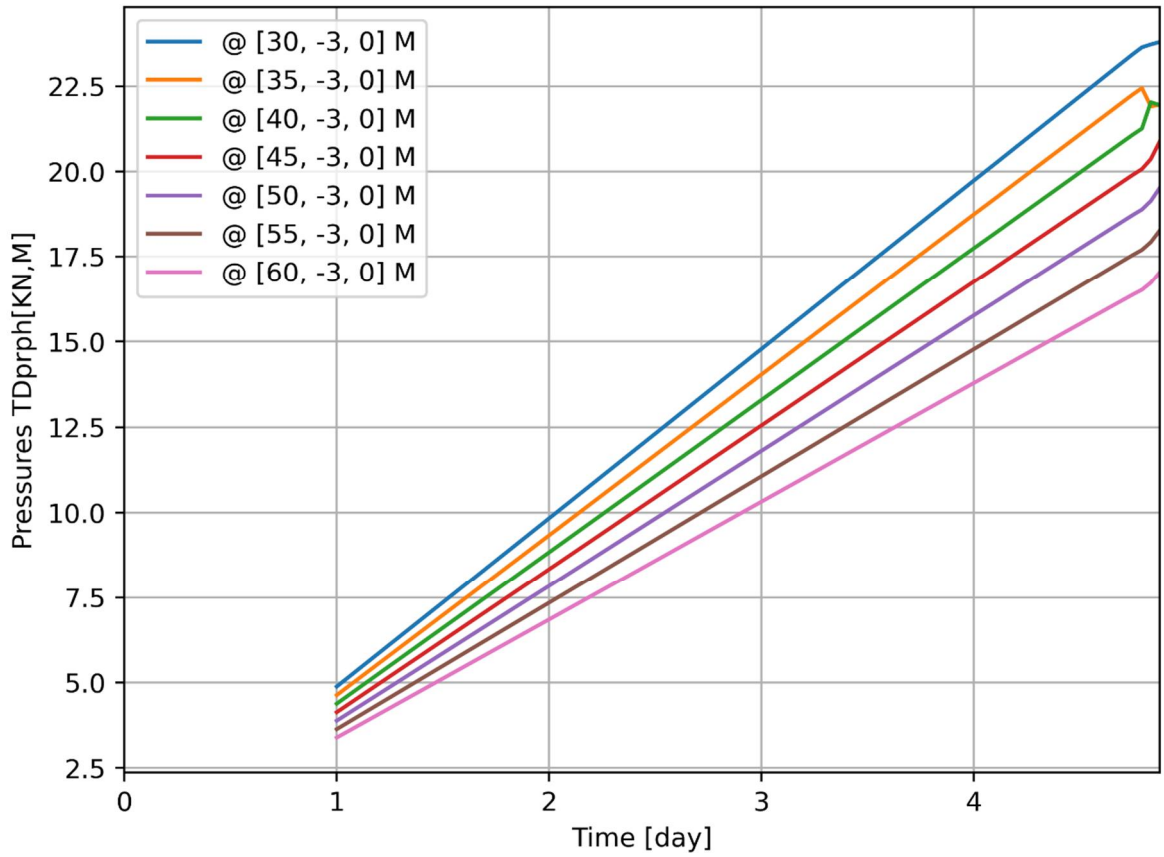


d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -94.37kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

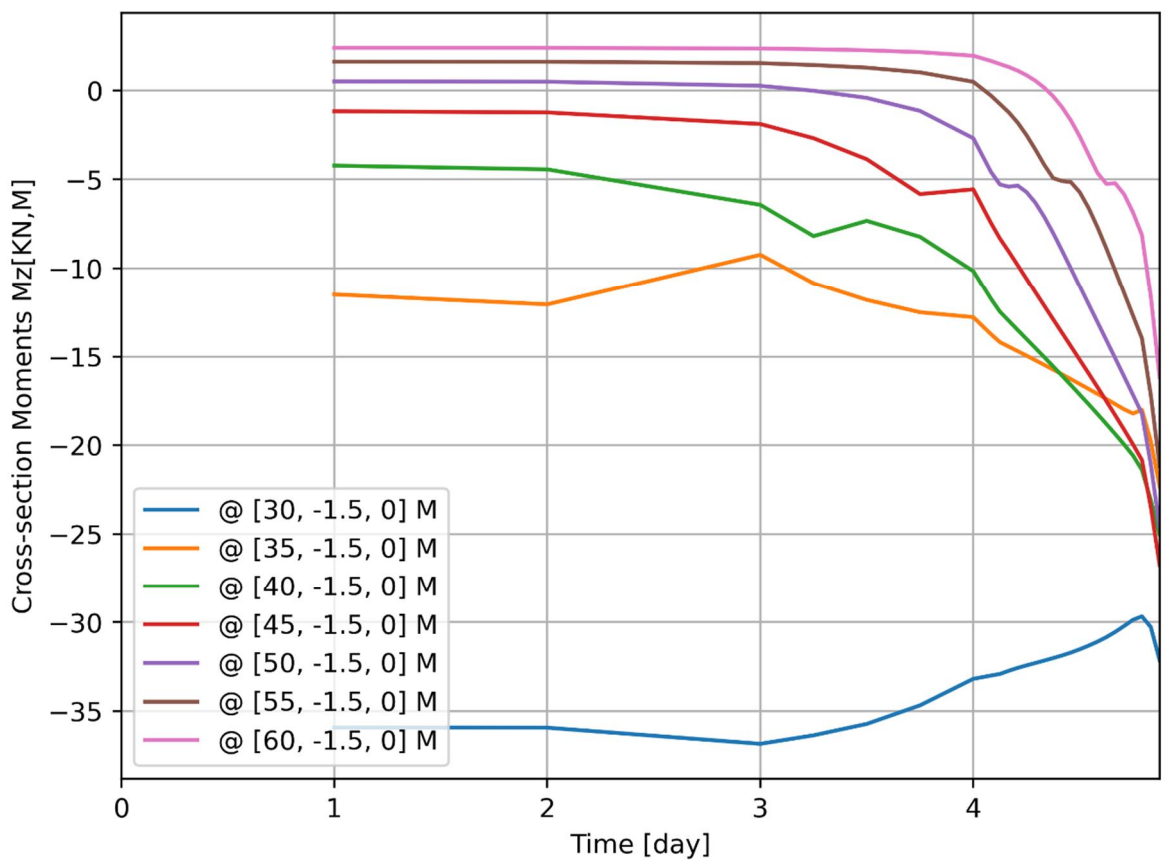
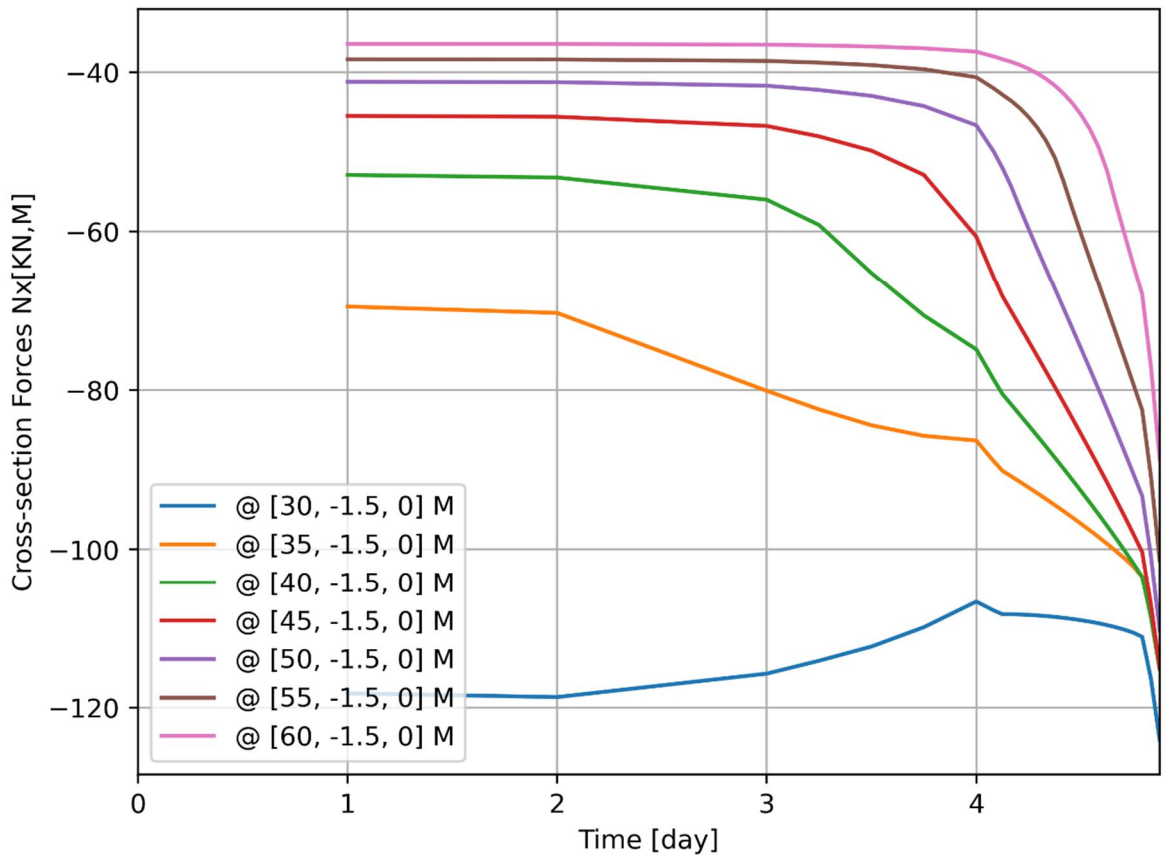








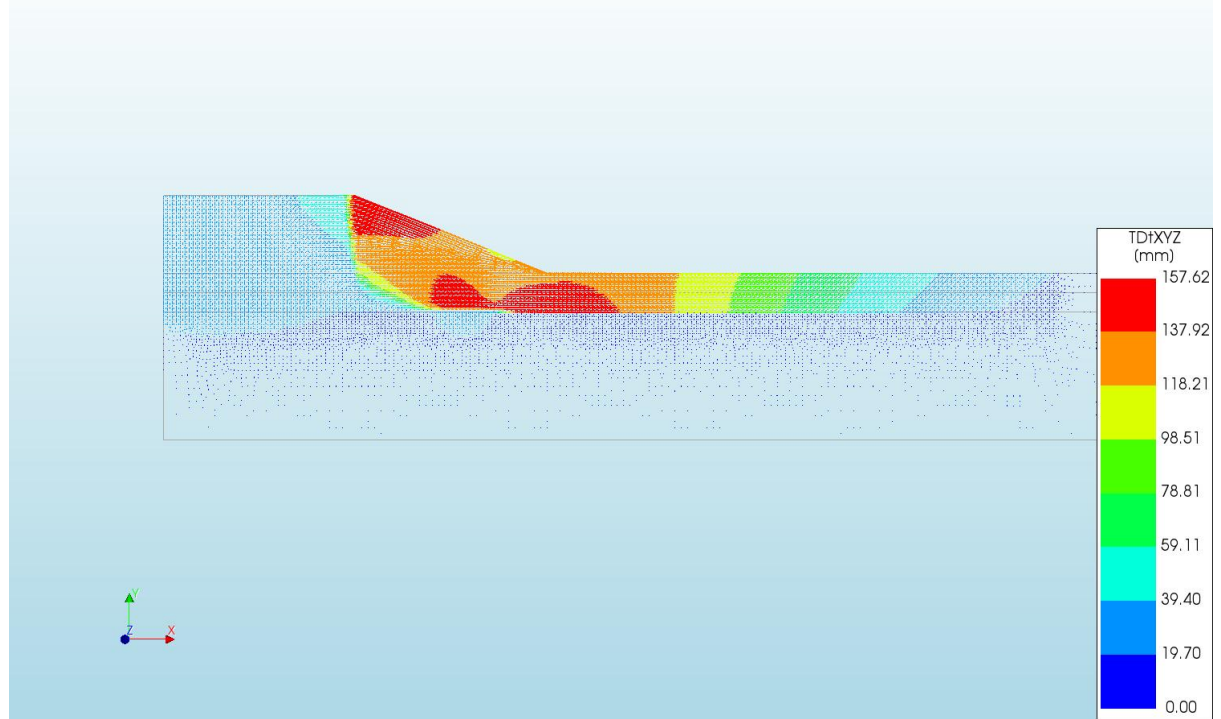




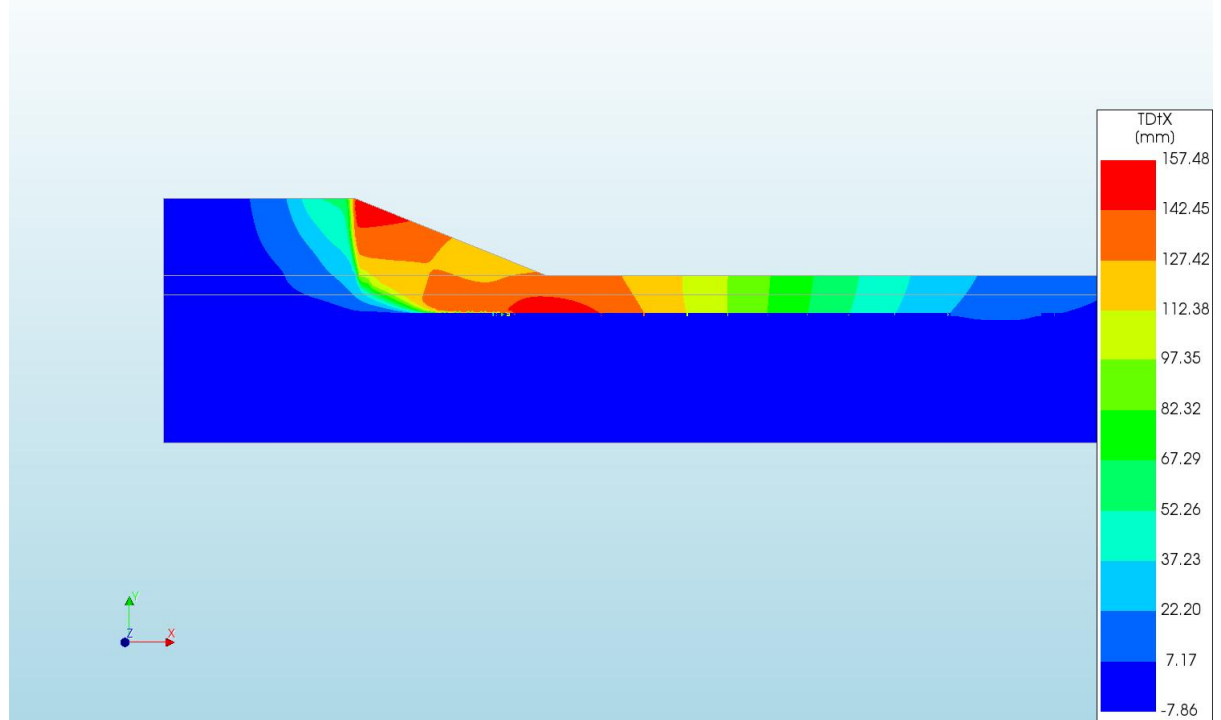
A.2.14

'Output\_d=3 c=19 E=3 k=1e-07 20200818'

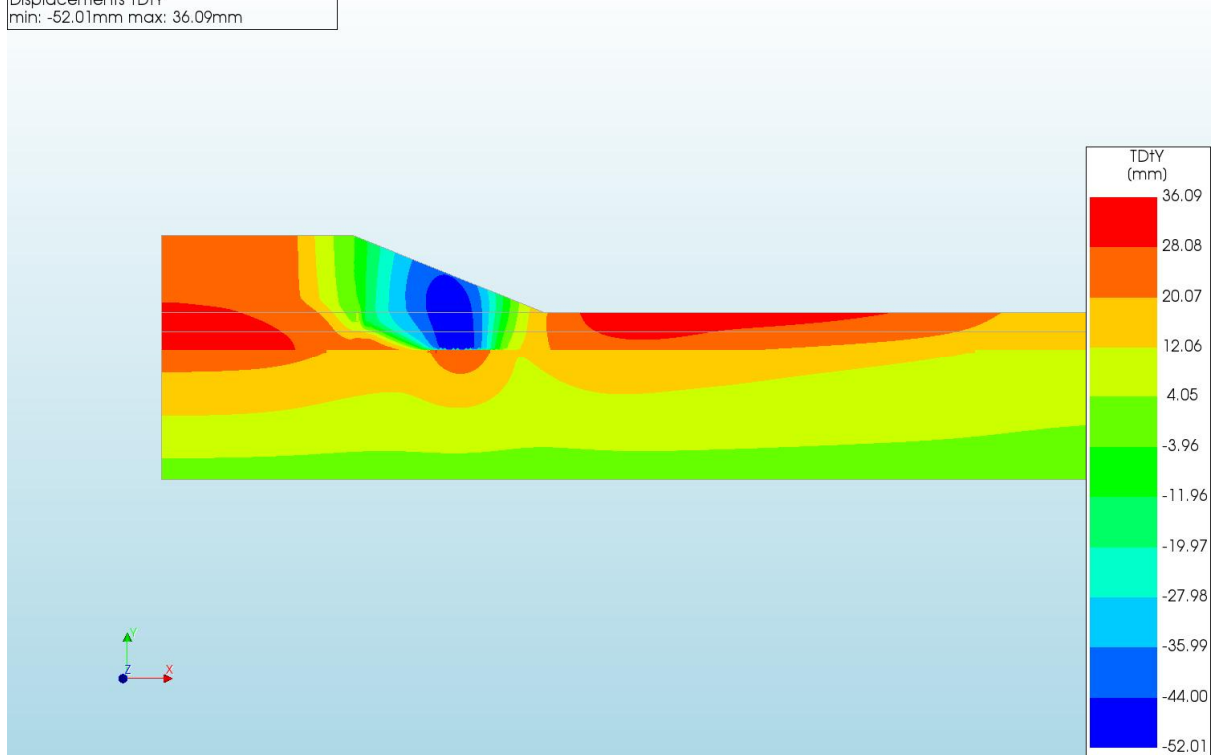
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDiXYZ  
min: 0.00mm max: 157.62mm



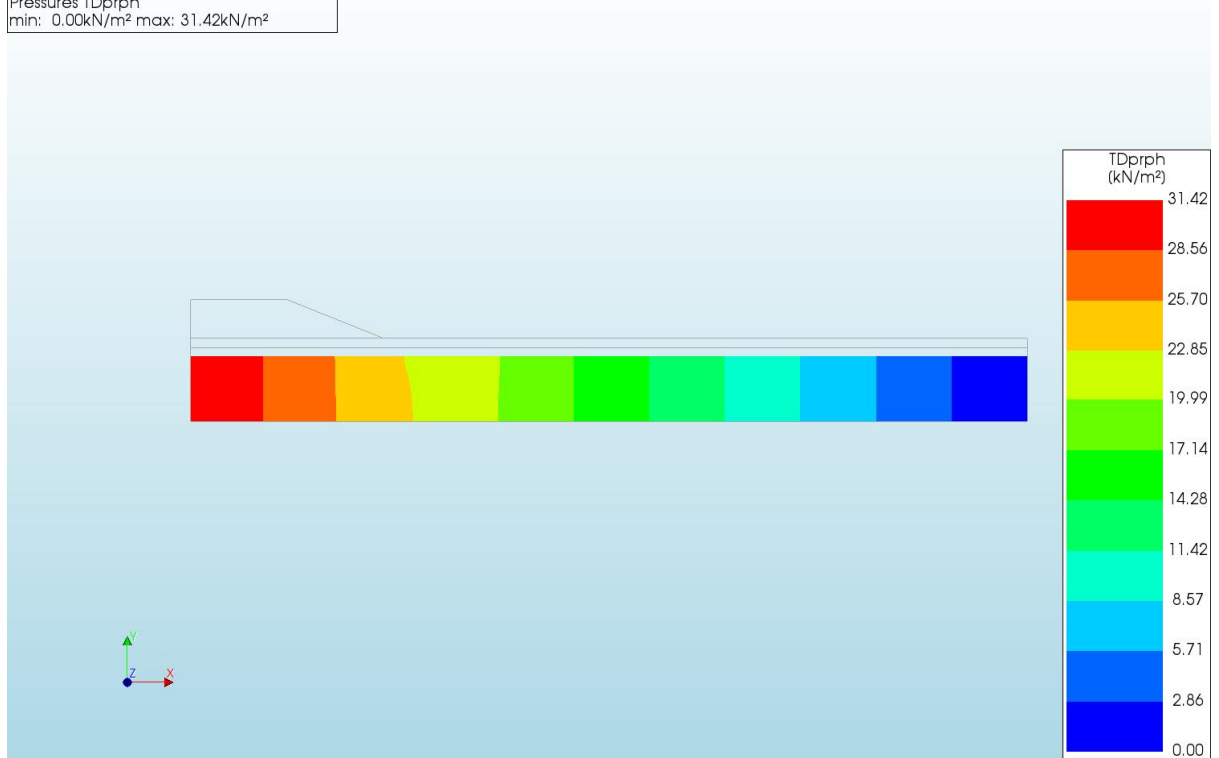
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDiX  
min: -7.86mm max: 157.48mm



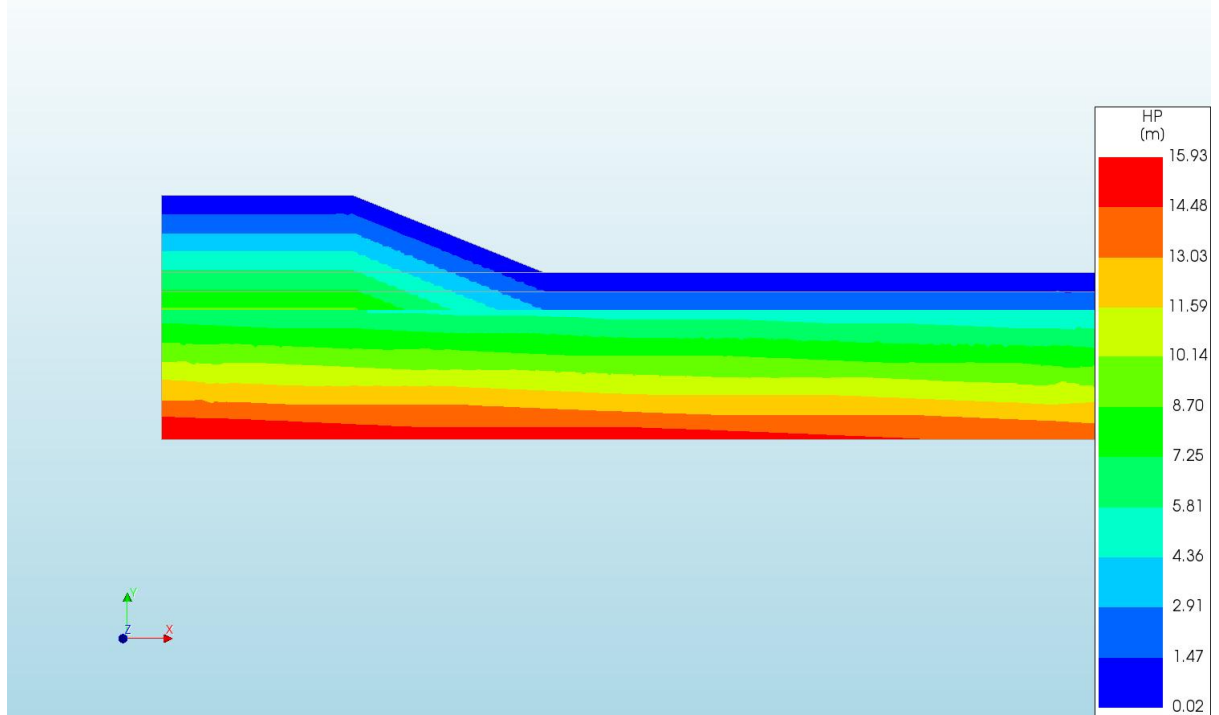
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDtY  
min: -52.01mm max: 36.09mm



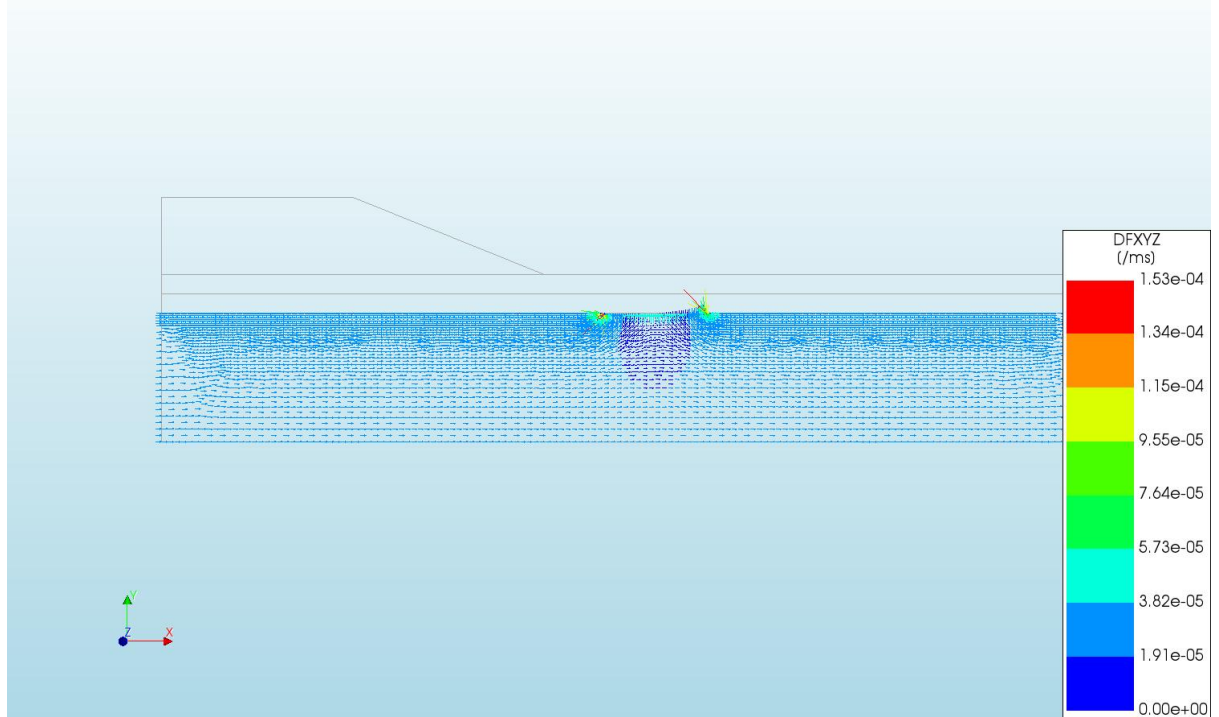
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 31.42kN/m<sup>2</sup>



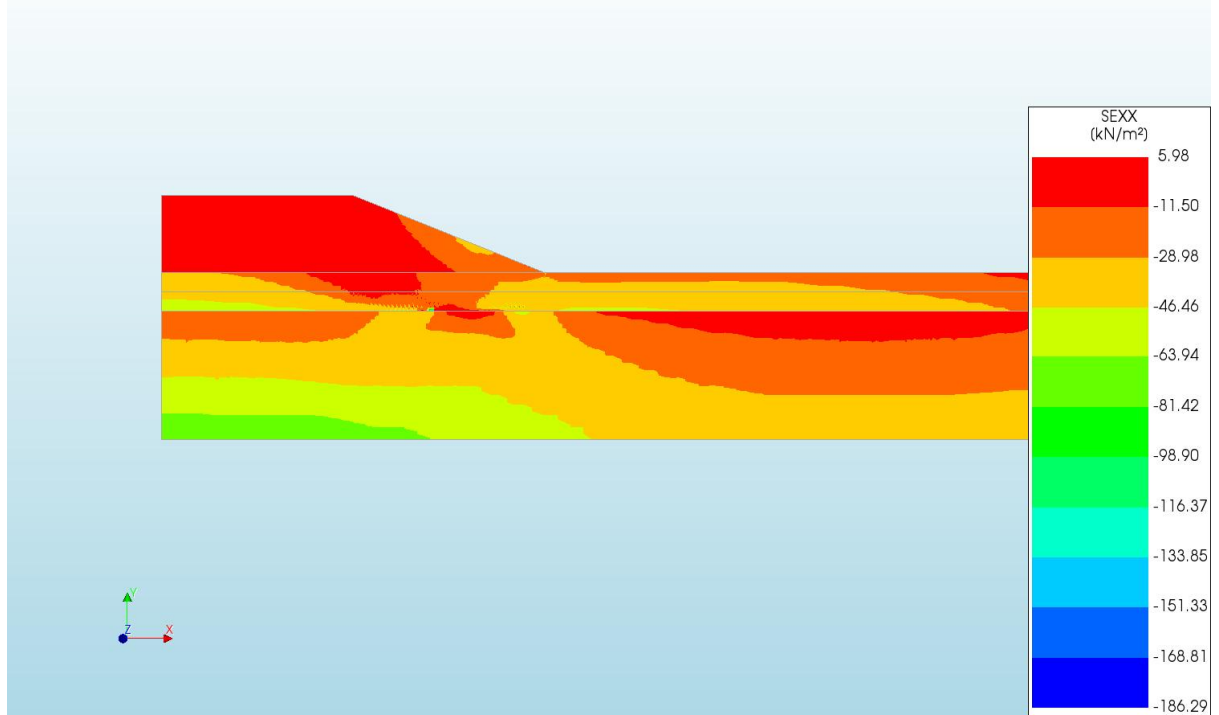
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.93m



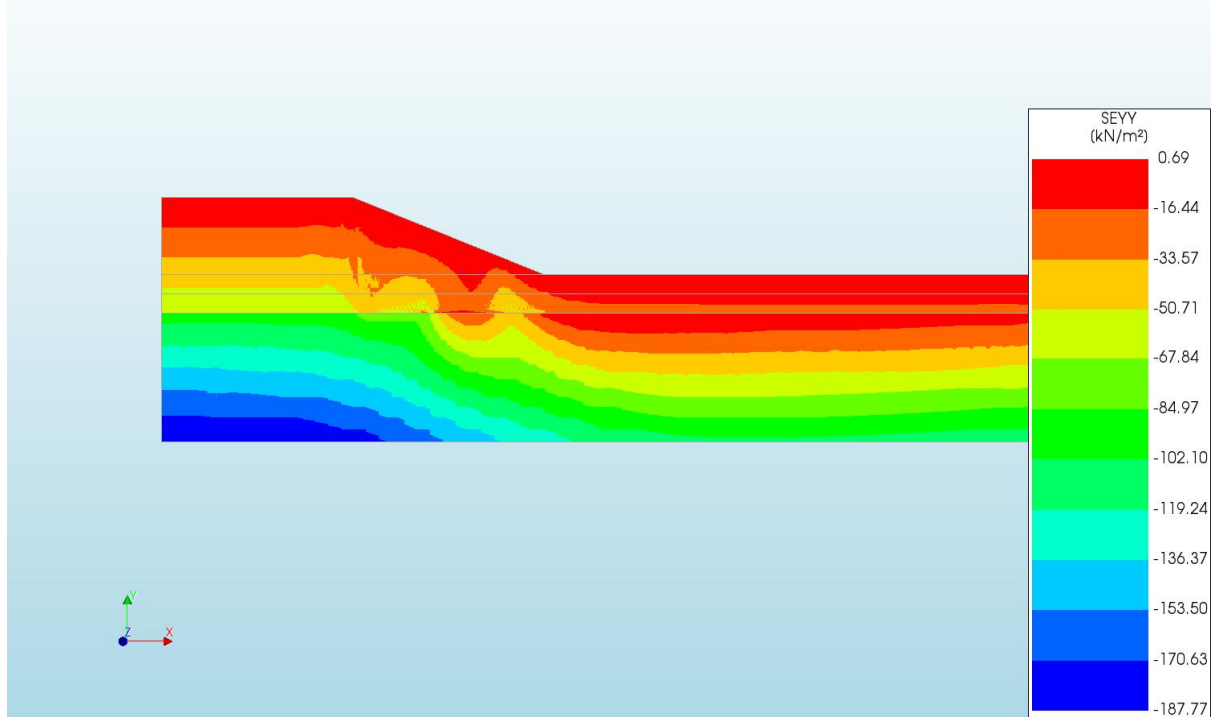
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.53e-04/ms



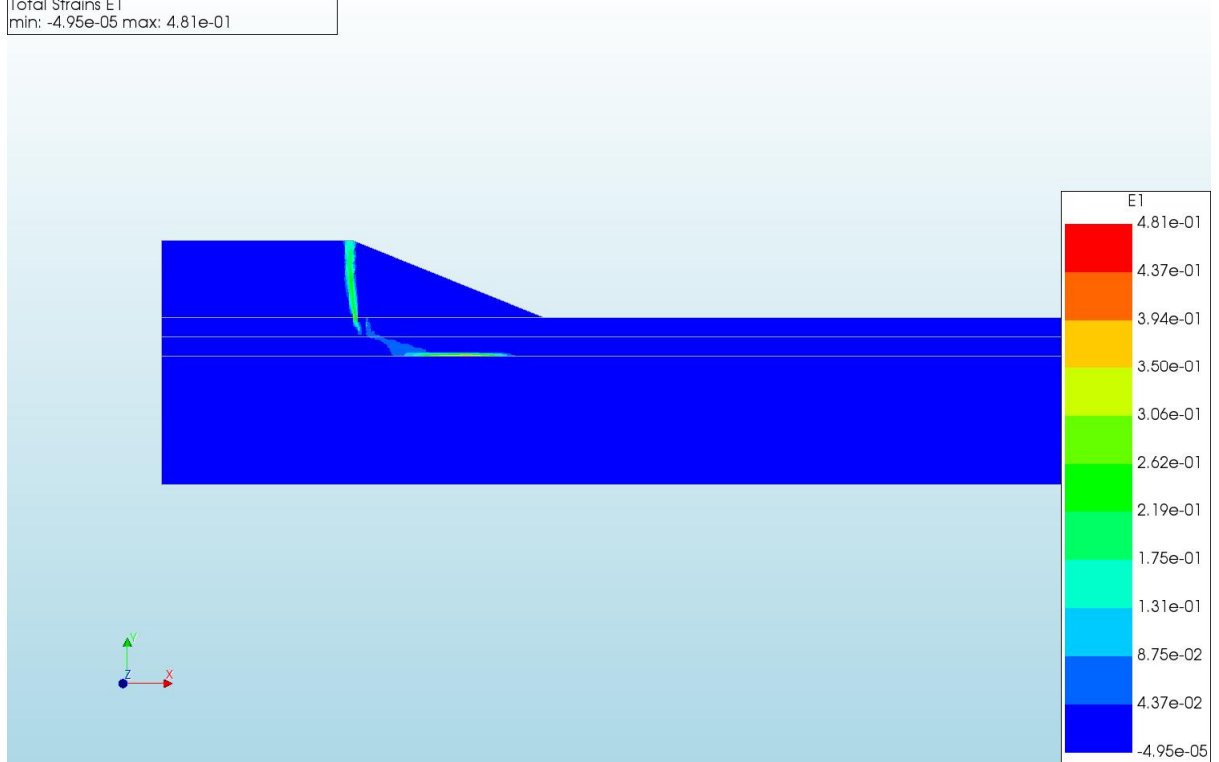
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -186,29kN/m<sup>2</sup> max: 5,98kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -187,77kN/m<sup>2</sup> max: 0,69kN/m<sup>2</sup>



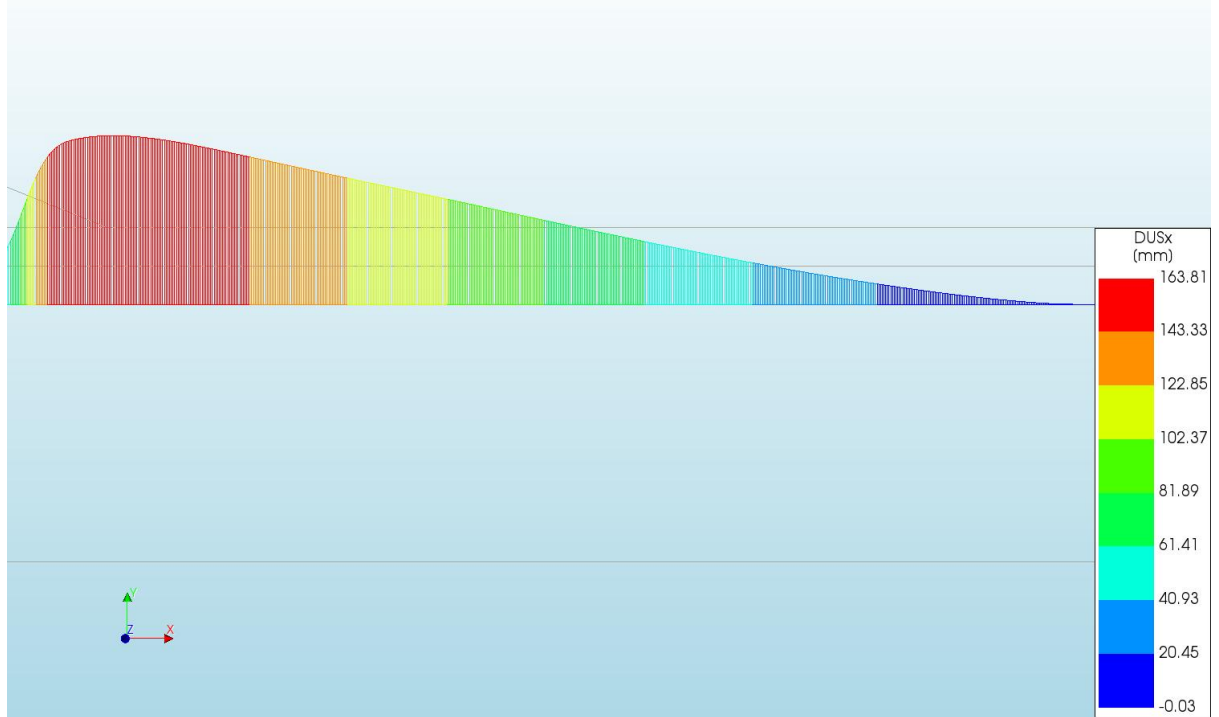
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Total Strains E1  
min: -4.95e-05 max: 4.81e-01



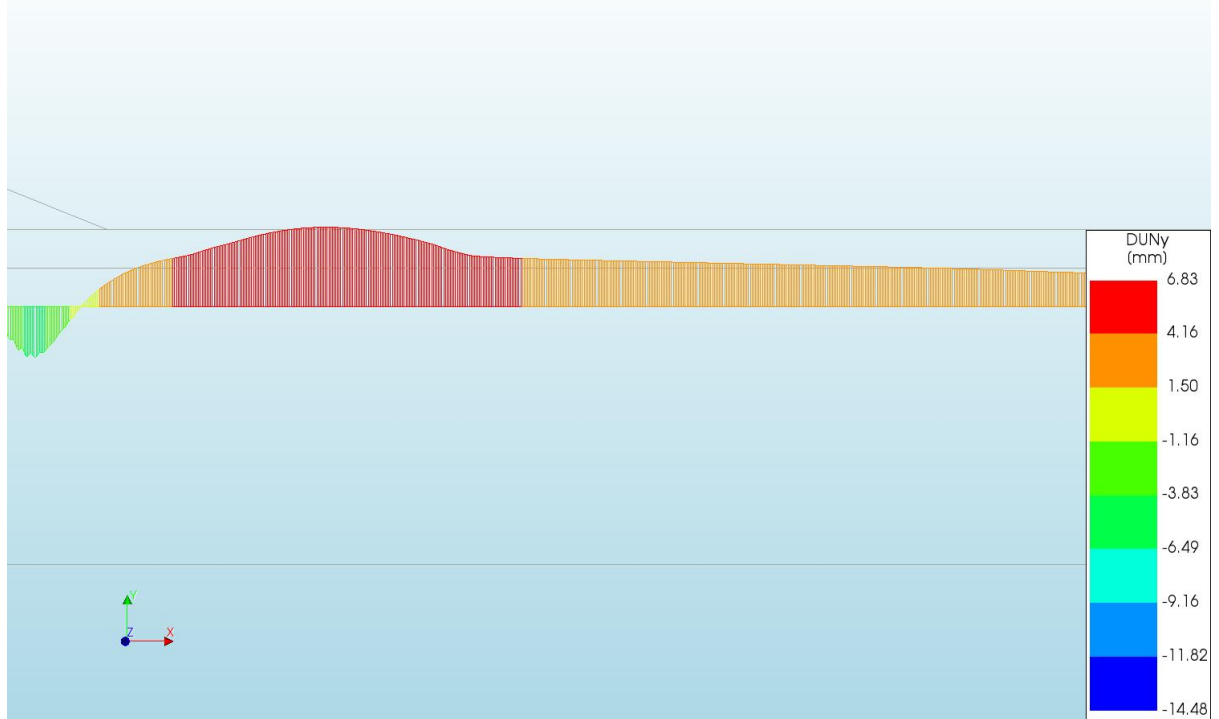
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.01e-01



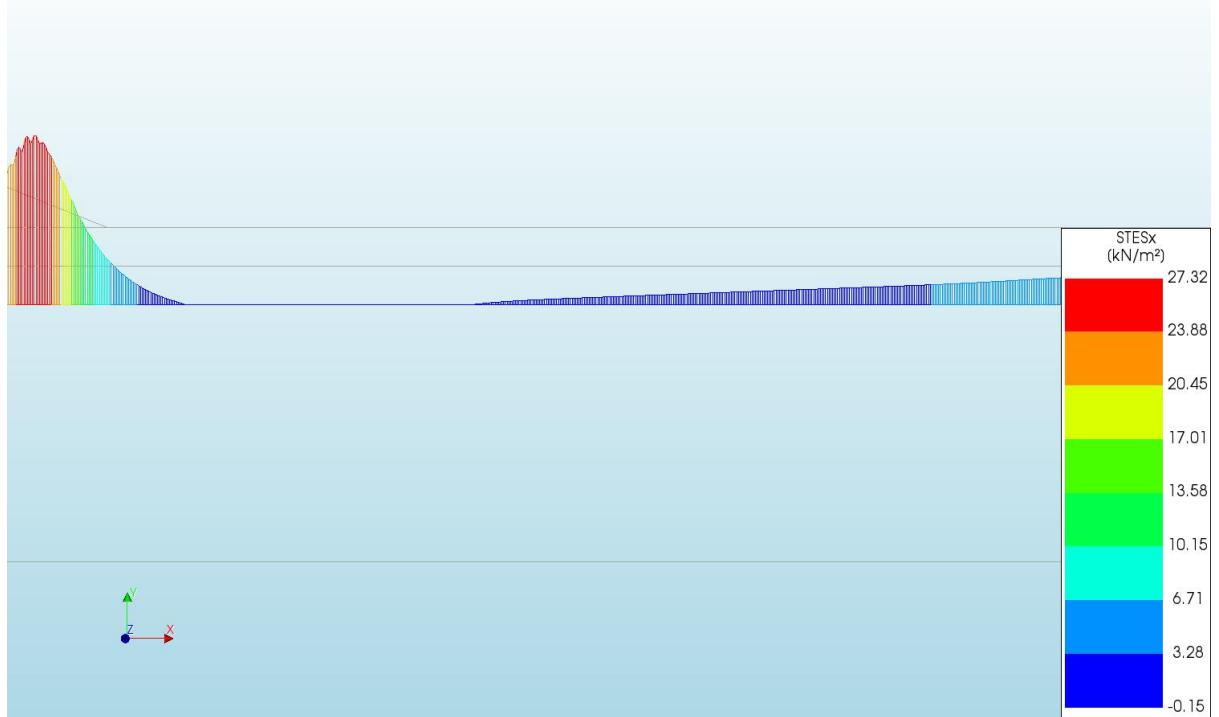
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 163.81mm



d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.48mm max: 6.83mm



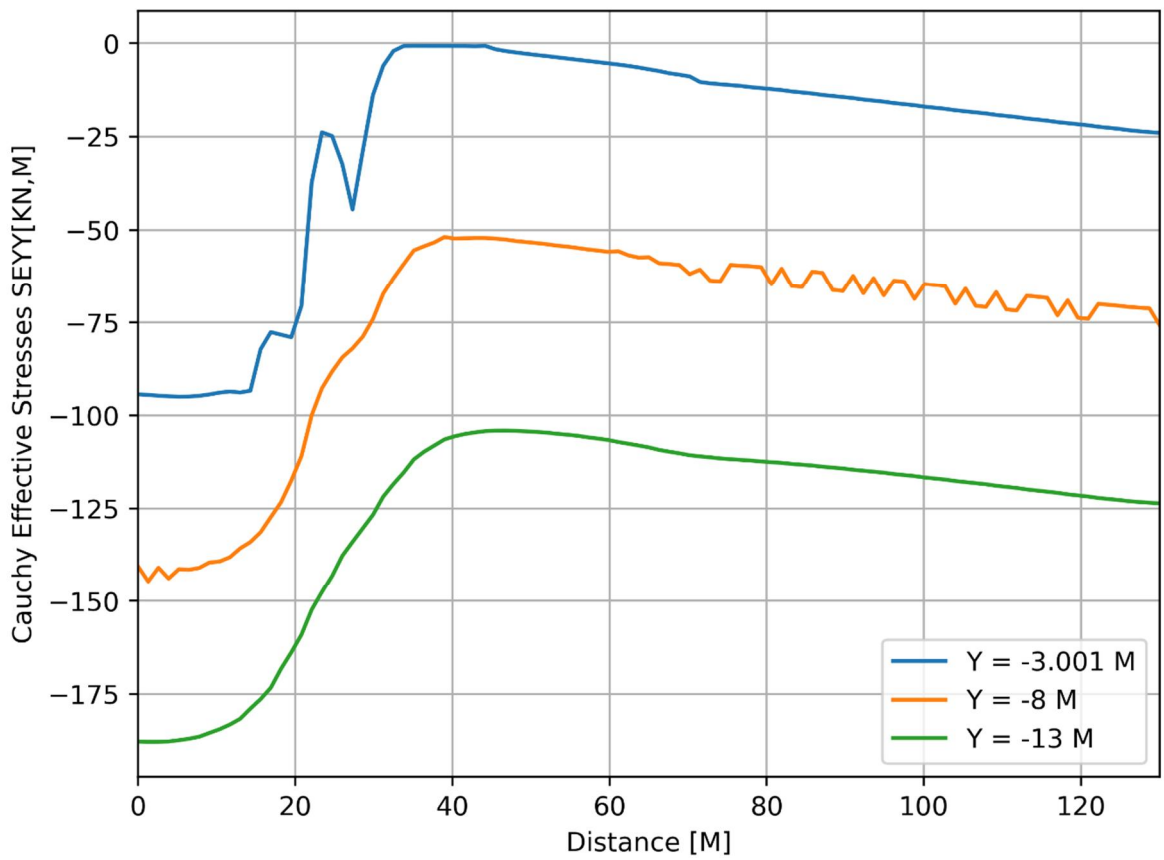
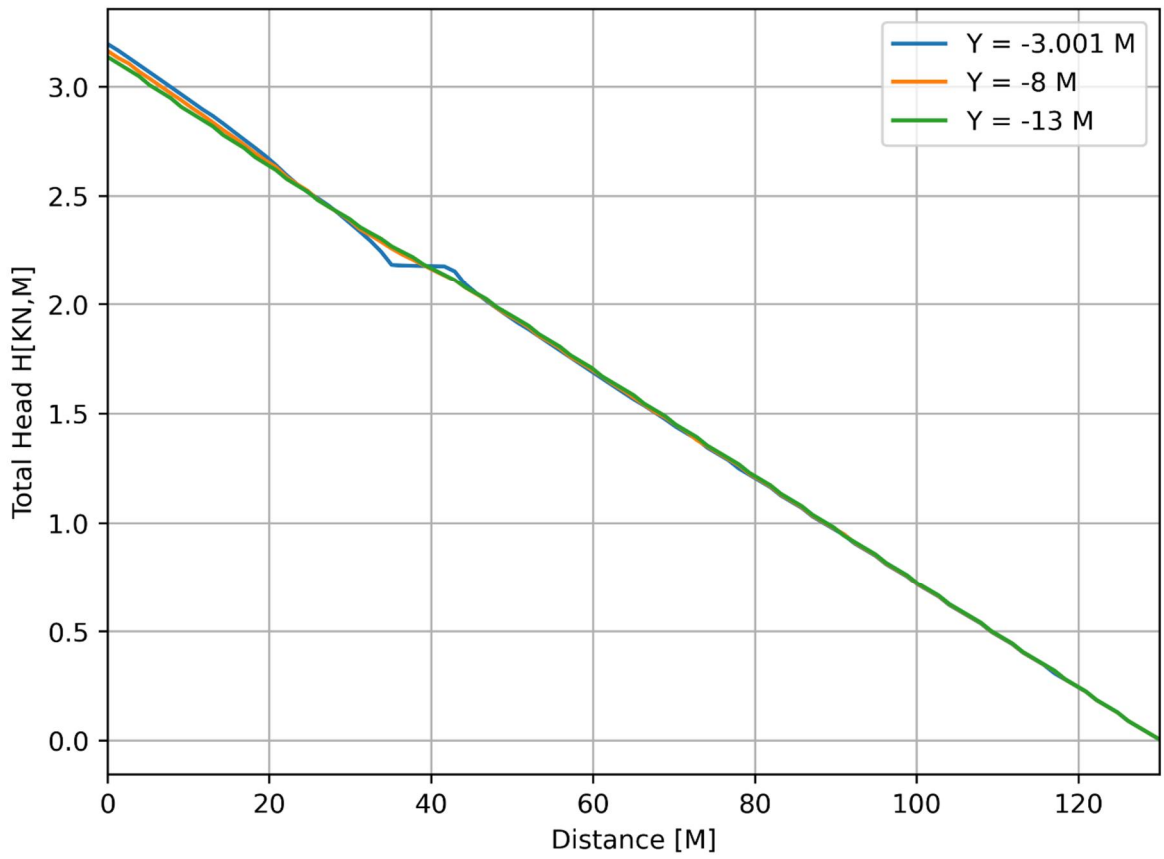
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.15kN/m<sup>2</sup> max: 27.32kN/m<sup>2</sup>

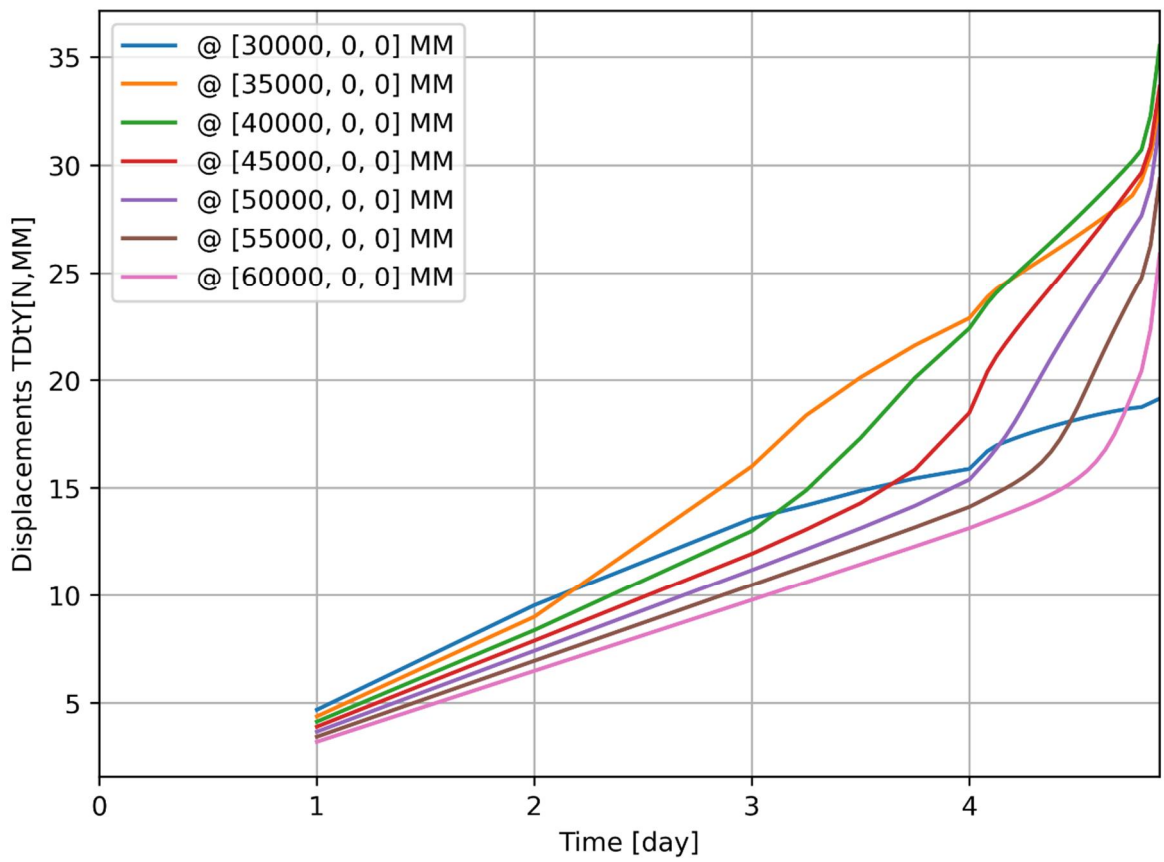
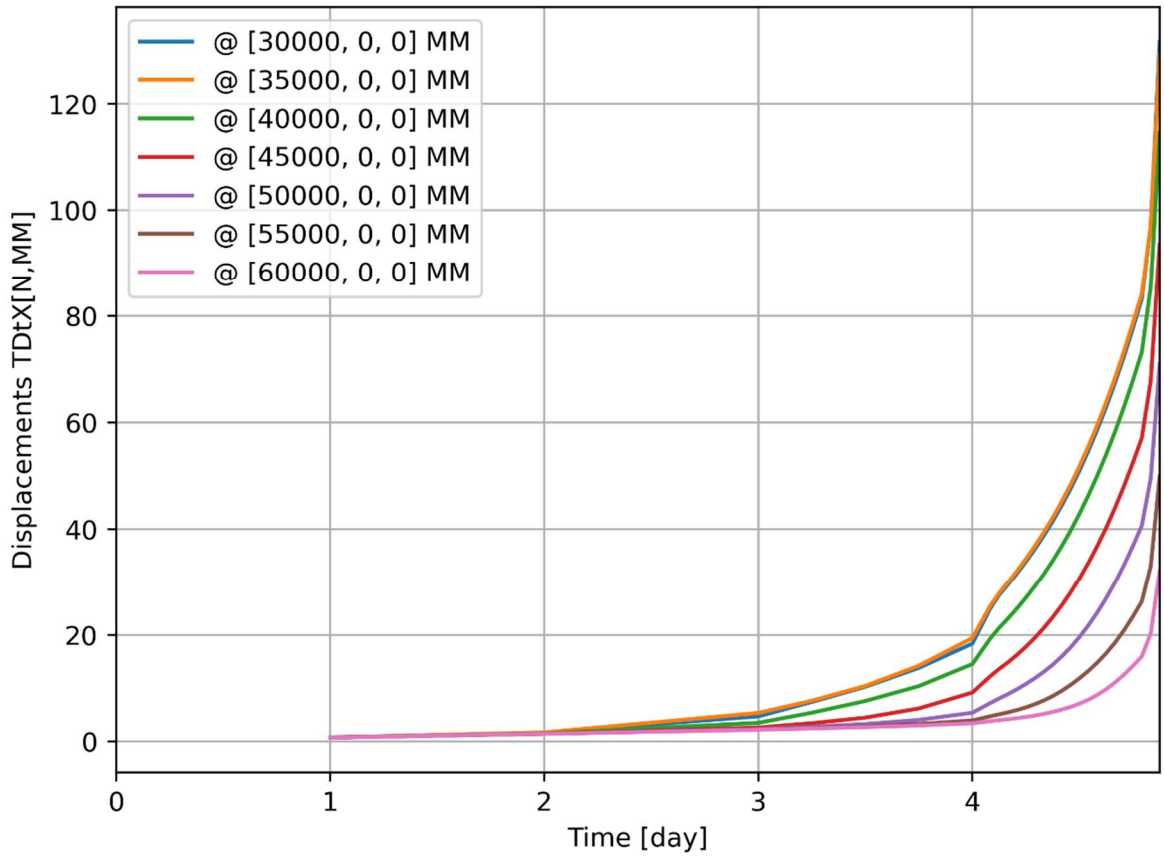


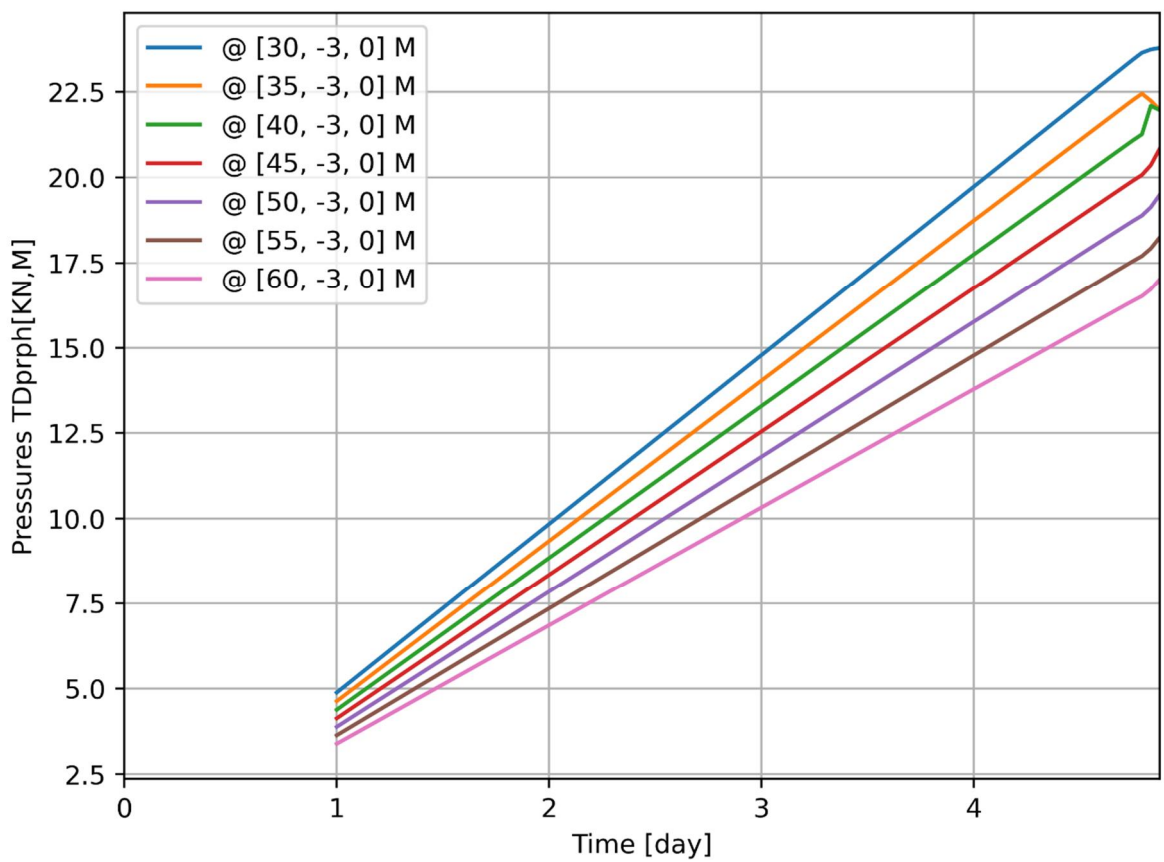
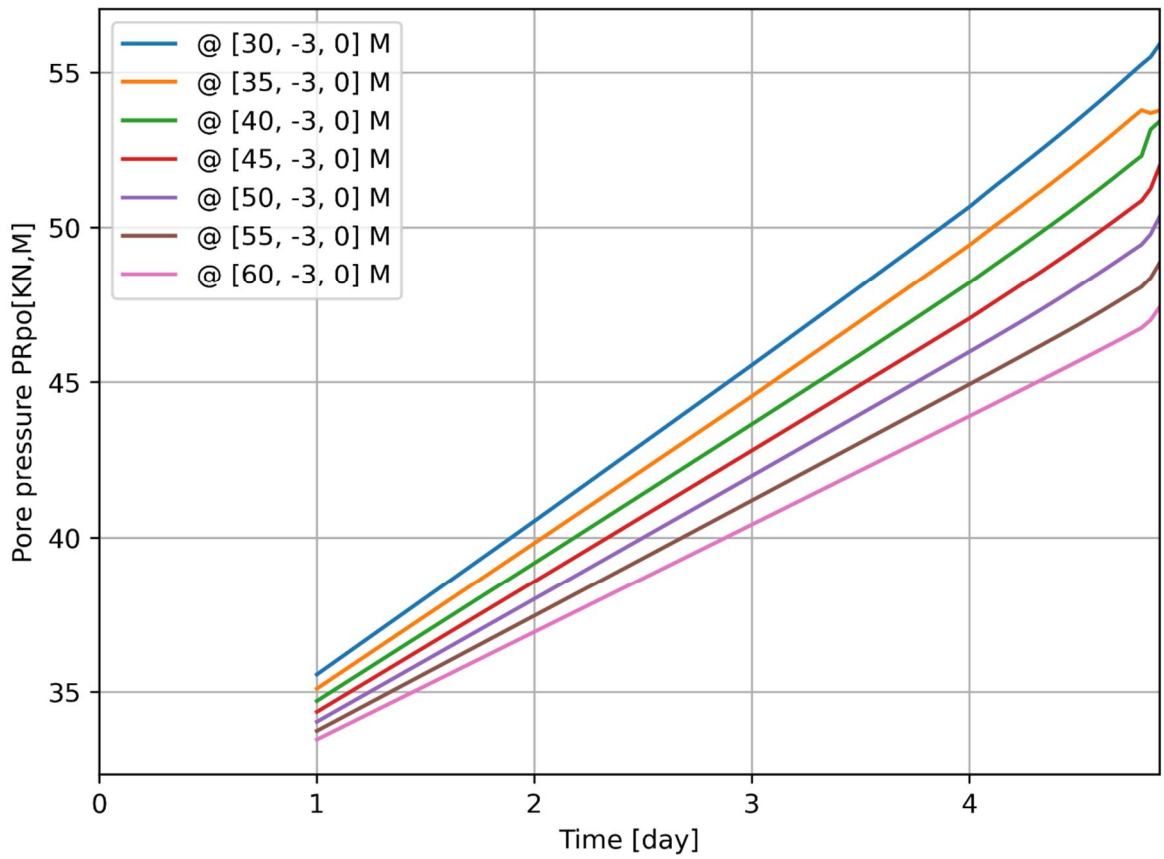
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -94.41kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

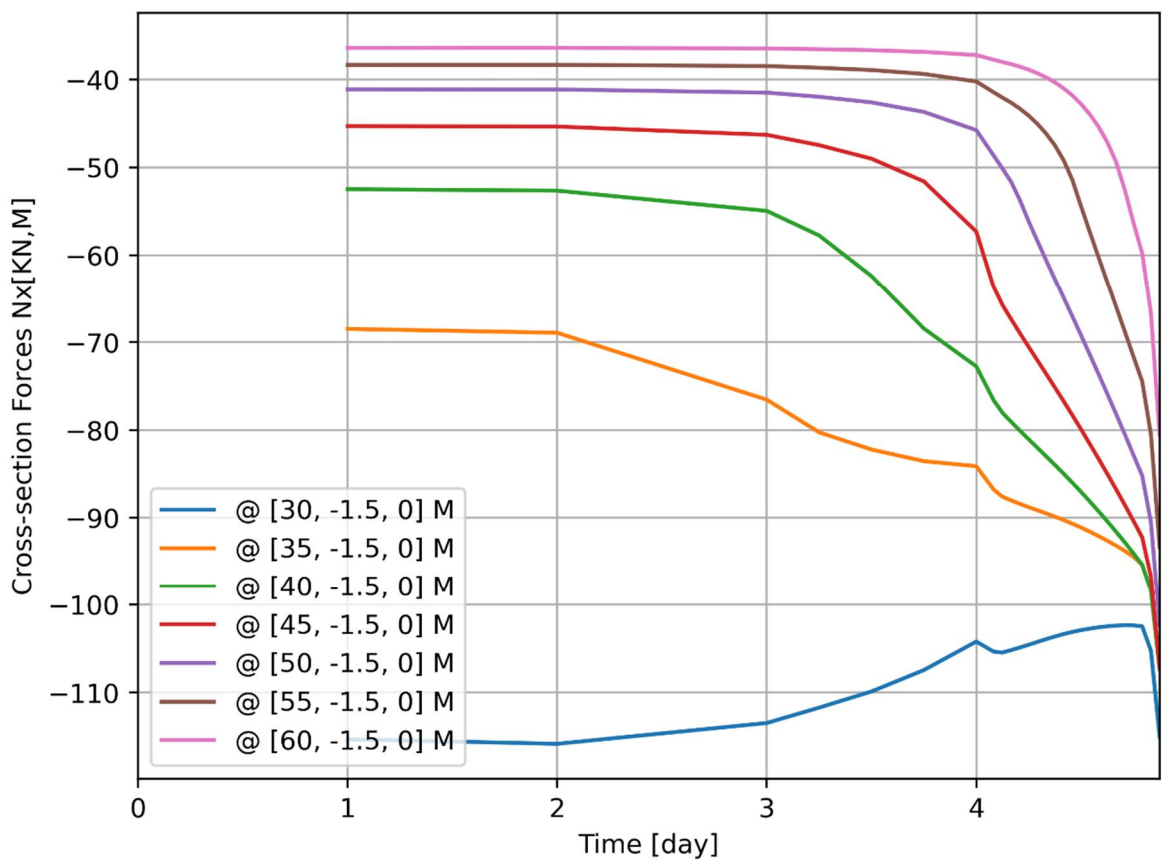
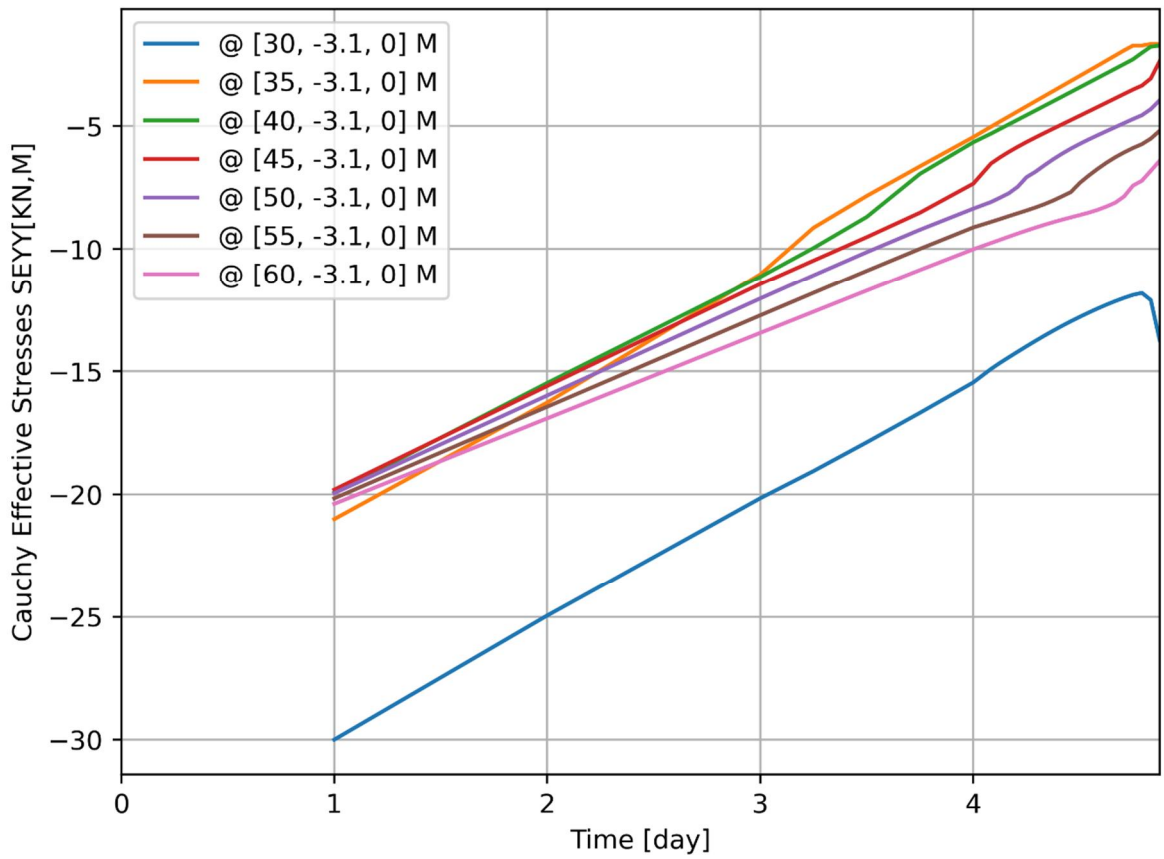


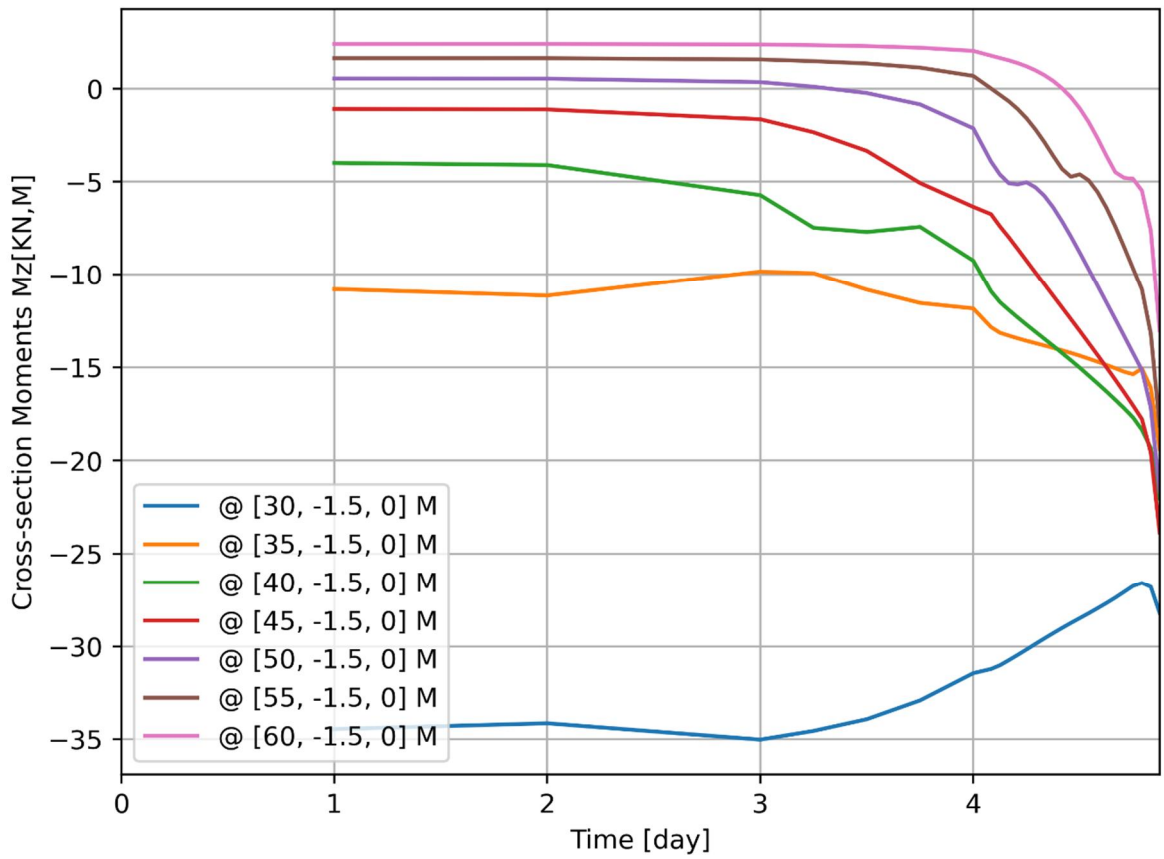








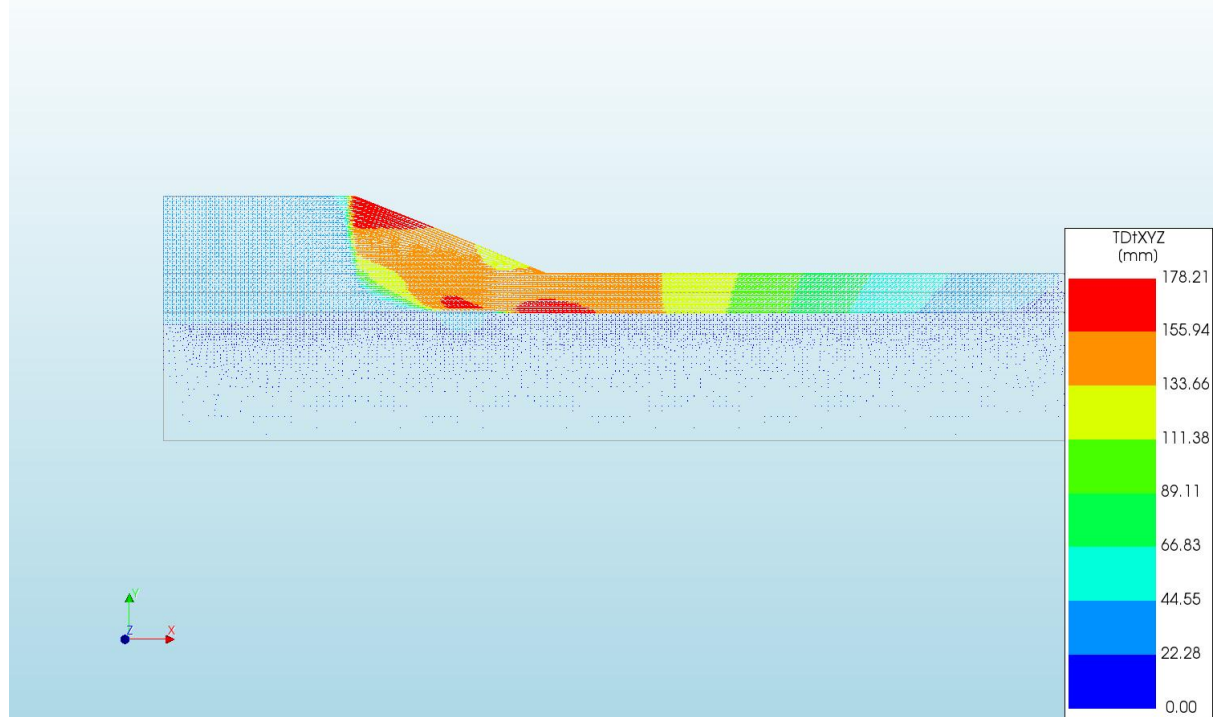




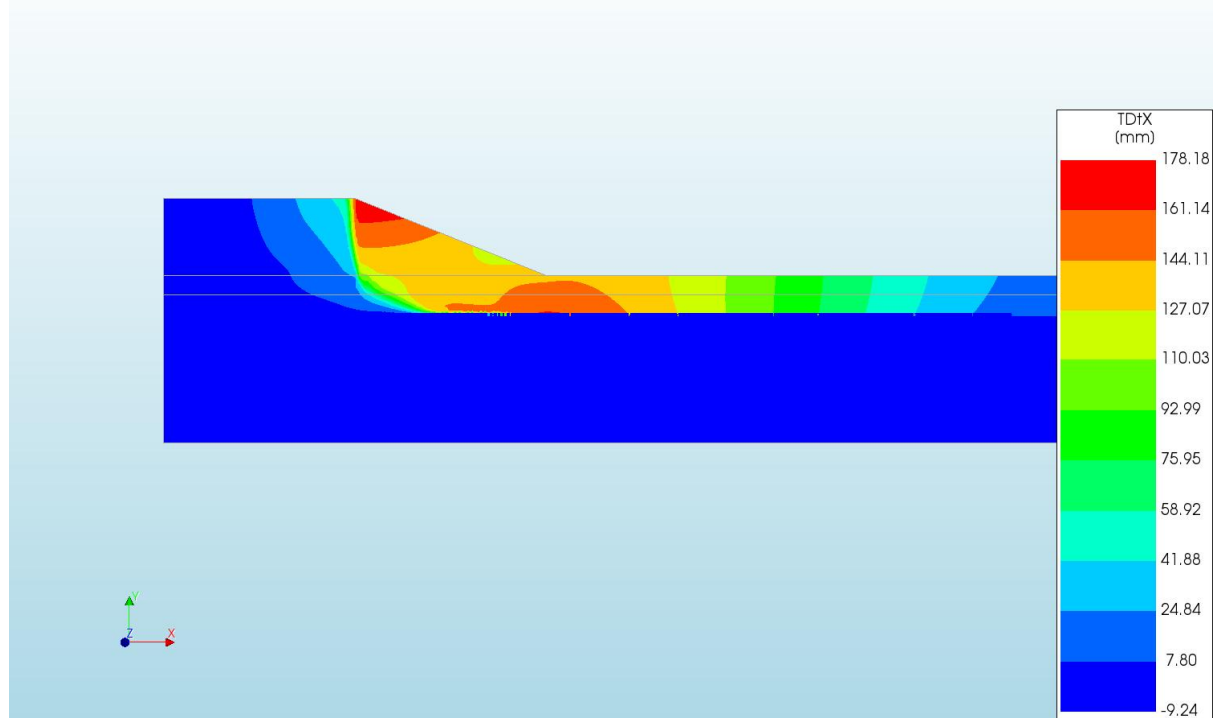
A.2.15

'Output d=3 c=20 E=3 k=1e-07 20200818'

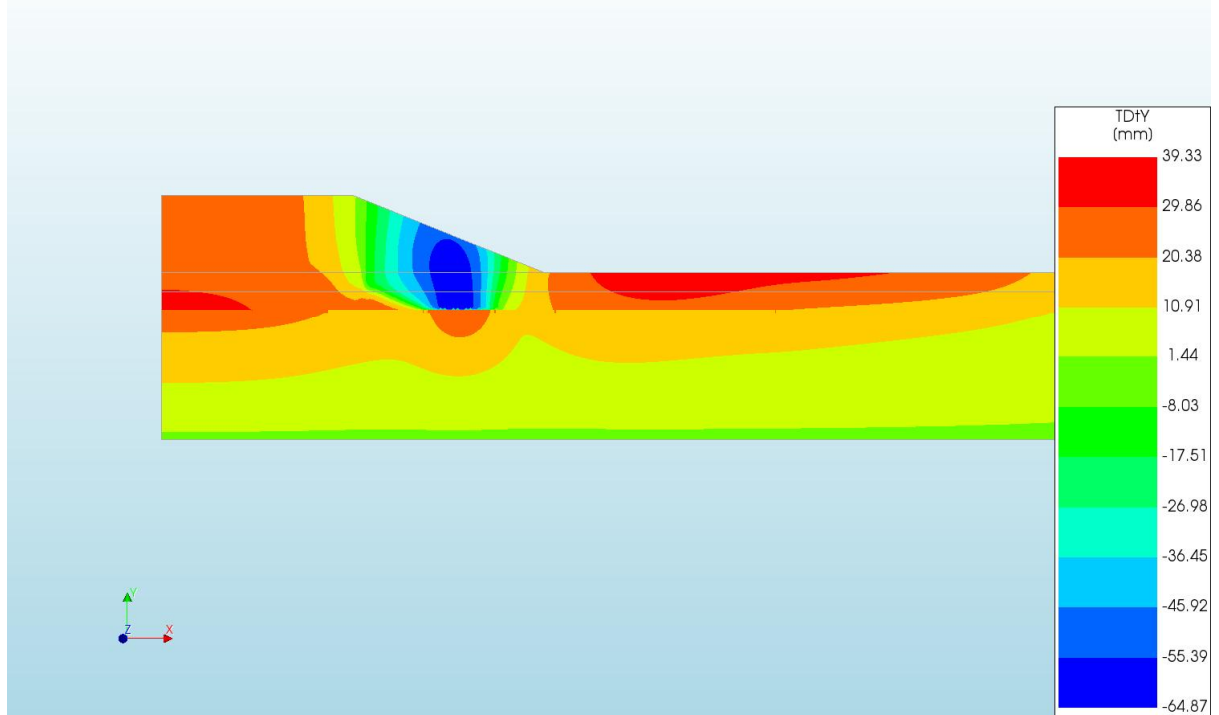
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 178.21mm



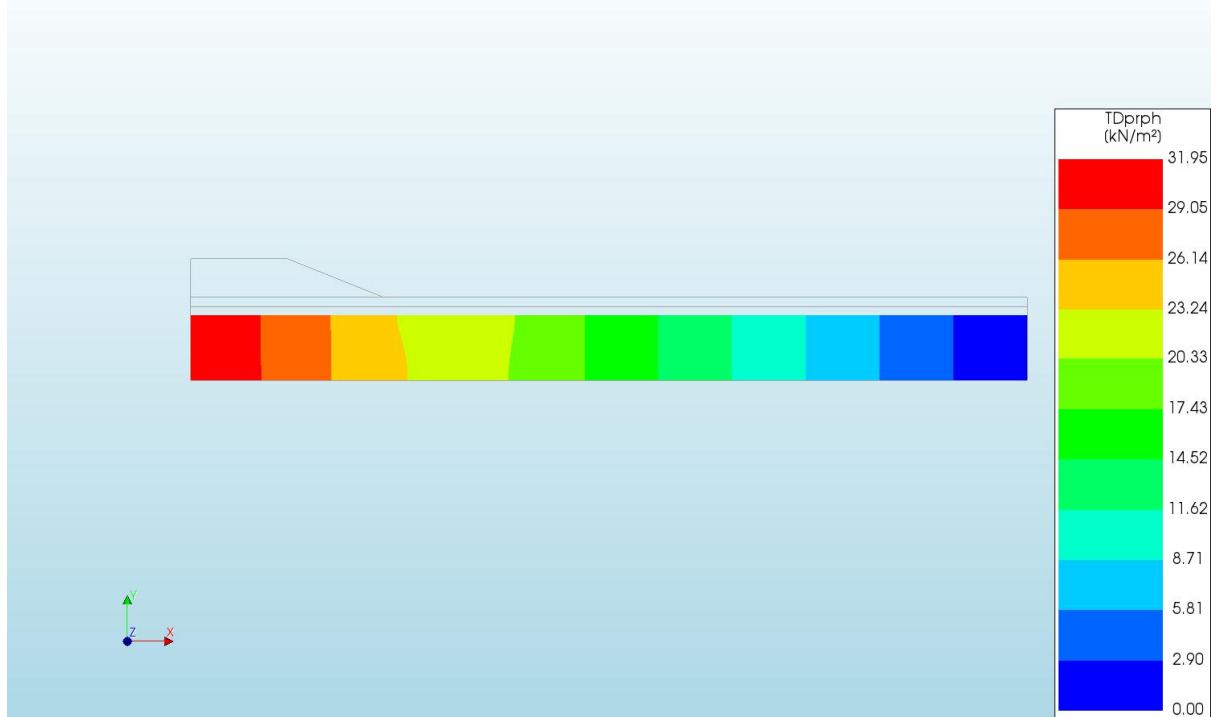
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -9.24mm max: 178.18mm



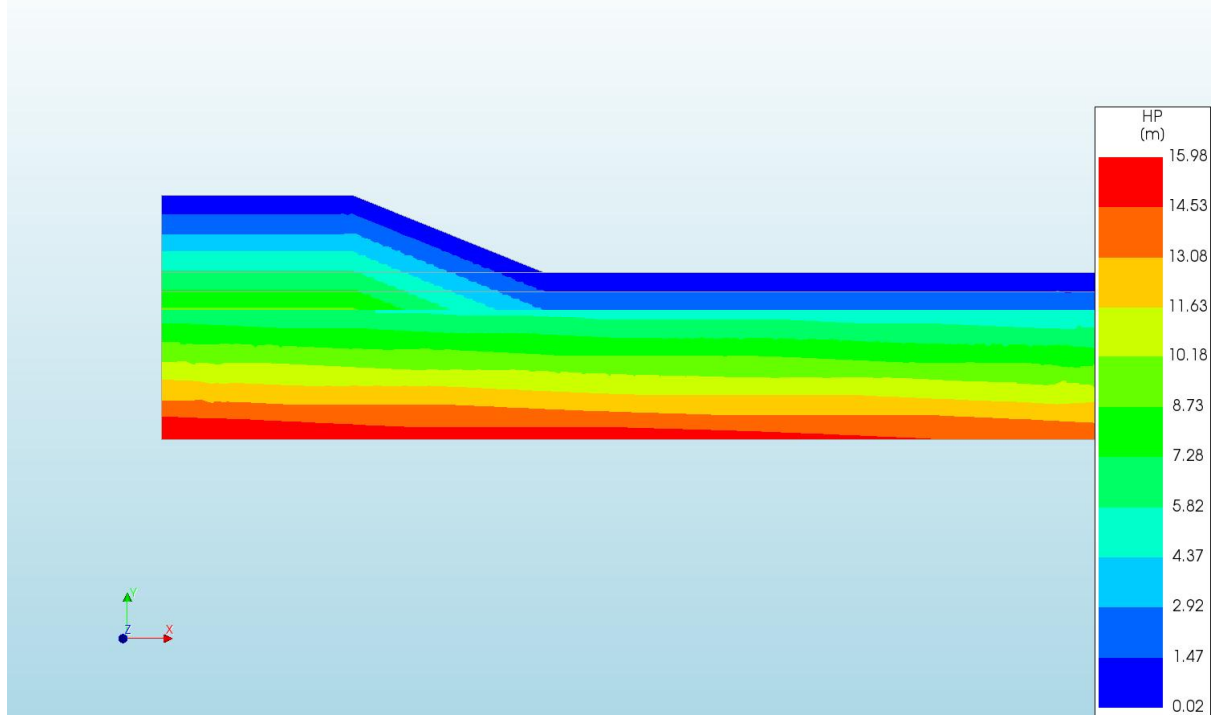
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Displacements TDtY  
min: -64.87mm max: 39.33mm



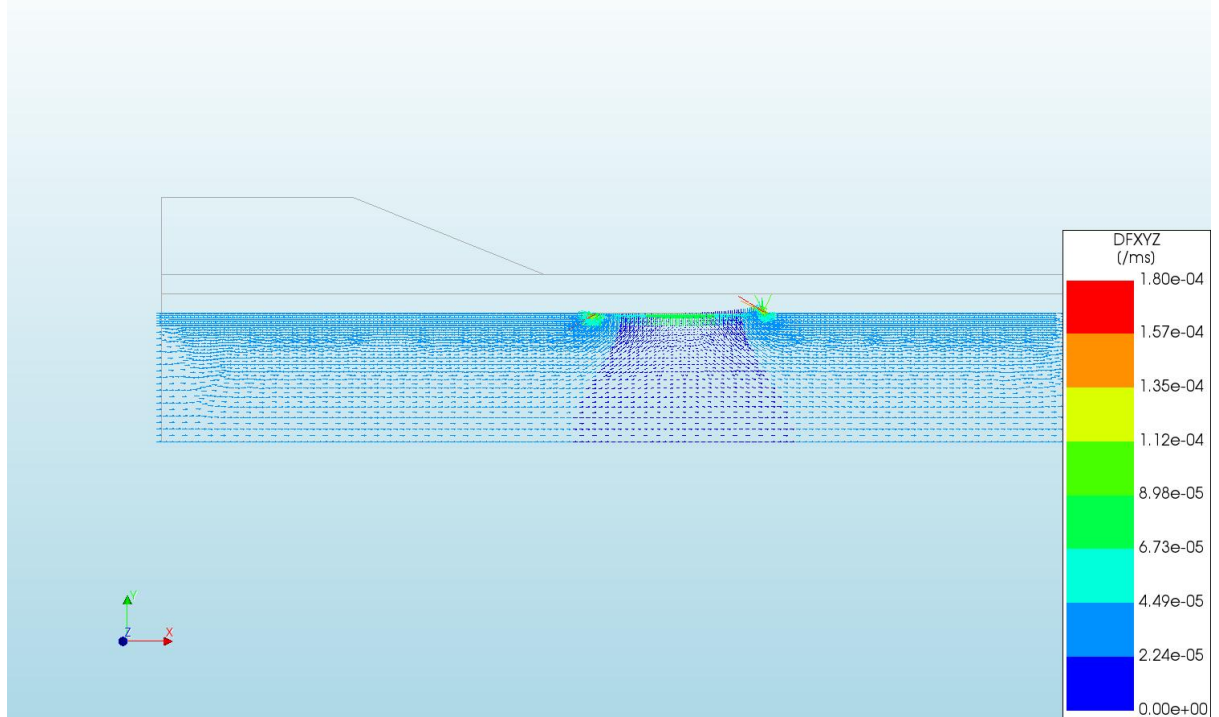
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 31.95kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.98m

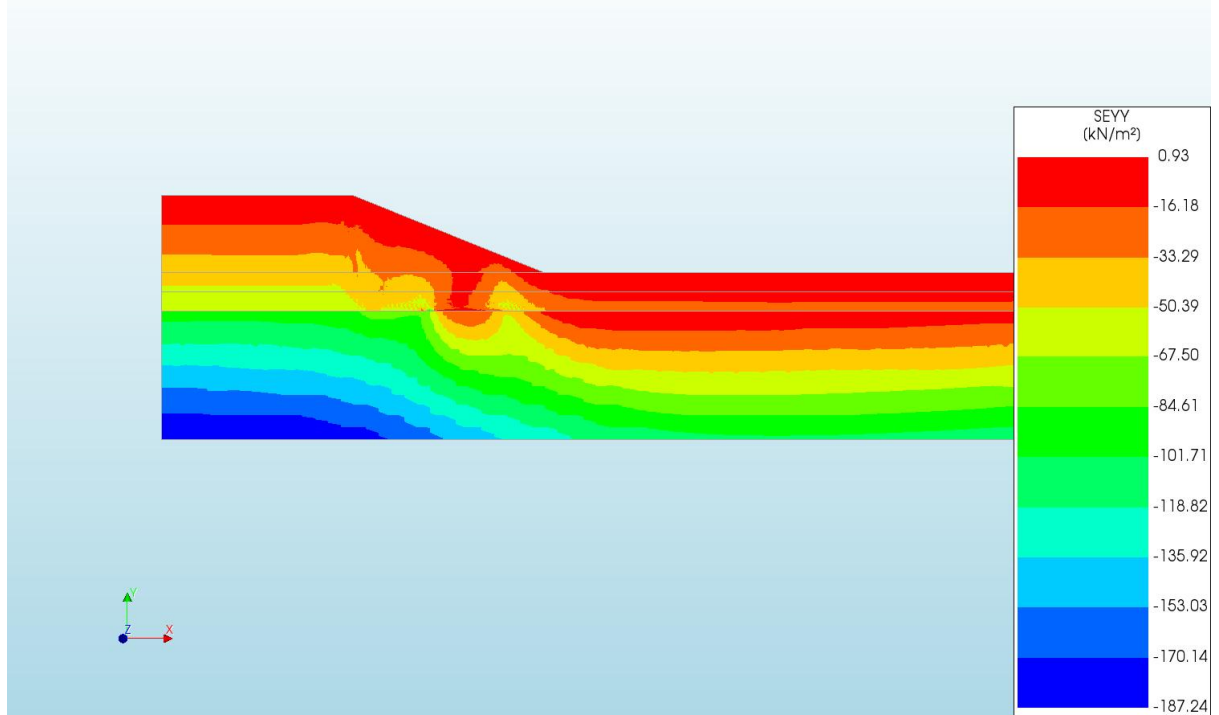


d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.80e-04/ms

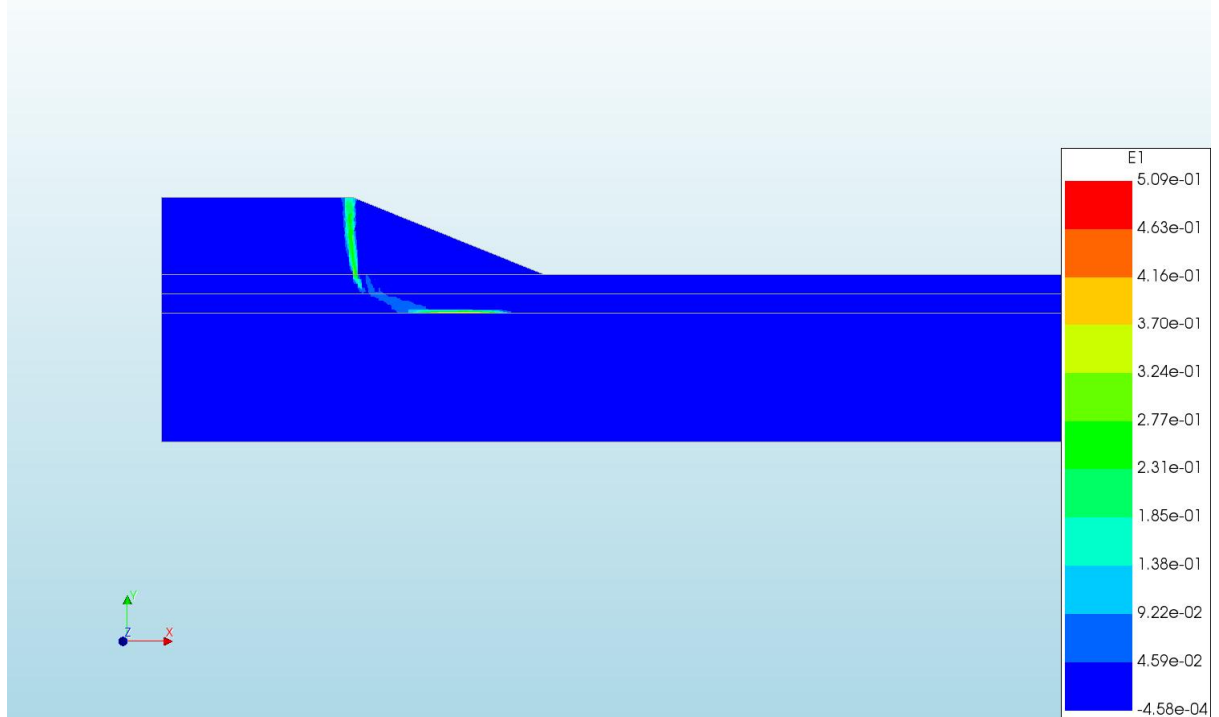




d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -187.24kN/m<sup>2</sup> max: 0.93kN/m<sup>2</sup>



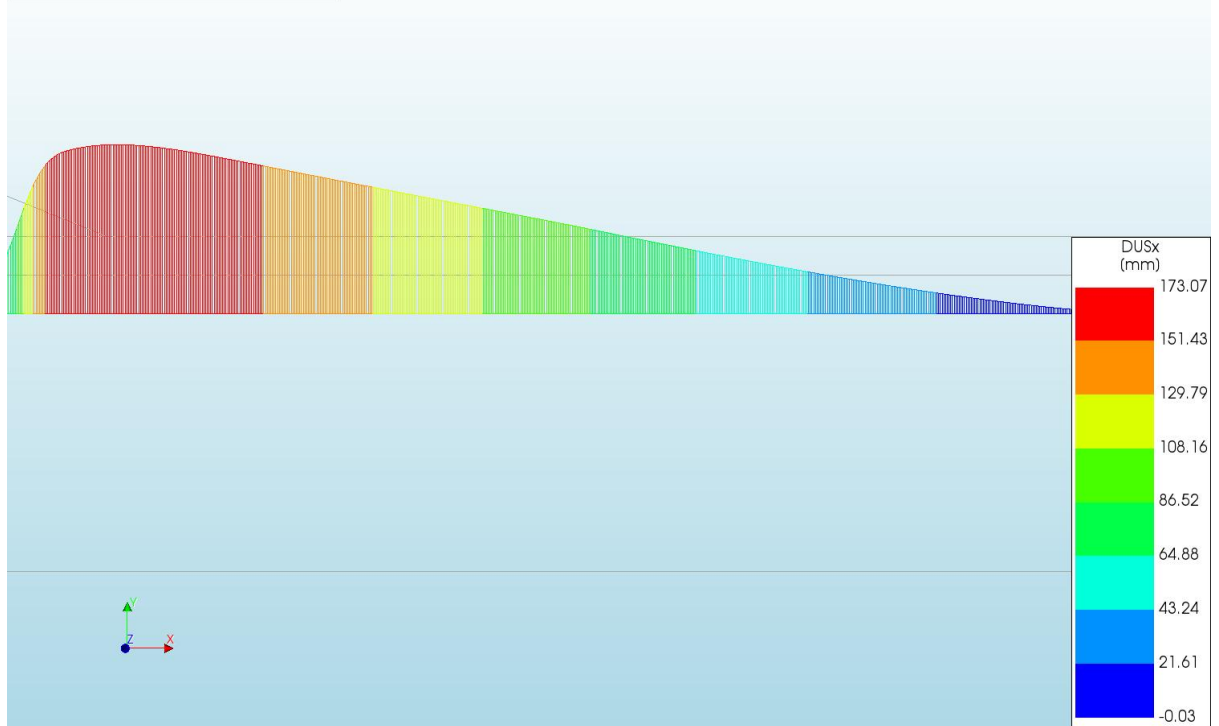
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Total Strains E1  
min: -4.58e-04 max: 5.09e-01



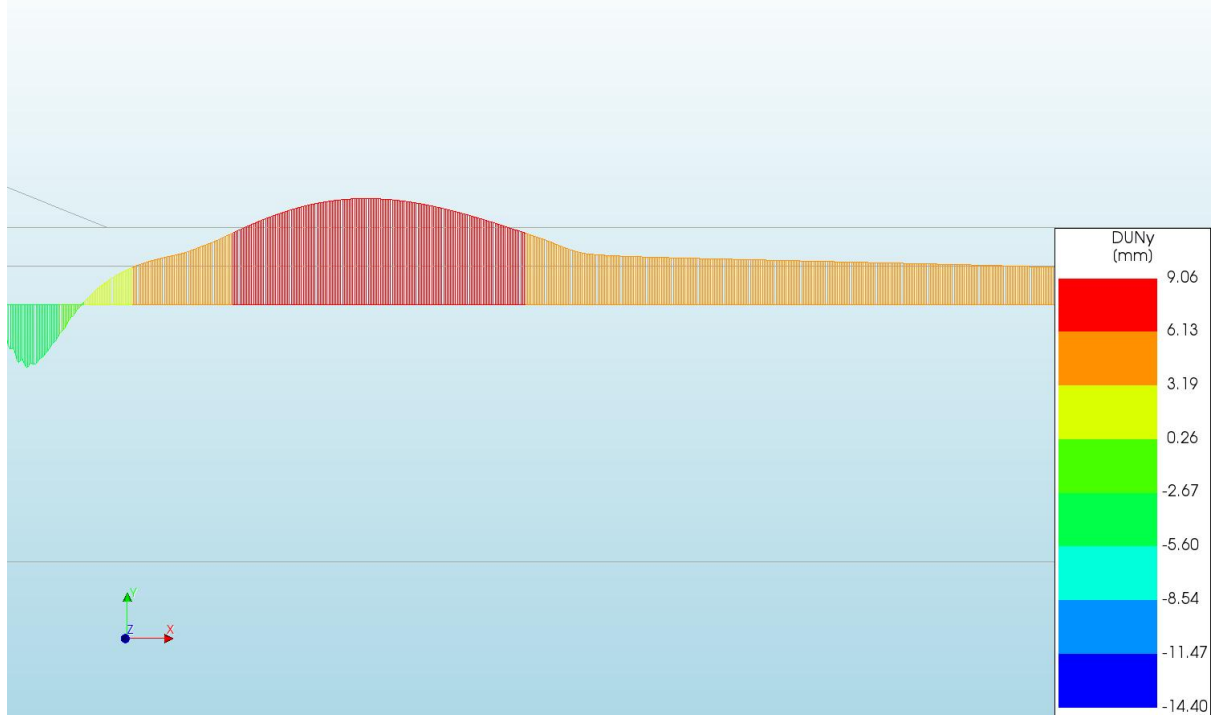
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.26e-01



d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 173.07mm



d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.40mm max: 9.06mm



d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.16kN/m<sup>2</sup> max: 30.56kN/m<sup>2</sup>



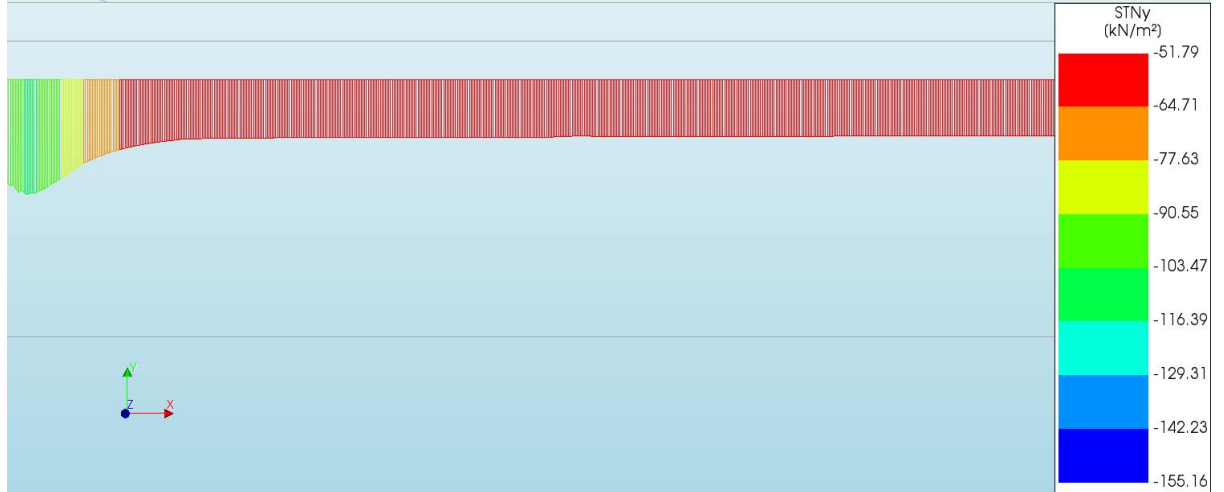
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -94.00kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>



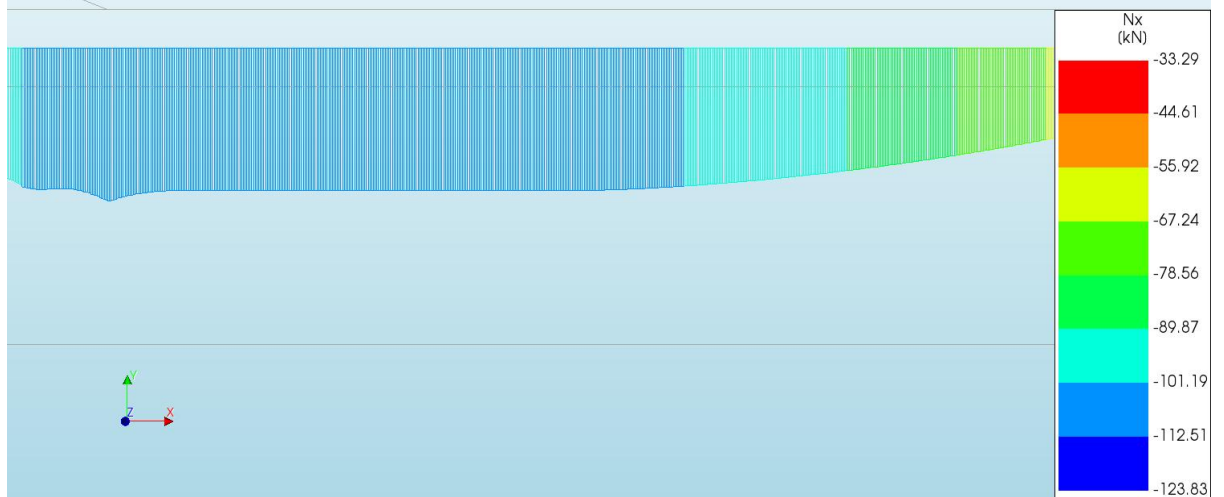
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
Interface Total Traction STSx  
min: -0.16kN/m<sup>2</sup> max: 30.56kN/m<sup>2</sup>



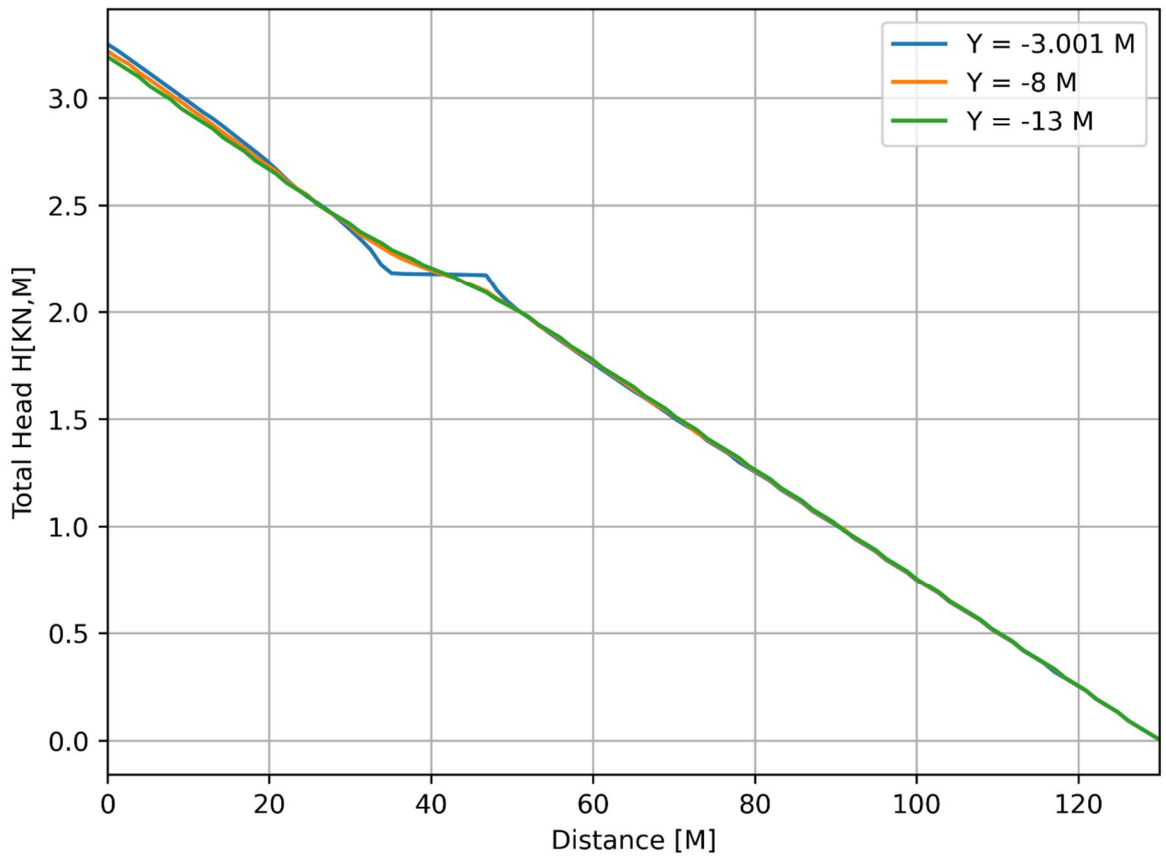
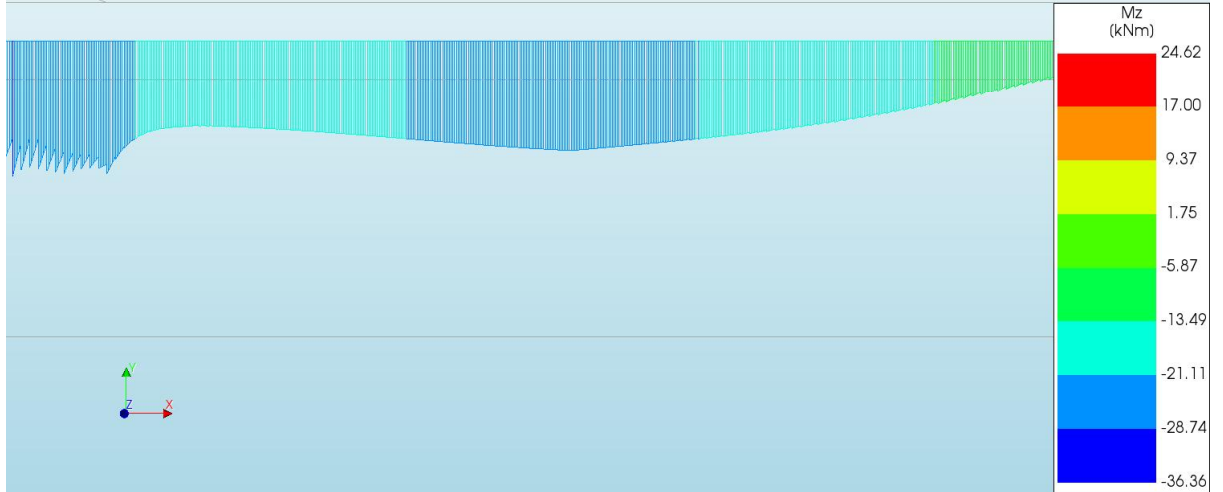
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
 Interface Total Traction STNy  
 min: -155.16kN/m<sup>2</sup> max: -51.79kN/m<sup>2</sup>

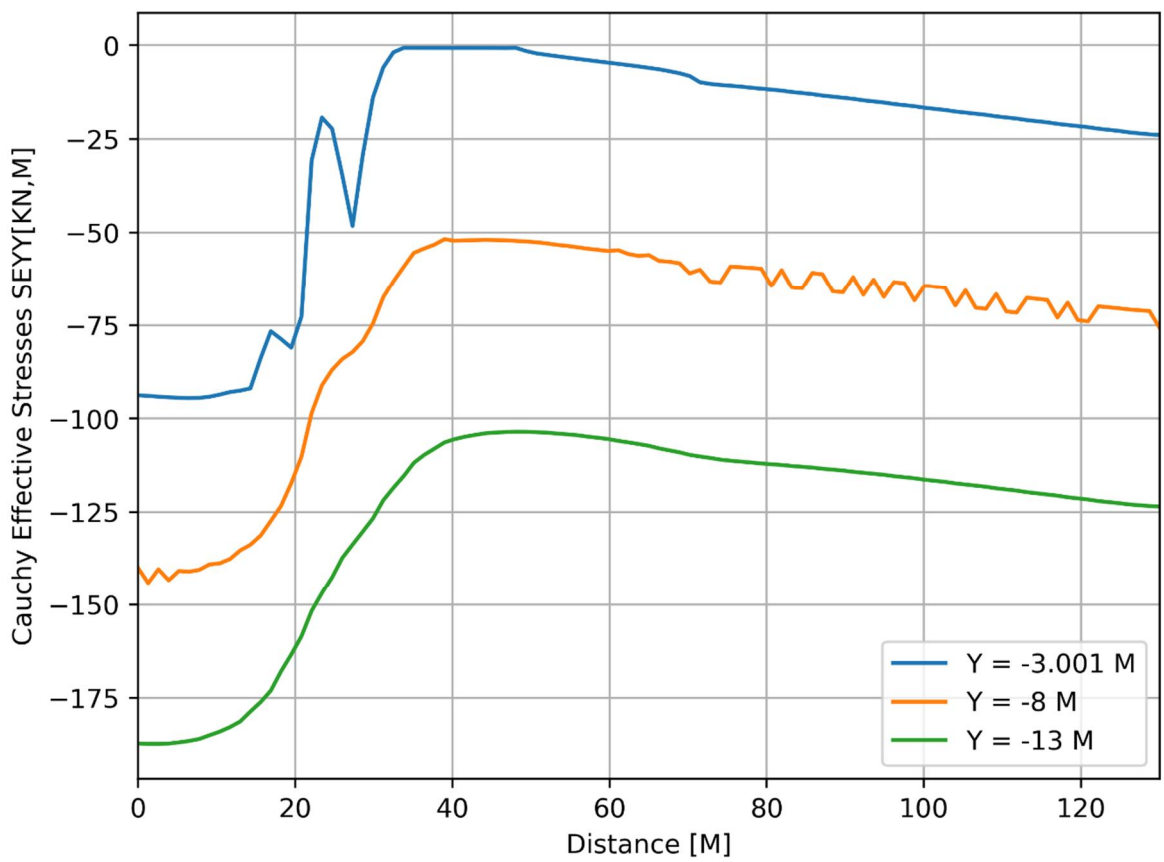
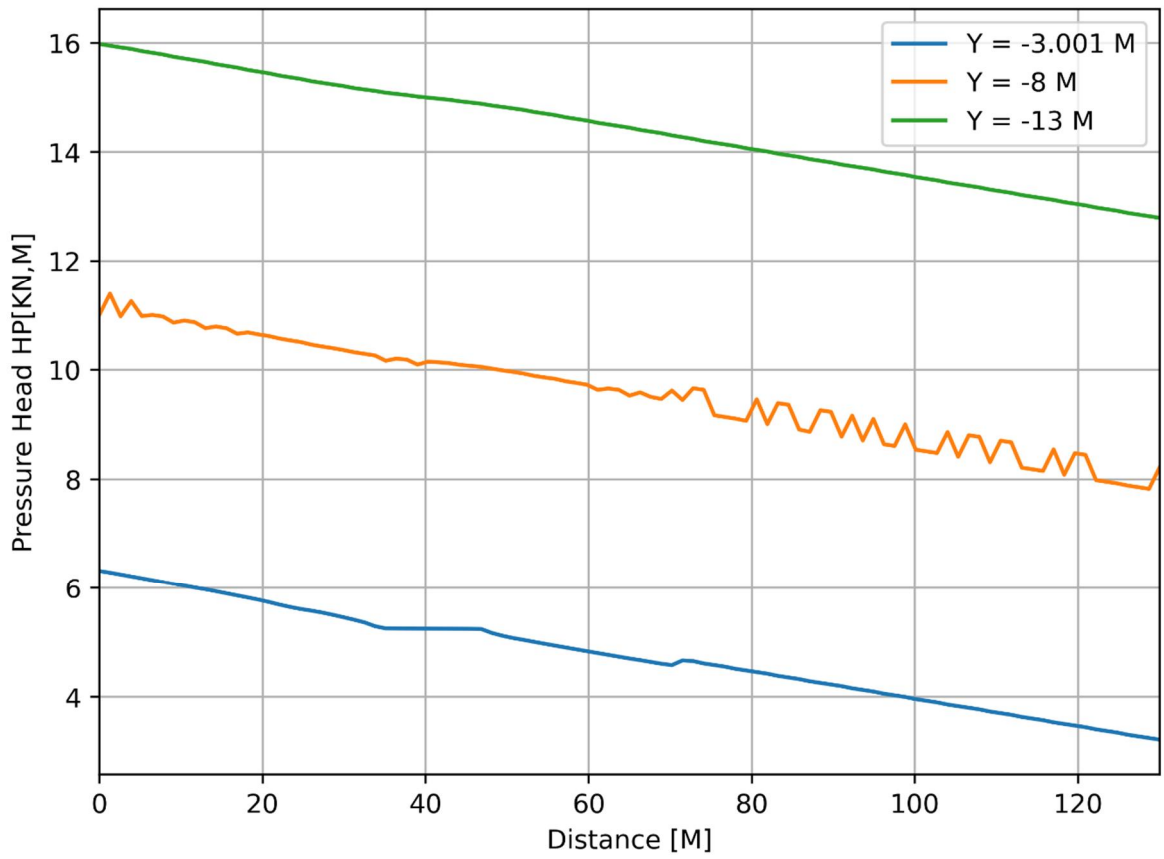


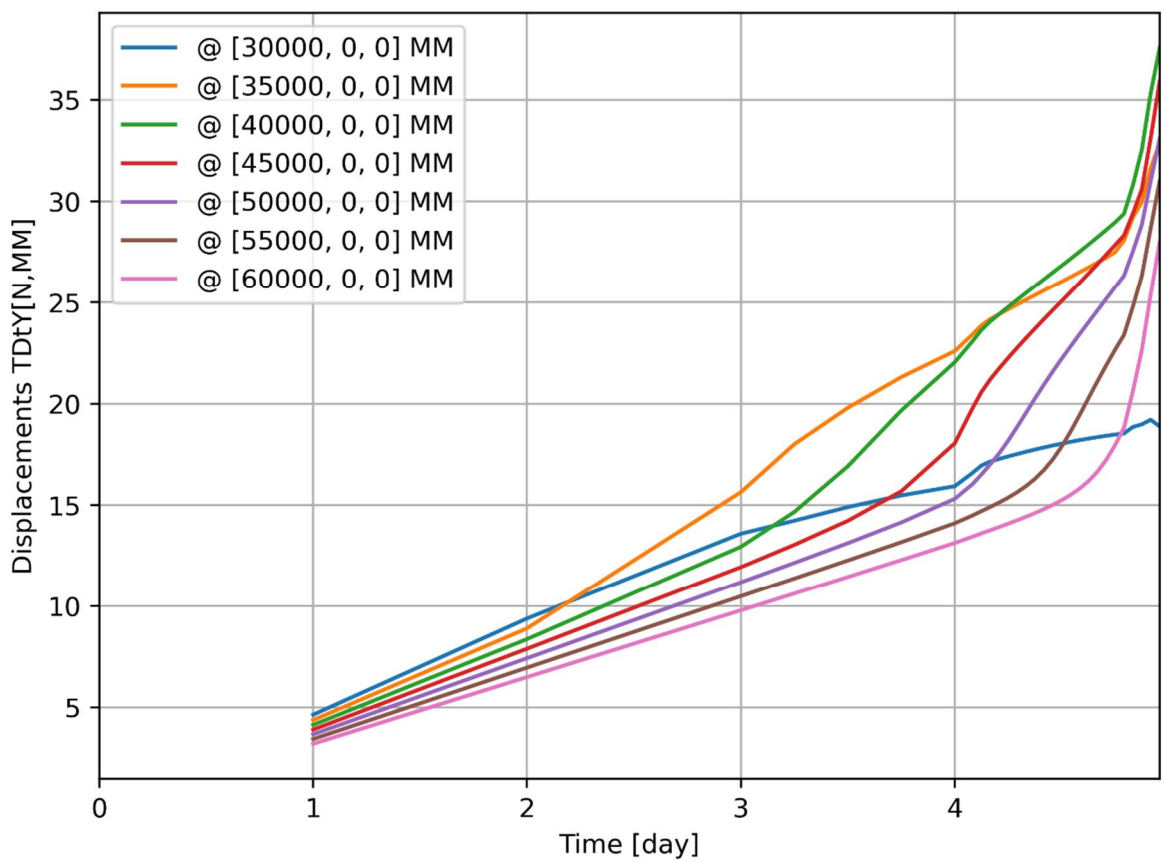
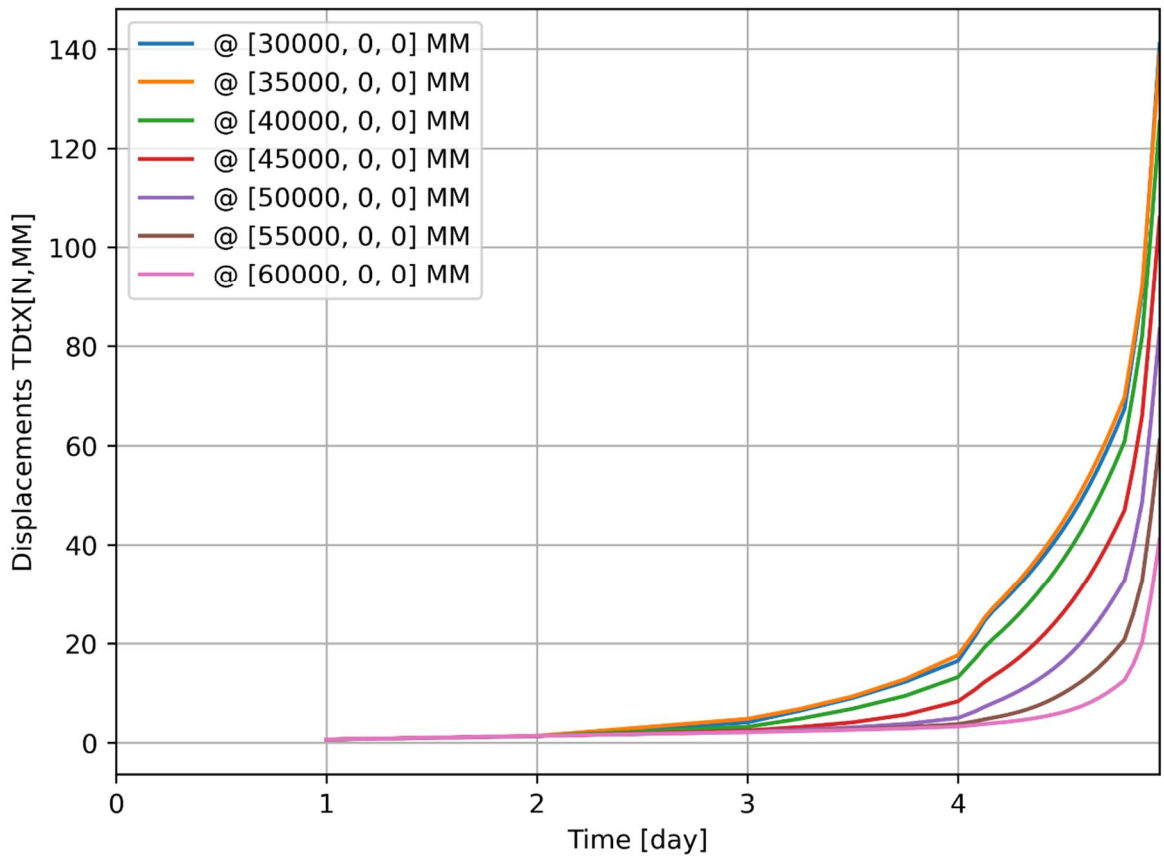
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
 Cross-section Forces Nx  
 min: -123.83kN max: -33.29kN



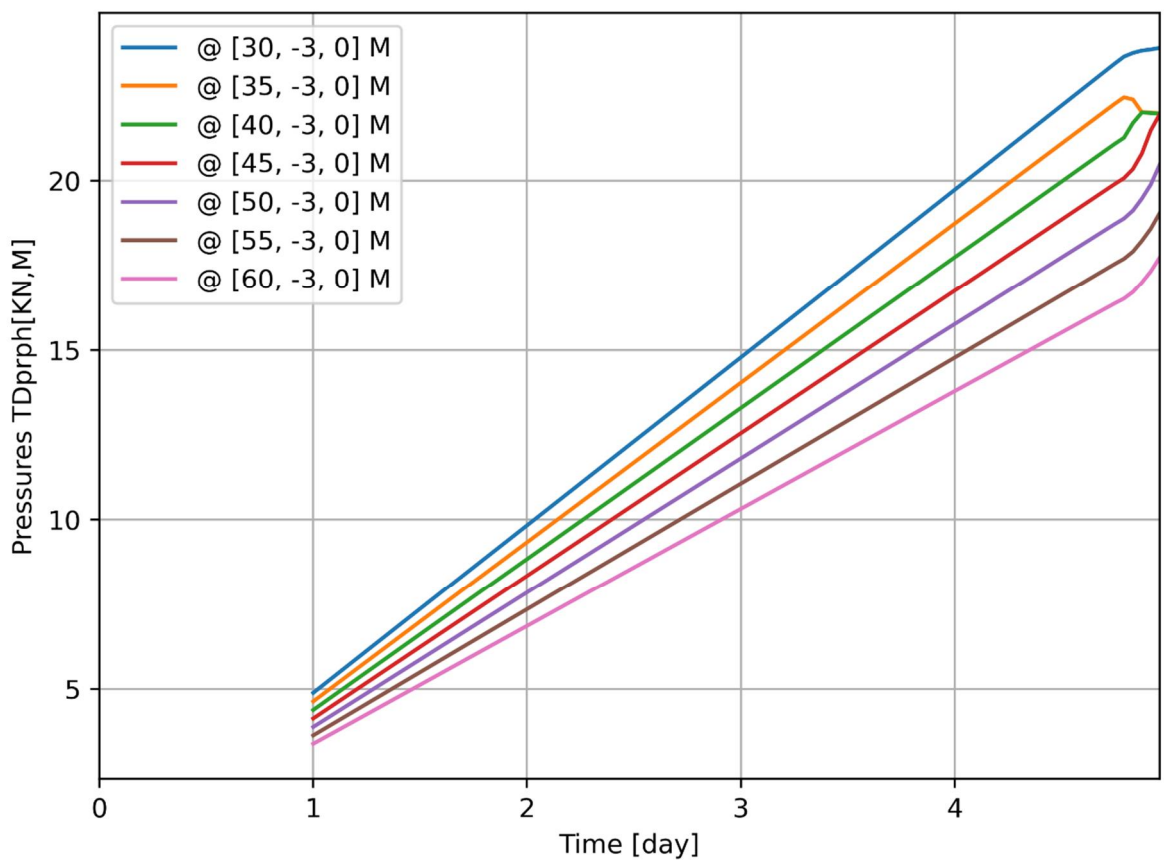
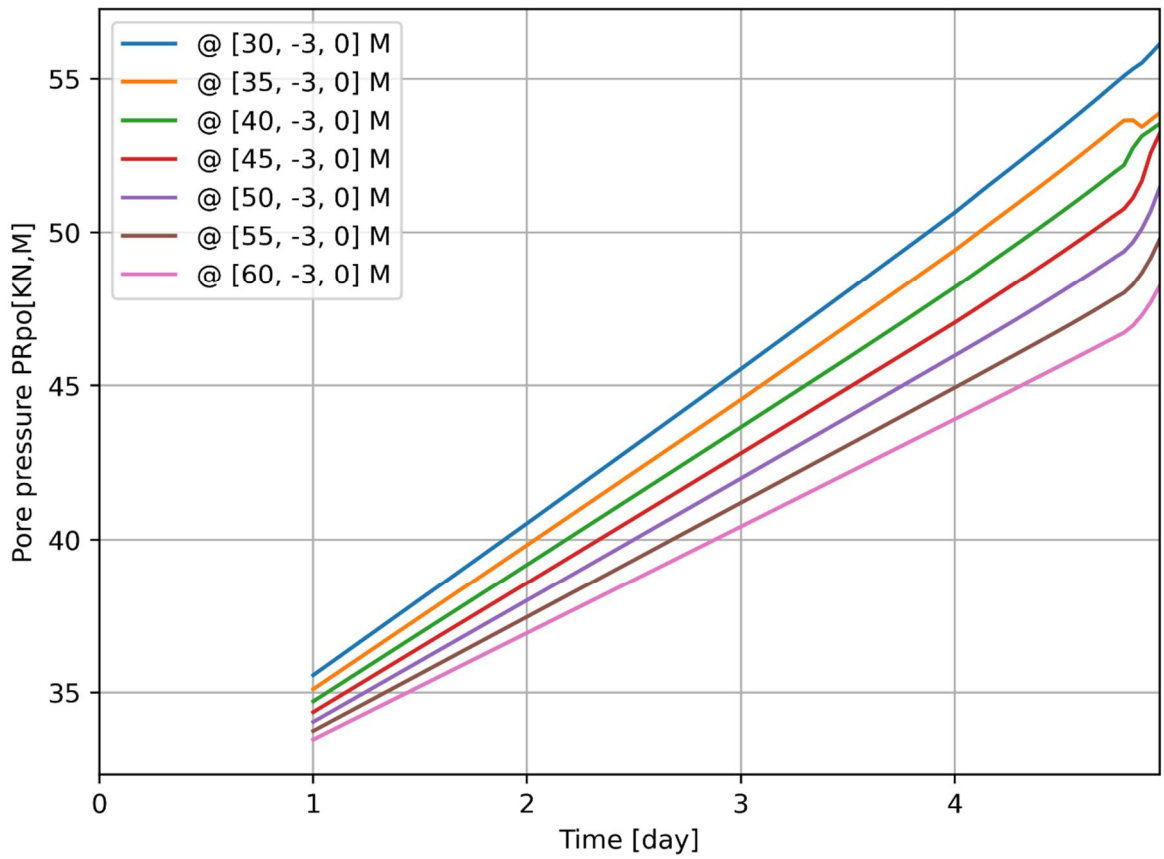
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 35, Time 4 day 23 hour  
 Cross-section Moments Mz  
 min: -36.36kNm max: 24.62kNm

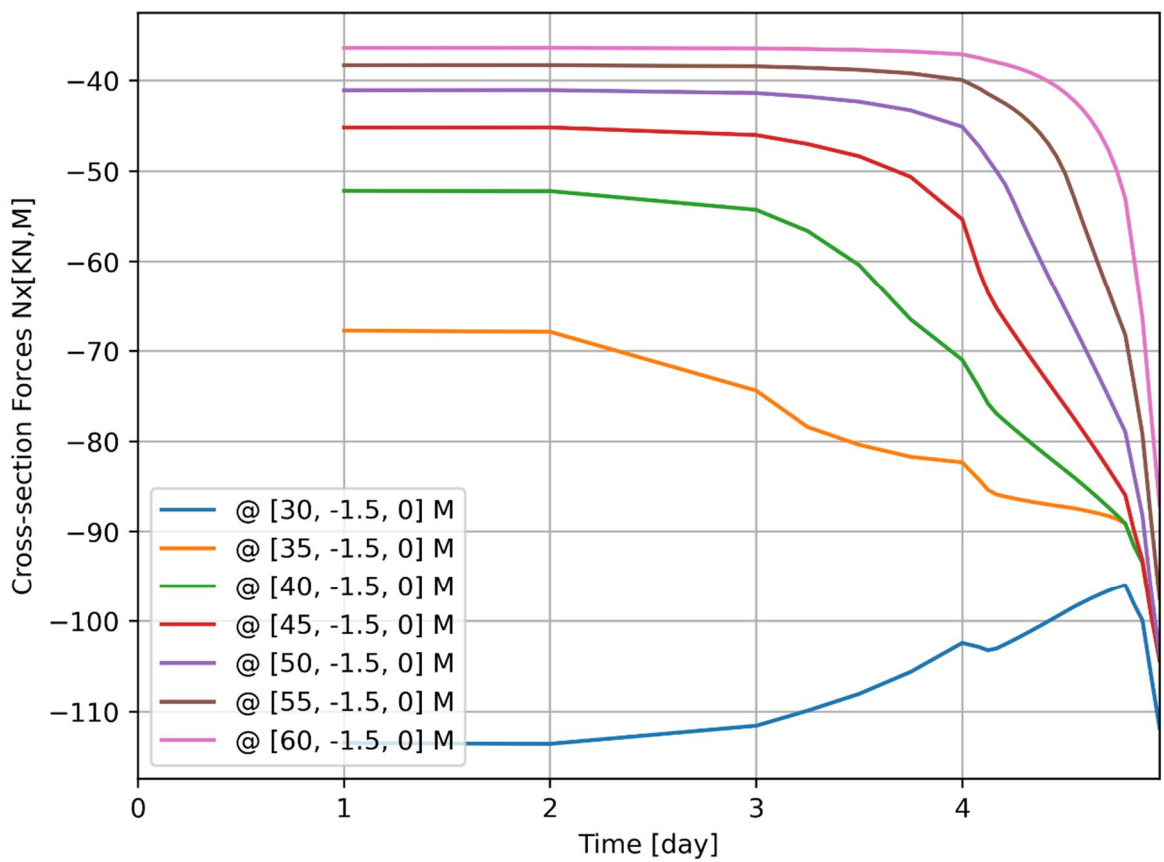
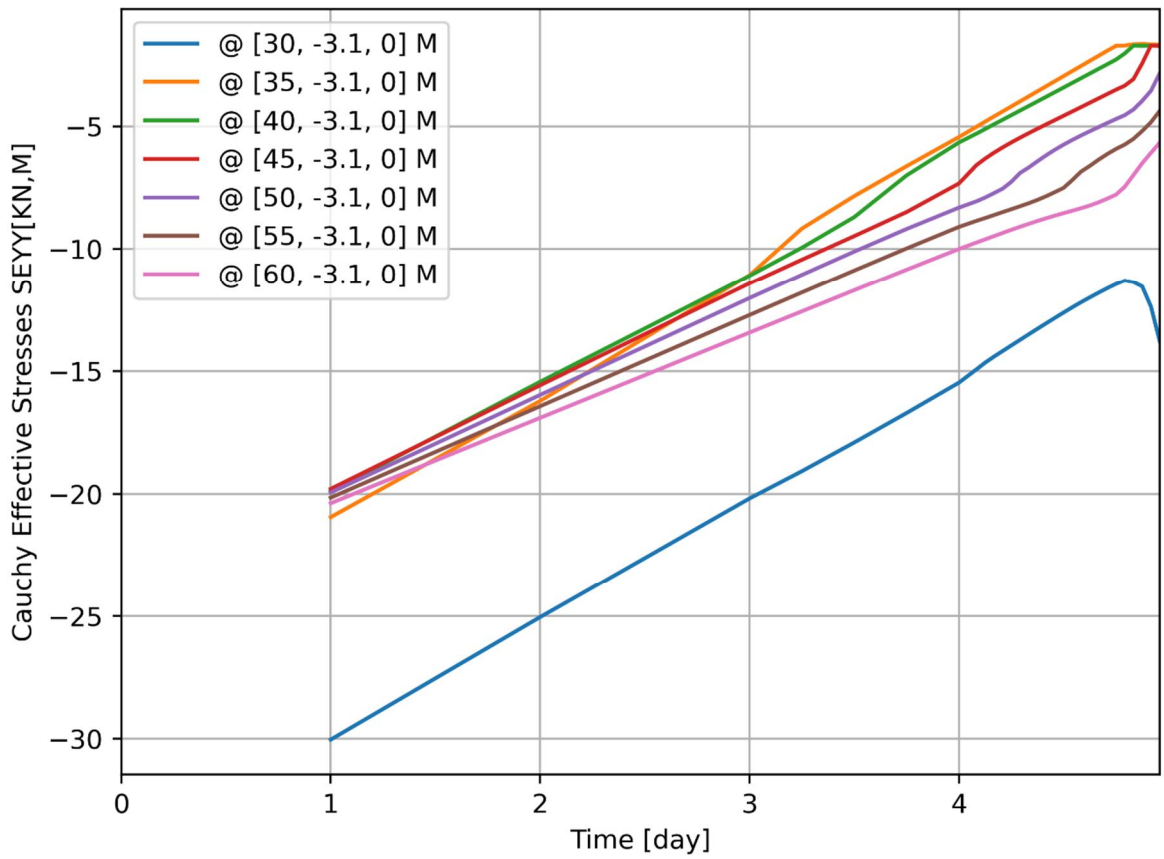


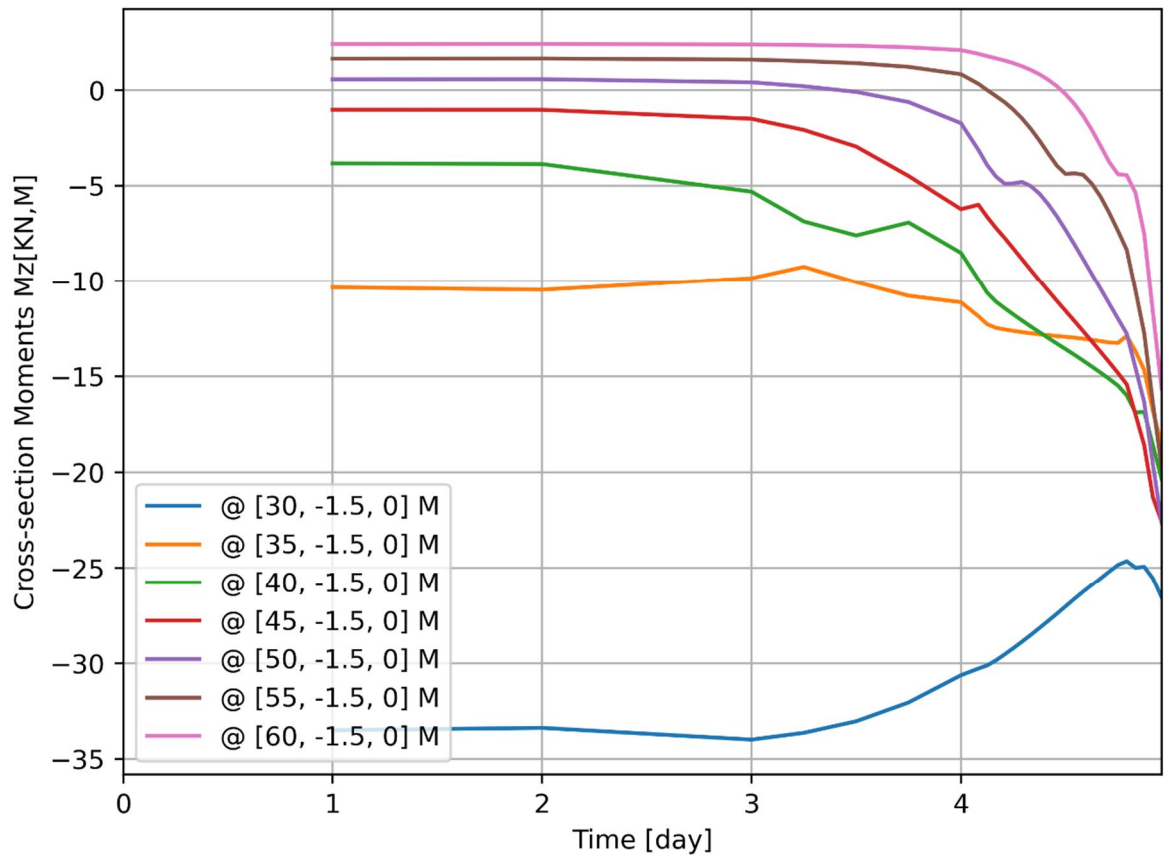








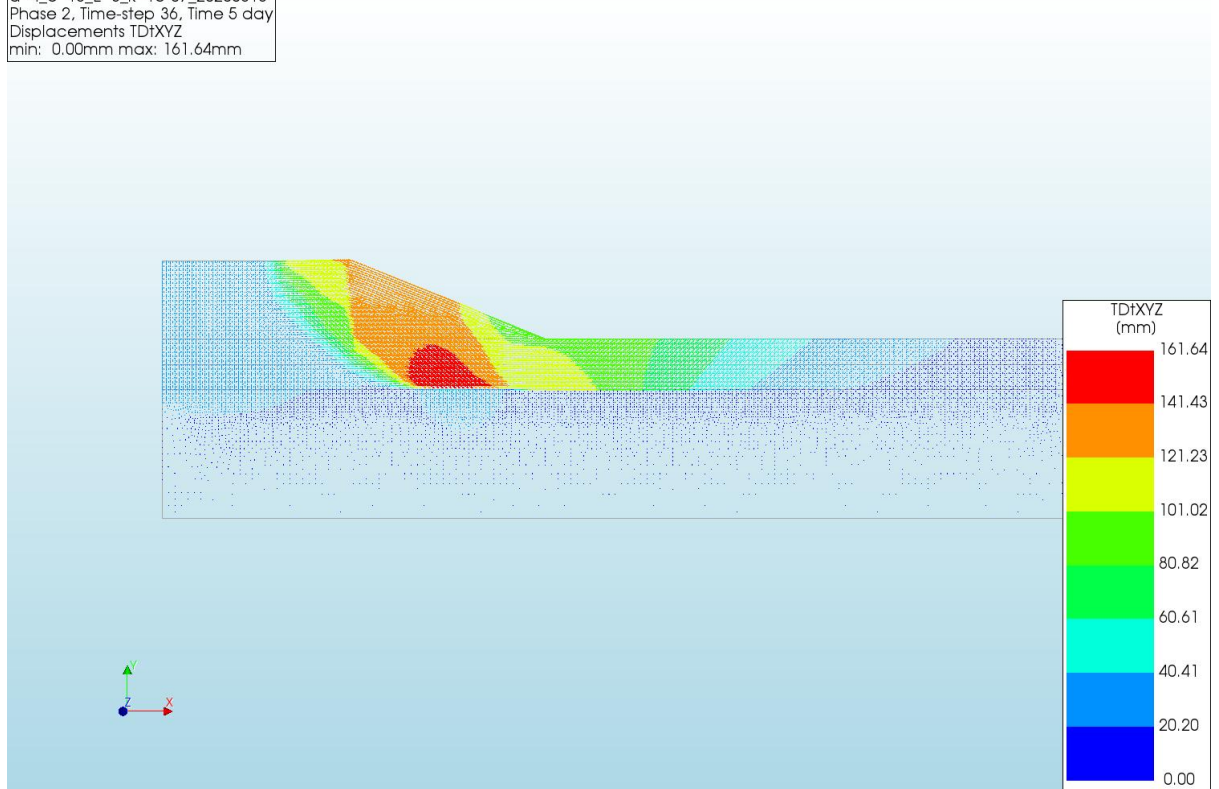




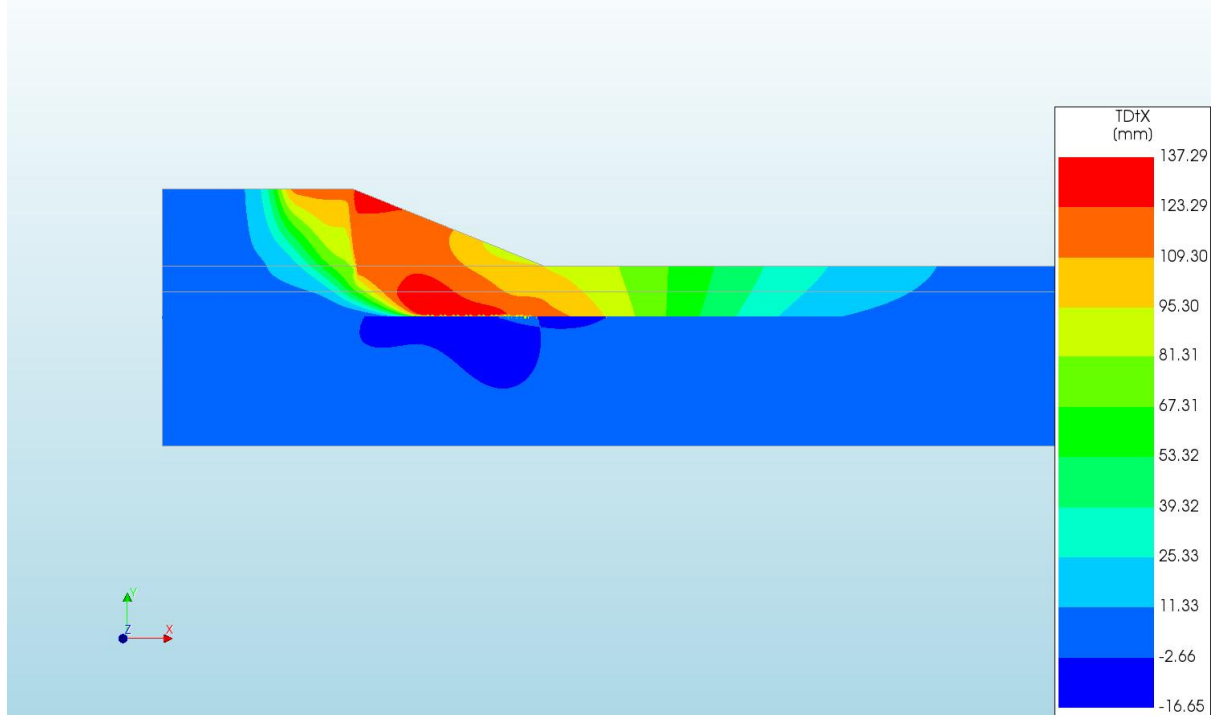
A.2.16

'Output\_d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818'

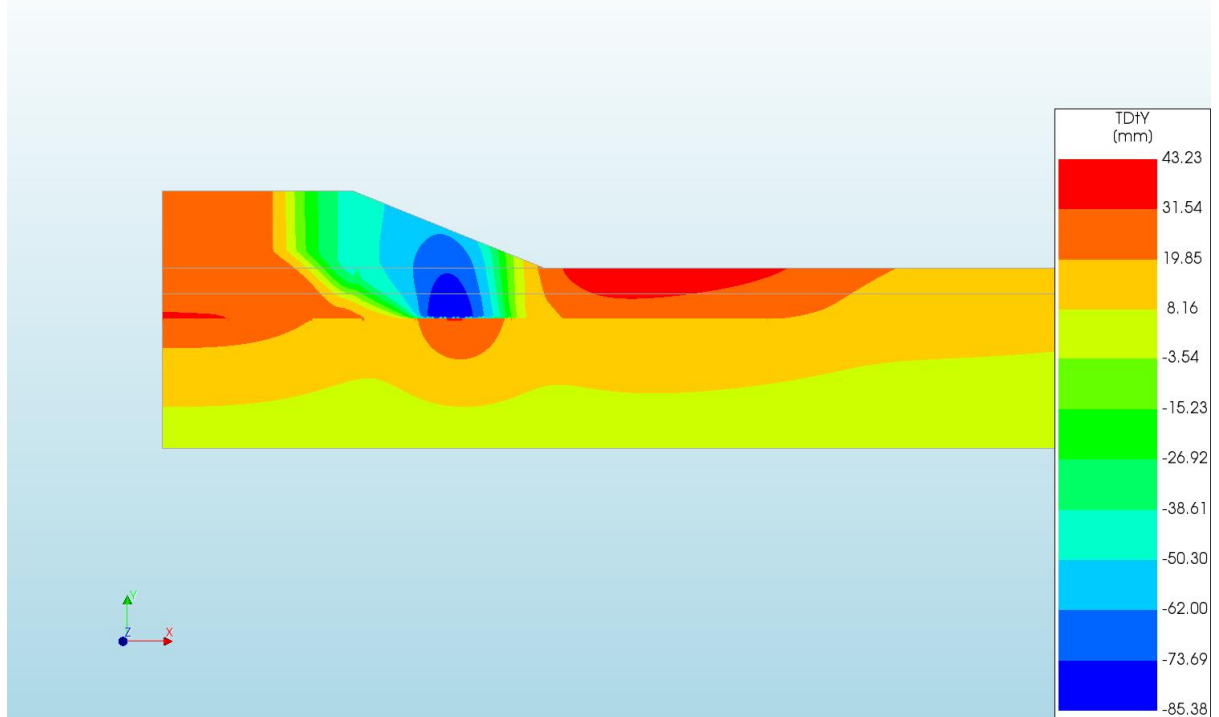
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 161.64mm



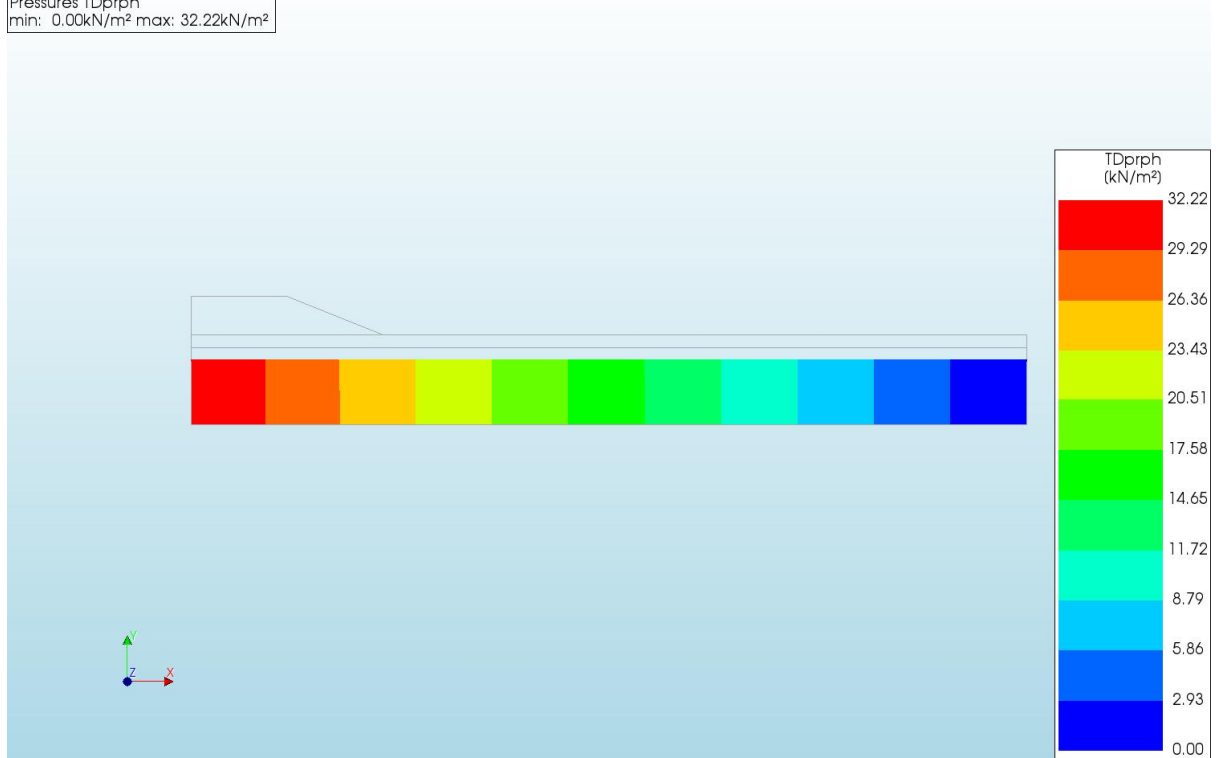
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Displacements TDtX  
min: -16.65mm max: 137.29mm



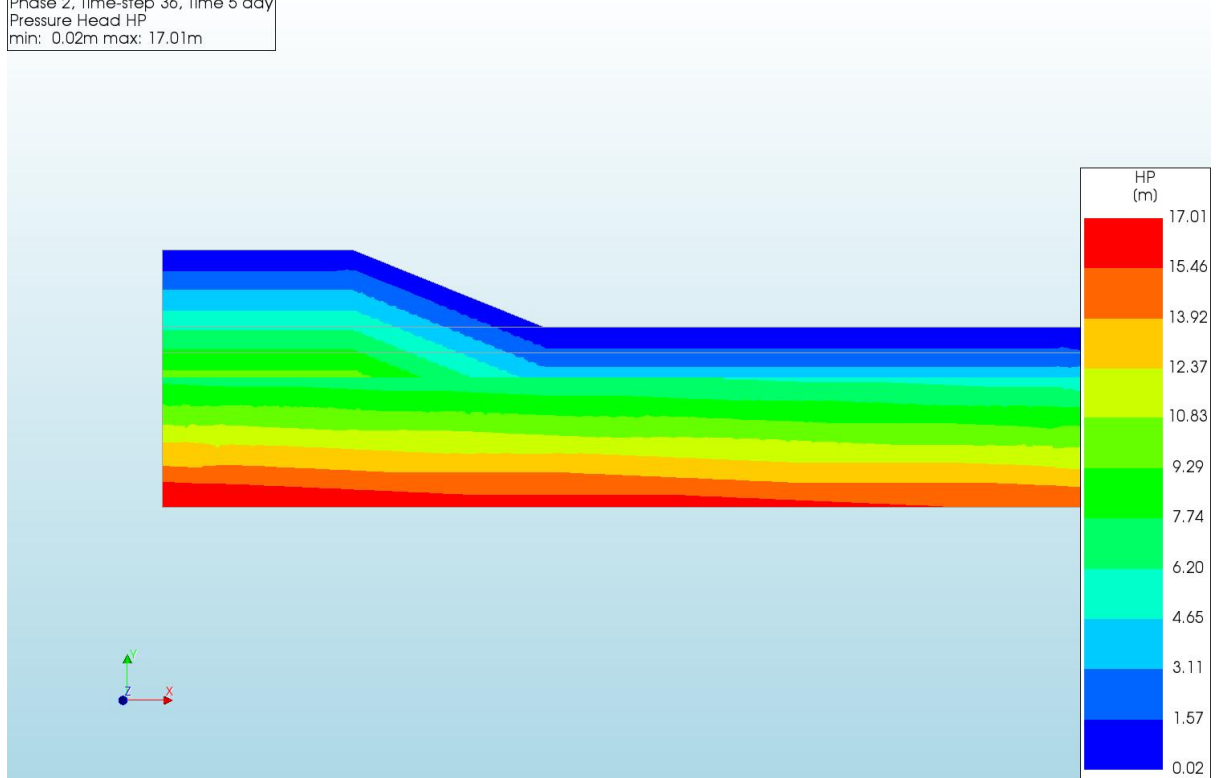
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Displacements TDtY  
min: -85.38mm max: 43.23mm



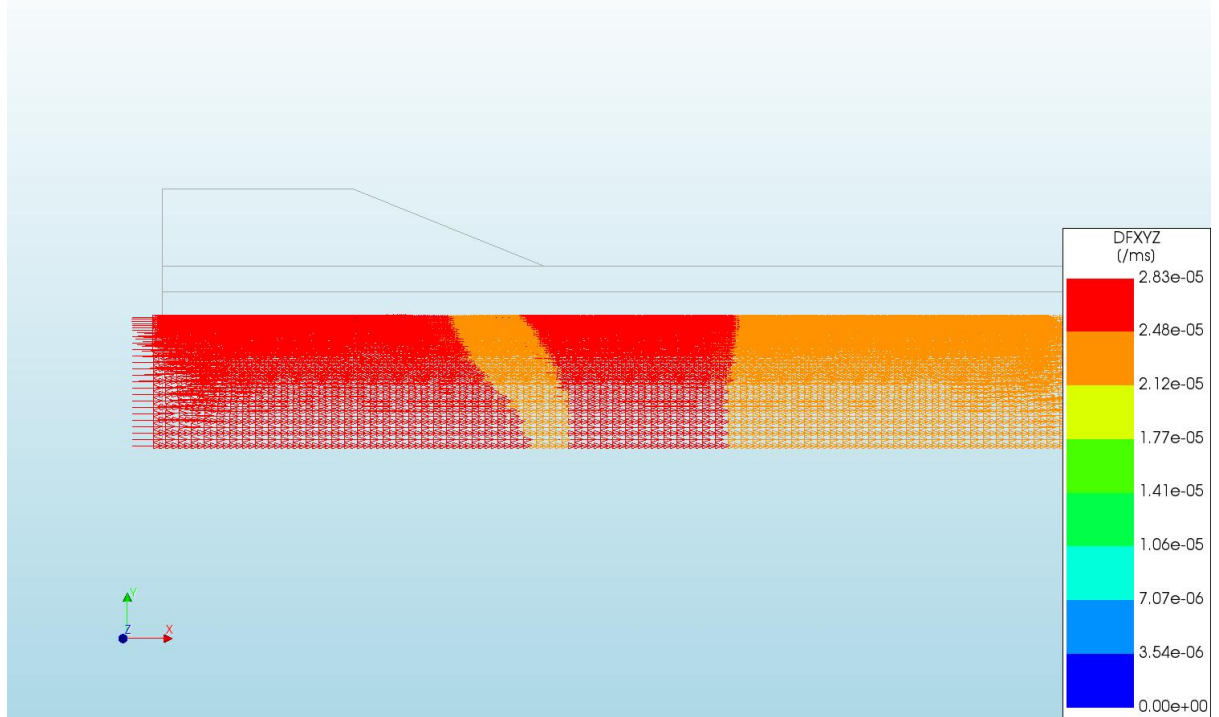
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 32.22kN/m<sup>2</sup>



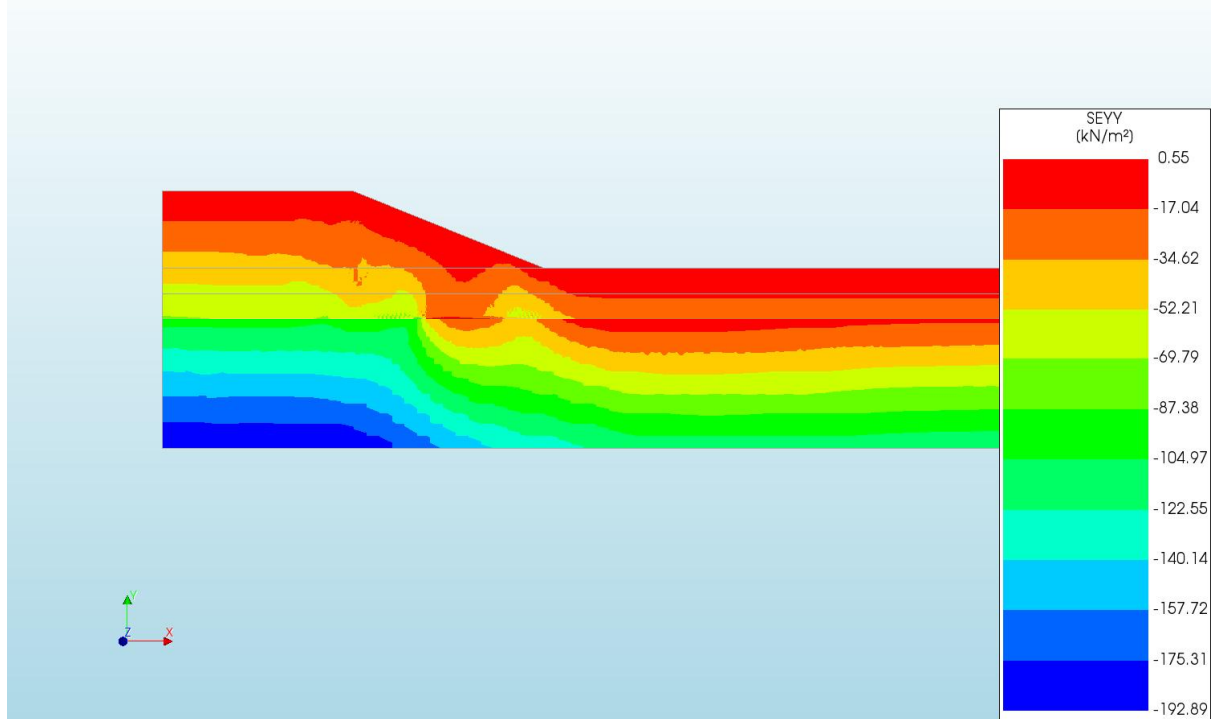
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 17.01m



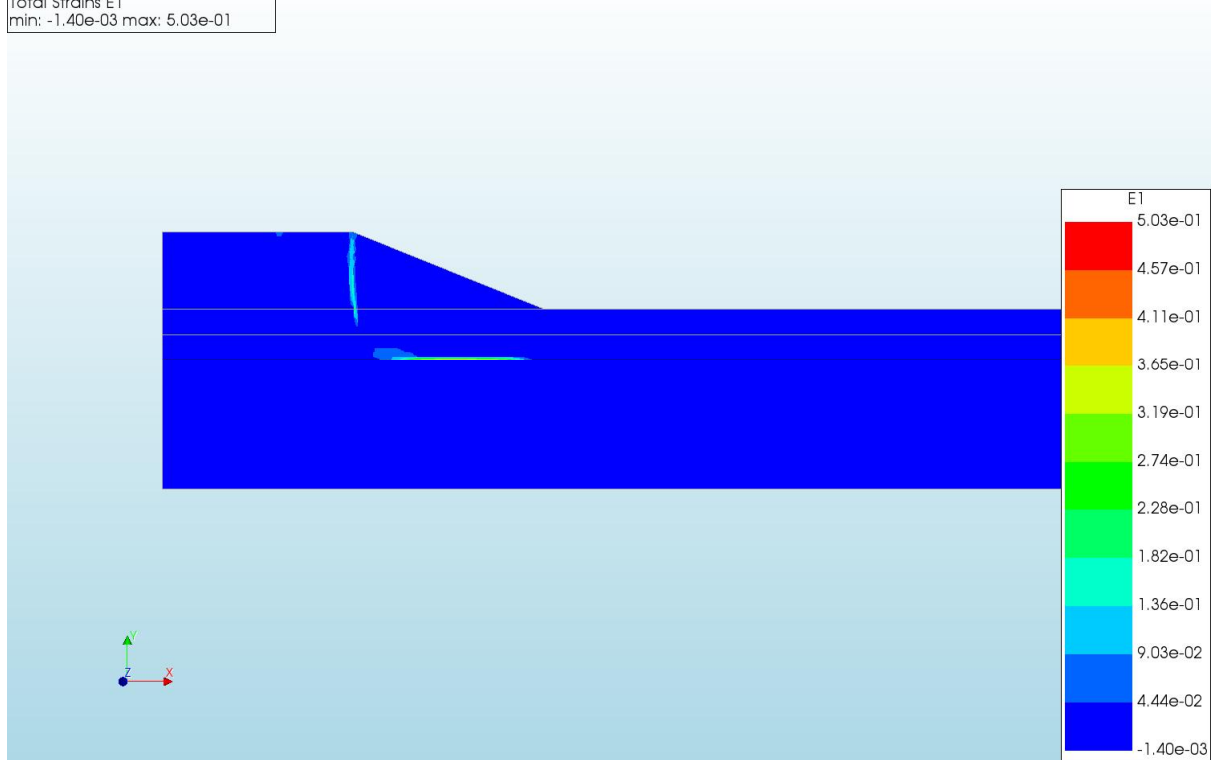
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.83e-05/ms



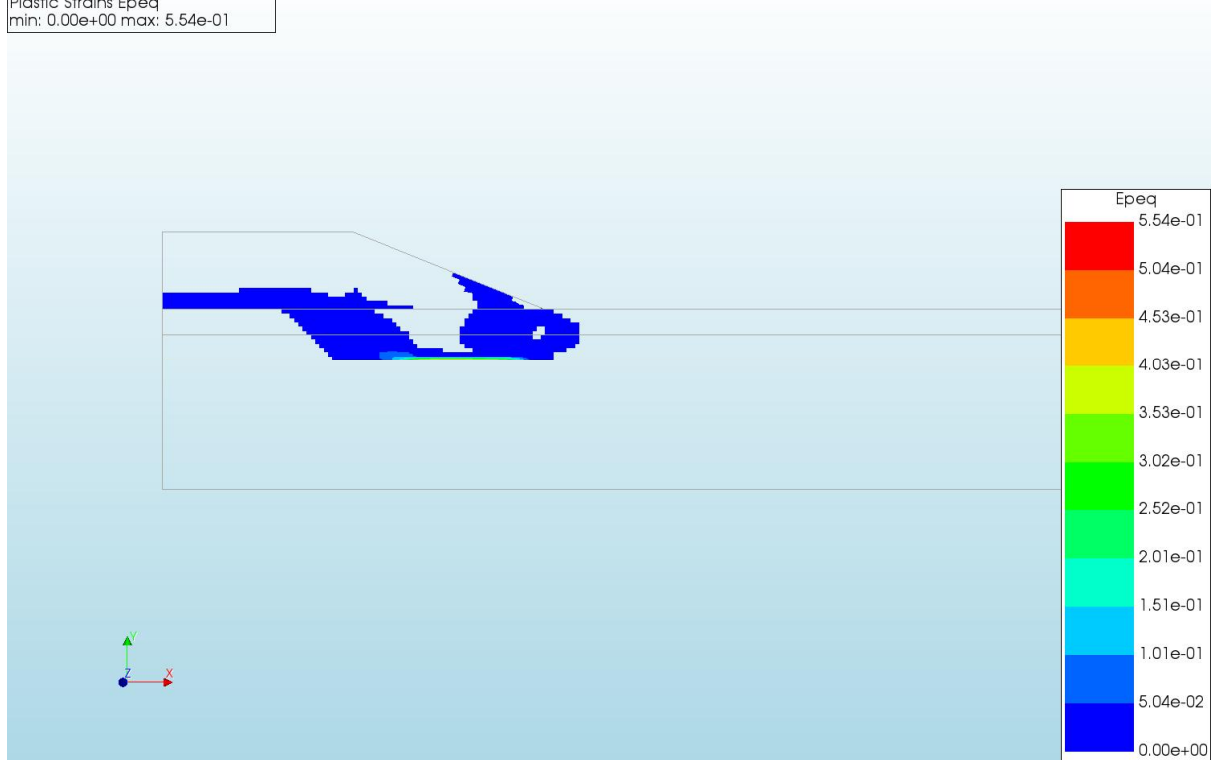
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.89kN/m<sup>2</sup> max: 0.55kN/m<sup>2</sup>



d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Total Strains E1  
min: -1.40e-03 max: 5.03e-01

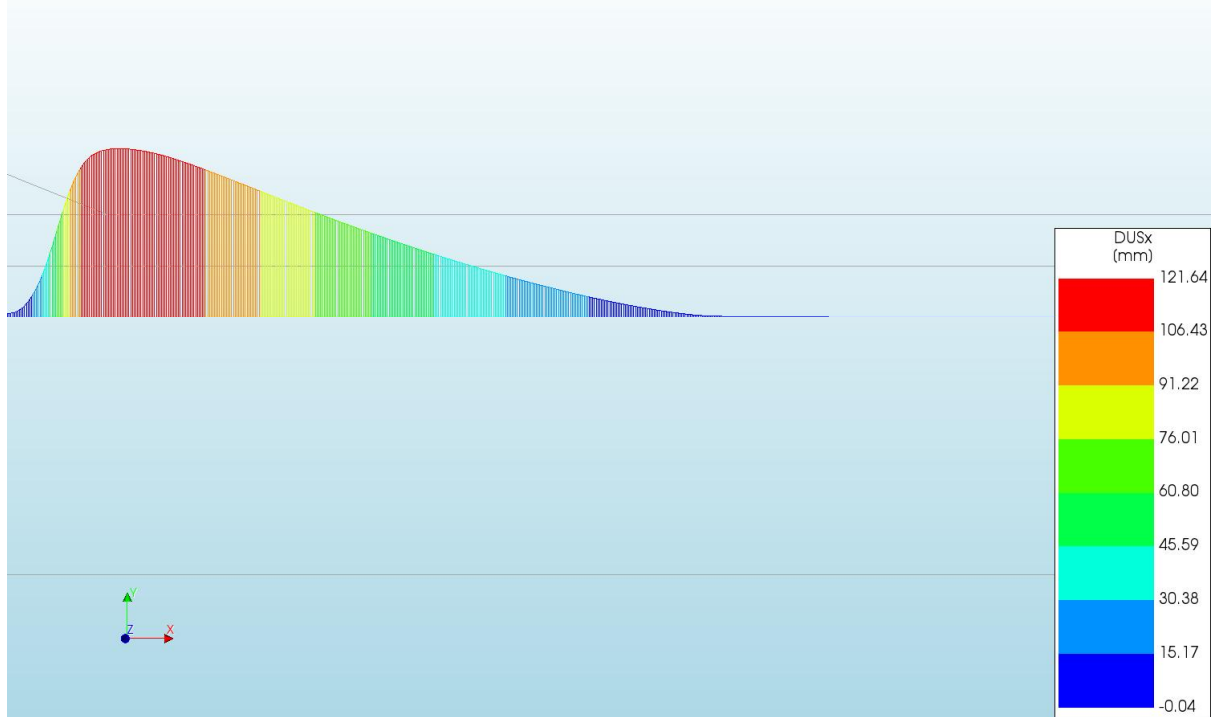


d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.54e-01

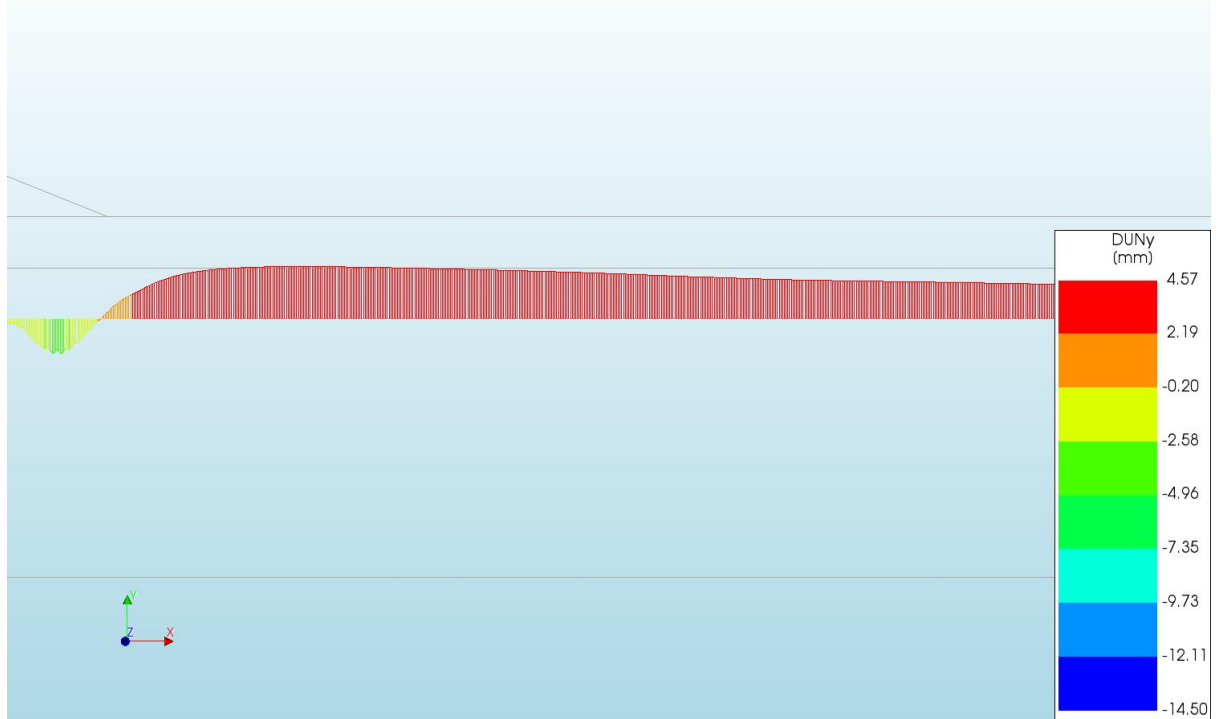




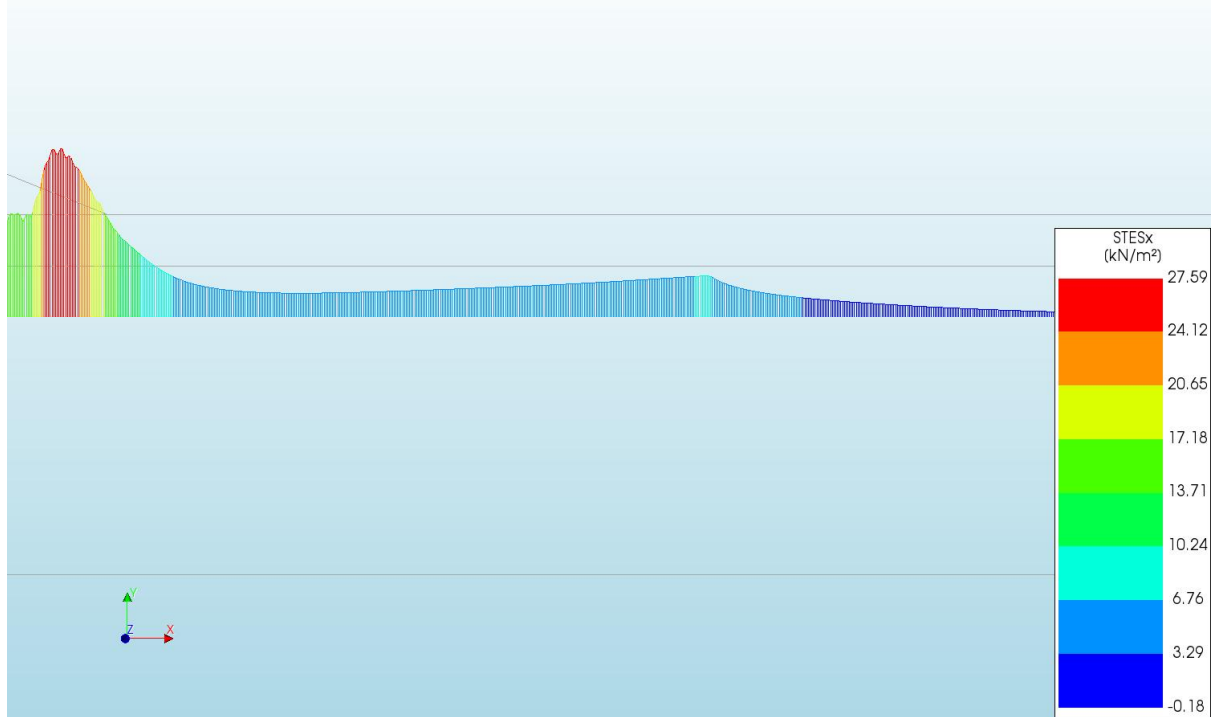
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.04mm max: 121.64mm



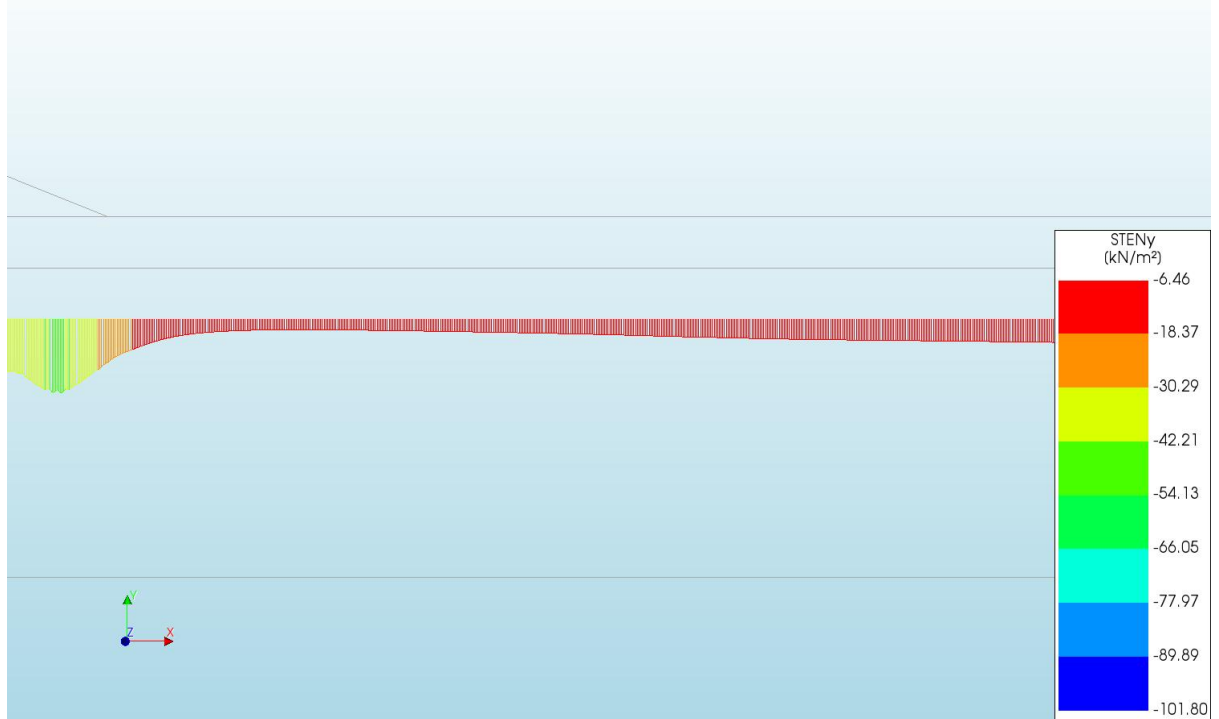
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.50mm max: 4.57mm

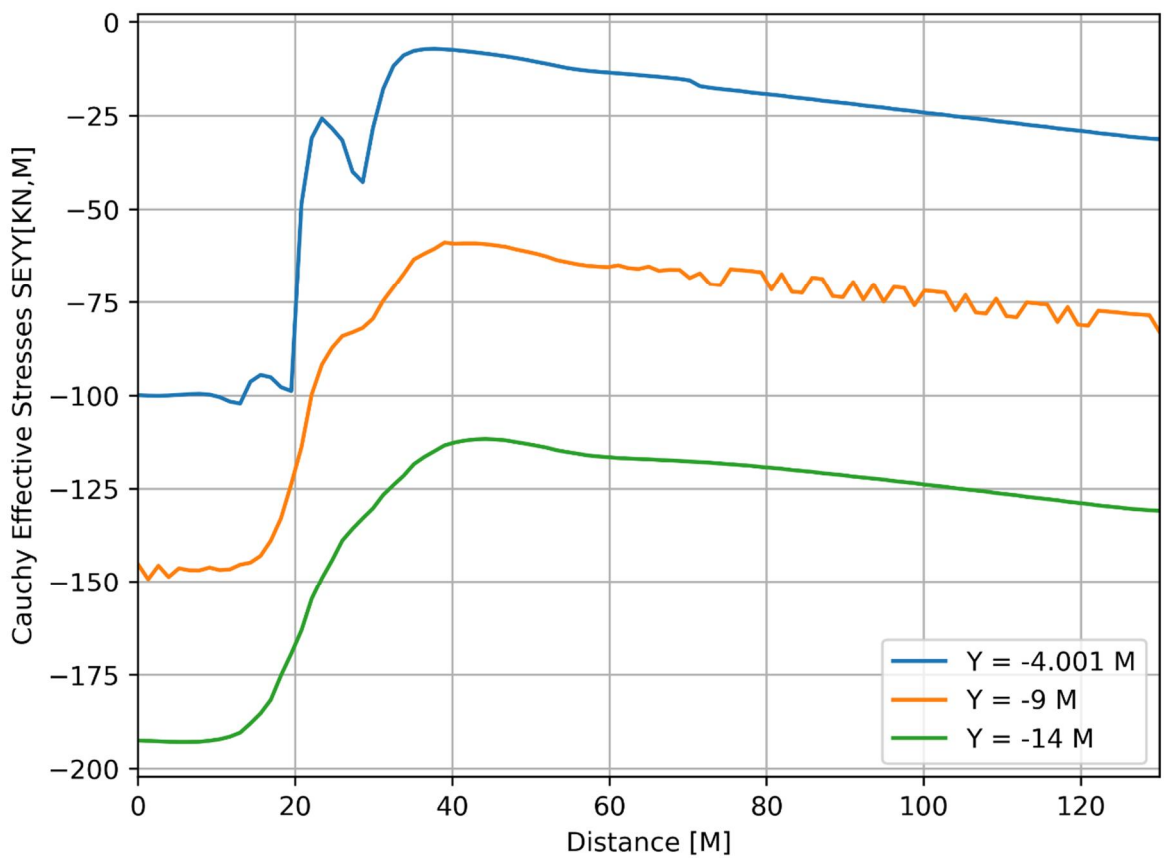
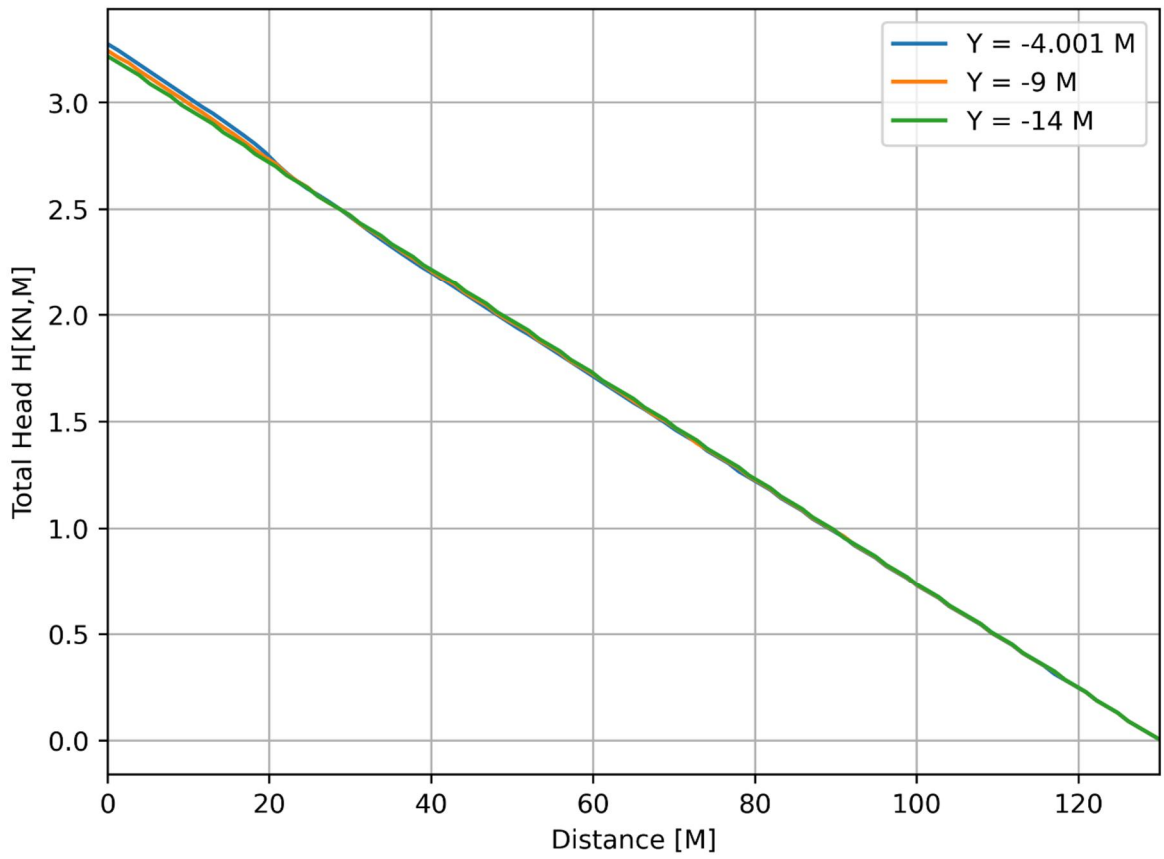


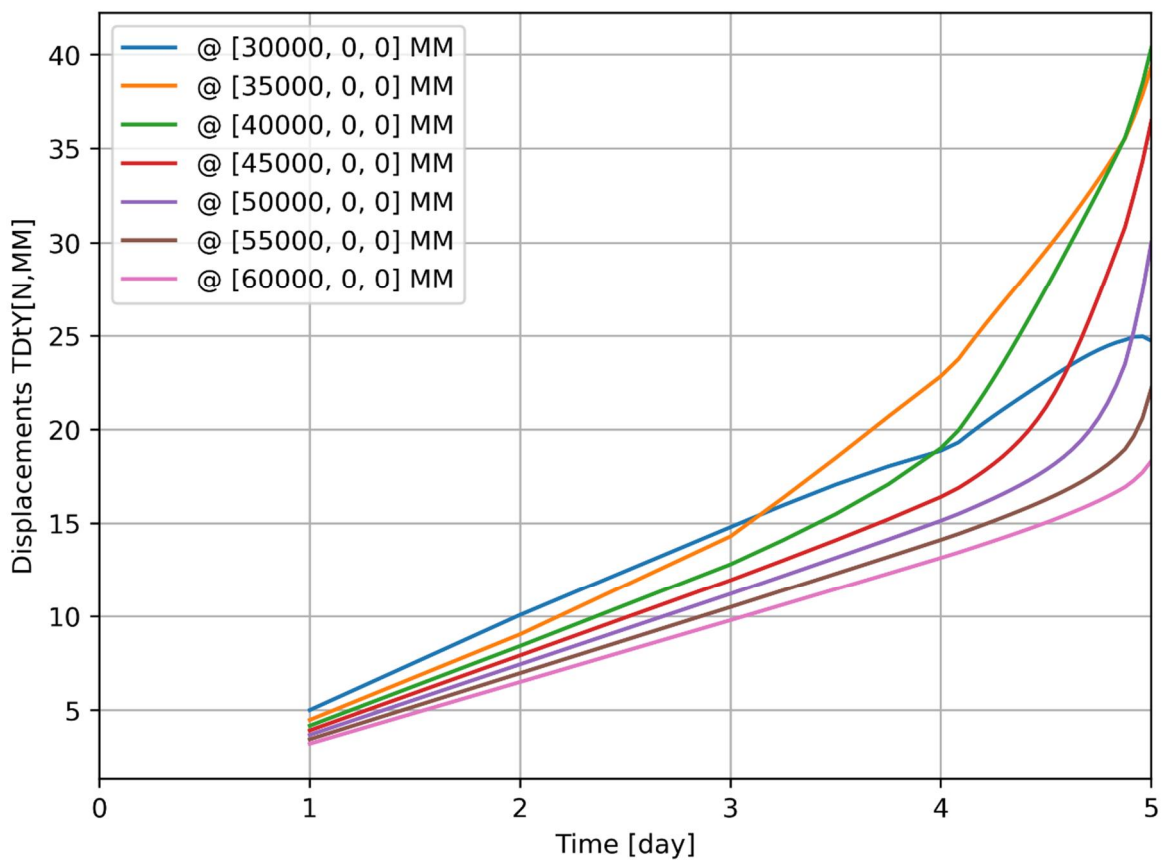
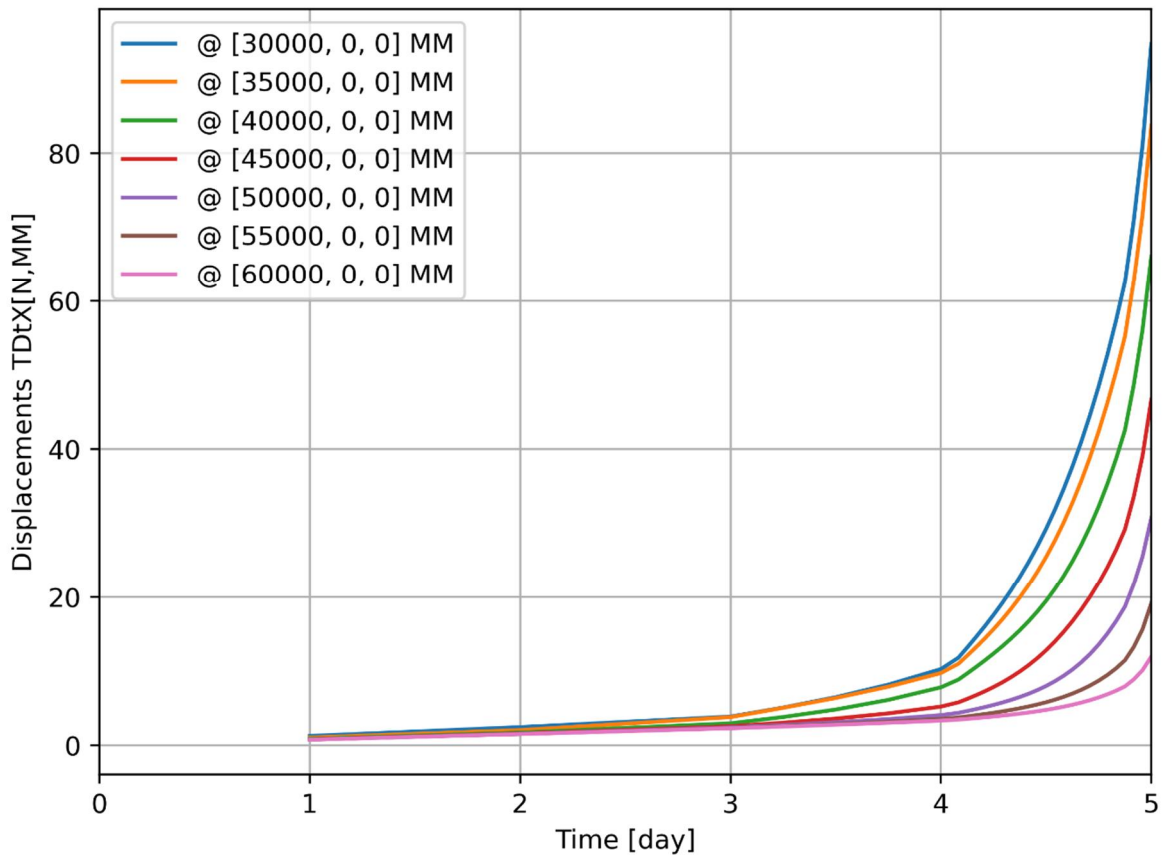
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.18kN/m<sup>2</sup> max: 27.59kN/m<sup>2</sup>

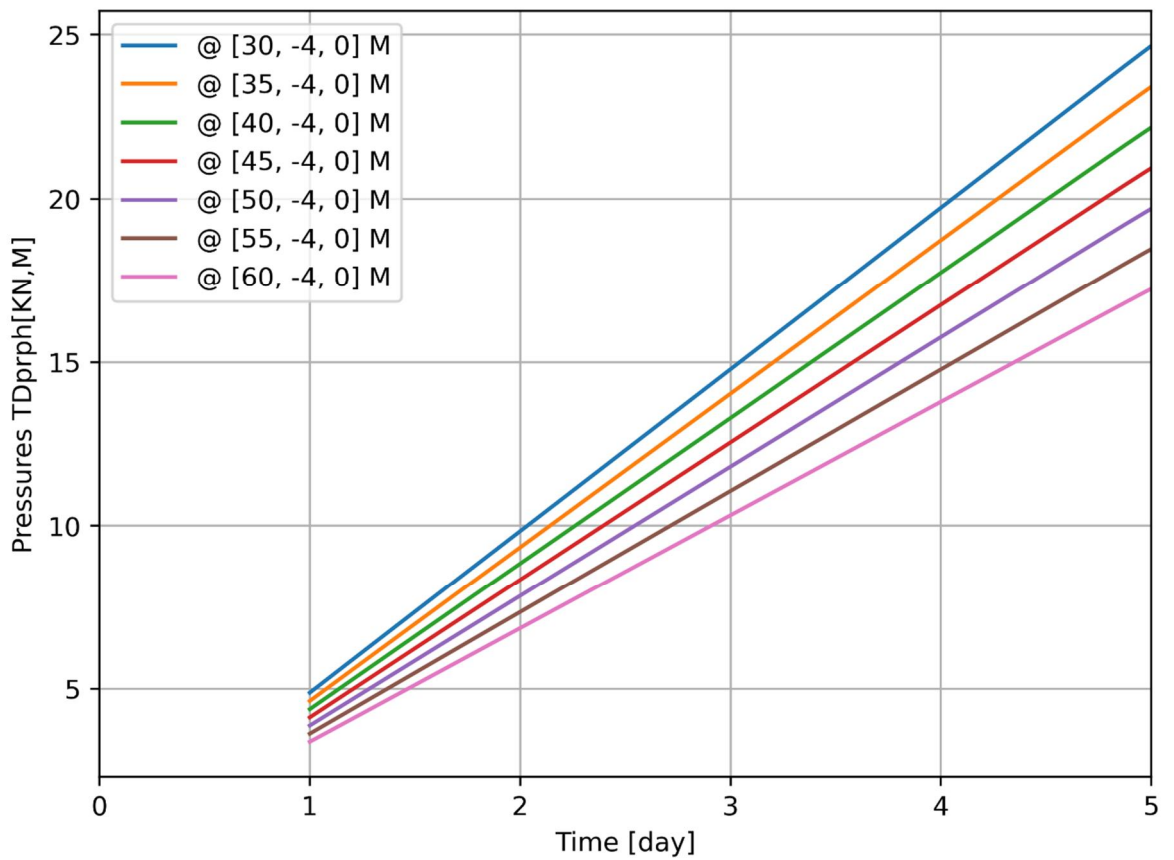
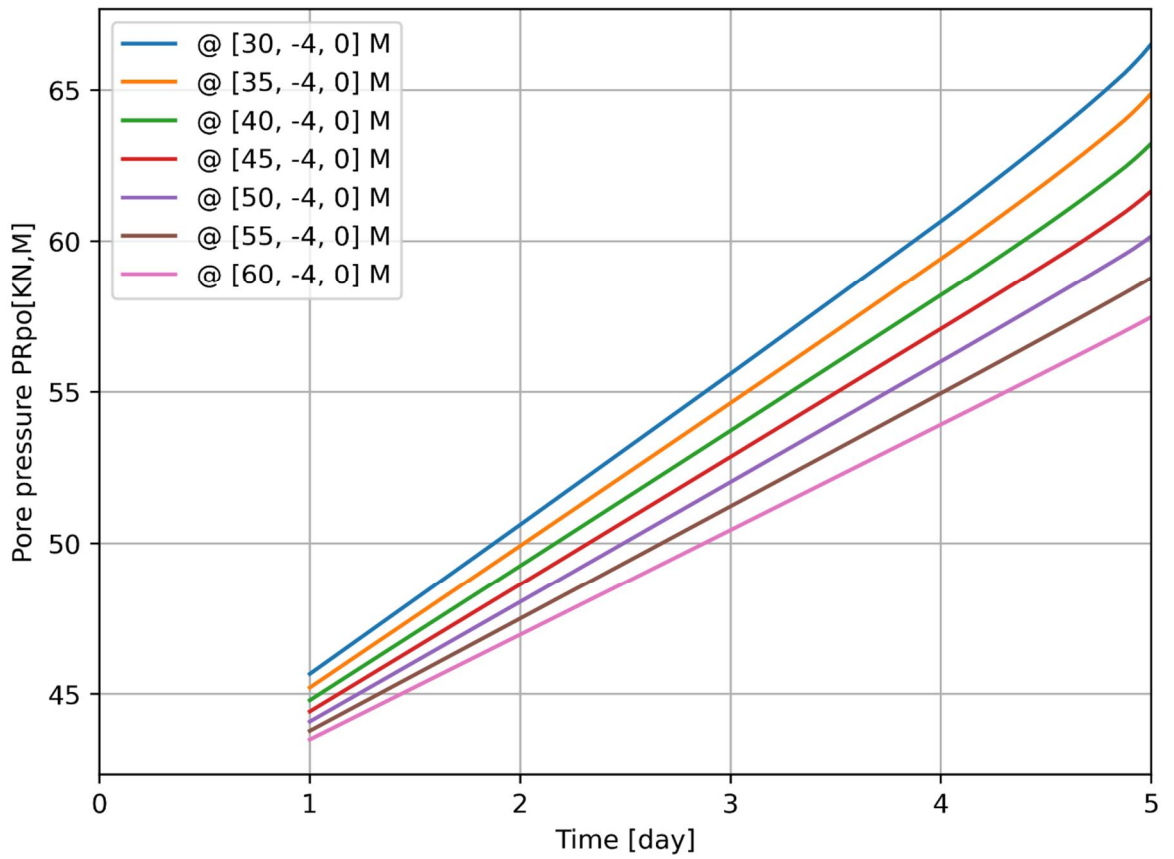


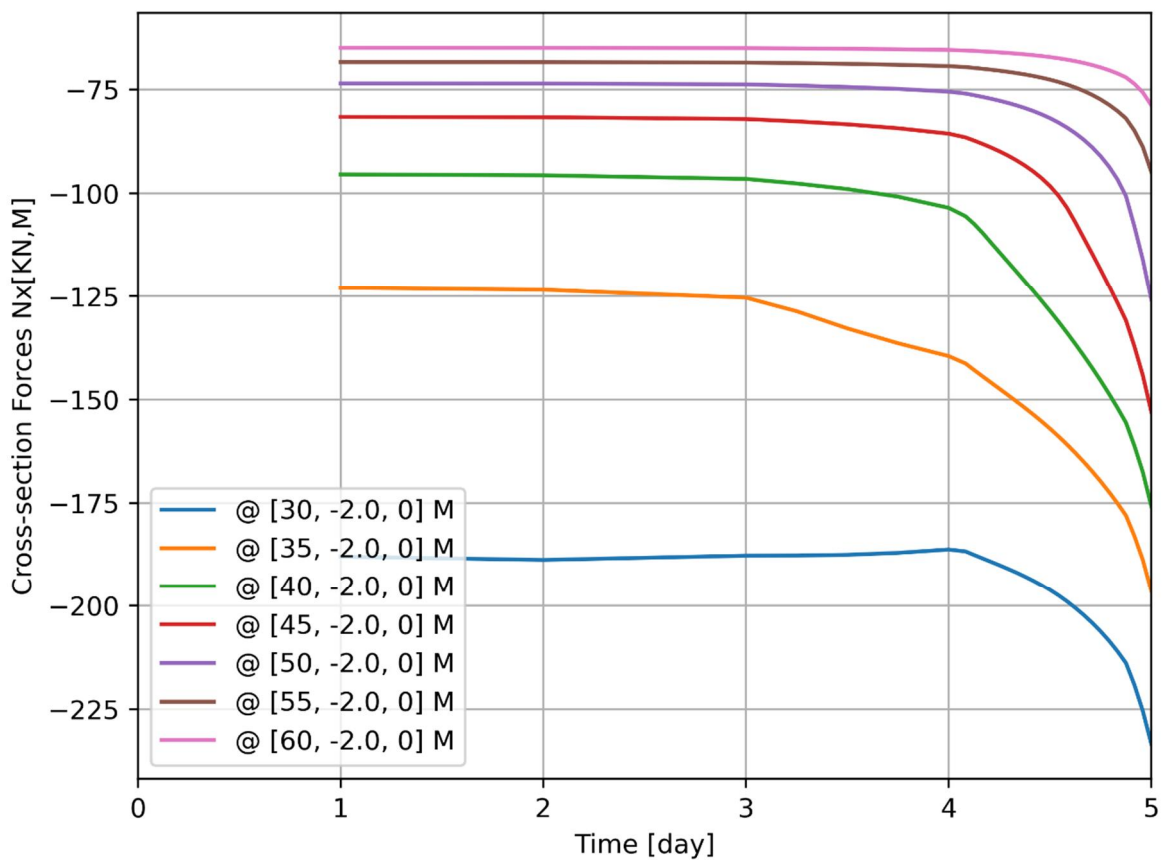
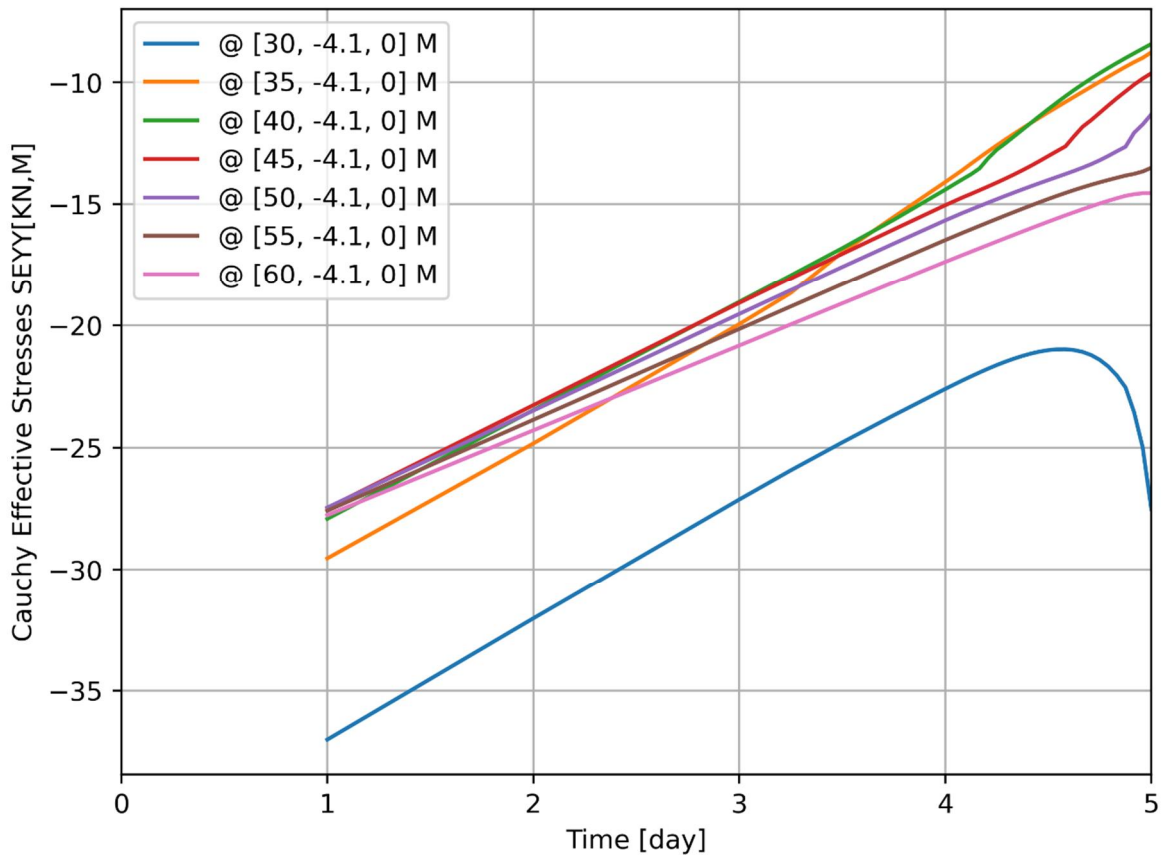
d=4\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 5 day  
Interface Effective Traction STENy  
min: -101.80kN/m<sup>2</sup> max: -6.46kN/m<sup>2</sup>

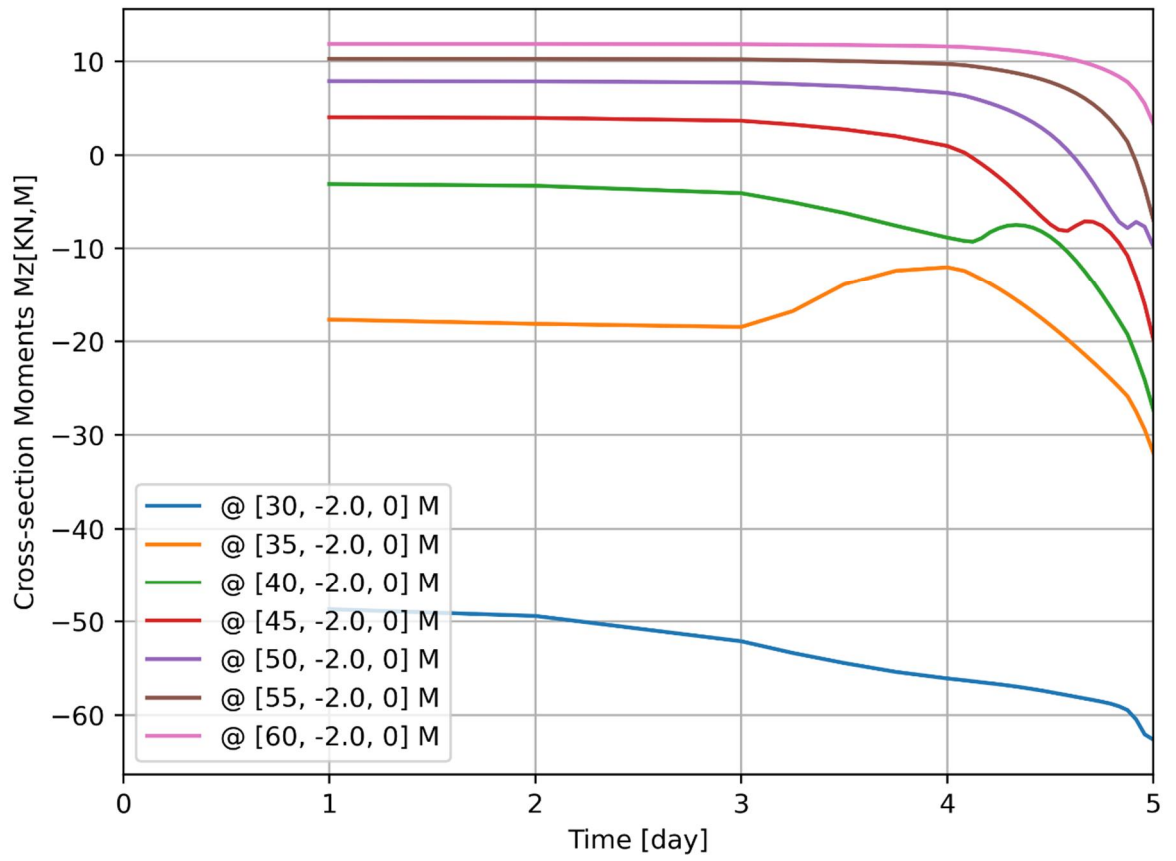








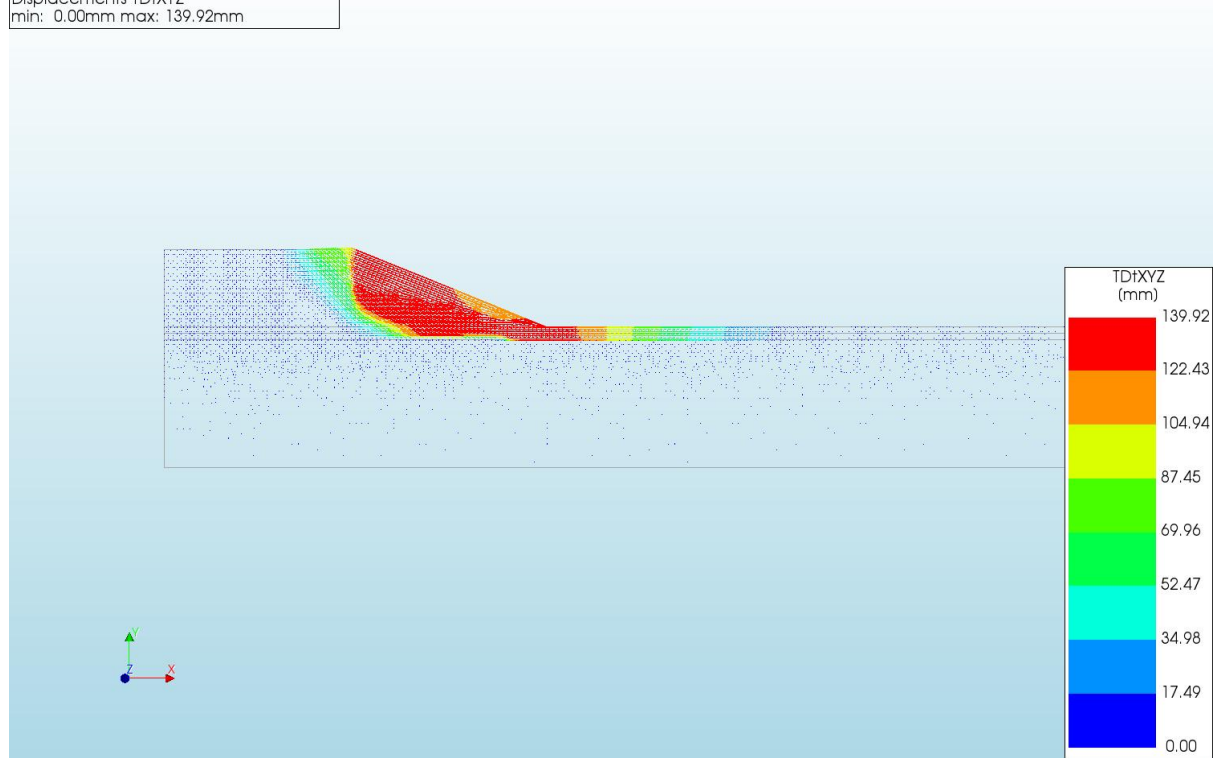




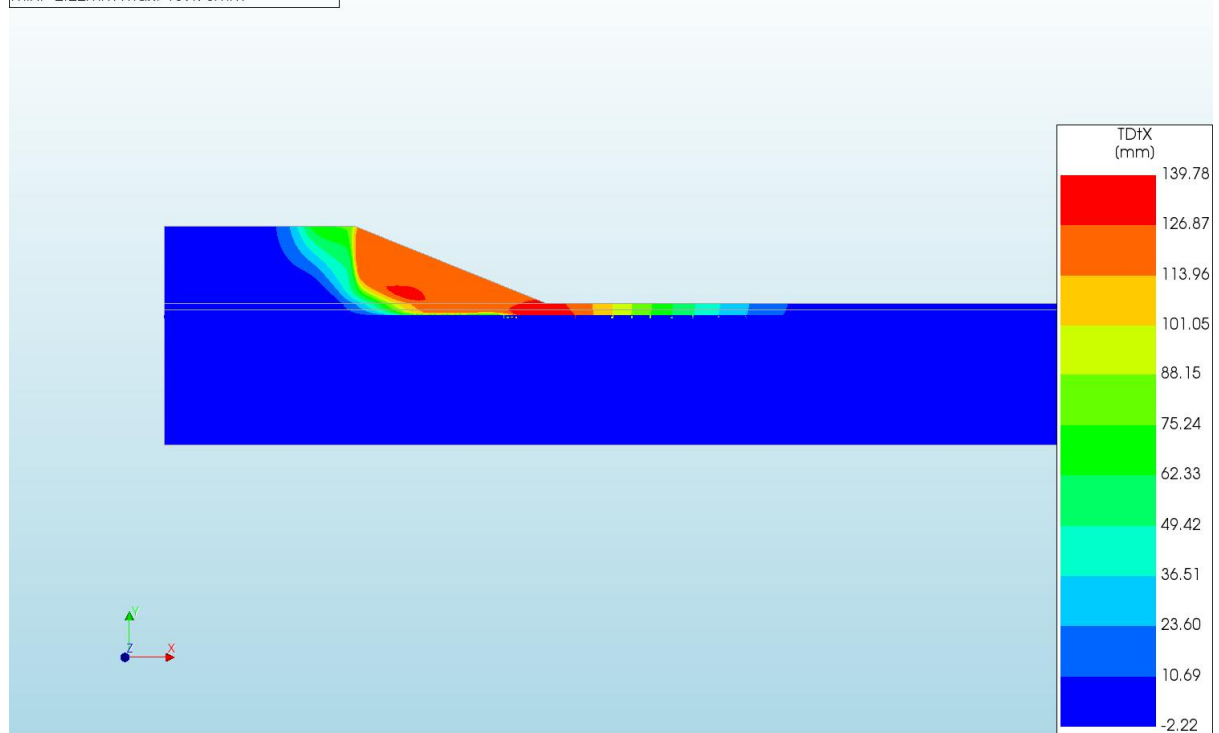
A.2.17

'Output d=1 c=14 E=1 k=1e-07 20200818'

d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 139.92mm

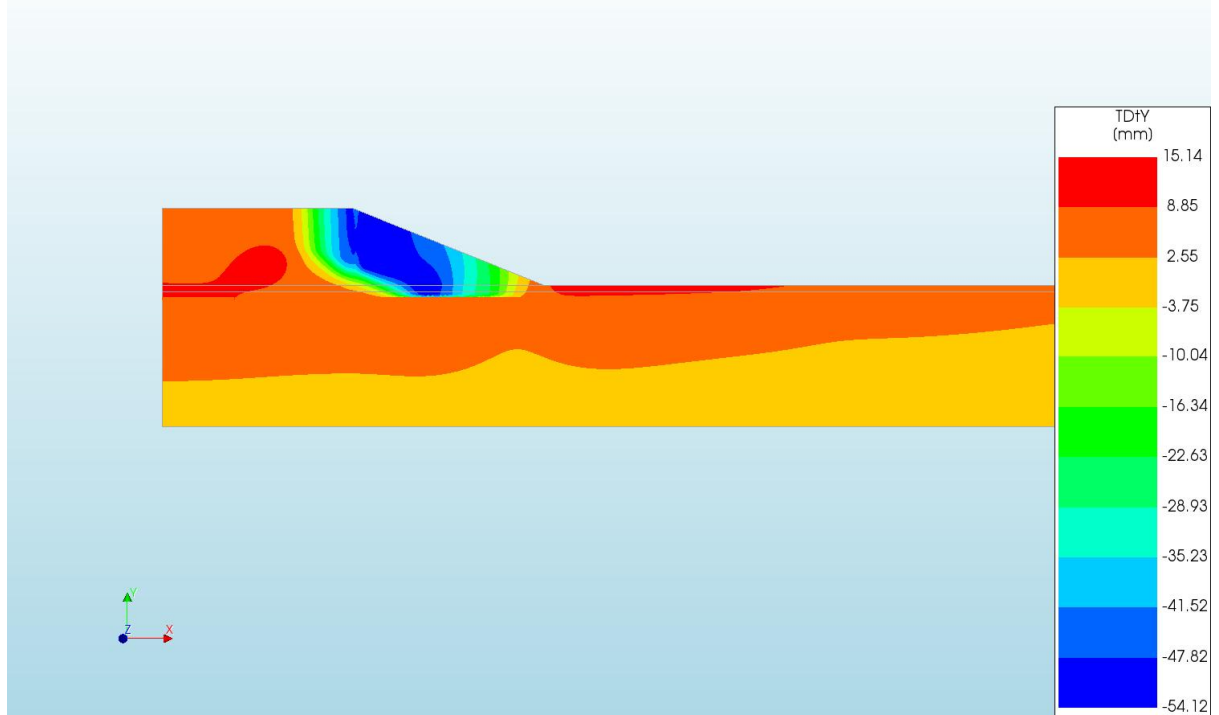


d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Displacements TDtX  
min: -2.22mm max: 139.78mm

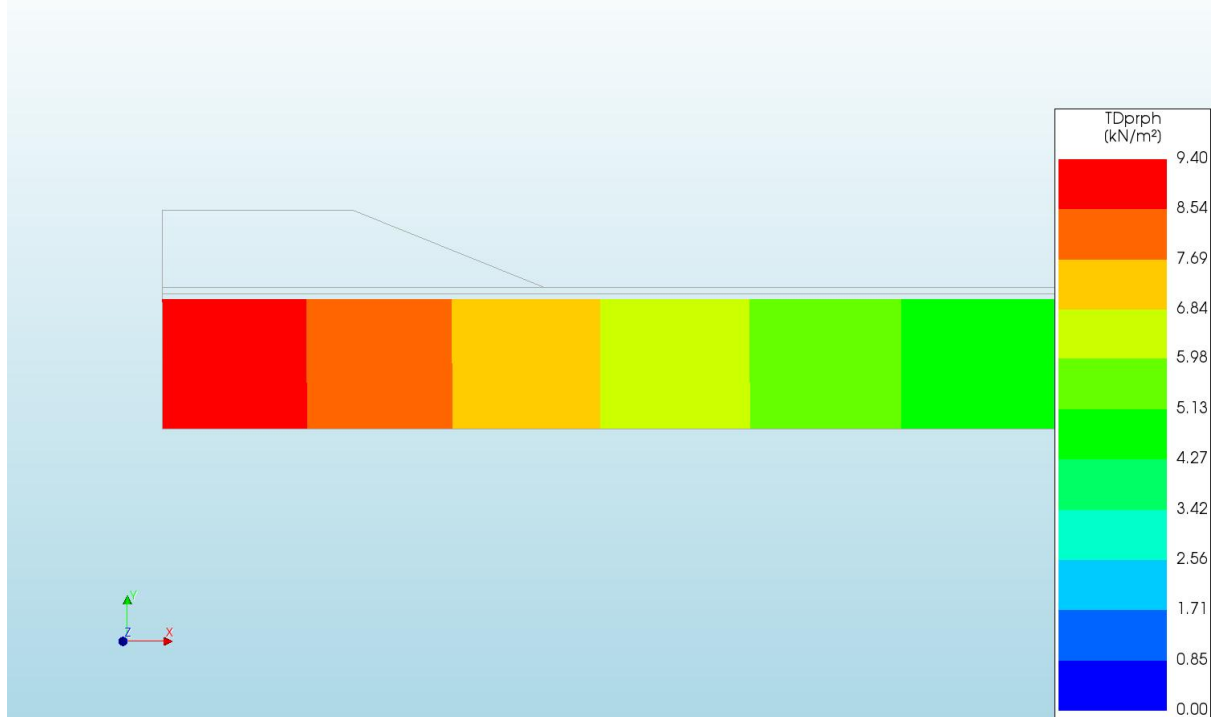




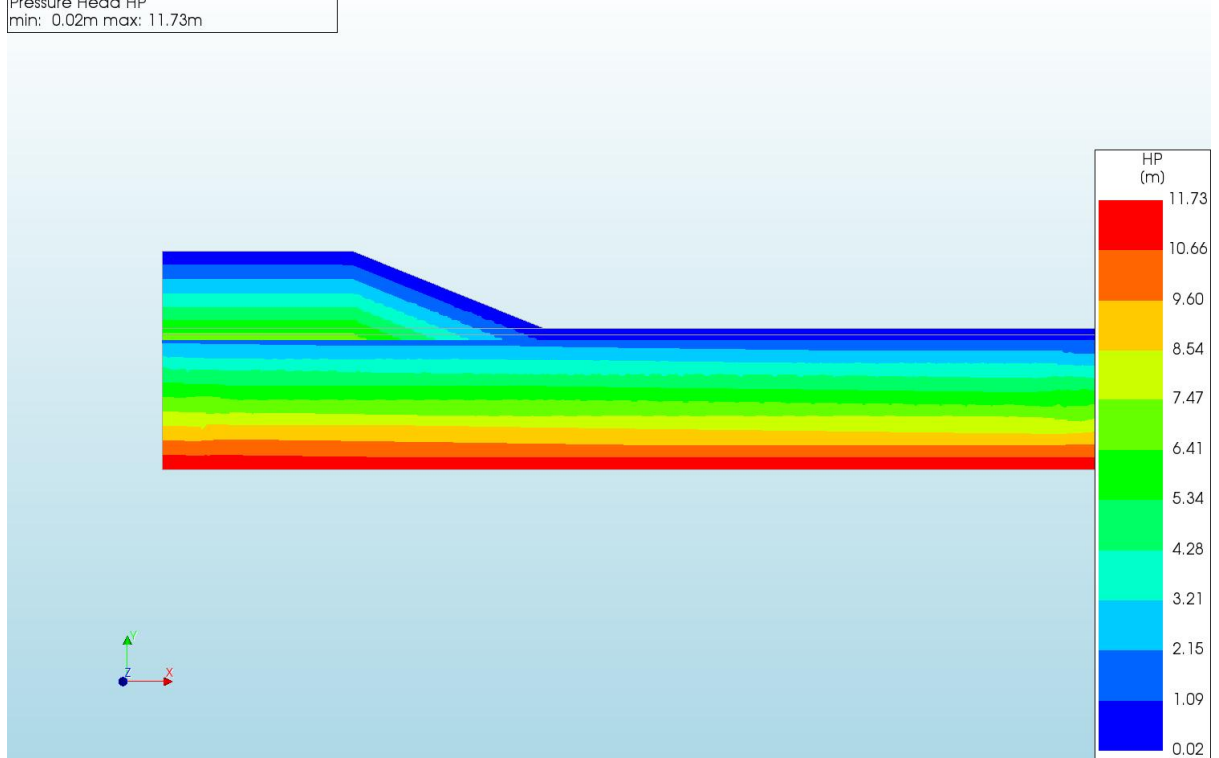
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Displacements TDtY  
min: -54.12mm max: 15.14mm



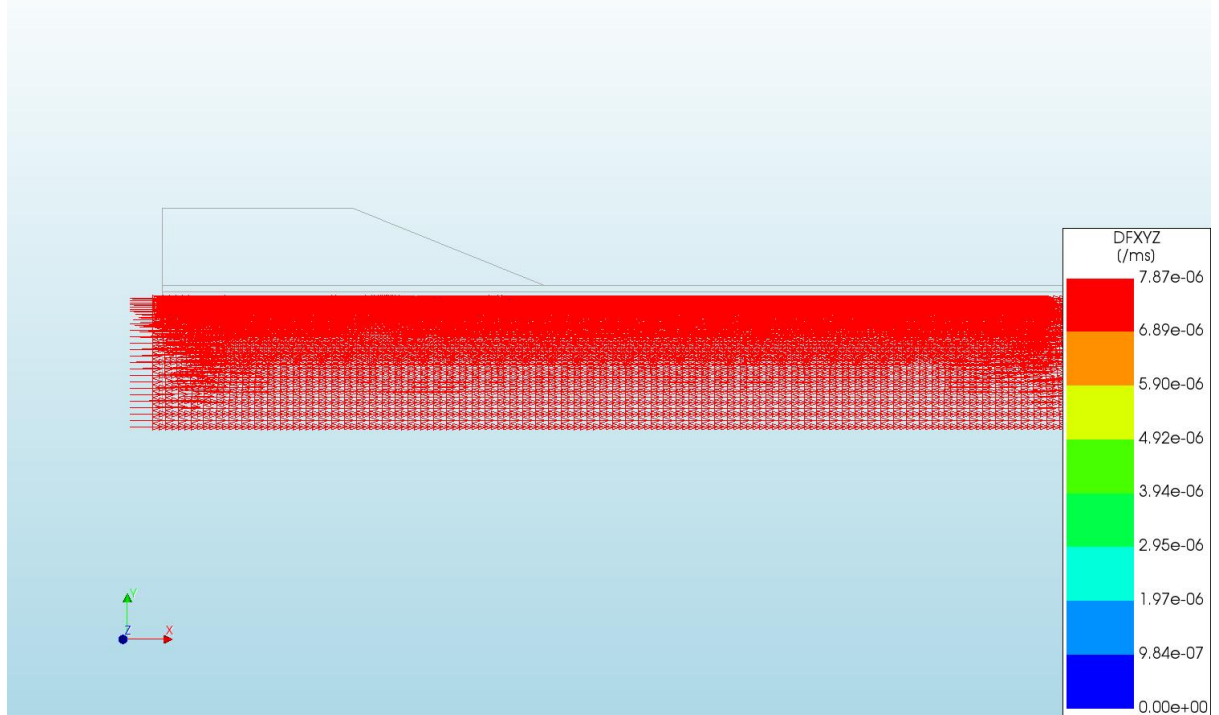
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 9.40kN/m<sup>2</sup>



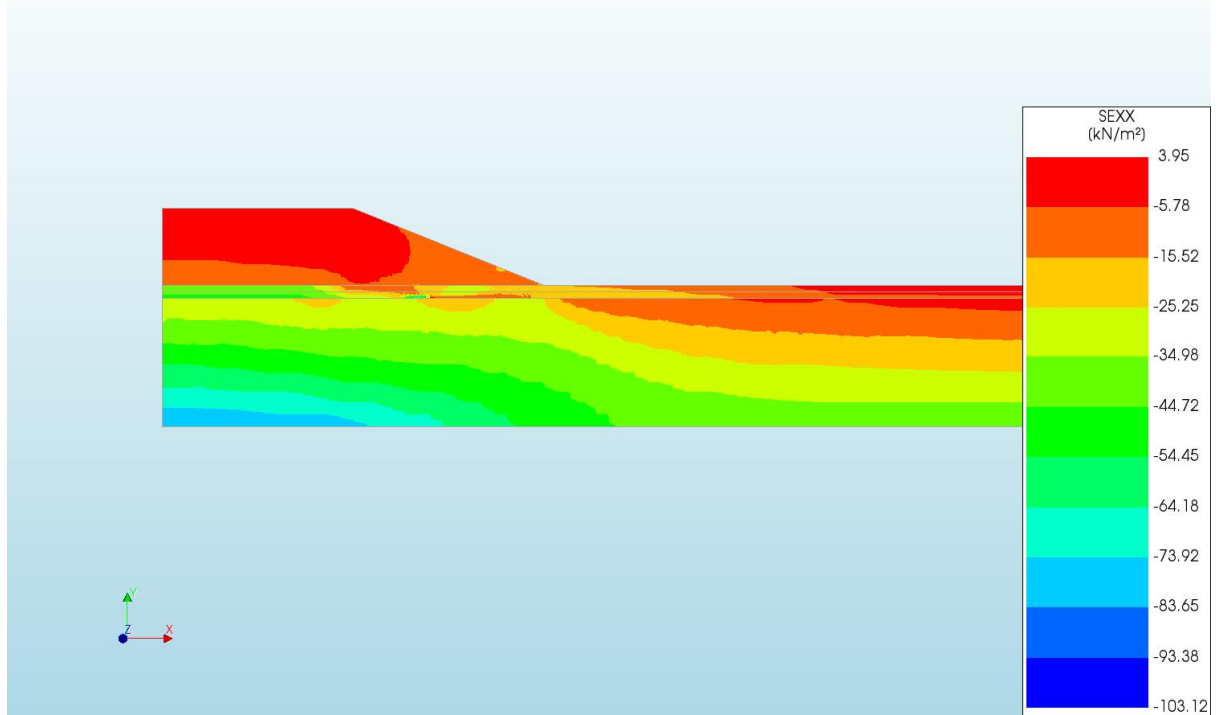
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 11.73m



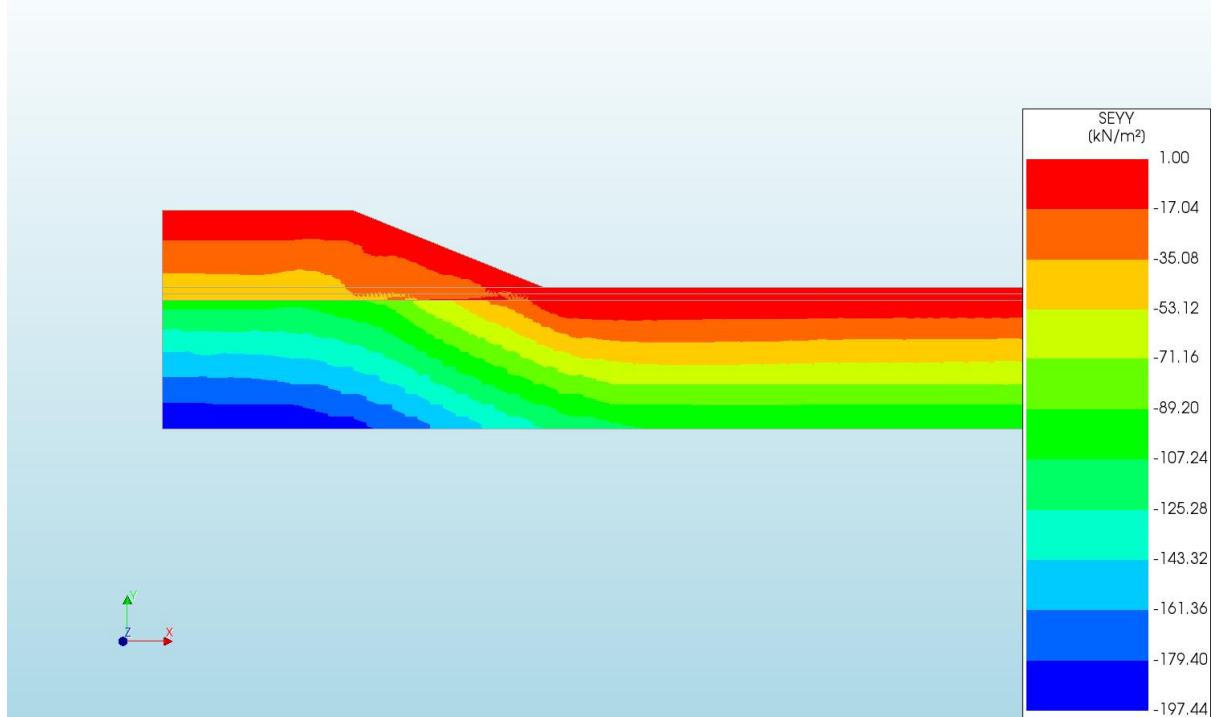
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 7.87e-06/ms



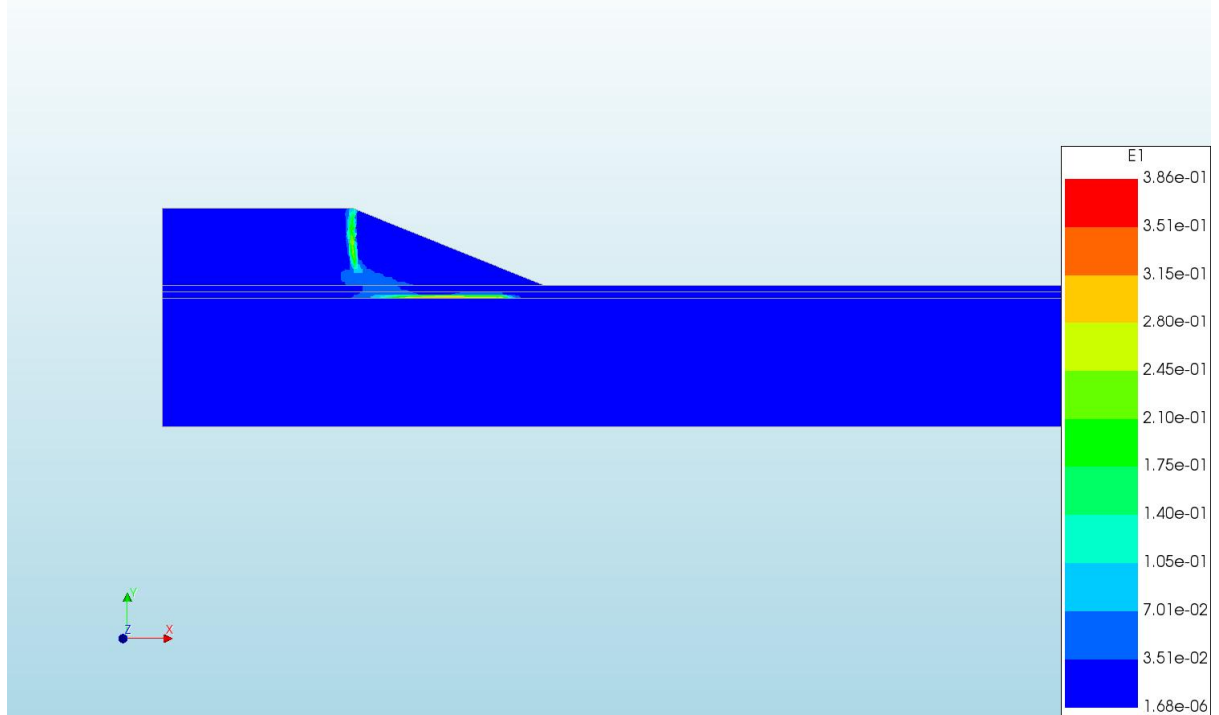
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -103.12kN/m<sup>2</sup> max: 3.95kN/m<sup>2</sup>



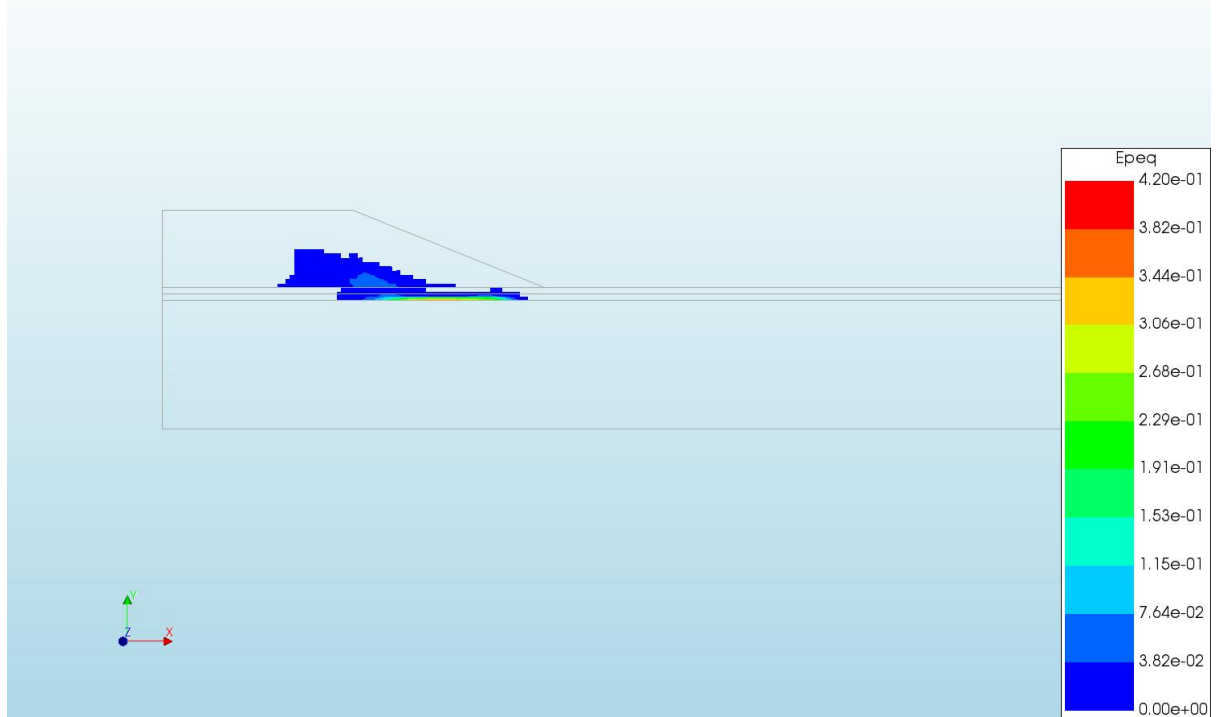
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -197.44kN/m<sup>2</sup> max: 1.00kN/m<sup>2</sup>



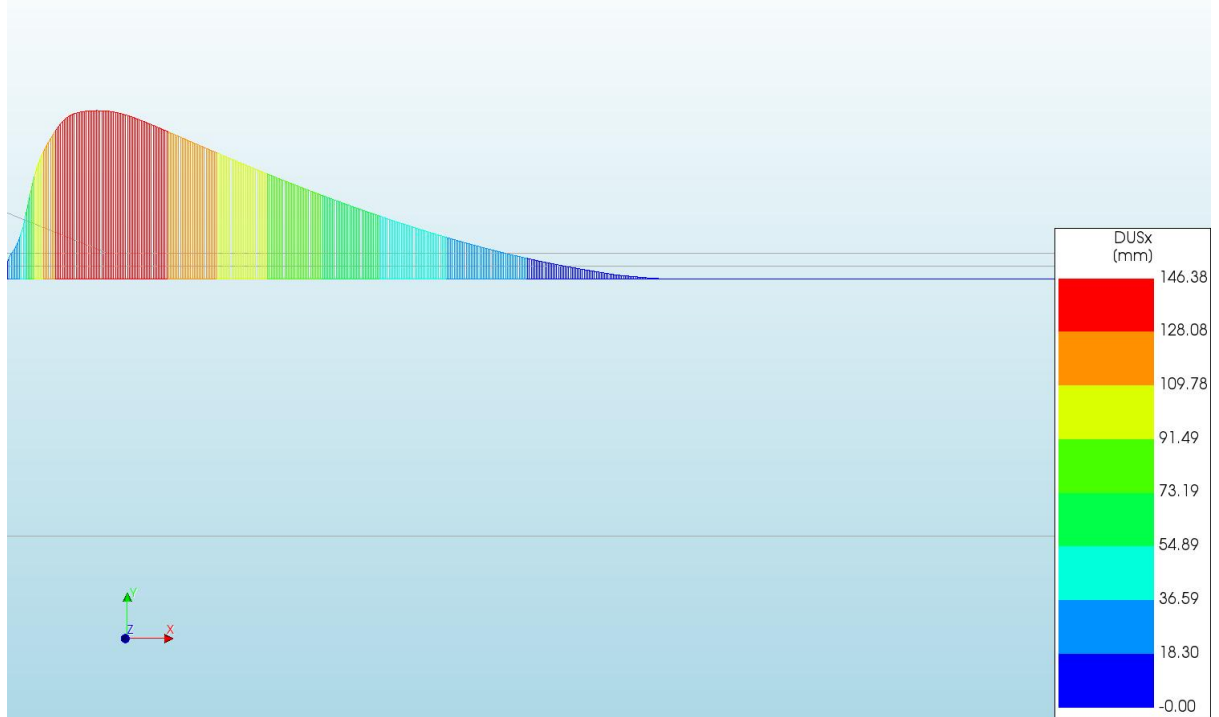
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Total Strains E1  
min: 1.68e-06 max: 3.86e-01



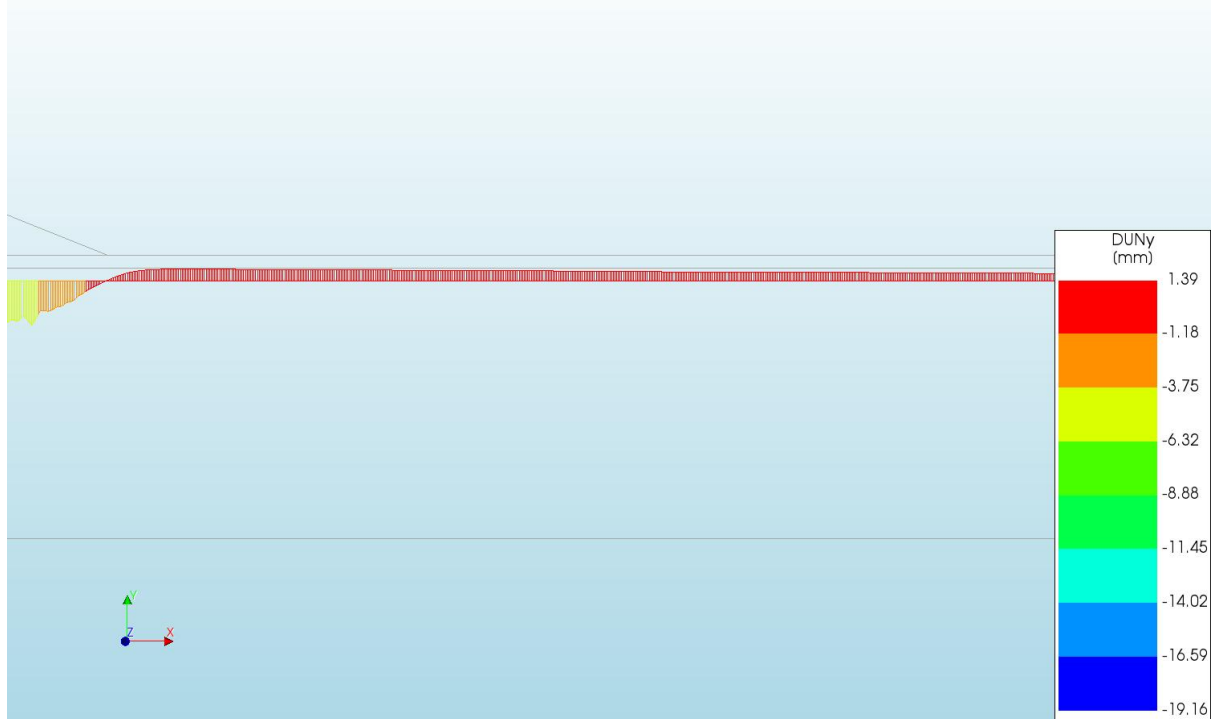
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.20e-01



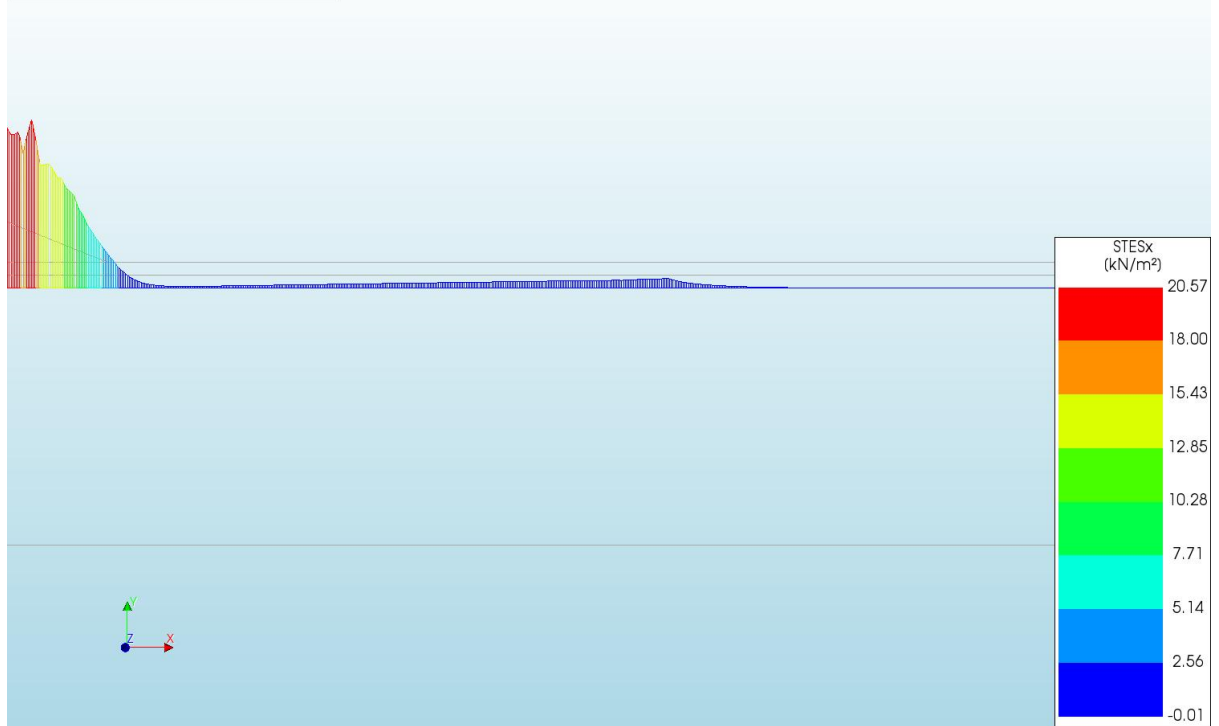
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.00mm max: 146.38mm



d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -19.16mm max: 1.39mm

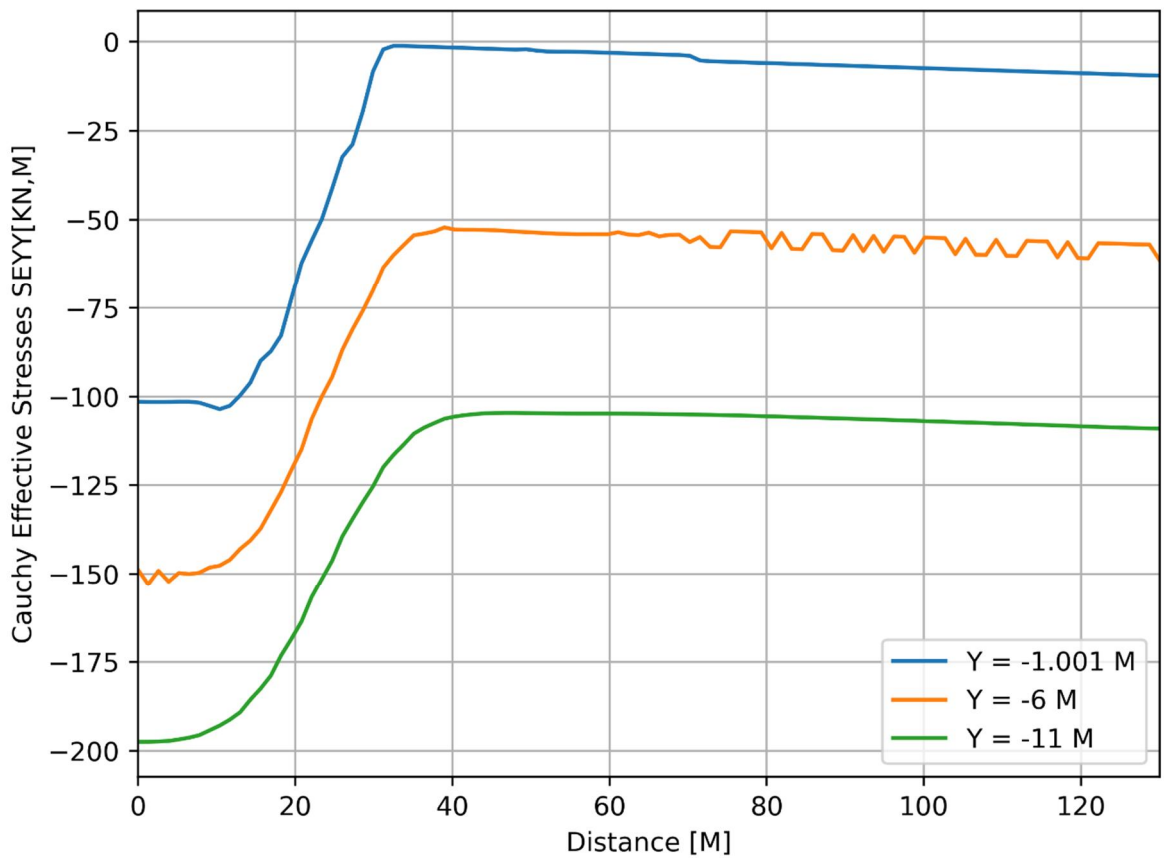
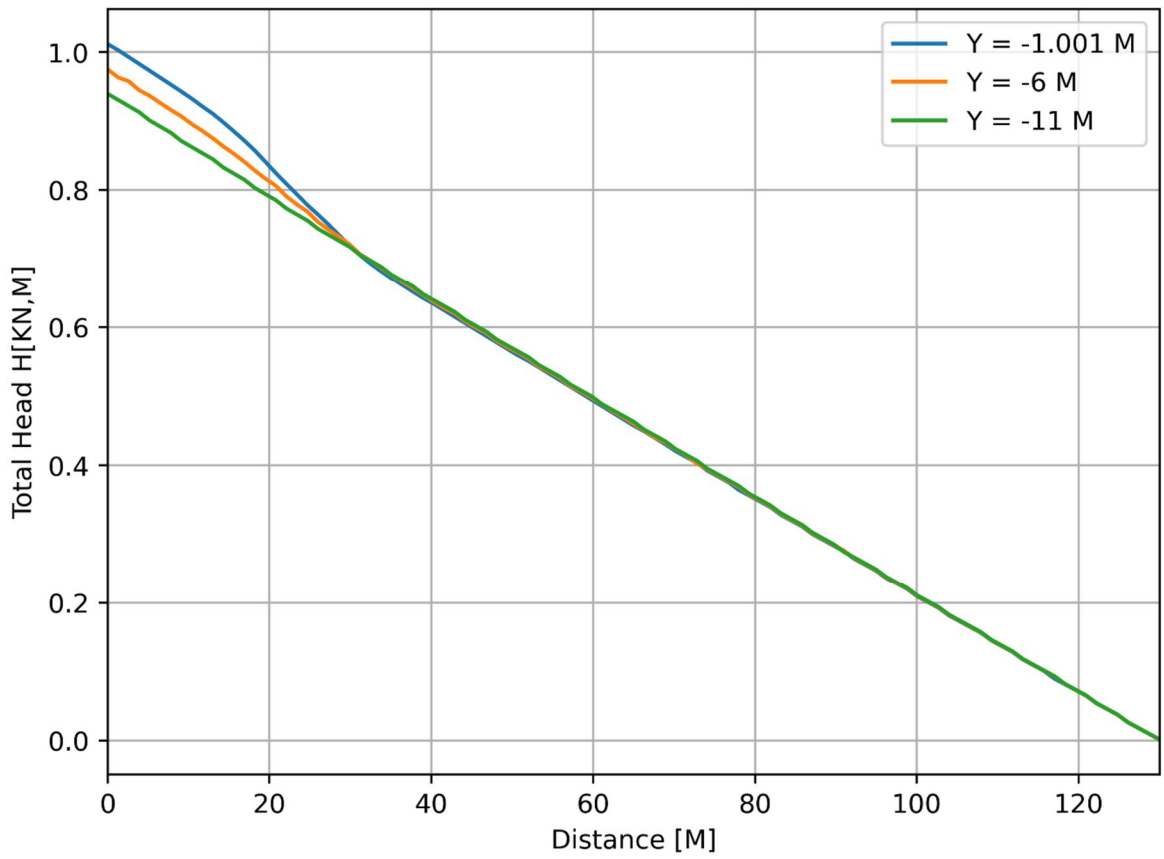


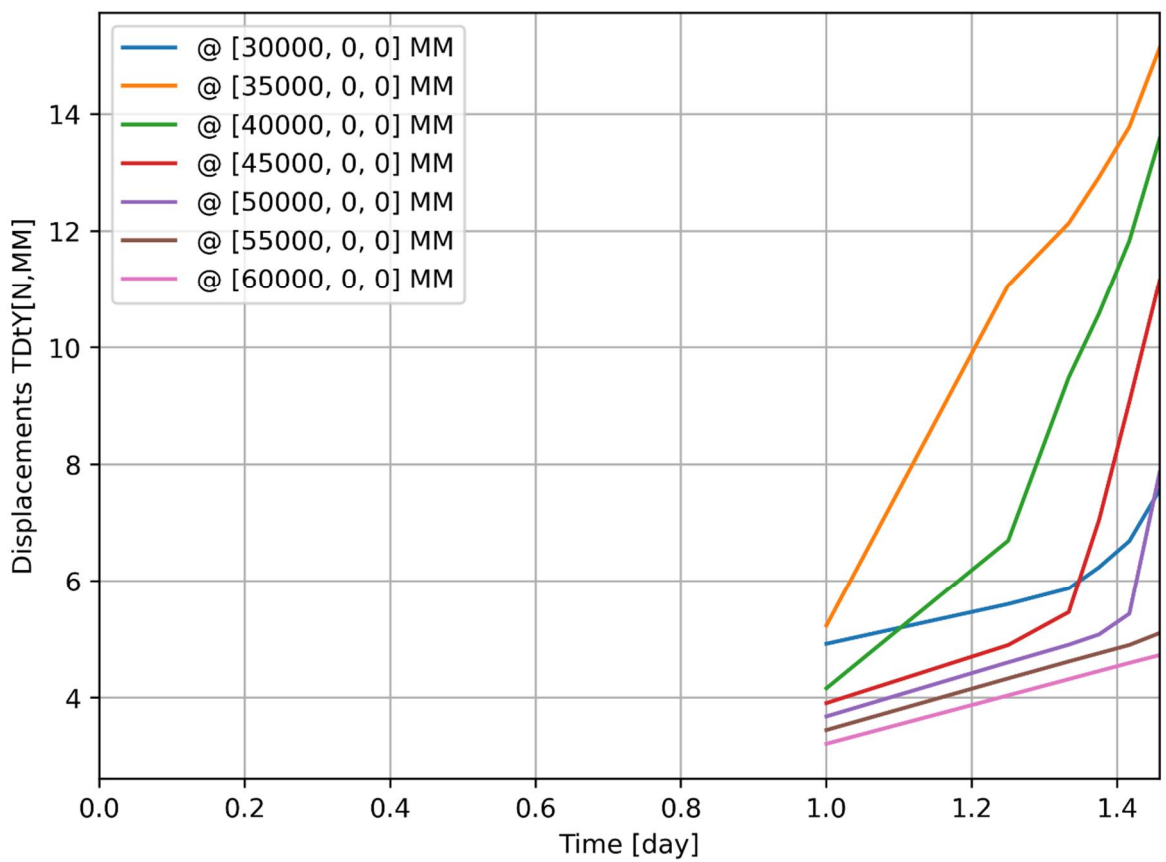
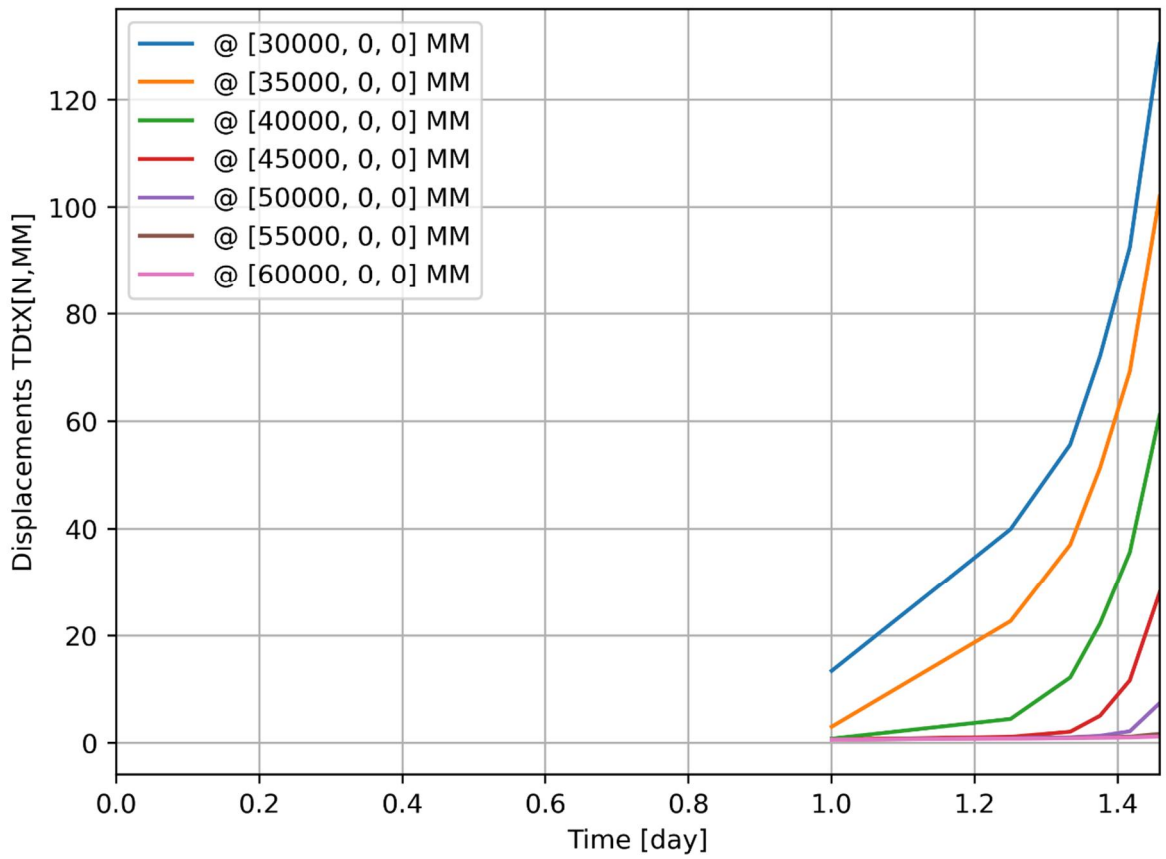
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.01kN/m<sup>2</sup> max: 20.57kN/m<sup>2</sup>



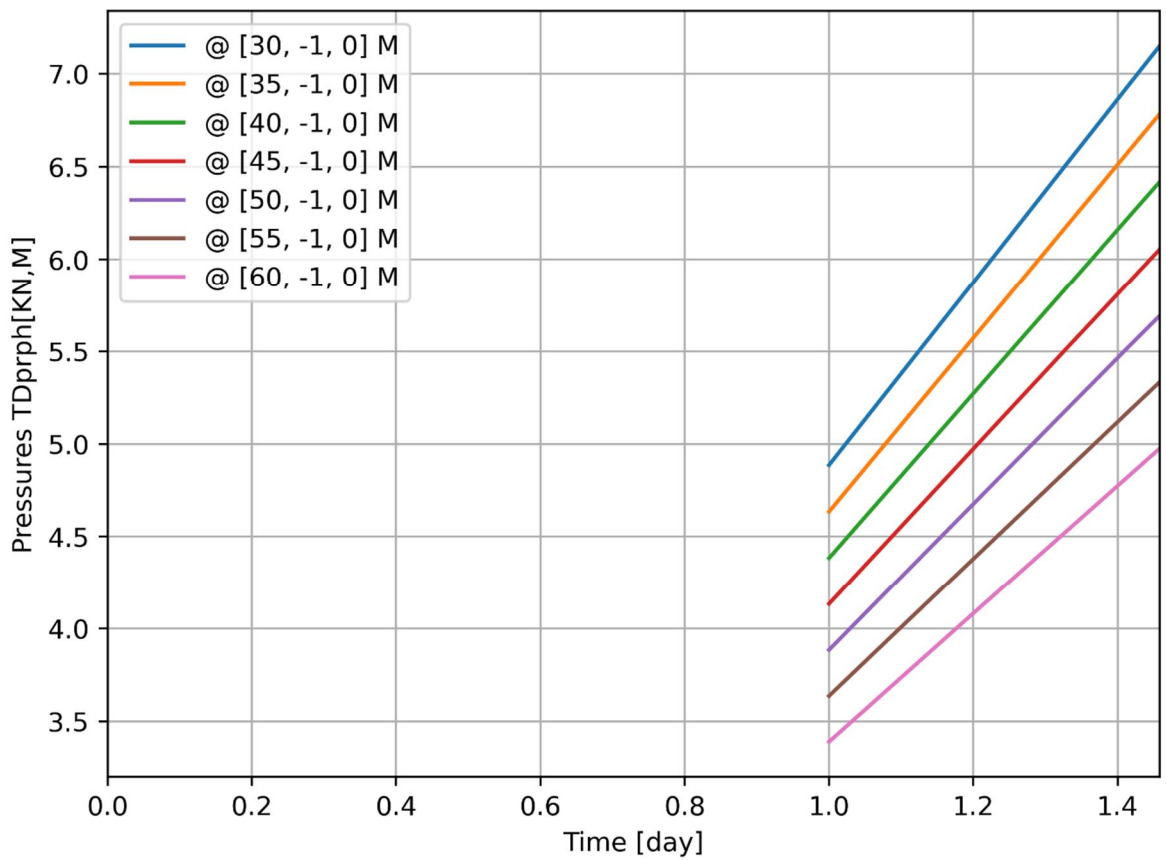
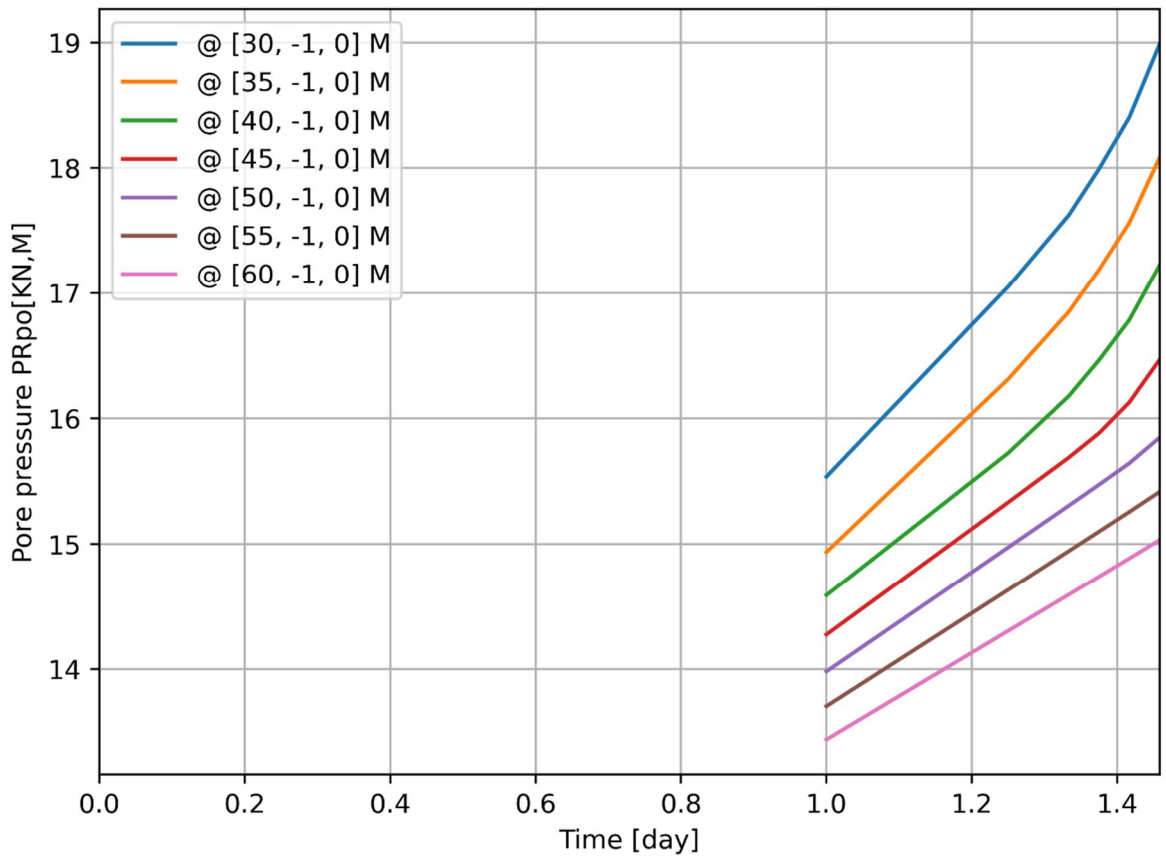
d=1\_c=14\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 12, Time 1 day 11 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -103.11kN/m<sup>2</sup> max: -0.38kN/m<sup>2</sup>

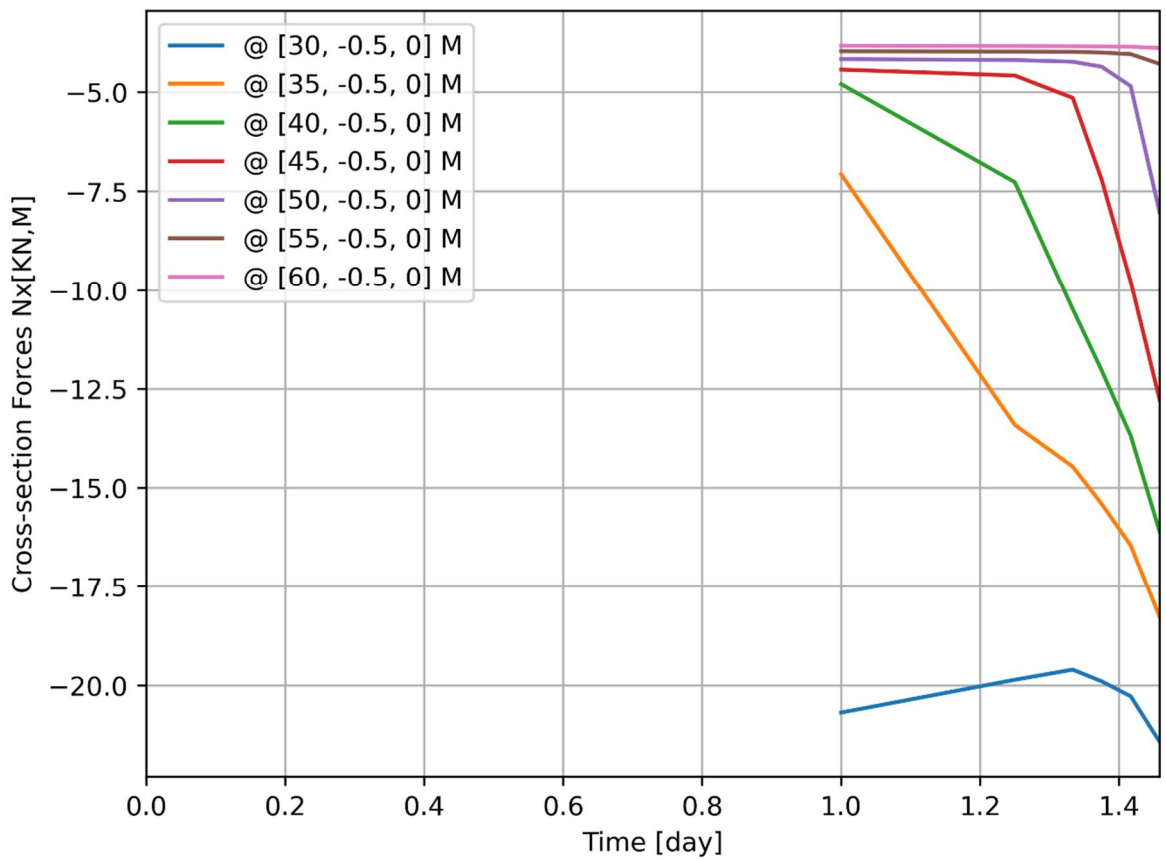
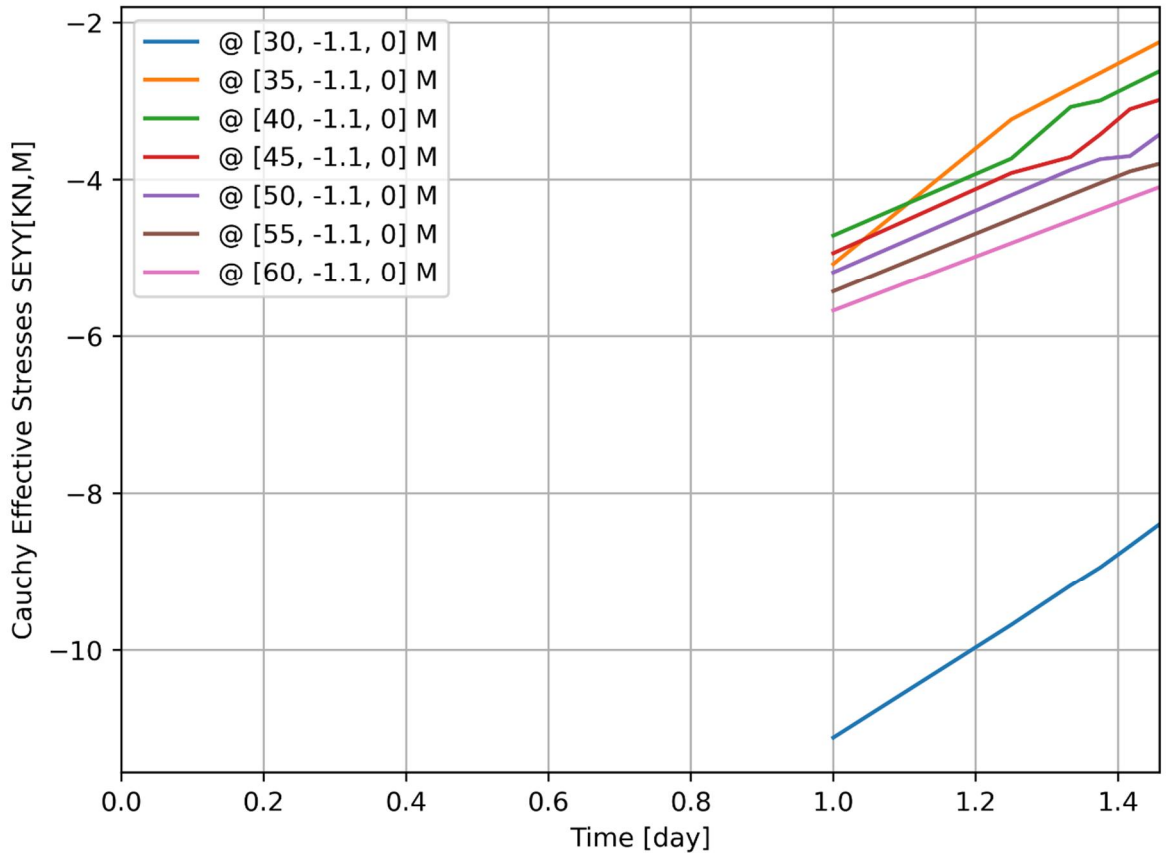


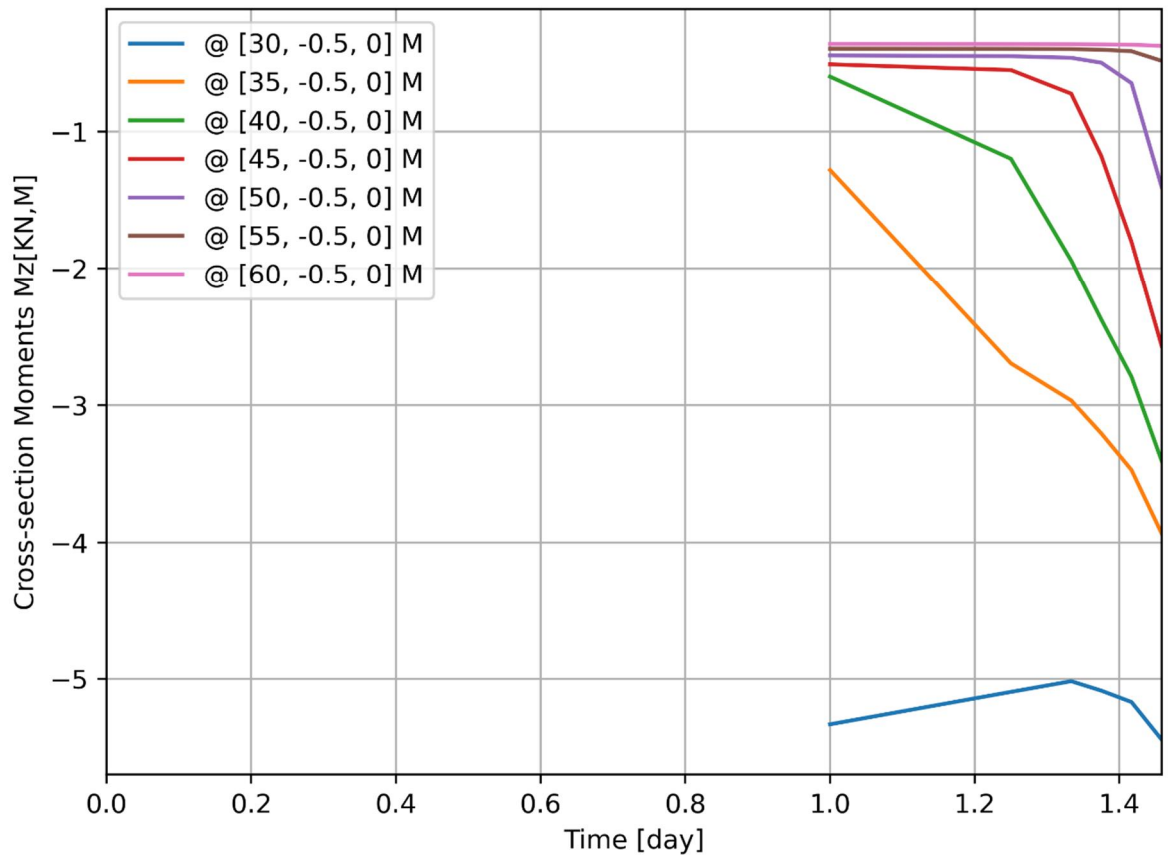








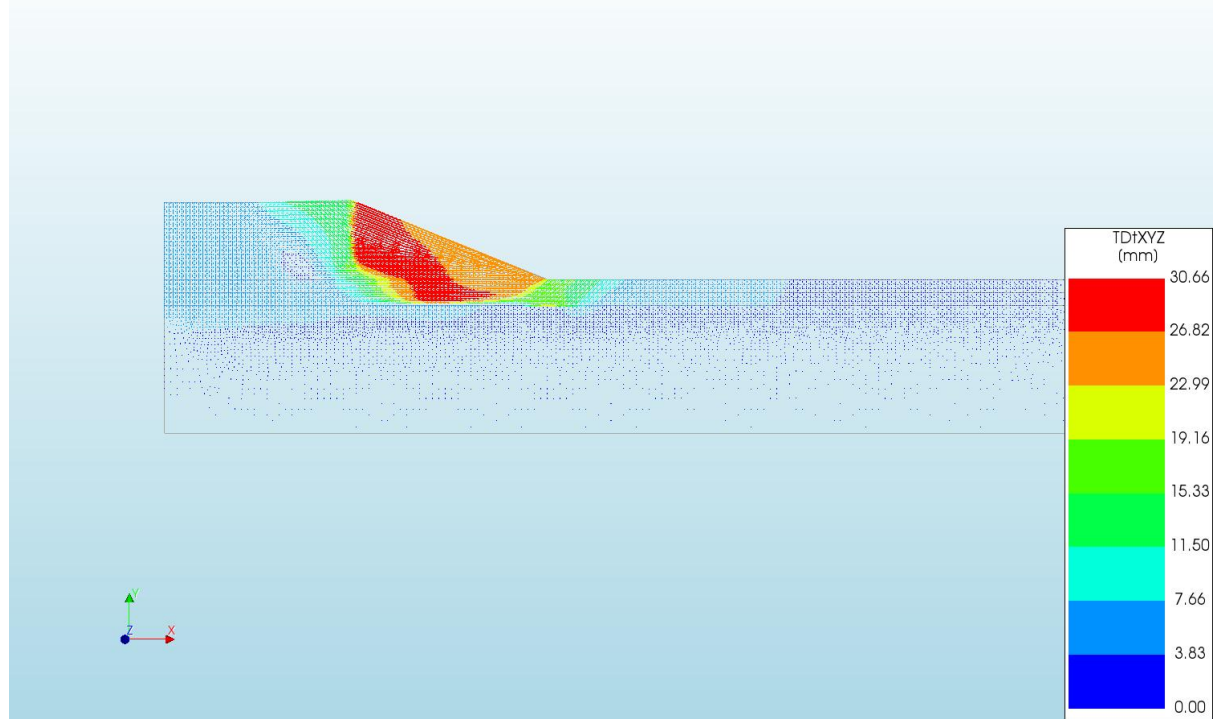




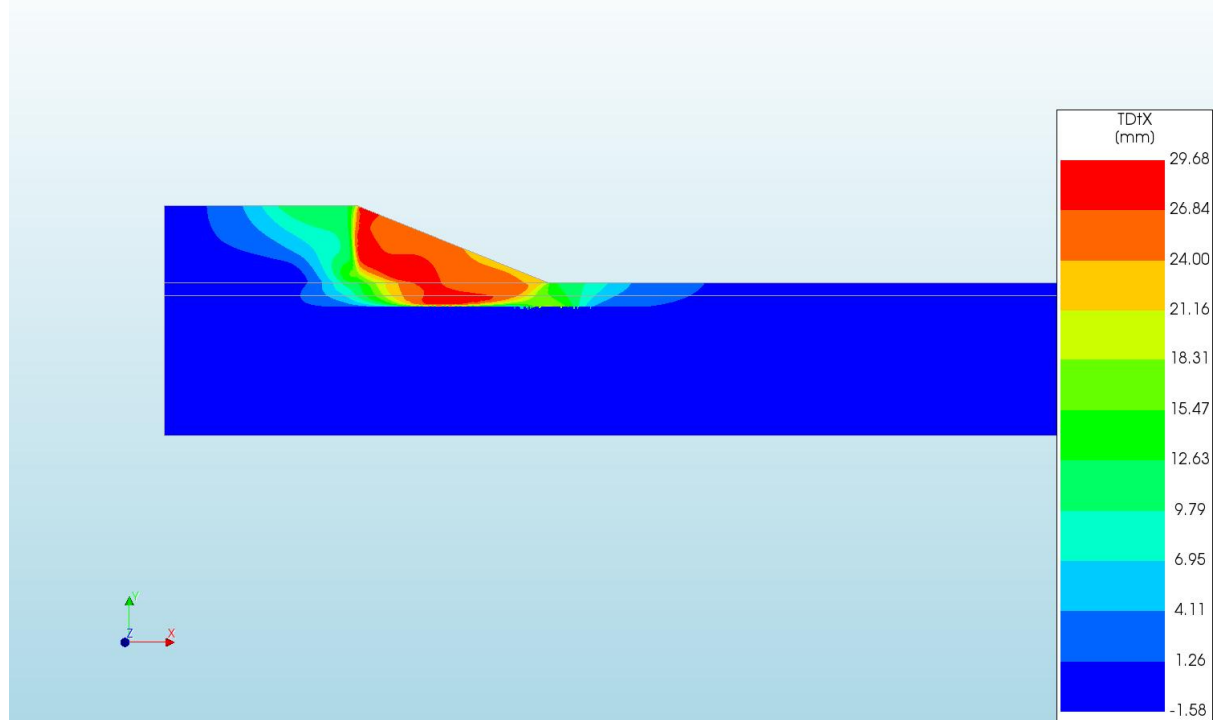
A.2.18

'Output\_d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818'

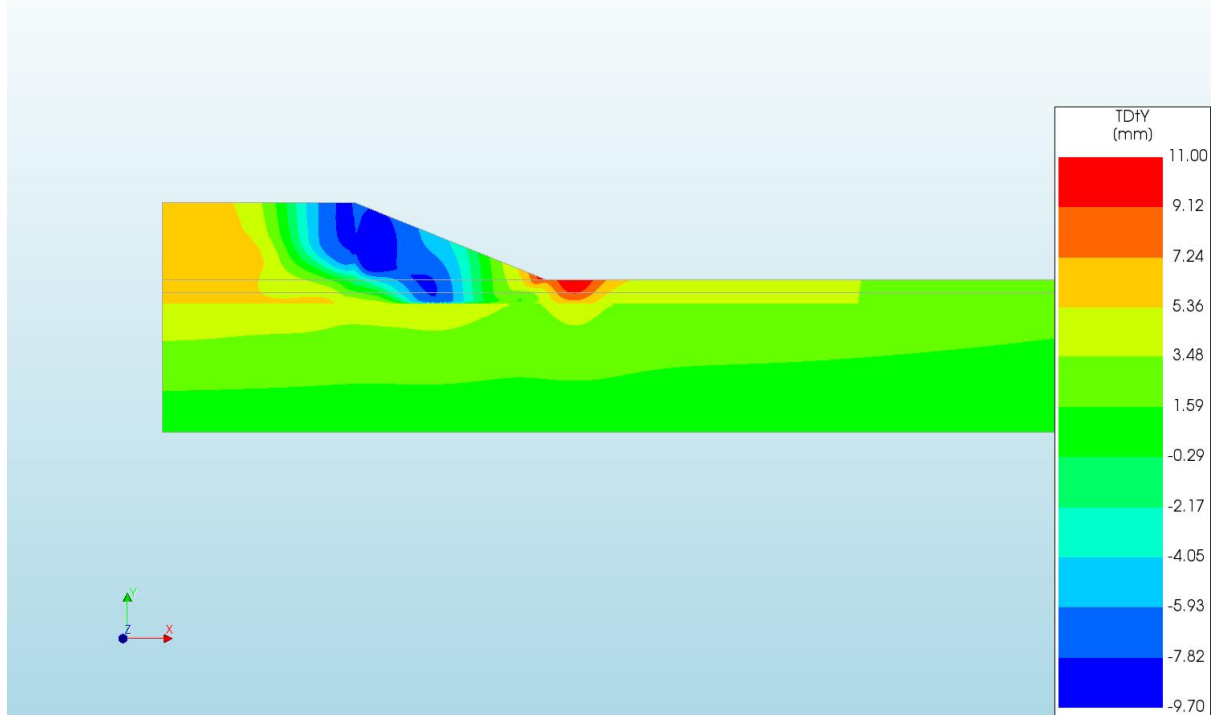
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 30.66mm



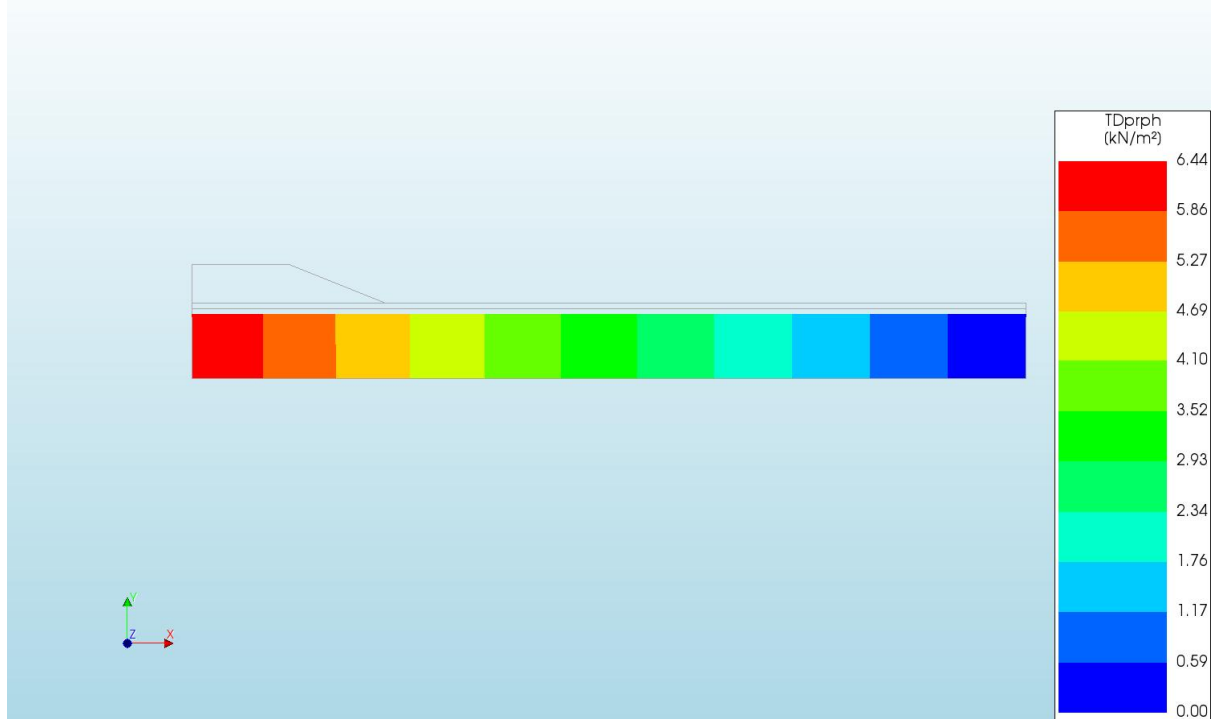
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
 Displacements TDtX  
 min: -1.58mm max: 29.68mm



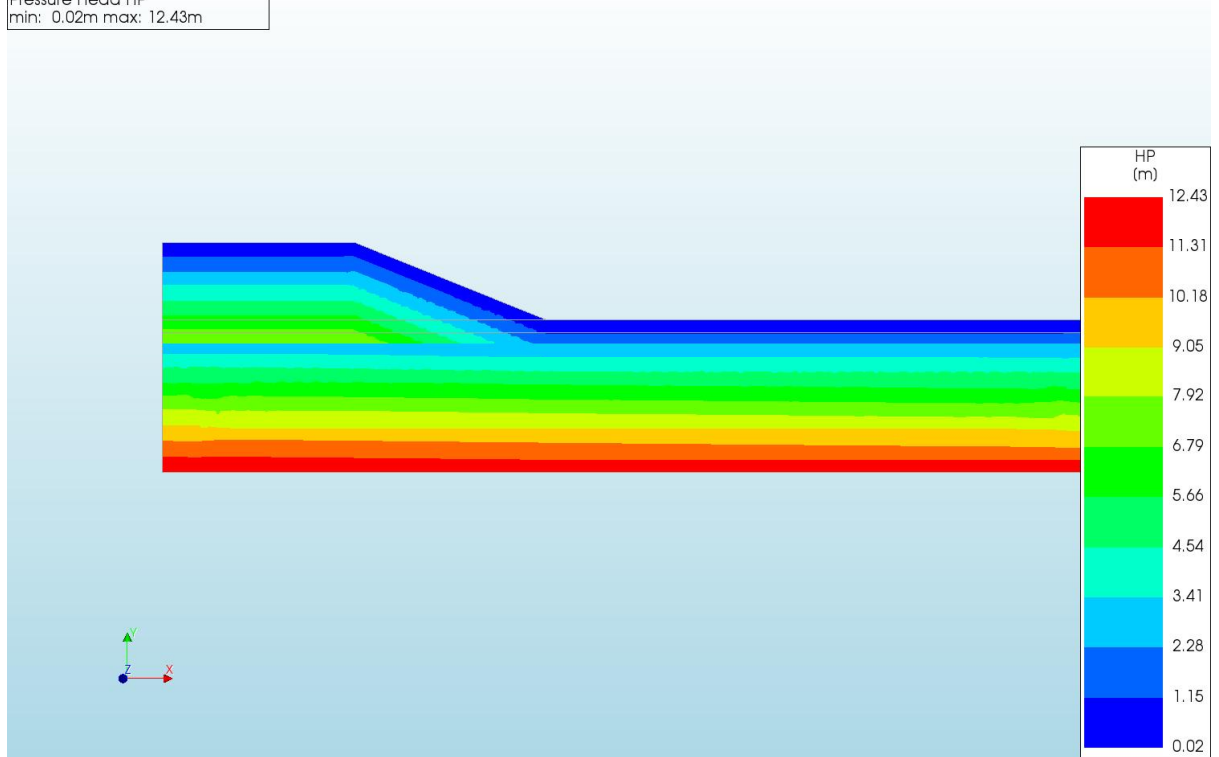
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Displacements TDtY  
min: -9.70mm max: 11.00mm



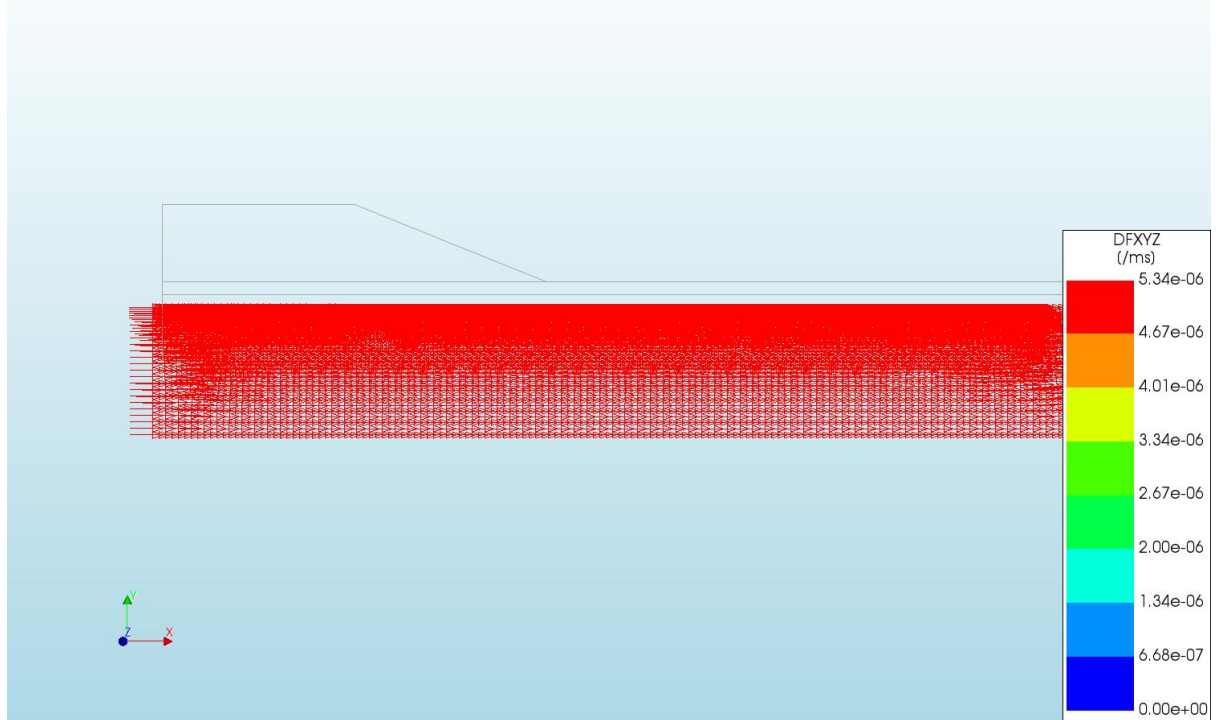
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 6.44kN/m<sup>2</sup>



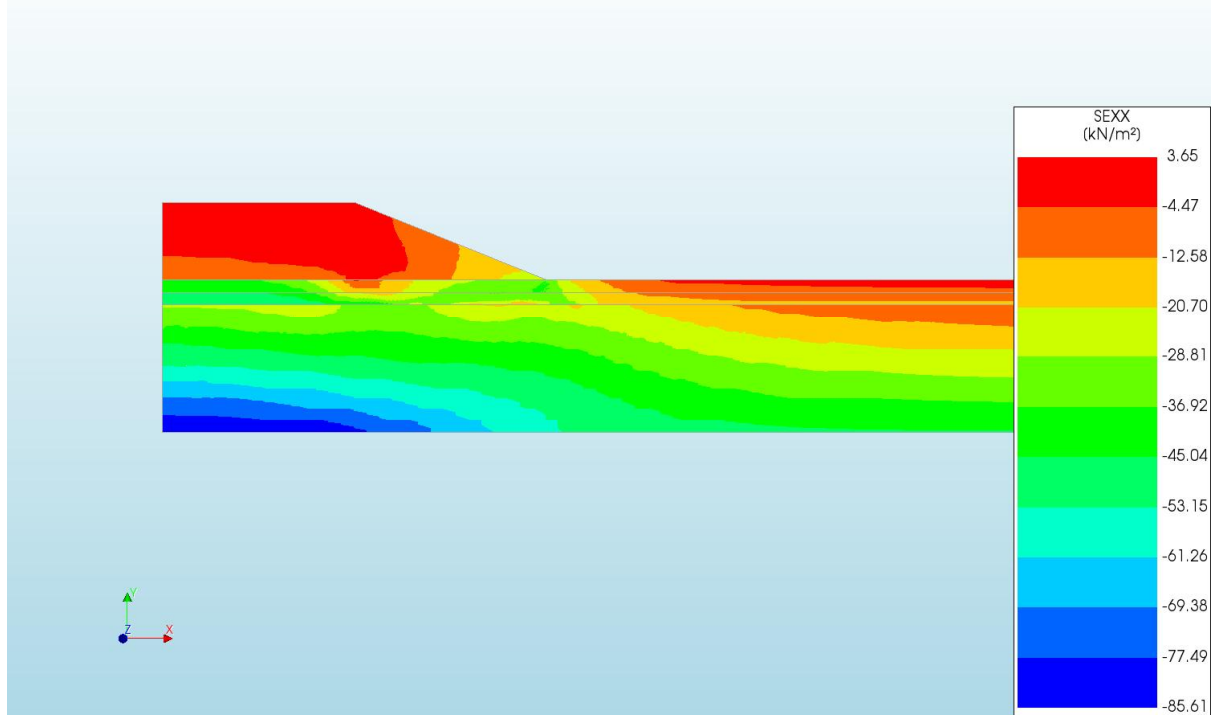
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.43m



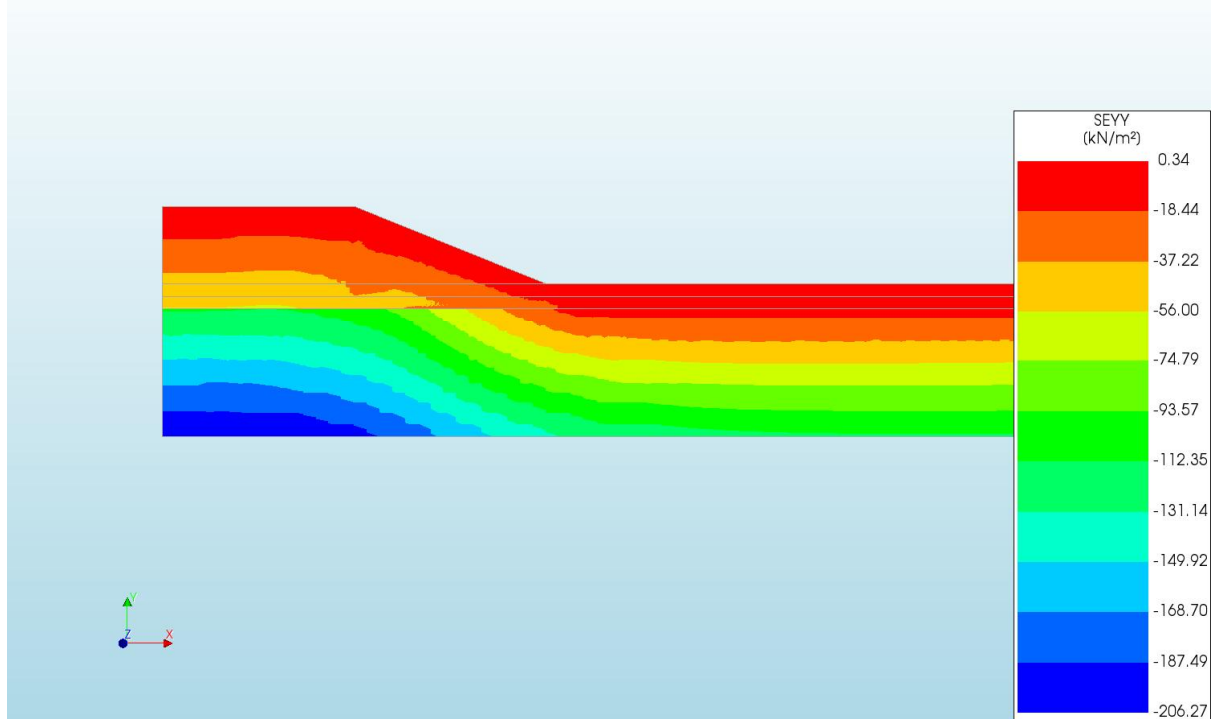
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 5.34e-06/ms



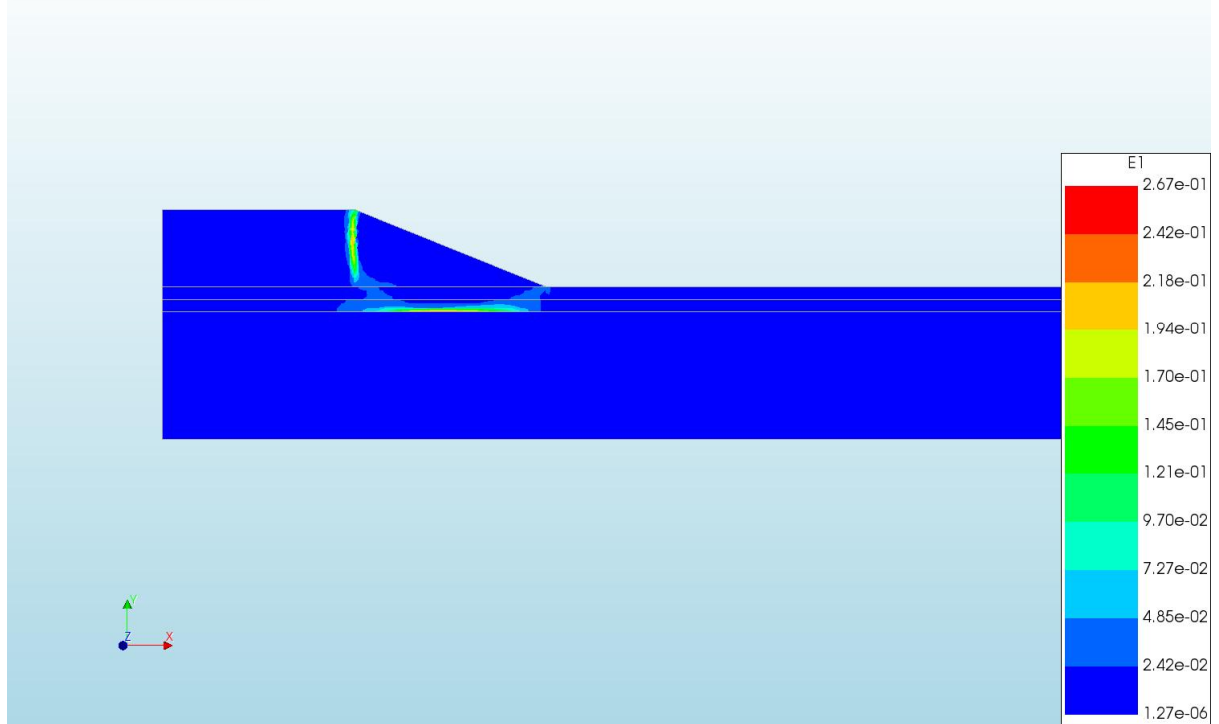
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -85.61kN/m<sup>2</sup> max: 3.65kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -206.27kN/m<sup>2</sup> max: 0.34kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Total Strains E1  
min: 1.27e-06 max: 2.67e-01

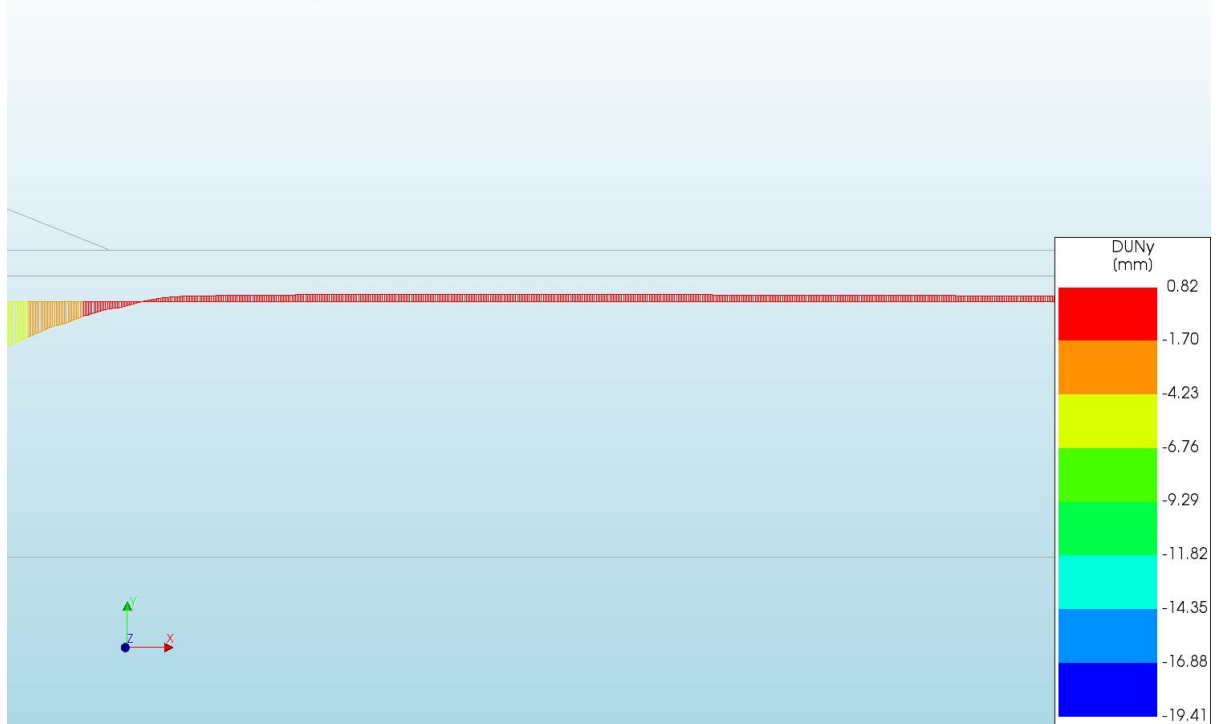


d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.00mm max: 25.28mm

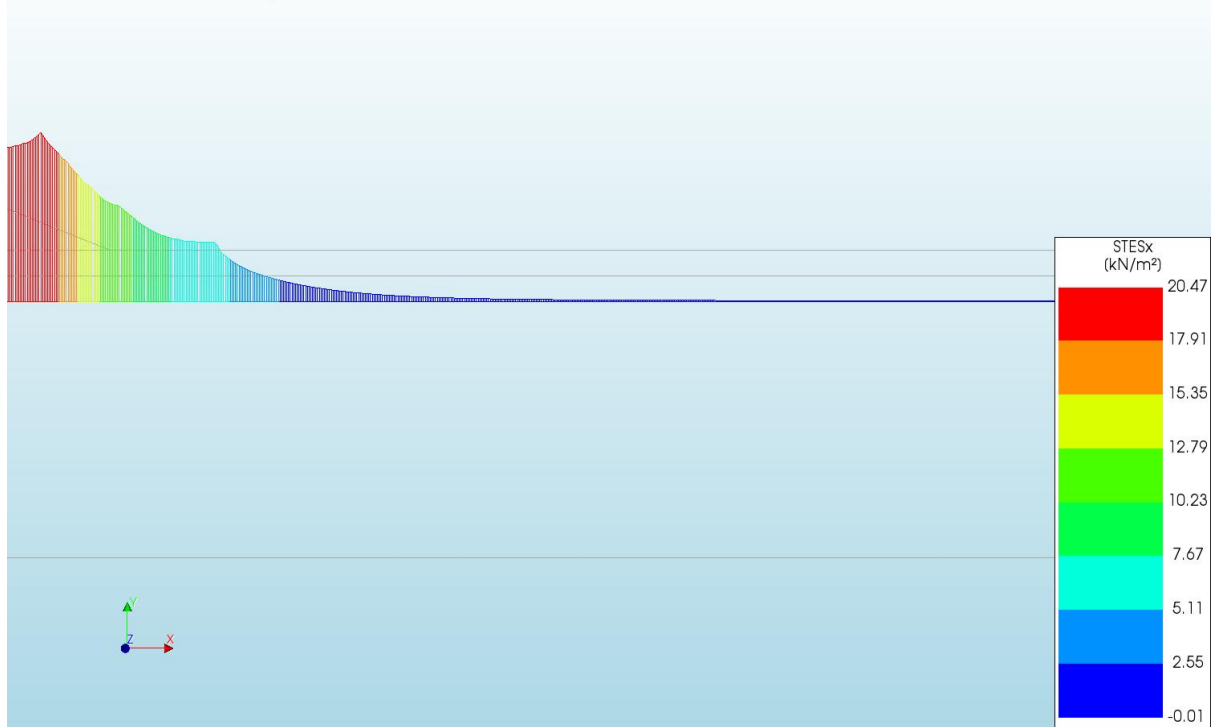




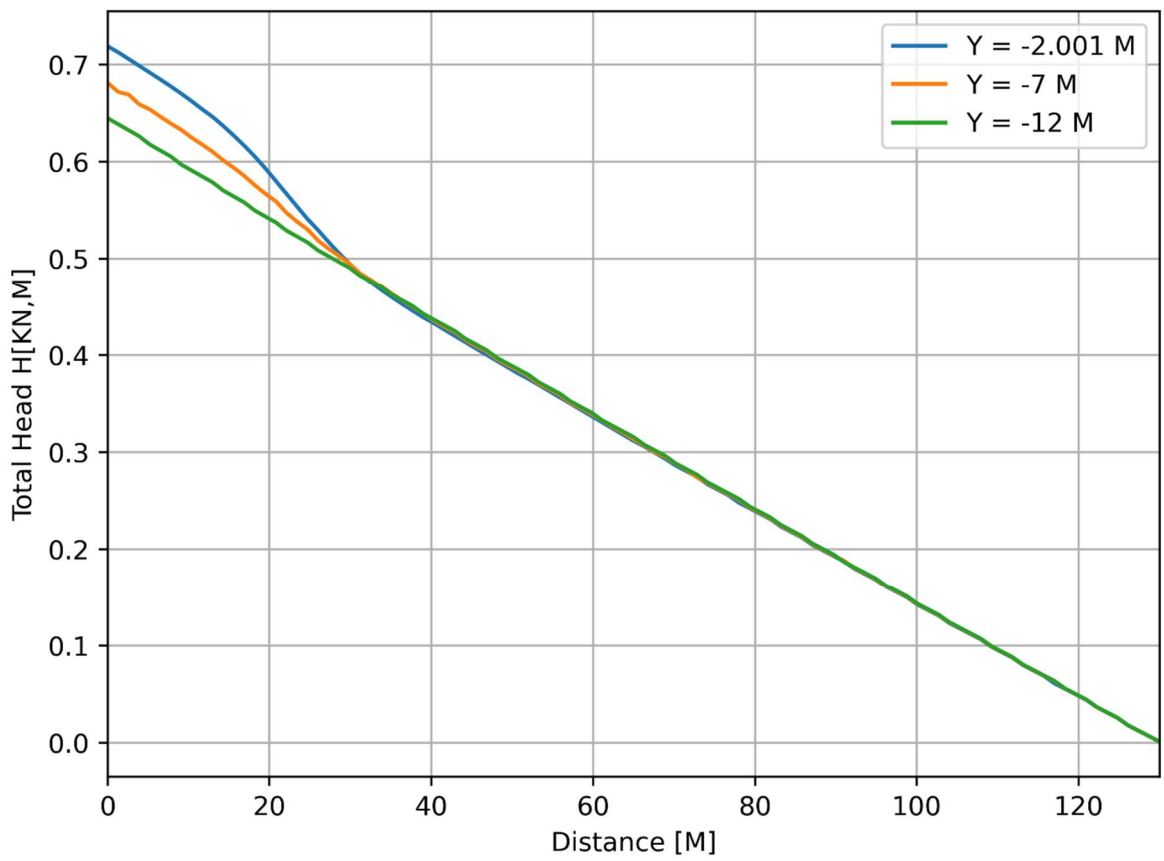
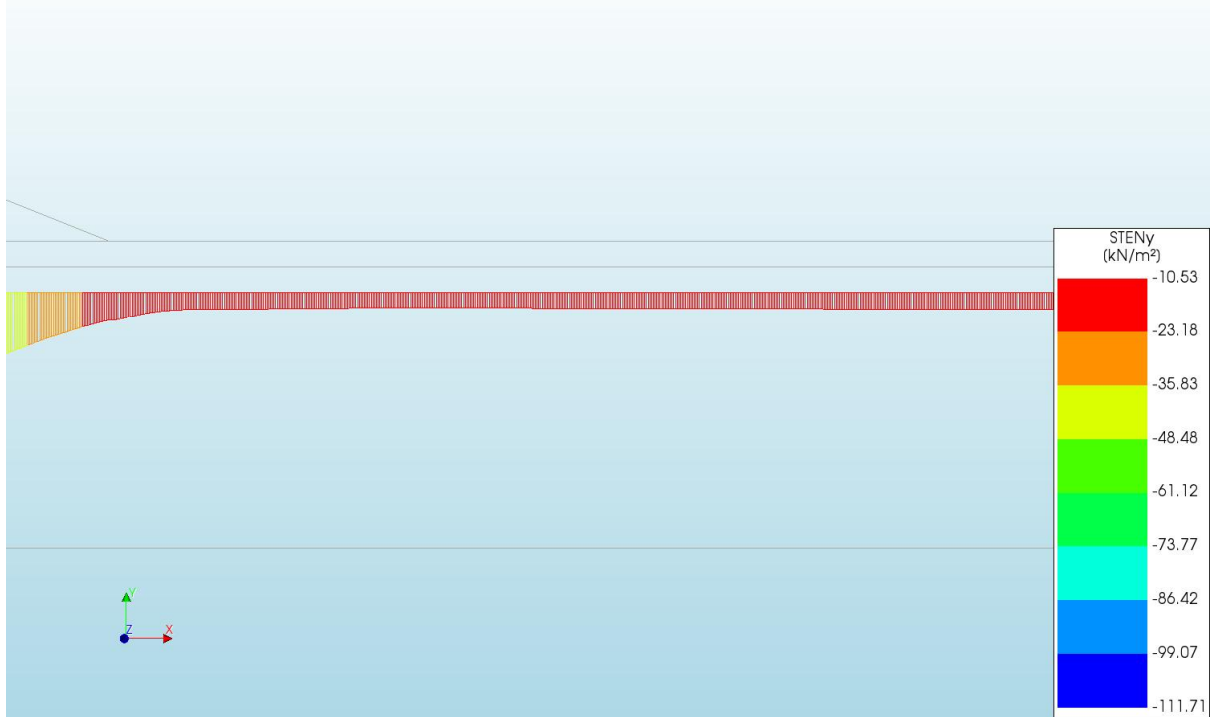
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -19.41mm max: 0.82mm

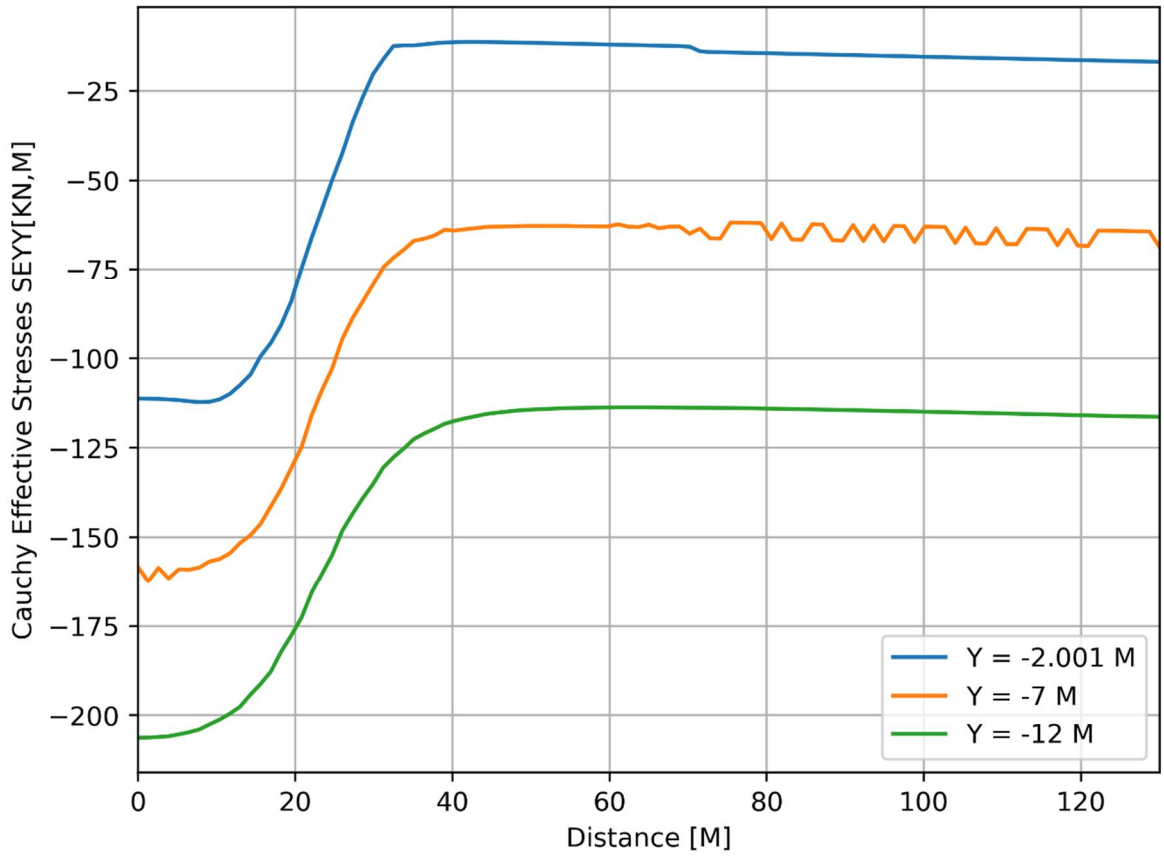


d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.01kN/m<sup>2</sup> max: 20.47kN/m<sup>2</sup>



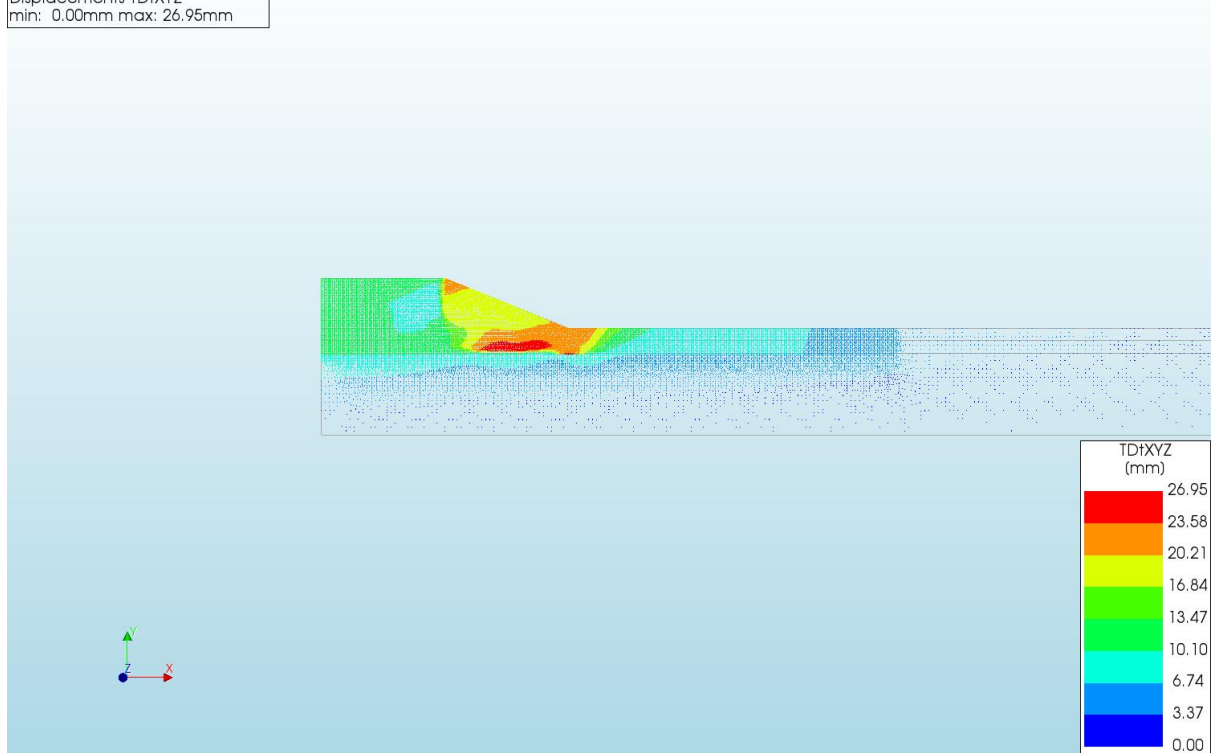
d=2\_c=15\_E=1\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 7, Time 1 day  
Interface Effective Tractions STENy  
min: -111.71kN/m<sup>2</sup> max: -10.53kN/m<sup>2</sup>



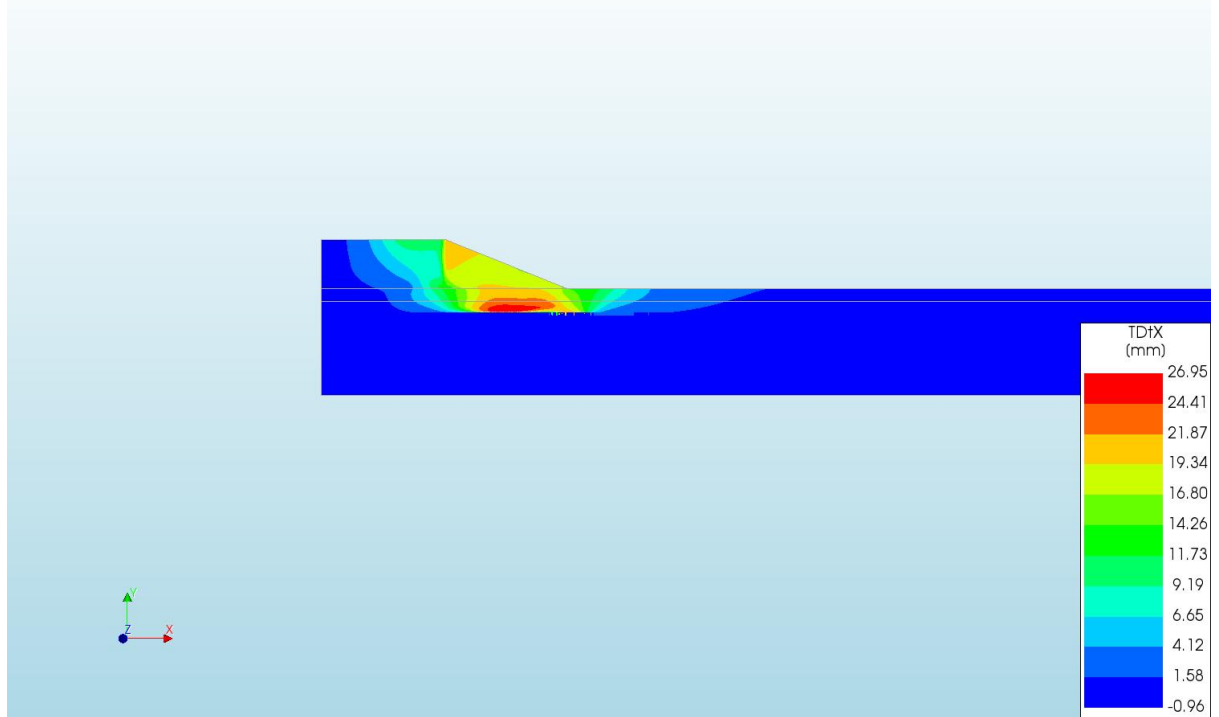


**A.2.19 'Output d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821'**

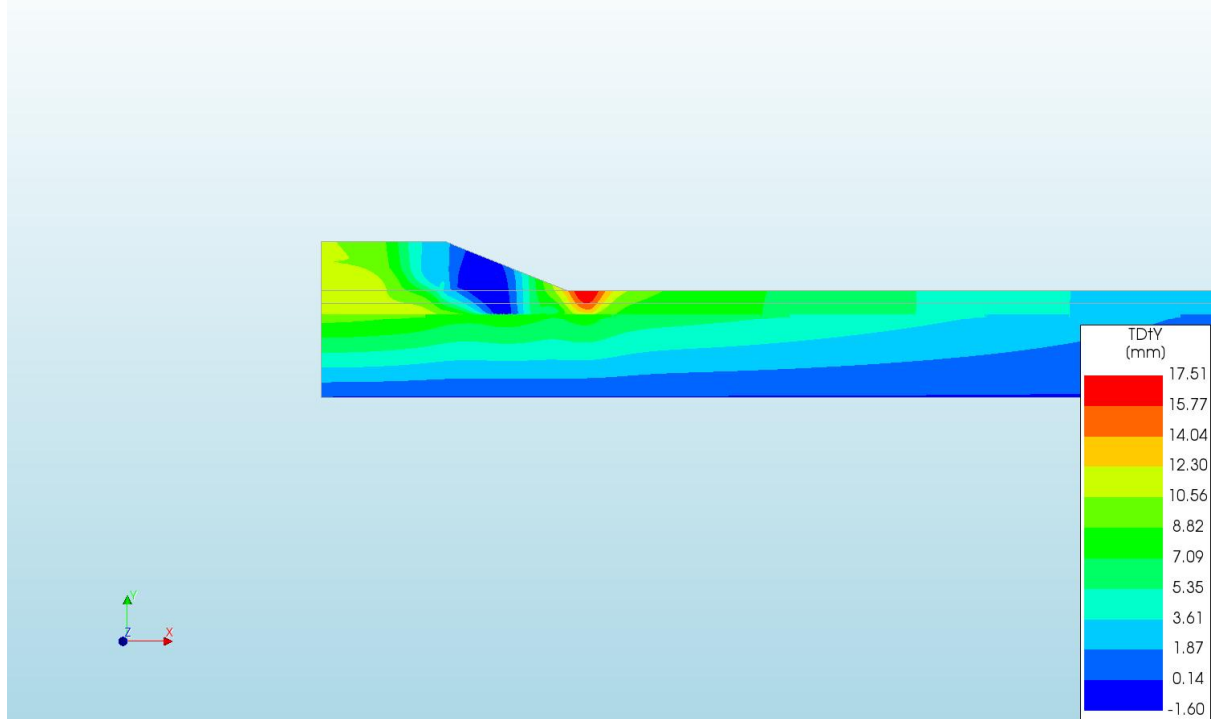
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
 Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
 Displacements TDXYZ  
 min: 0.00mm max: 26.95mm



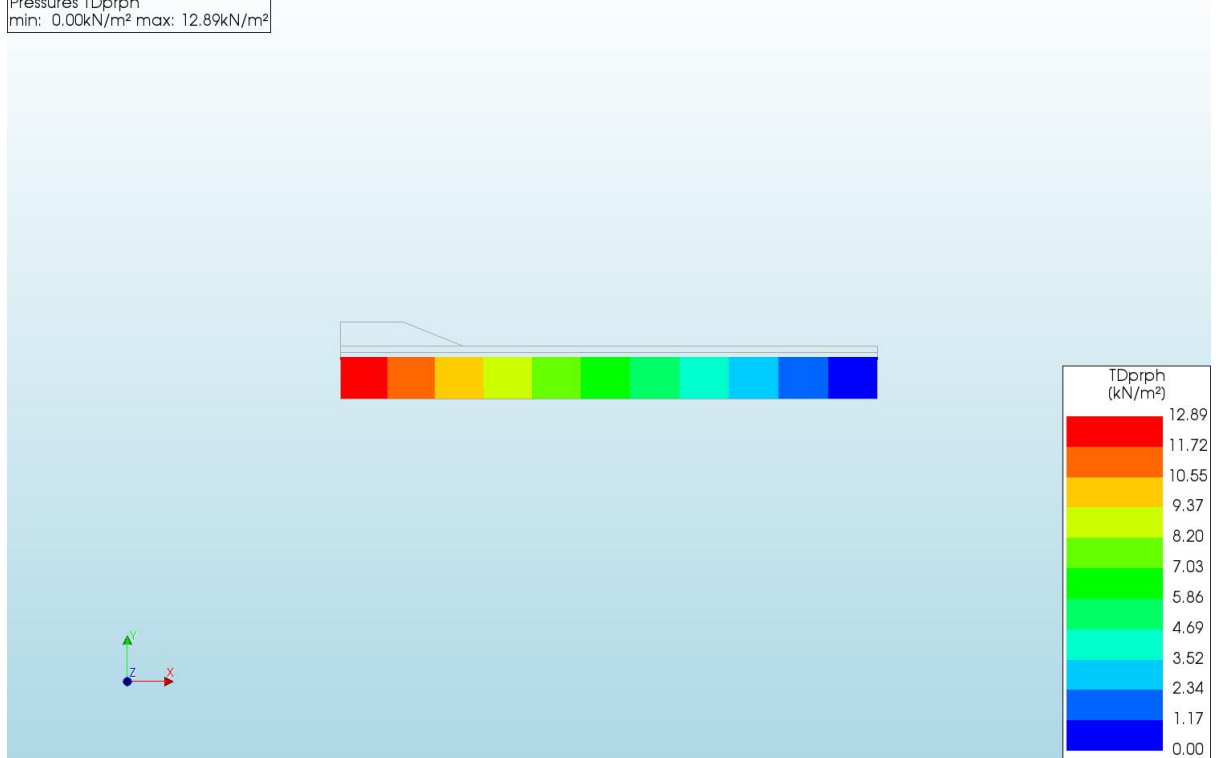
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Displacements TDtX  
min: -0.96mm max: 26.95mm



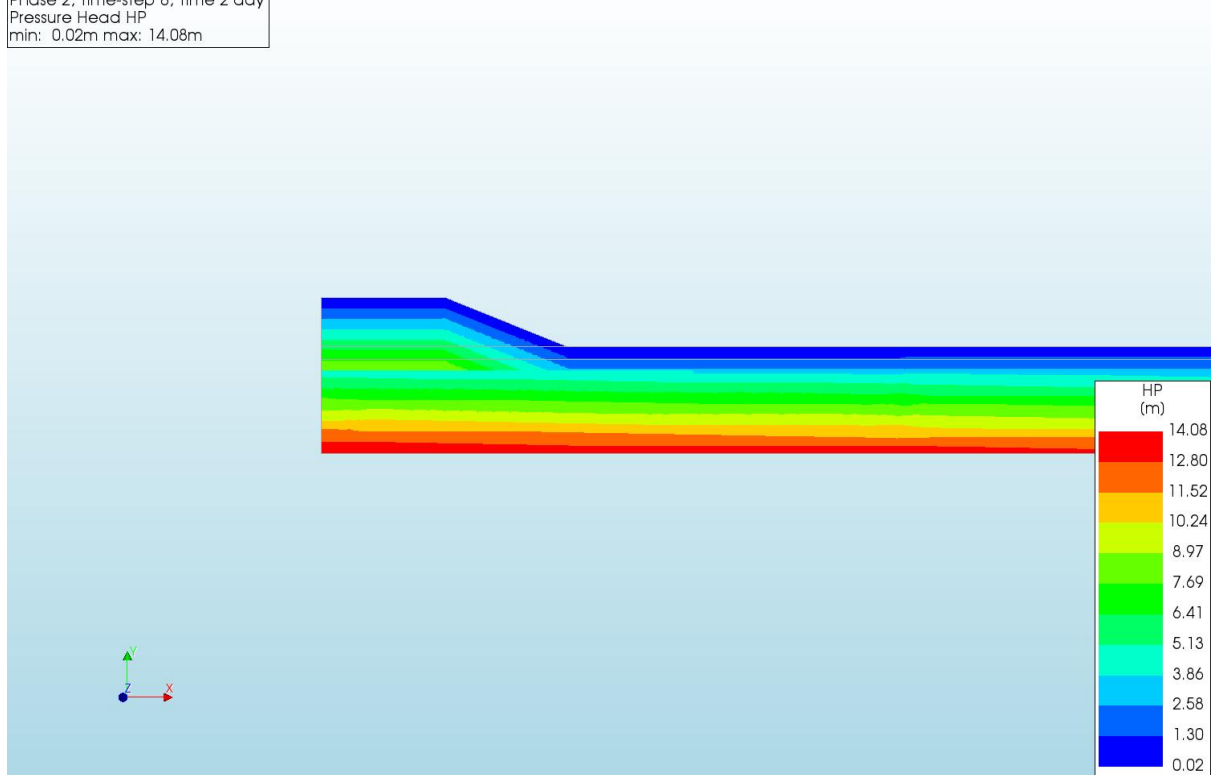
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Displacements TDtY  
min: -1.60mm max: 17.51mm



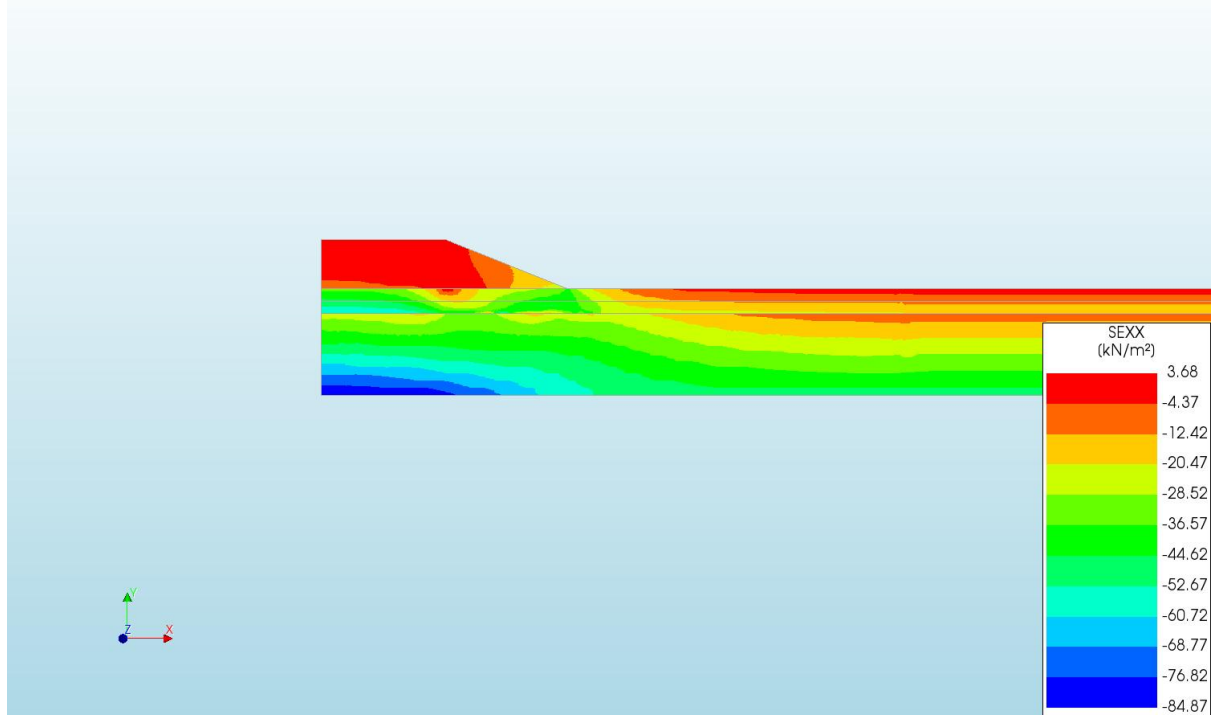
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 12.89kN/m<sup>2</sup>



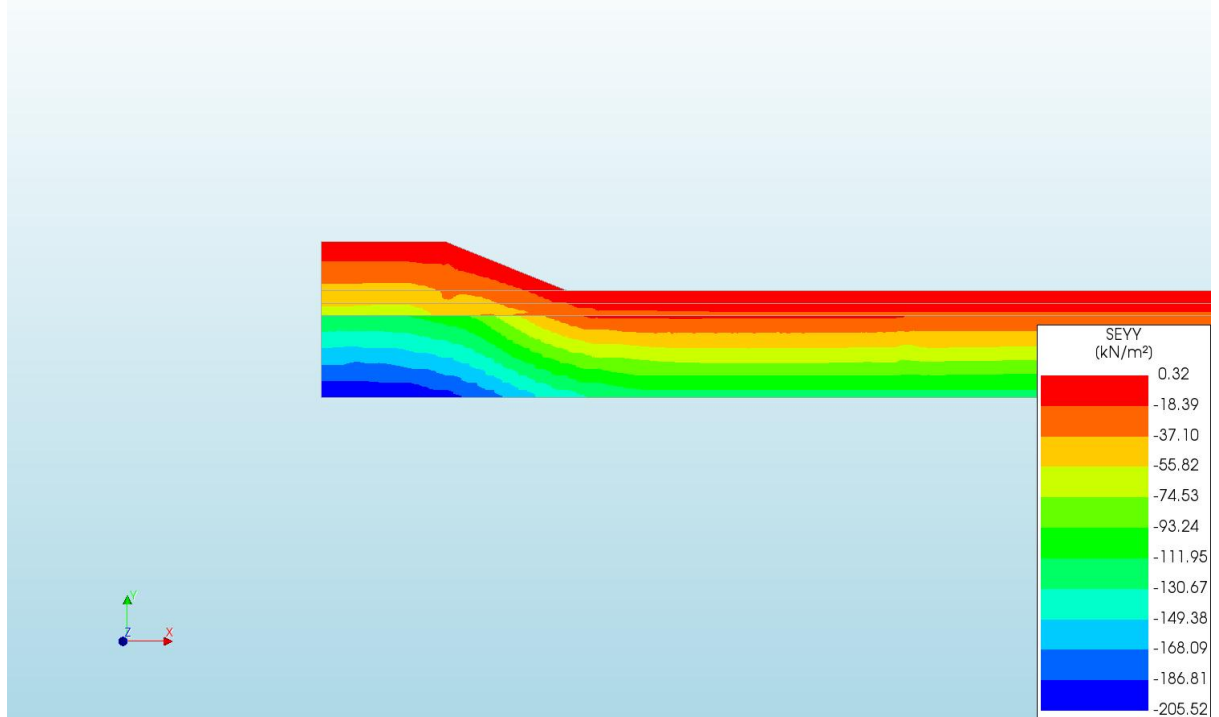
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 14.08m



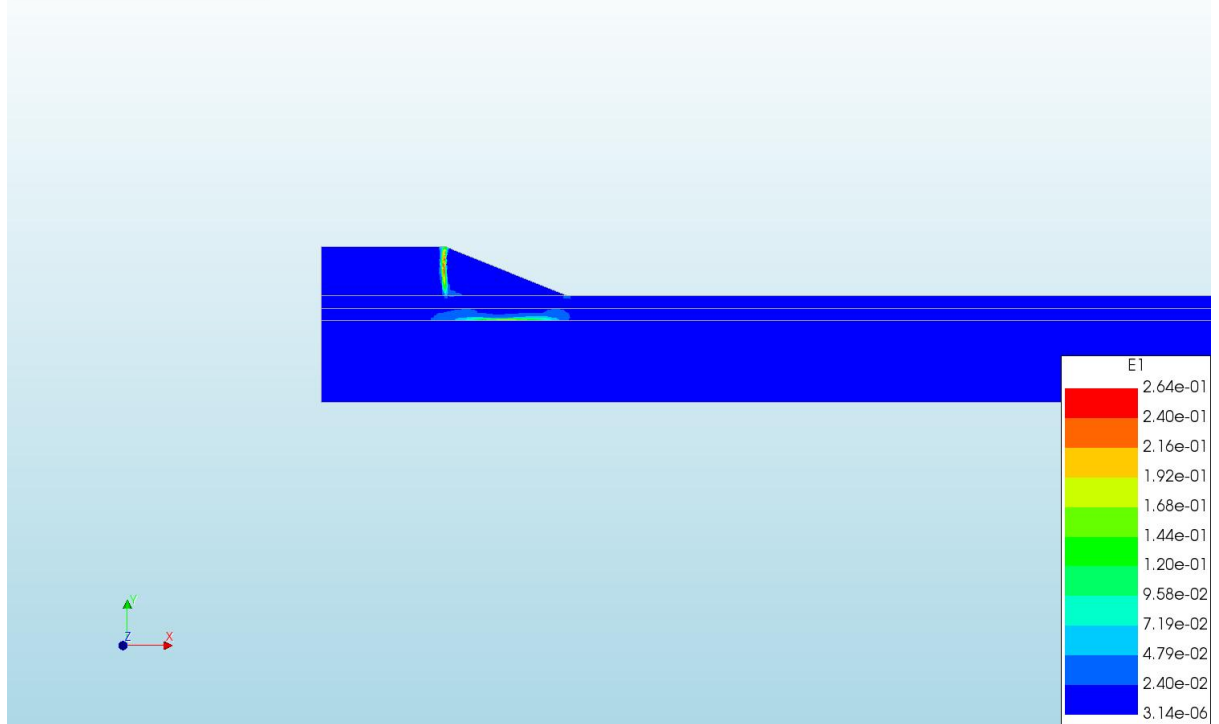
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -84.87kN/m<sup>2</sup> max: 3.68kN/m<sup>2</sup>



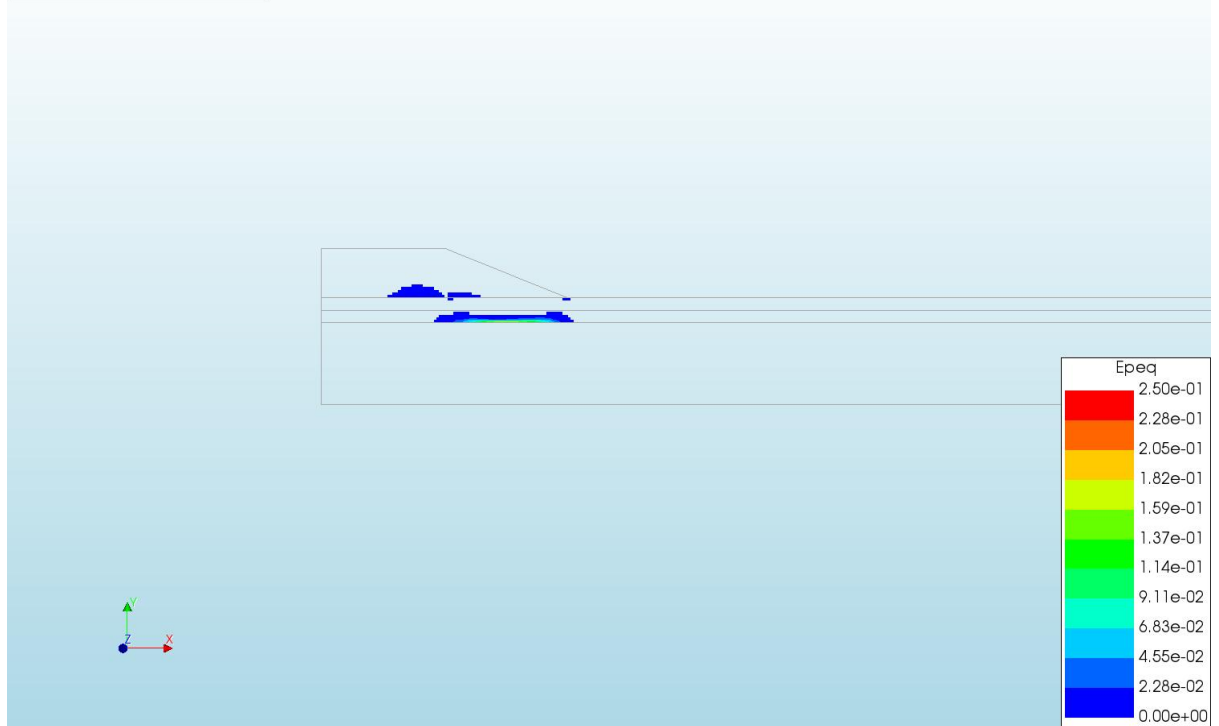
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -205.52kN/m<sup>2</sup> max: 0.32kN/m<sup>2</sup>



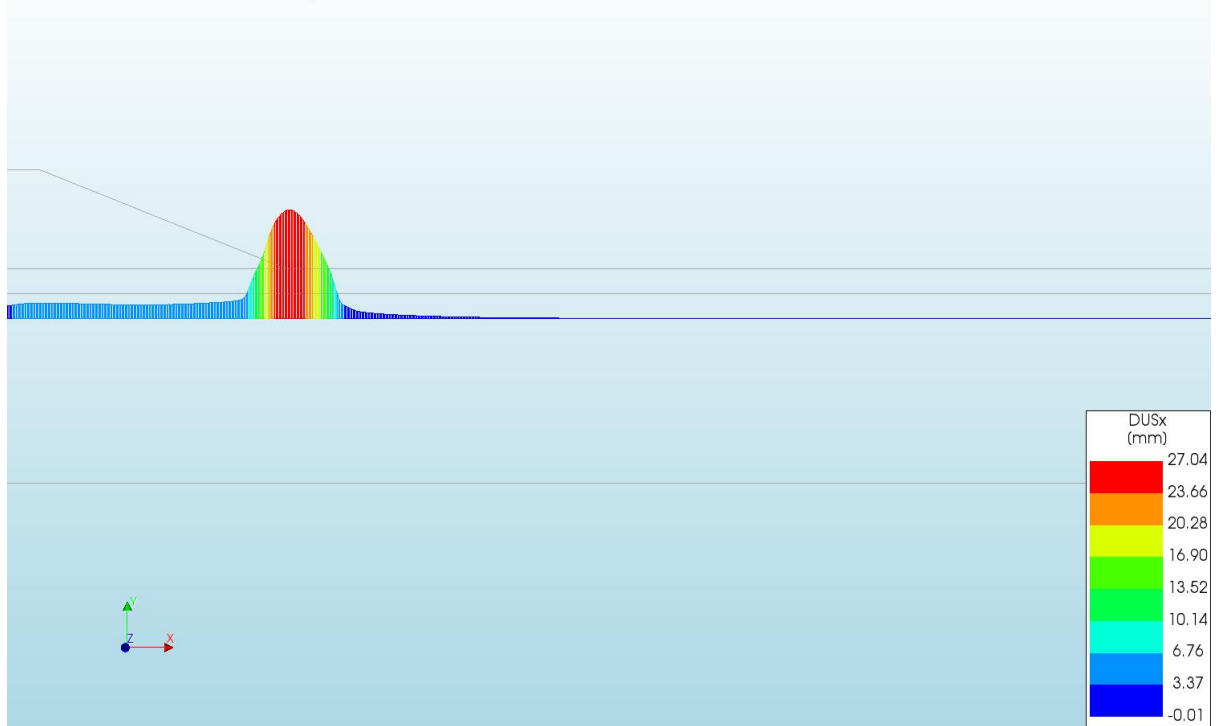
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Total Strains E1  
min: 3.14e-06 max: 2.64e-01



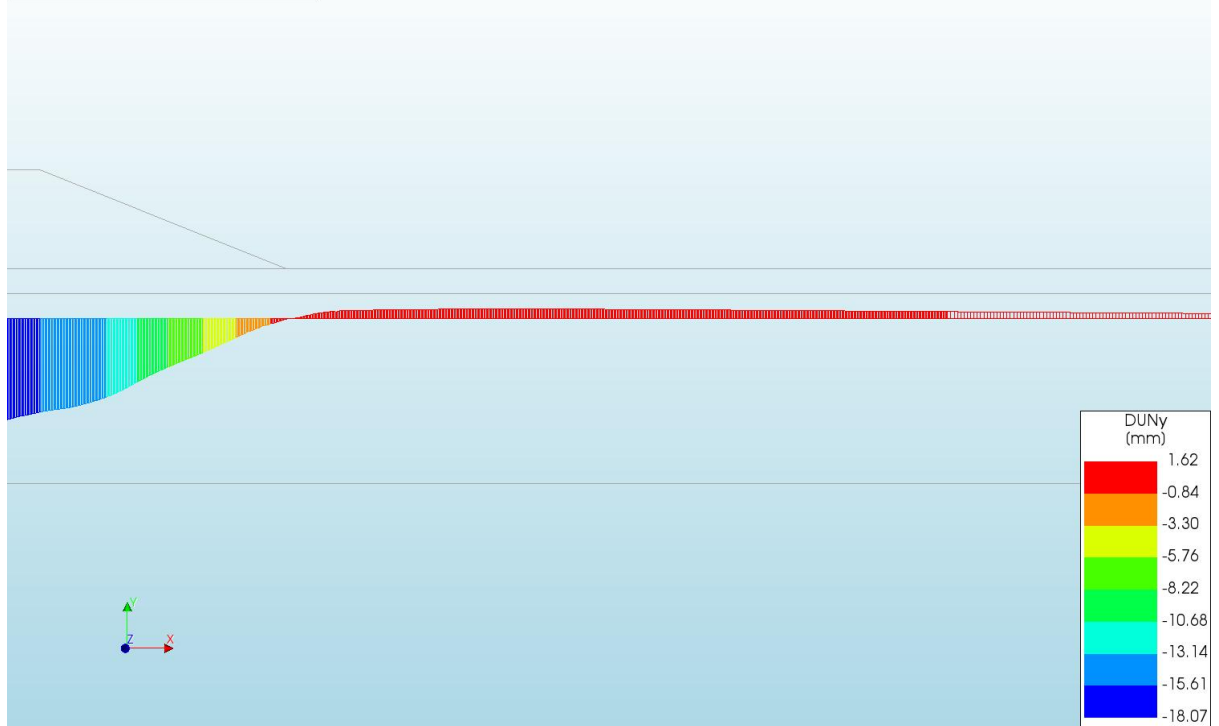
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 2.50e-01



d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 27.04mm

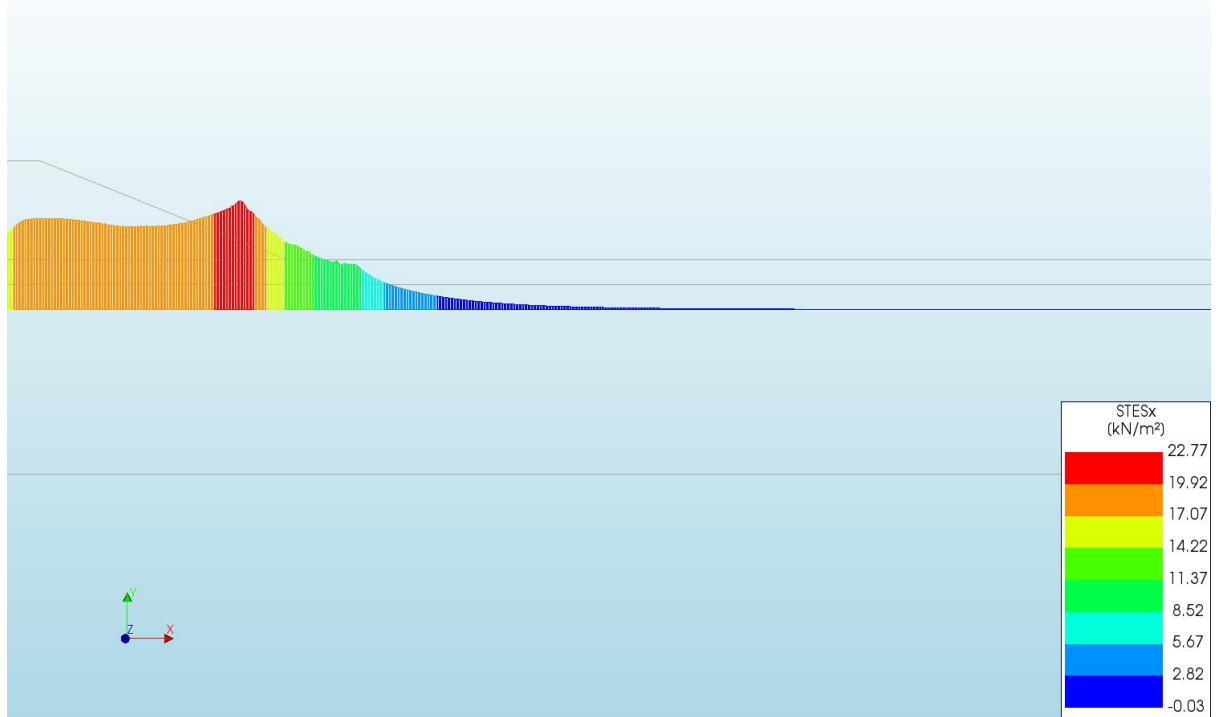


d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -18.07mm max: 1.62mm

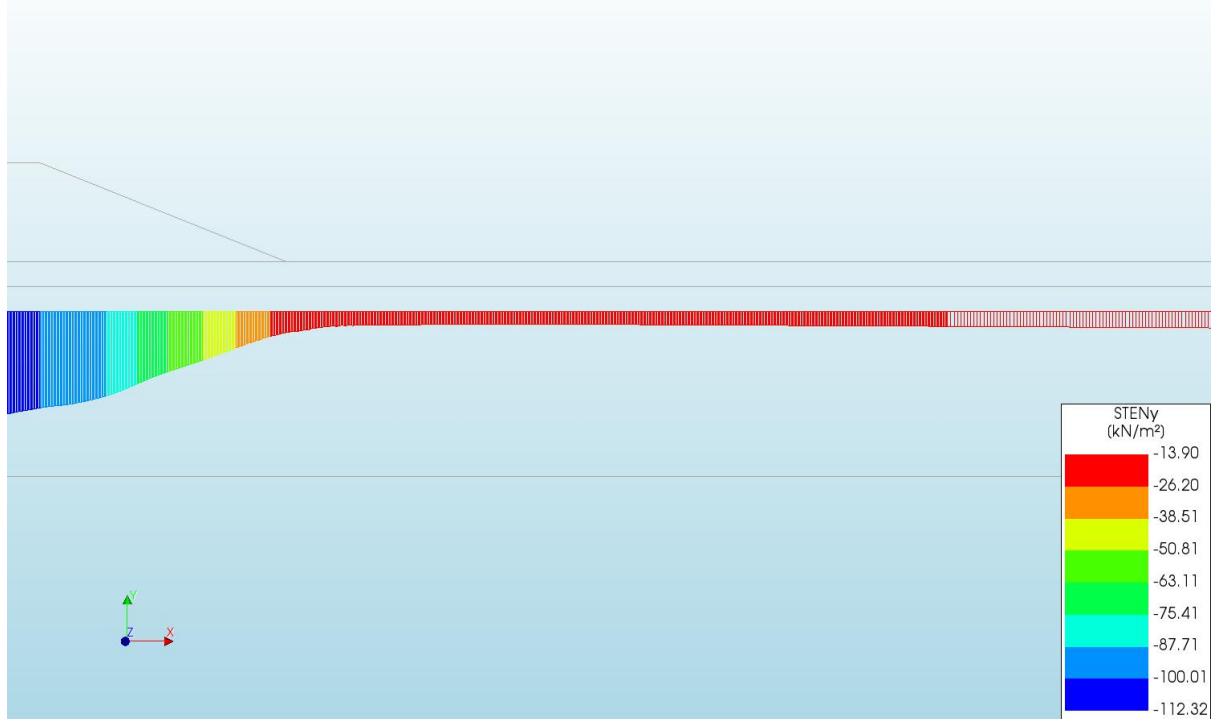


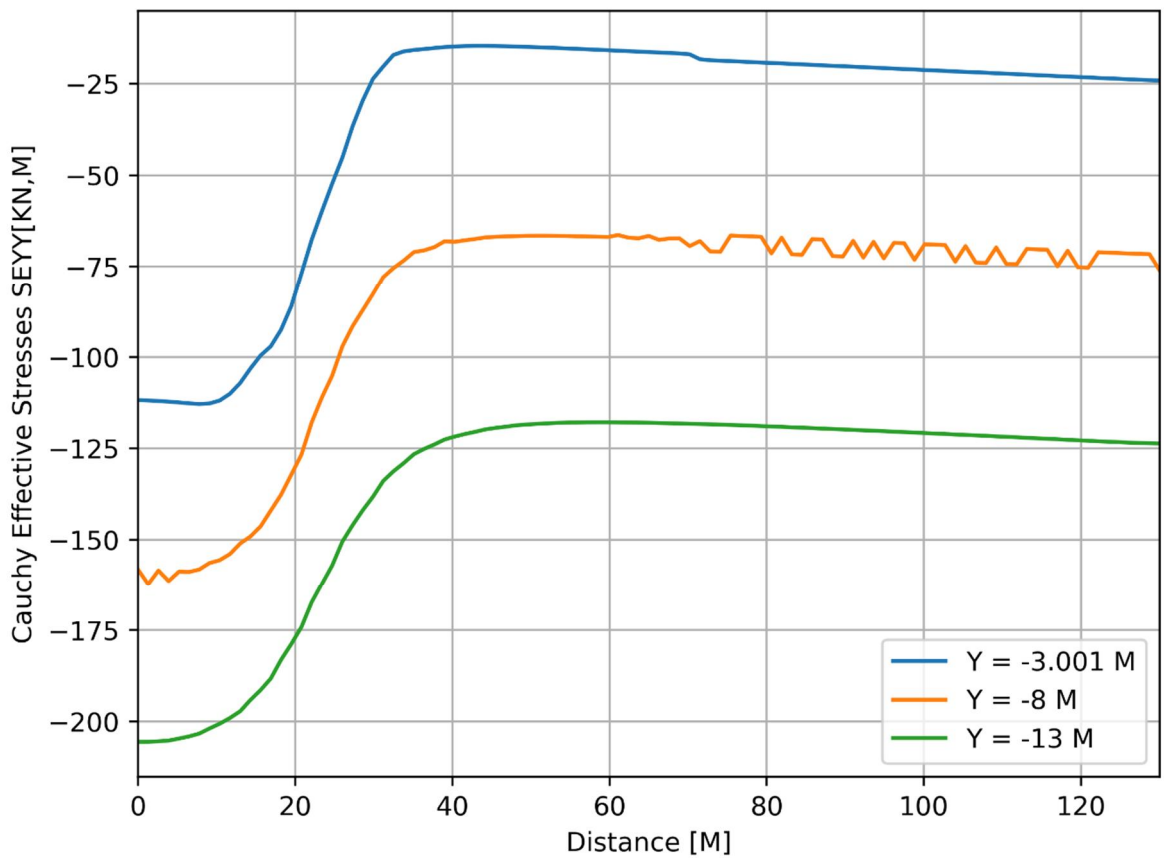
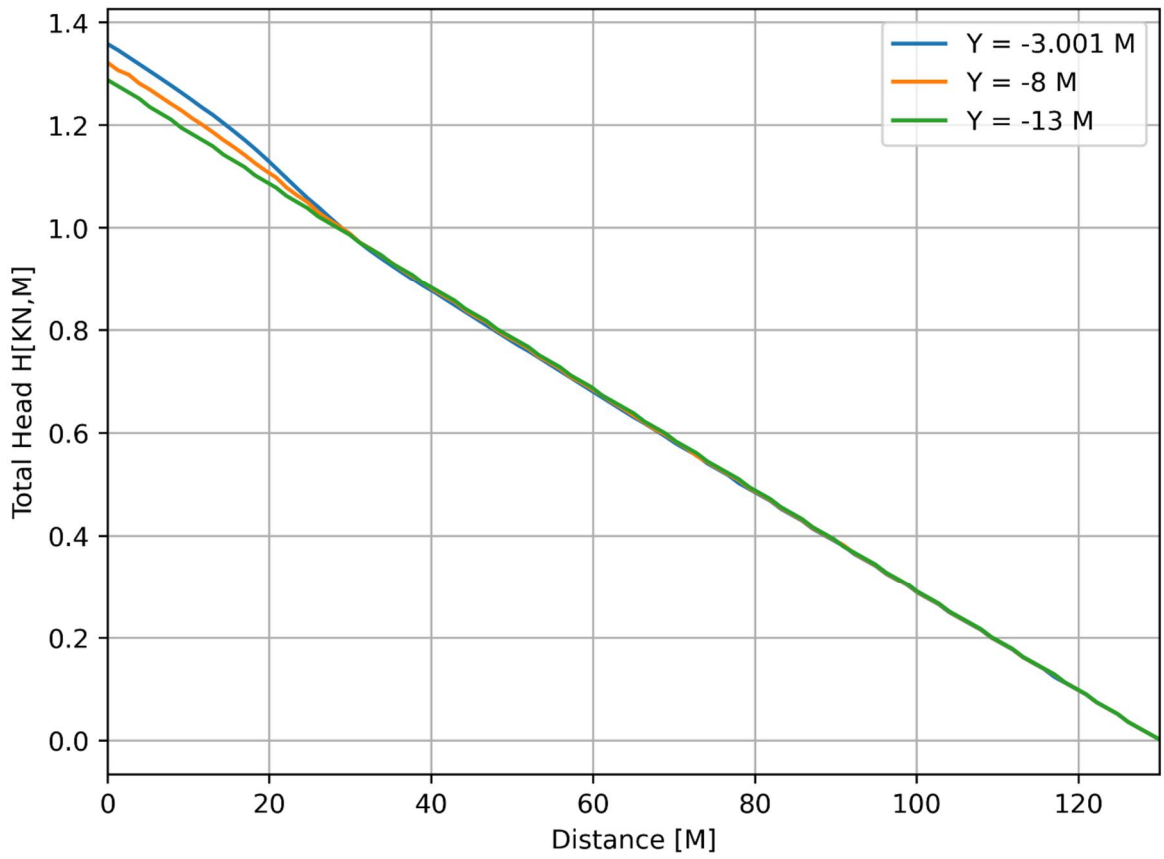


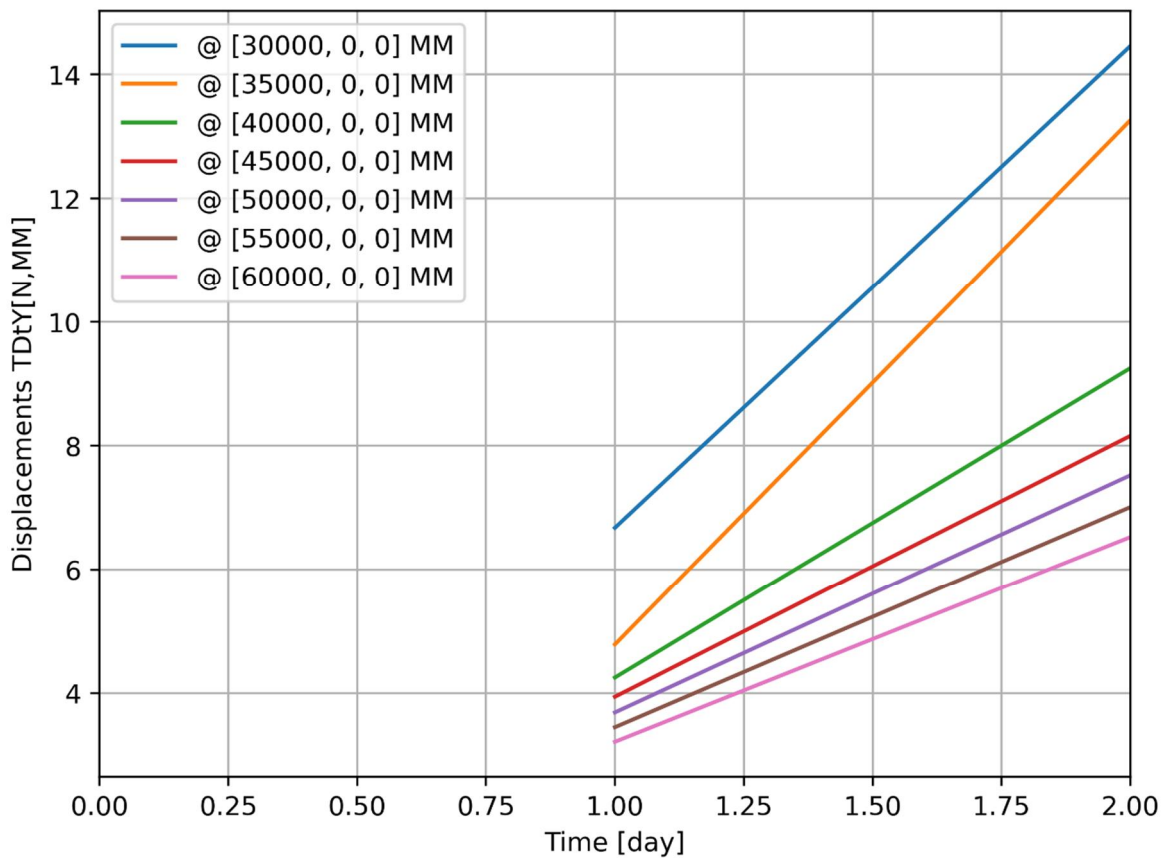
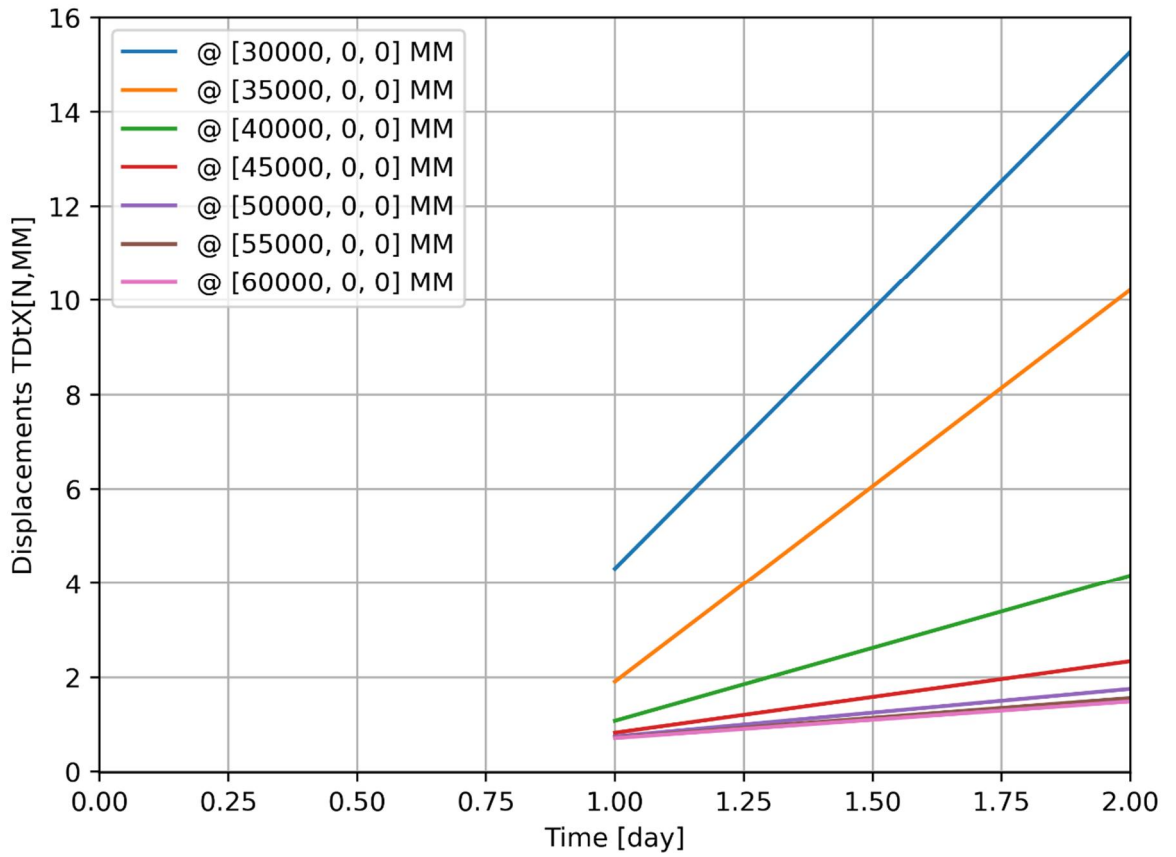
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.03kN/m<sup>2</sup> max: 22.77kN/m<sup>2</sup>

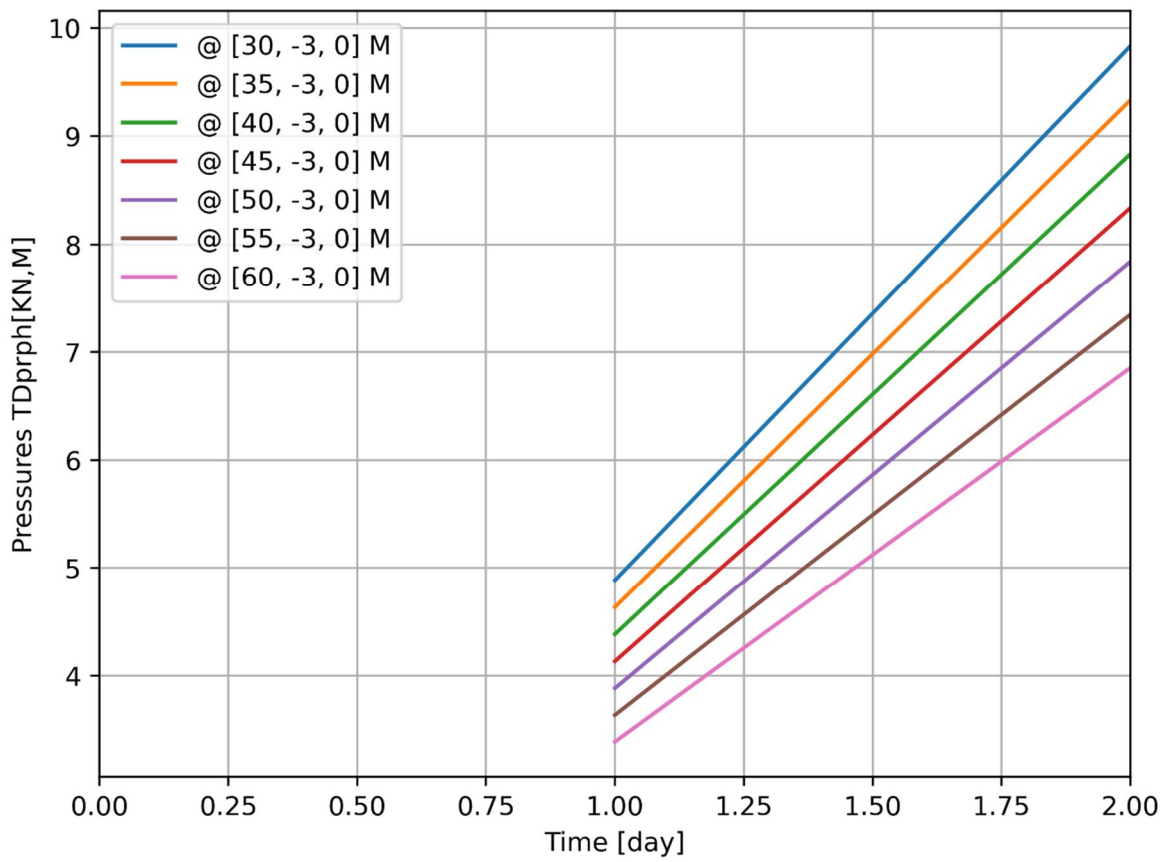
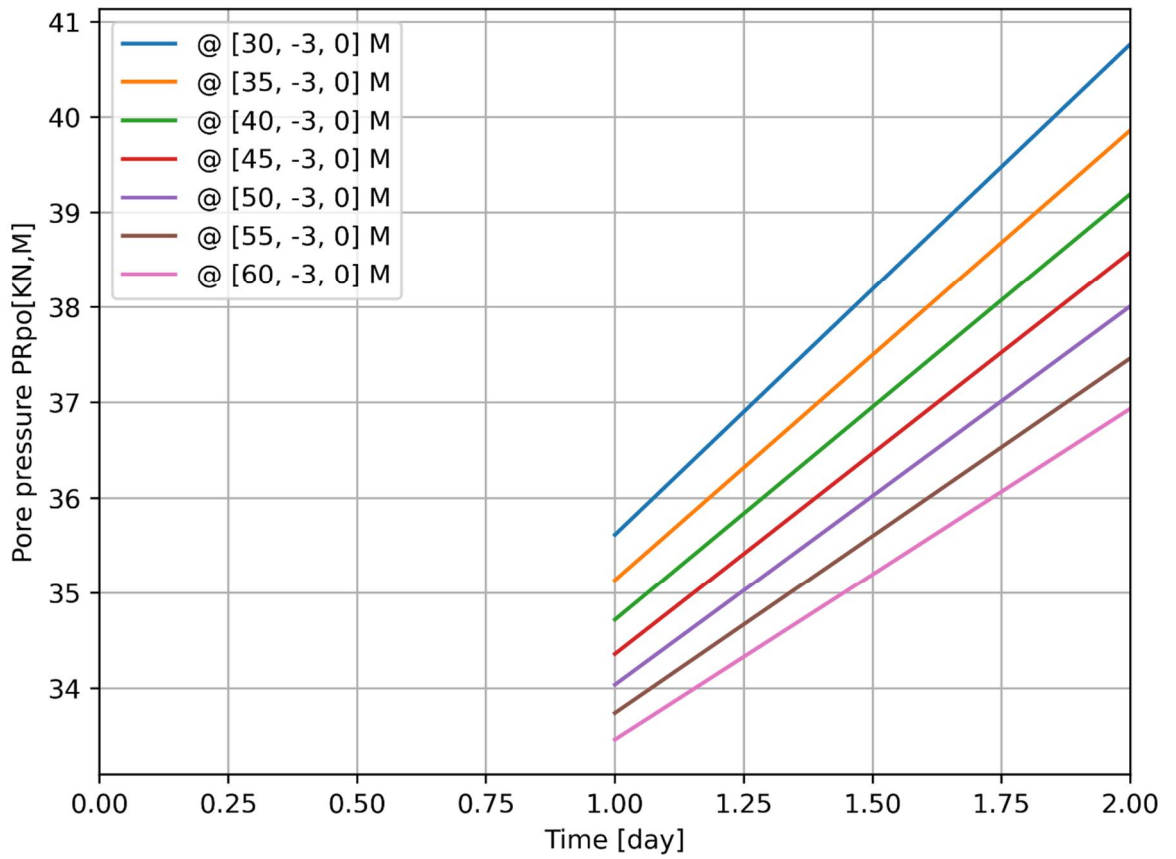


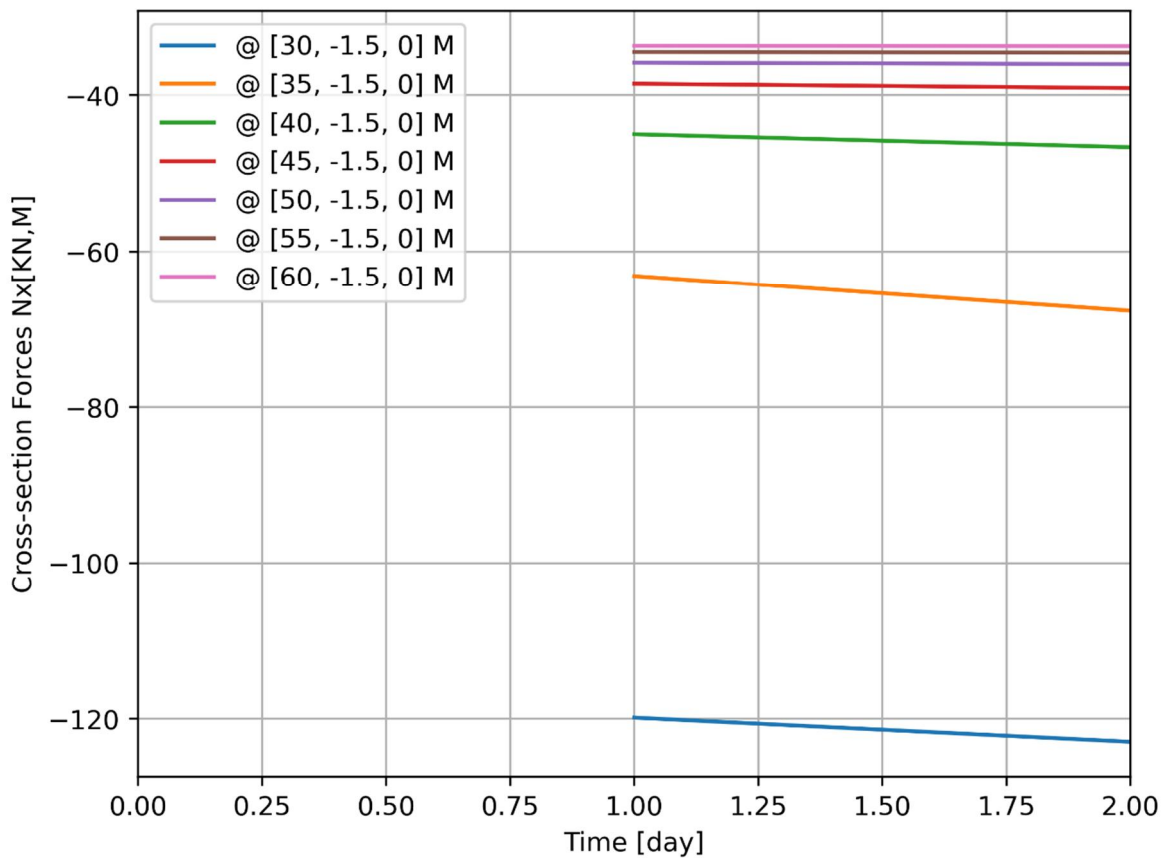
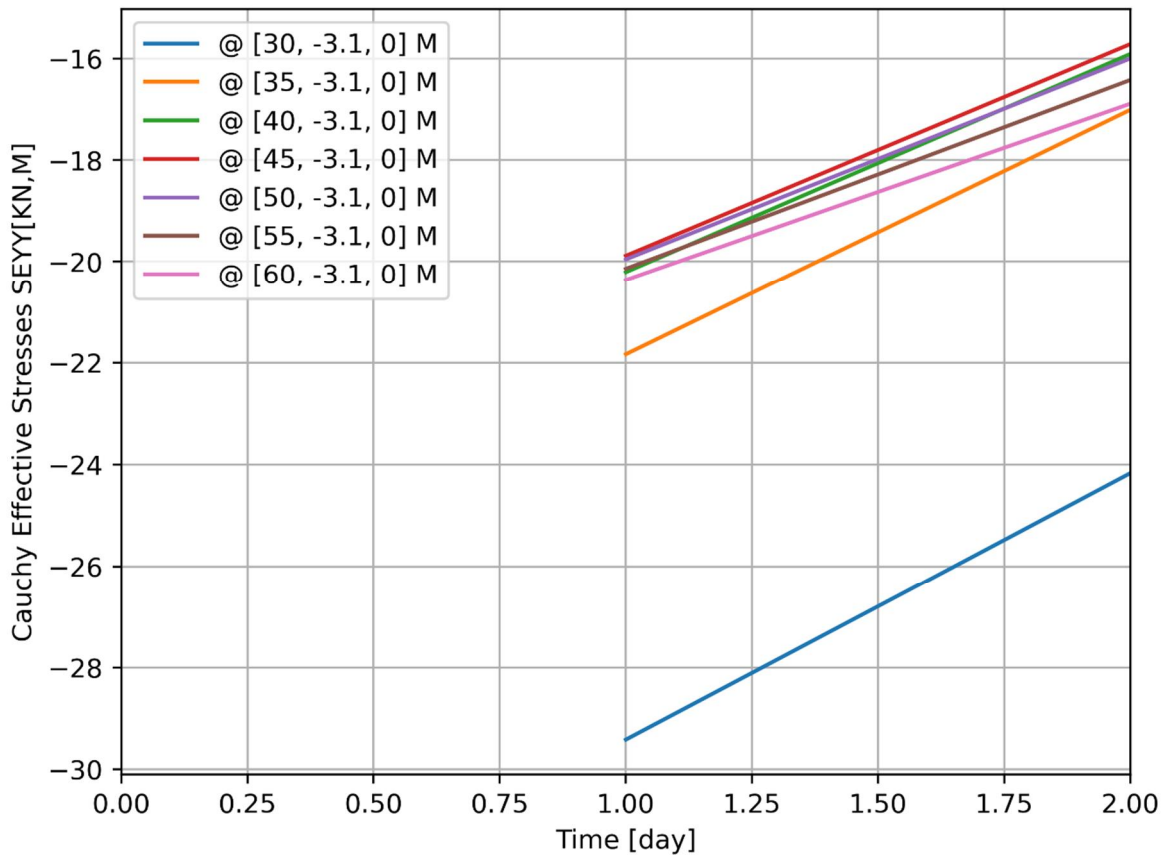
d=3\_c=18\_E=1\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 8, Time 2 day  
Interface Effective Traction STENy  
min: -112.32kN/m<sup>2</sup> max: -13.90kN/m<sup>2</sup>

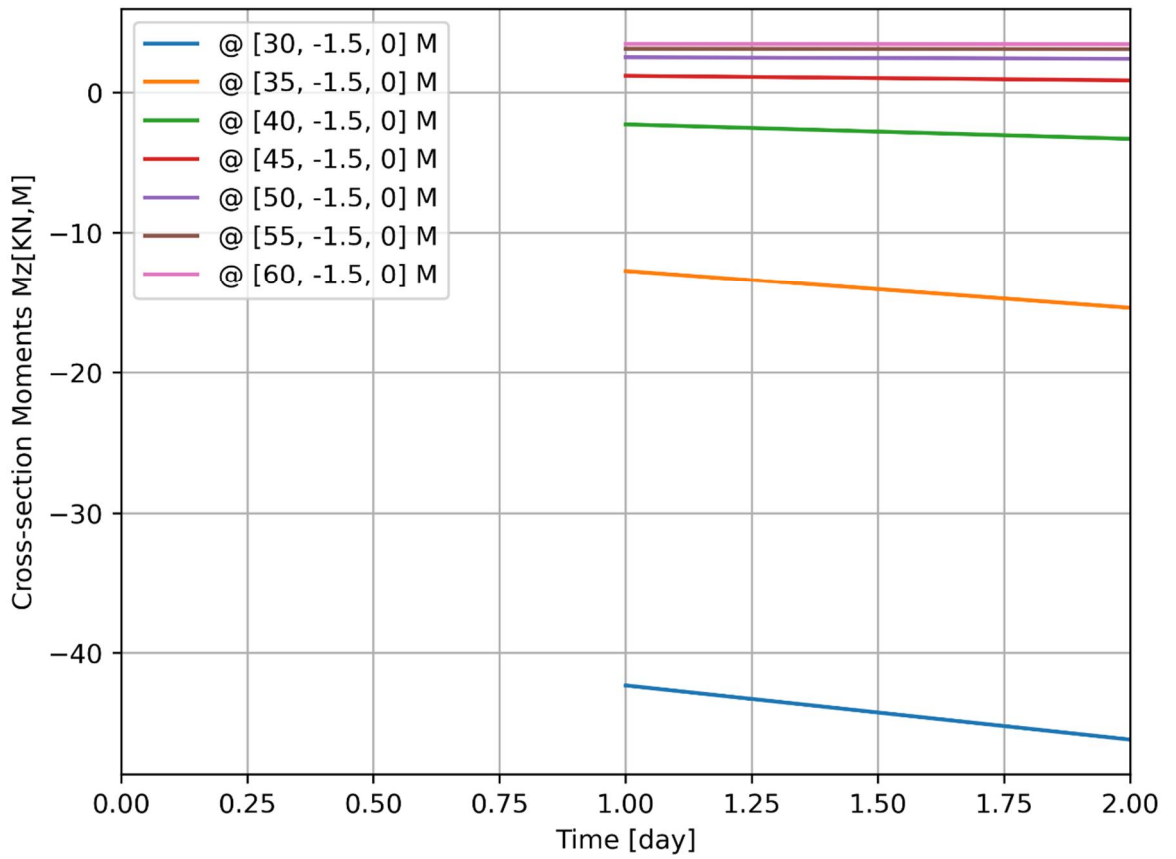






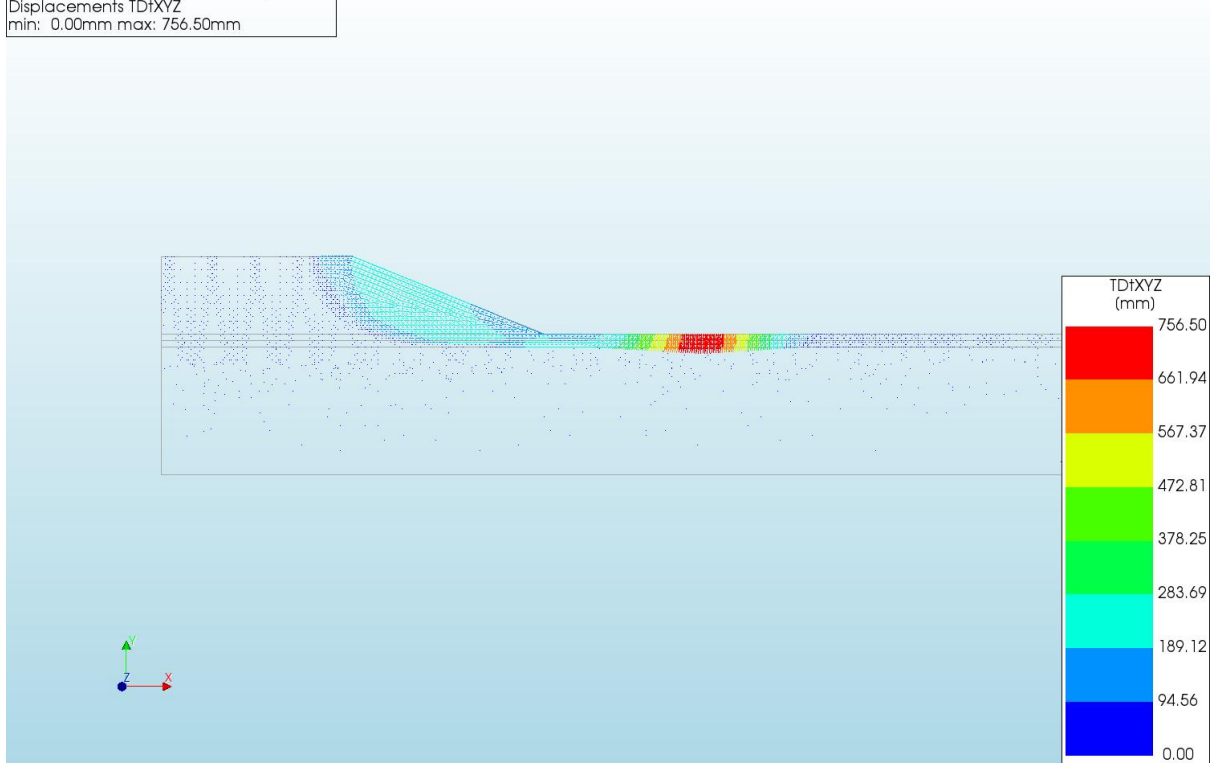




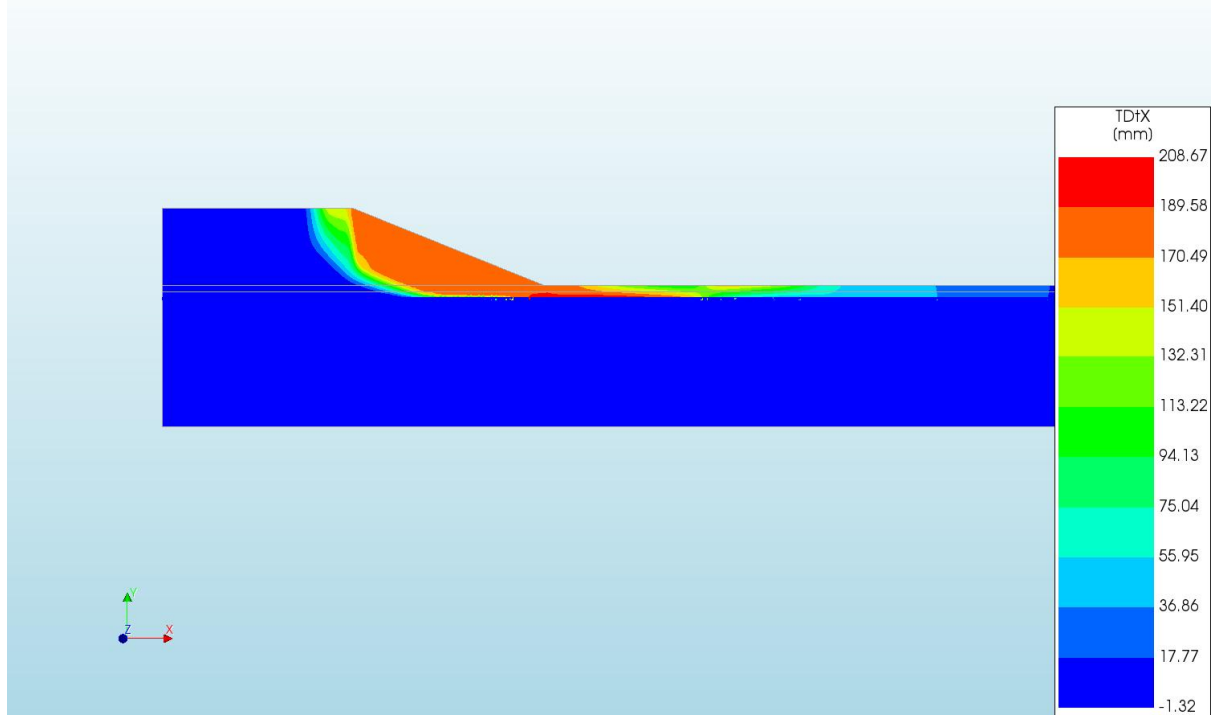


**A.2.20 'Output\_d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818'**

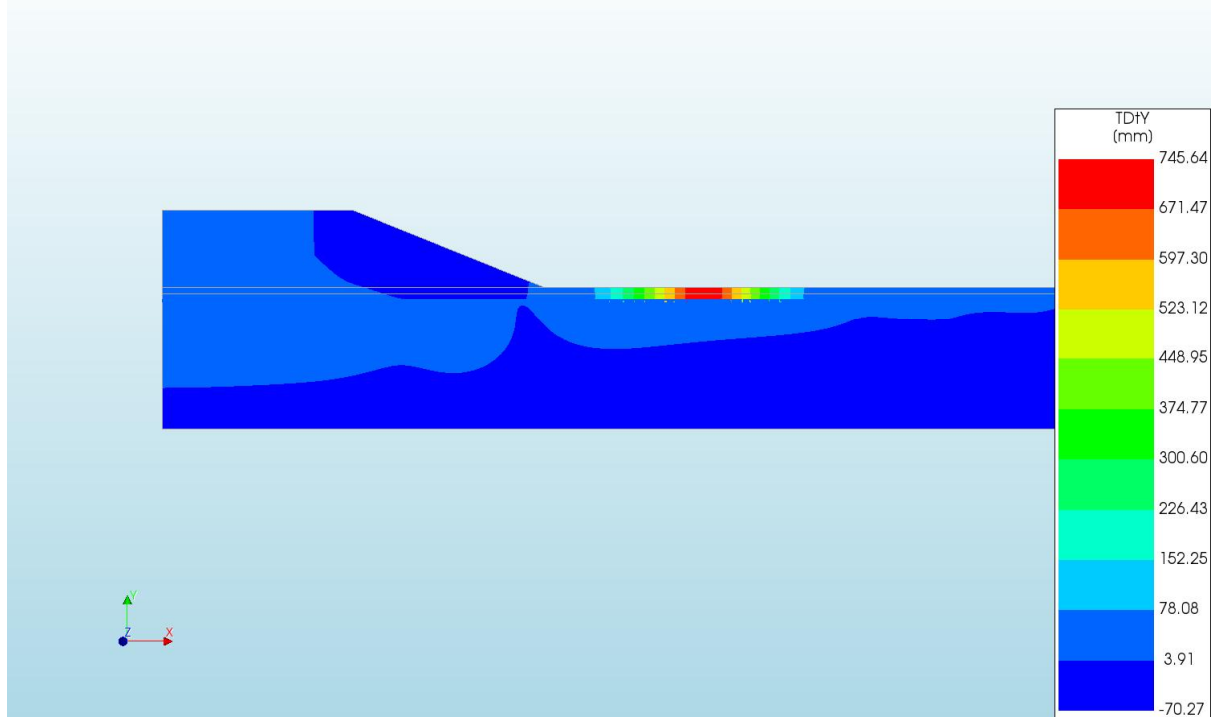
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
 Displacements TDiXYZ  
 min: 0.00mm max: 756.50mm



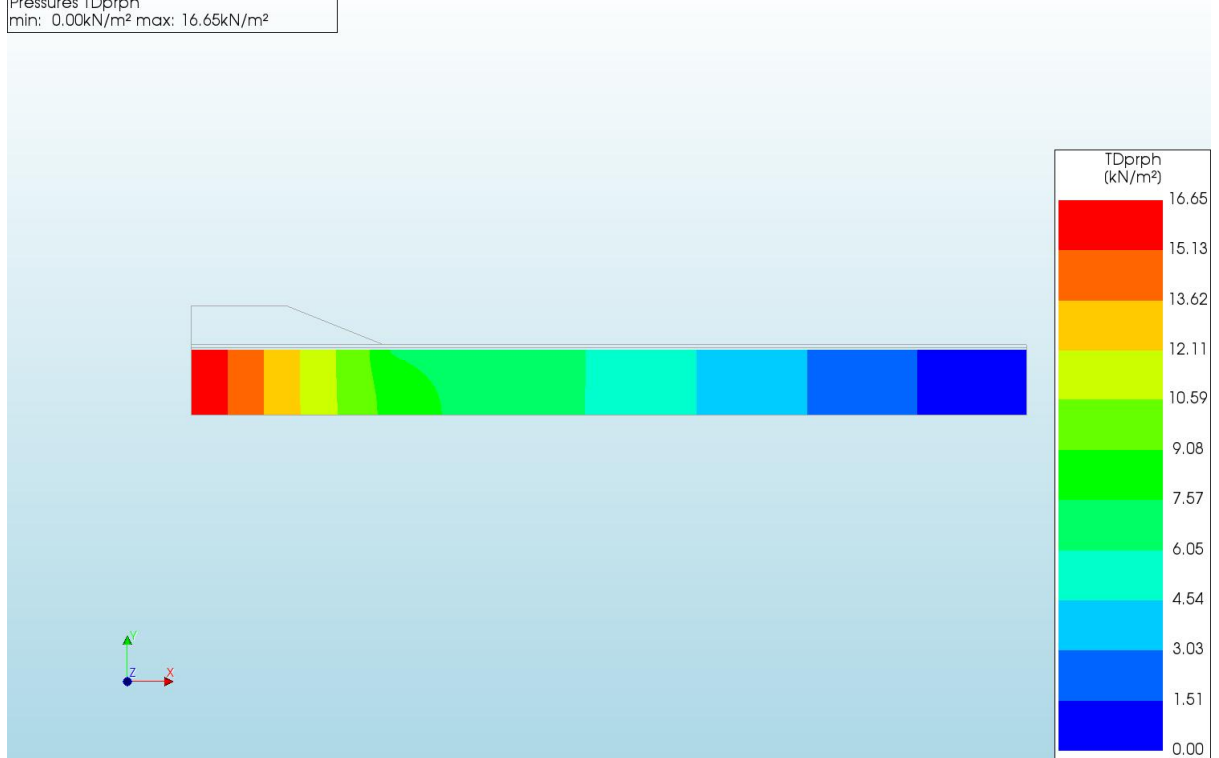
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Displacements TDtX  
min: -1.32mm max: 208.67mm



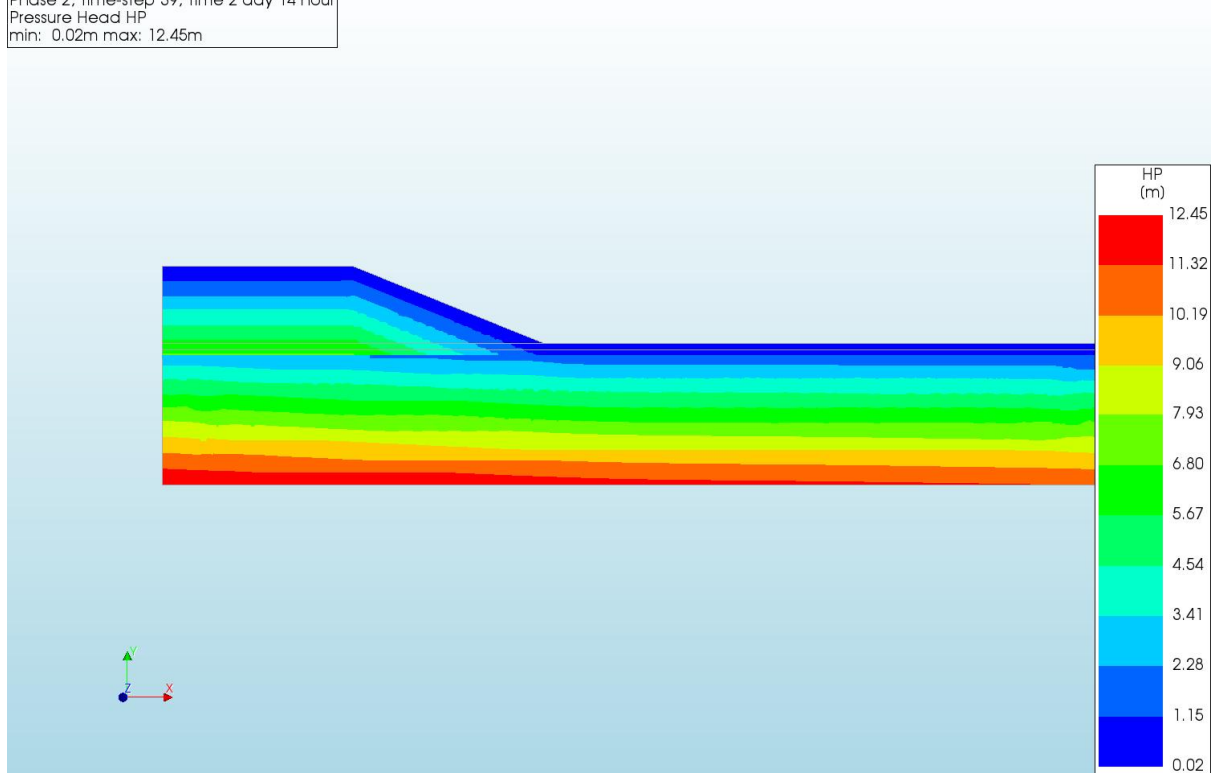
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Displacements TDtY  
min: -70.27mm max: 745.64mm



d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 16.65kN/m<sup>2</sup>

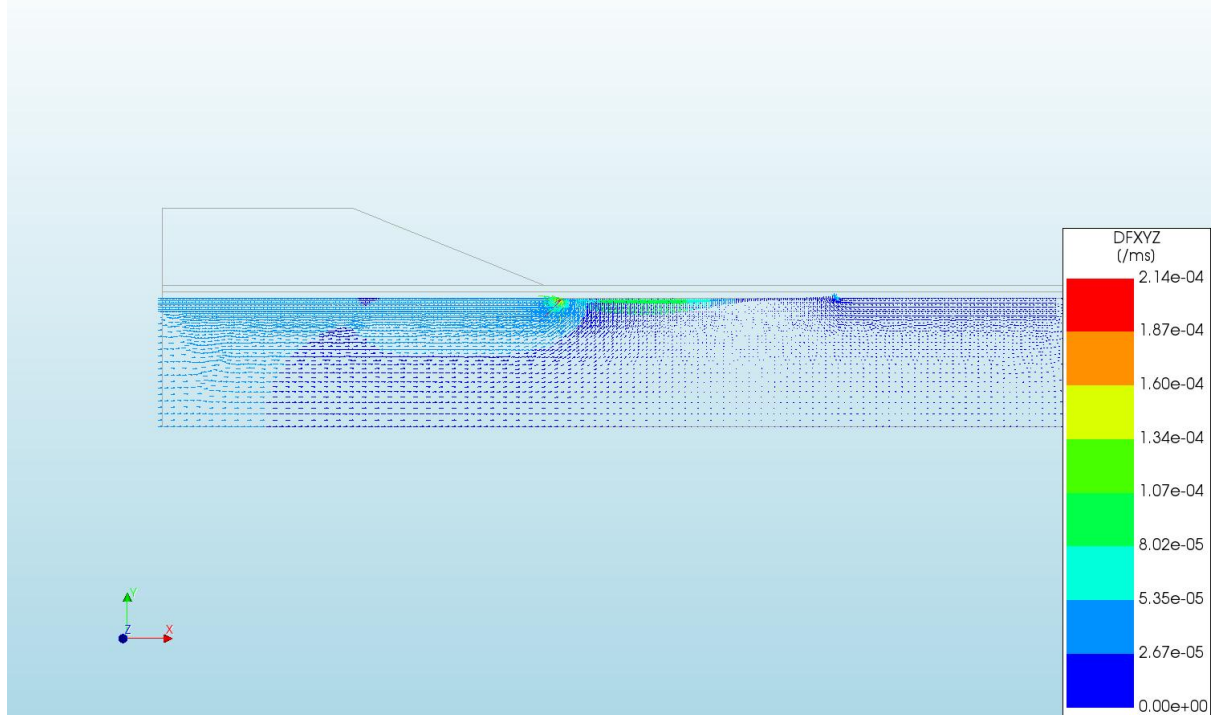


d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.45m

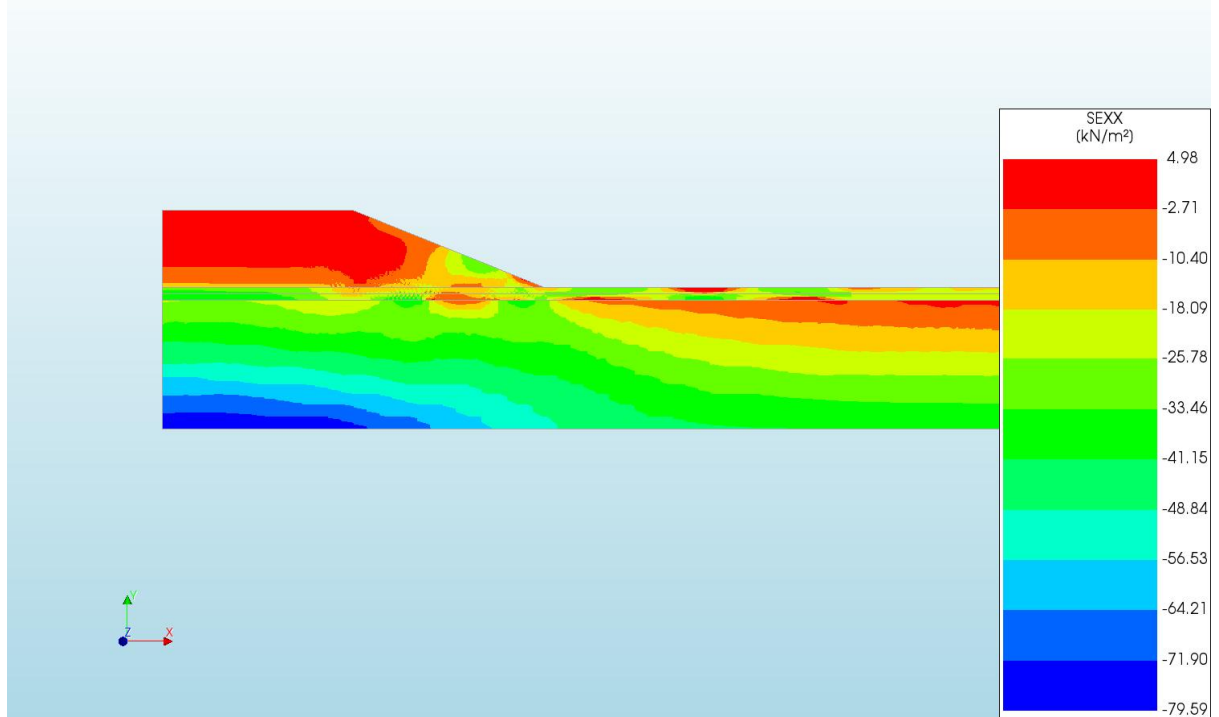




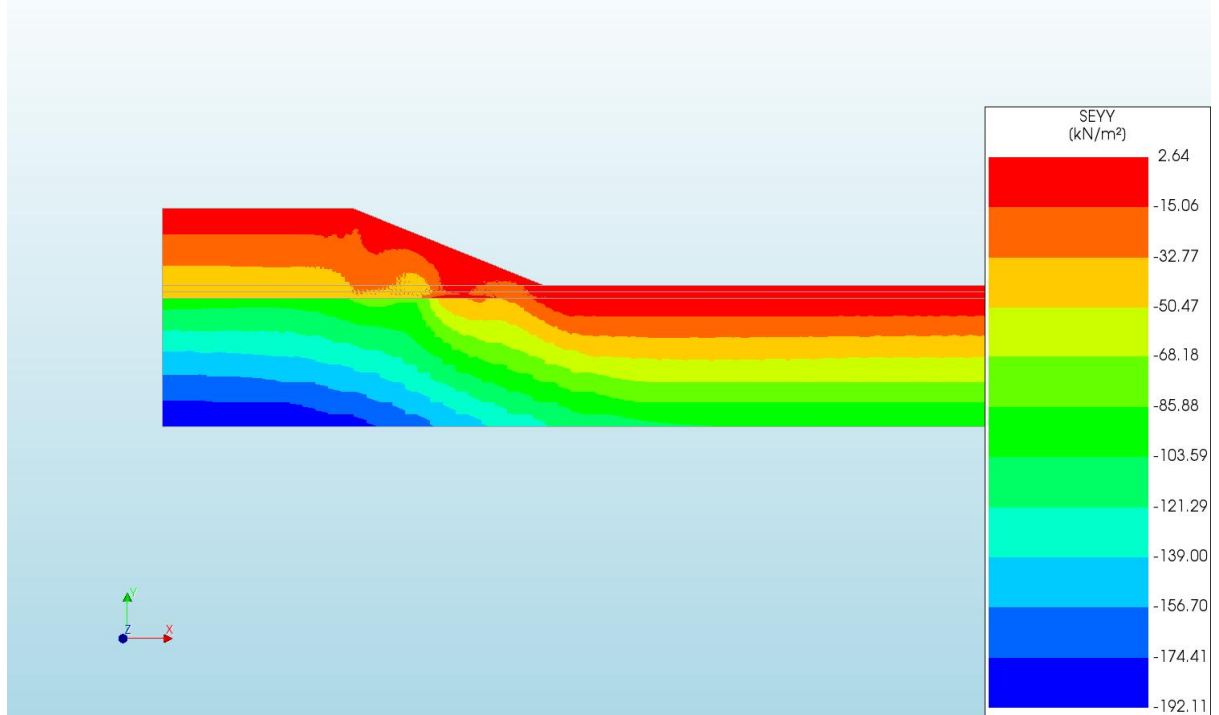
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.14e-04/ms



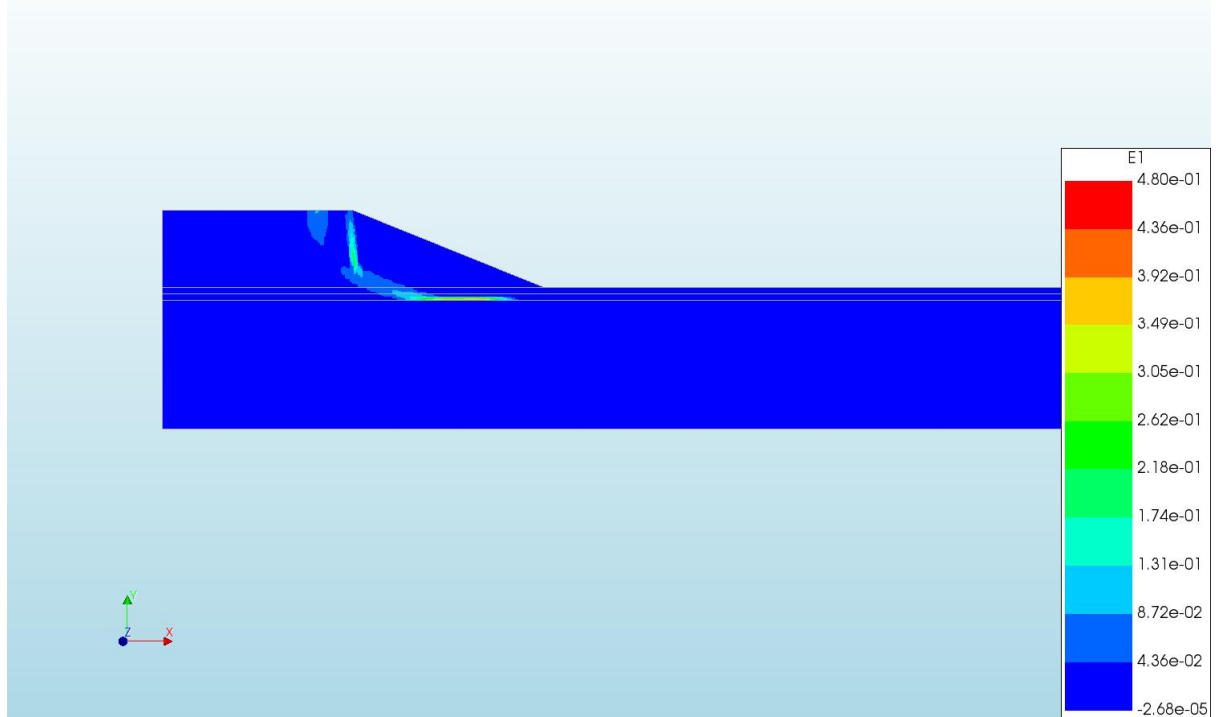
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.59kN/m<sup>2</sup> max: 4.98kN/m<sup>2</sup>



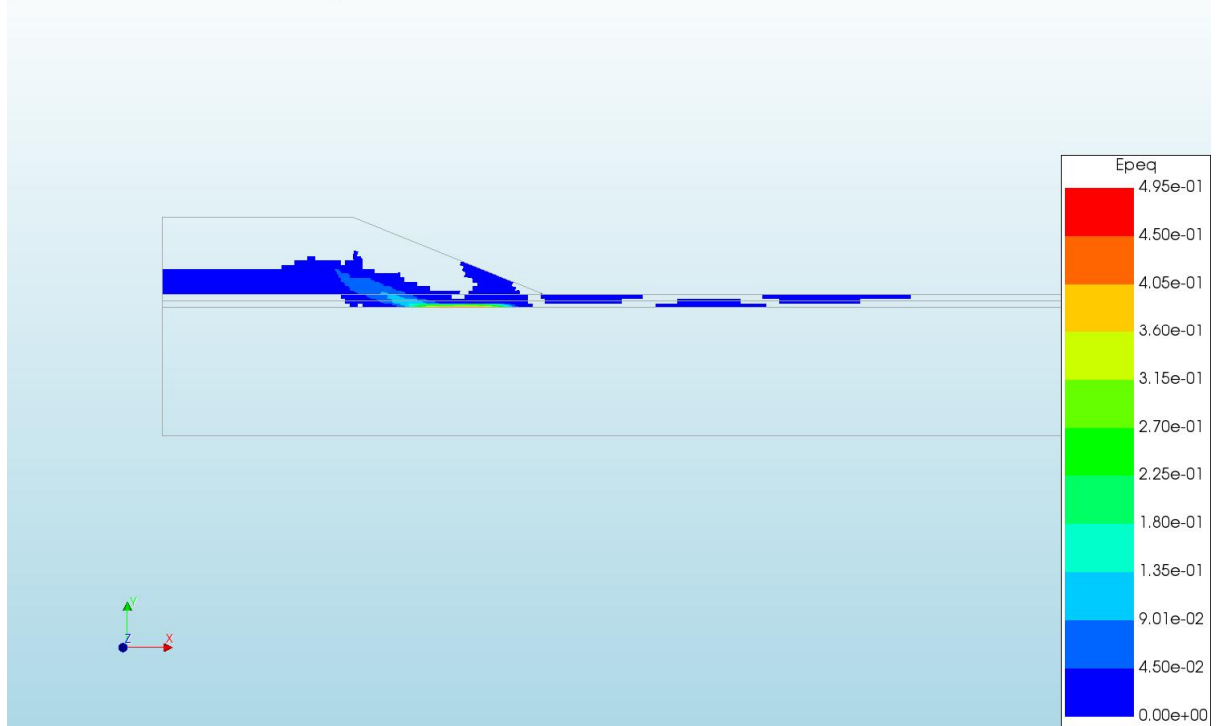
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.11kN/m<sup>2</sup> max: 2.64kN/m<sup>2</sup>



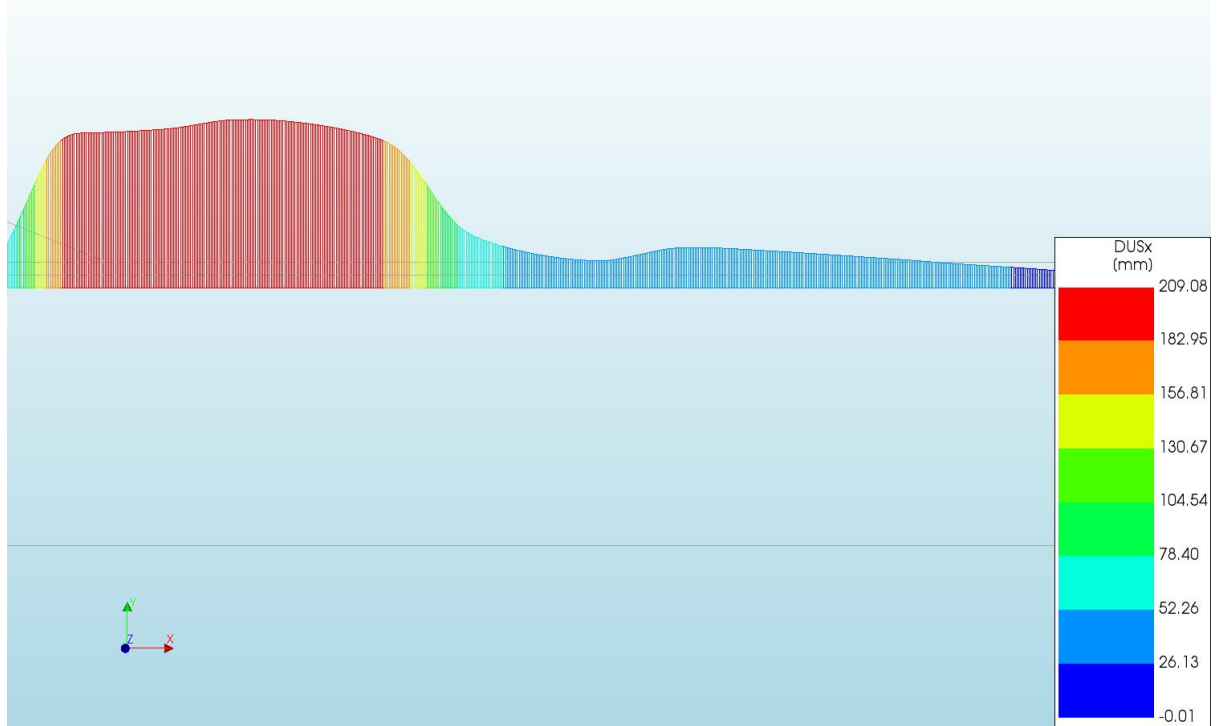
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Total Strains E1  
min: -2.68e-05 max: 4.80e-01



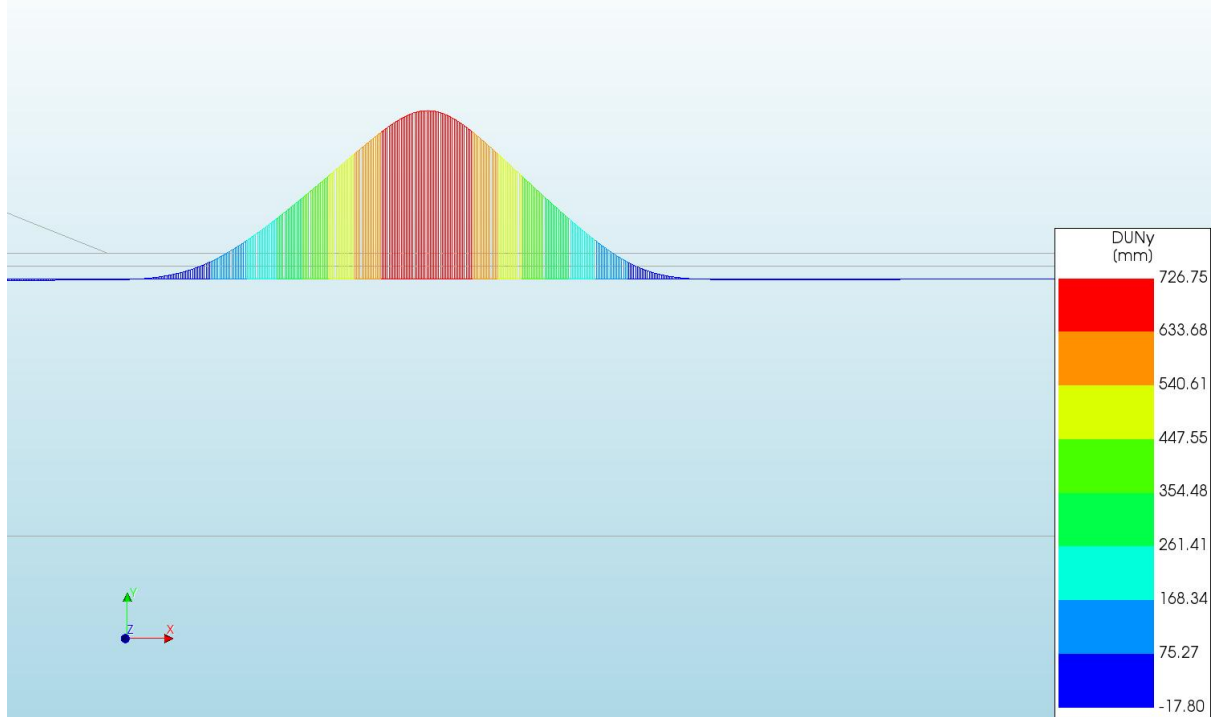
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.95e-01



d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 209.08mm



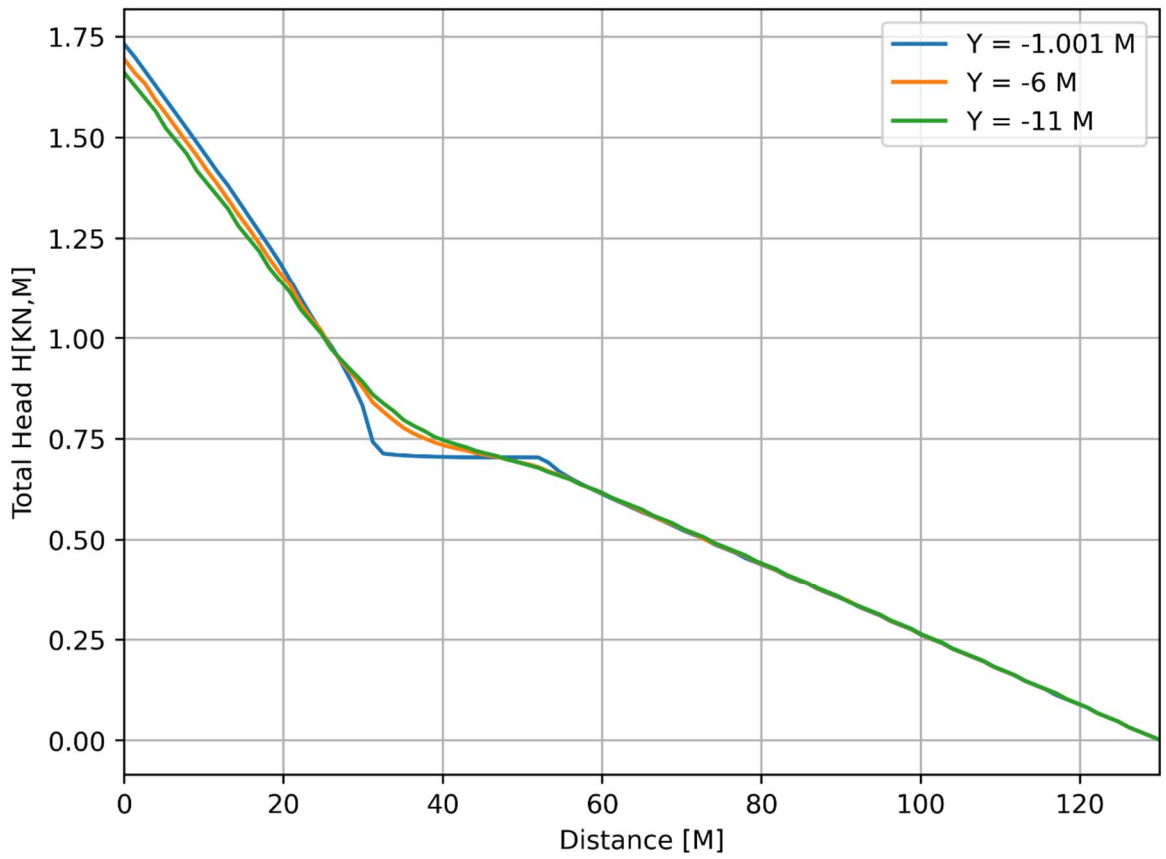
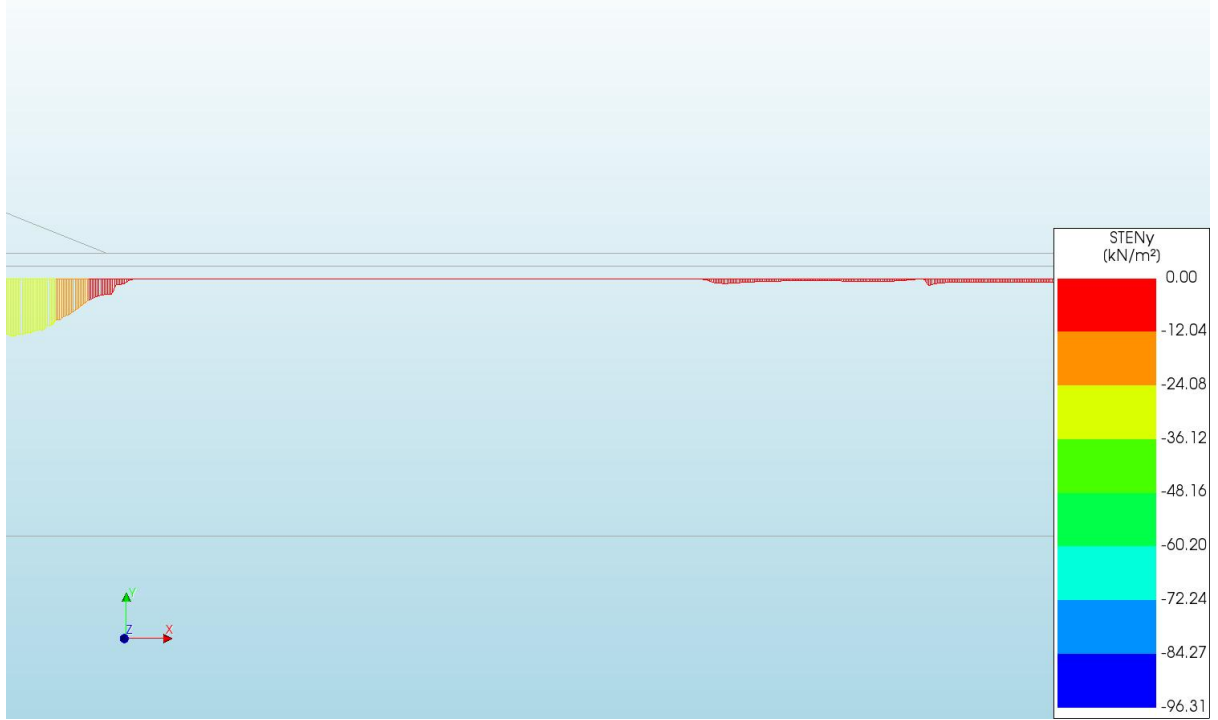
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -17.80mm max: 726.75mm

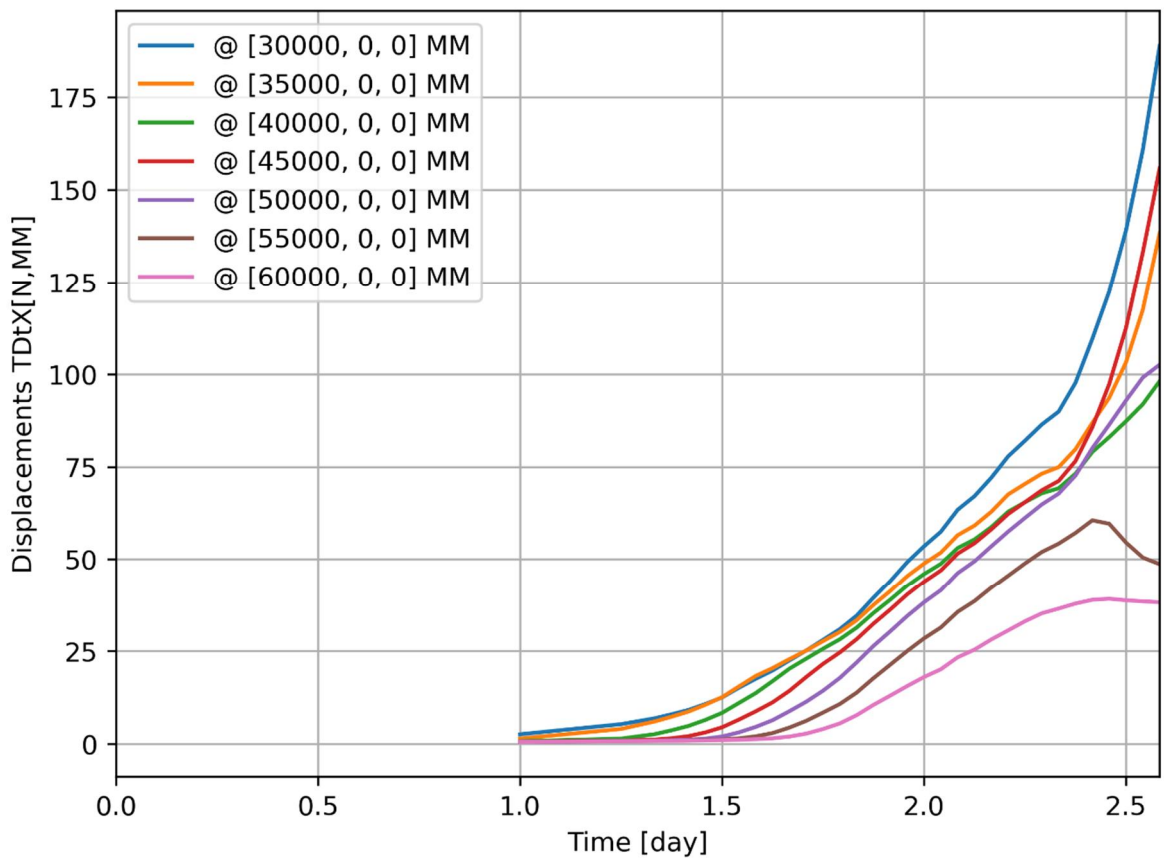
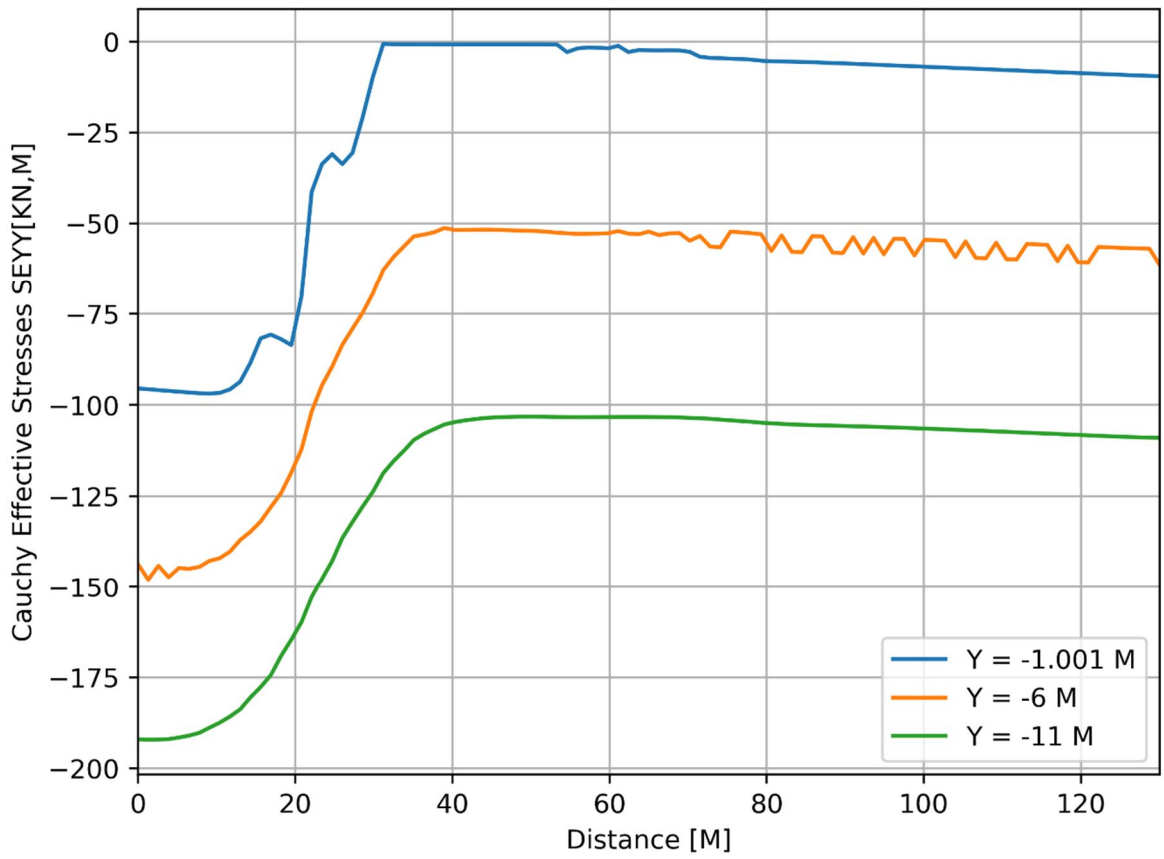


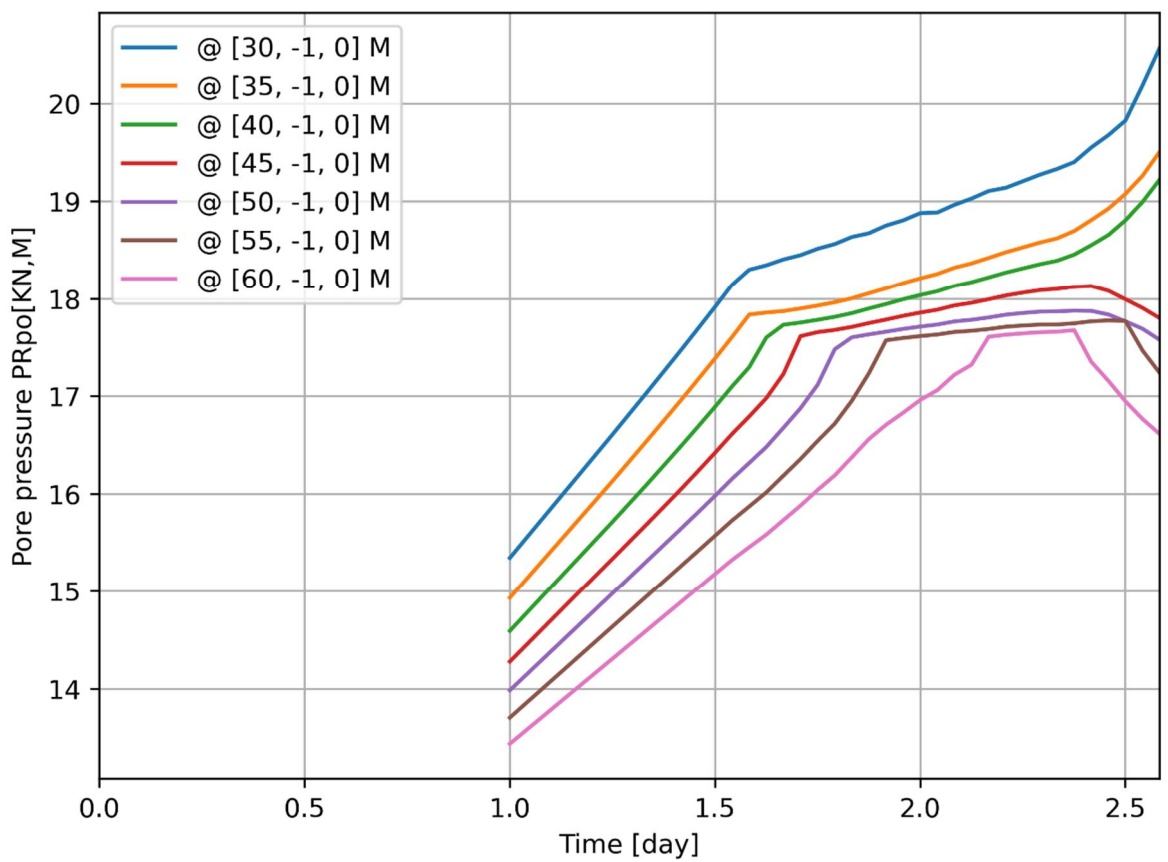
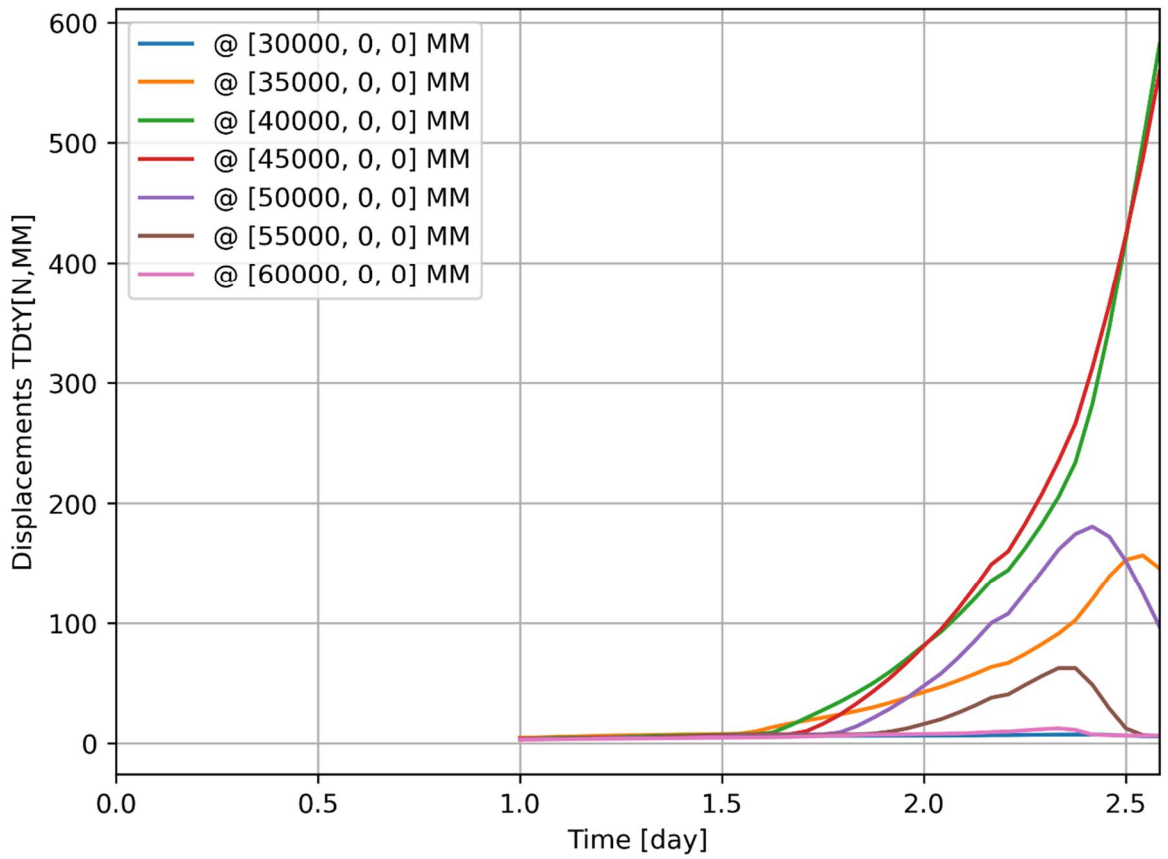
d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.57kN/m<sup>2</sup> max: 21.17kN/m<sup>2</sup>

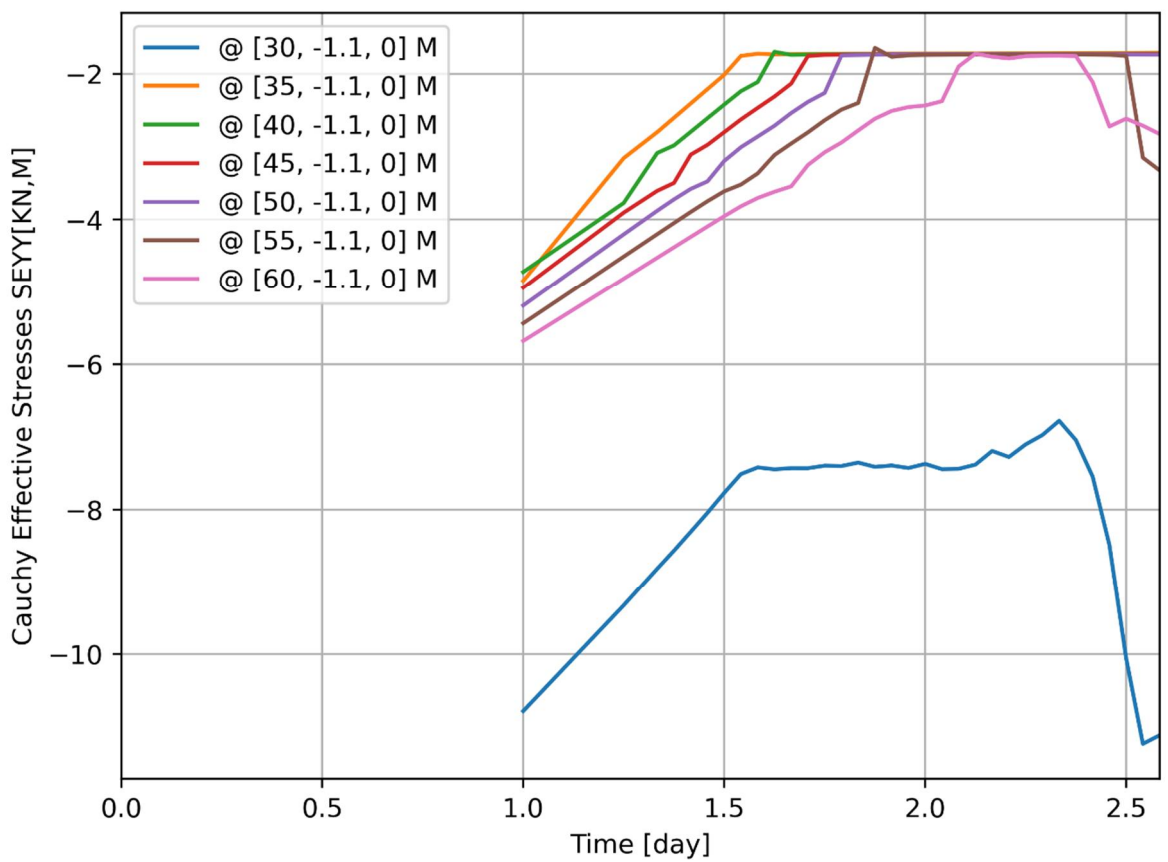
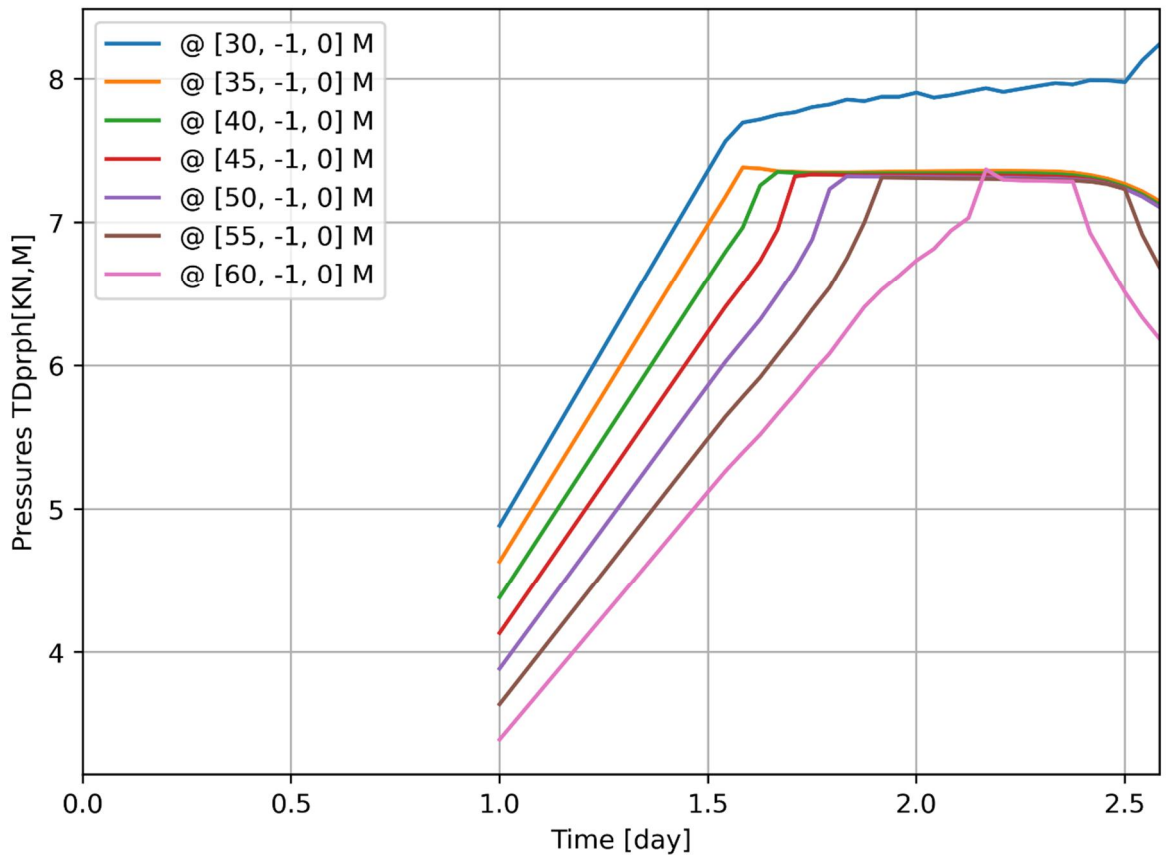


d=1\_c=14\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 2 day 14 hour  
Interface Effective Tractions STENy  
min: -96.31kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

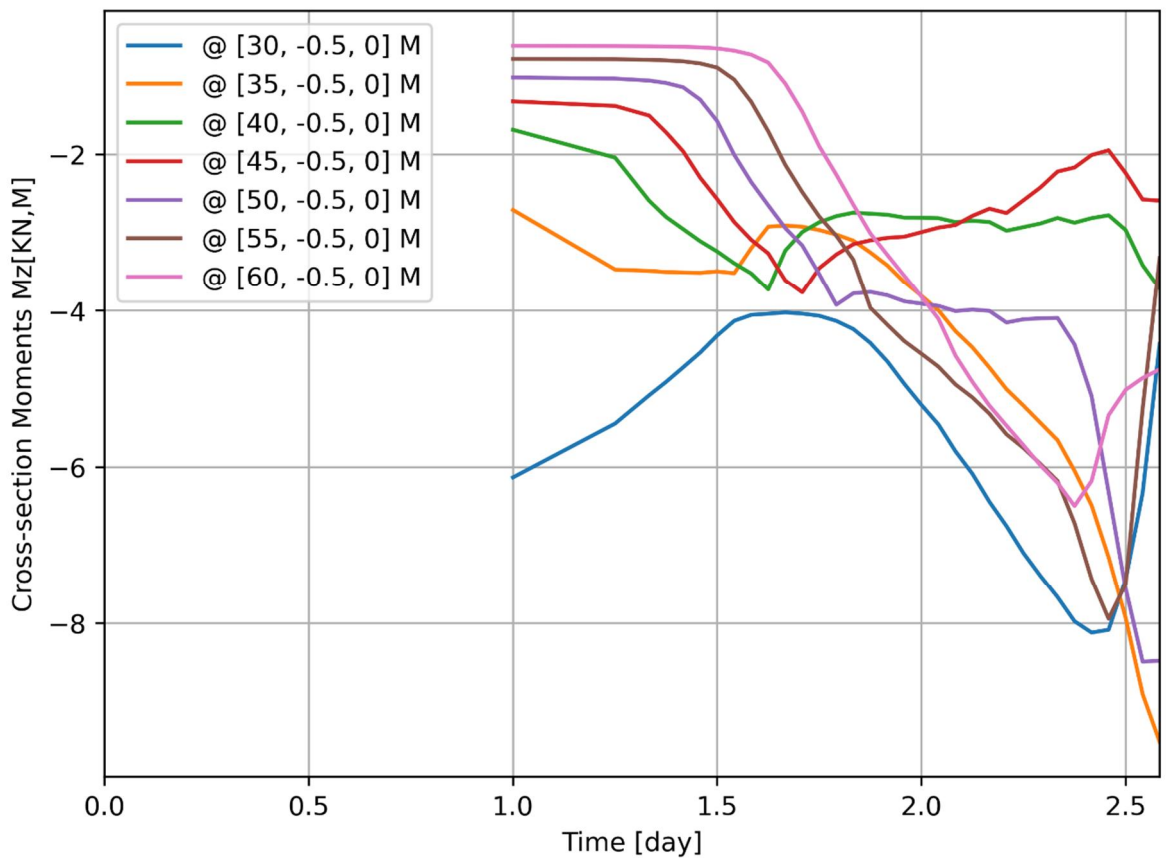
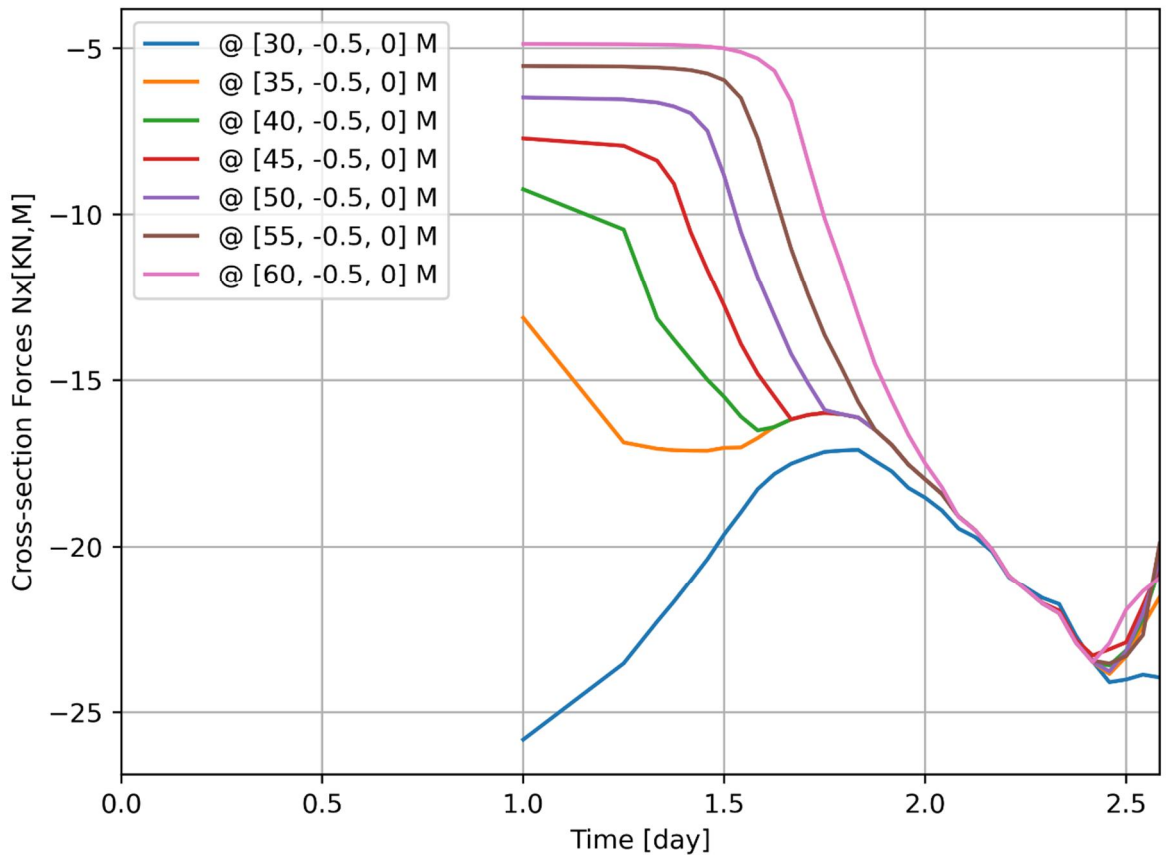








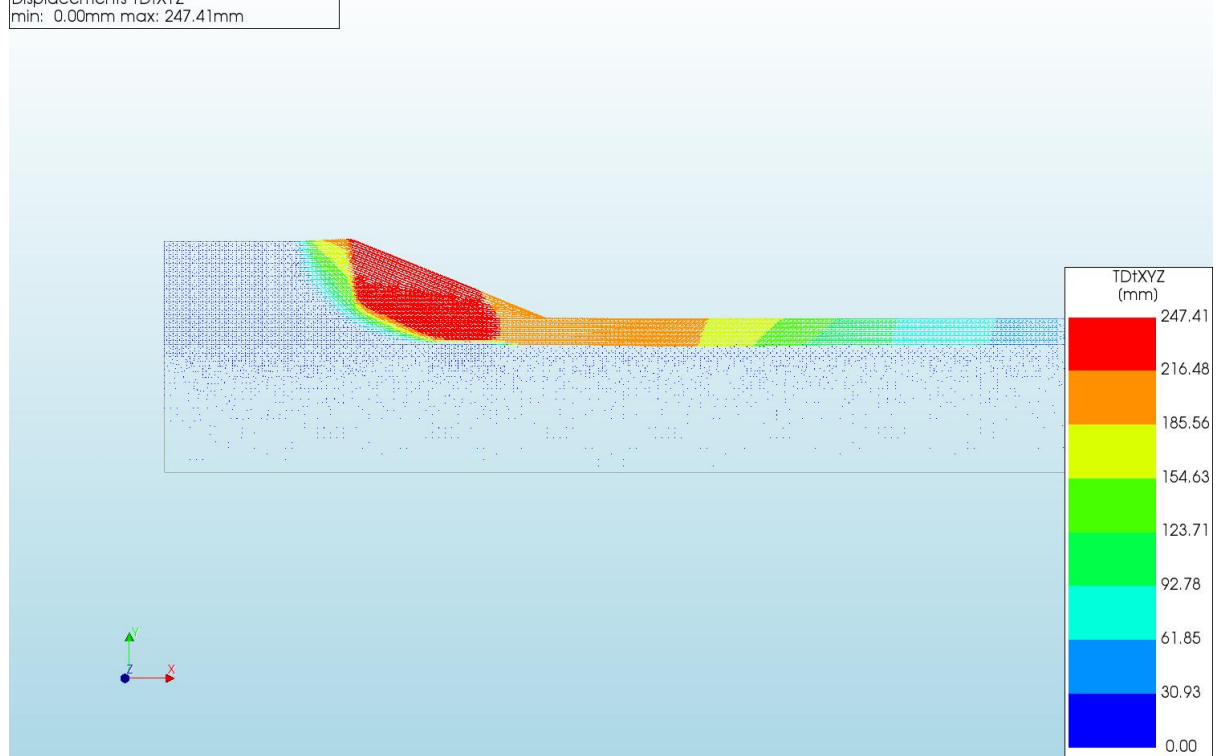




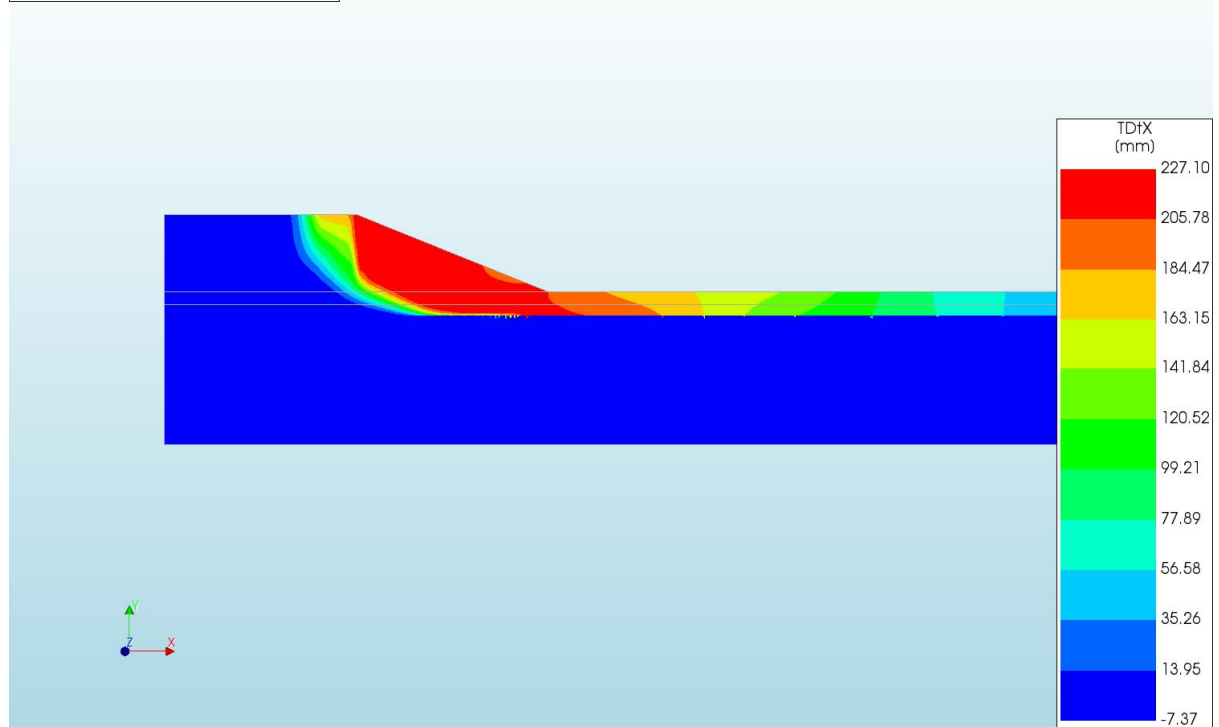
A.2.21

'Output\_d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818'

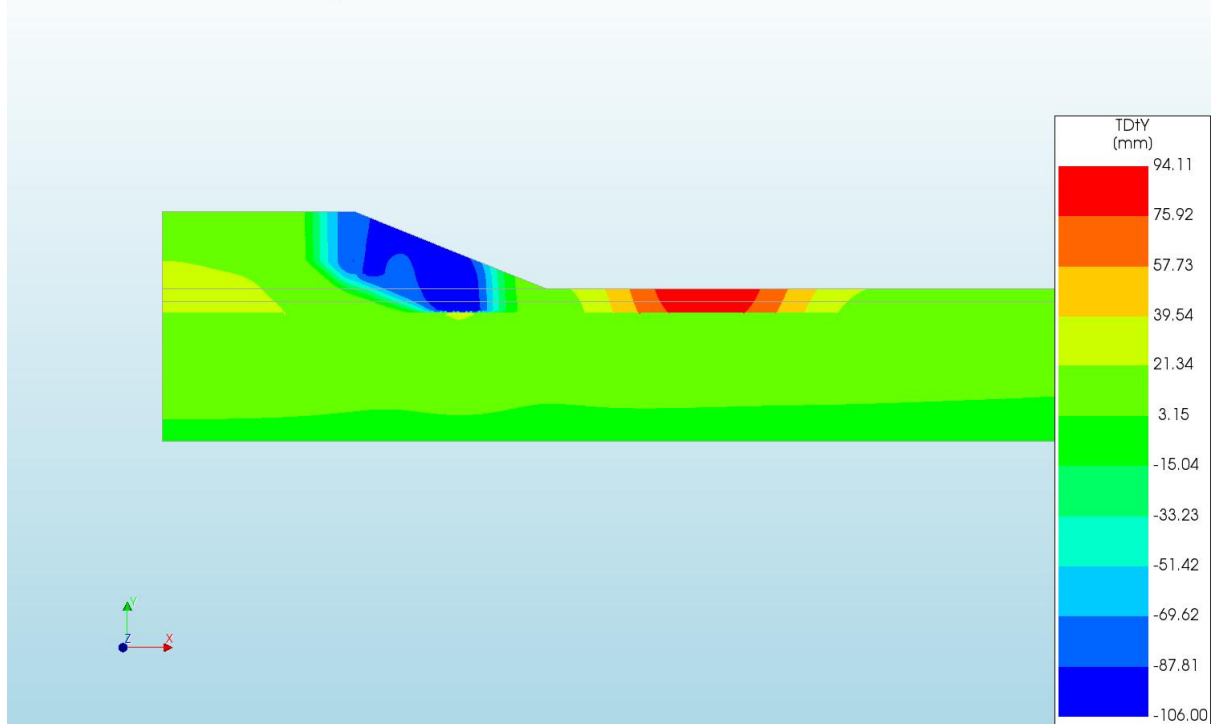
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
 Displacements TDiXYZ  
 min: 0.00mm max: 247.41mm



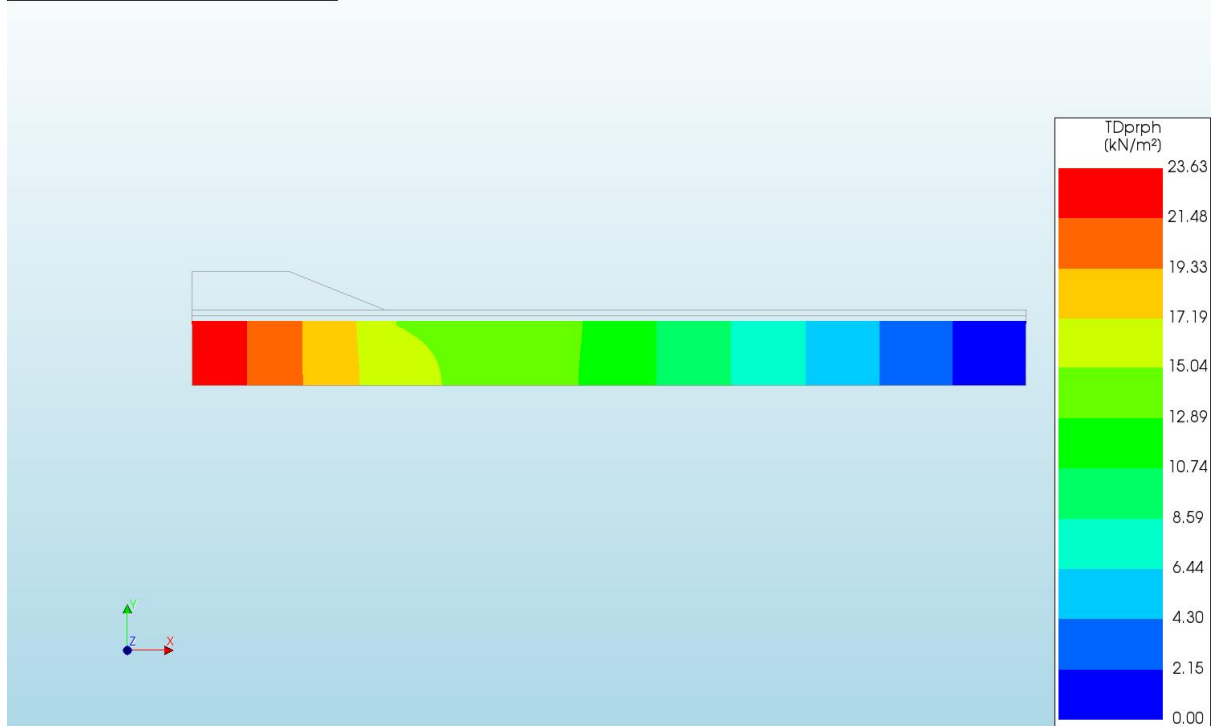
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -7.37mm max: 227.10mm



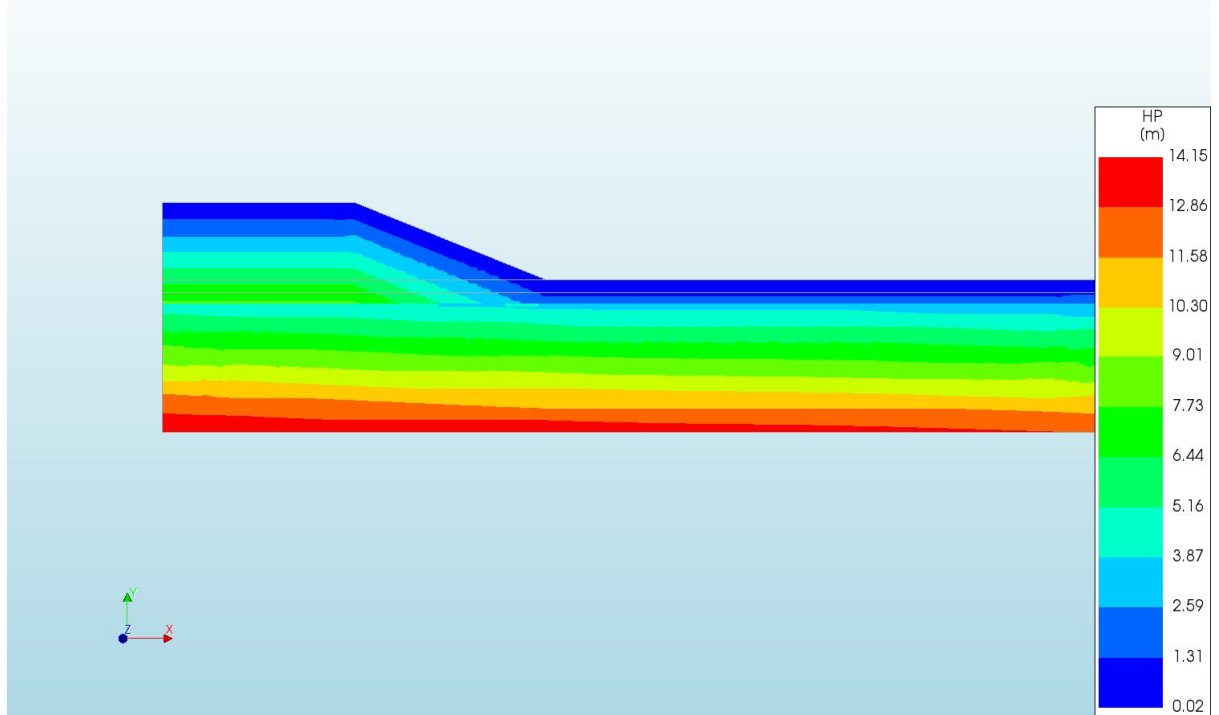
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Displacements TDY  
min: -106,00mm max: 94,11mm



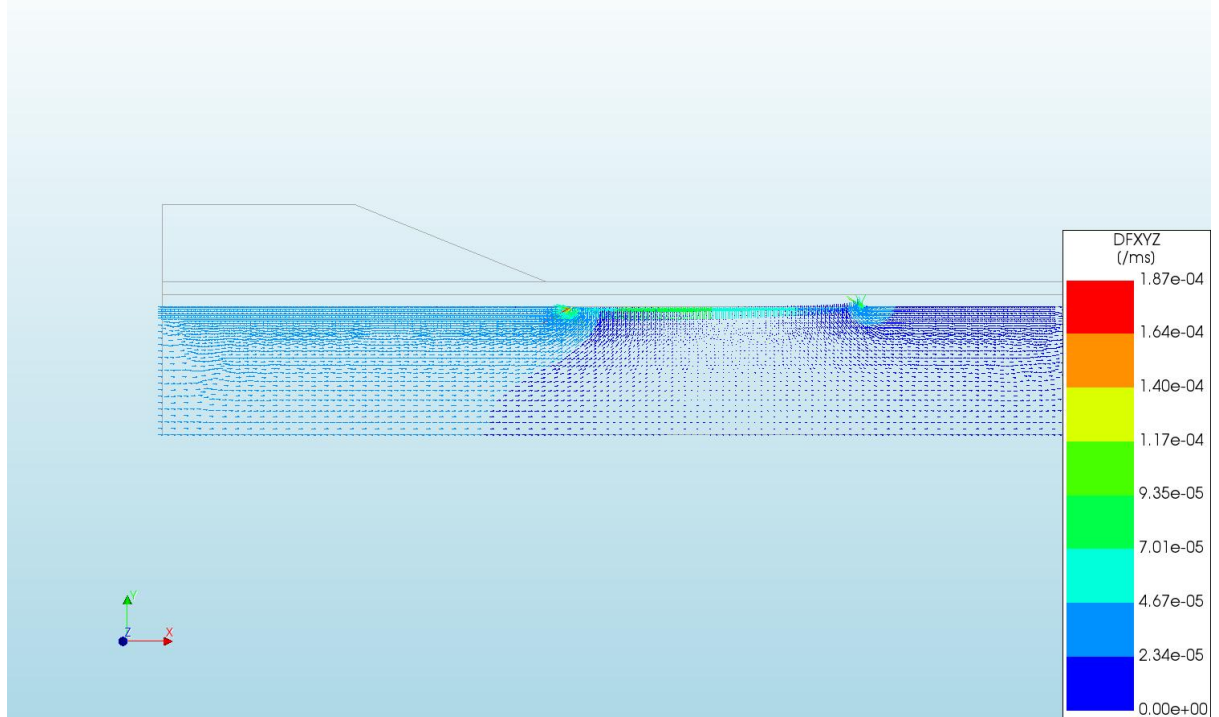
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Pressures TDprph  
min: 0,00kN/m<sup>2</sup> max: 23,63kN/m<sup>2</sup>



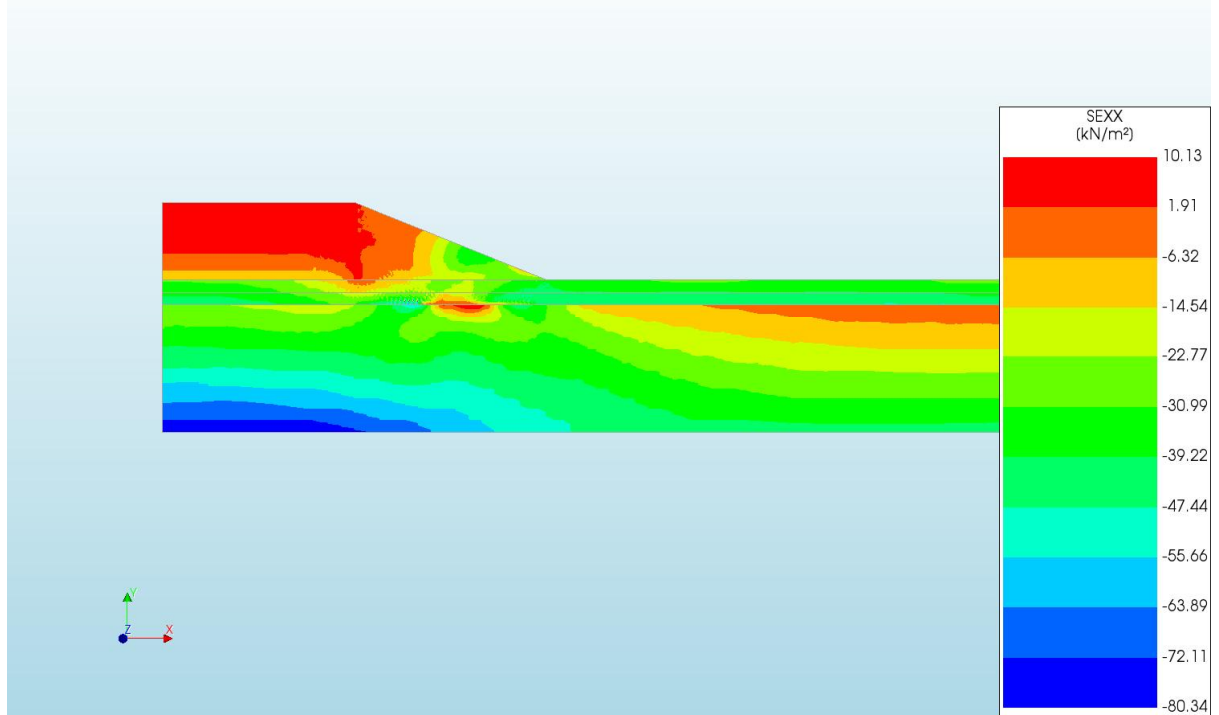
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 14.15m



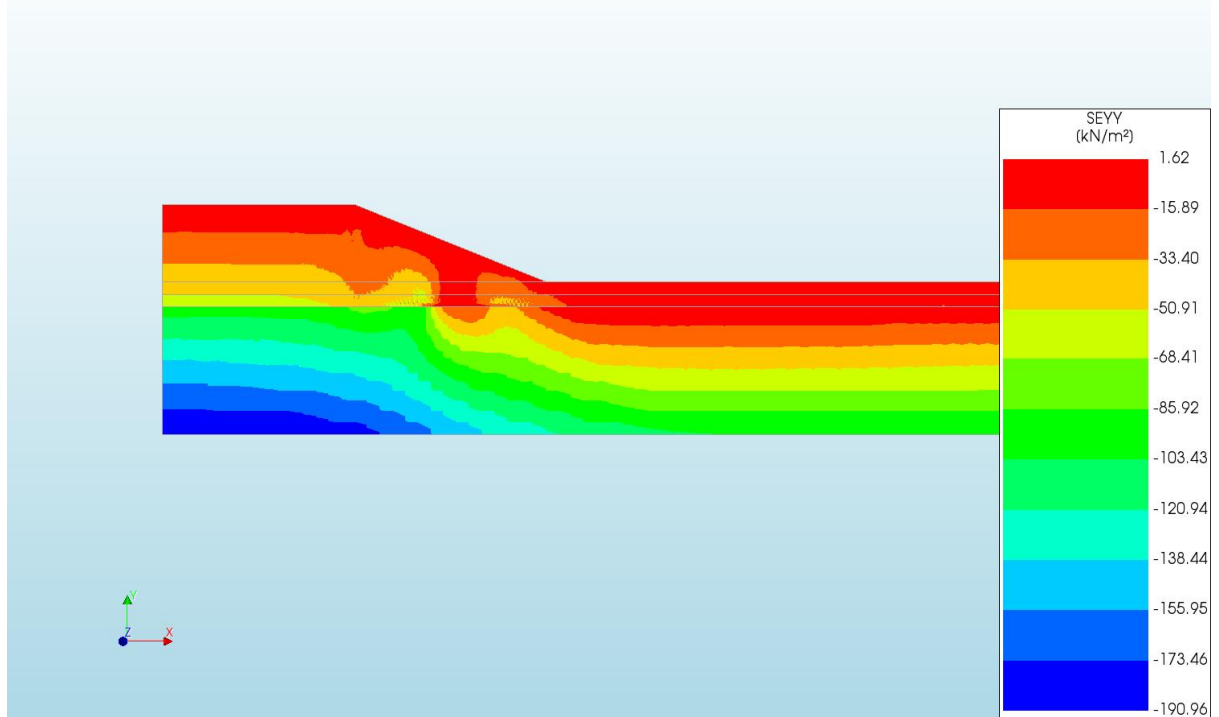
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.87e-04/ms



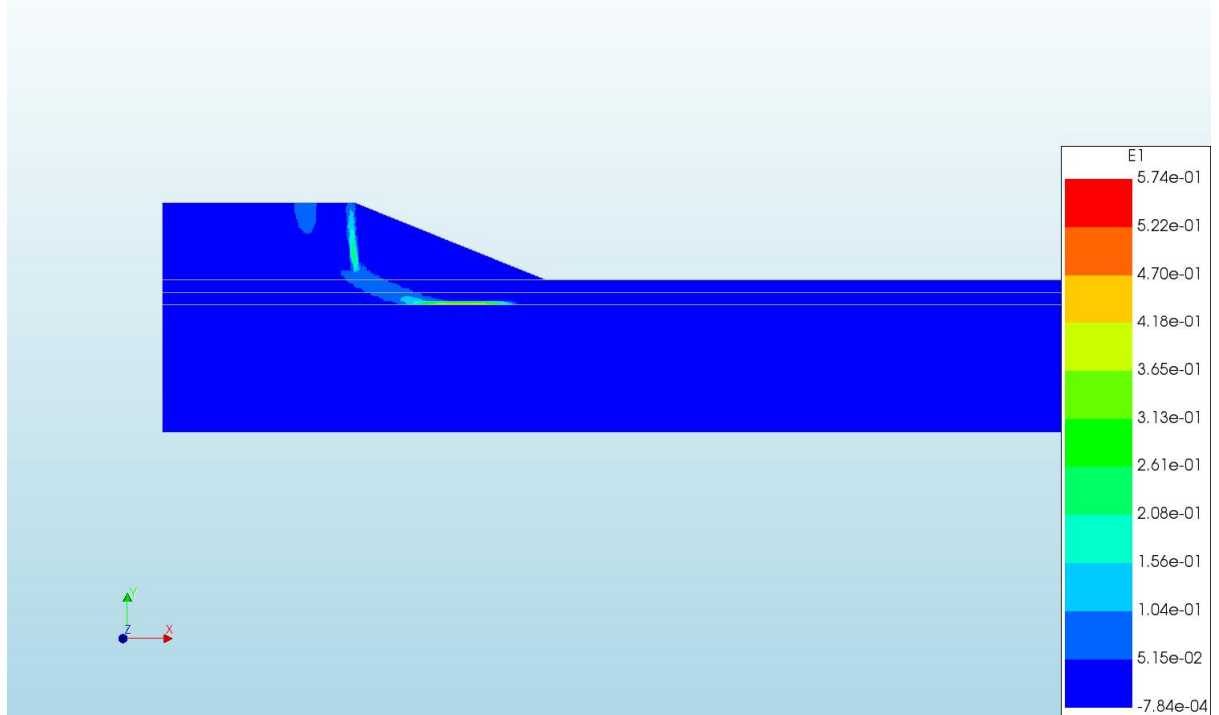
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -80.34kN/m<sup>2</sup> max: 10.13kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -190.96kN/m<sup>2</sup> max: 1.62kN/m<sup>2</sup>



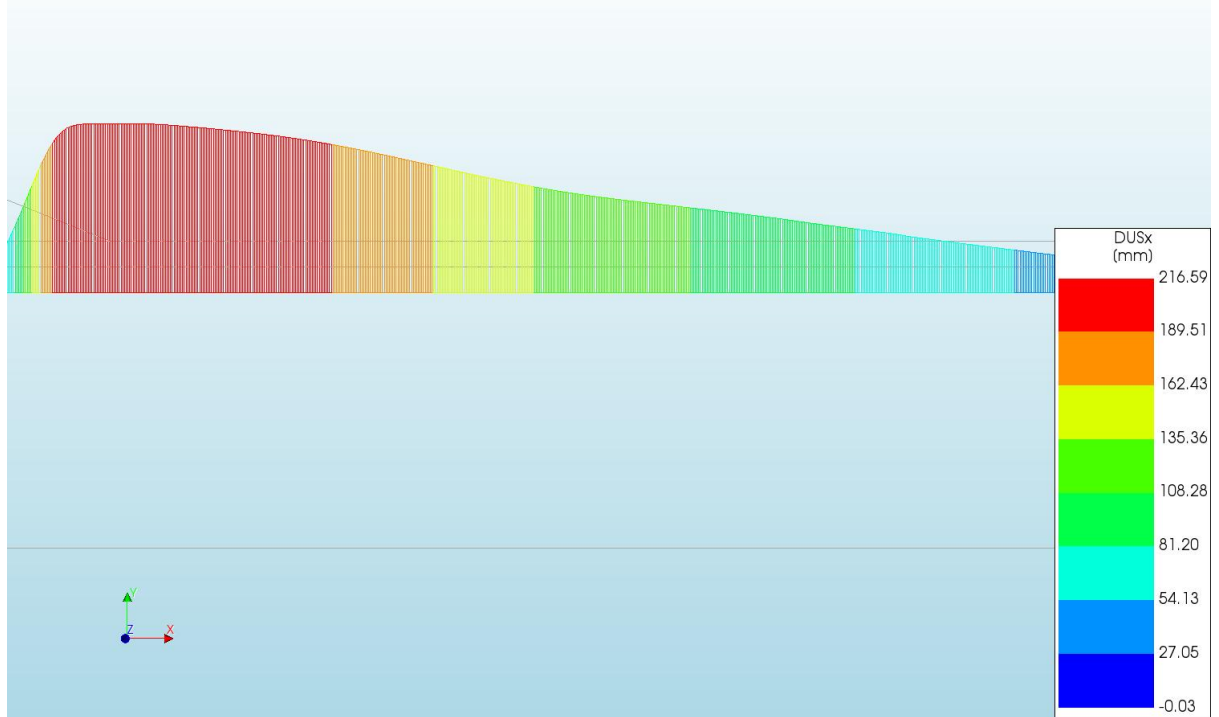
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Total Strains E1  
min: -7.84e-04 max: 5.74e-01



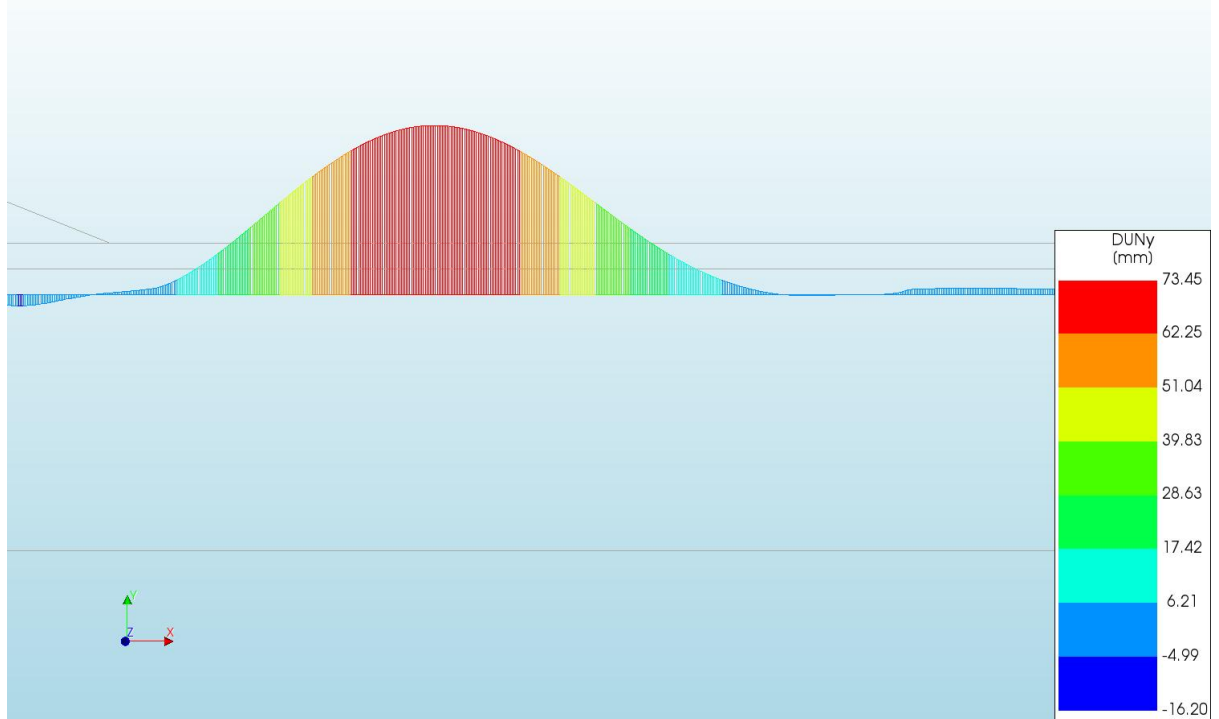
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.61e-01



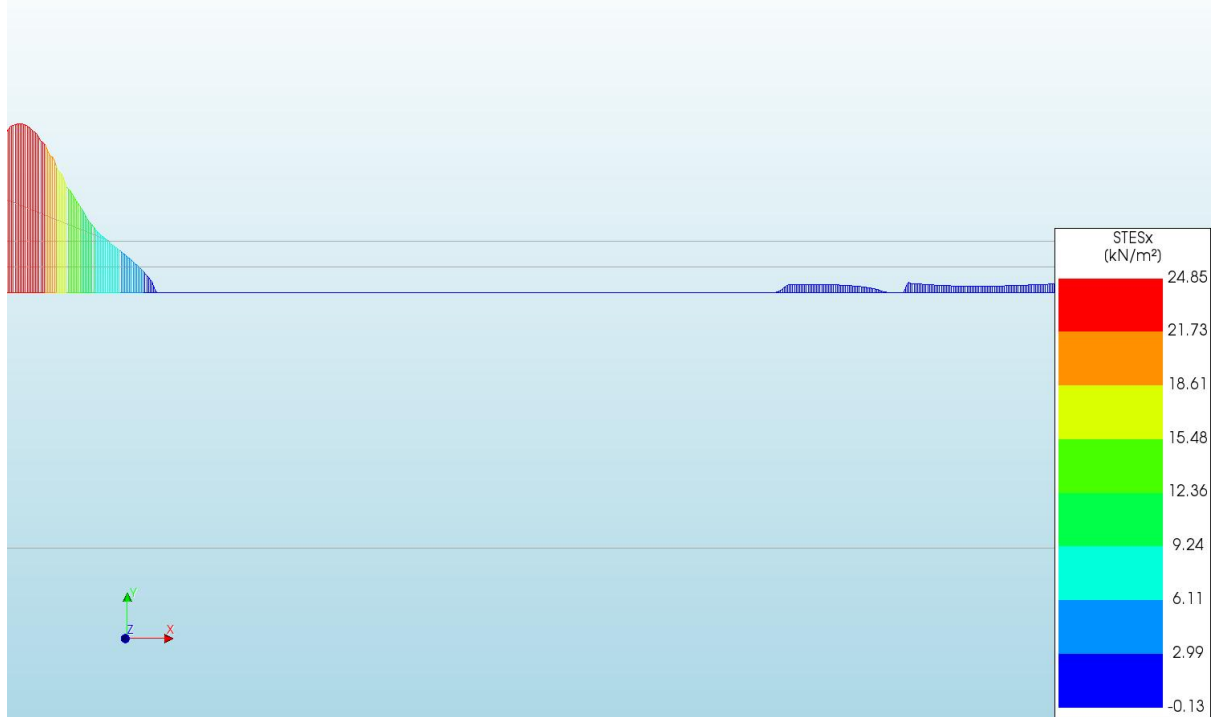
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.03mm max: 216.59mm



d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -16.20mm max: 73.45mm



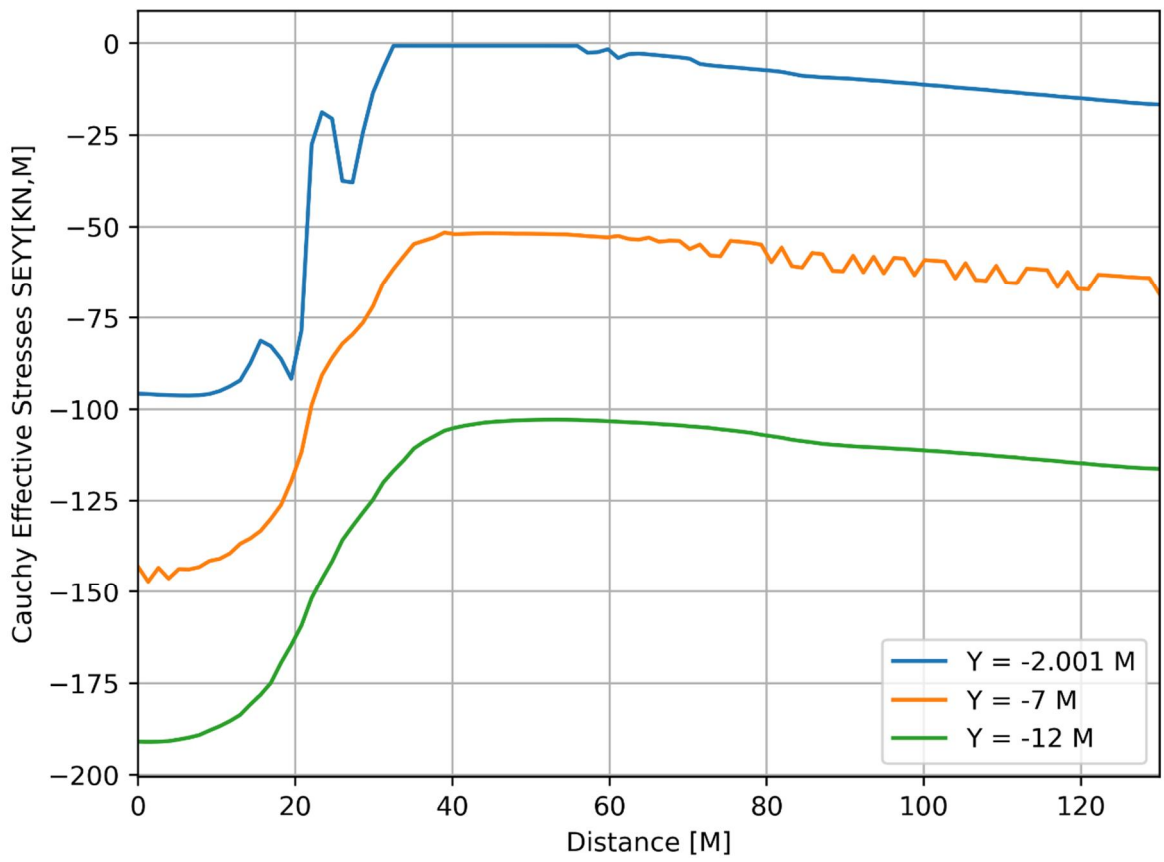
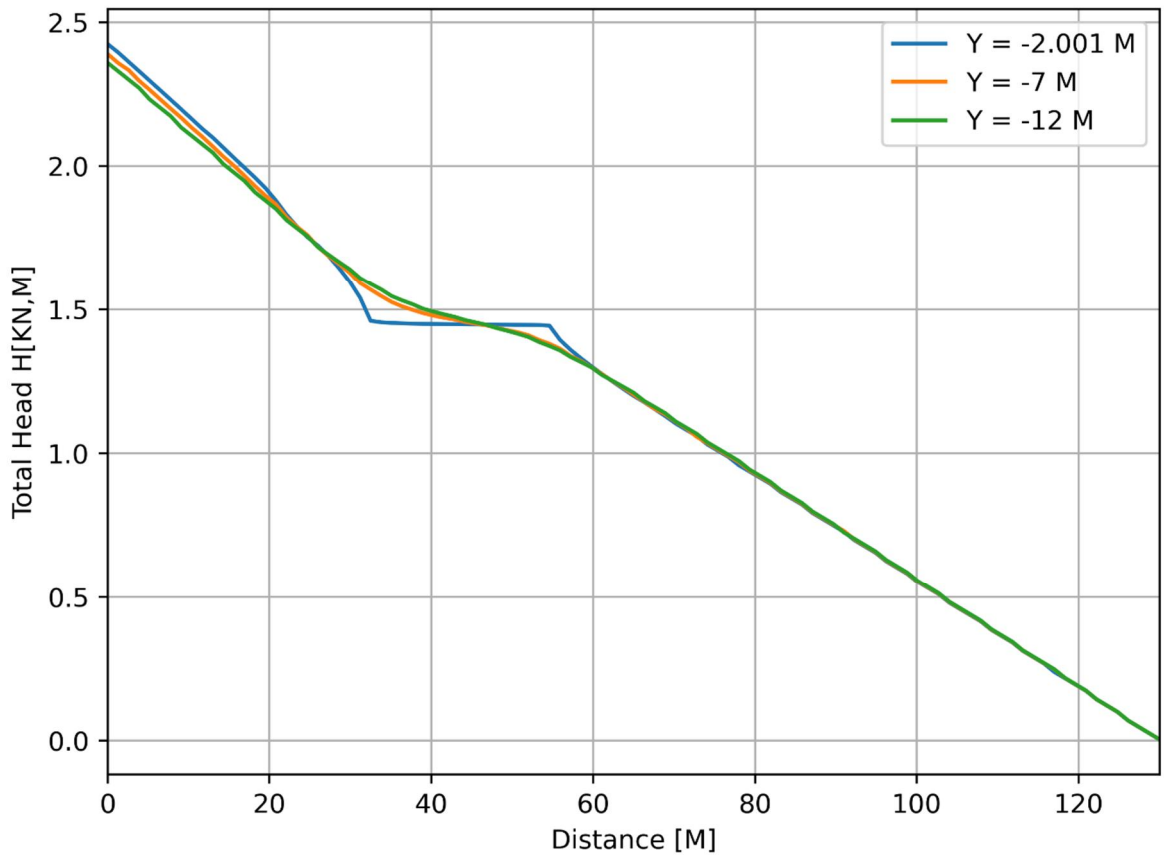
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.13kN/m<sup>2</sup> max: 24.85kN/m<sup>2</sup>

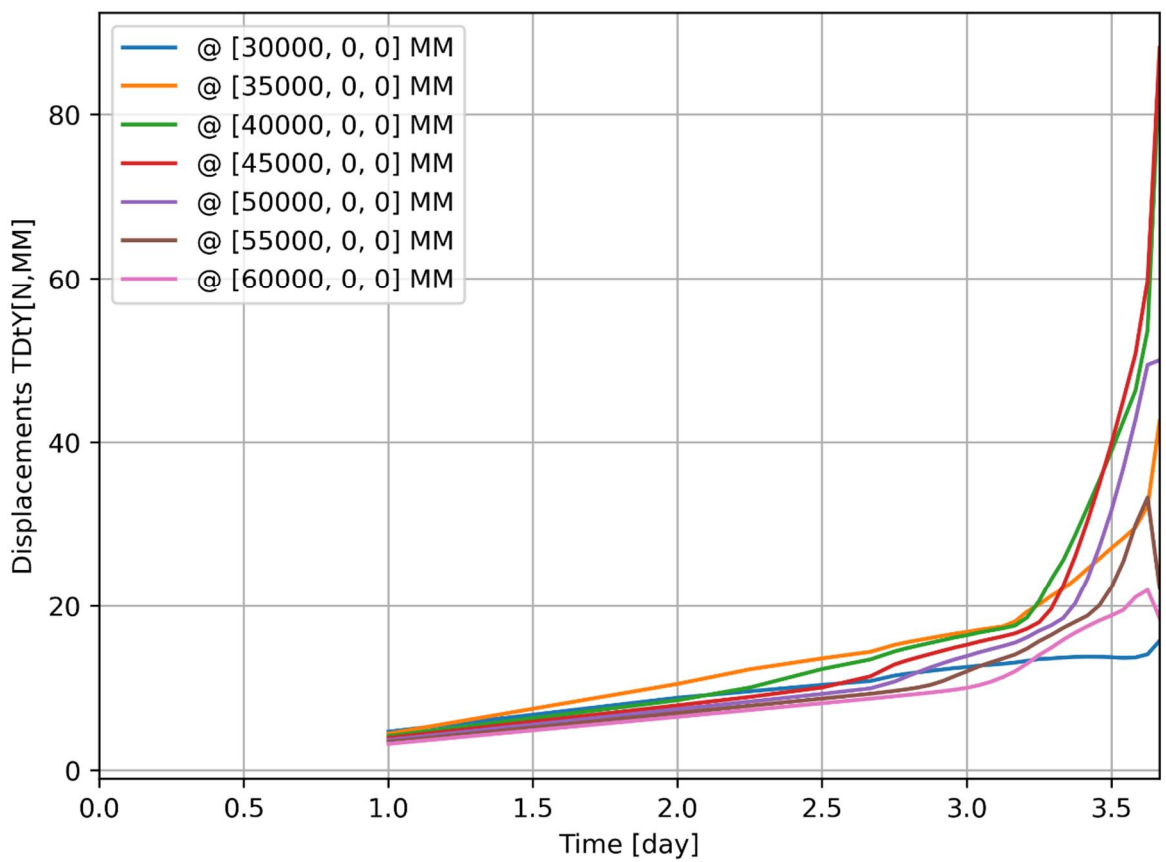
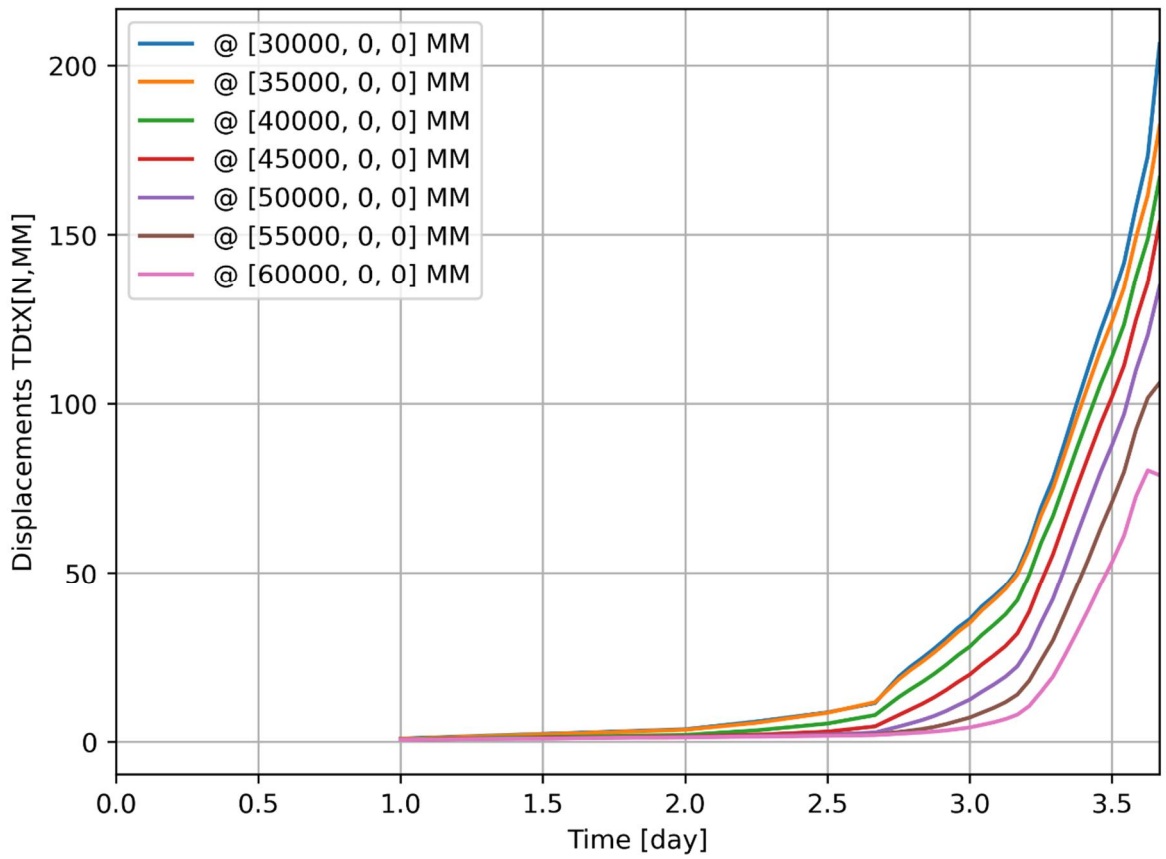


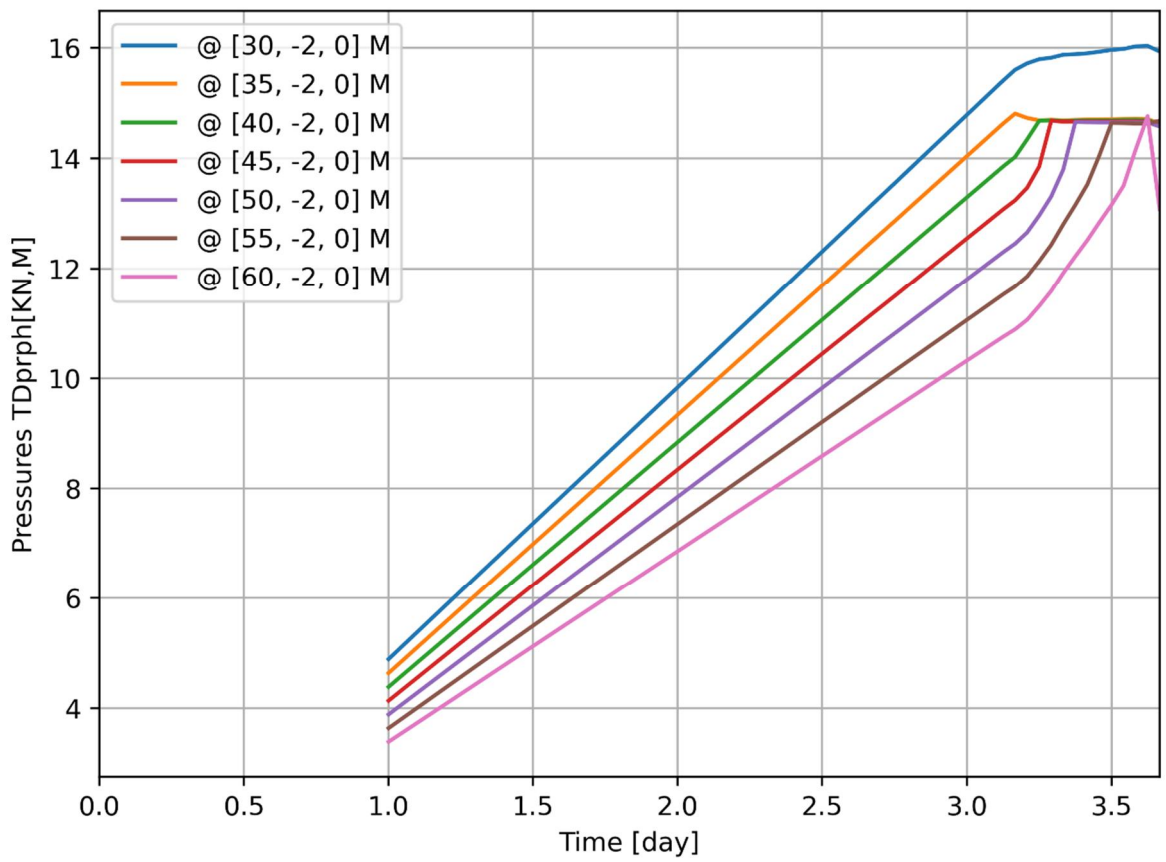
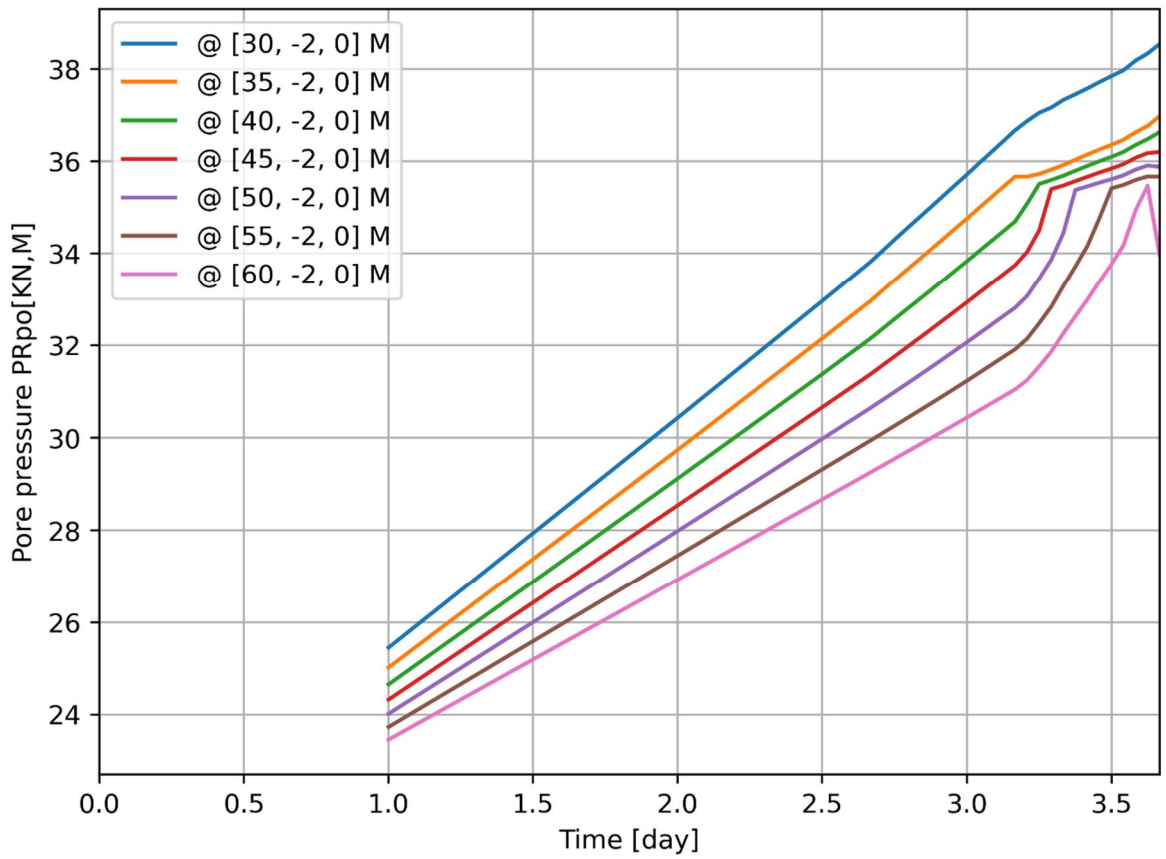
d=2\_c=15\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 34, Time 3 day 16 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -95.65kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

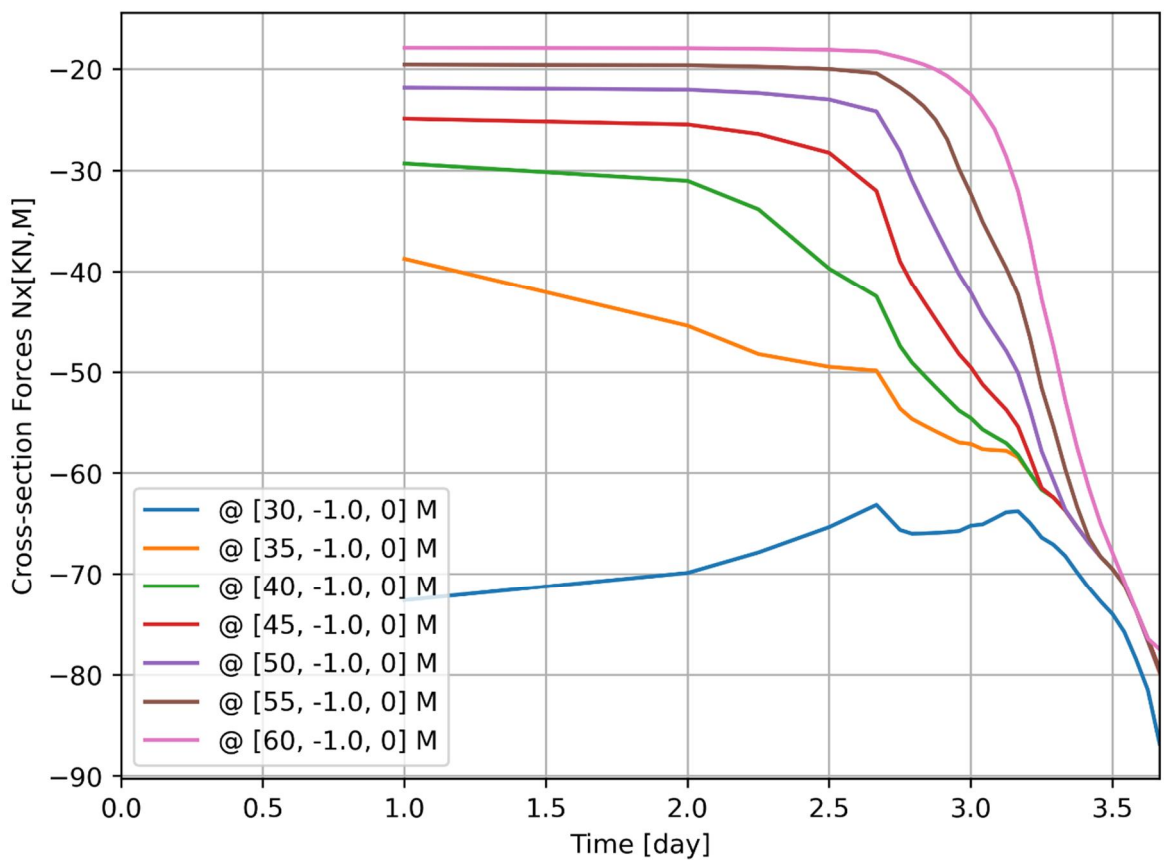
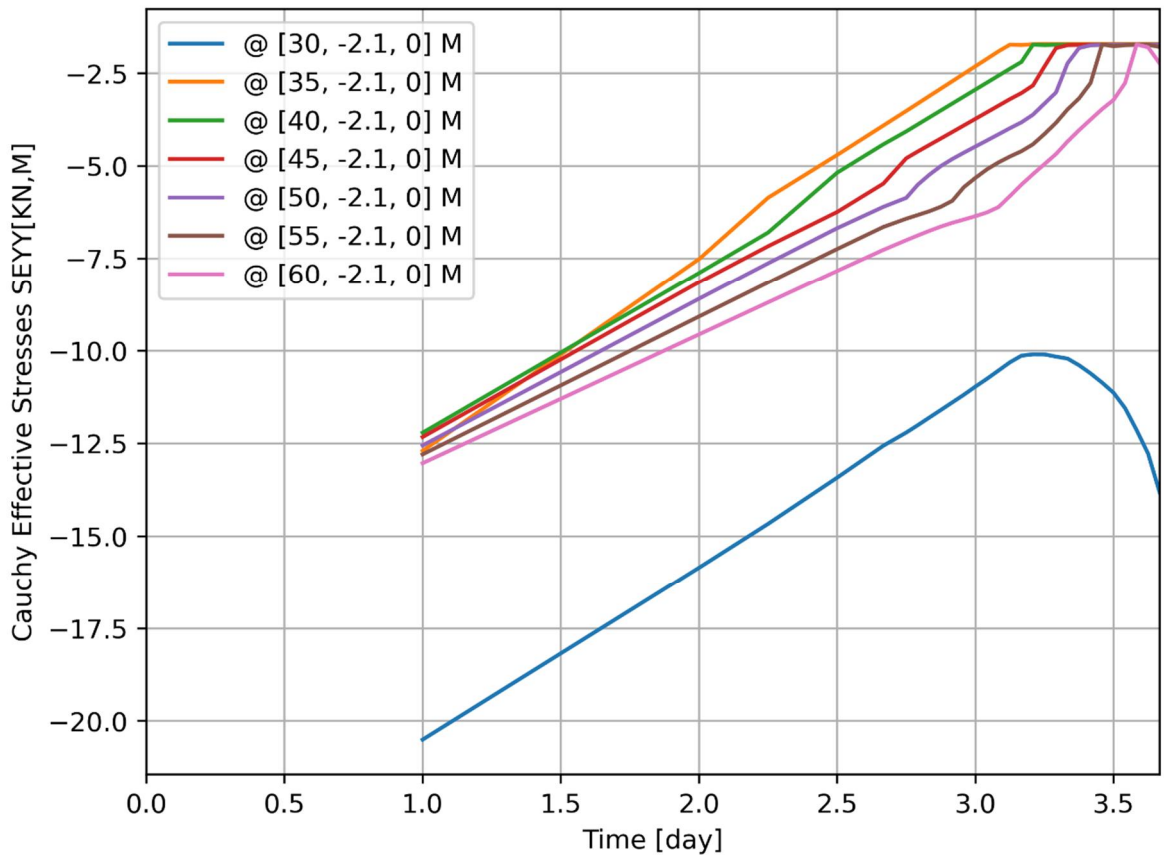


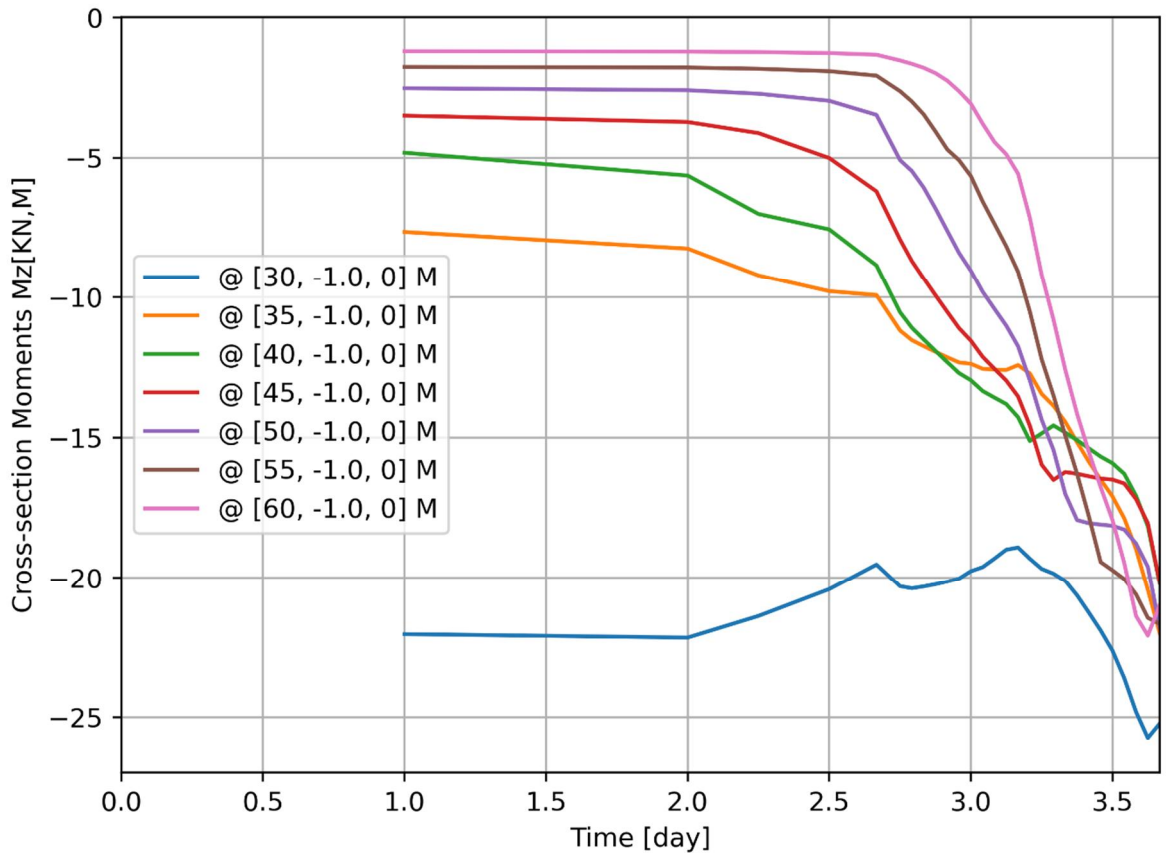








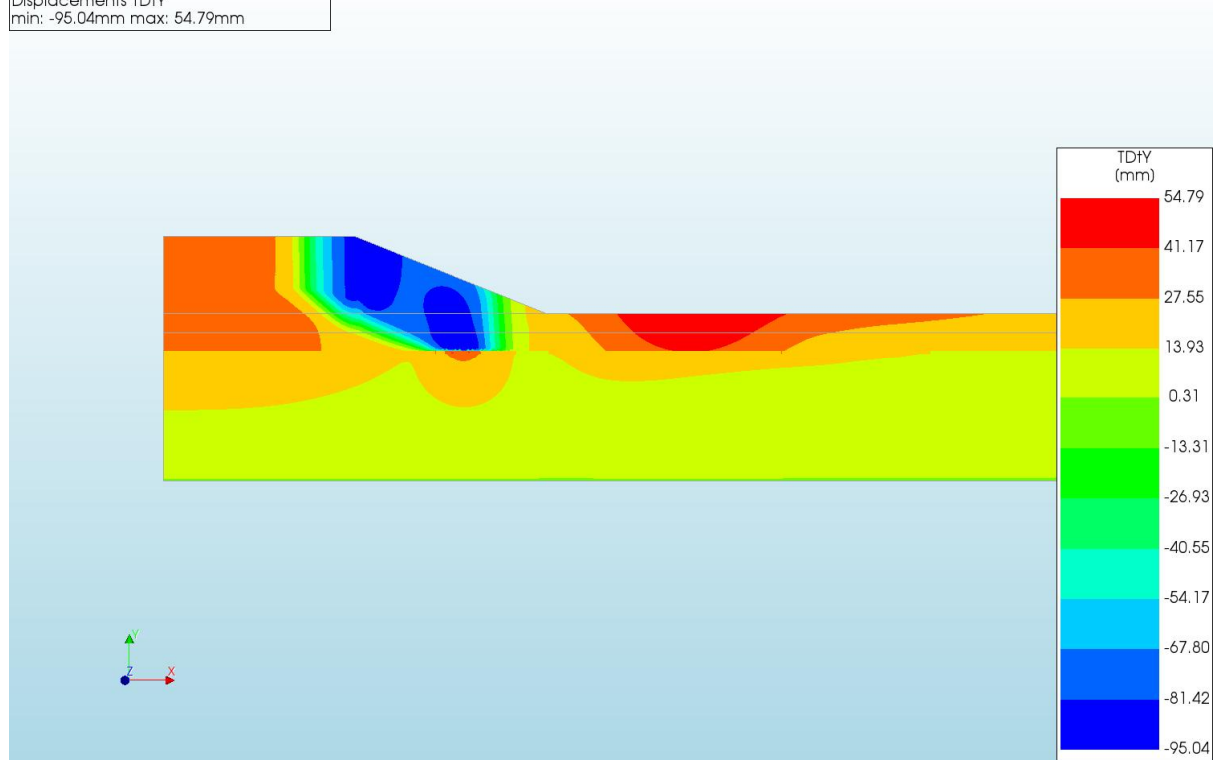




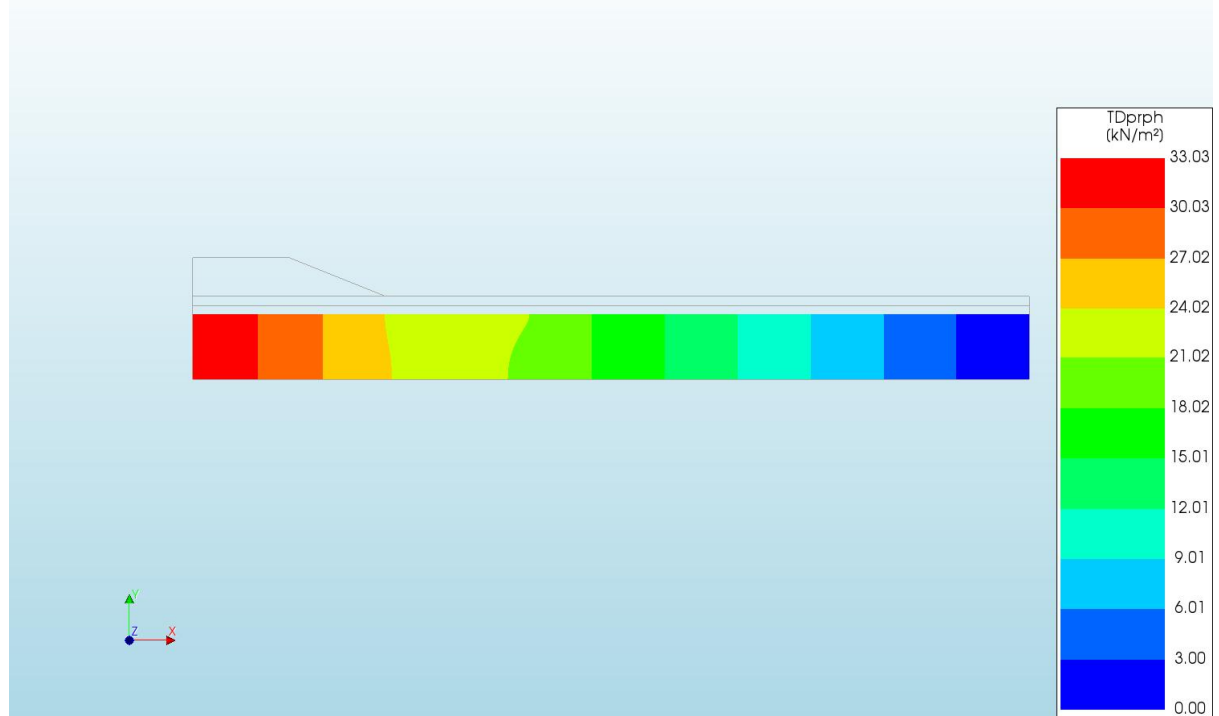
A.2.22

'Output d=3 c=18 E=5 k=1e-07 20200818'

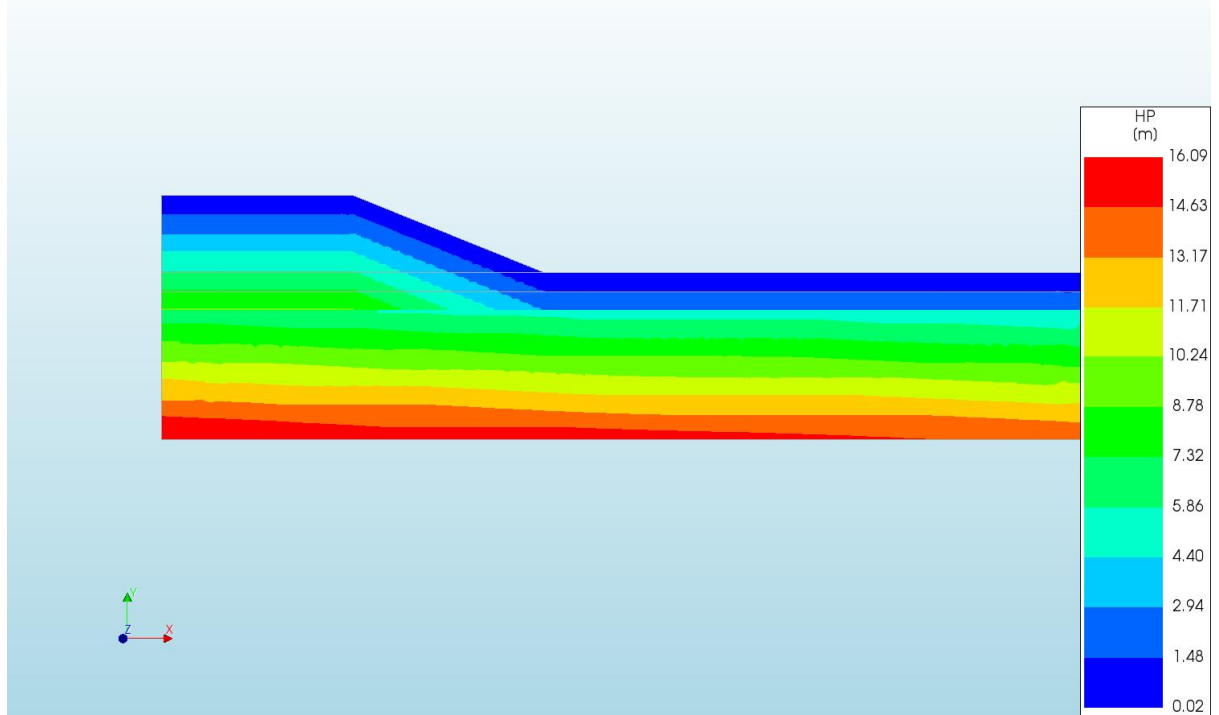
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Displacements TDY  
min: -95.04mm max: 54.79mm



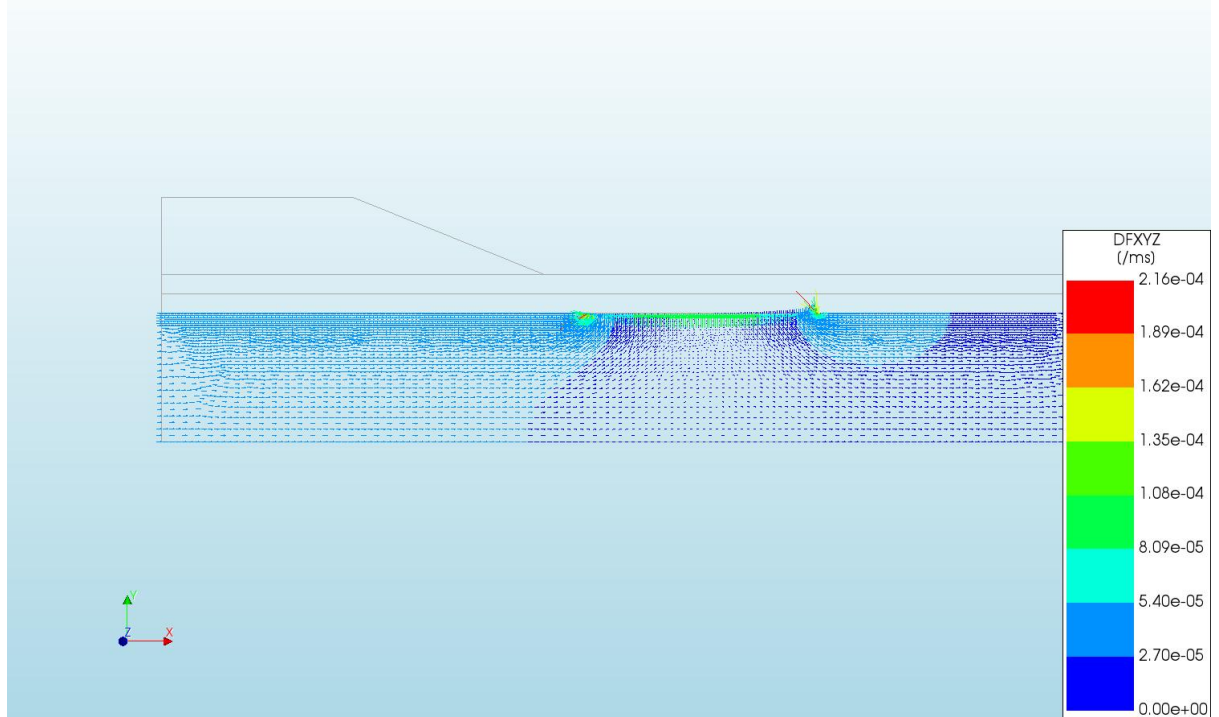
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 33.03kN/m<sup>2</sup>



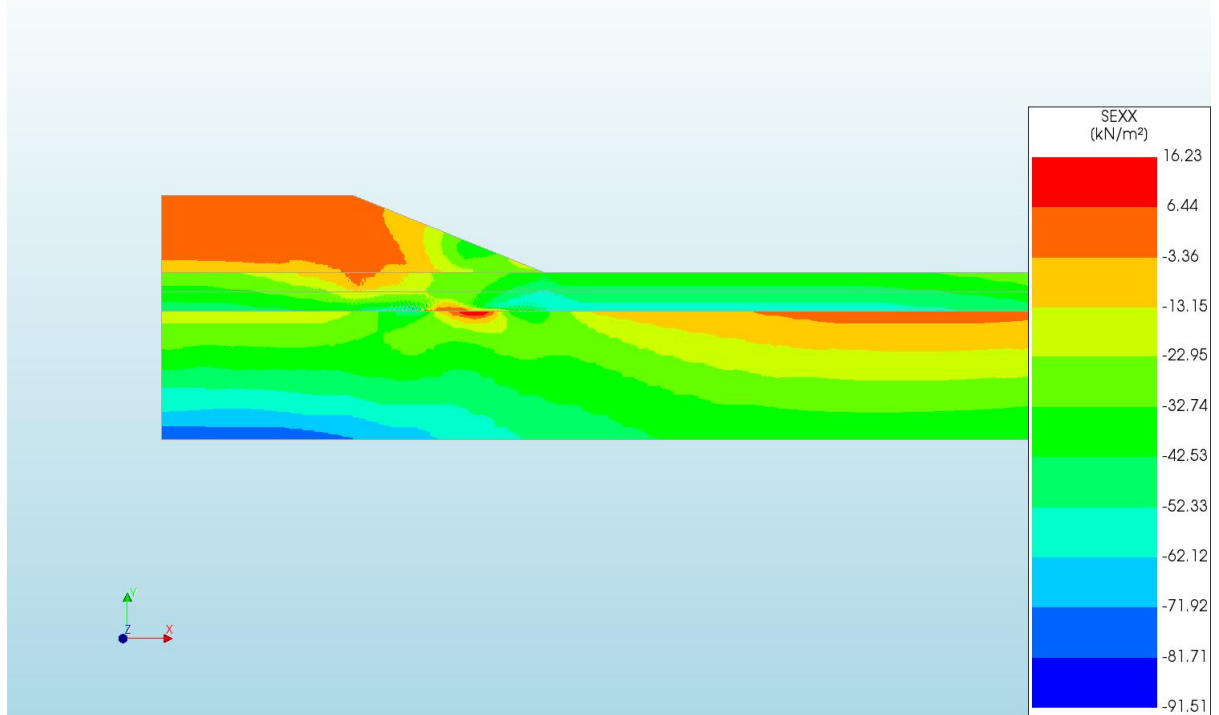
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 16.09m



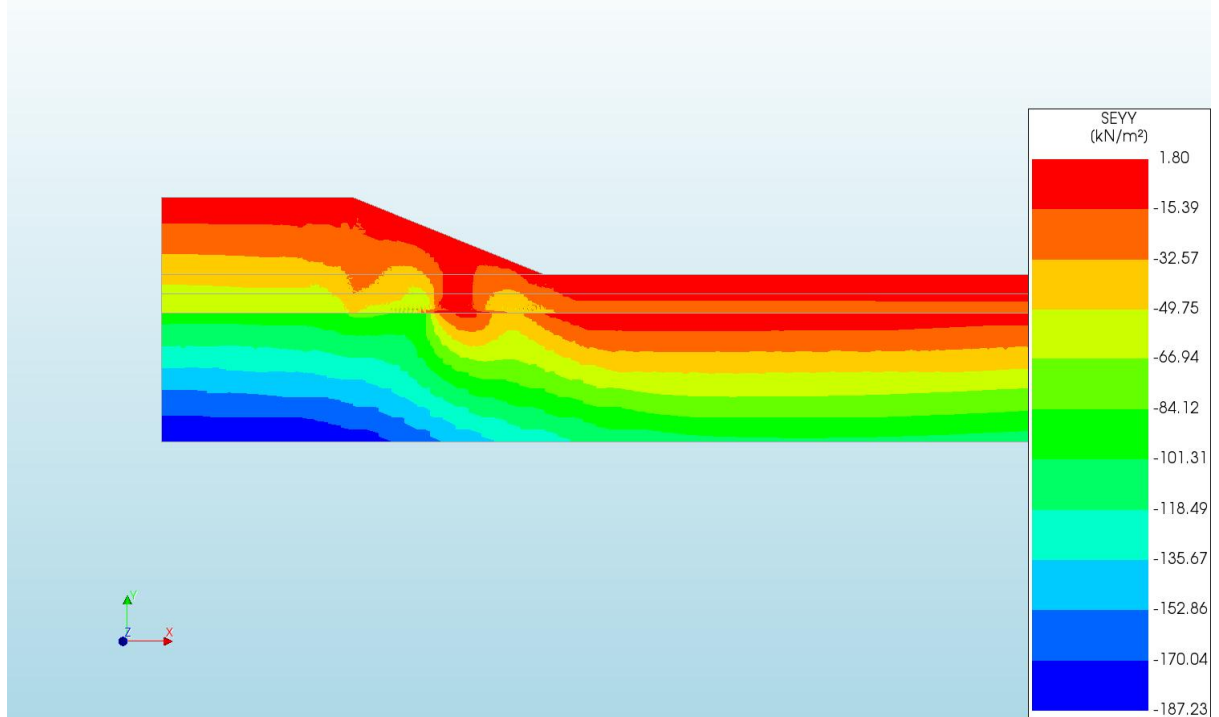
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.16e-04/ms



d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -91.51kN/m<sup>2</sup> max: 16.23kN/m<sup>2</sup>

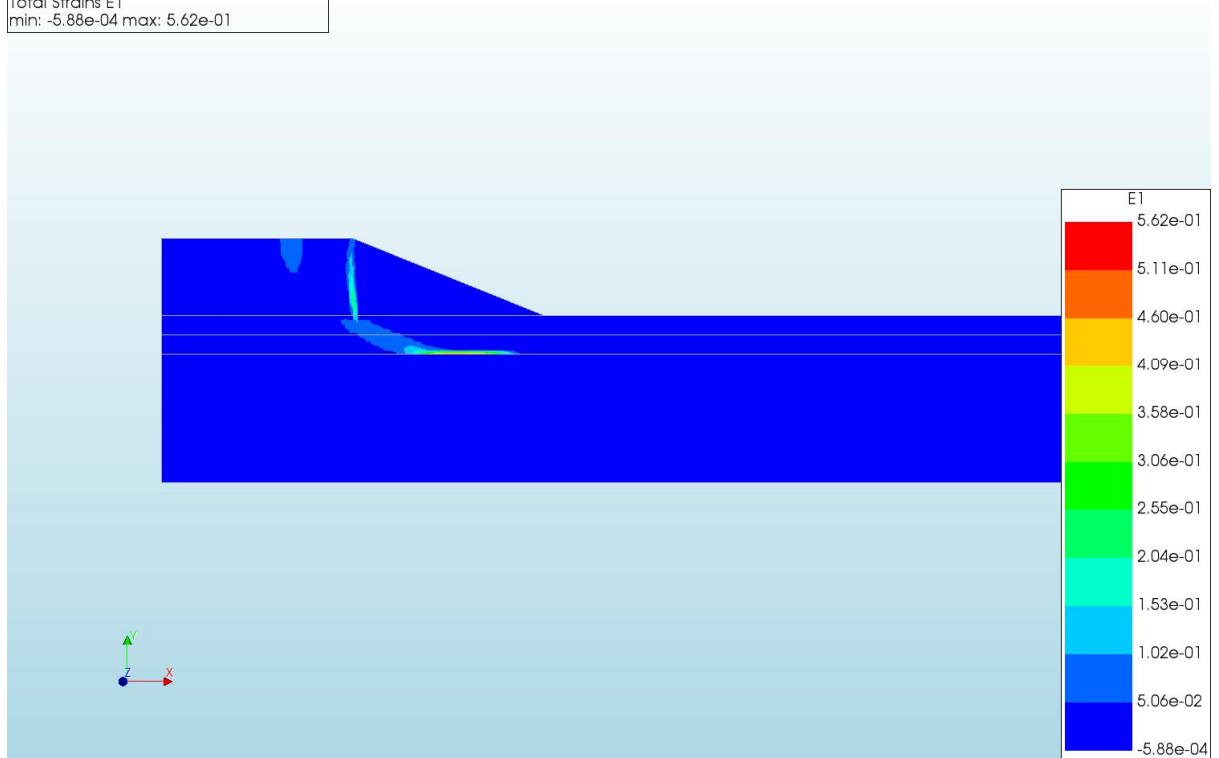


d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -187.23kN/m<sup>2</sup> max: 1.80kN/m<sup>2</sup>

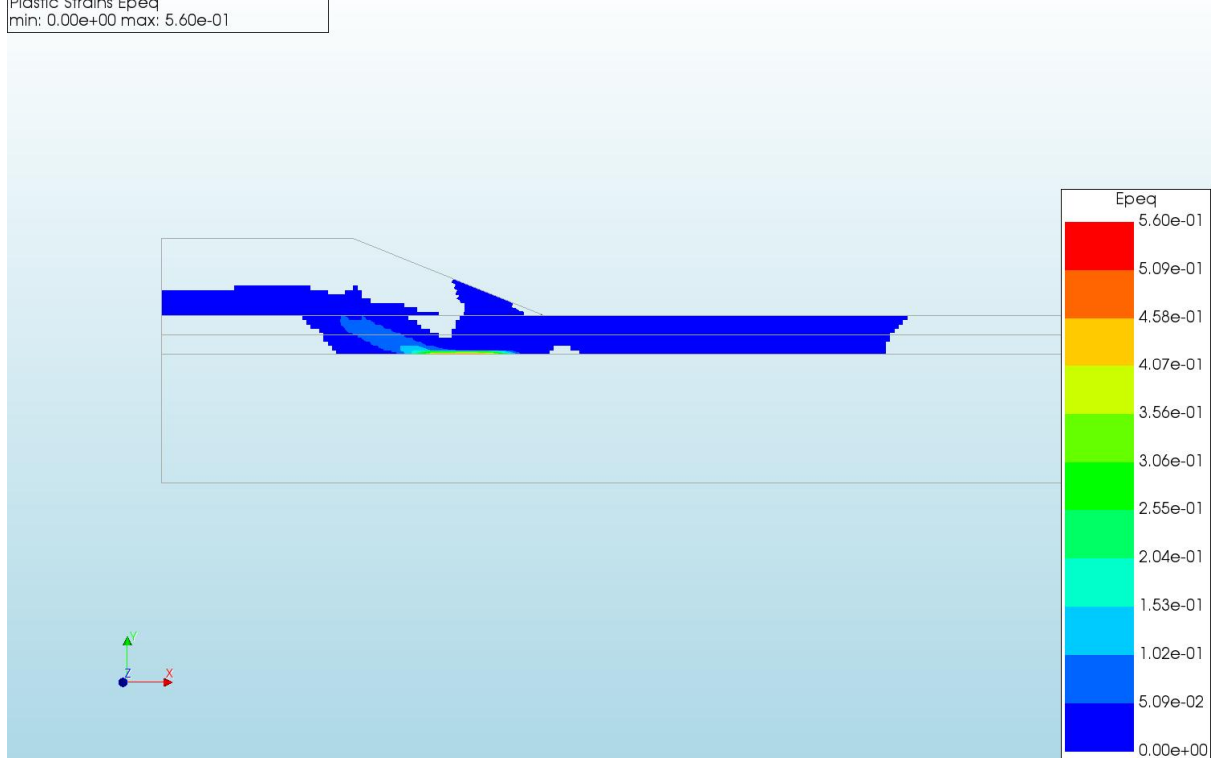




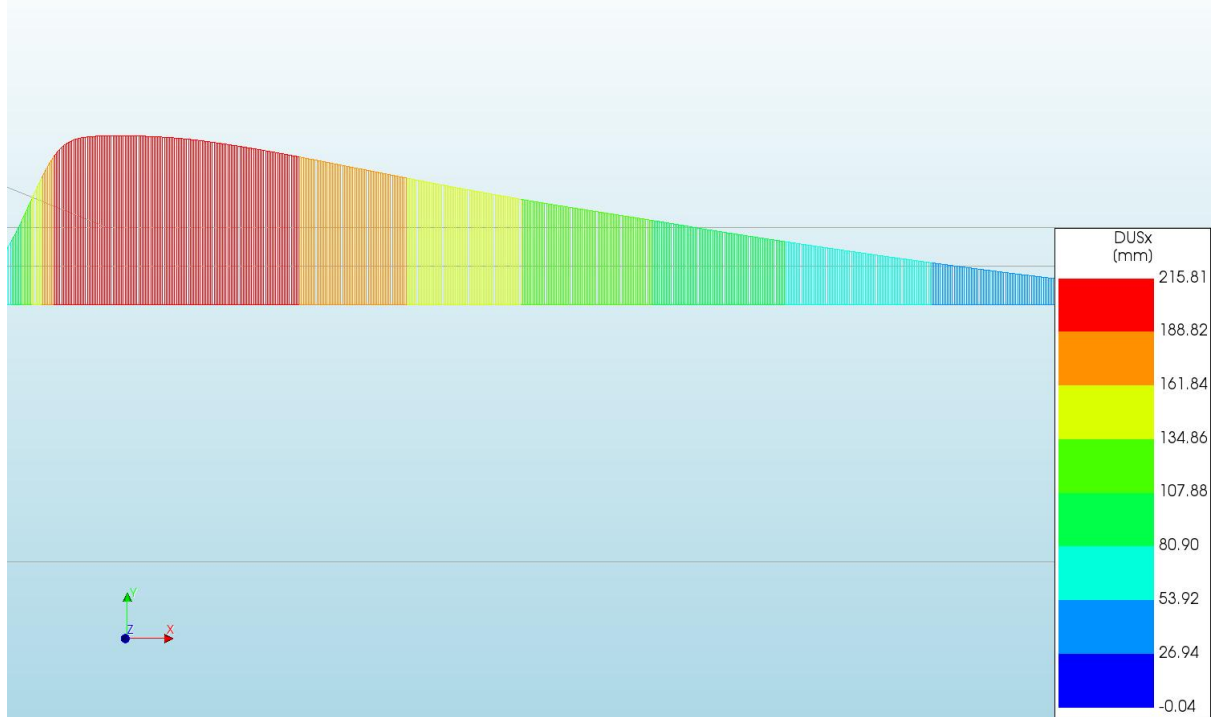
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Total Strains E1  
min: -5.88e-04 max: 5.62e-01



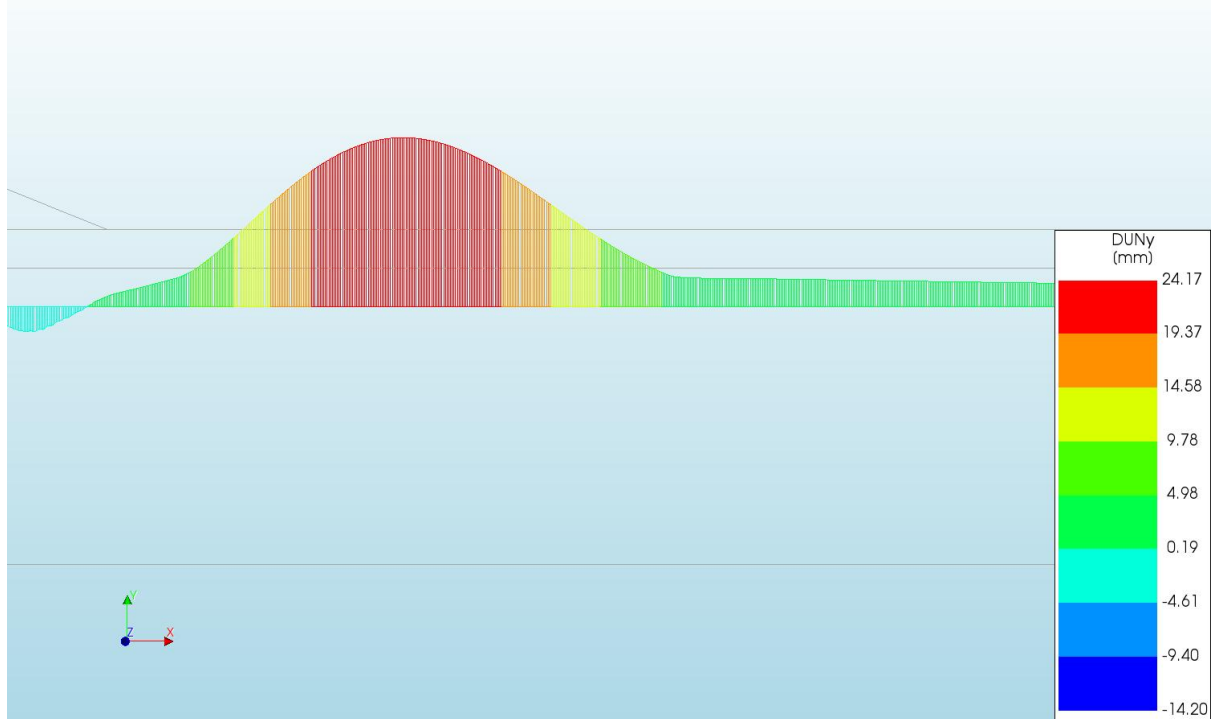
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.60e-01



d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.04mm max: 215.81mm



d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.20mm max: 24.17mm

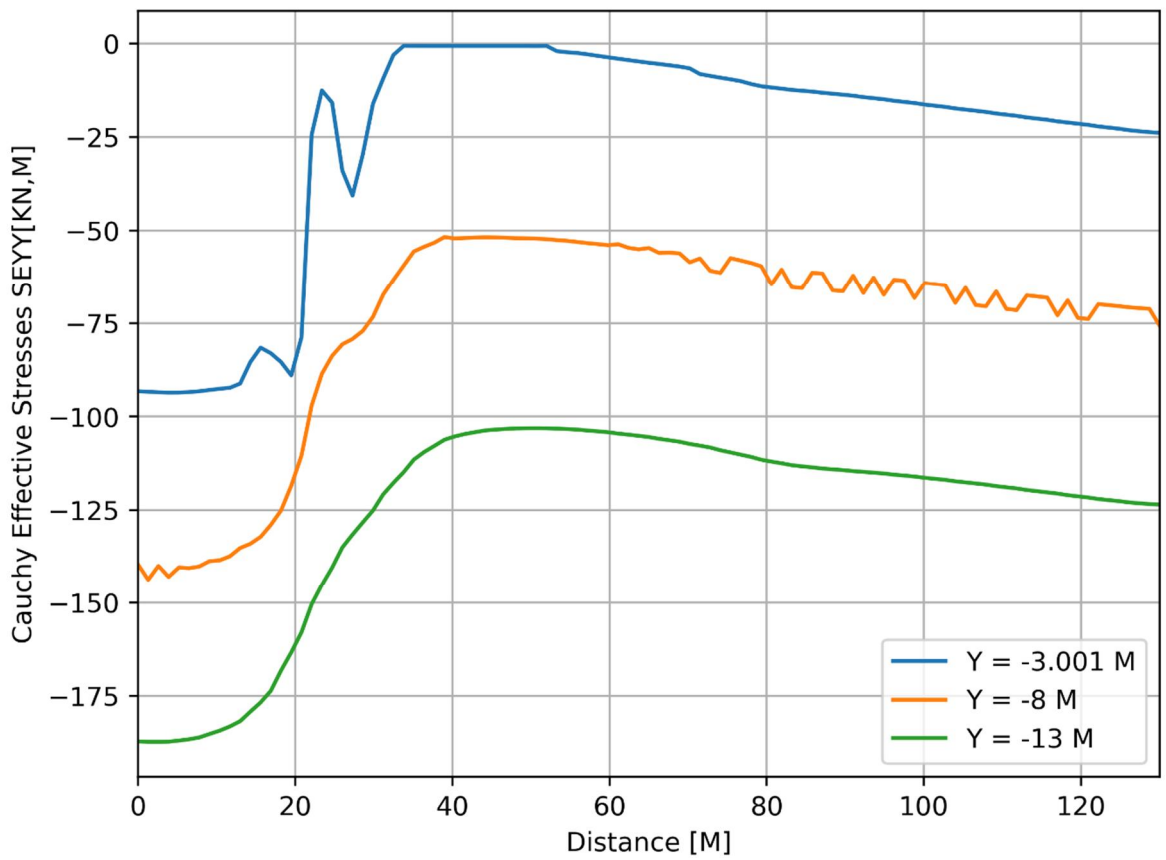
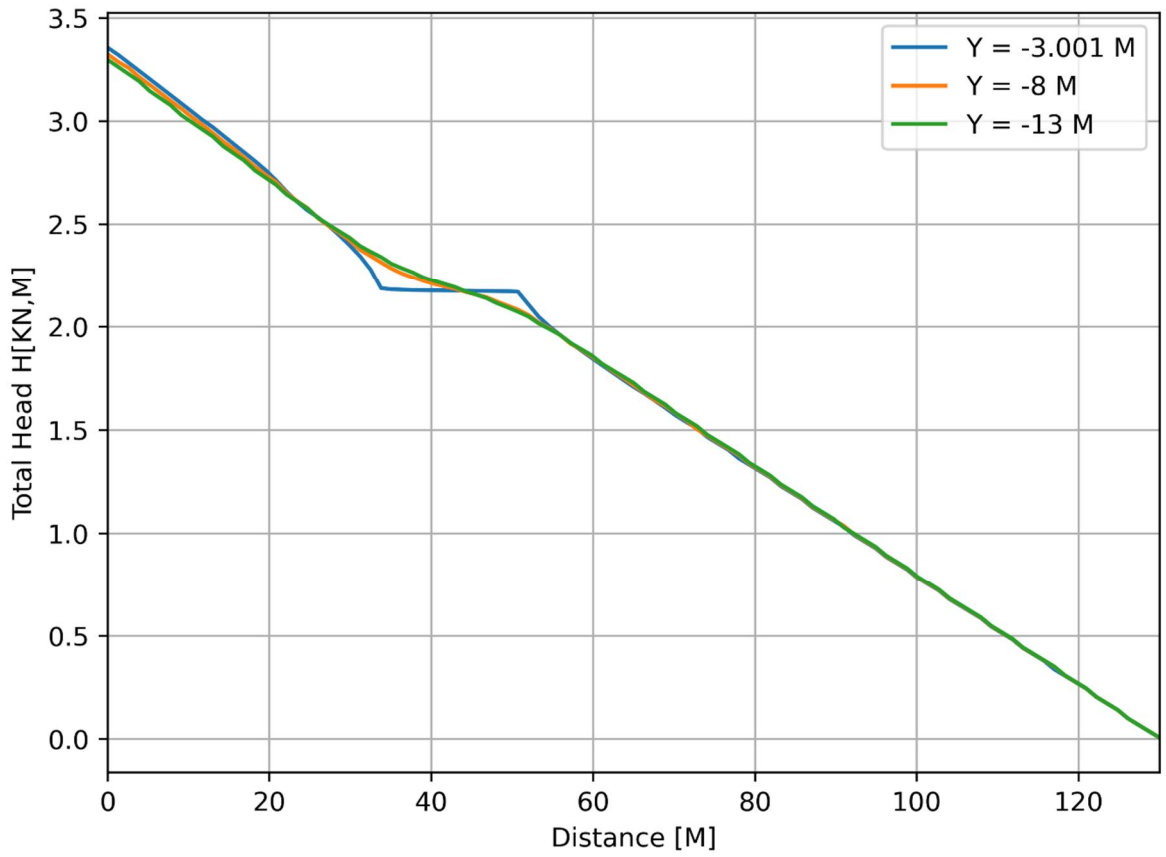


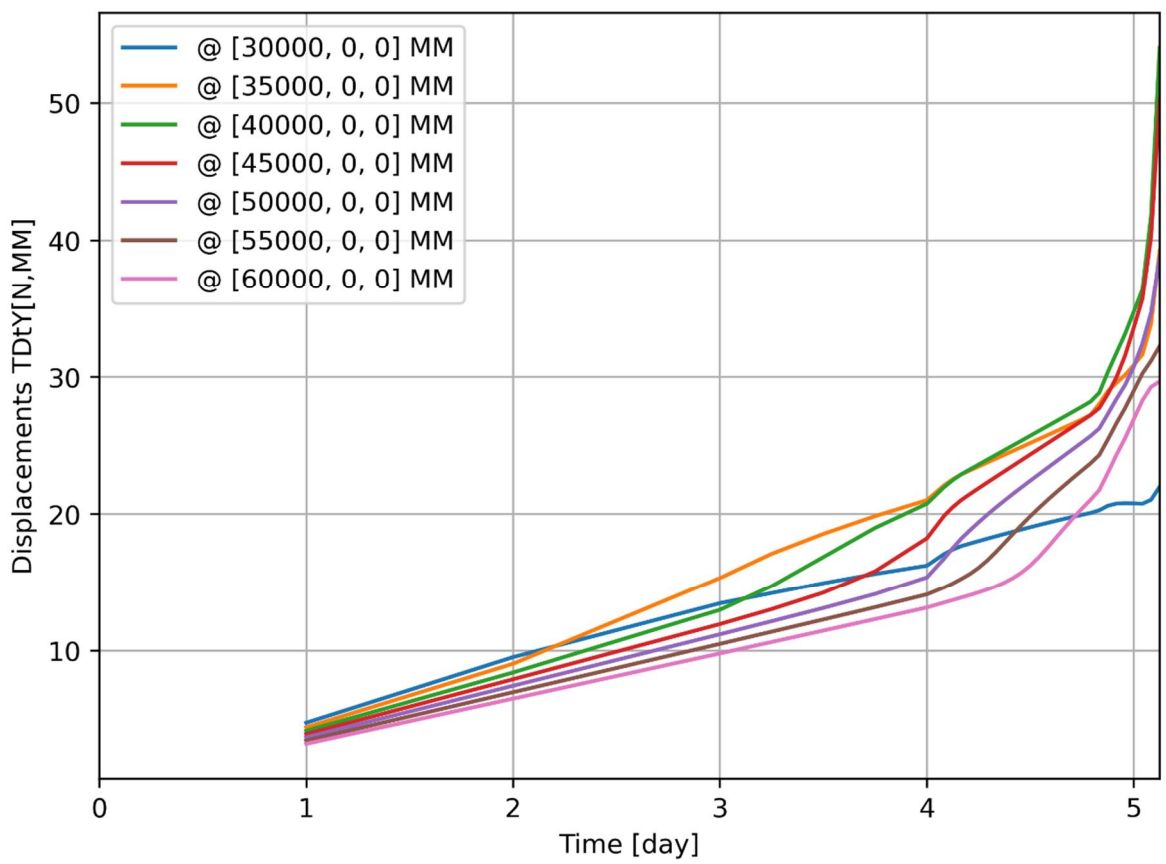
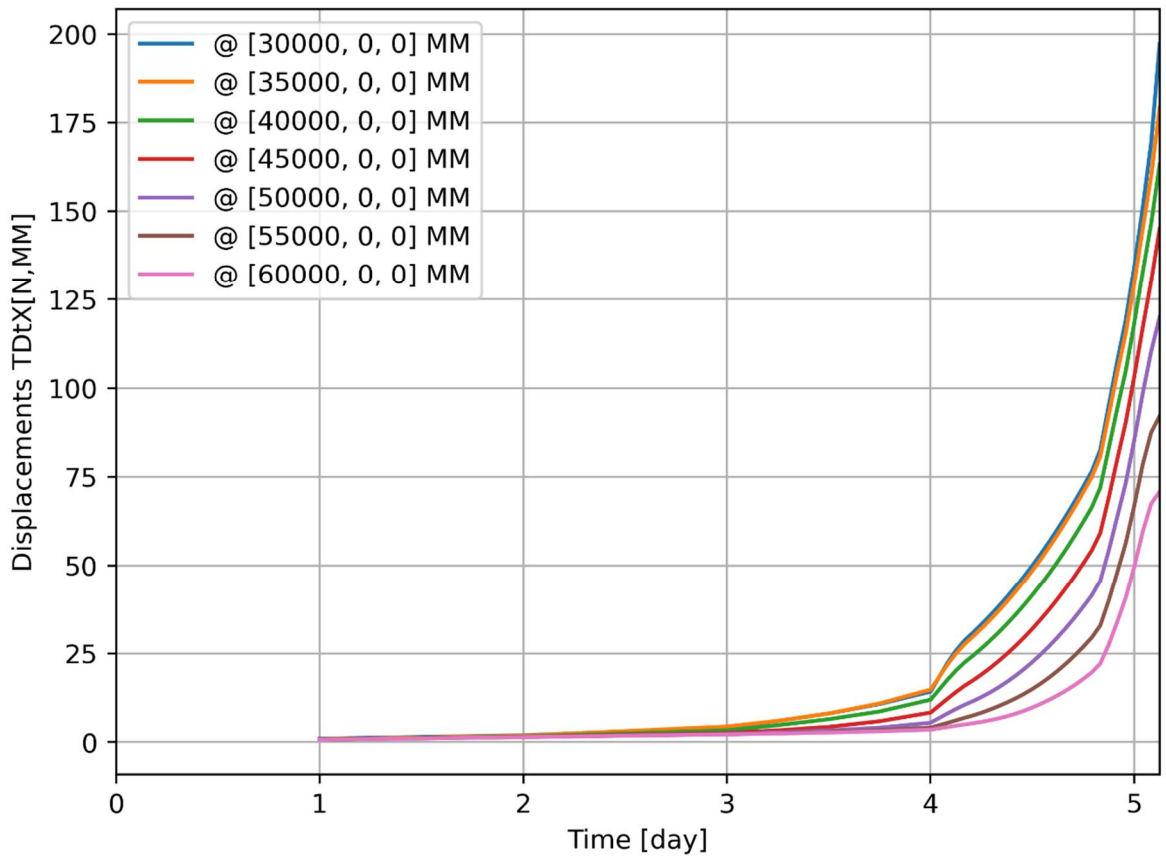
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.22kN/m<sup>2</sup> max: 25.11kN/m<sup>2</sup>

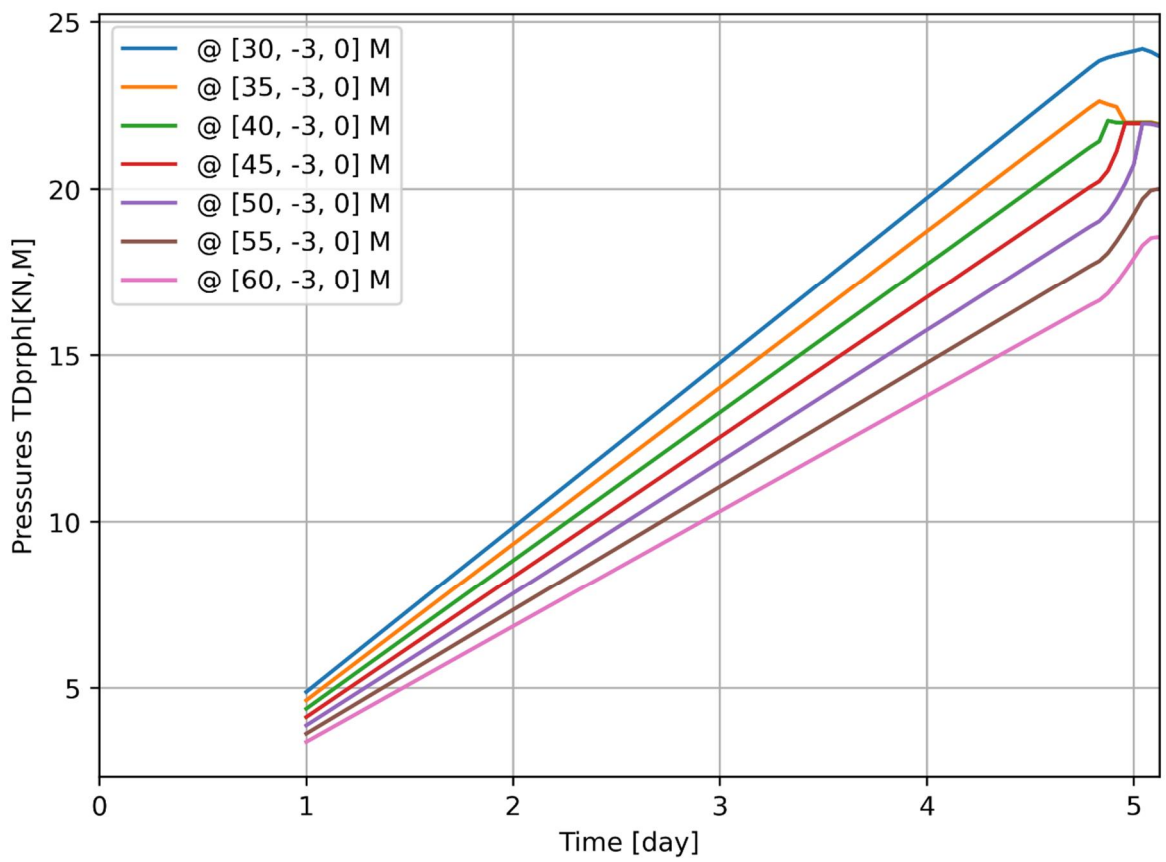
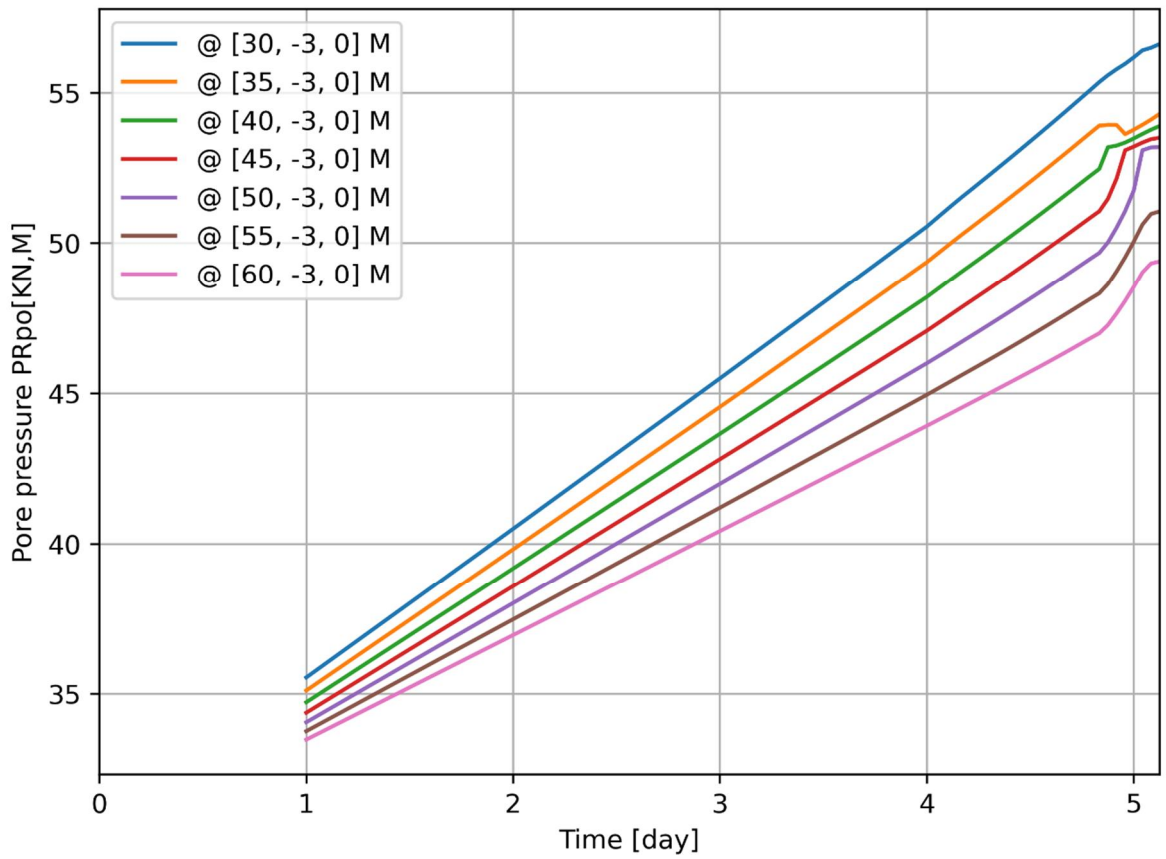


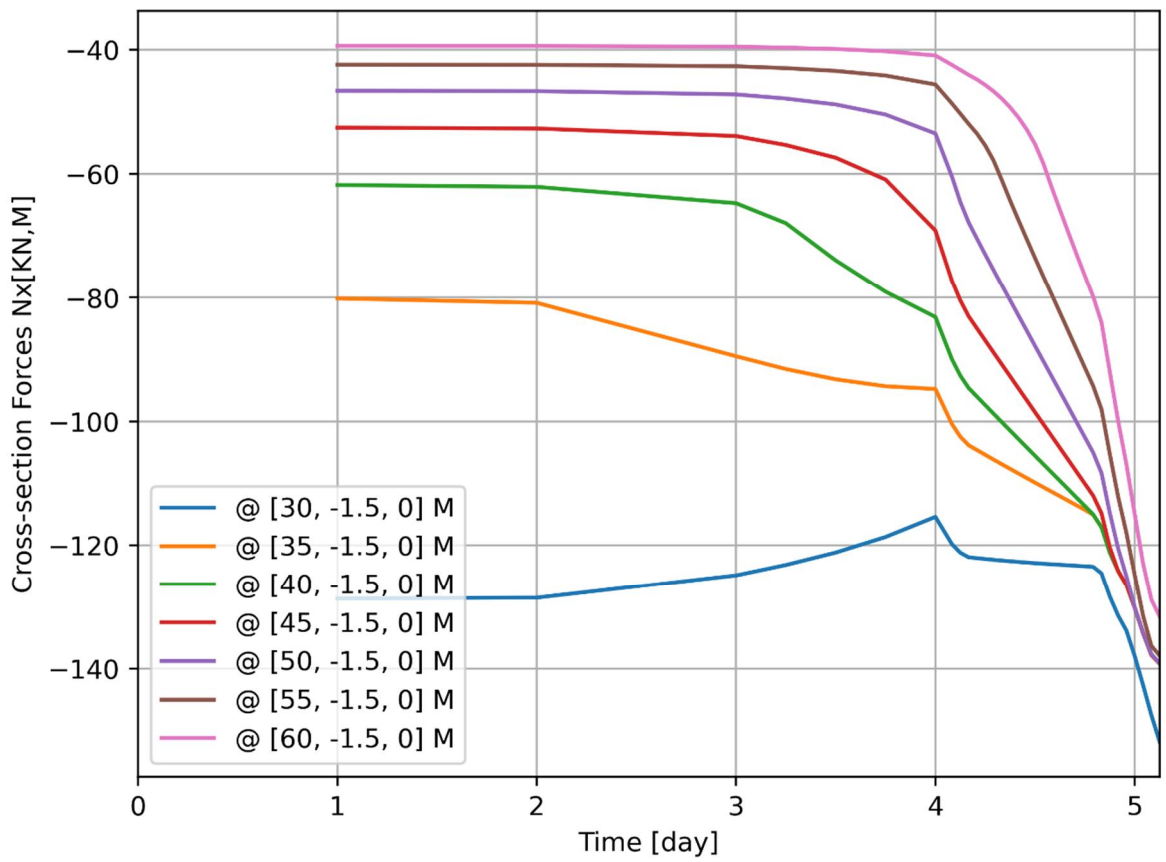
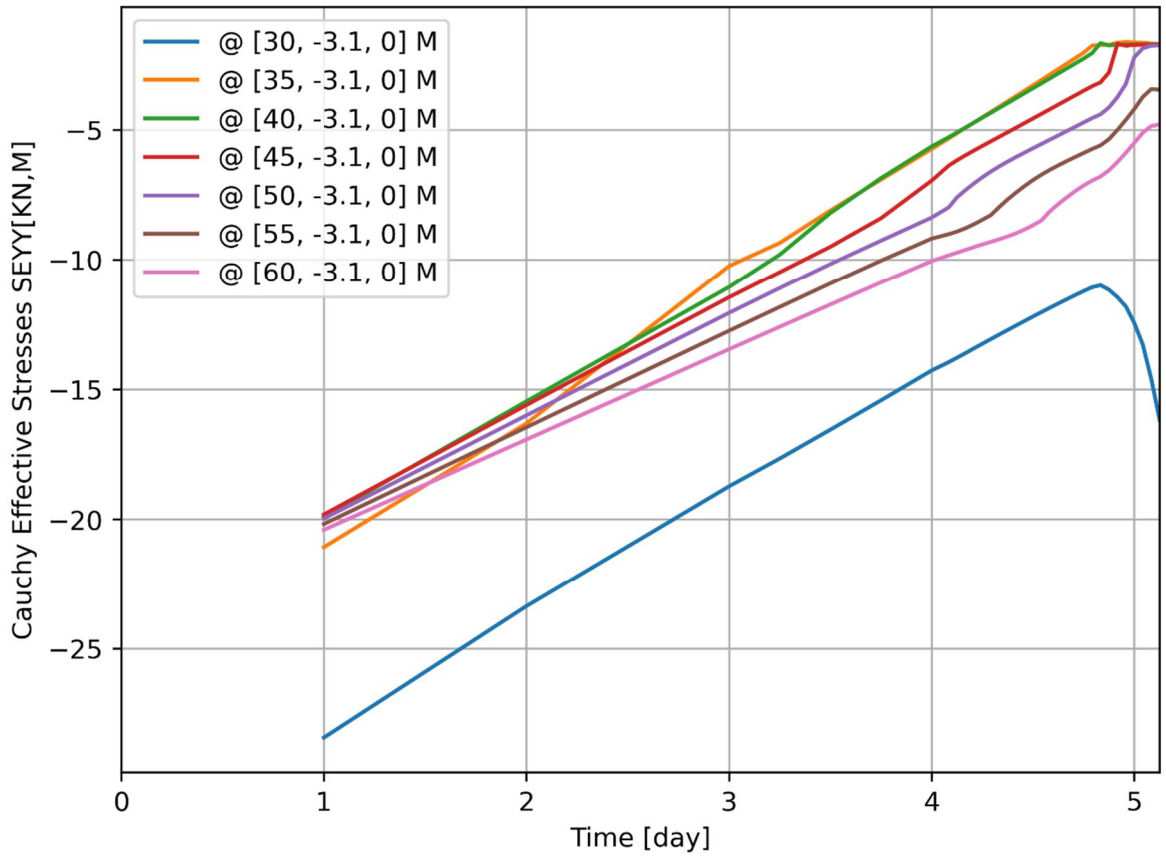
d=3\_c=16\_E=5\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 39, Time 5 day 3 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -92.99kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

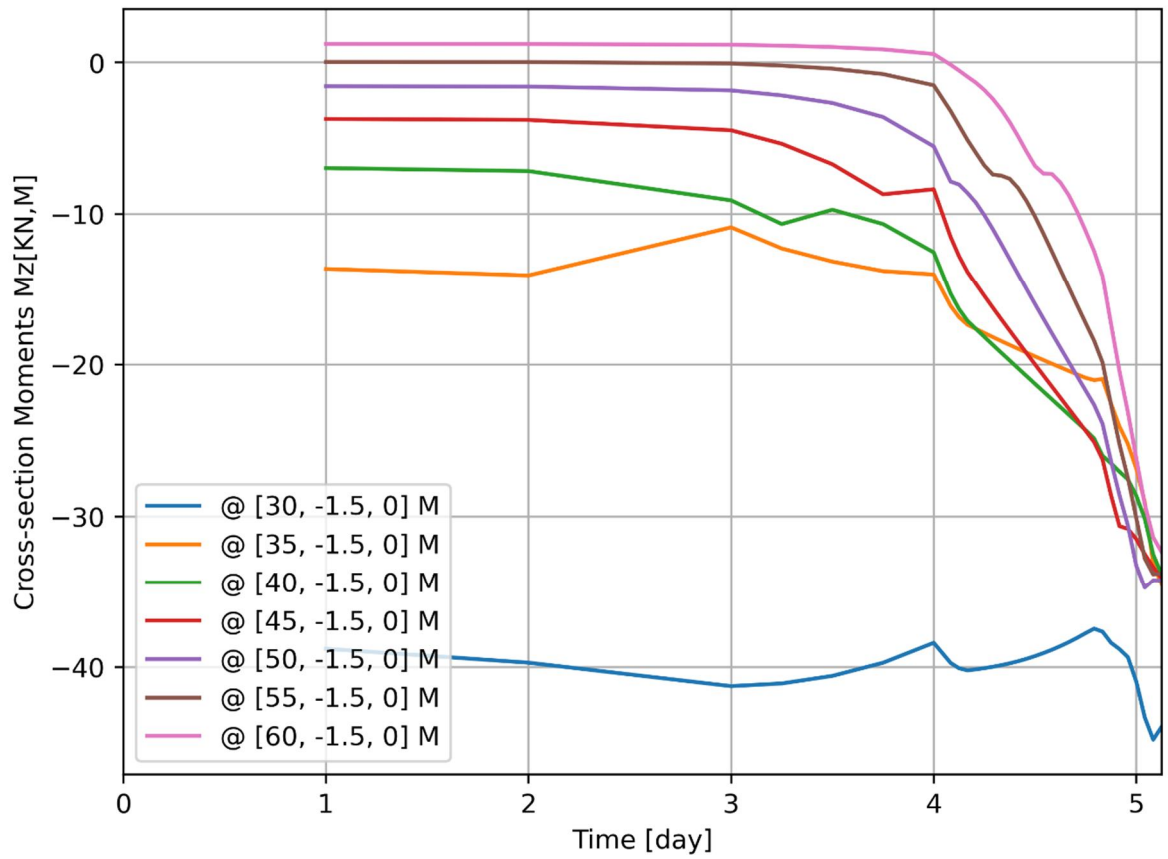










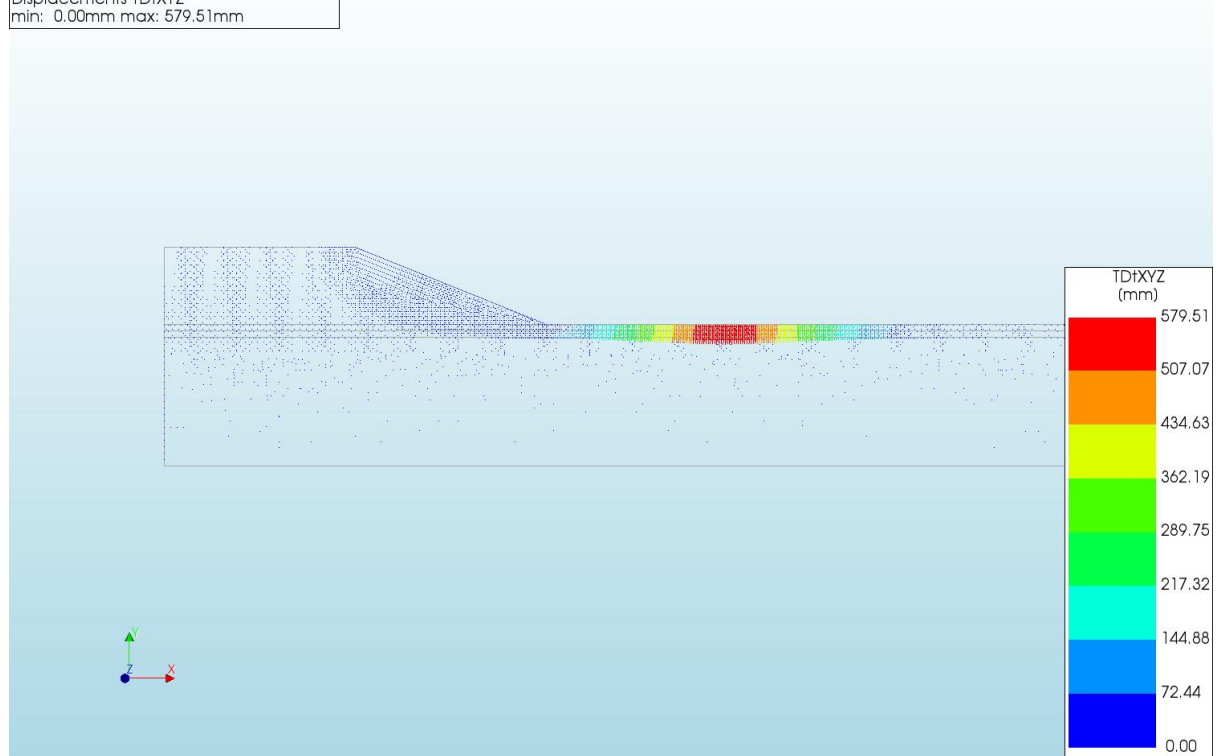




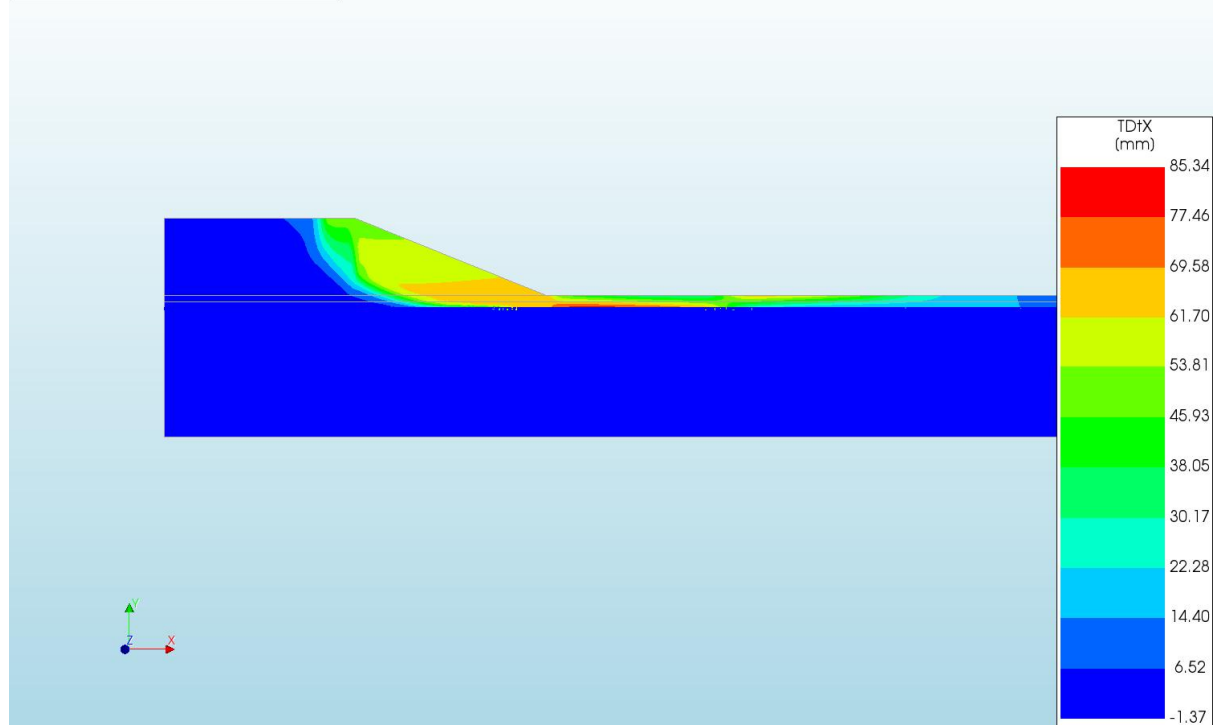
A.2.23

'Output\_d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818'

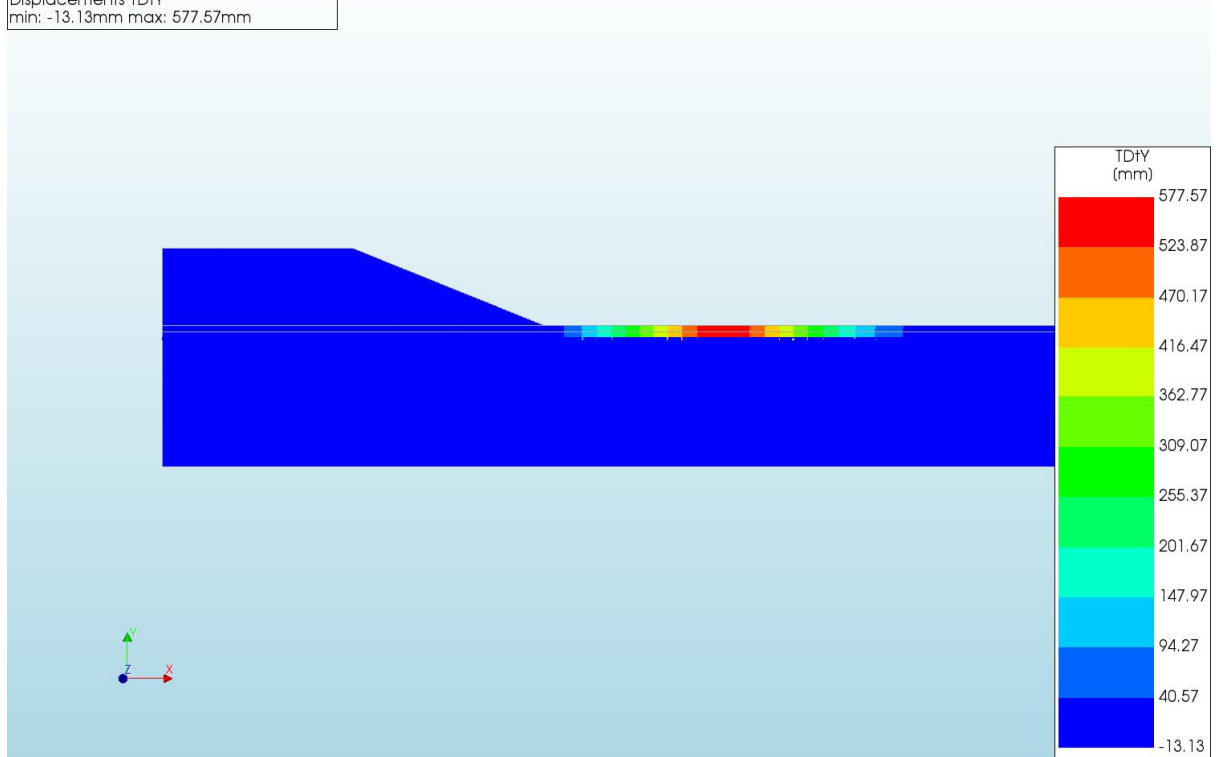
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 579.51mm



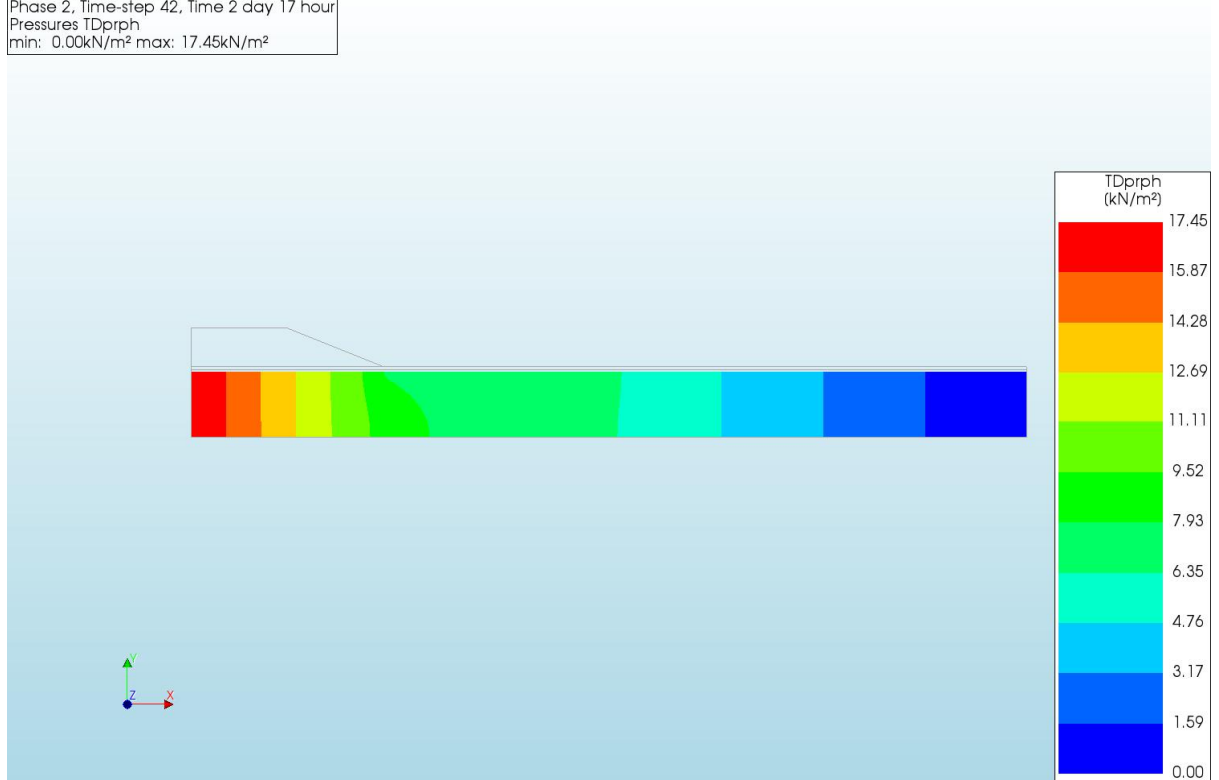
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Displacements TDtX  
min: -1.37mm max: 85.34mm



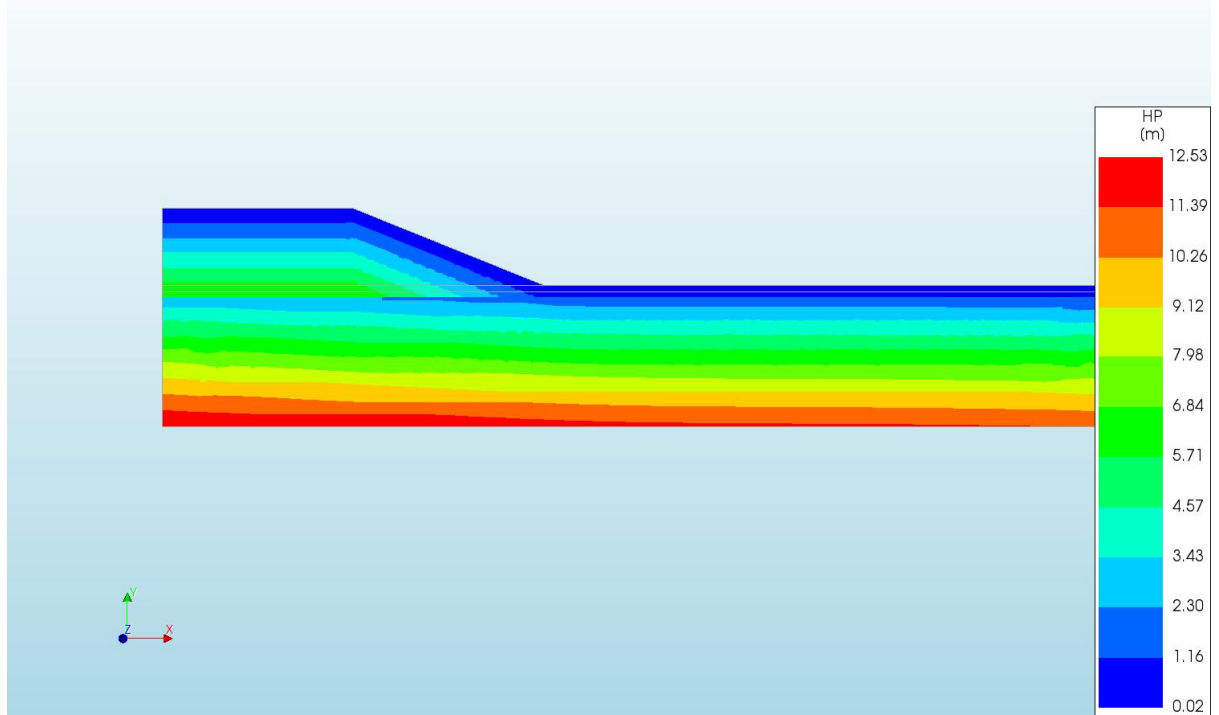
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Displacements TDtY  
min: -13.13mm max: 577.57mm



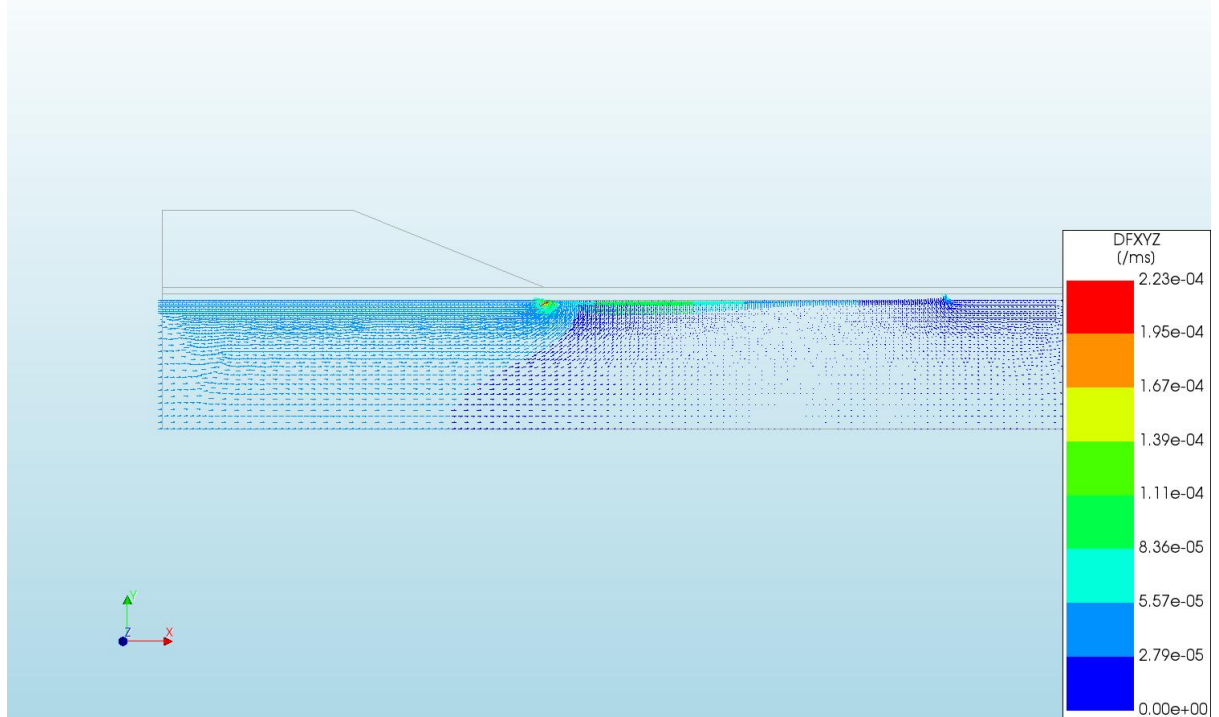
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 17.45kN/m<sup>2</sup>



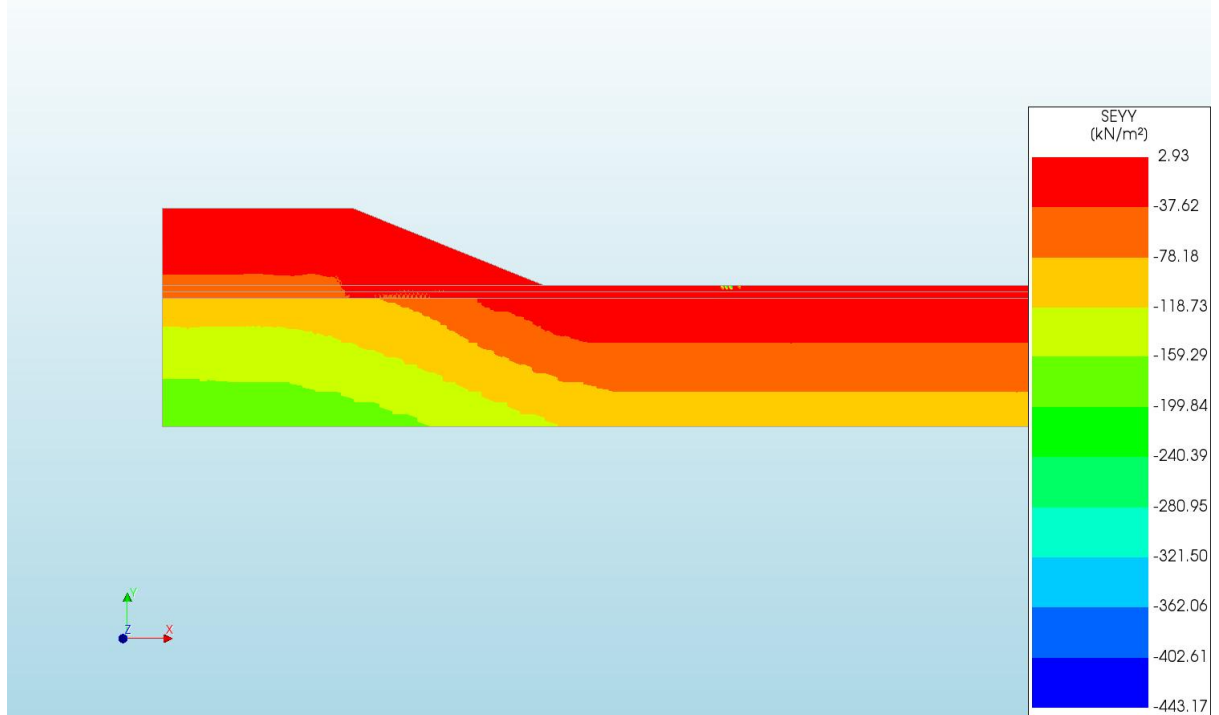
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.53m



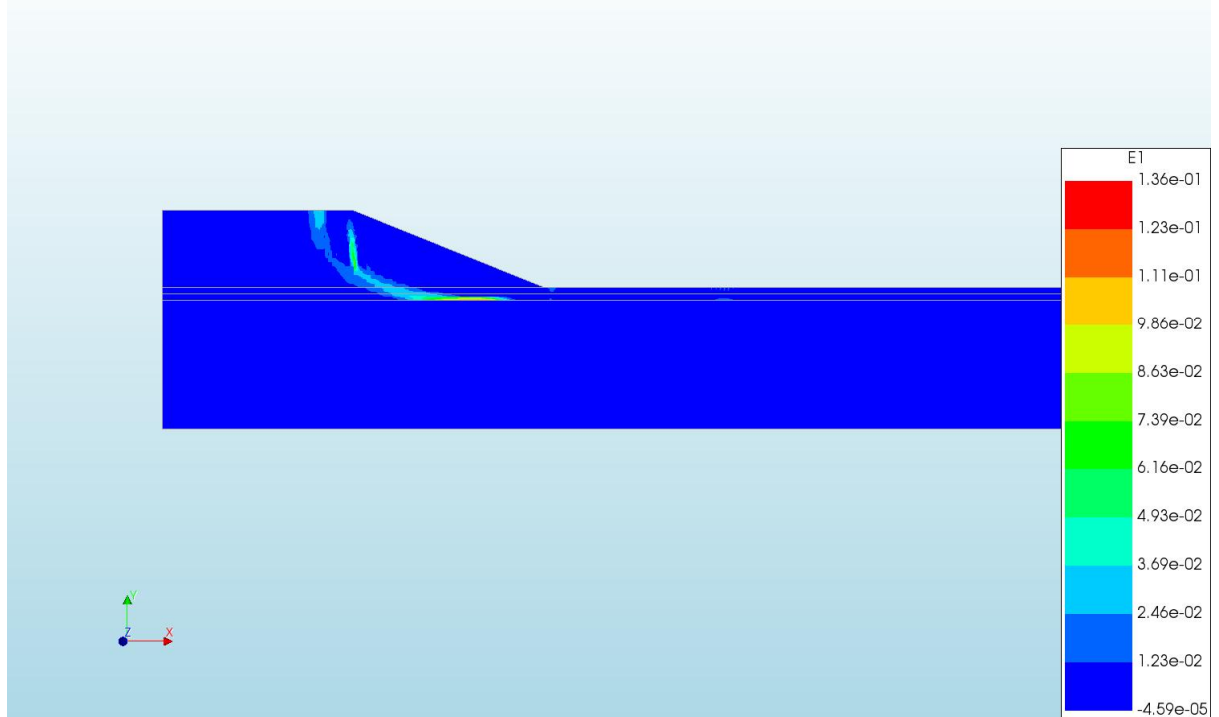
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.23e-04/ms



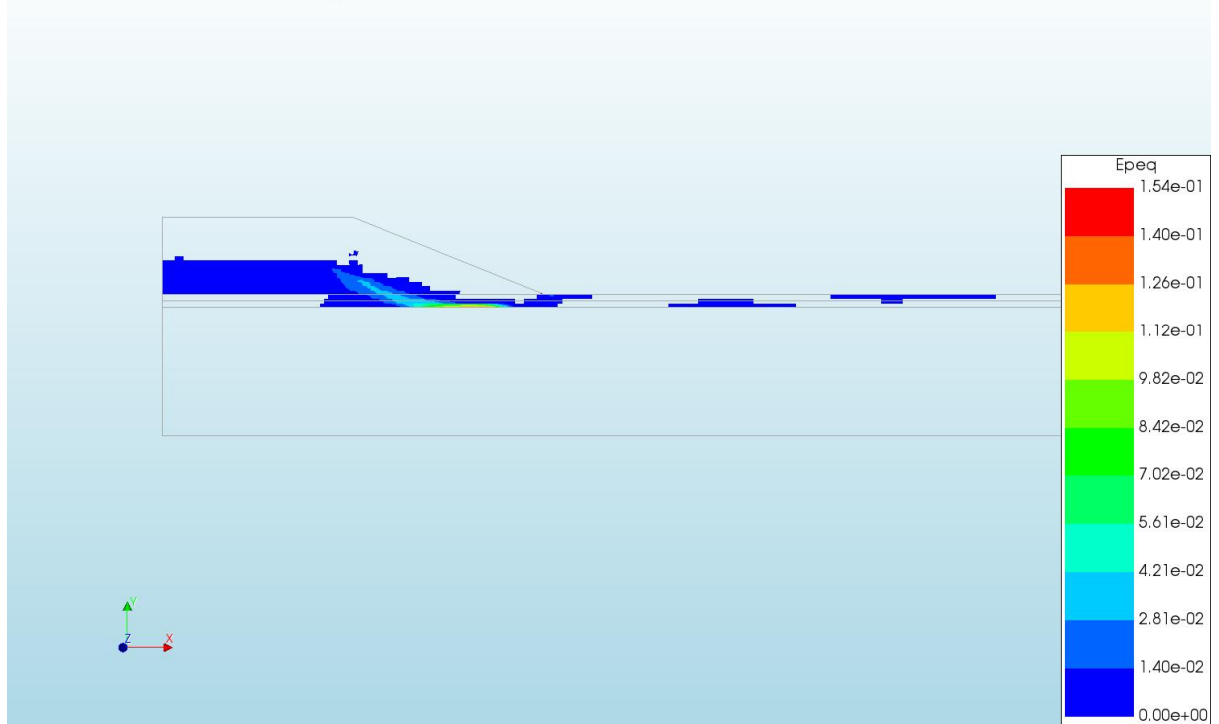
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -443.17kN/m<sup>2</sup> max: 2.93kN/m<sup>2</sup>



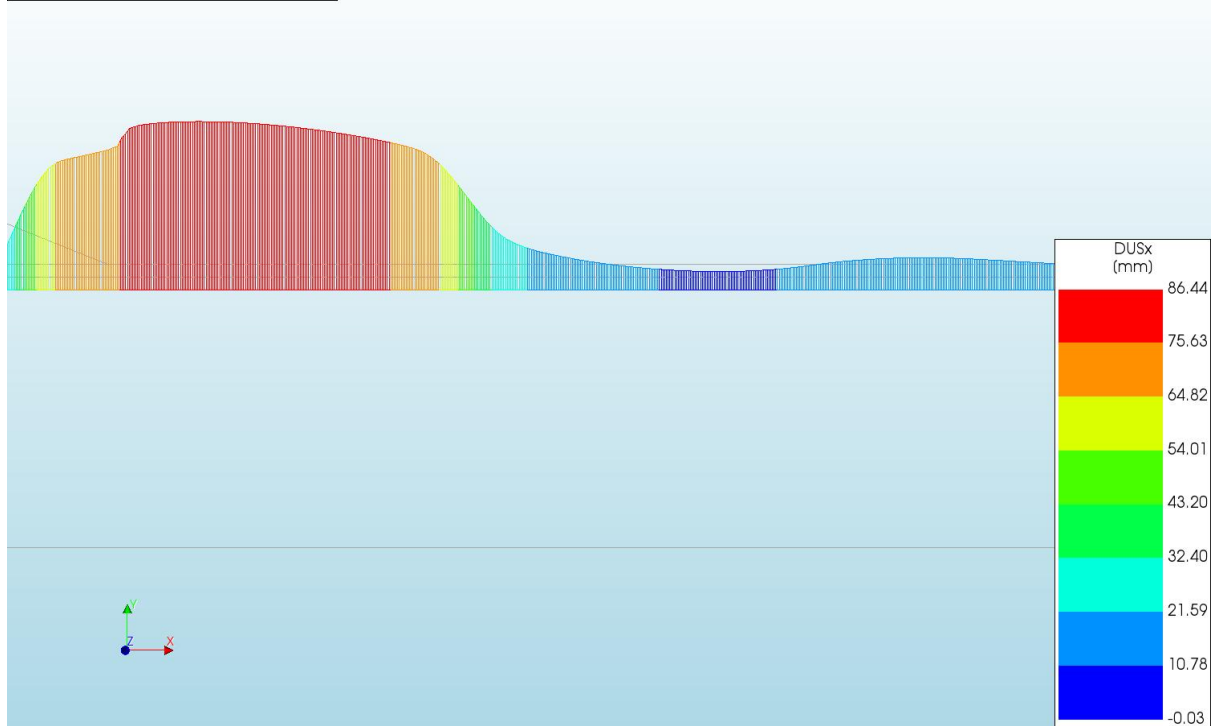
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Total Strains E1  
min: -4.59e-05 max: 1.36e-01



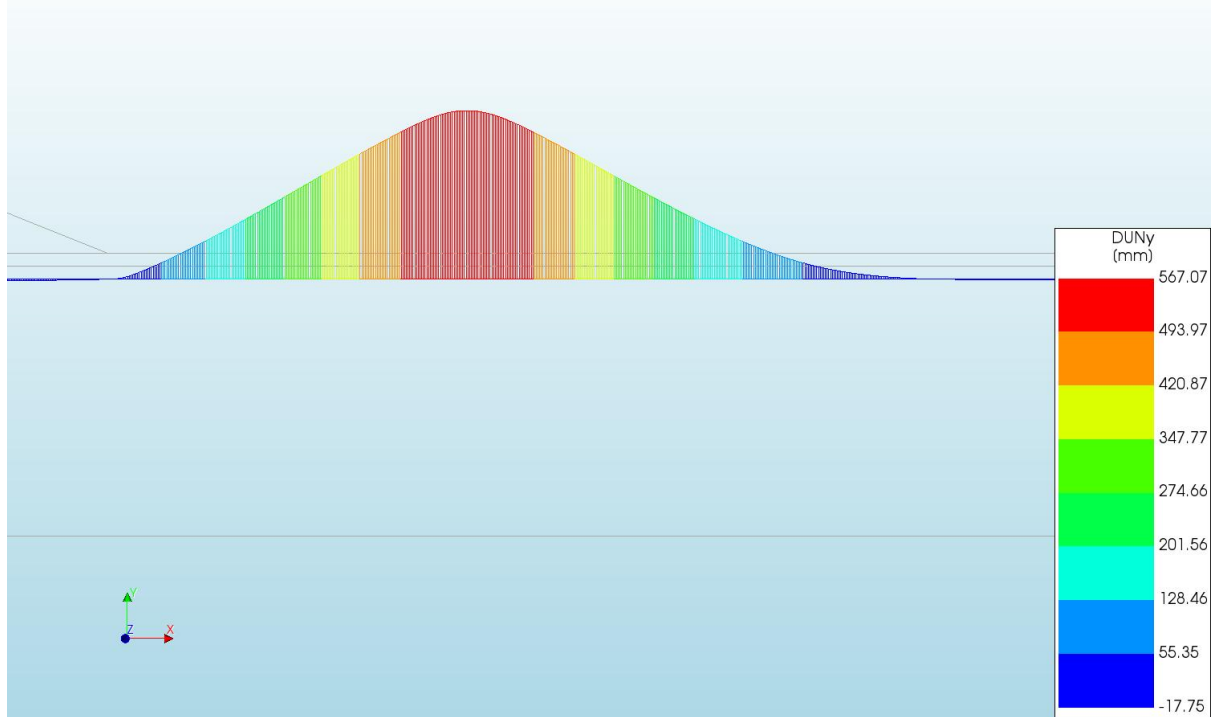
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 1.54e-01



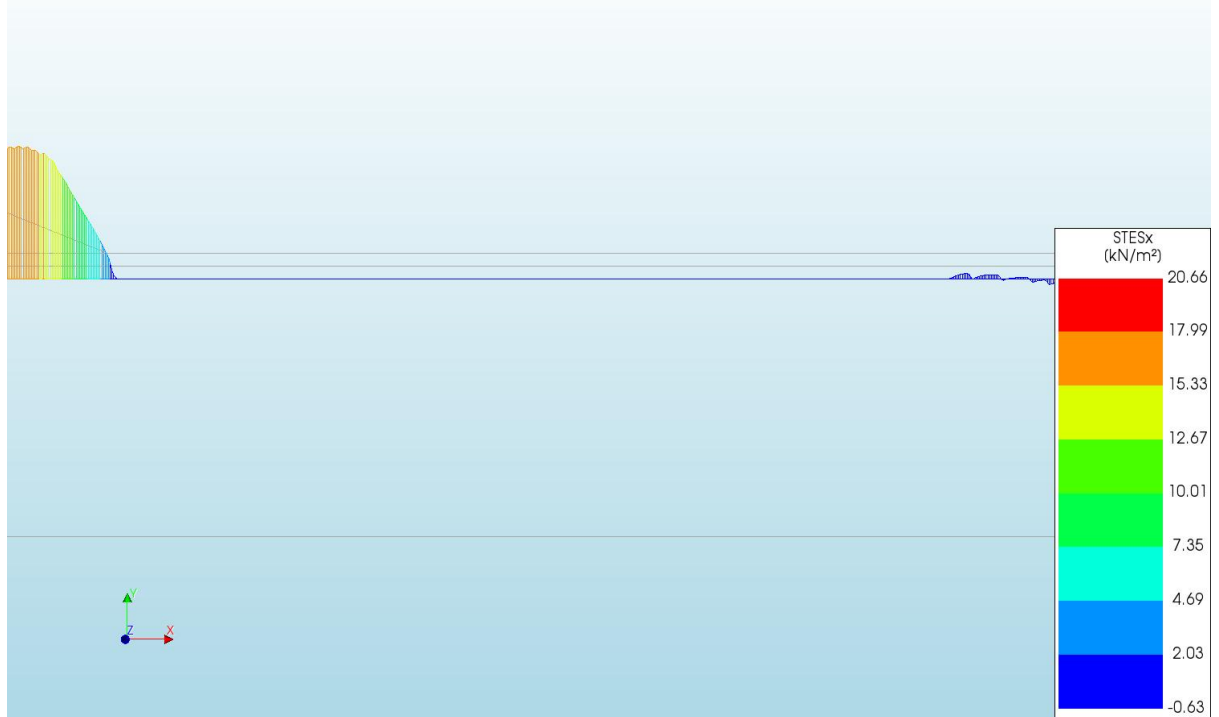
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 86.44mm

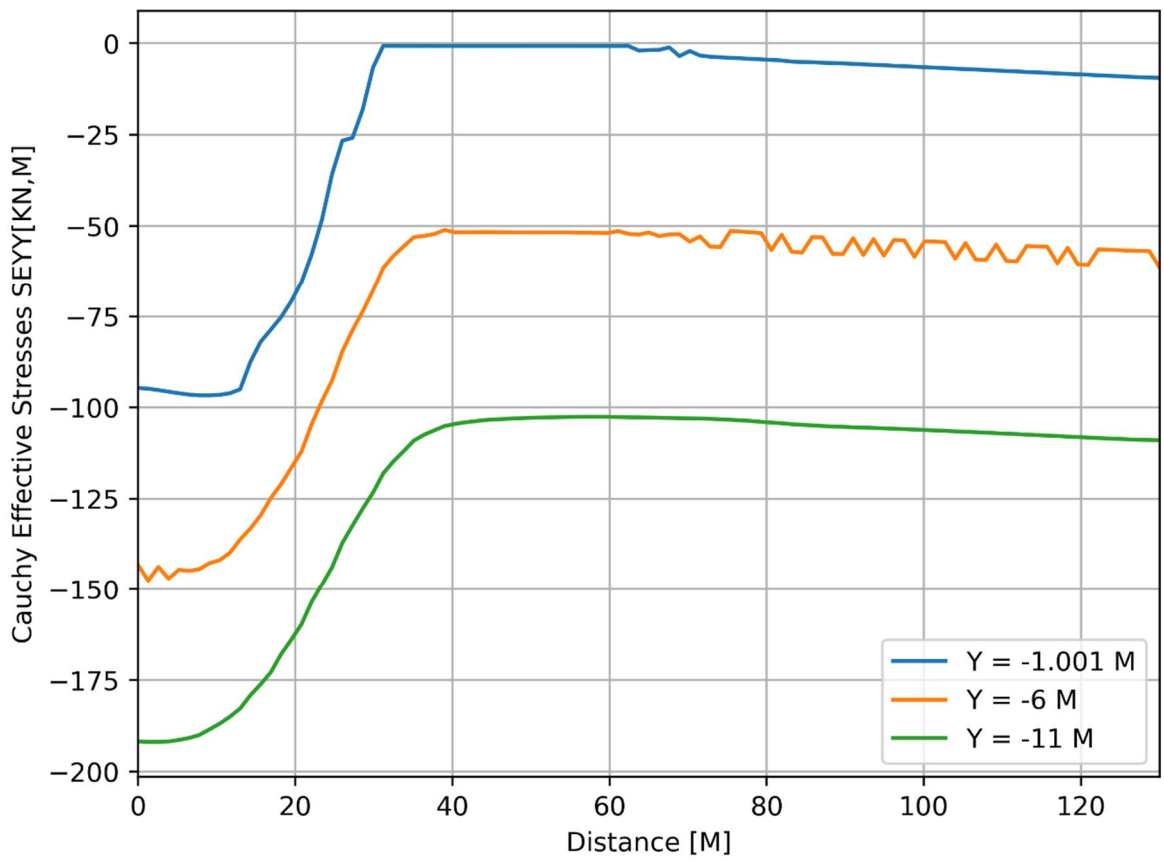
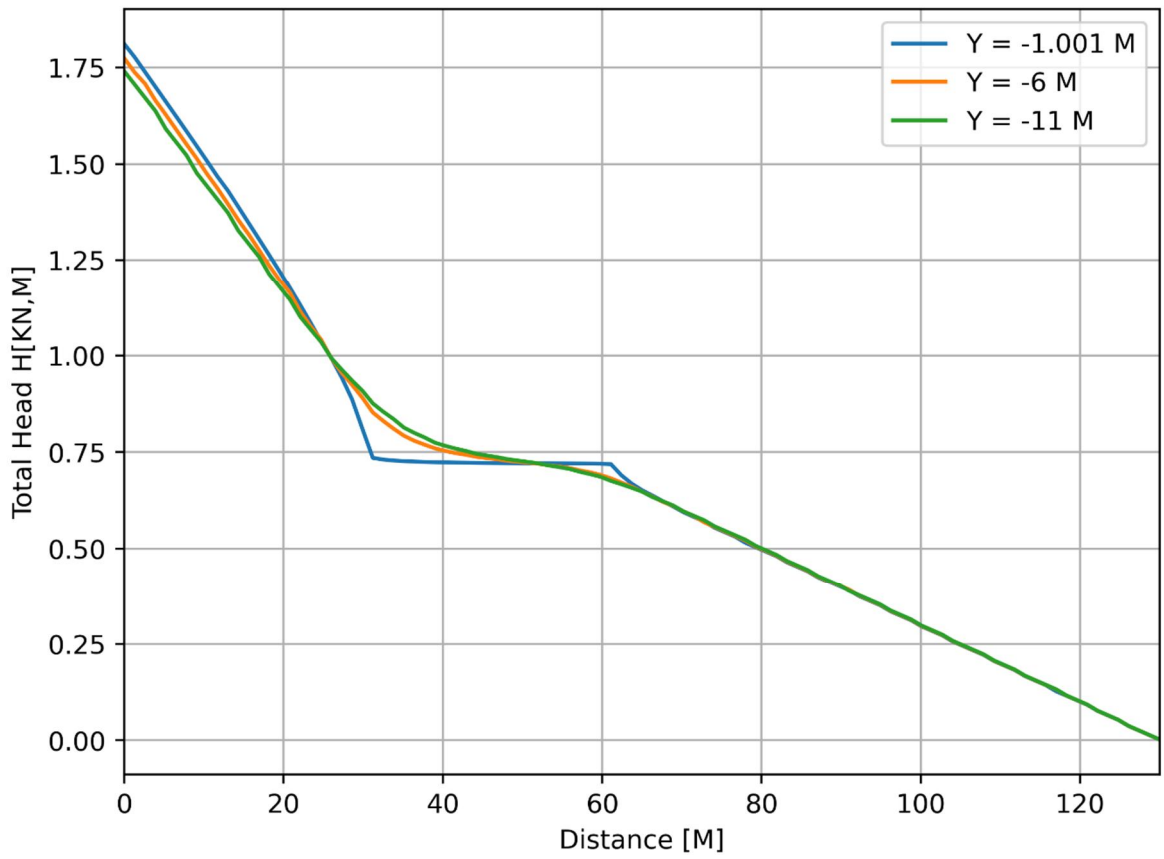


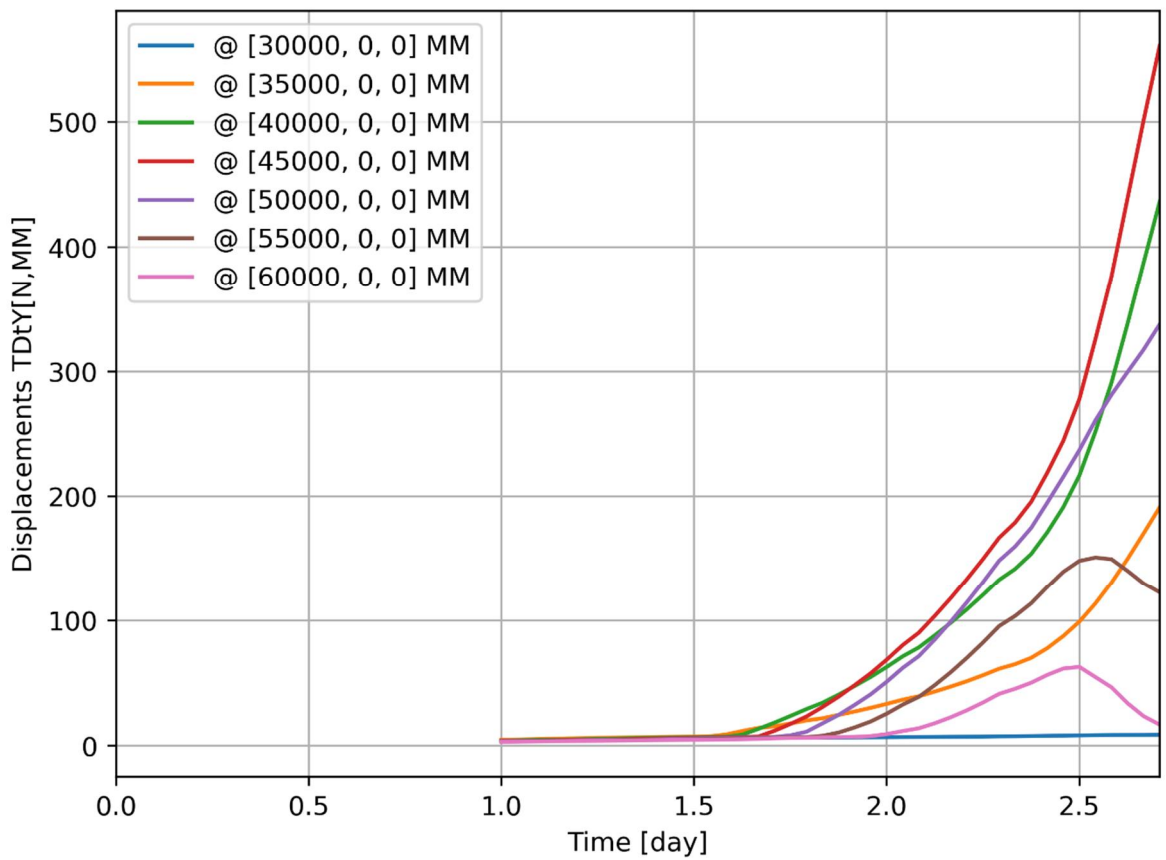
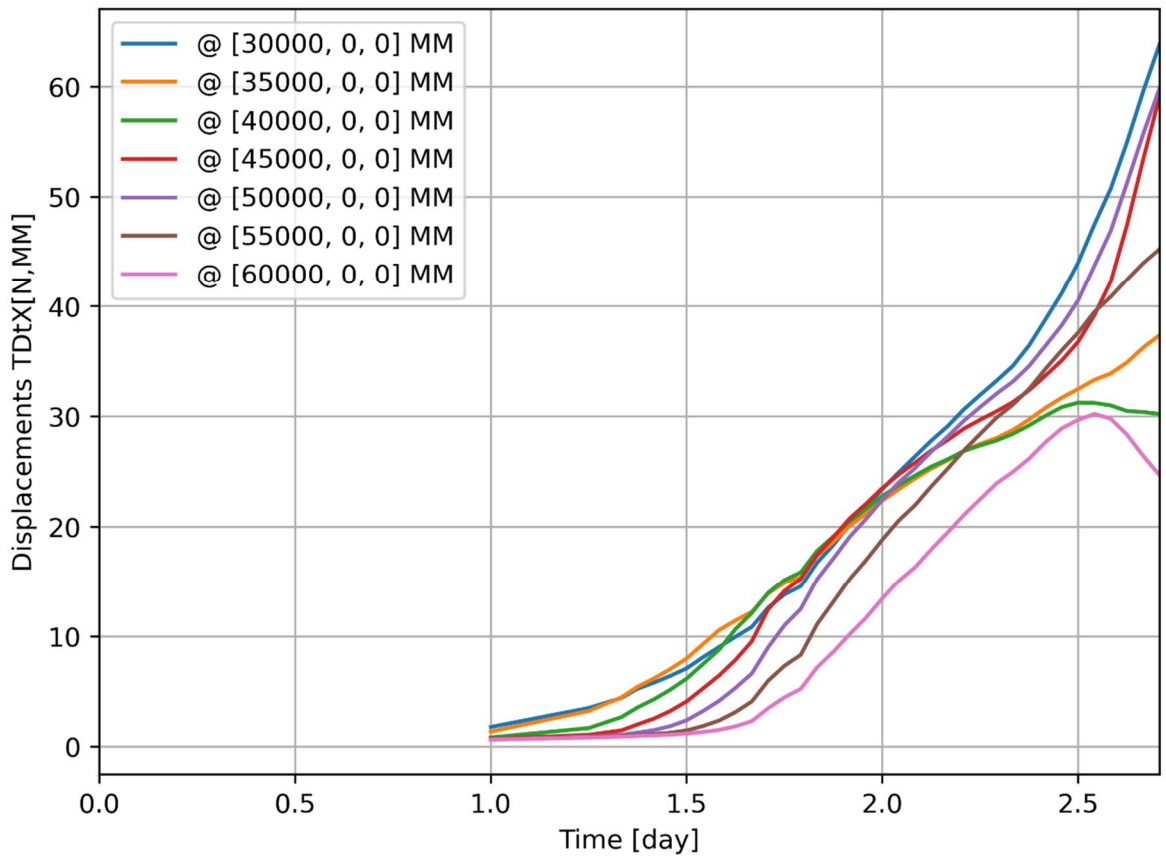
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -17.75mm max: 567.07mm



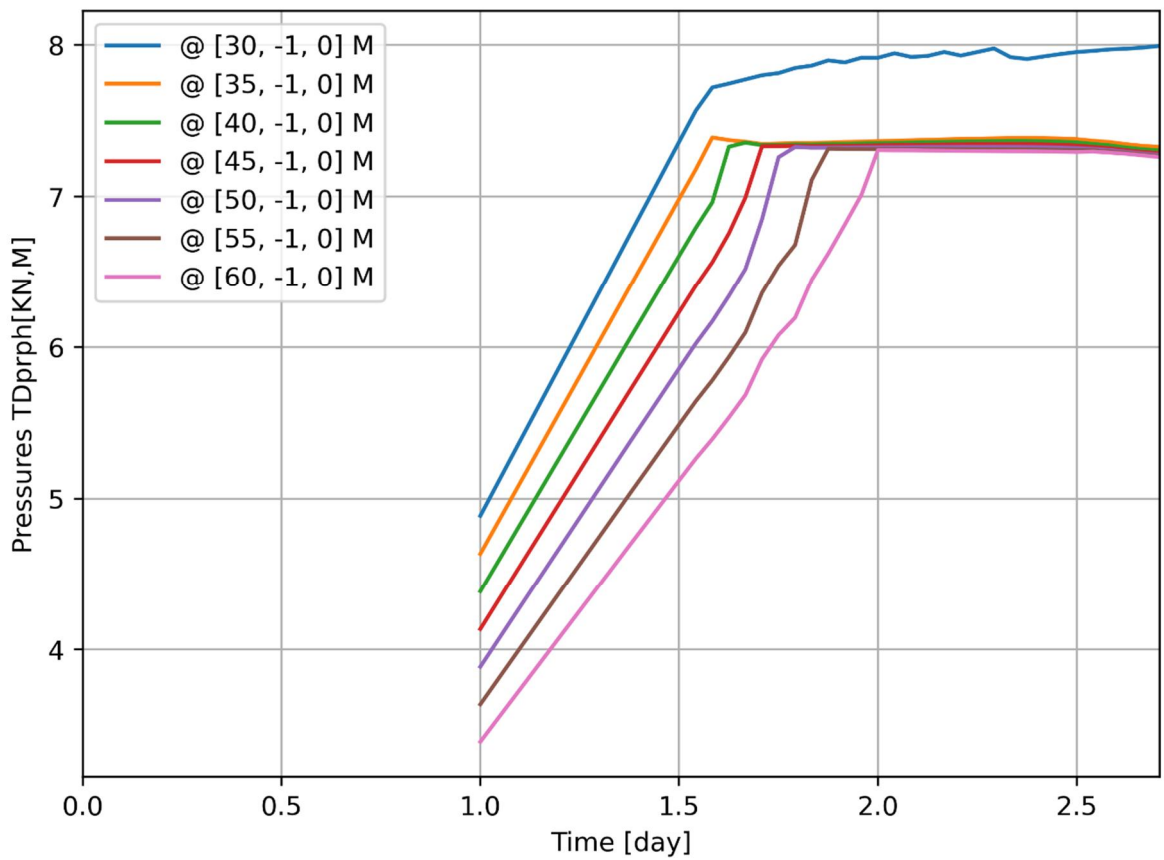
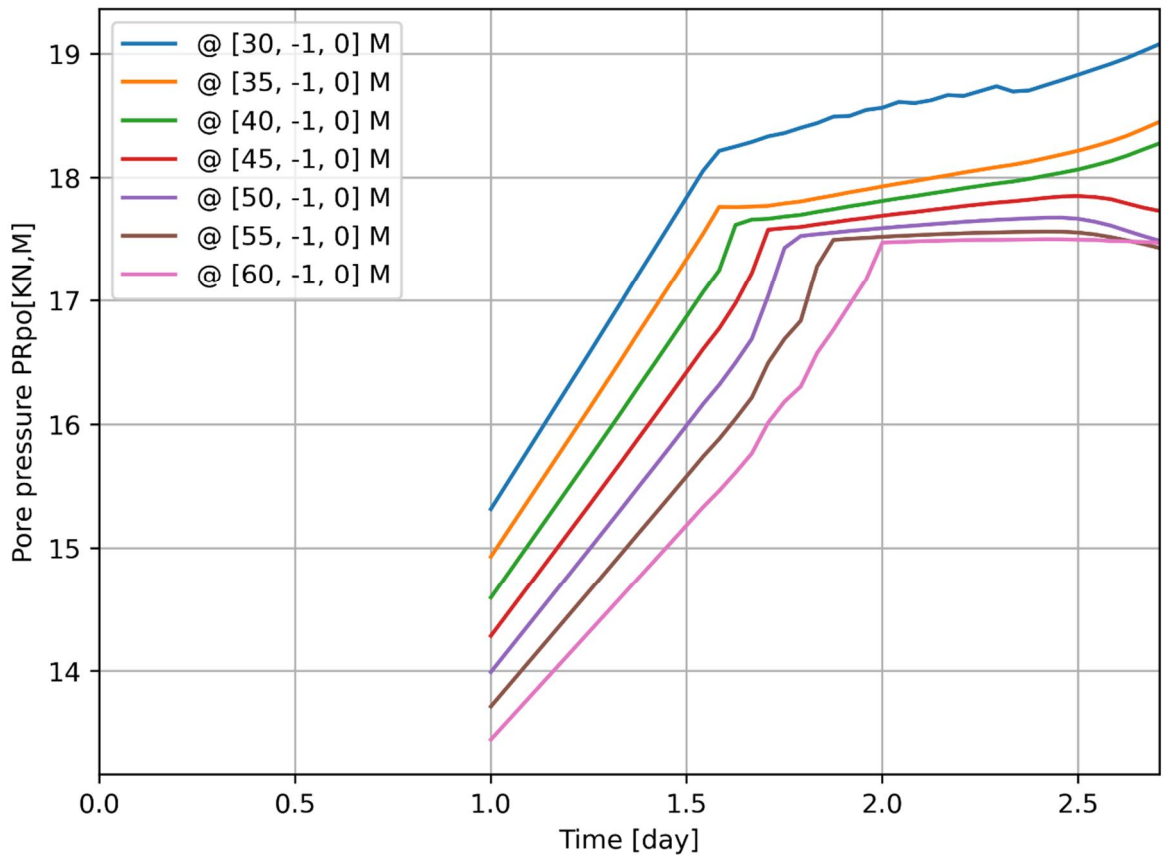
d=1\_c=14\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 2 day 17 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.63kN/m<sup>2</sup> max: 20.66kN/m<sup>2</sup>

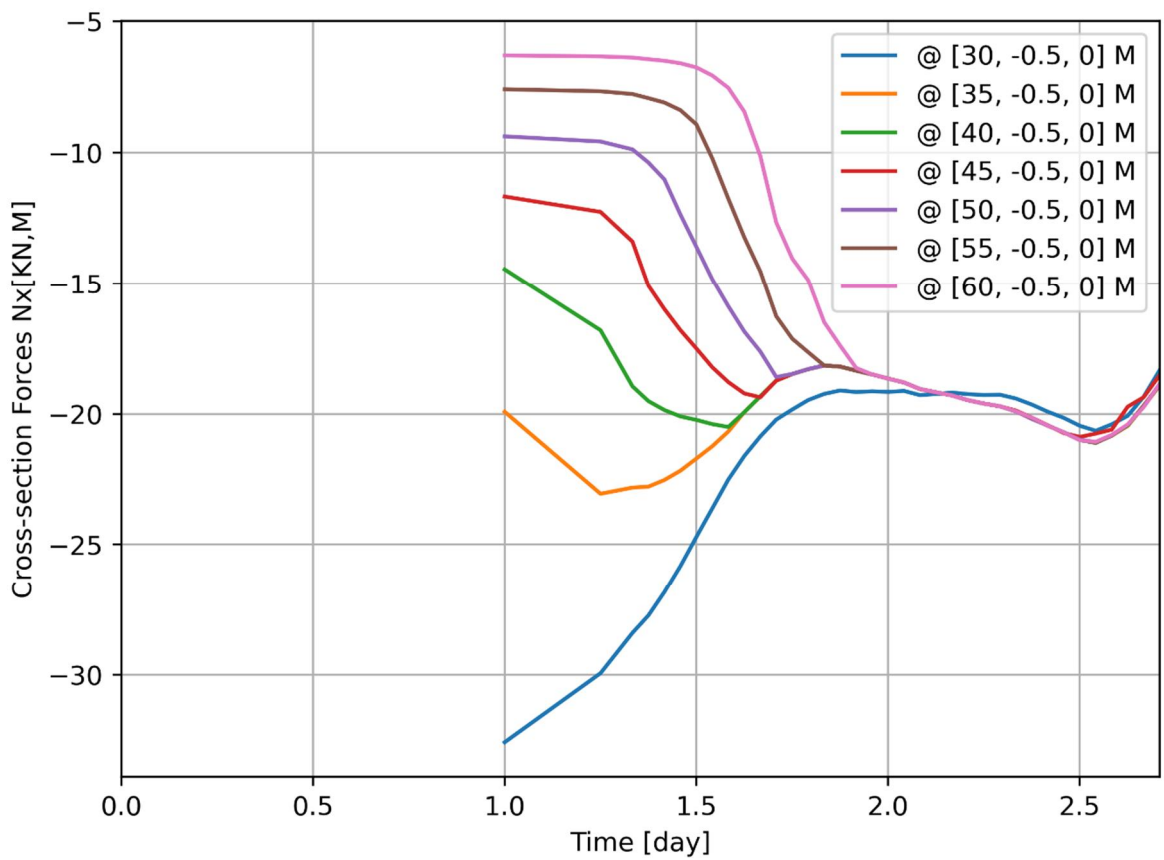
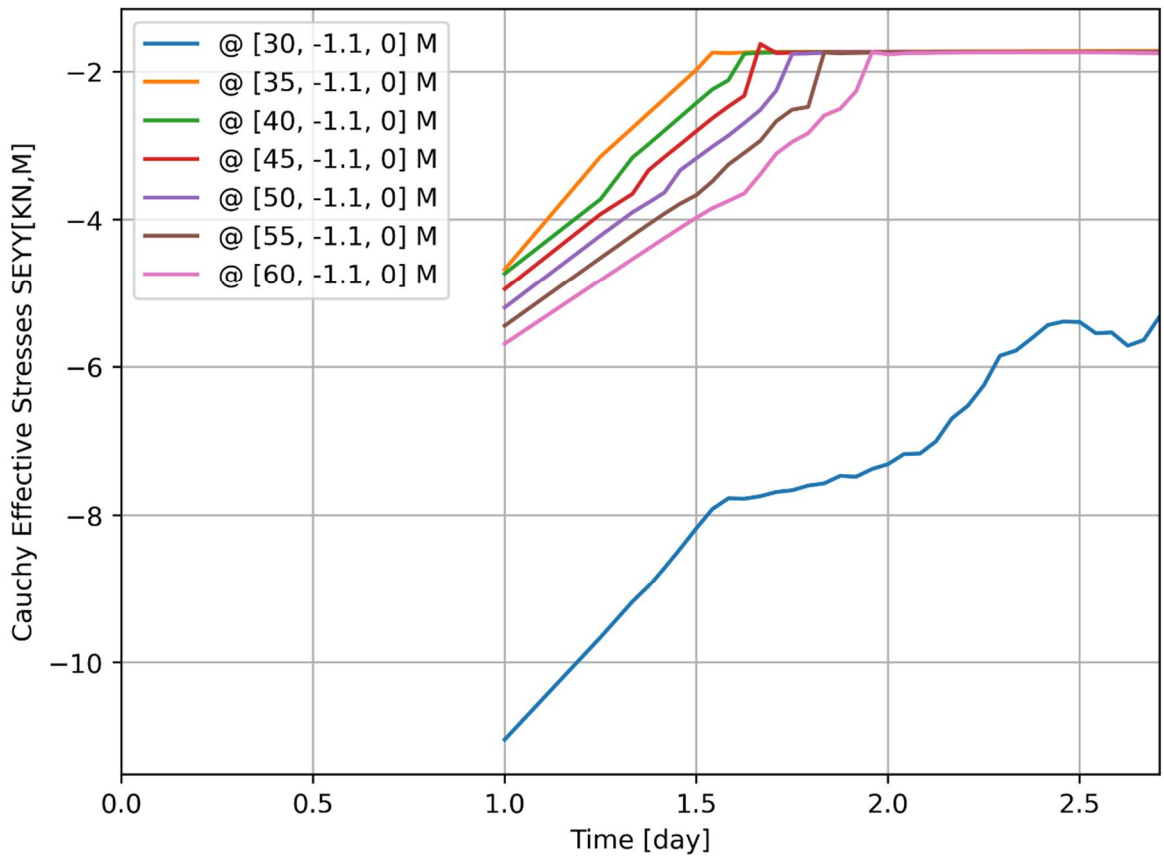


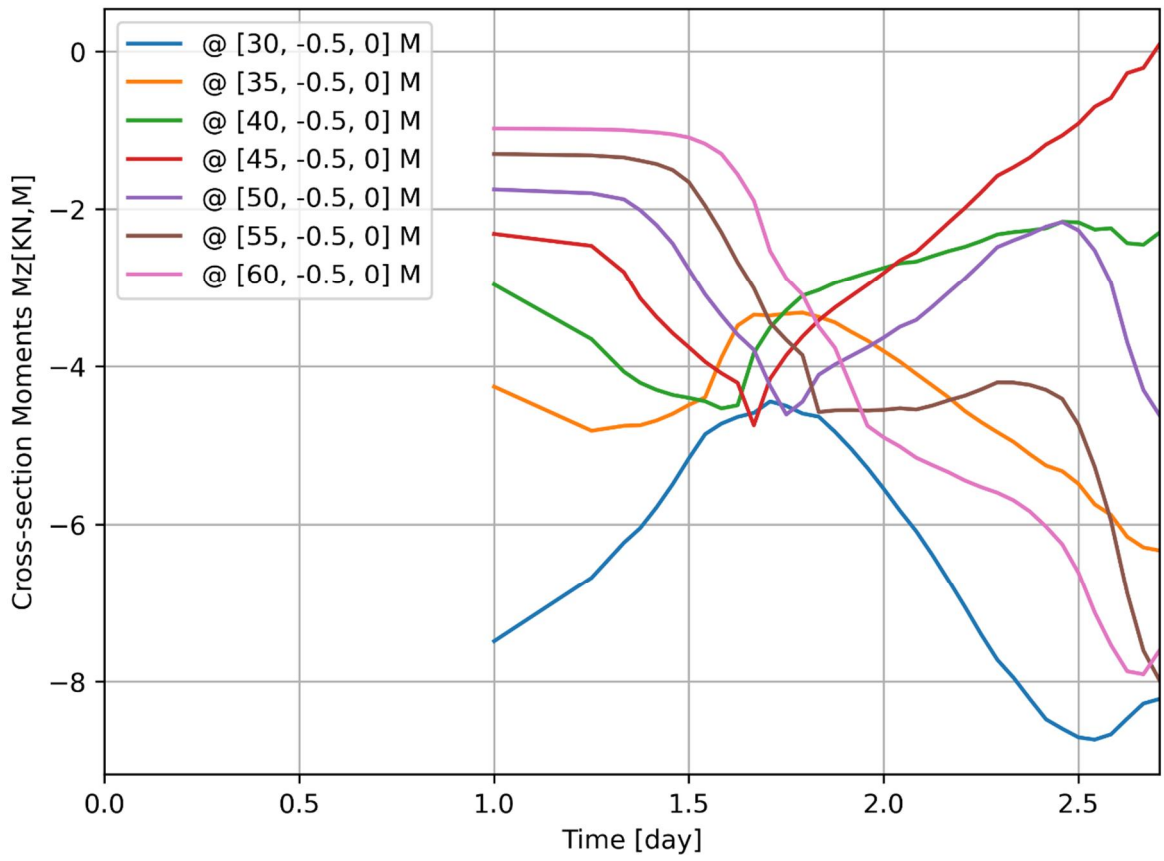








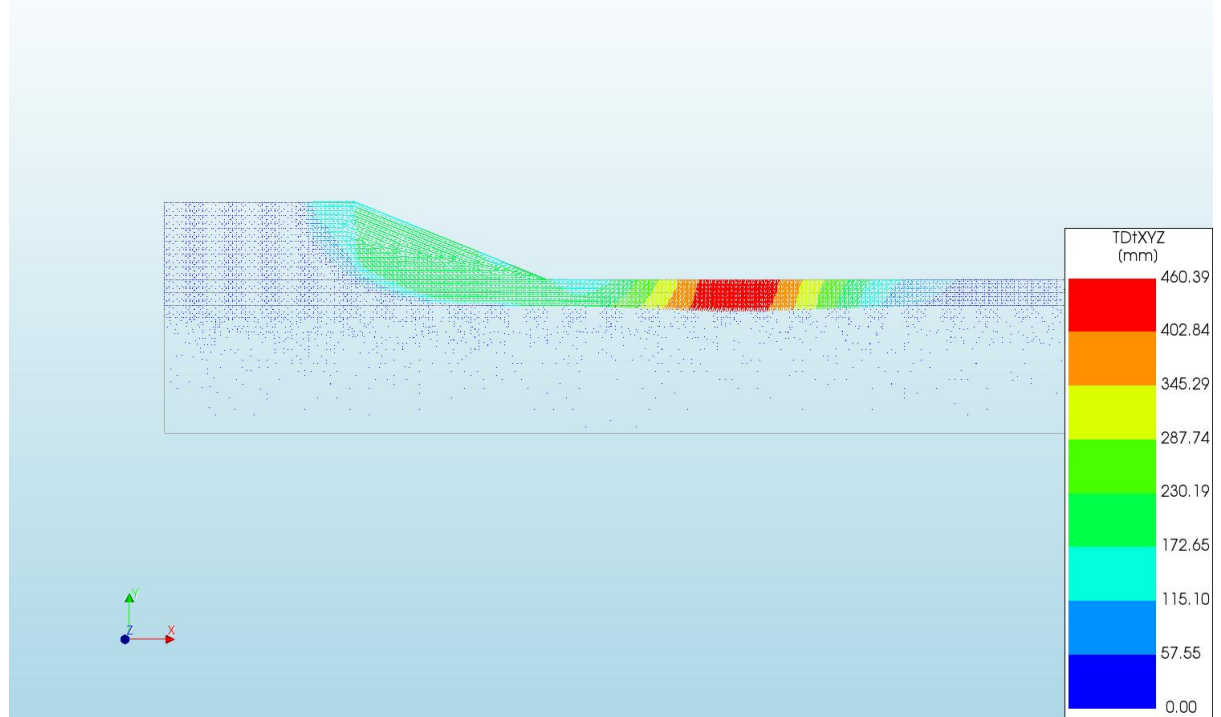




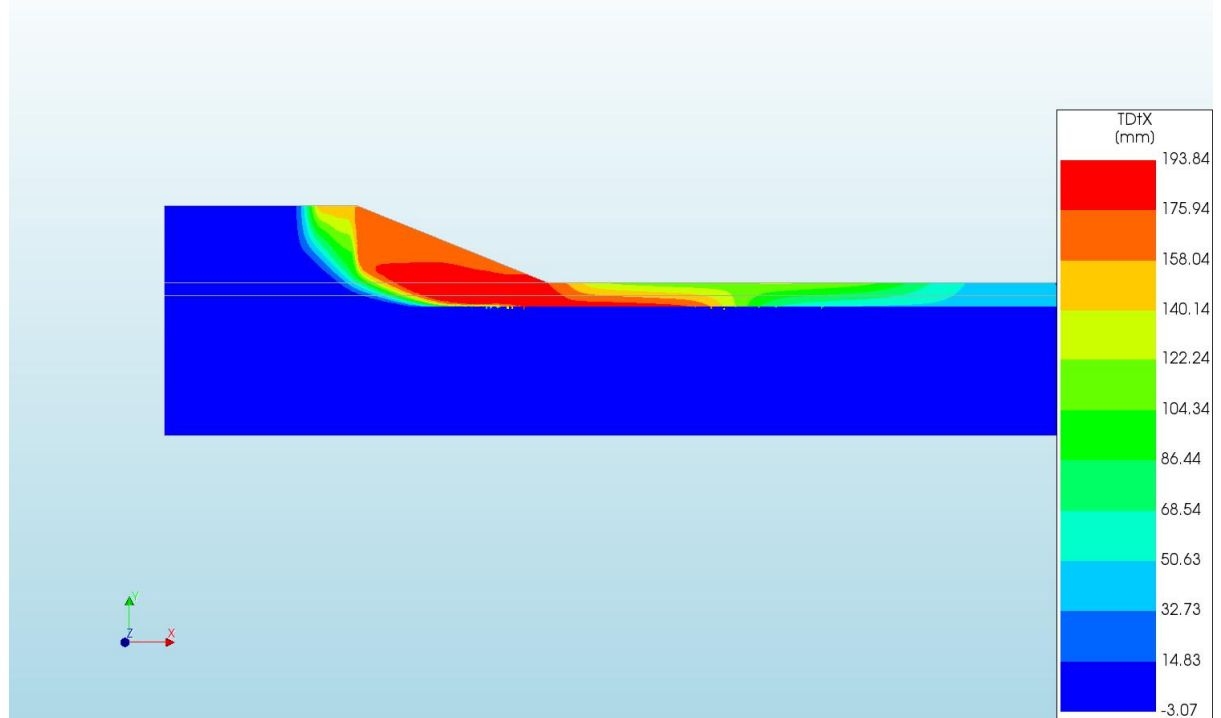
A.2.24

'Output\_d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818'

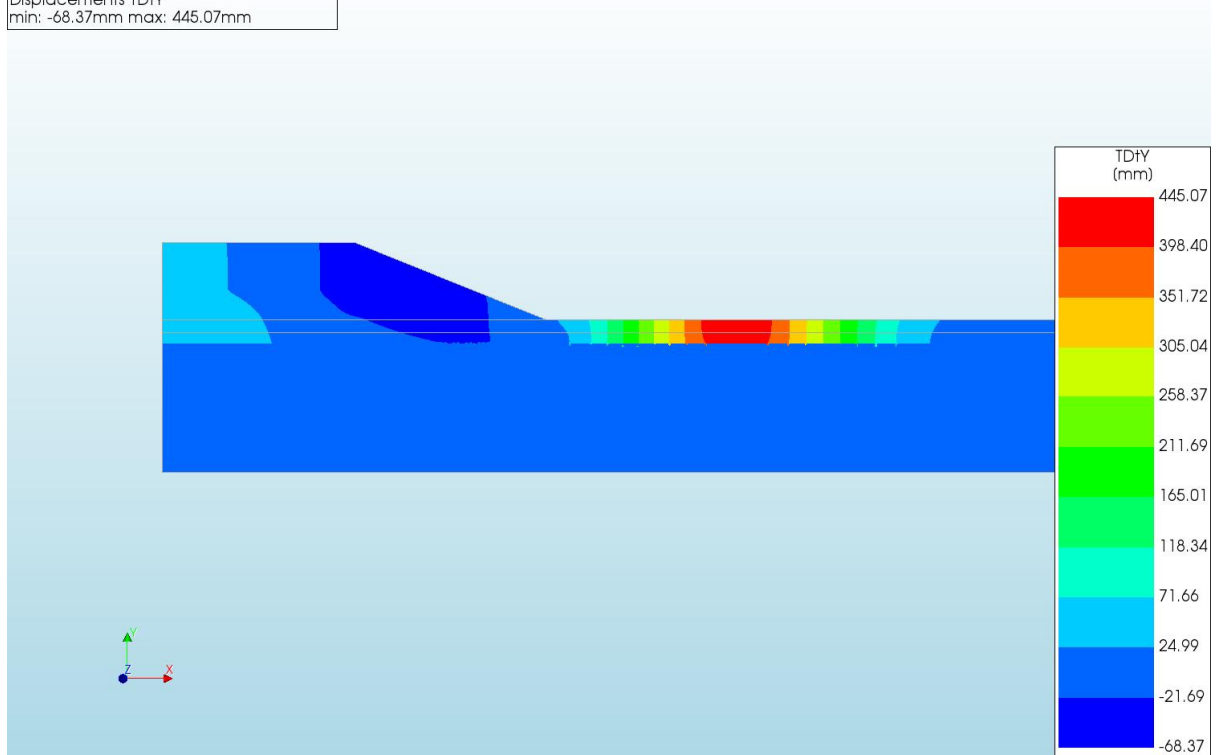
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 460.39mm



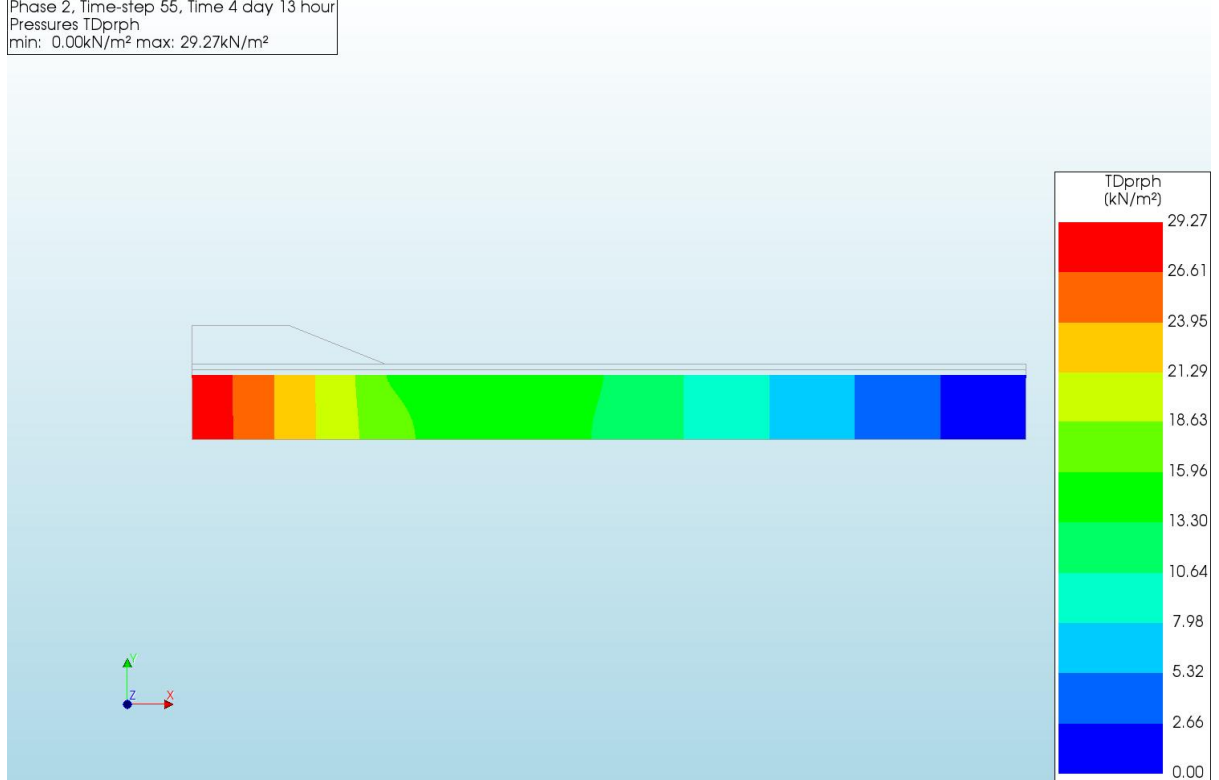
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -3.07mm max: 193.84mm



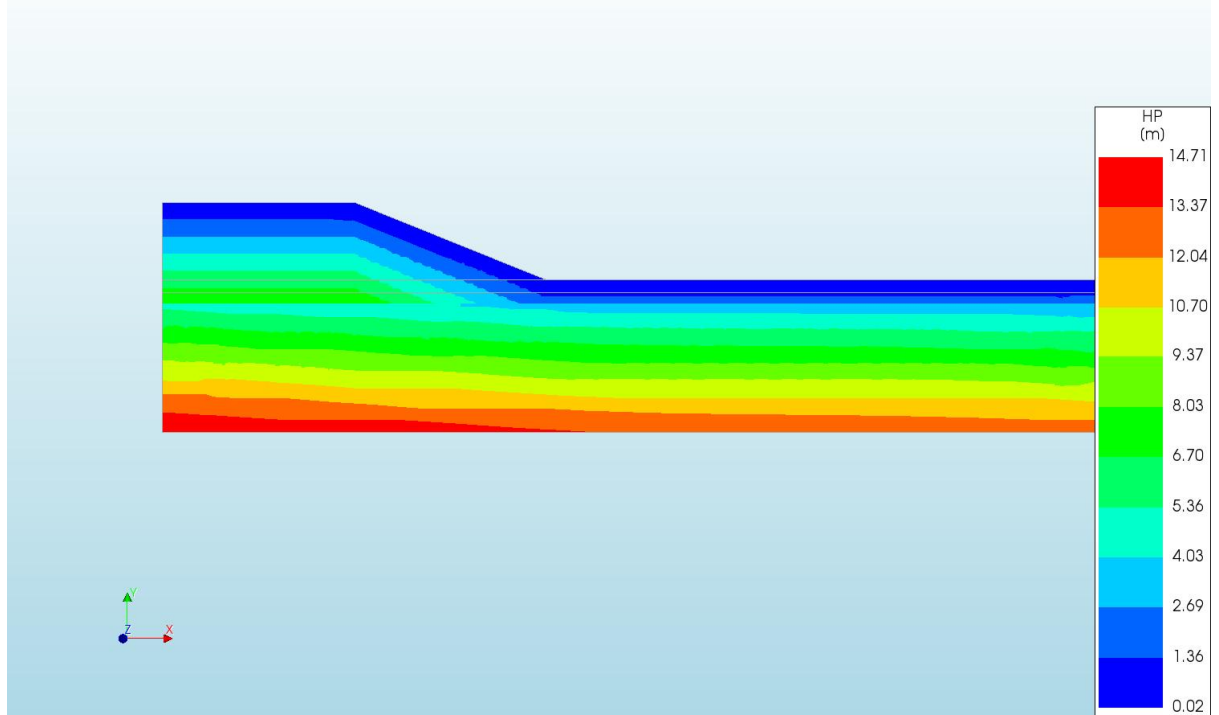
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Displacements TDY  
min: -68.37mm max: 445.07mm



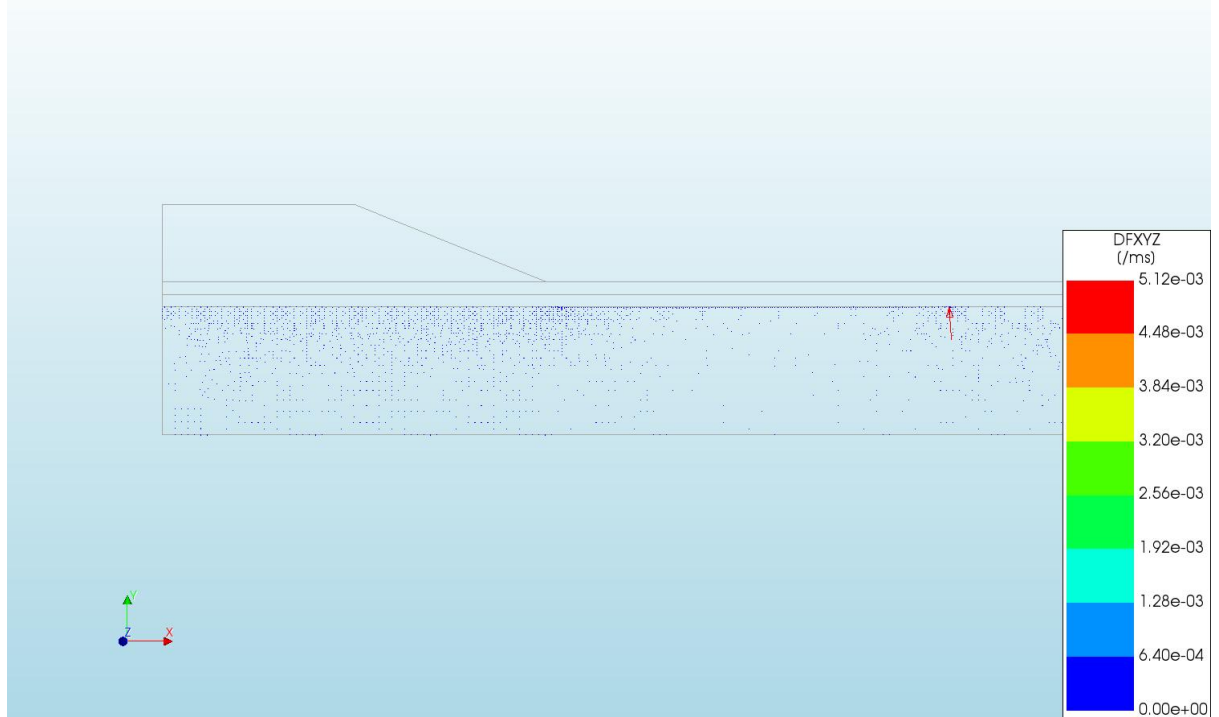
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 29.27kN/m<sup>2</sup>



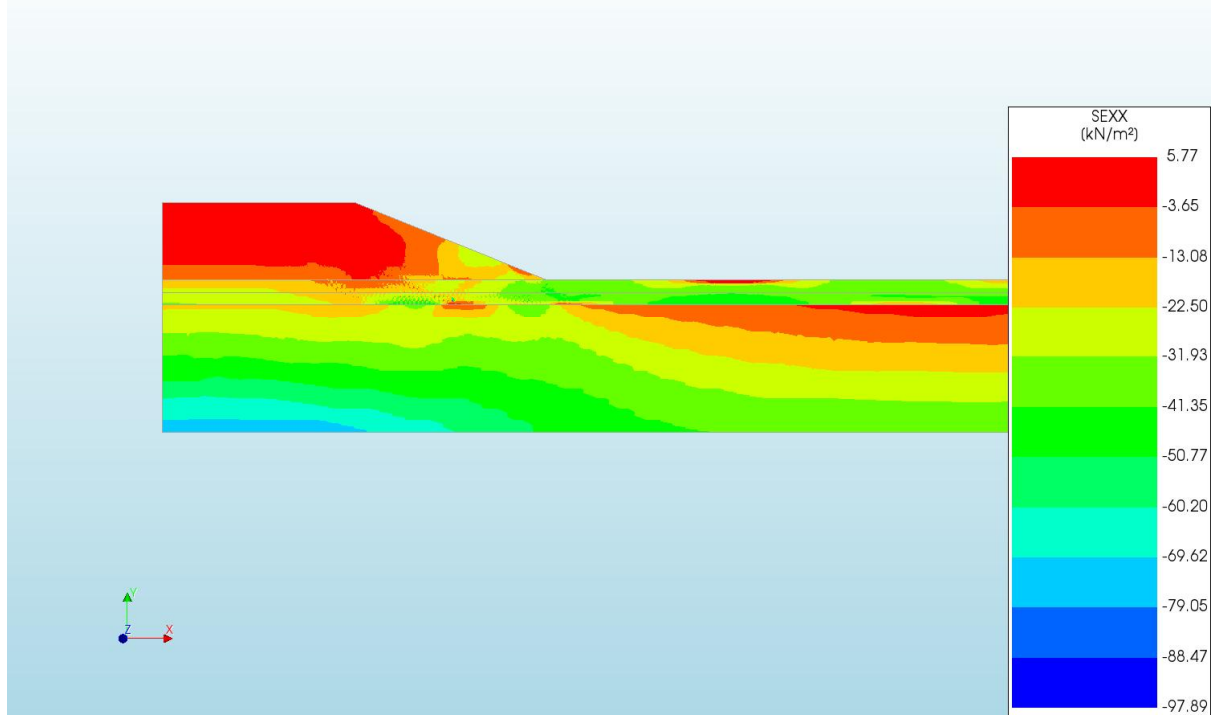
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 14.71m



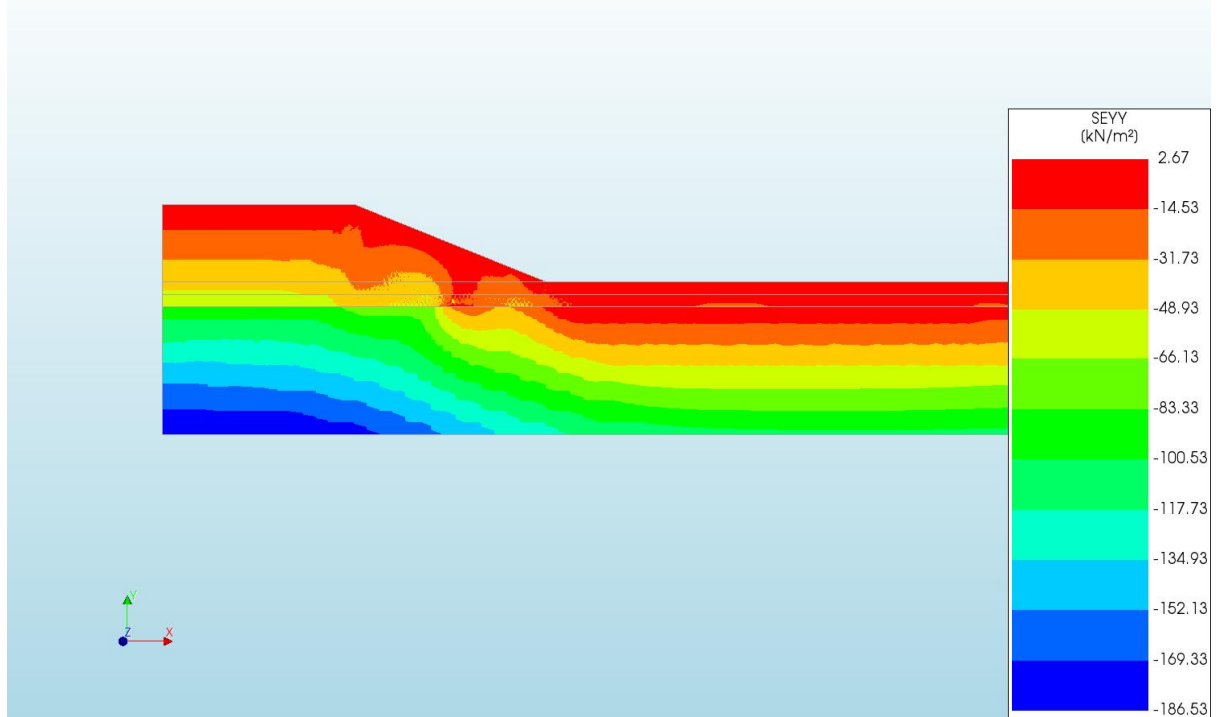
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 5.12e-03/ms



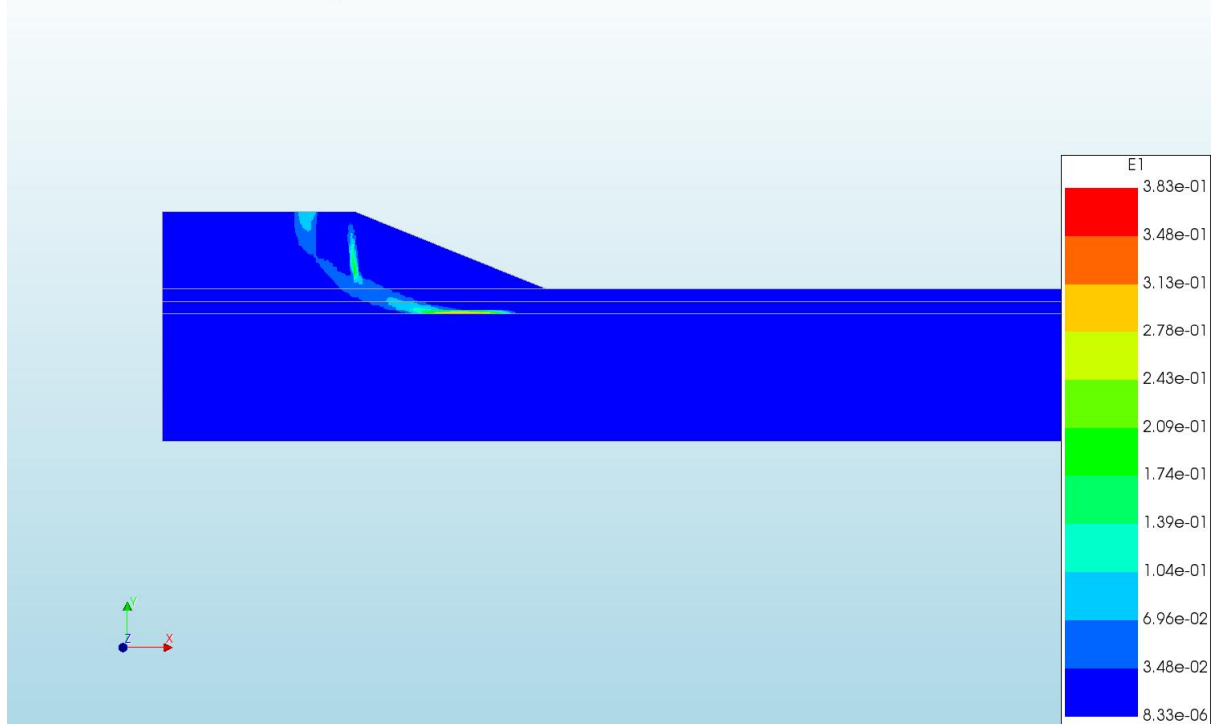
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -97.89kN/m<sup>2</sup> max: 5.77kN/m<sup>2</sup>



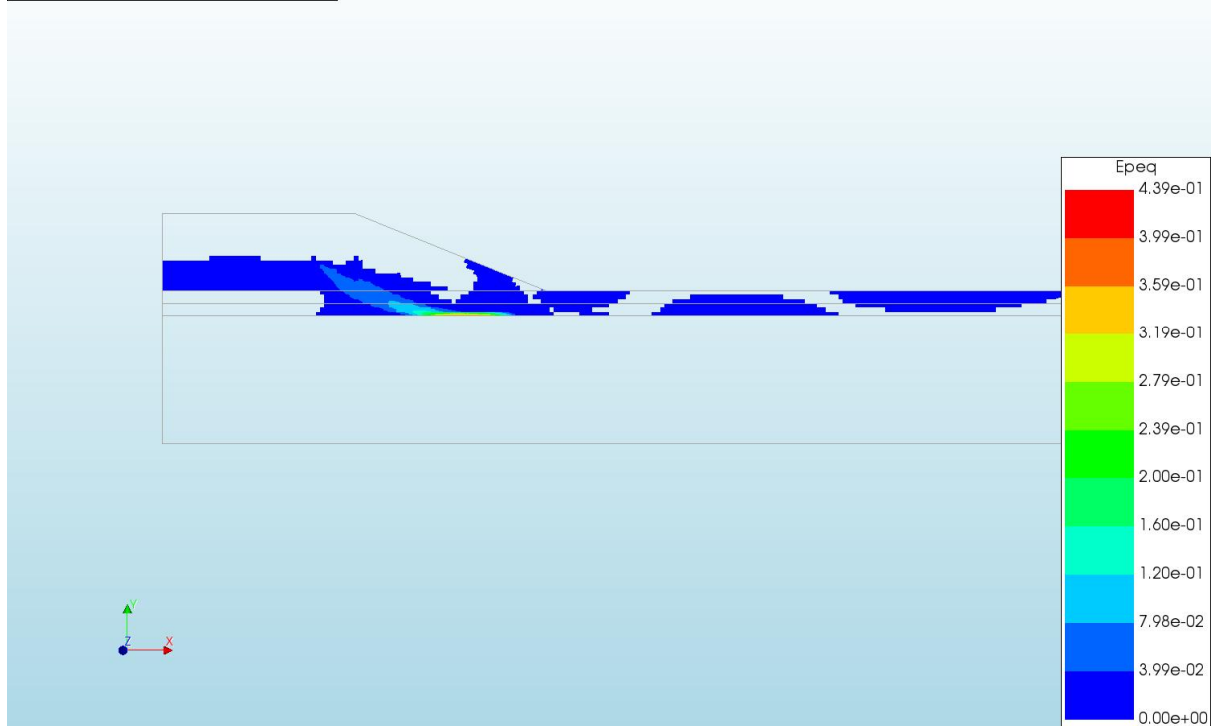
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -186.53kN/m<sup>2</sup> max: 2.67kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Total Strains E1  
min: 8.33e-06 max: 3.83e-01

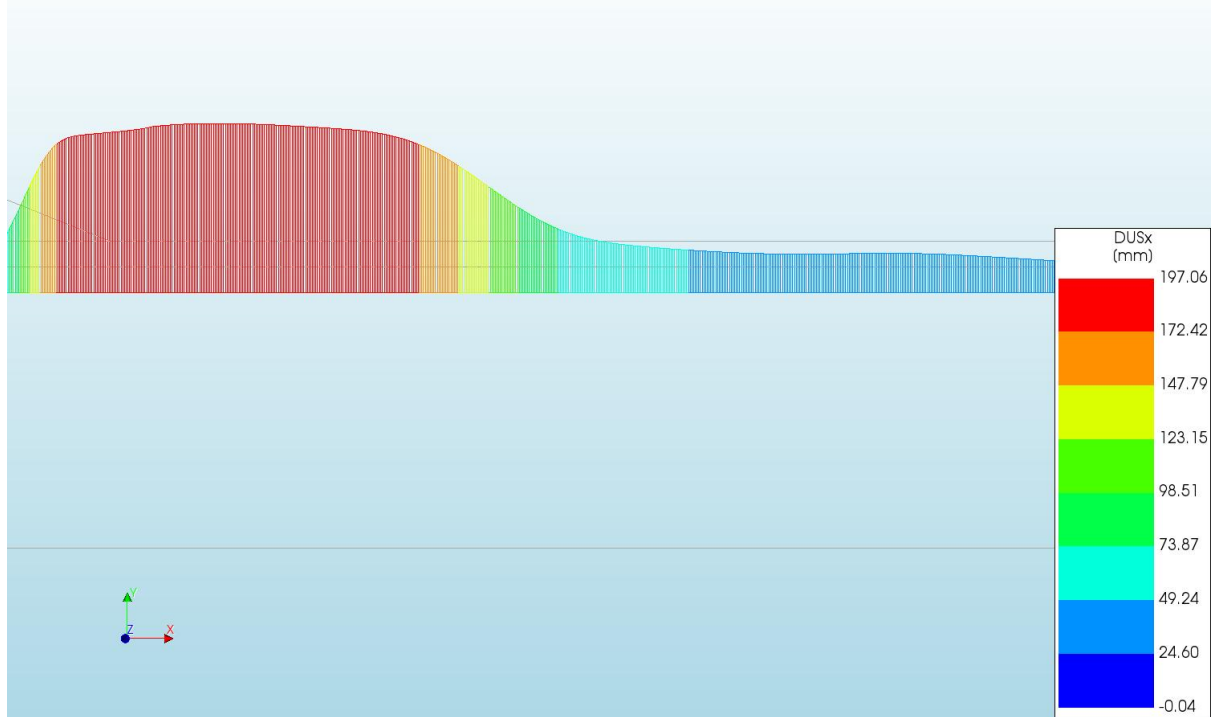


d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.39e-01

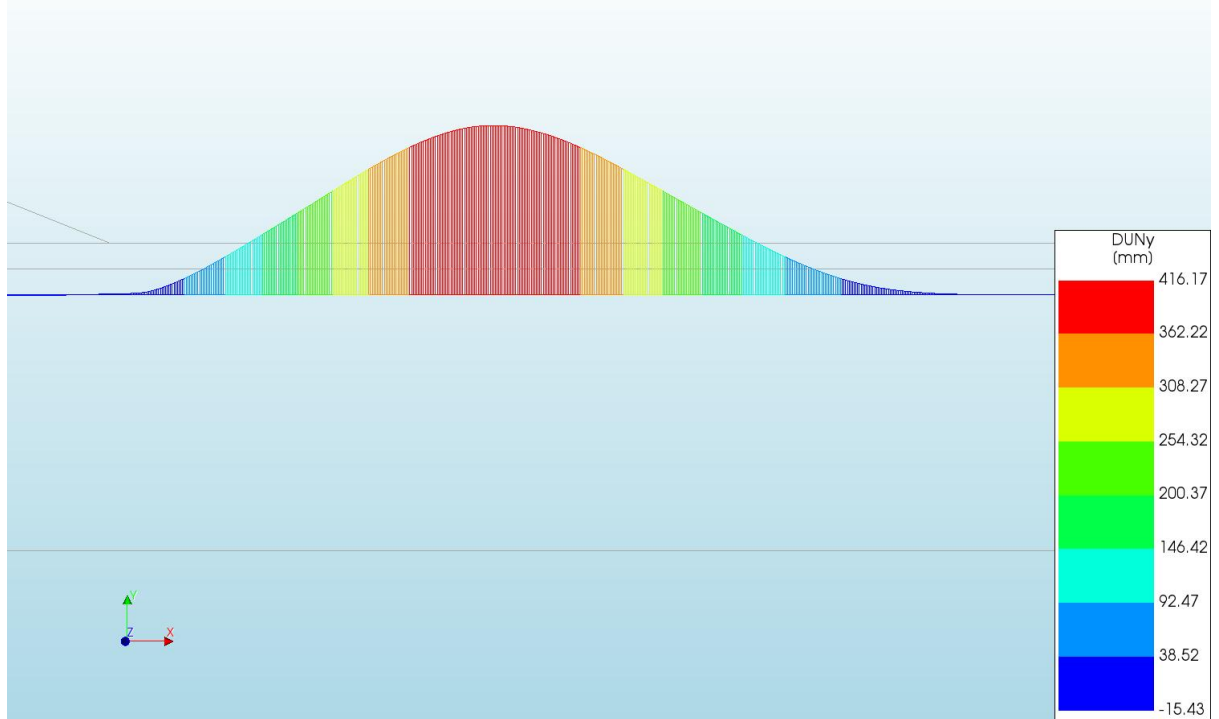




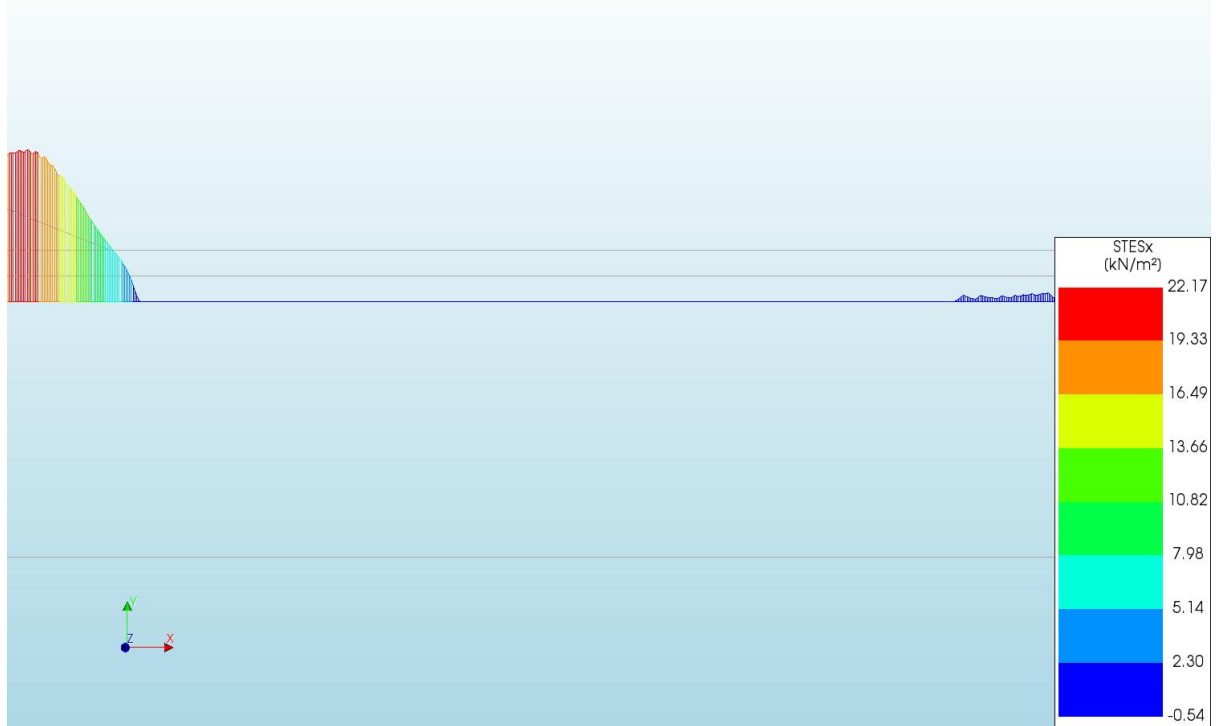
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.04mm max: 197.06mm



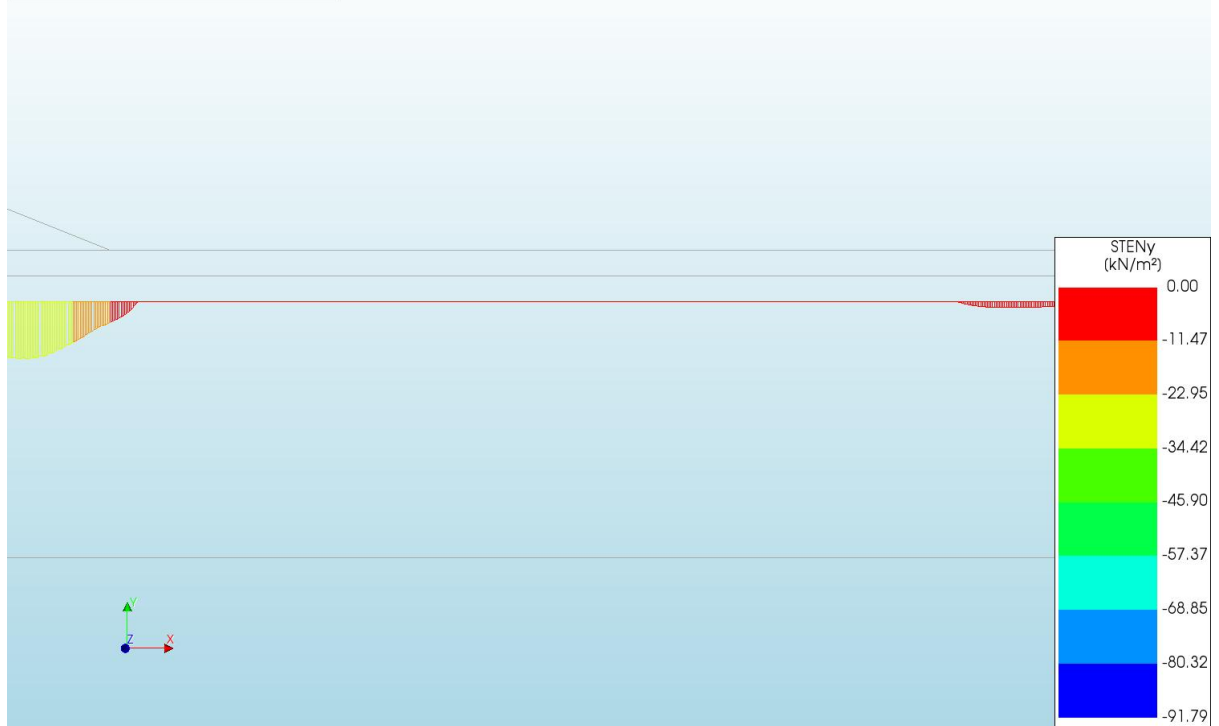
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -15.43mm max: 416.17mm

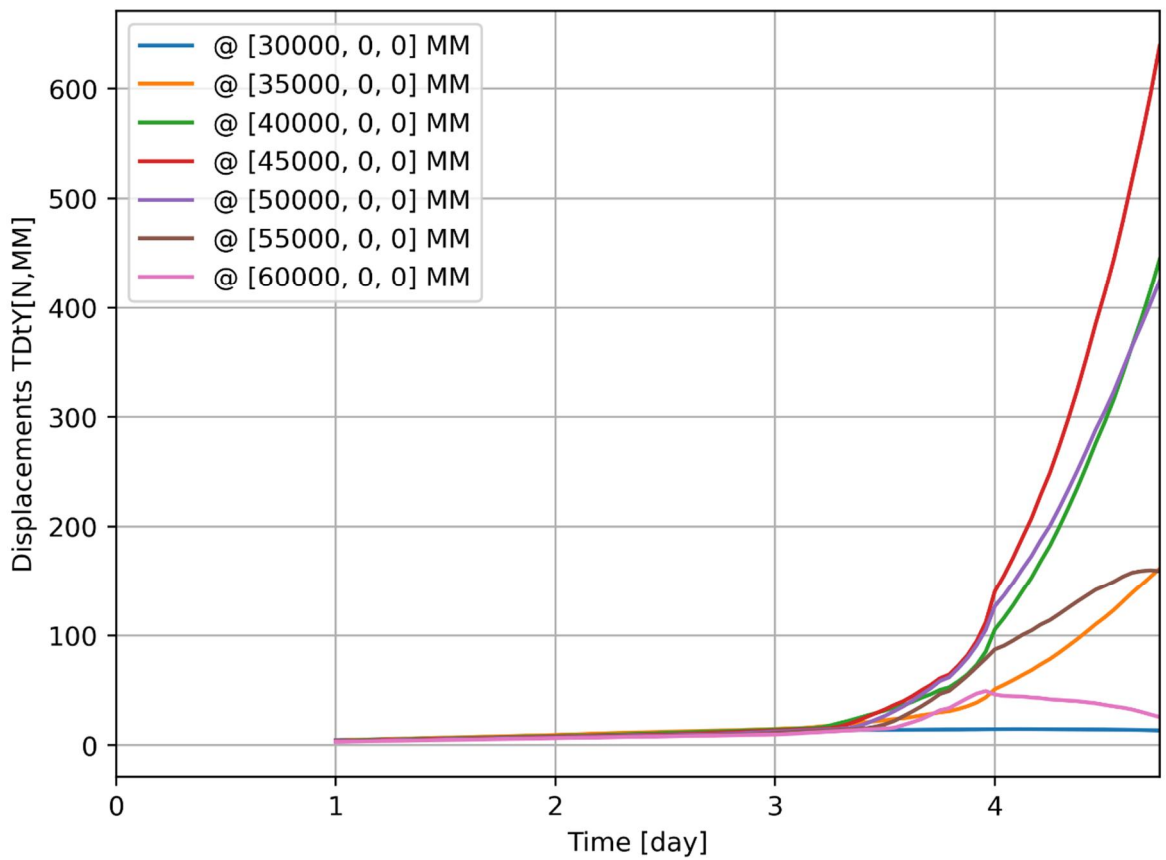
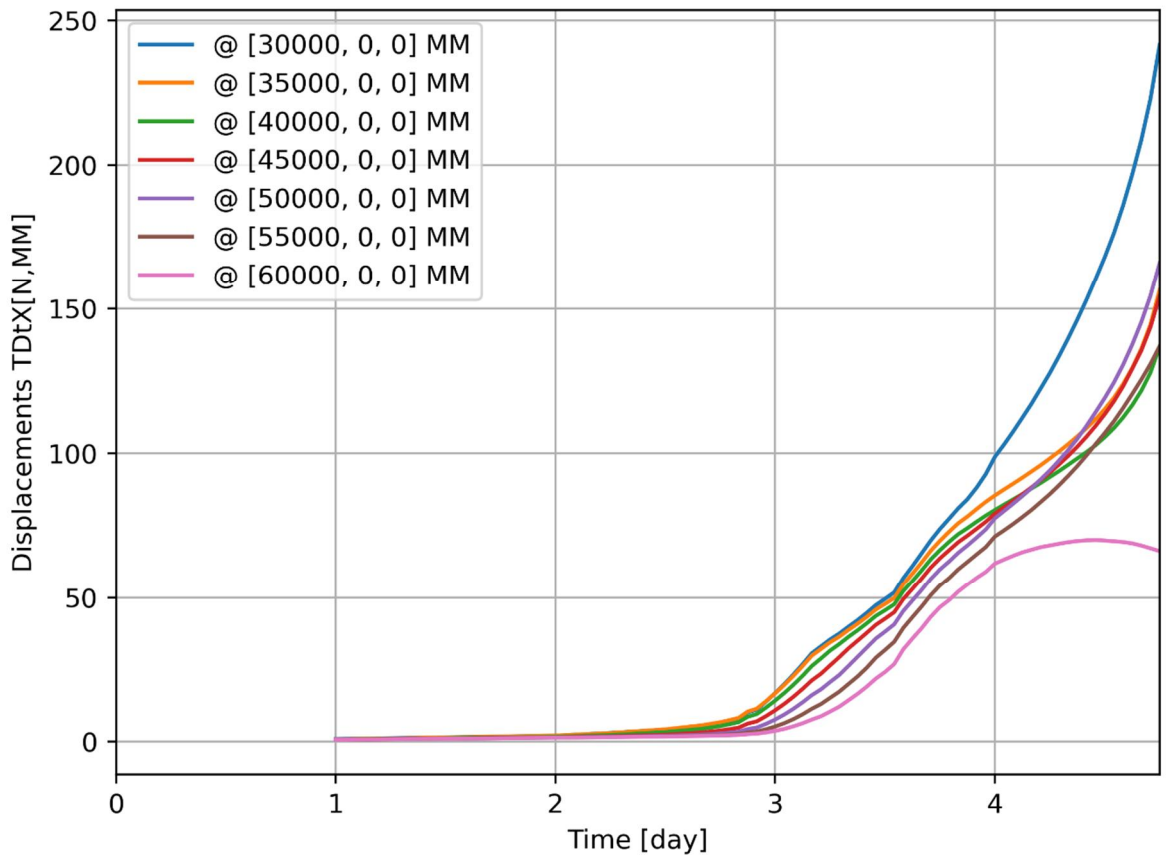


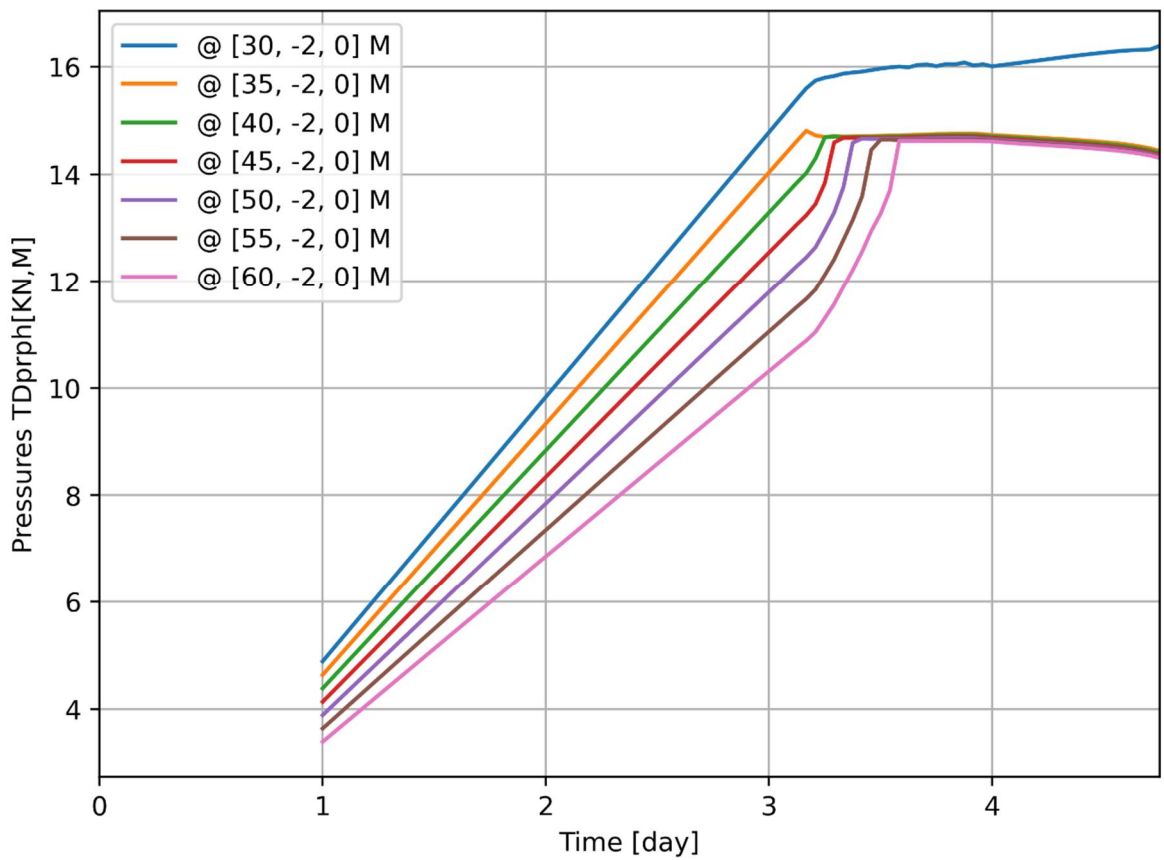
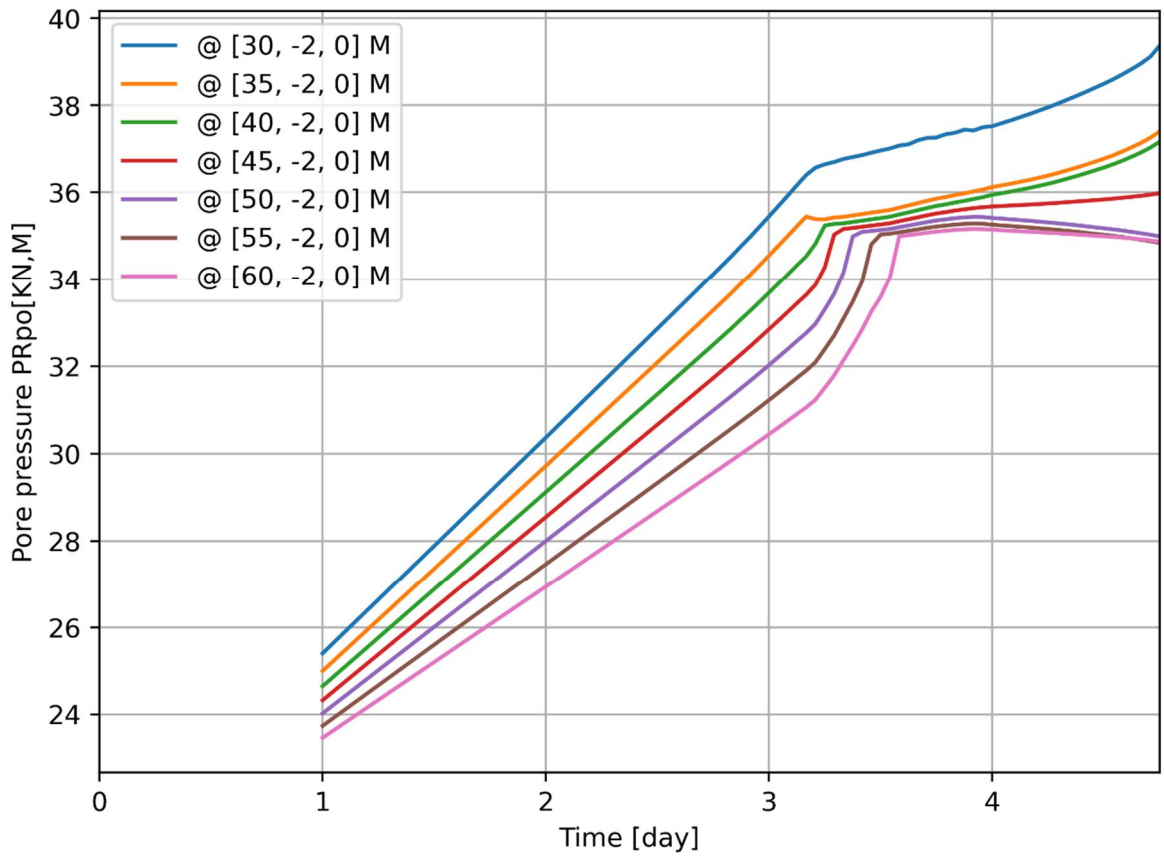
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.54kN/m<sup>2</sup> max: 22.17kN/m<sup>2</sup>

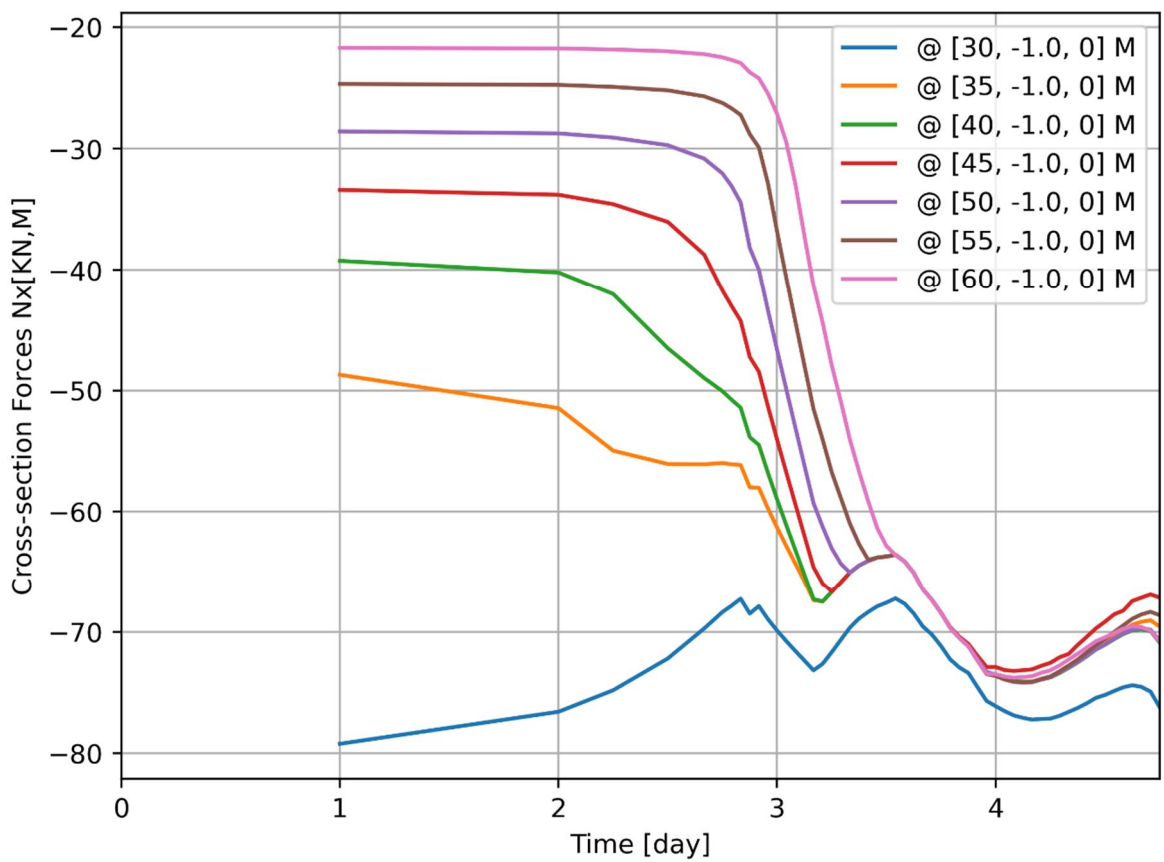
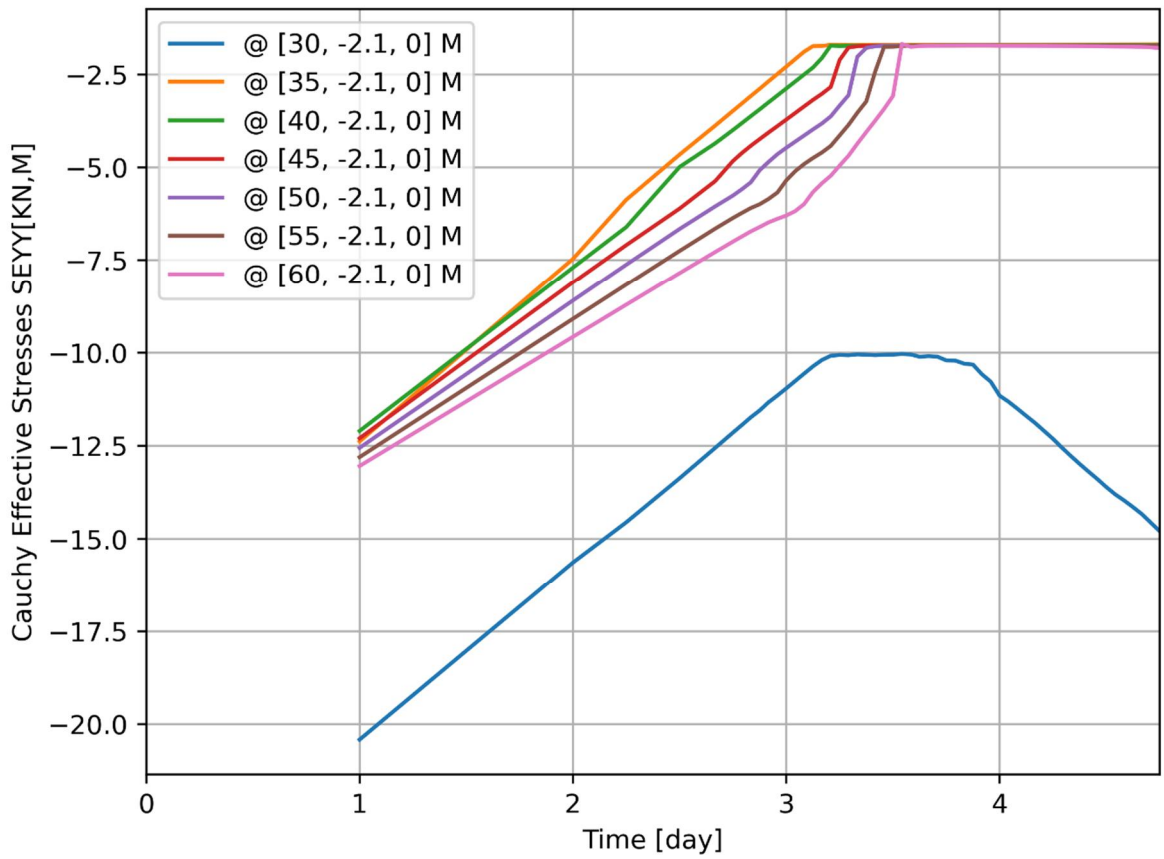


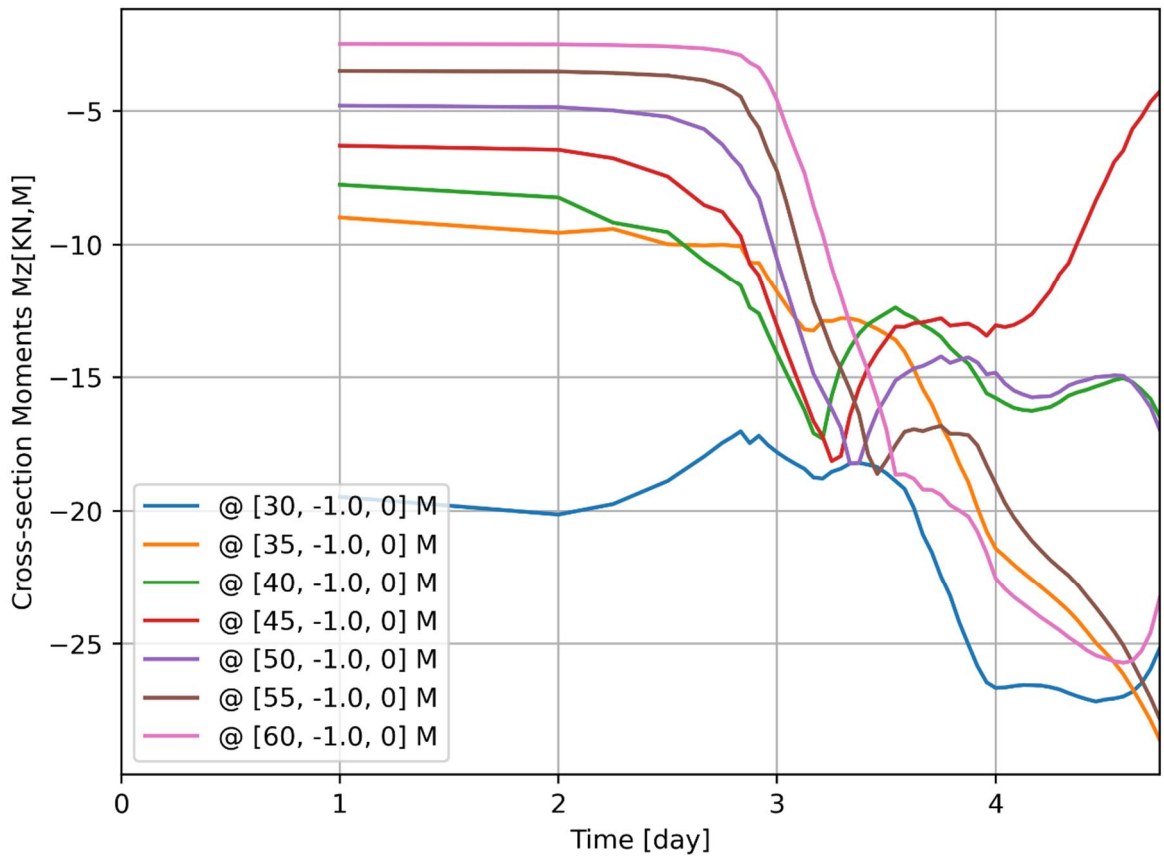
d=2\_c=15\_E=10\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 55, Time 4 day 13 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -91.79kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







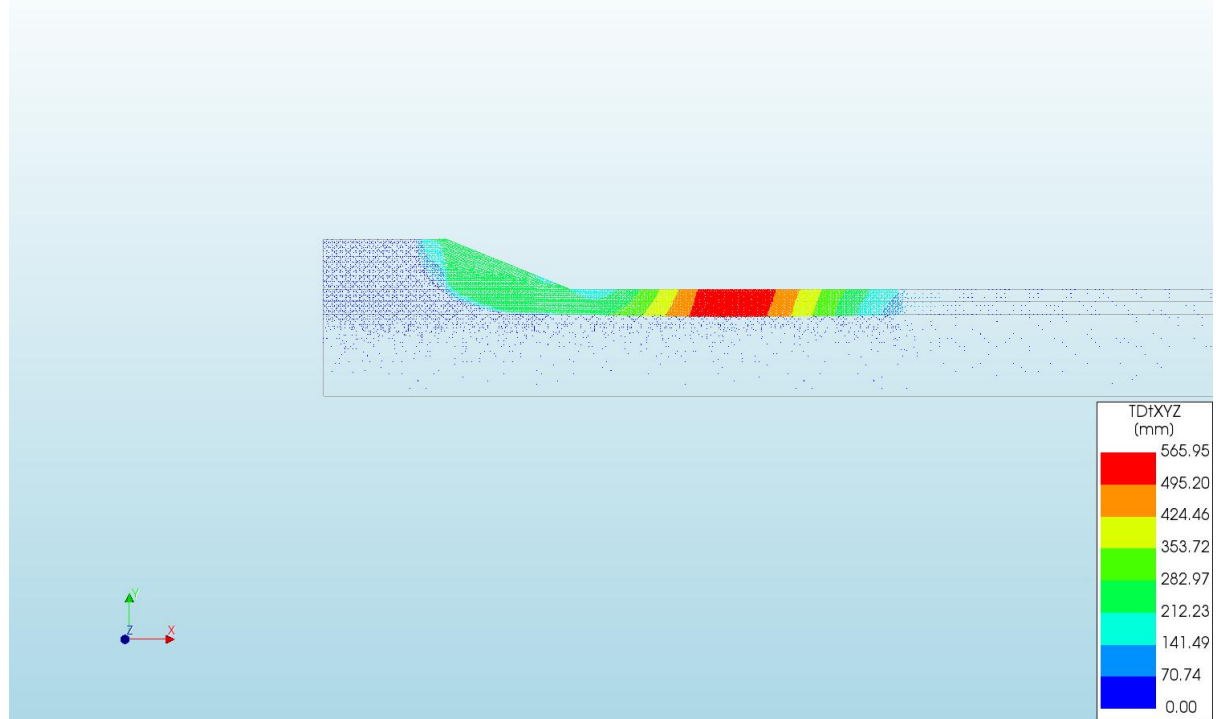




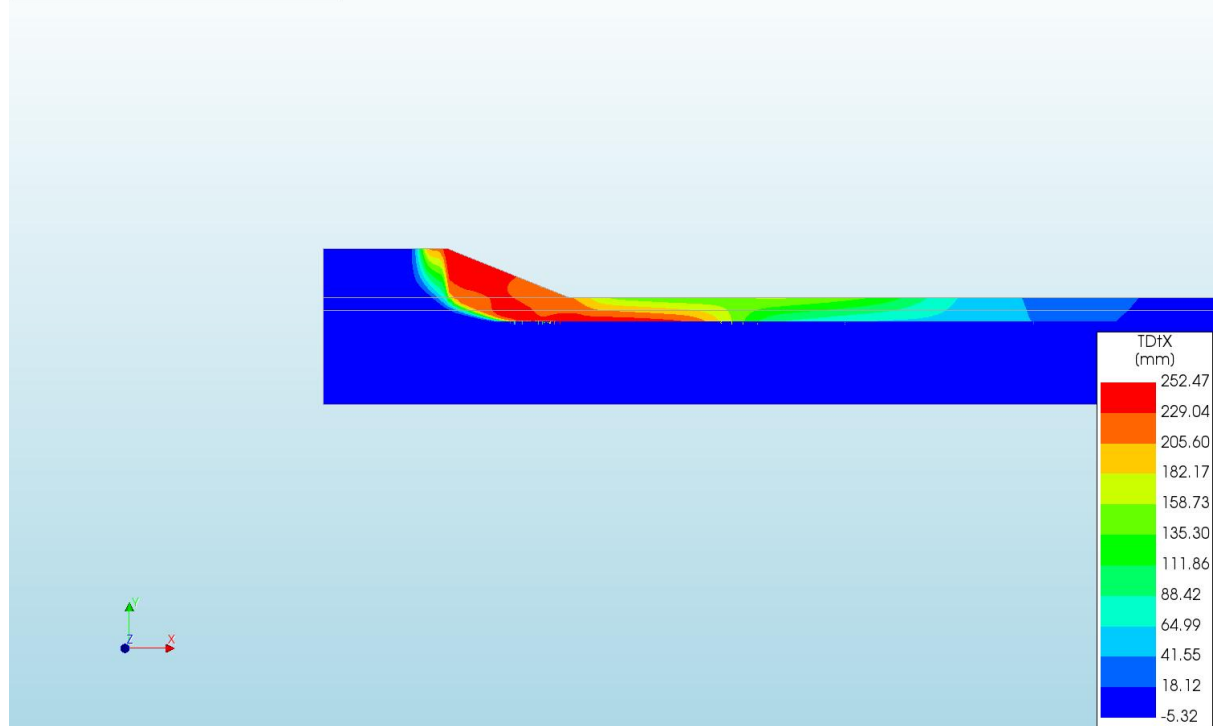
A.2.25

'Output\_d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821'

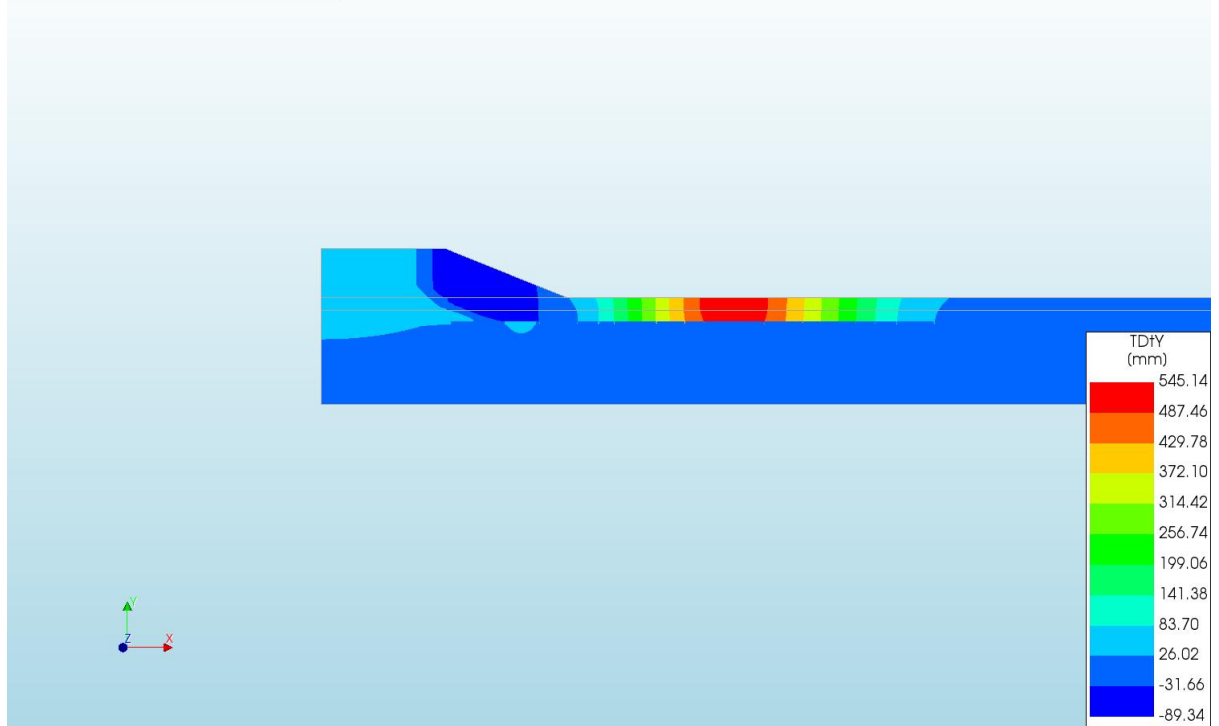
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 565.95mm



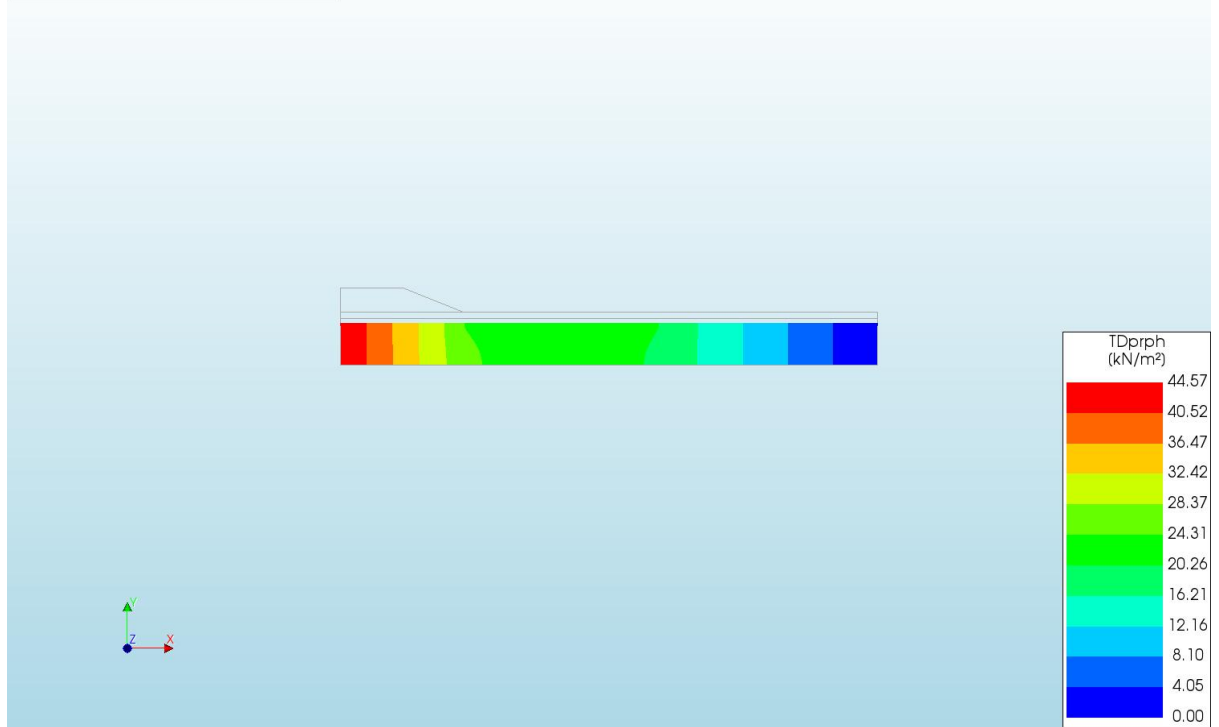
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Displacements TDtX  
min: -5.32mm max: 252.47mm



d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Displacements TDtY  
min: -89.34mm max: 545.14mm

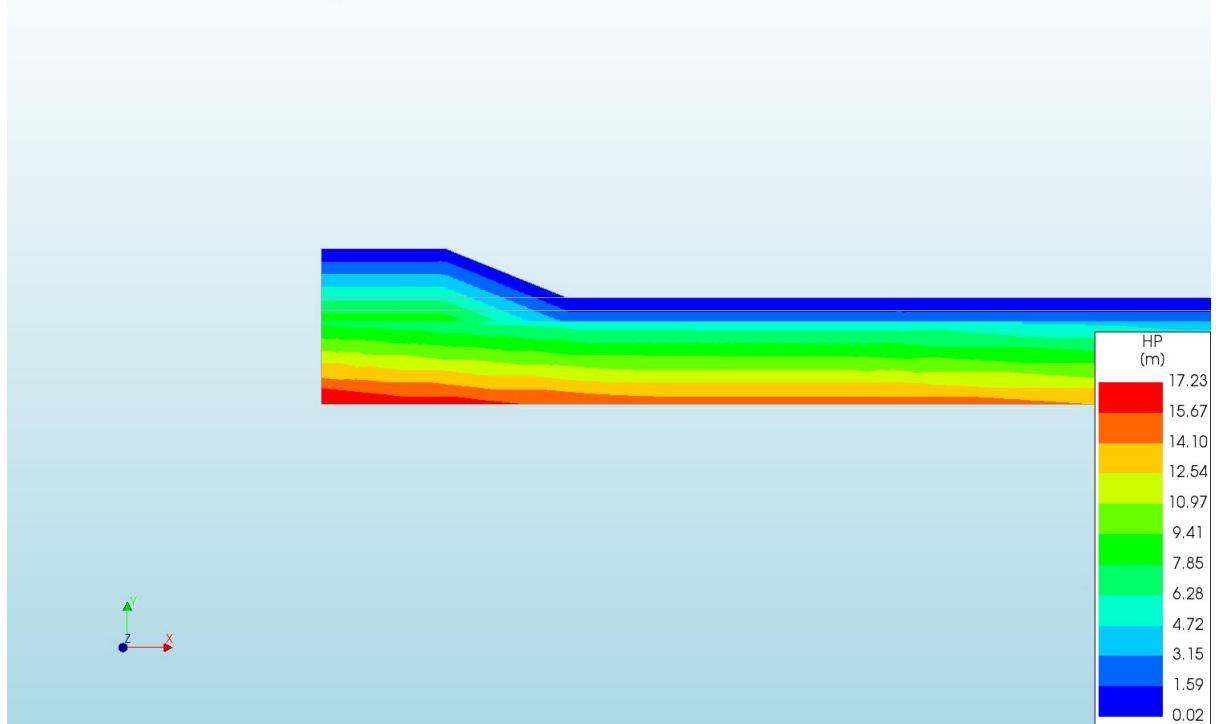


d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 44.57kN/m<sup>2</sup>

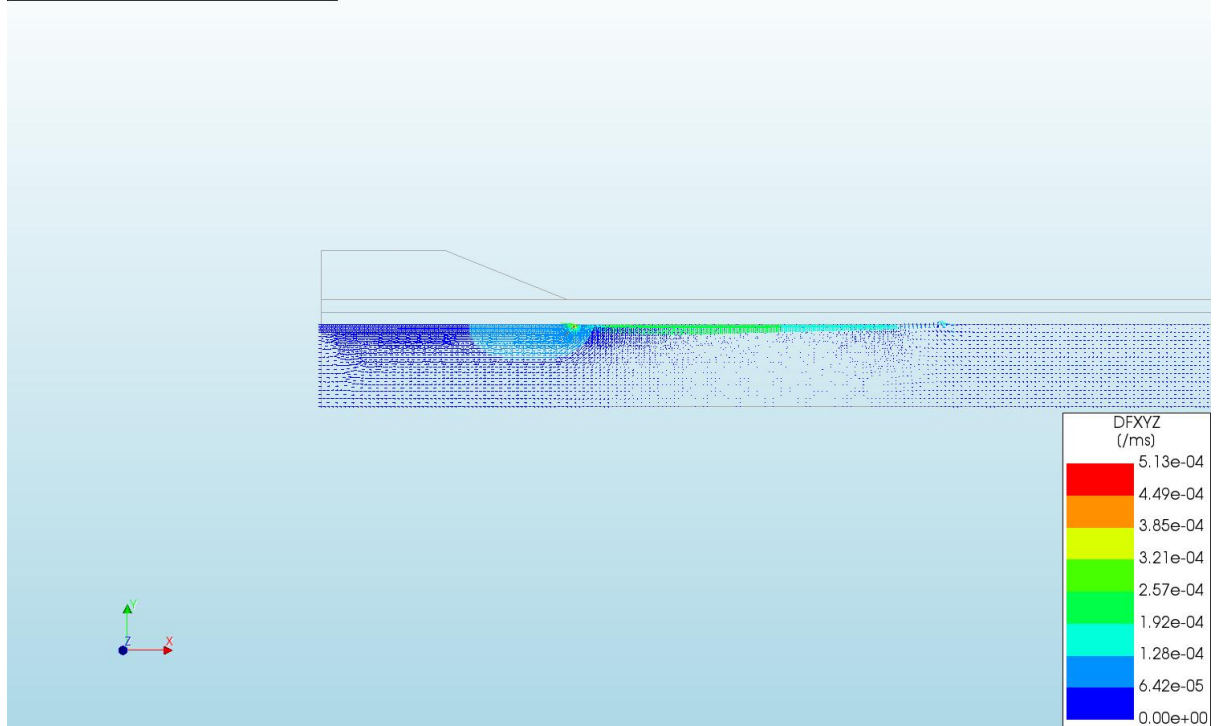




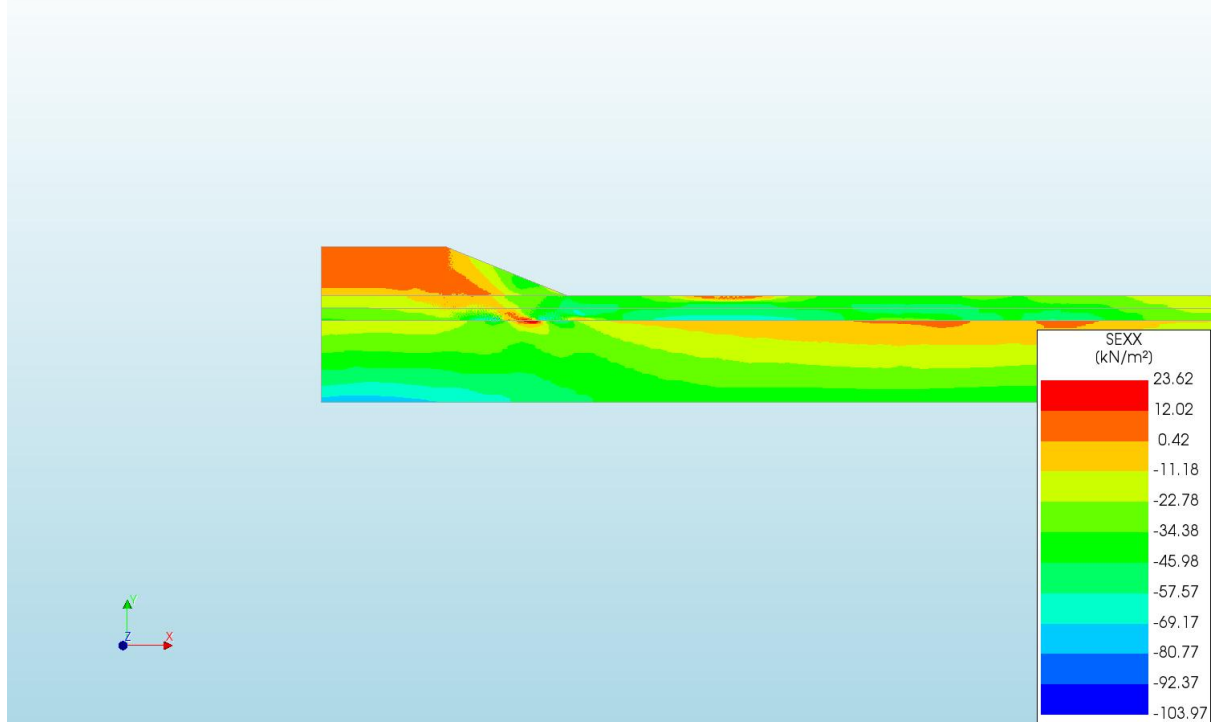
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 17.23m



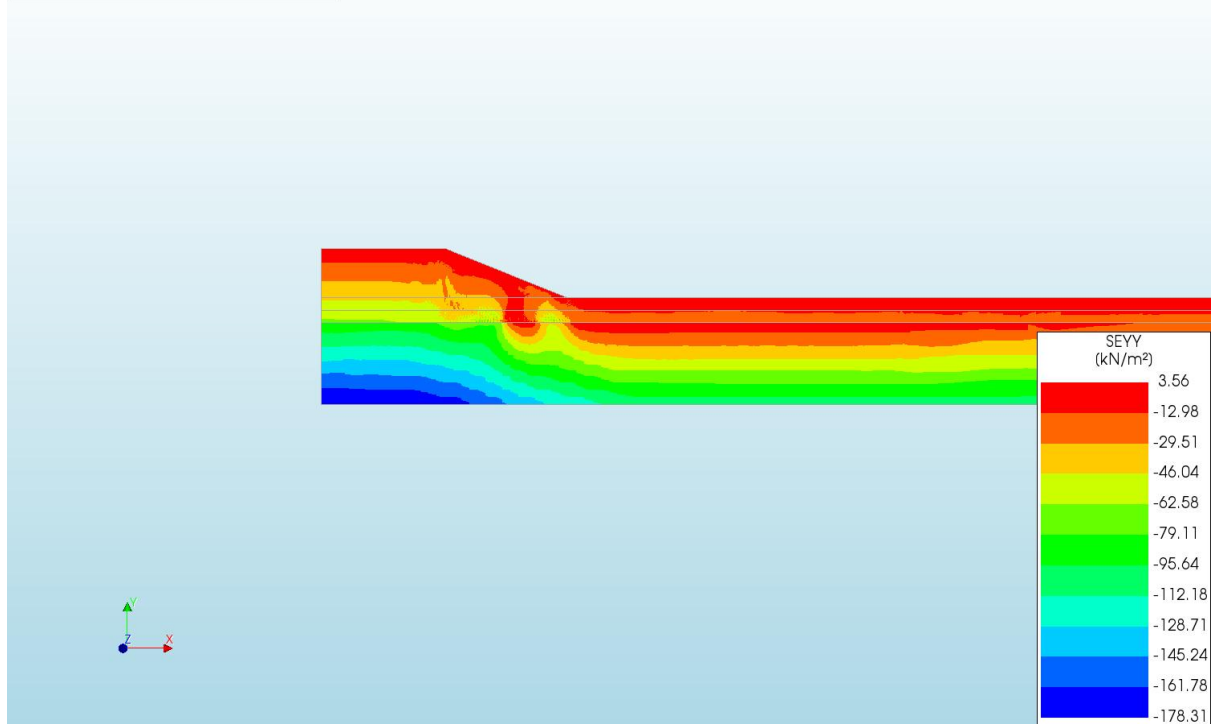
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 5.13e-04/ms



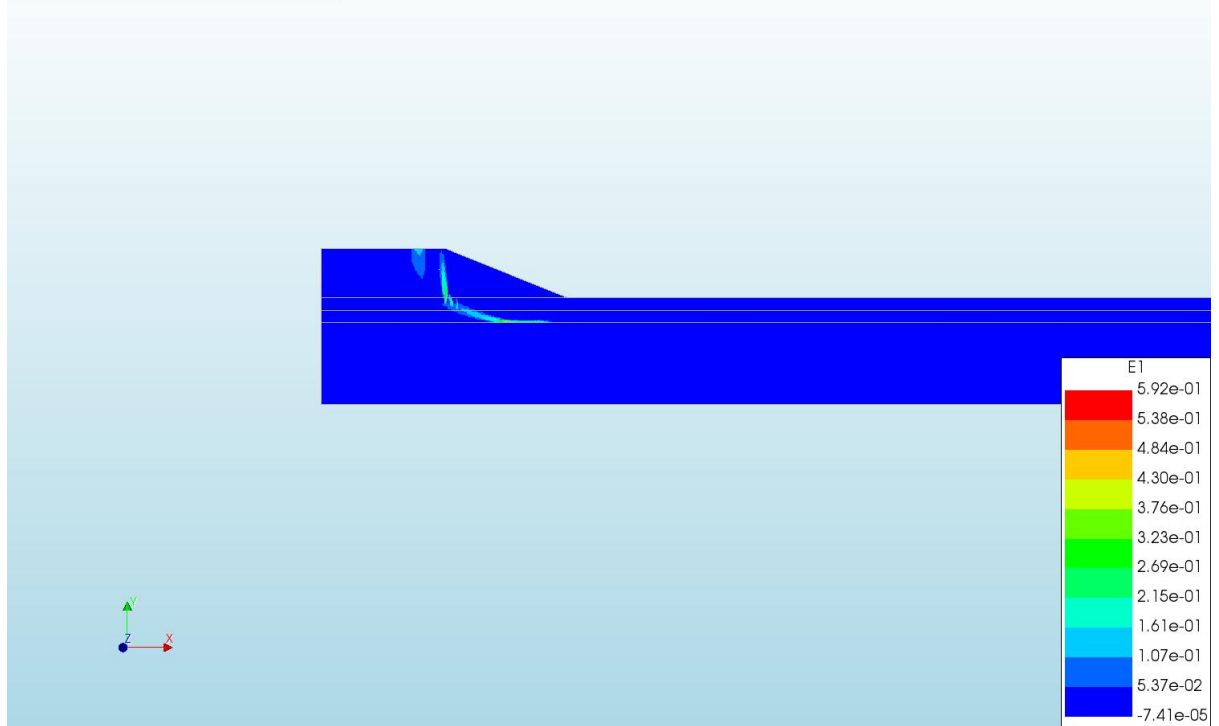
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -103.97kN/m<sup>2</sup> max: 23.62kN/m<sup>2</sup>



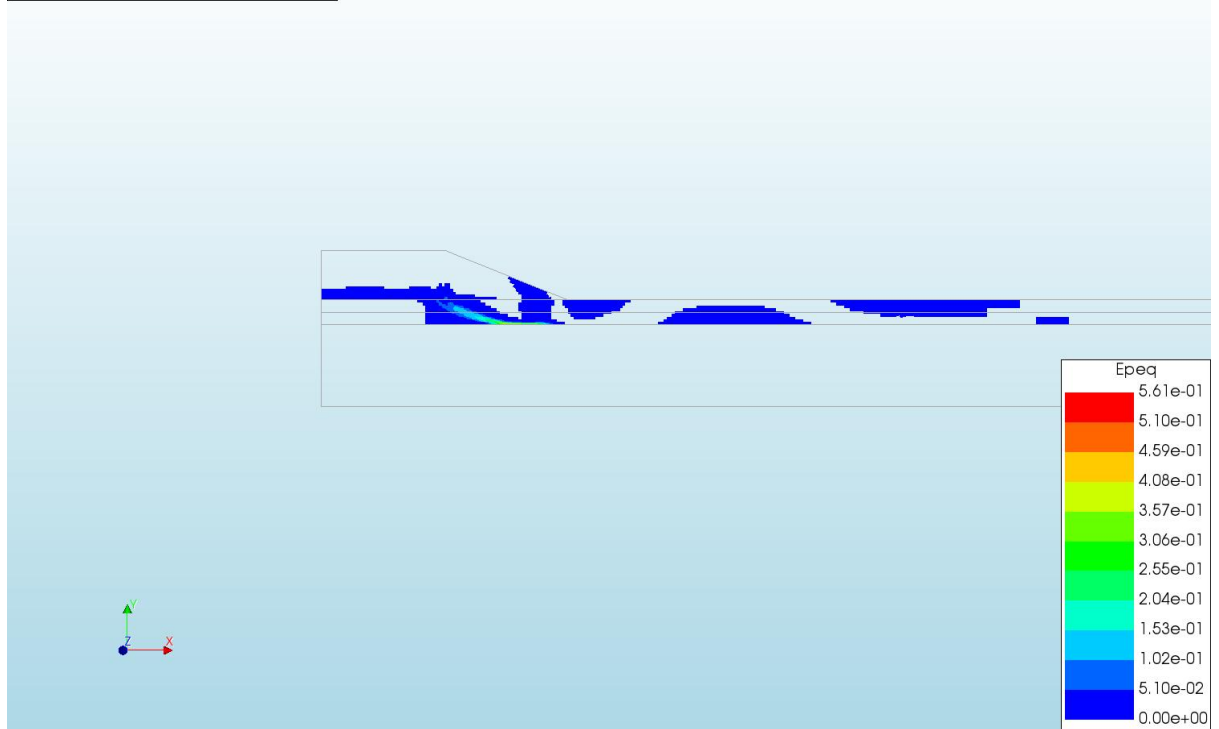
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -178.31kN/m<sup>2</sup> max: 3.56kN/m<sup>2</sup>



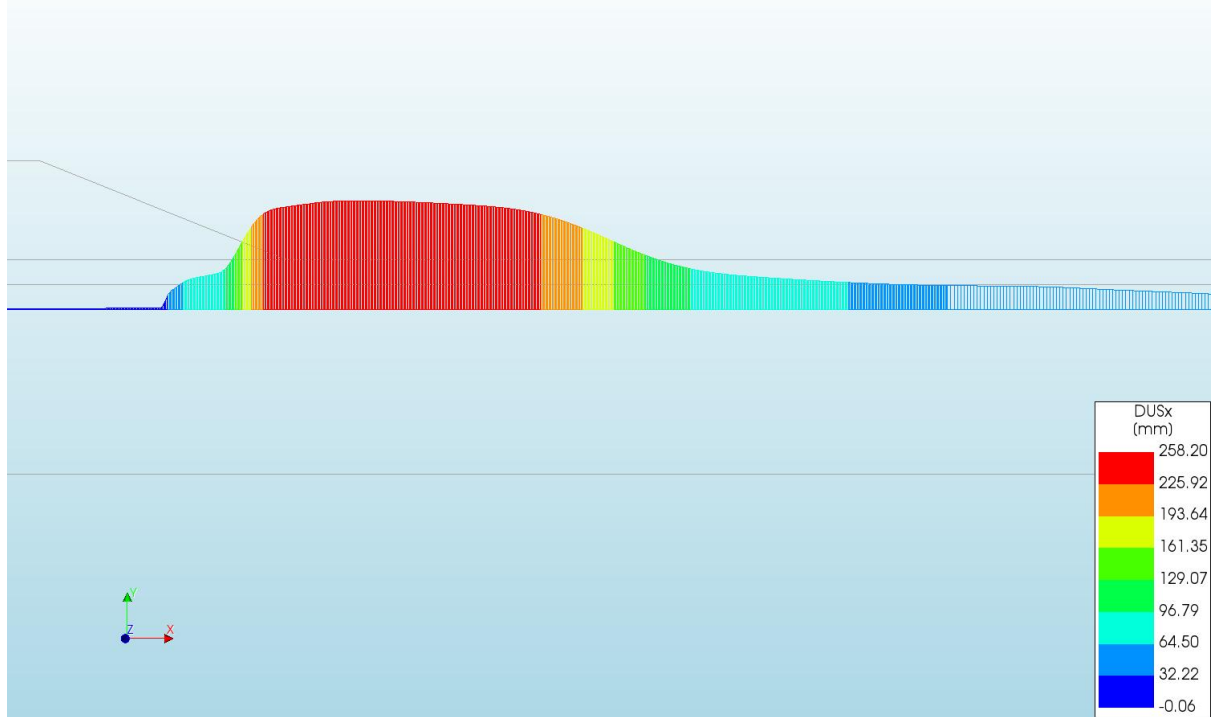
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Total Strains E1  
min: -7.41e-05 max: 5.92e-01



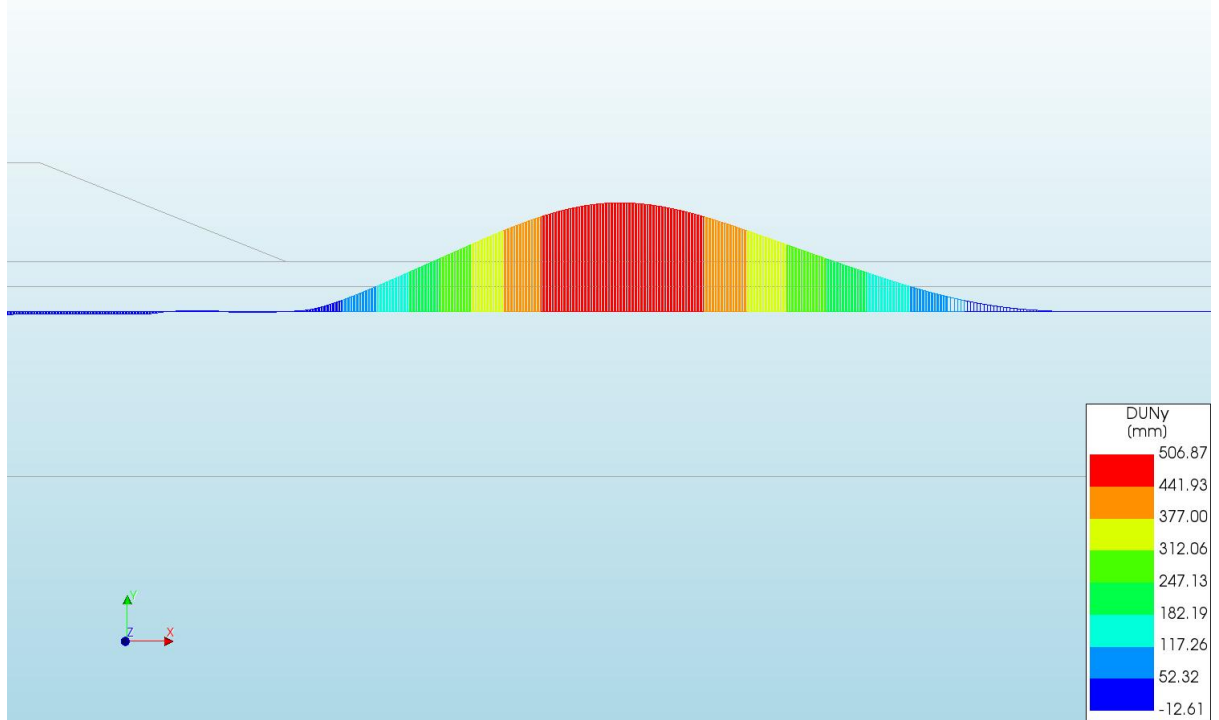
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.61e-01



d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.06mm max: 258.20mm



d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -12.61mm max: 506.87mm

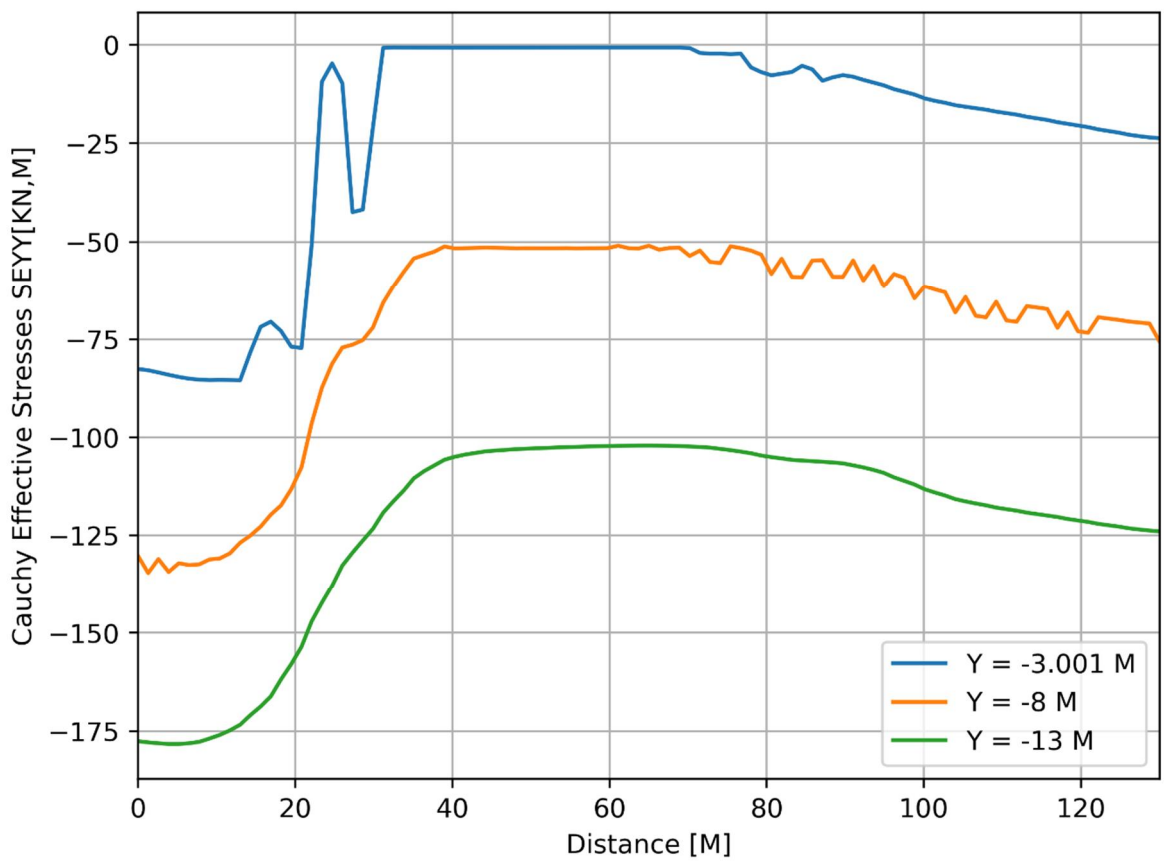
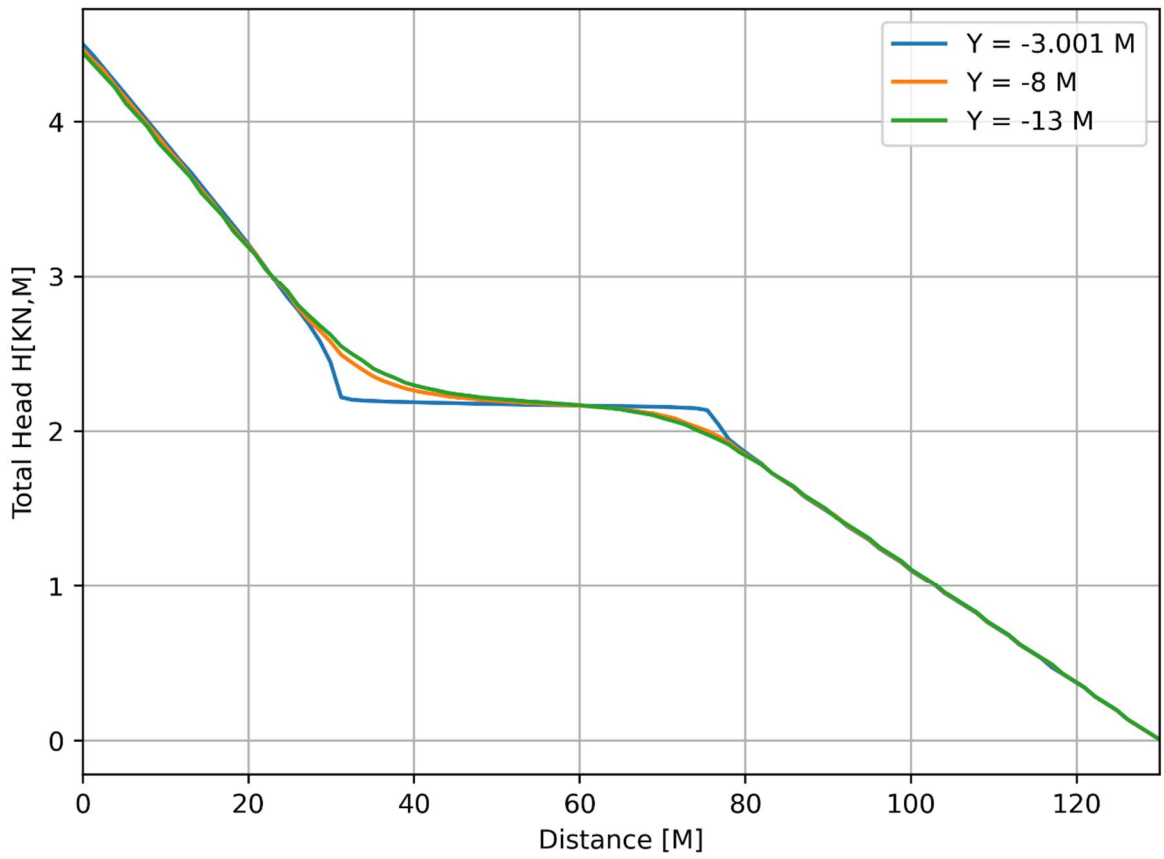


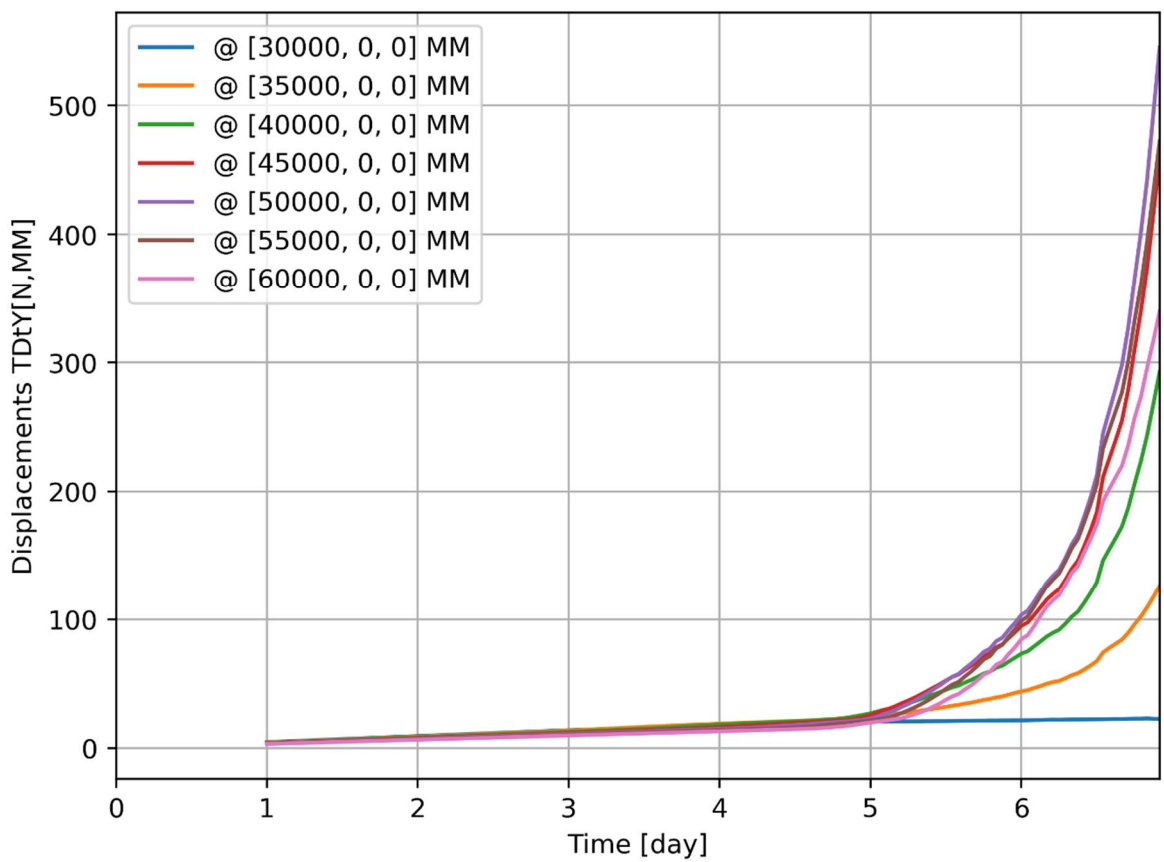
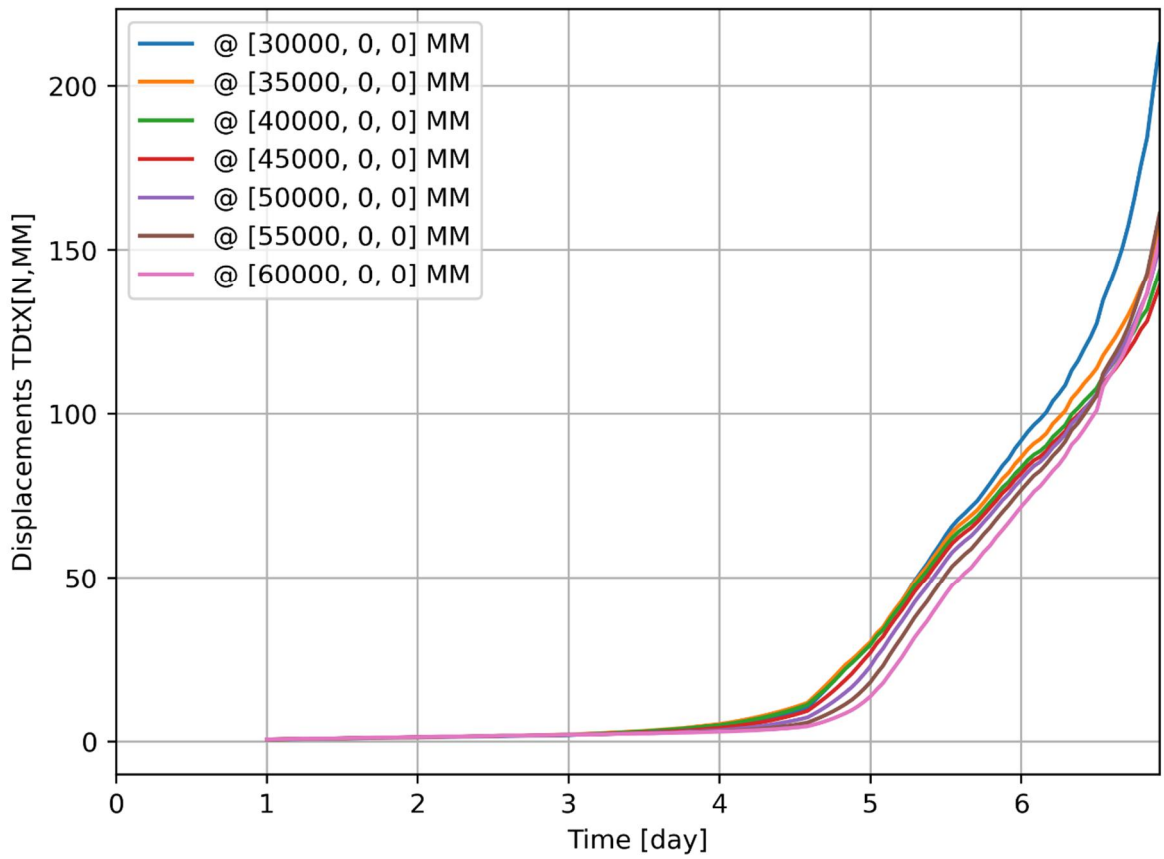
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
 Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -3.48kN/m<sup>2</sup> max: 28.04kN/m<sup>2</sup>

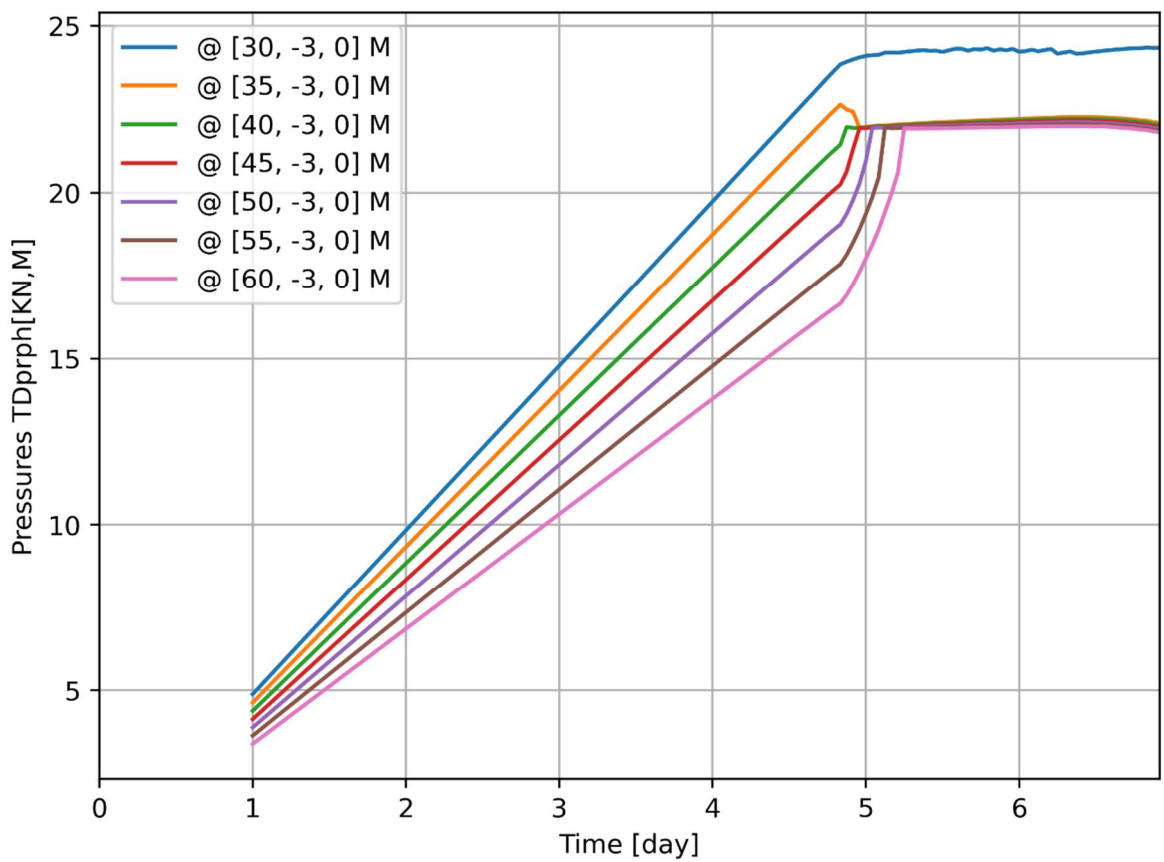
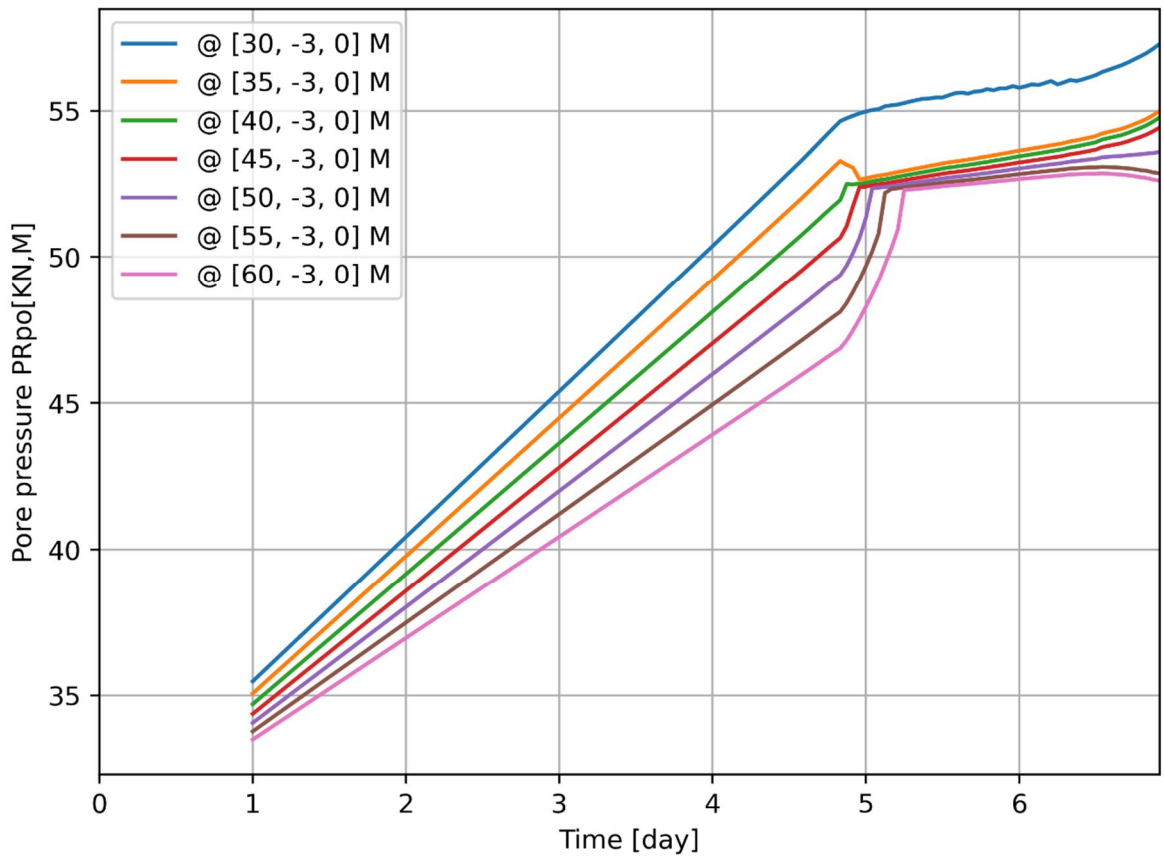


d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
 Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -85.06kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

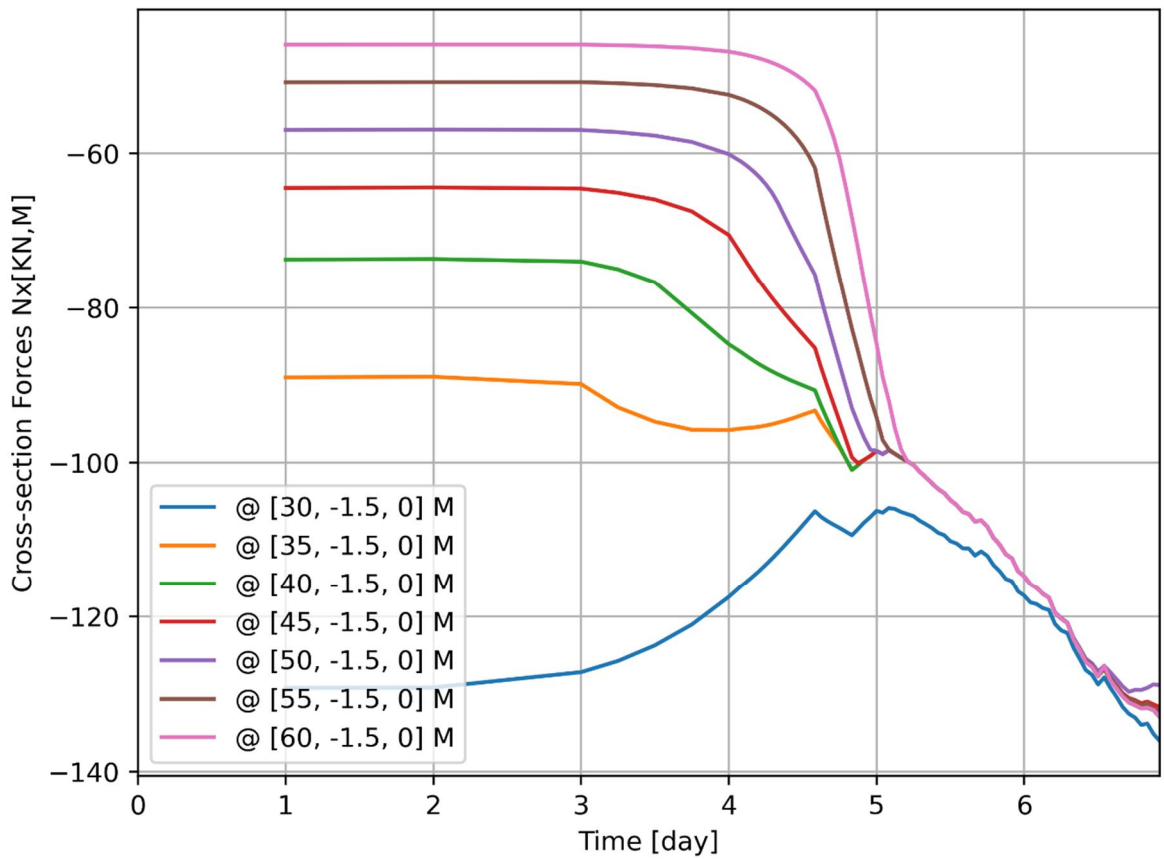
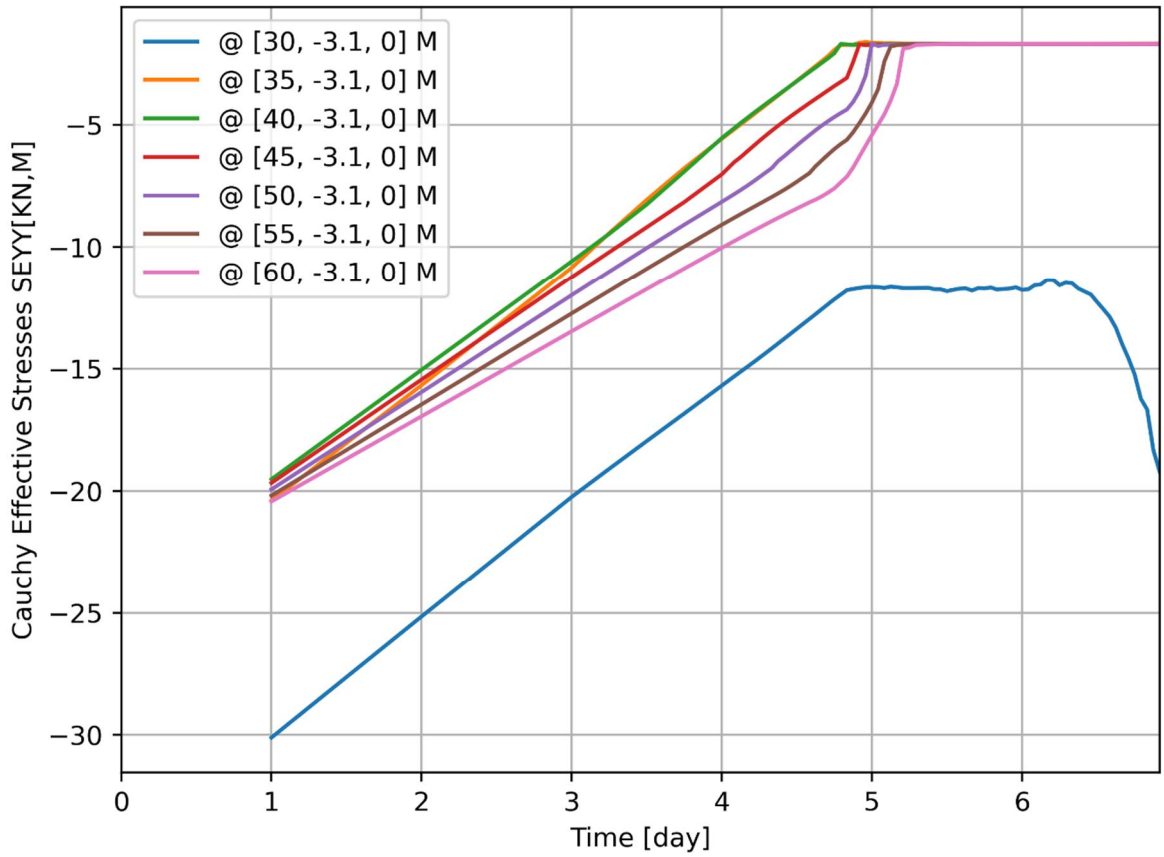


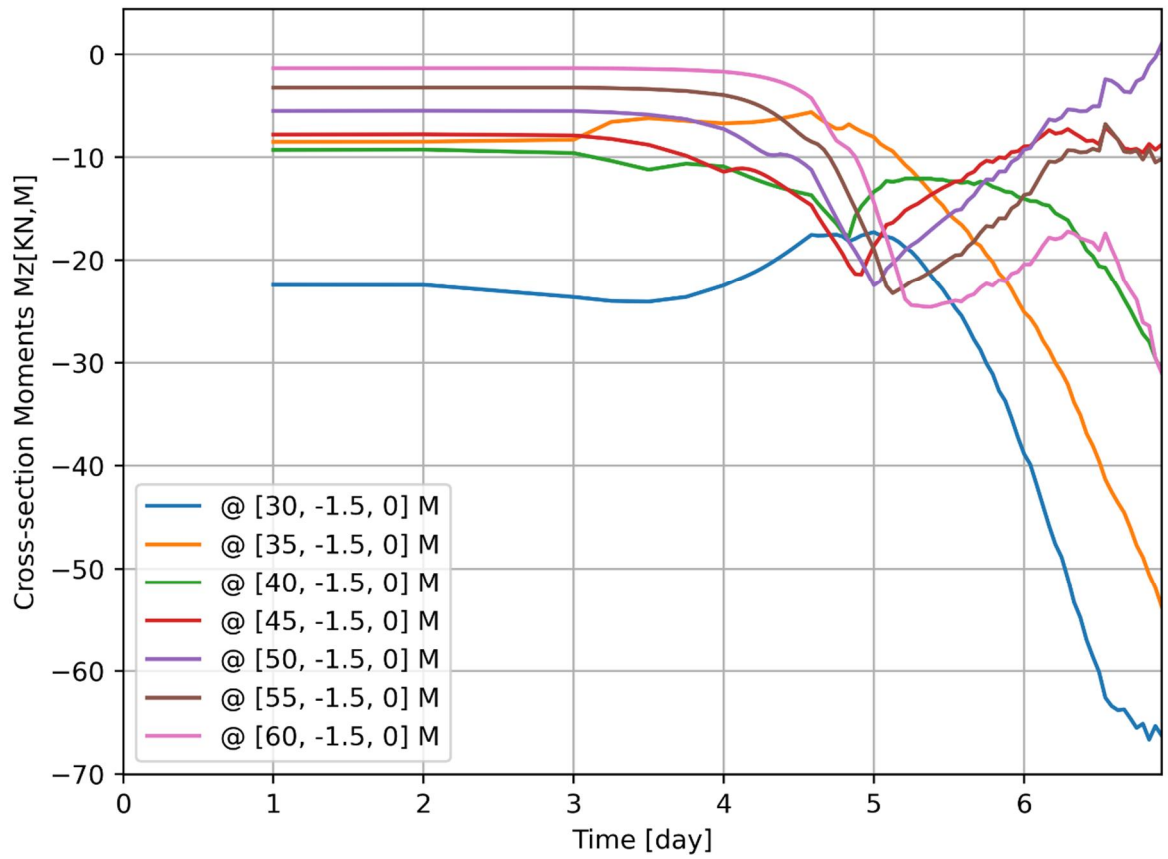








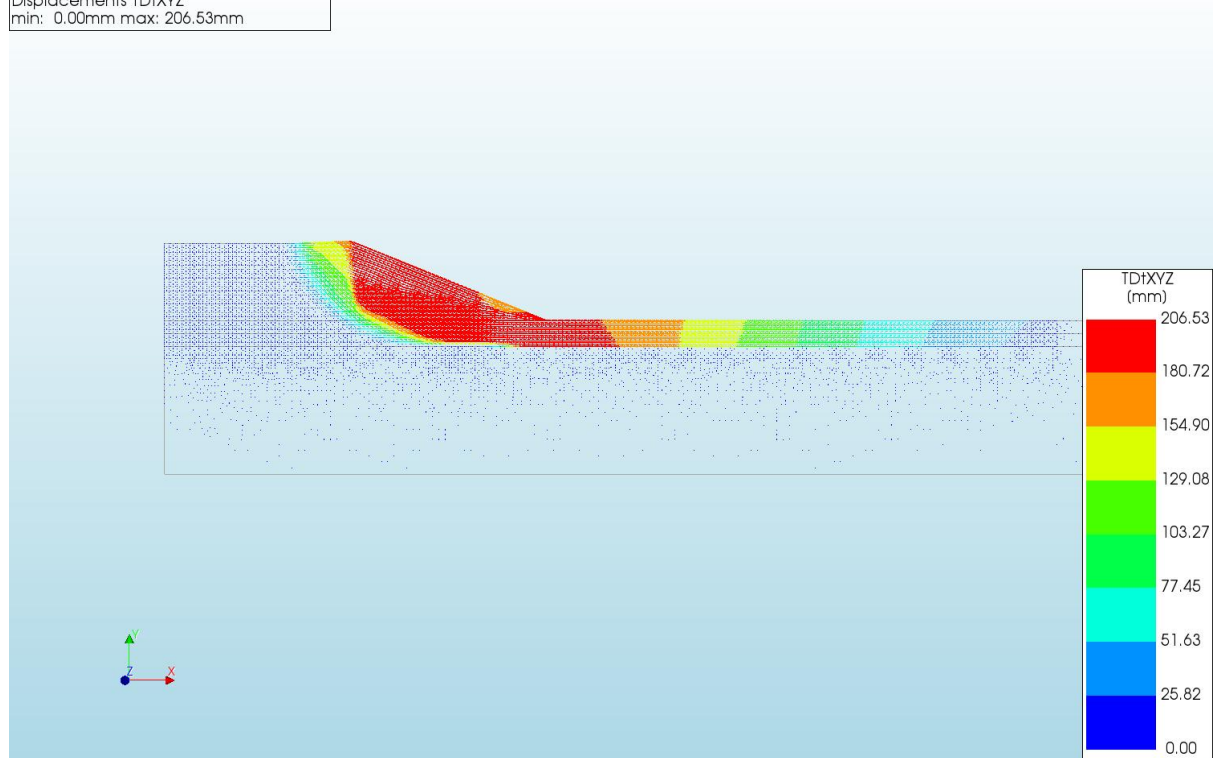




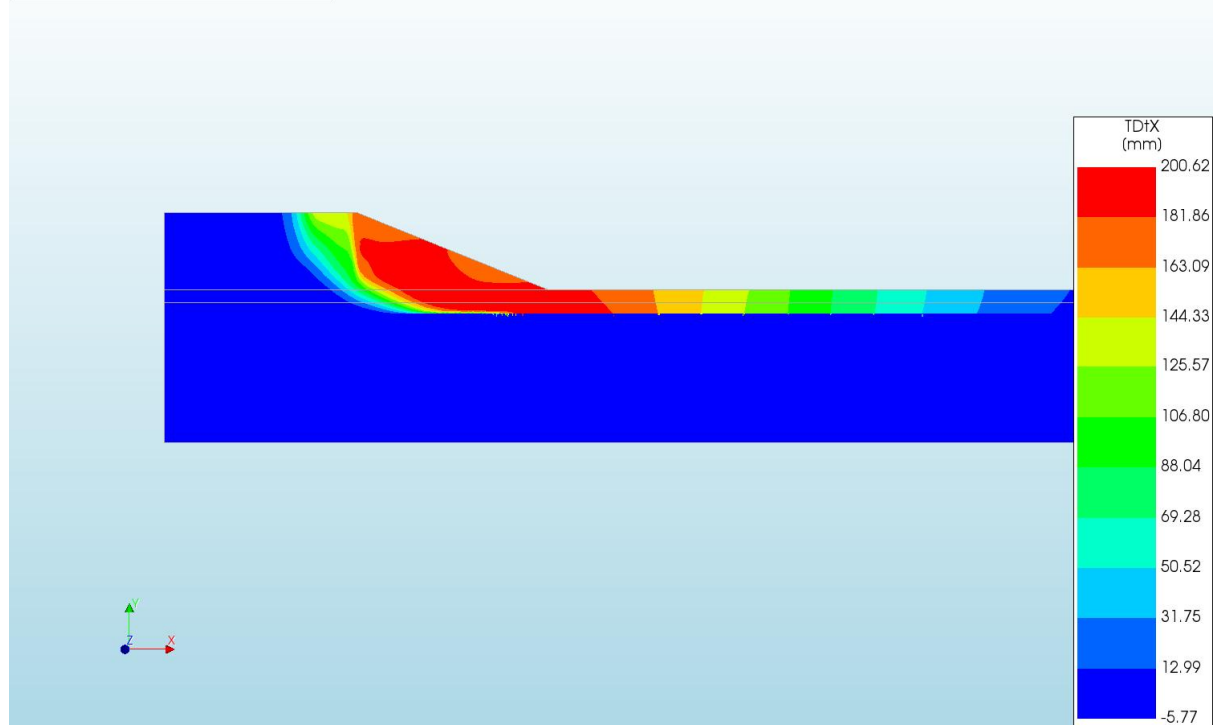
A.2.26

'Output\_d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-08\_20200818'

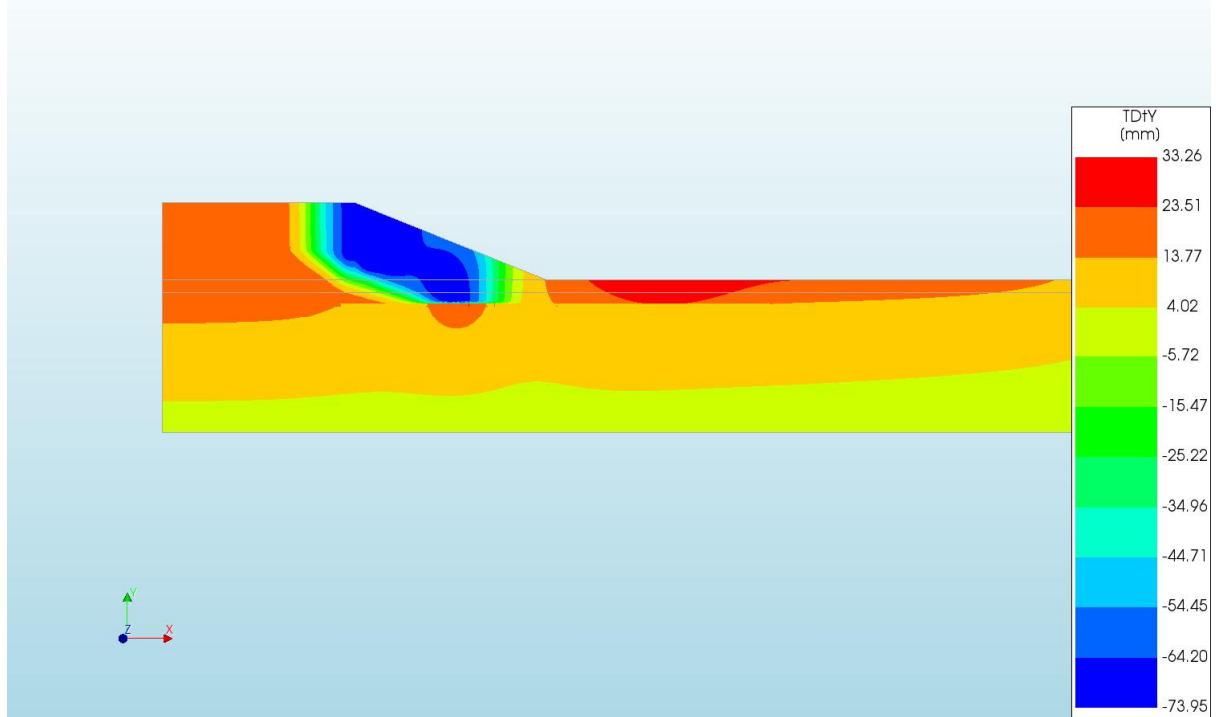
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Displacements TDiXYZ  
 min: 0.00mm max: 206.53mm



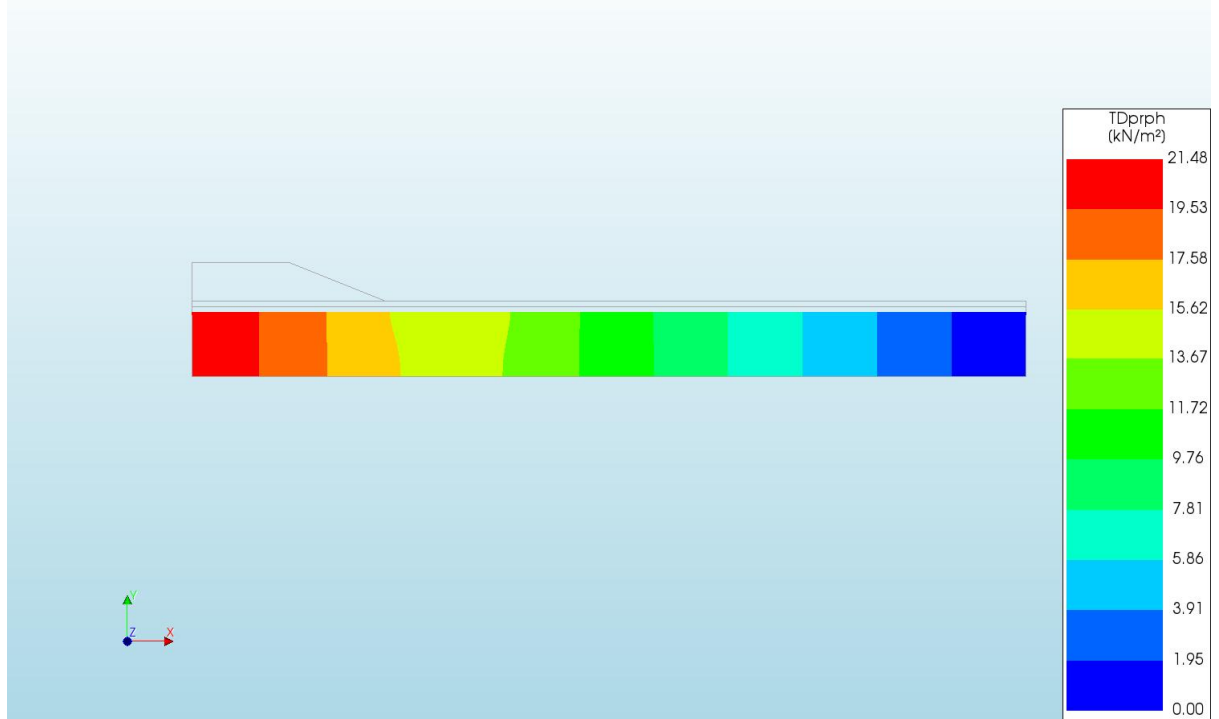
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Displacements TDiX  
 min: -5.77mm max: 200.62mm



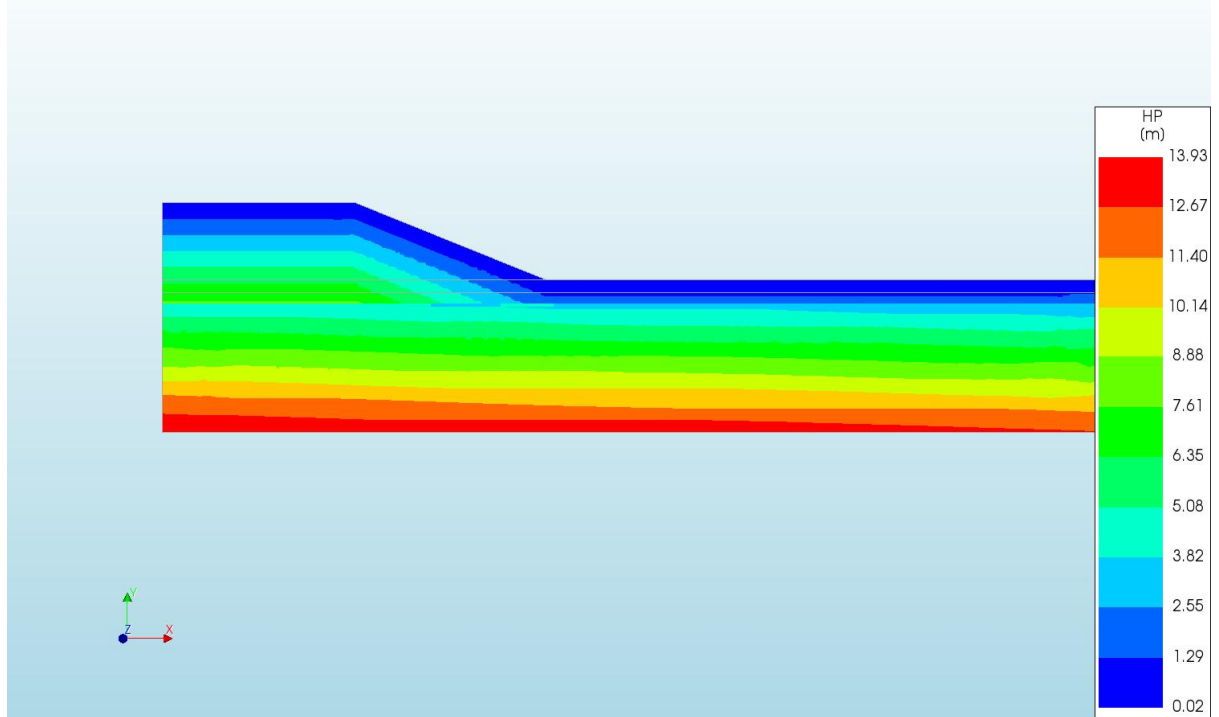
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtY  
min: -73.95mm max: 33.26mm



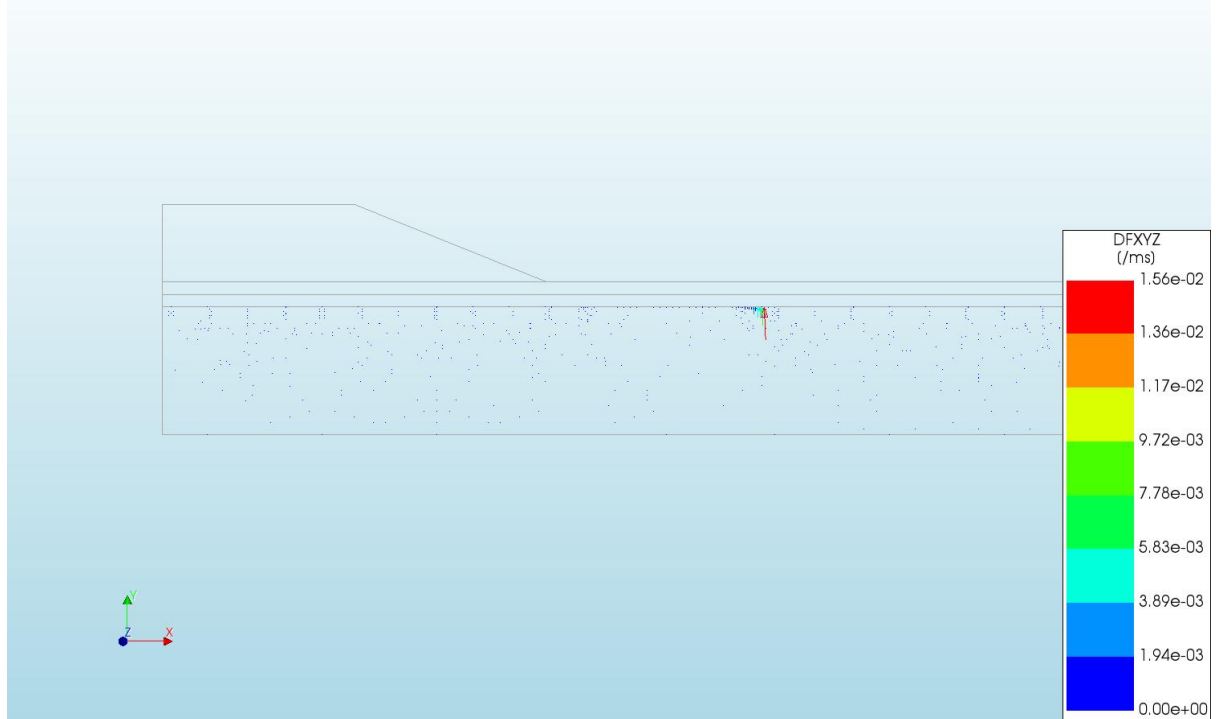
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 21.48kN/m<sup>2</sup>



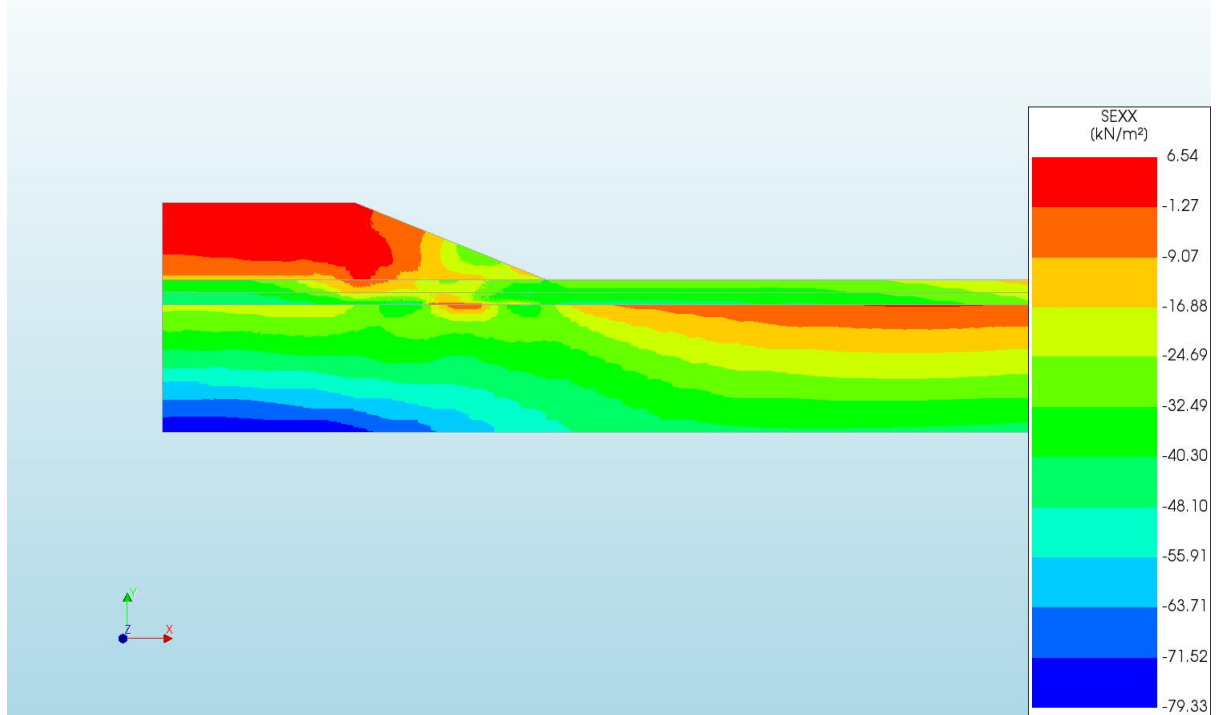
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.93m



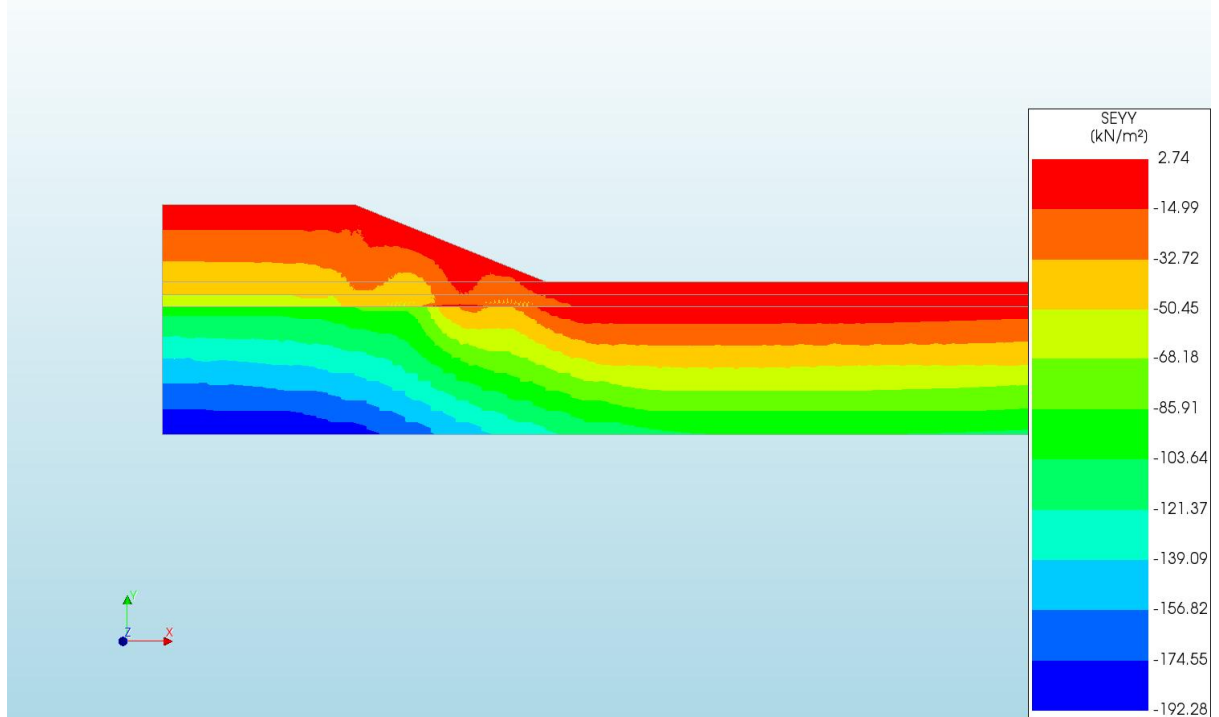
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.56e-02/ms



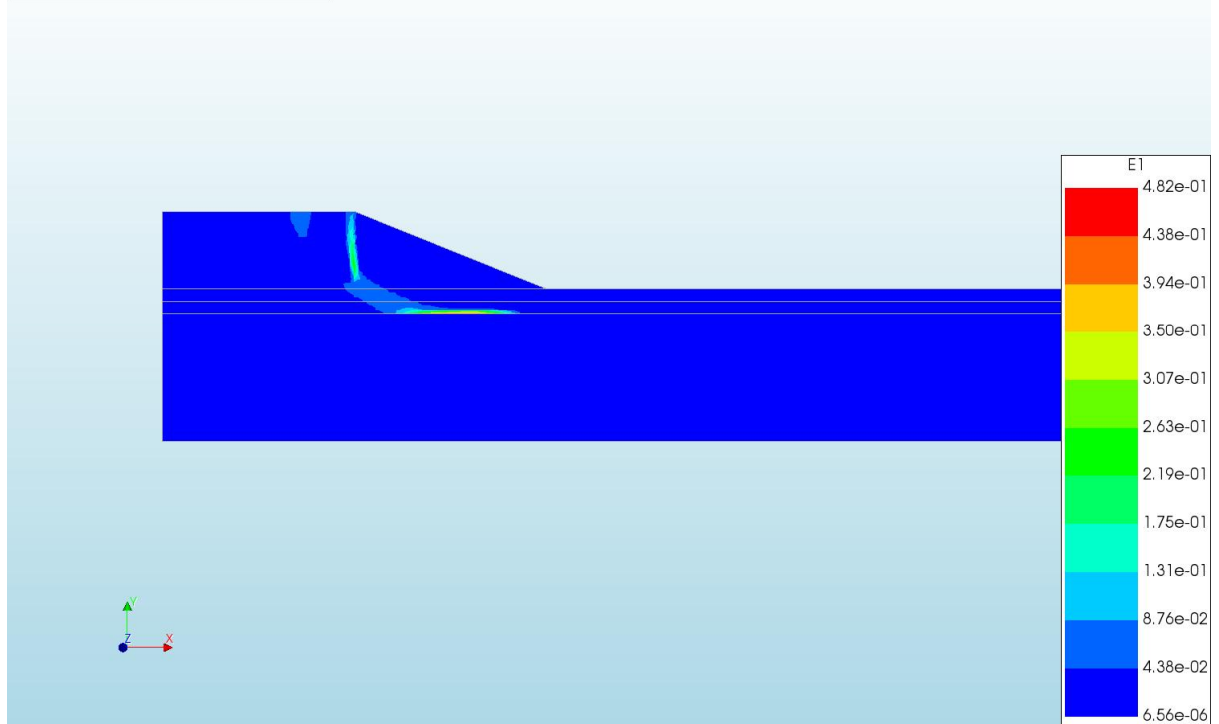
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.33kN/m<sup>2</sup> max: 6.54kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.28kN/m<sup>2</sup> max: 2.74kN/m<sup>2</sup>



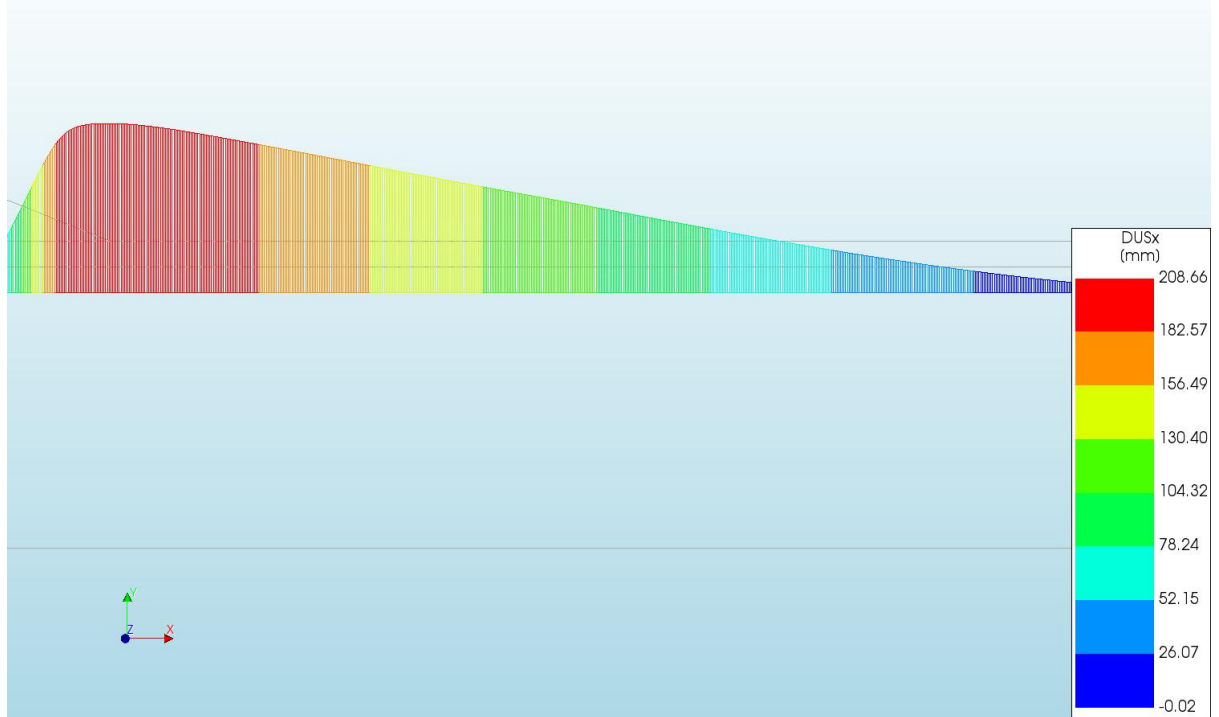
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Total Strains E1  
min: 6.56e-06 max: 4.82e-01



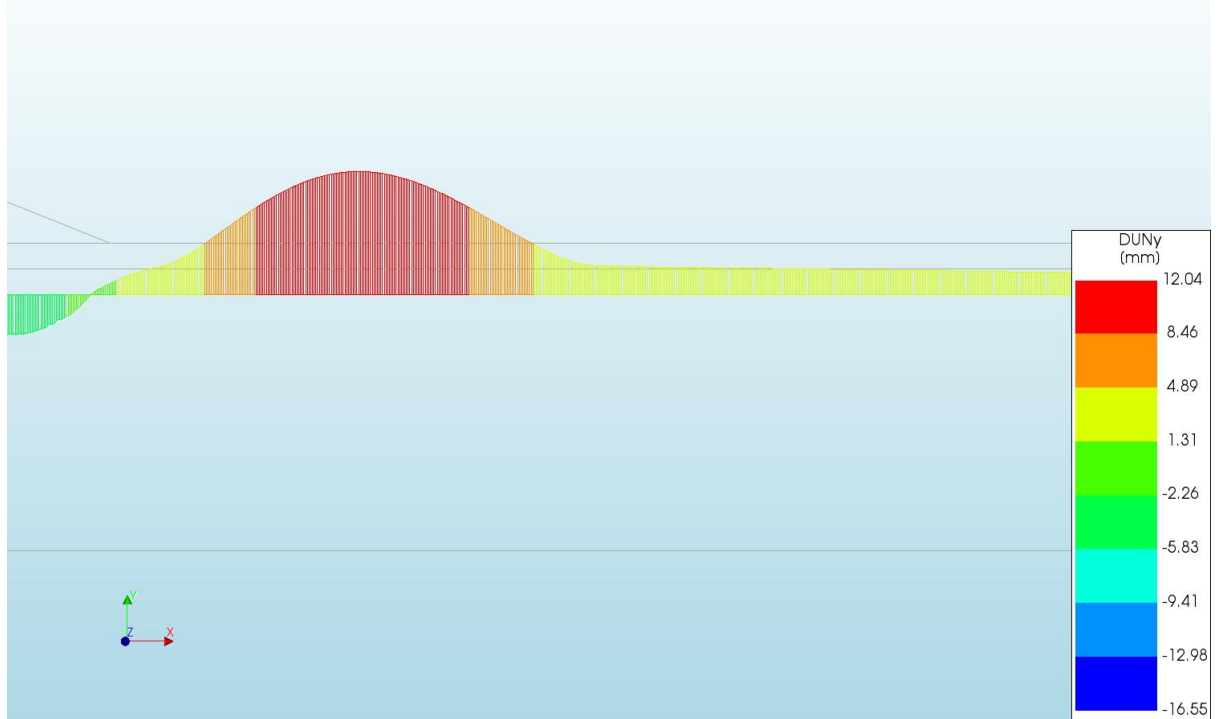
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.03e-01



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 208.66mm

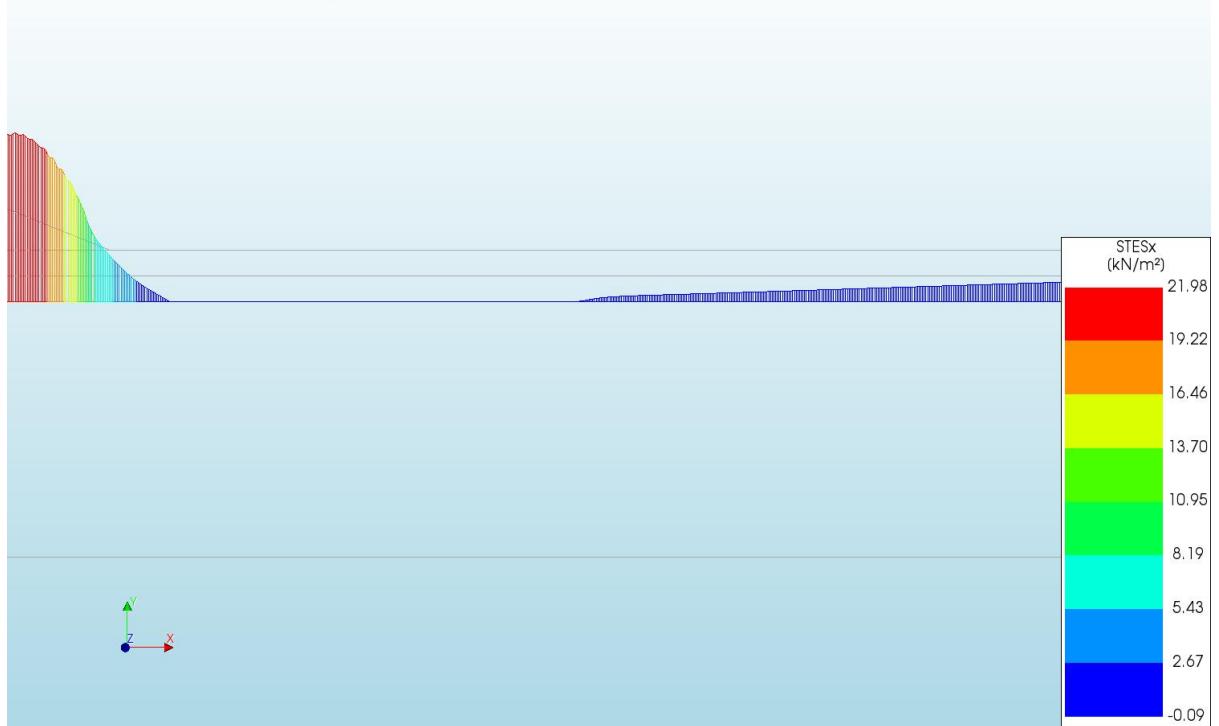


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.55mm max: 12.04mm

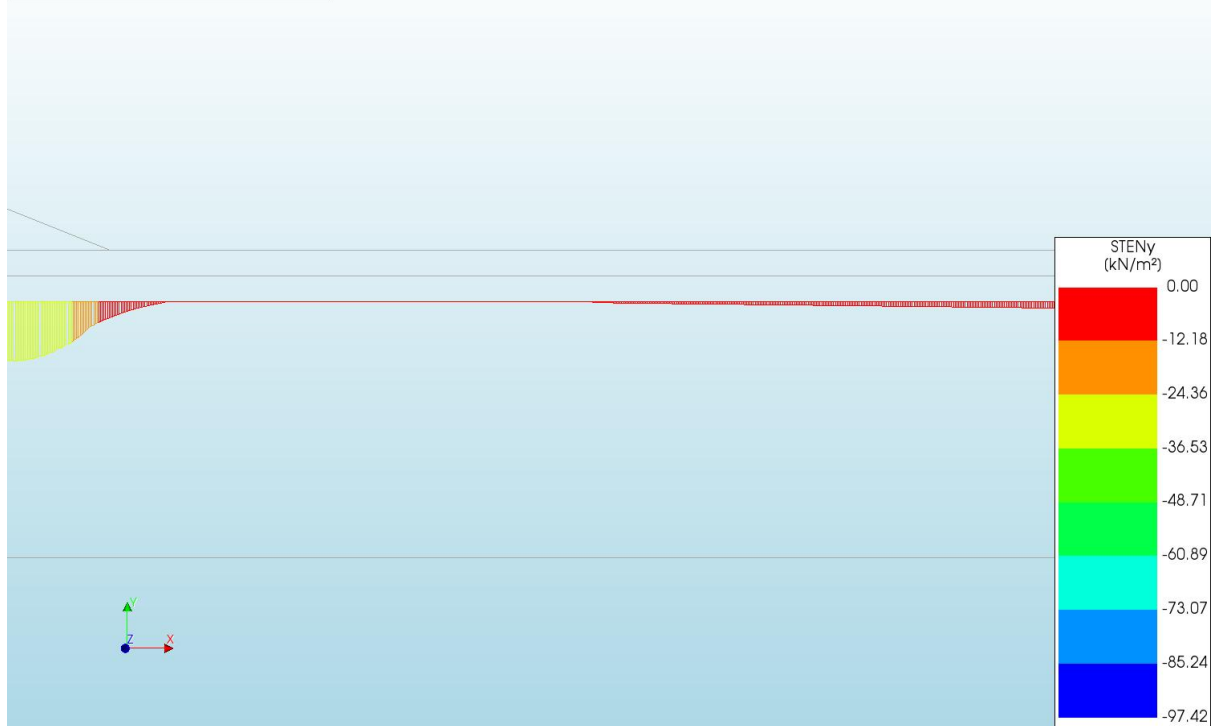


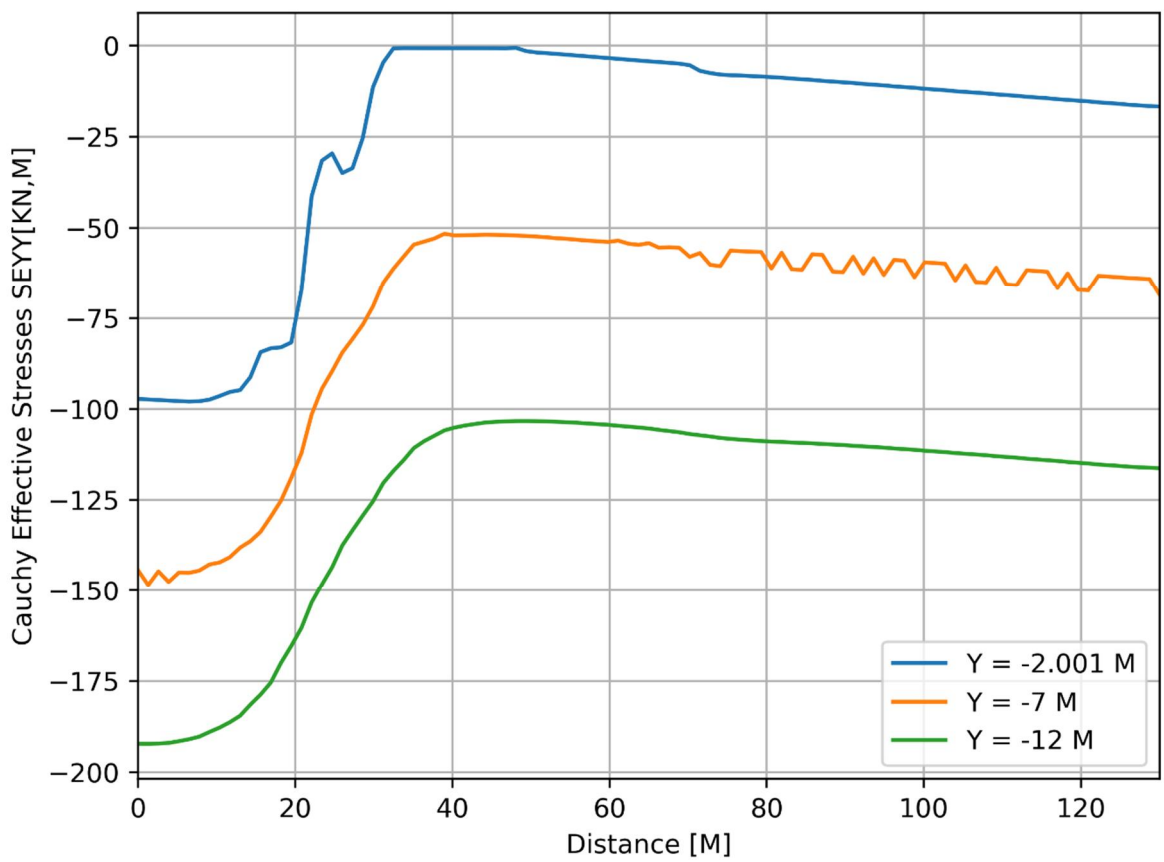
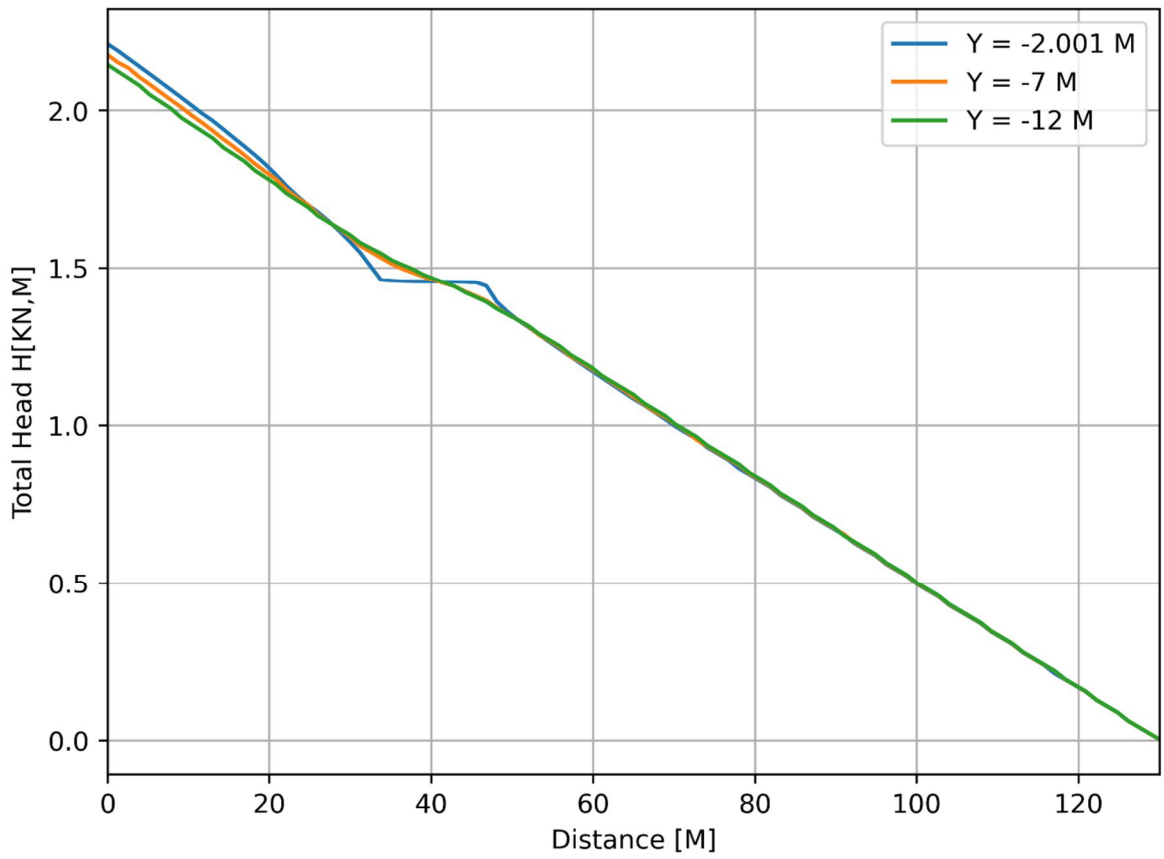


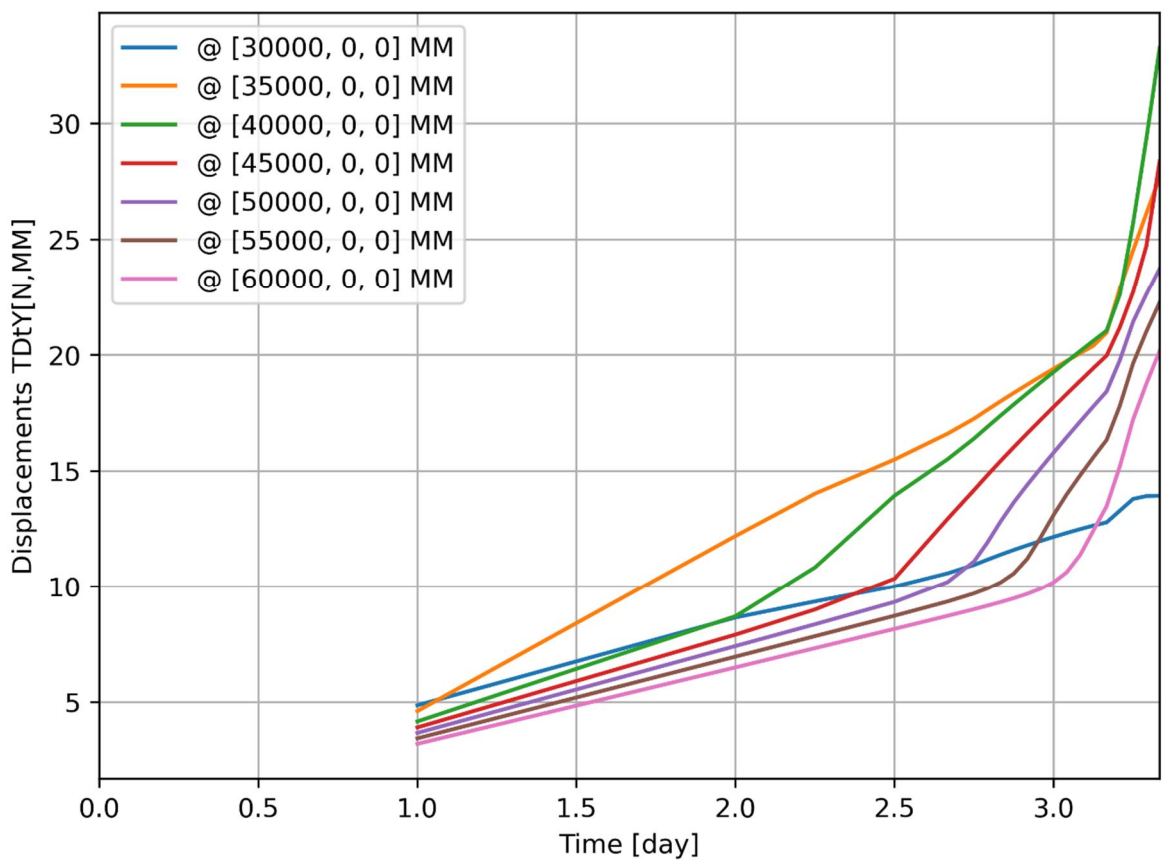
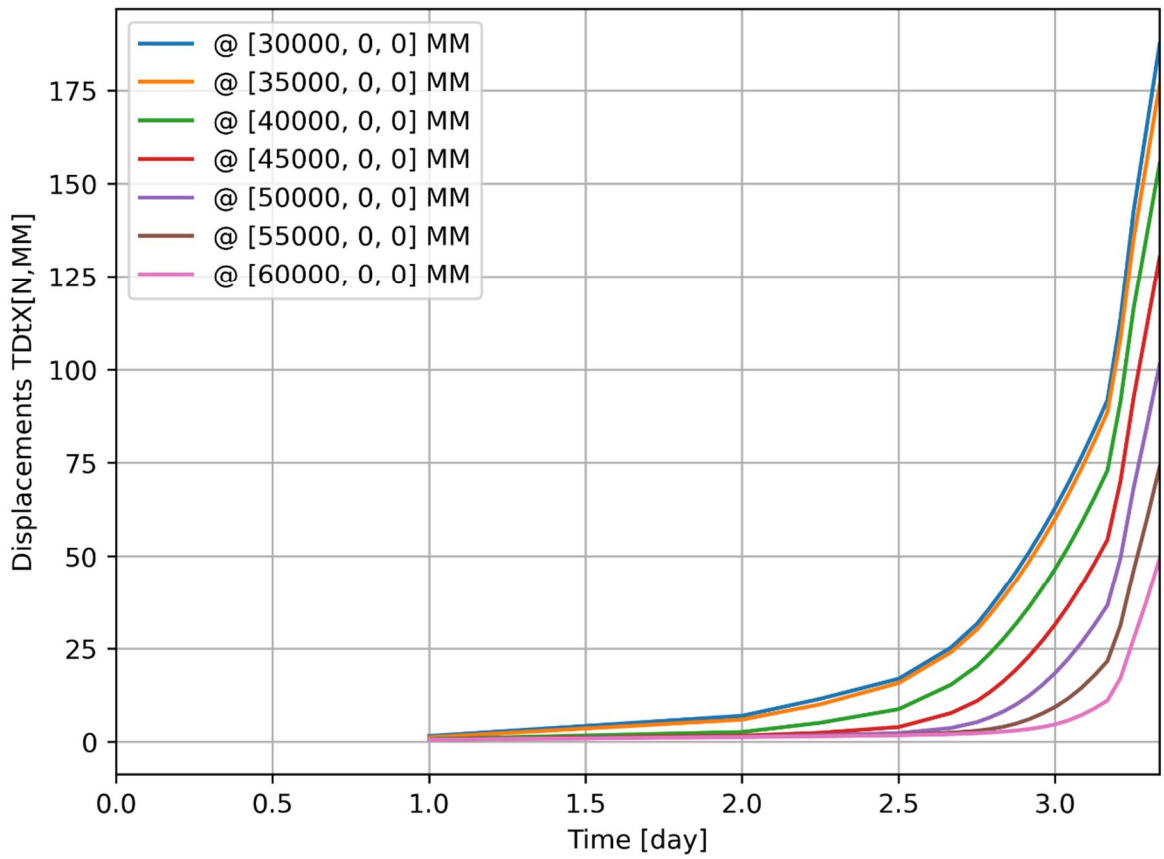
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.09kN/m<sup>2</sup> max: 21.98kN/m<sup>2</sup>

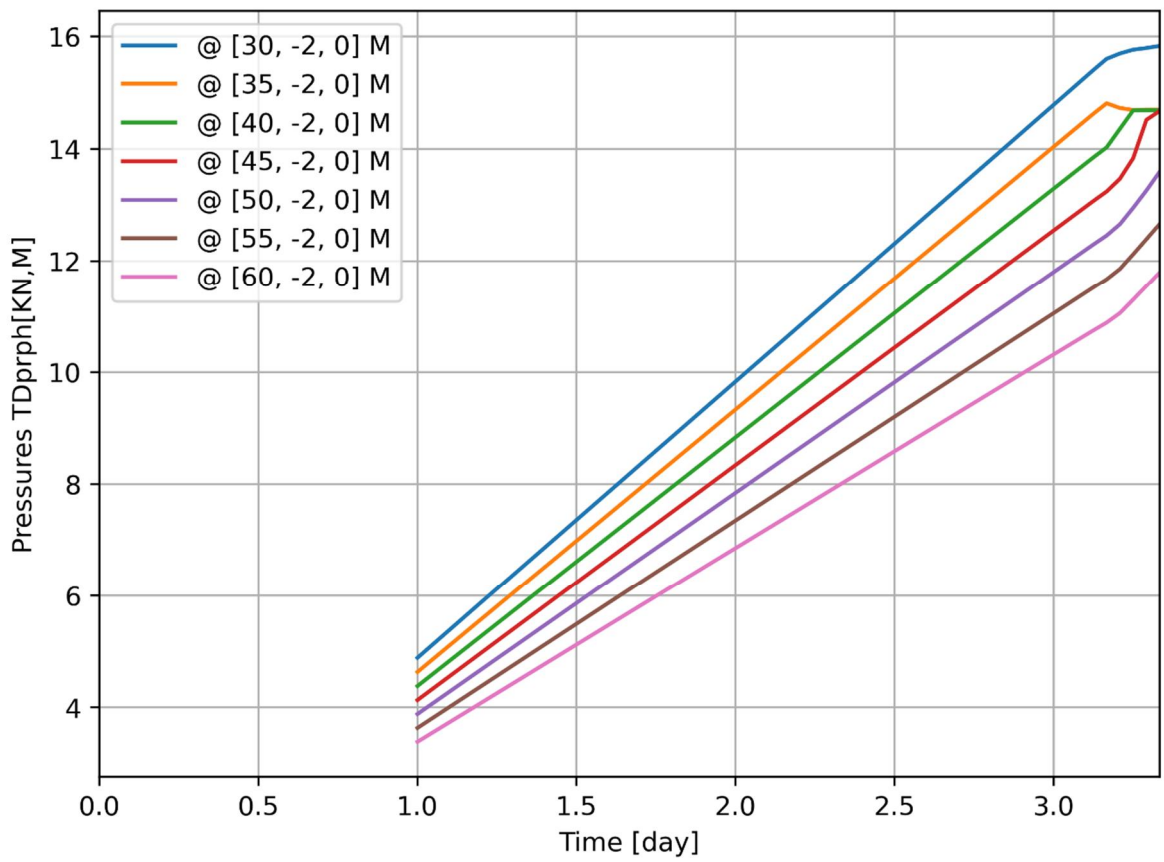
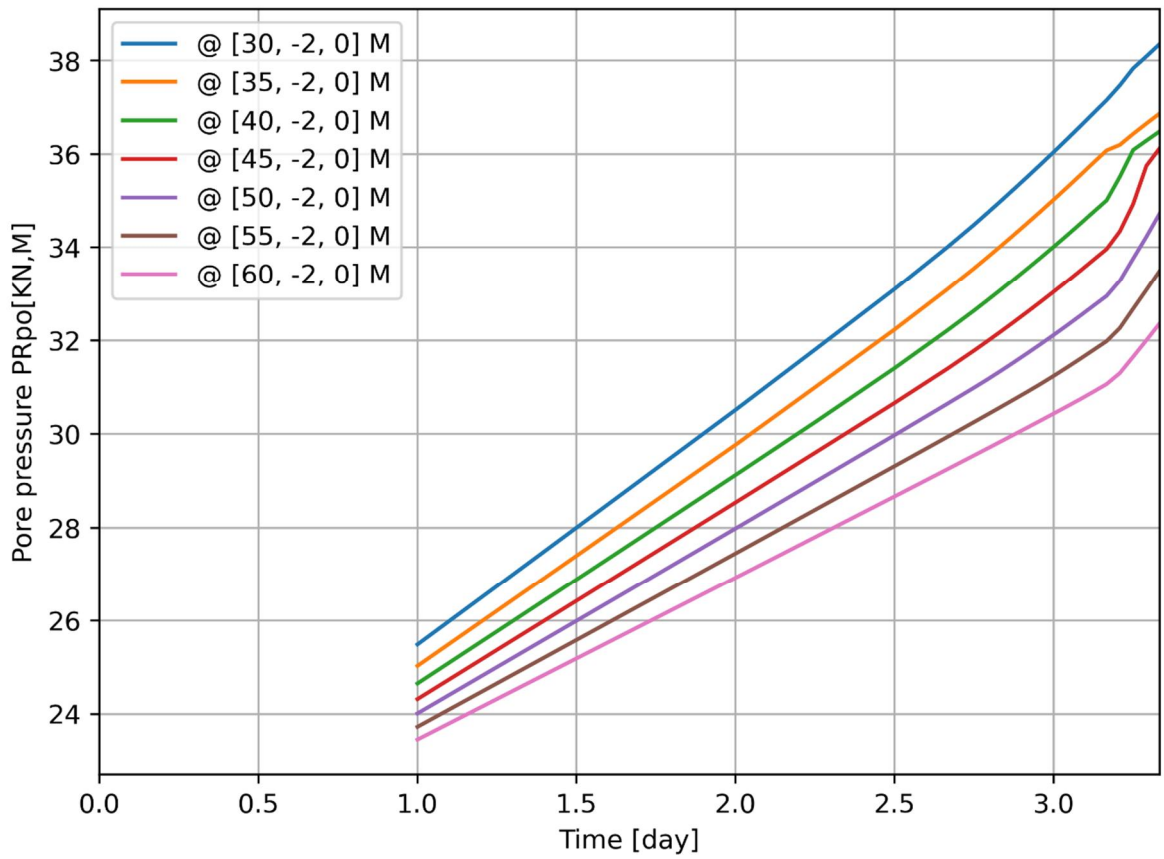


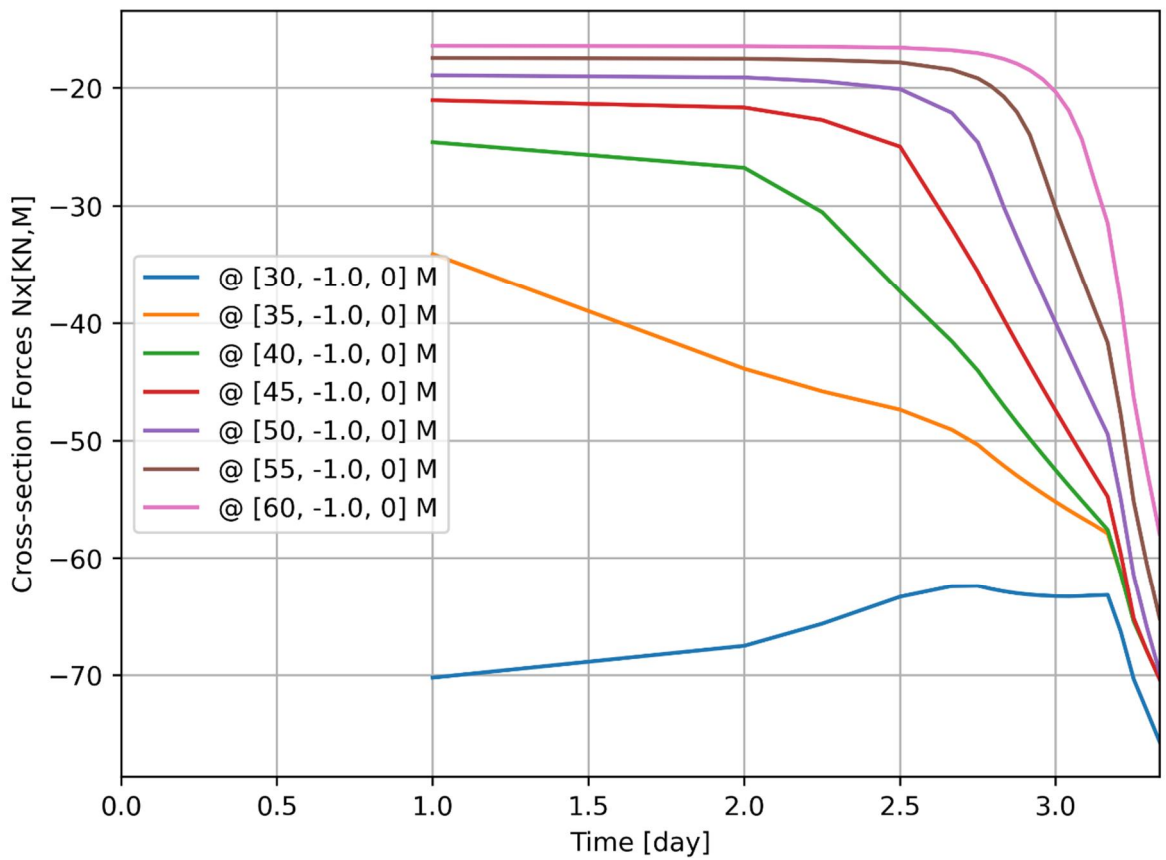
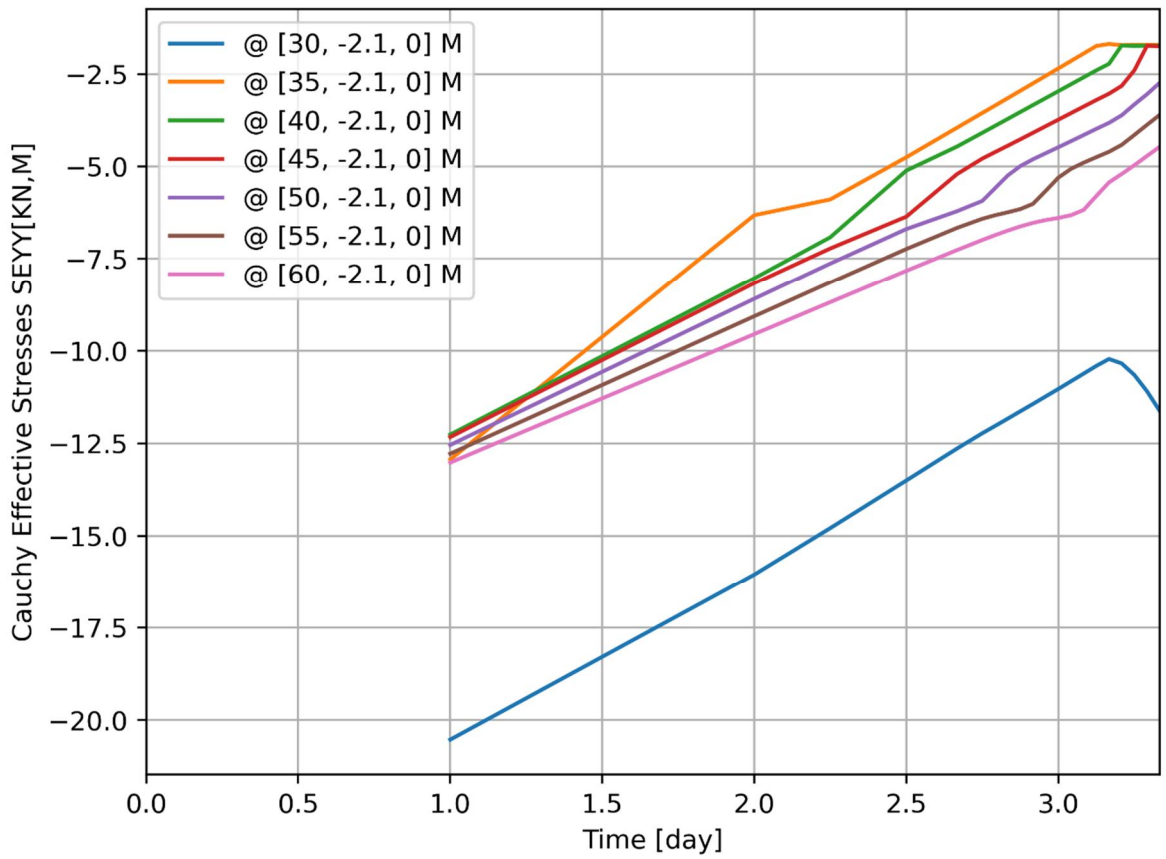
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -97.42kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

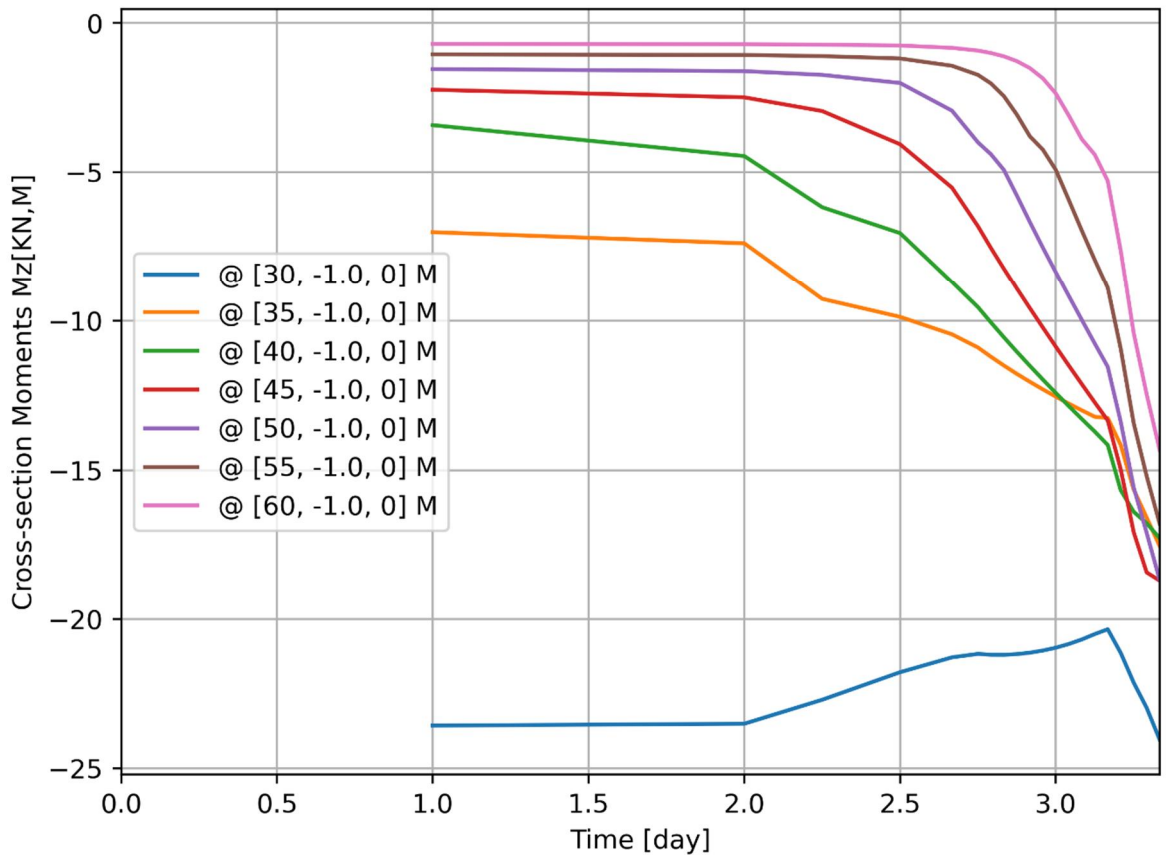








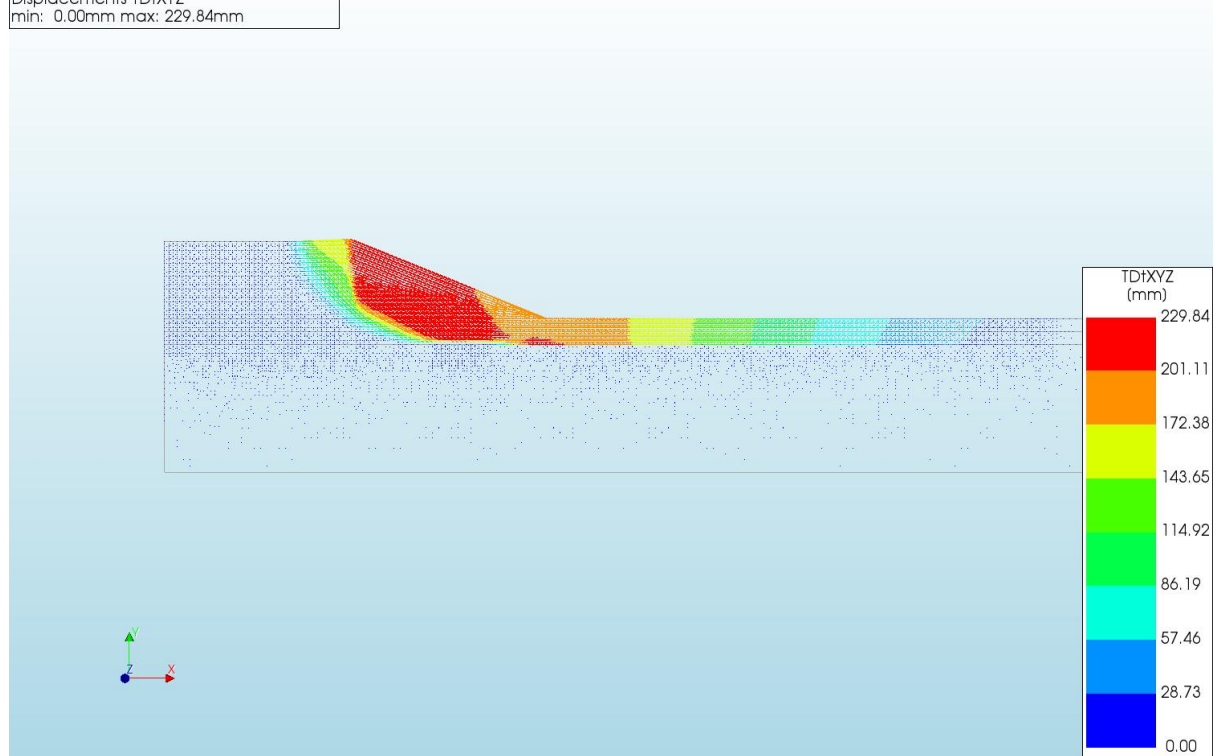




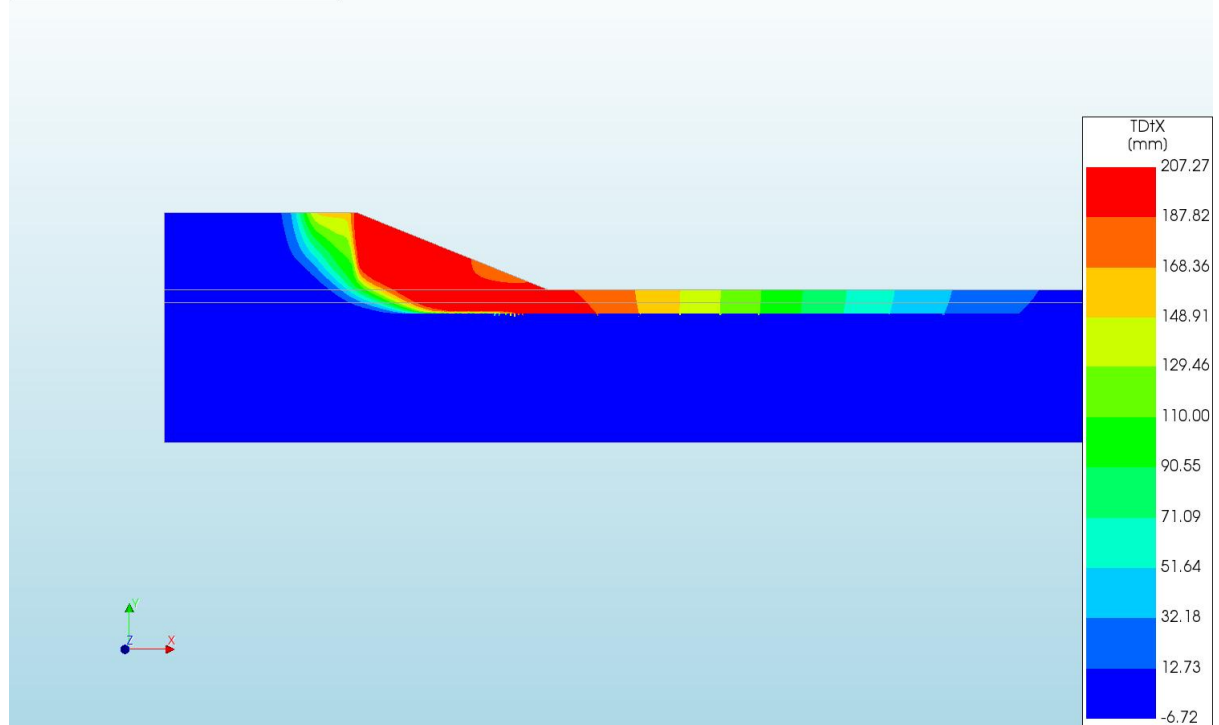
A.2.27

'Output d=2 c=15 E=3 k=1e-08 20200818'

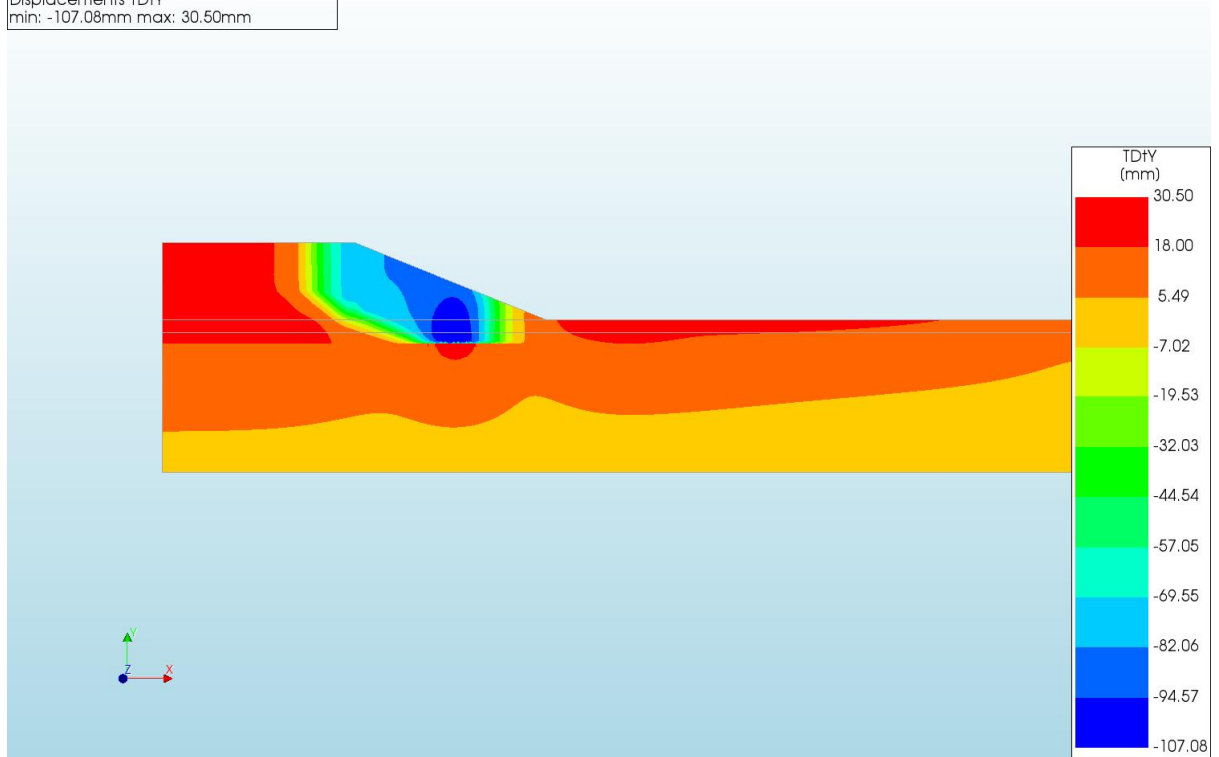
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Displacements TdXYZ  
min: 0.00mm max: 229.84mm



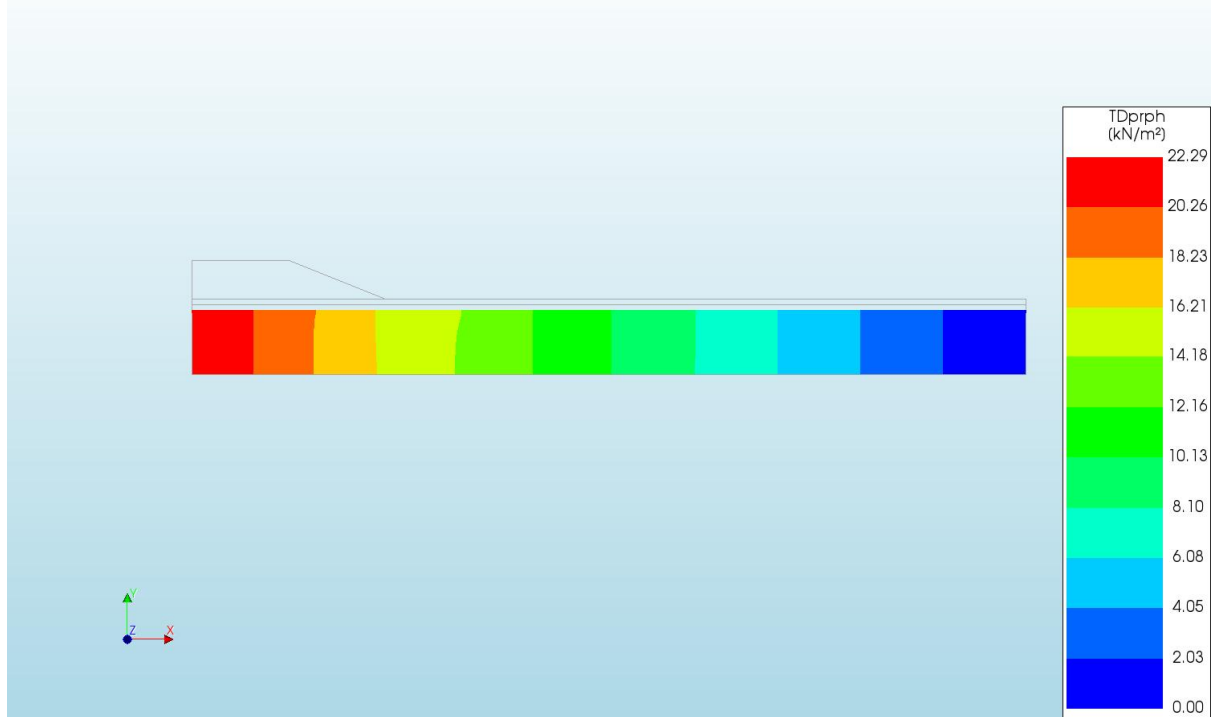
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Displacements TdX  
min: -6.72mm max: 207.27mm



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Displacements TDtY  
min: -107.08mm max: 30.50mm

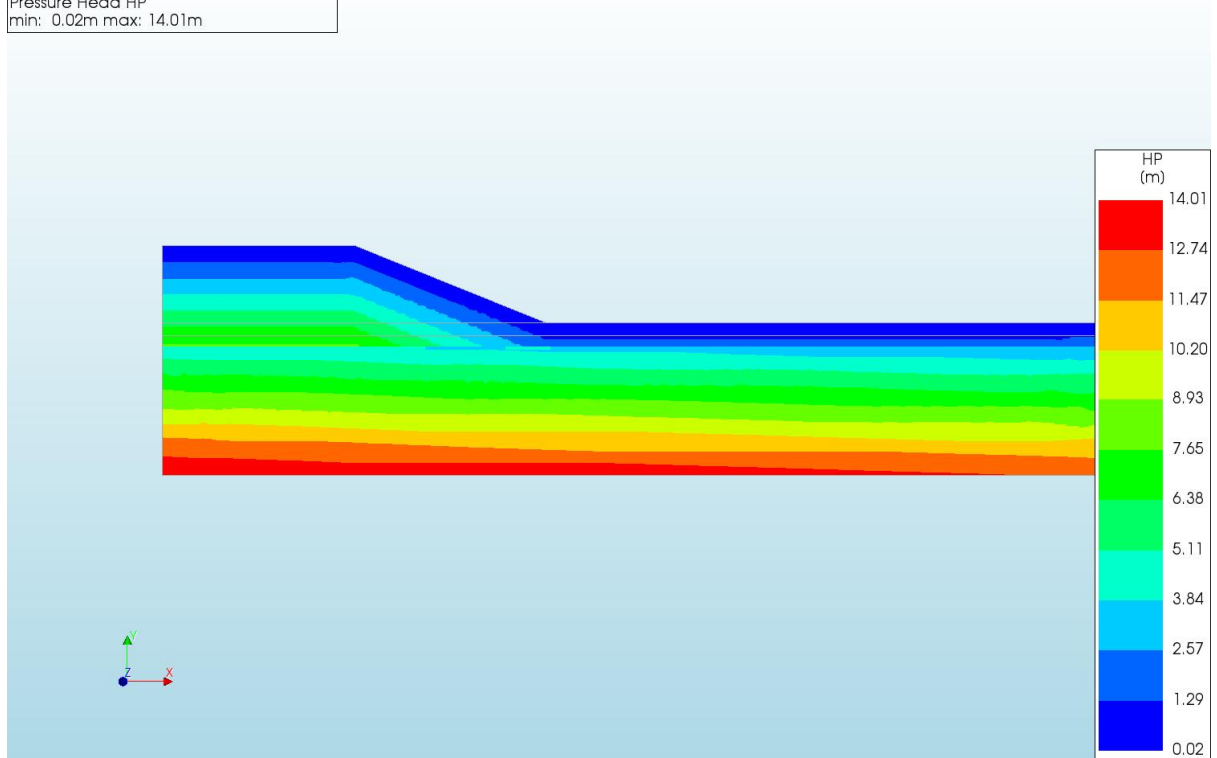


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 22.29kN/m<sup>2</sup>

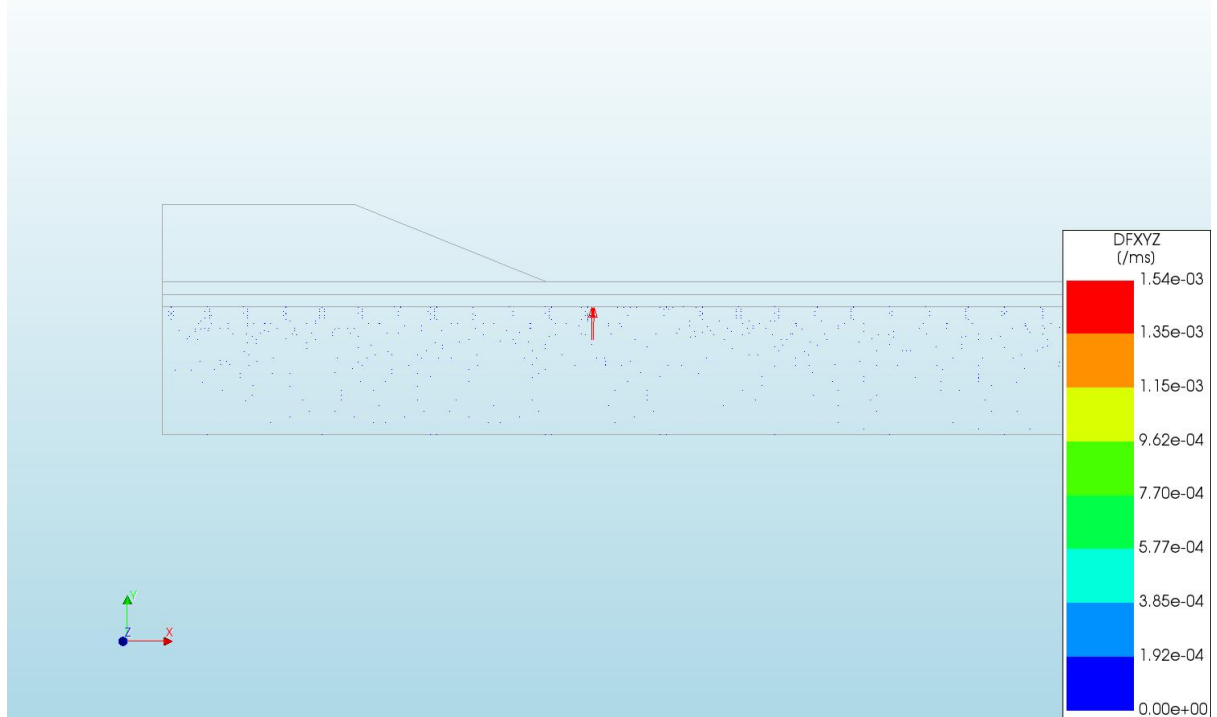




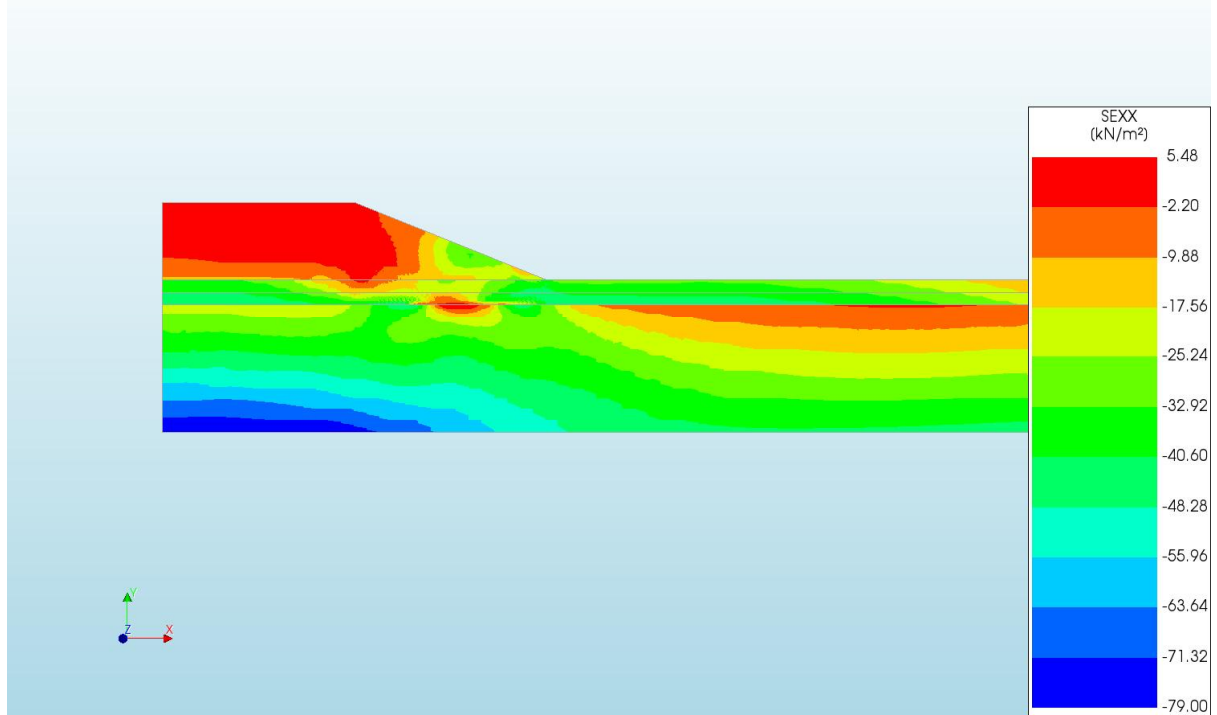
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 14.01m



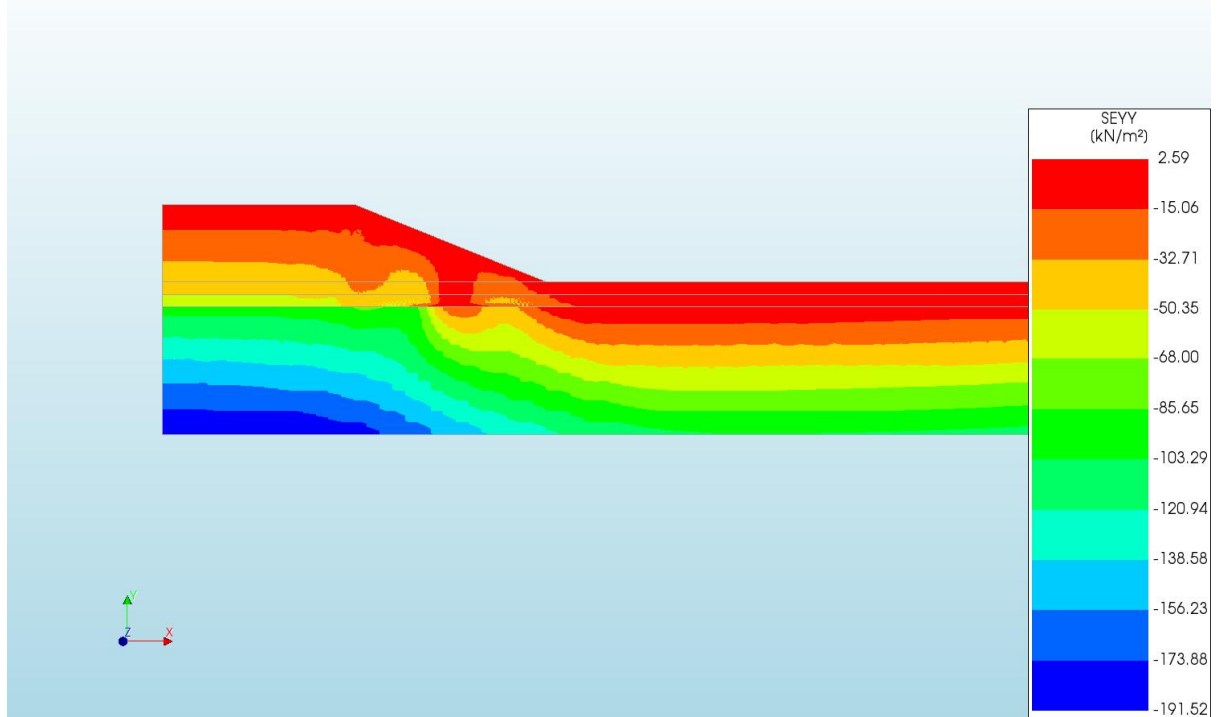
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.54e-03/ms



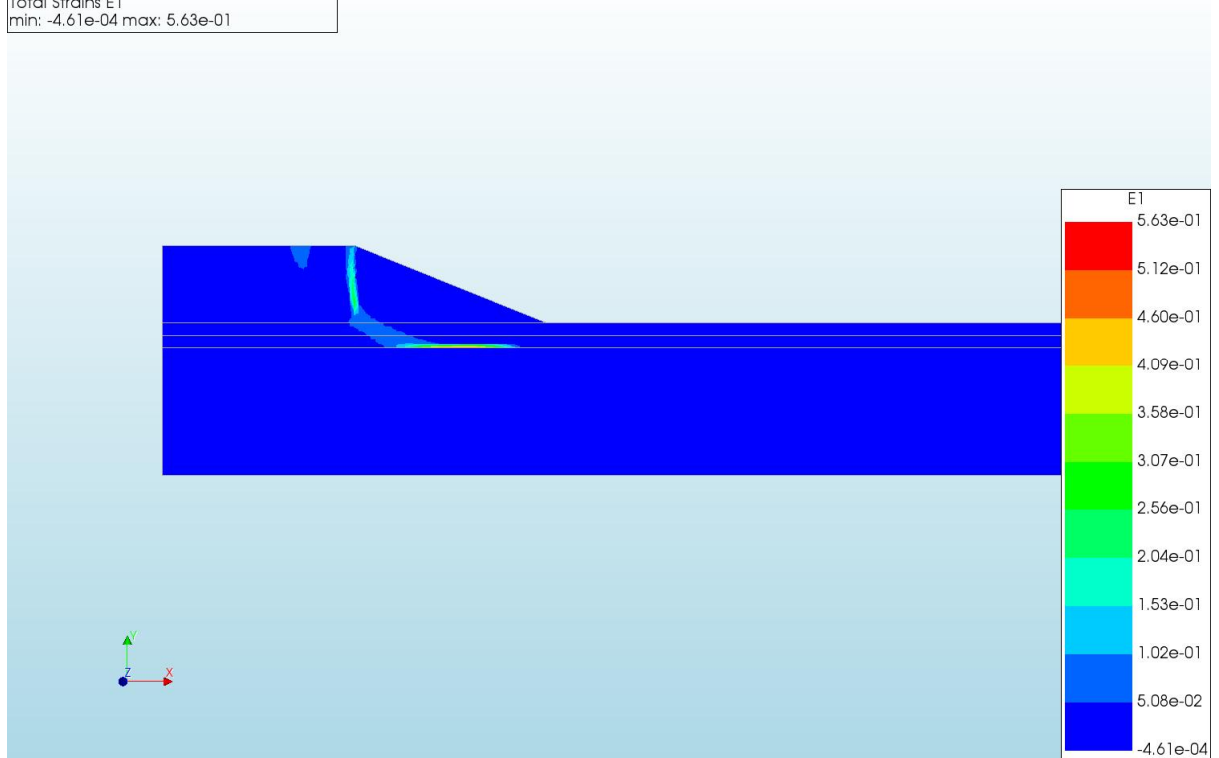
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.00kN/m<sup>2</sup> max: 5.48kN/m<sup>2</sup>



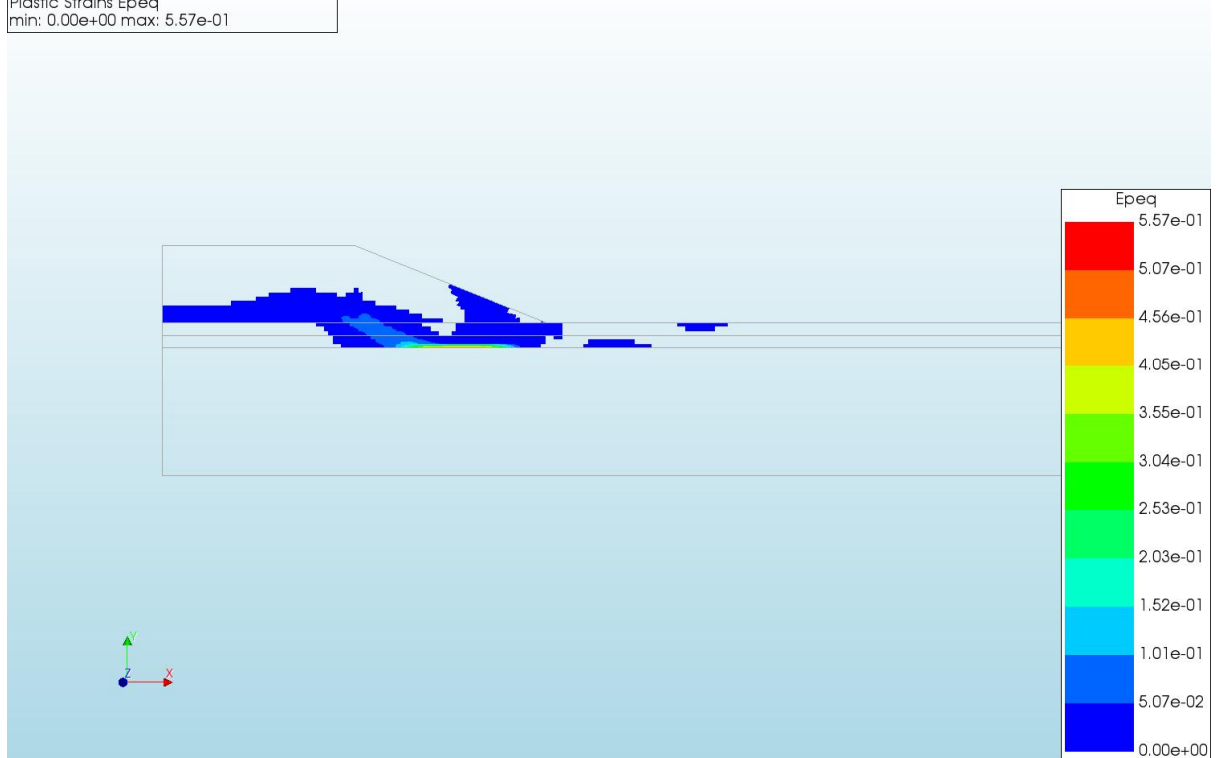
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -191.52kN/m<sup>2</sup> max: 2.59kN/m<sup>2</sup>



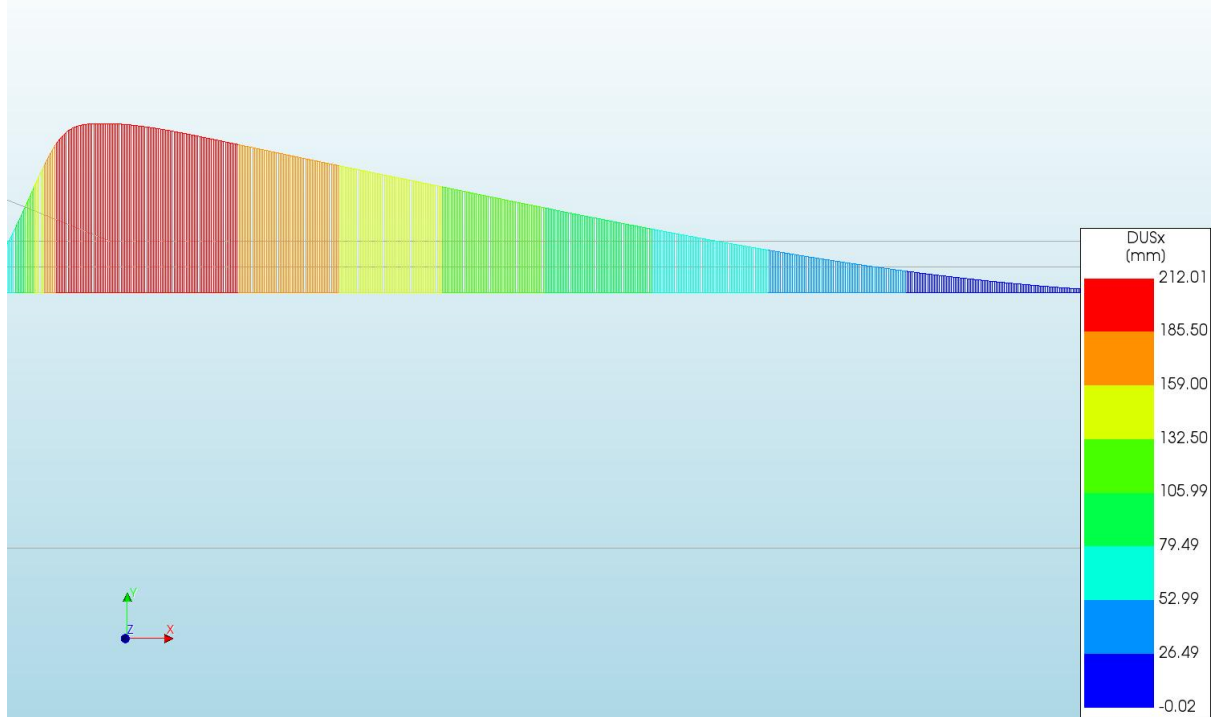
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Total Strains E1  
min: -4.61e-04 max: 5.63e-01



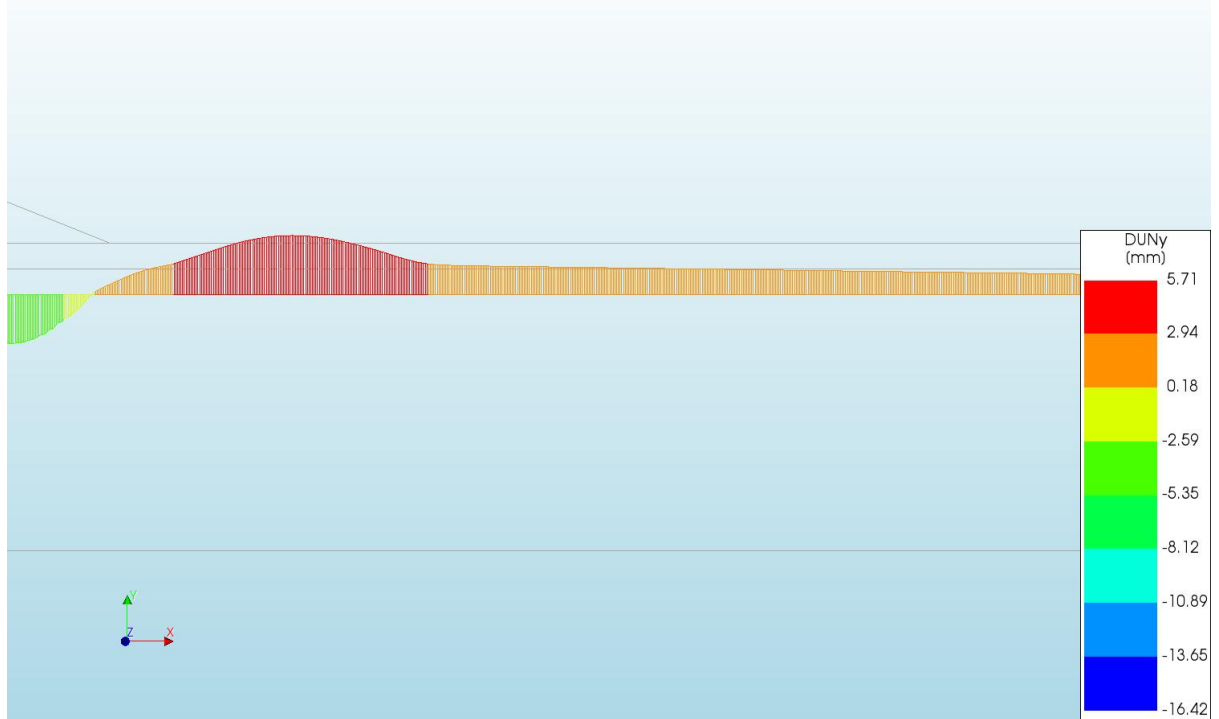
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.57e-01



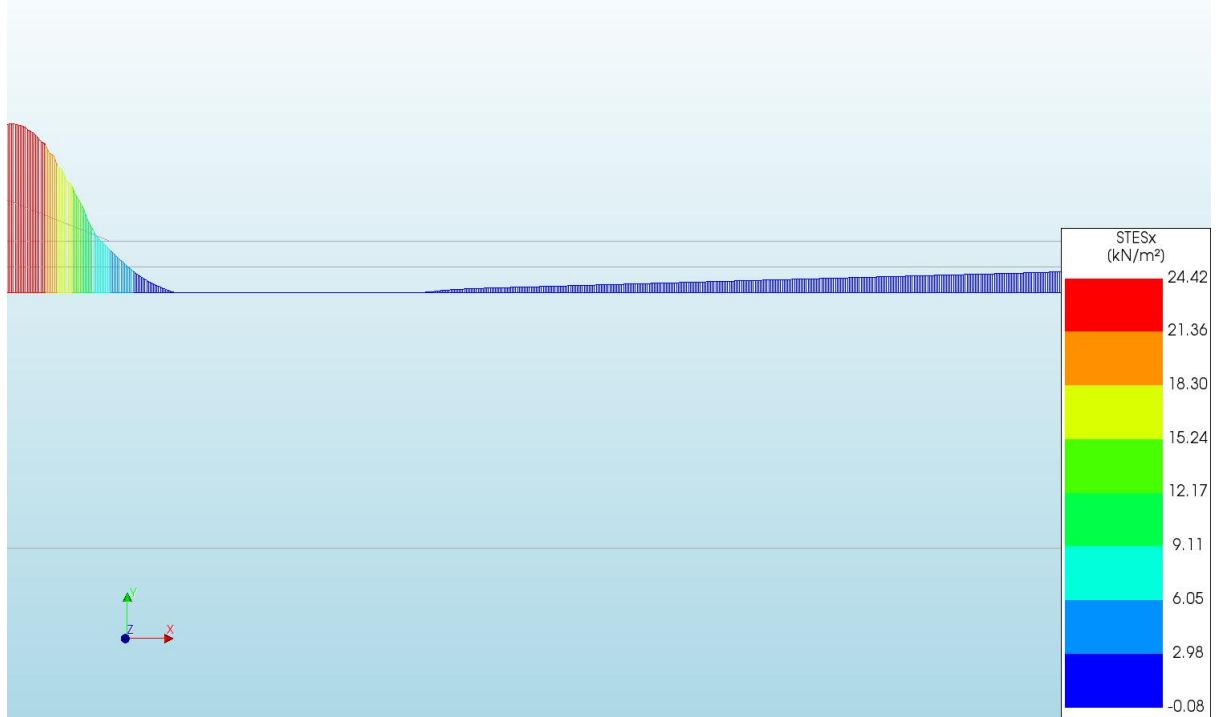
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 212.01mm



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.42mm max: 5.71mm

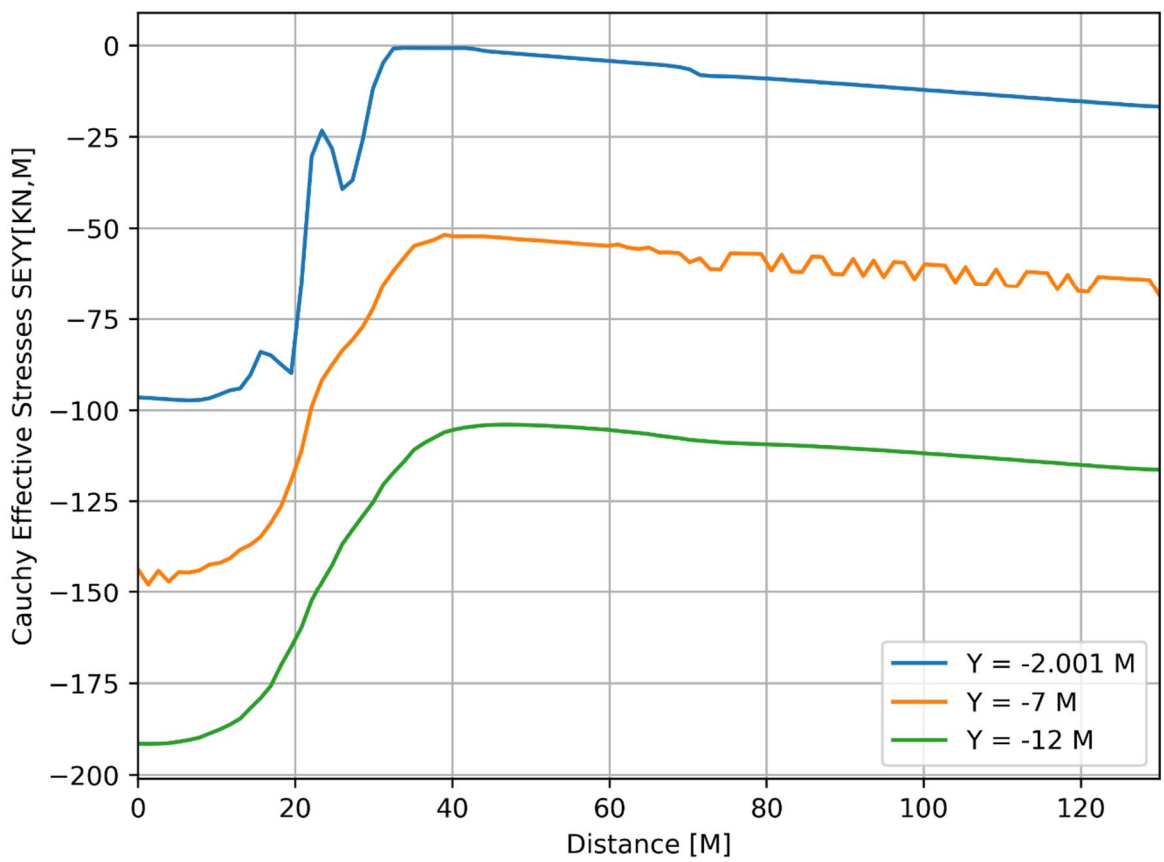
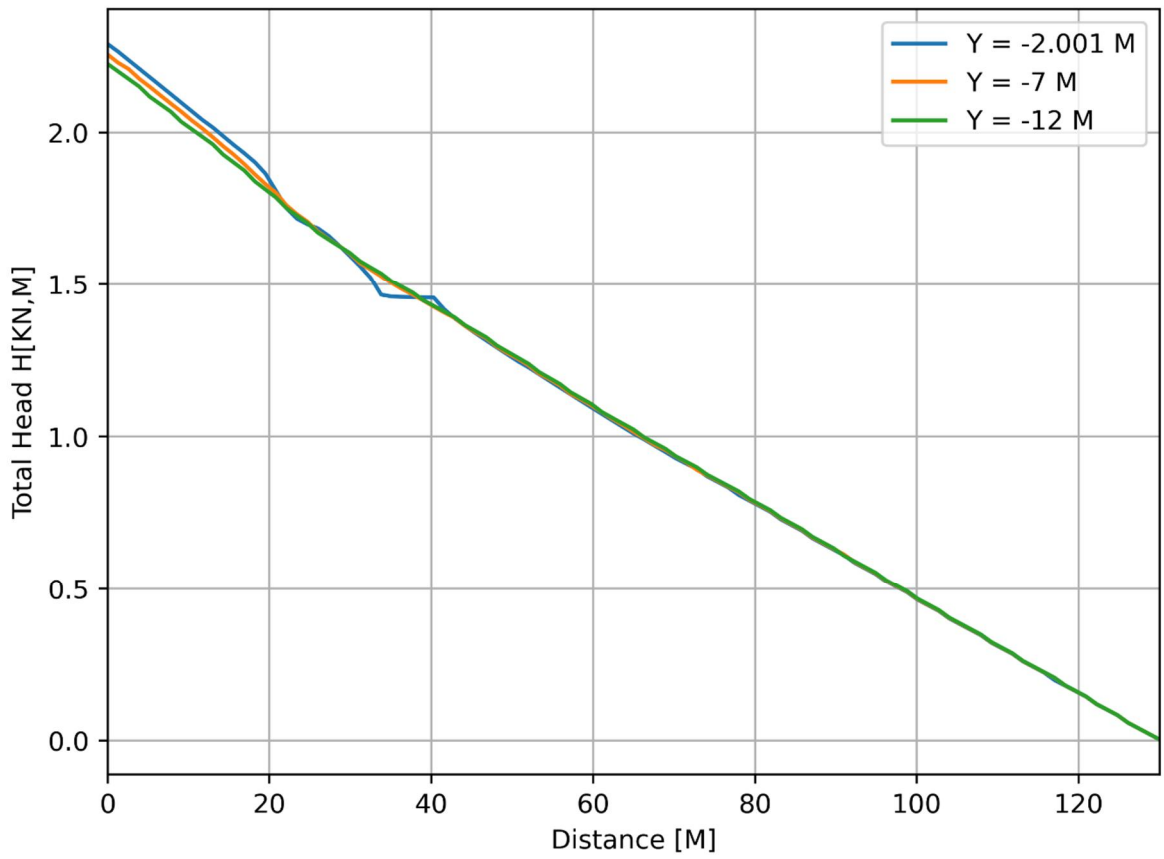


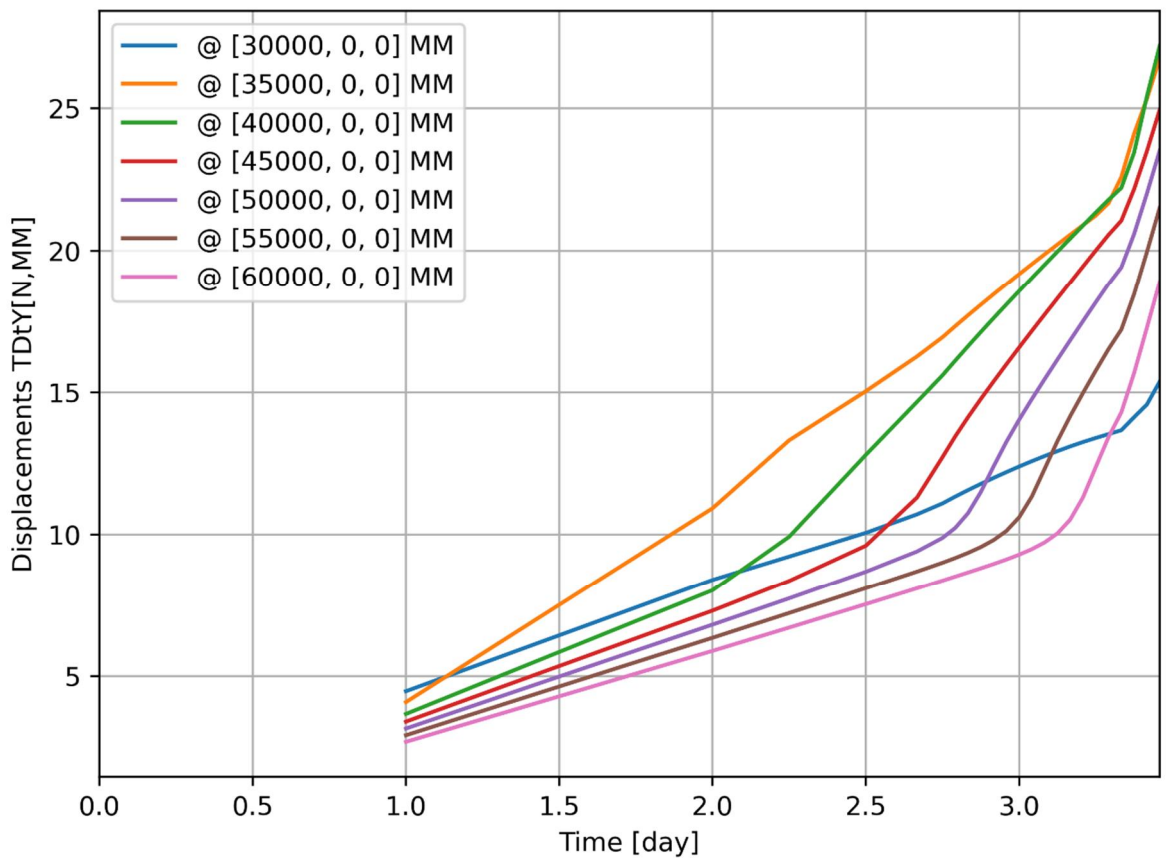
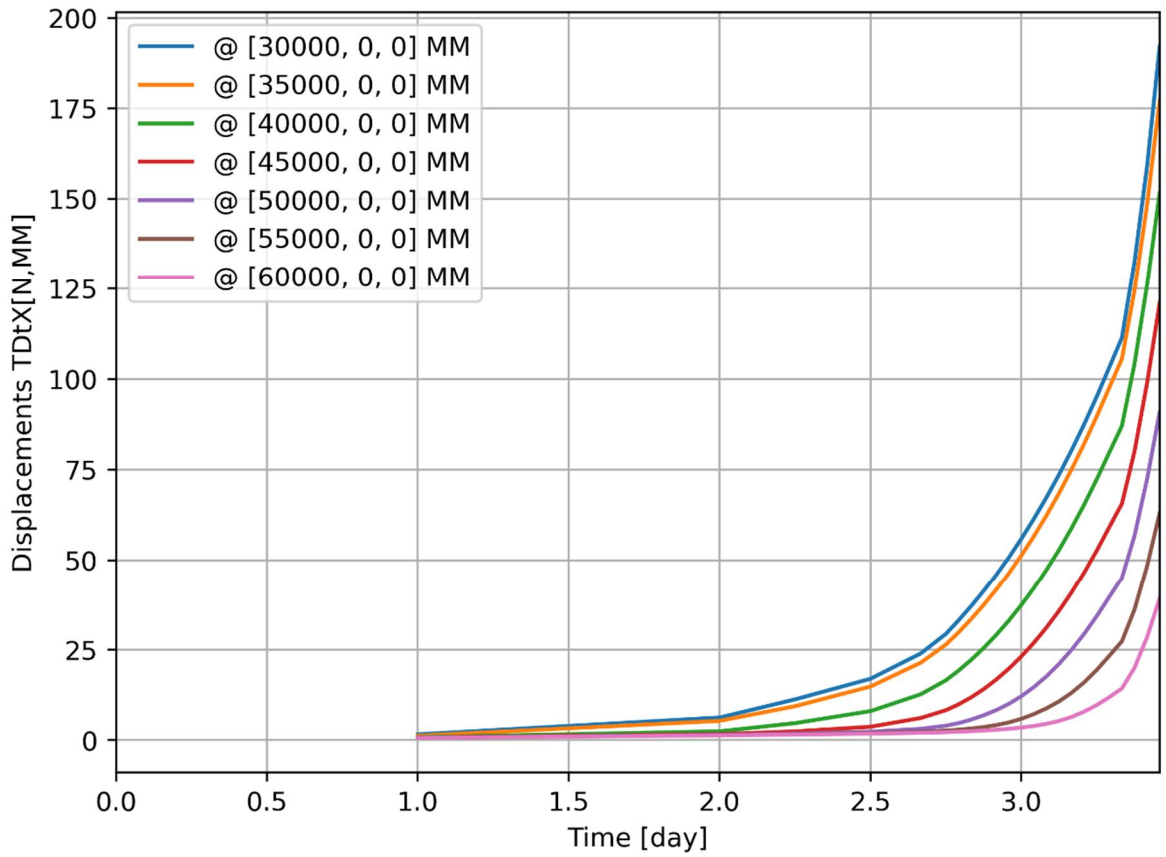
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.08kN/m<sup>2</sup> max: 24.42kN/m<sup>2</sup>

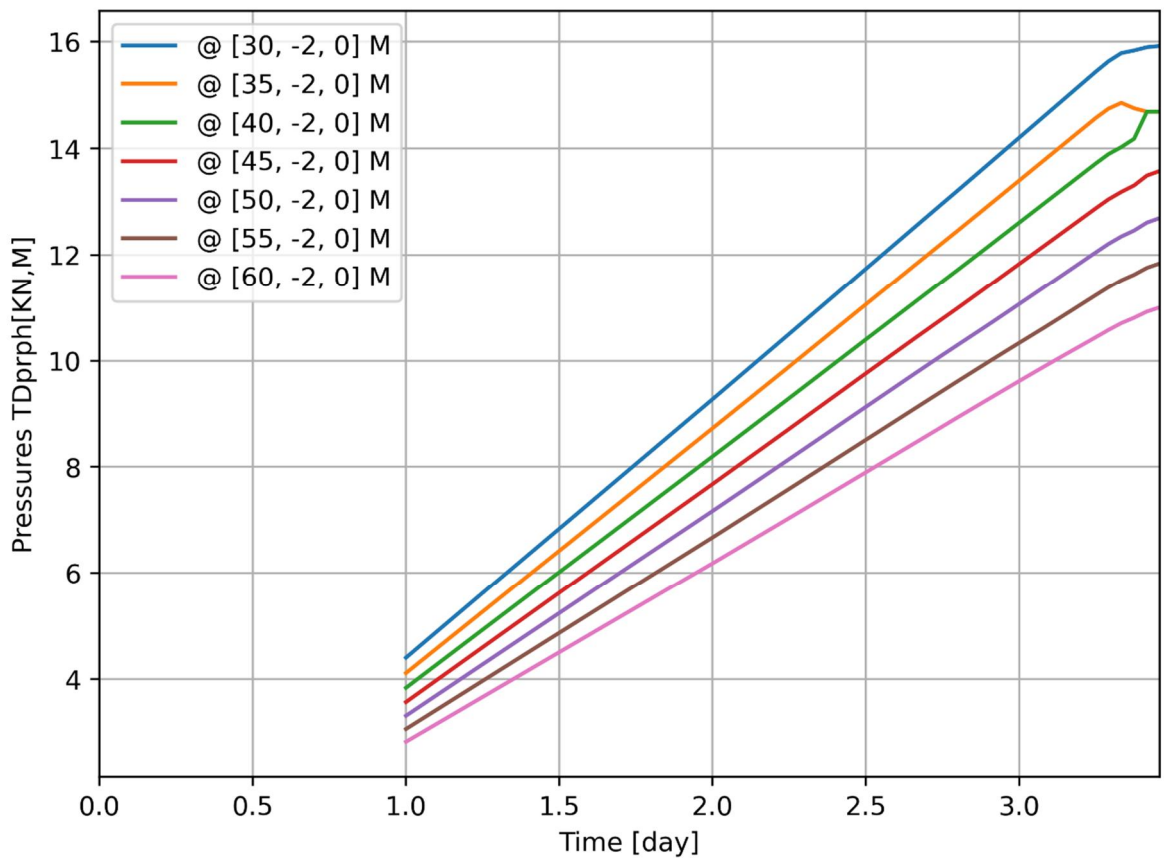
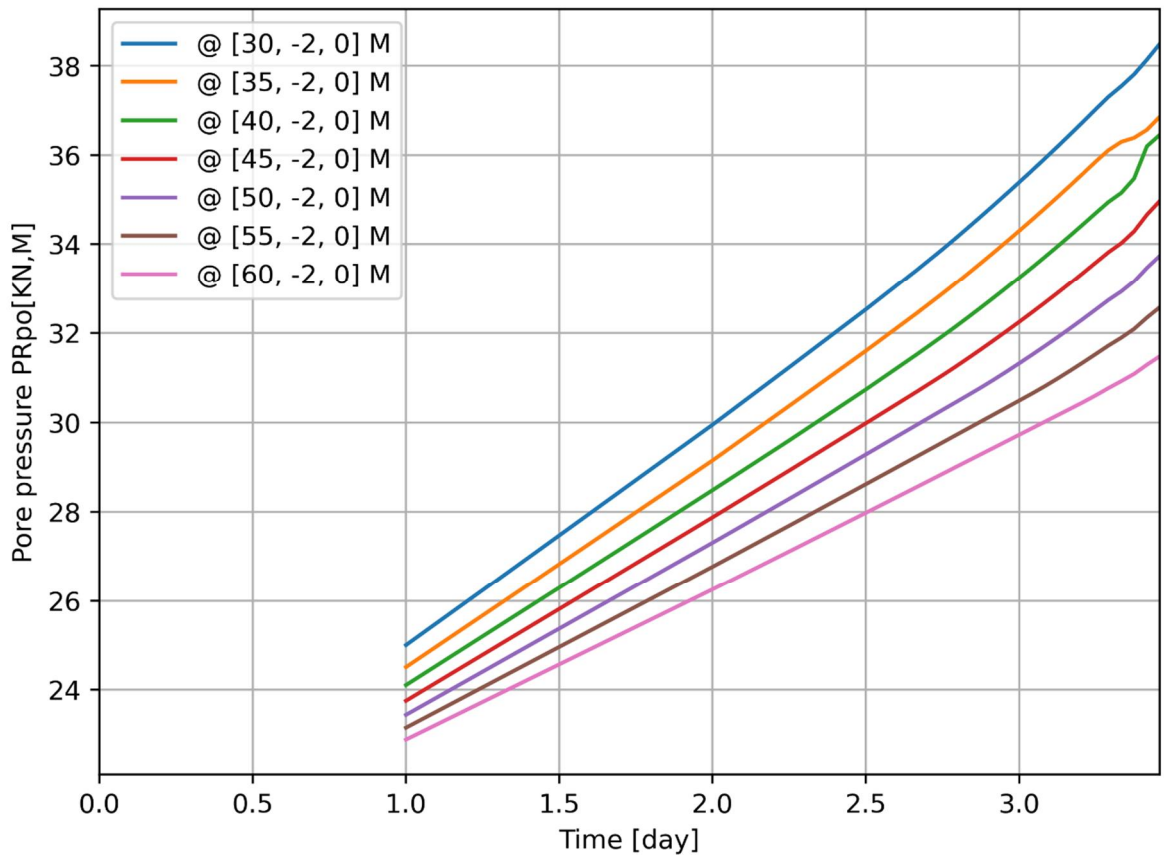


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-08\_20200818  
Phase 2, Time-step 29, Time 3 day 11 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -96.75kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

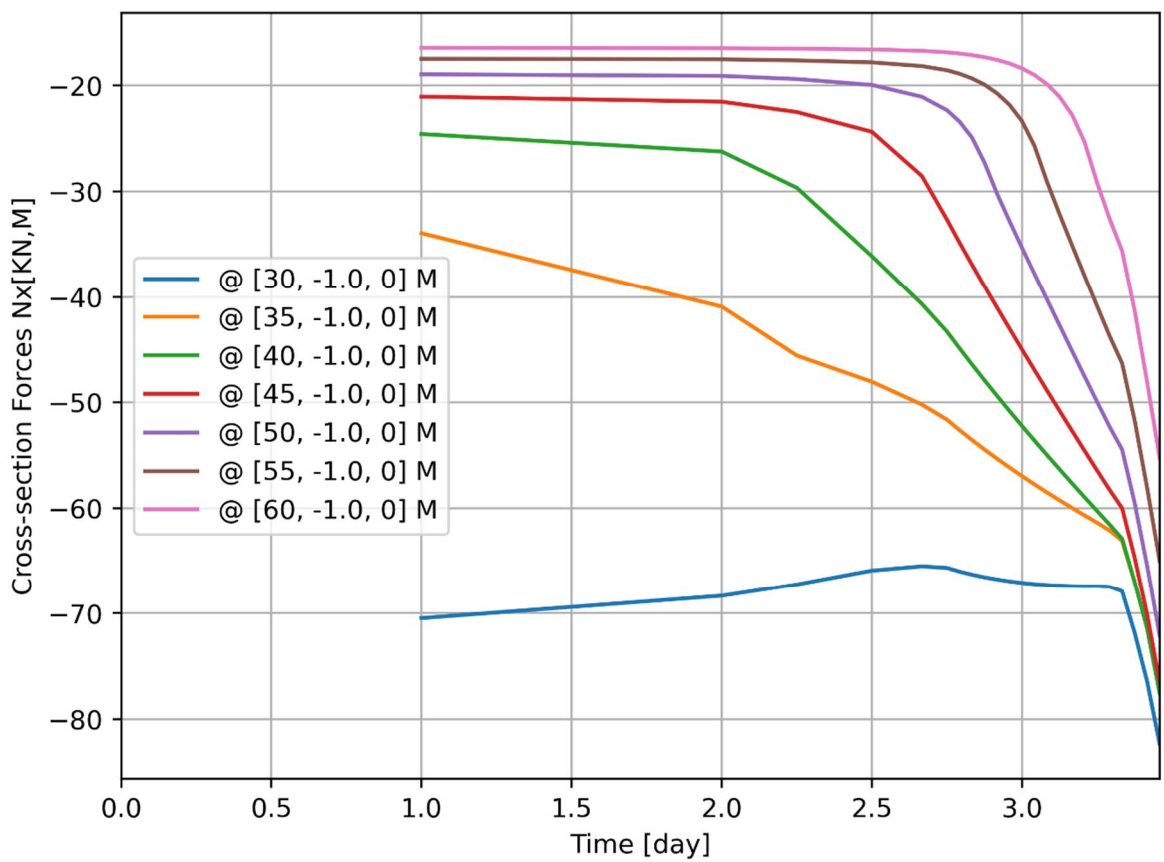
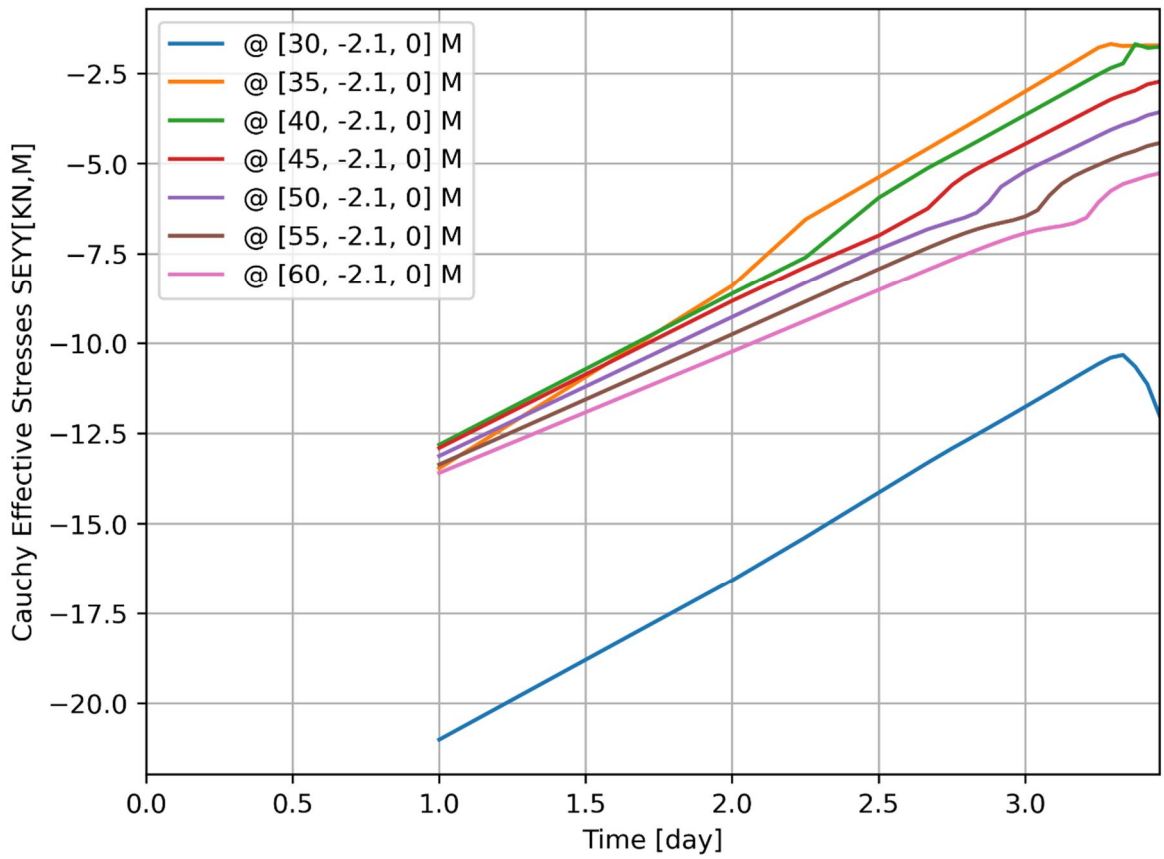


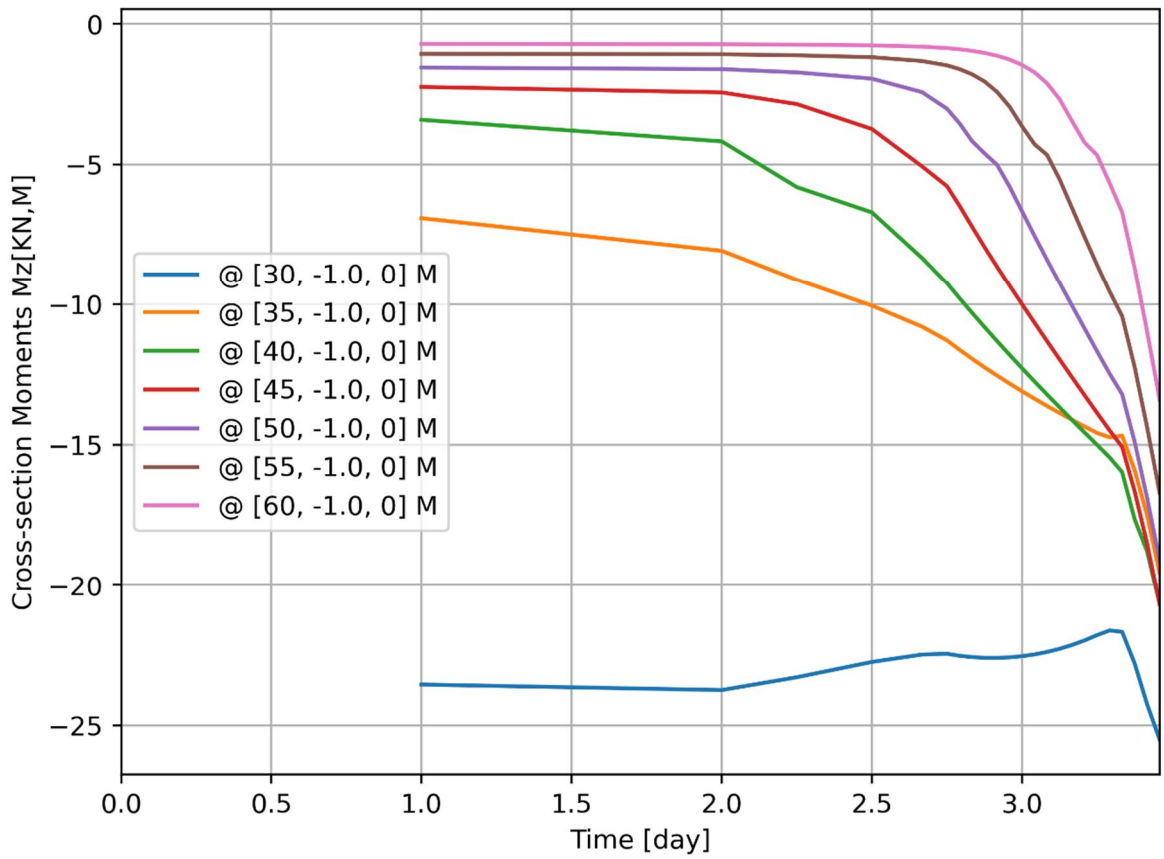








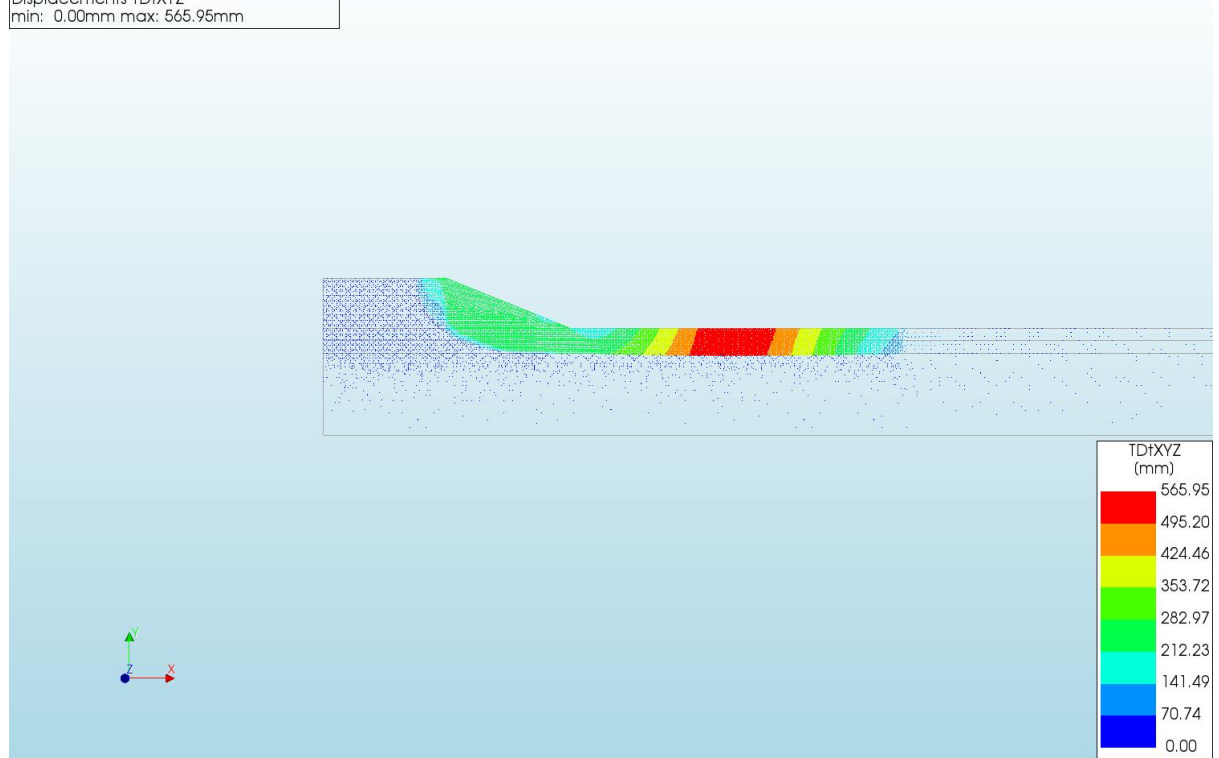




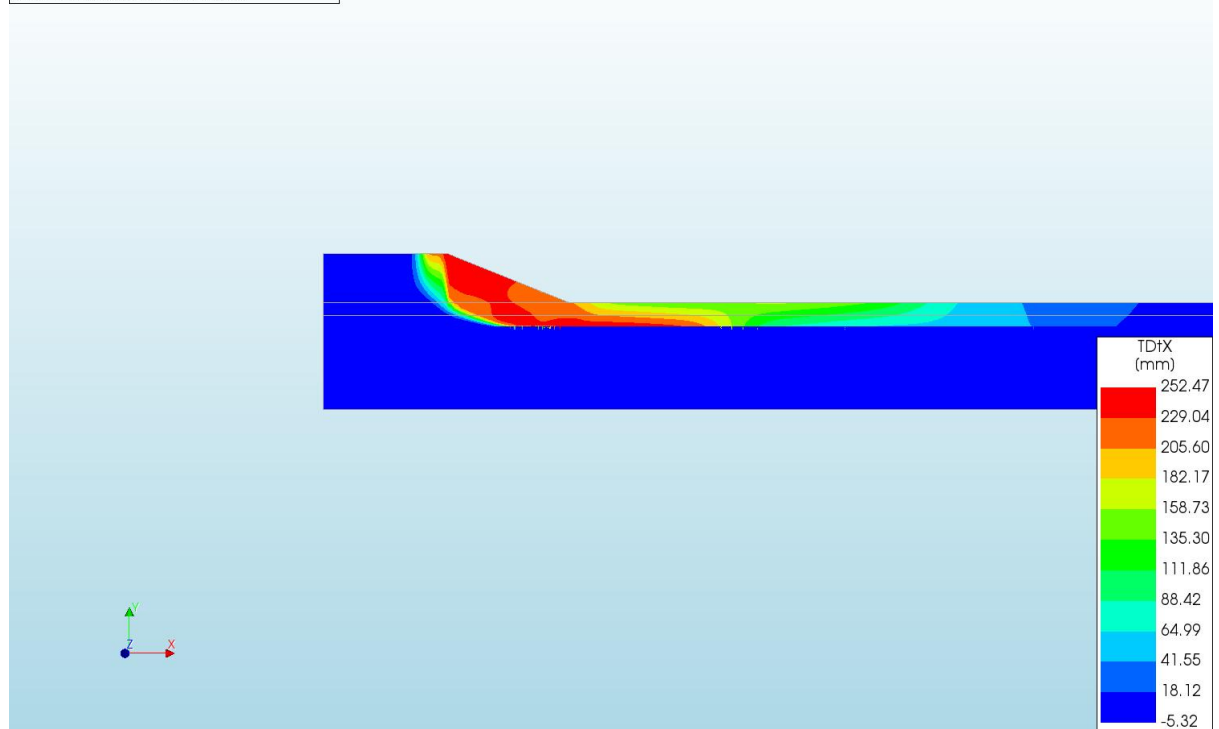
A.2.28

'Output d=3 c=18 E=3 k=1e-08 20200821'

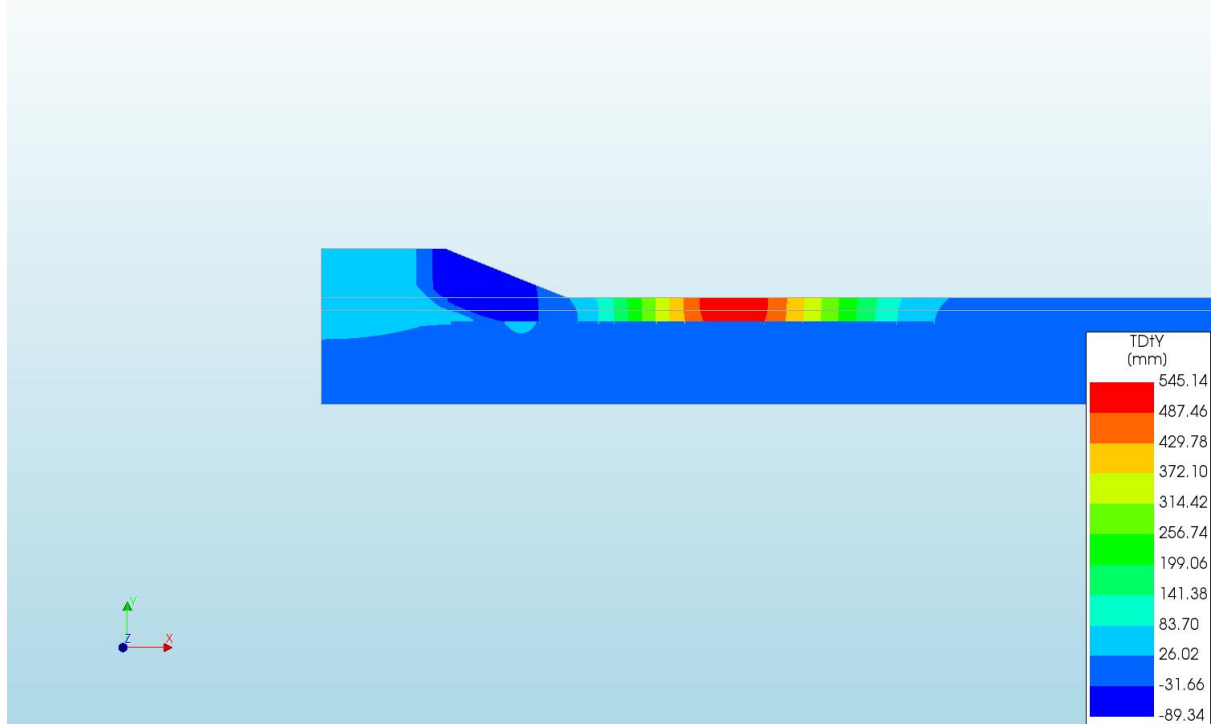
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Displacements TDiXYZ  
min: 0.00mm max: 565.95mm



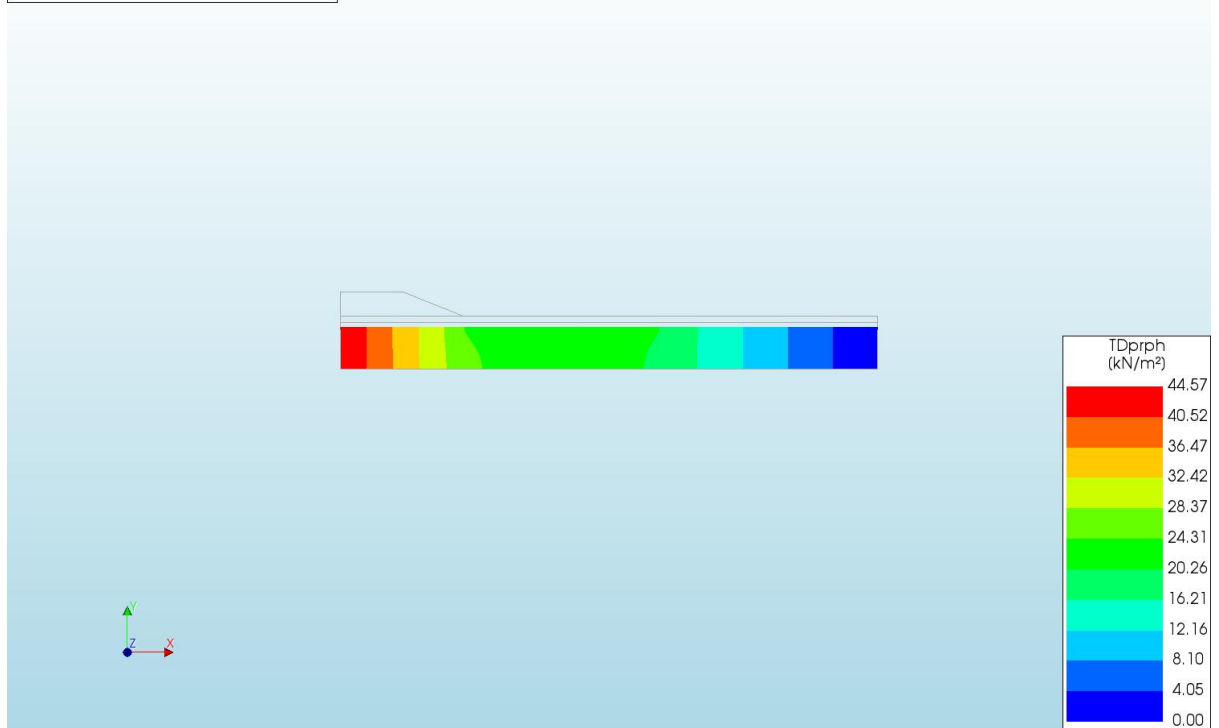
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Displacements TDtX  
min: -5.32mm max: 252.47mm



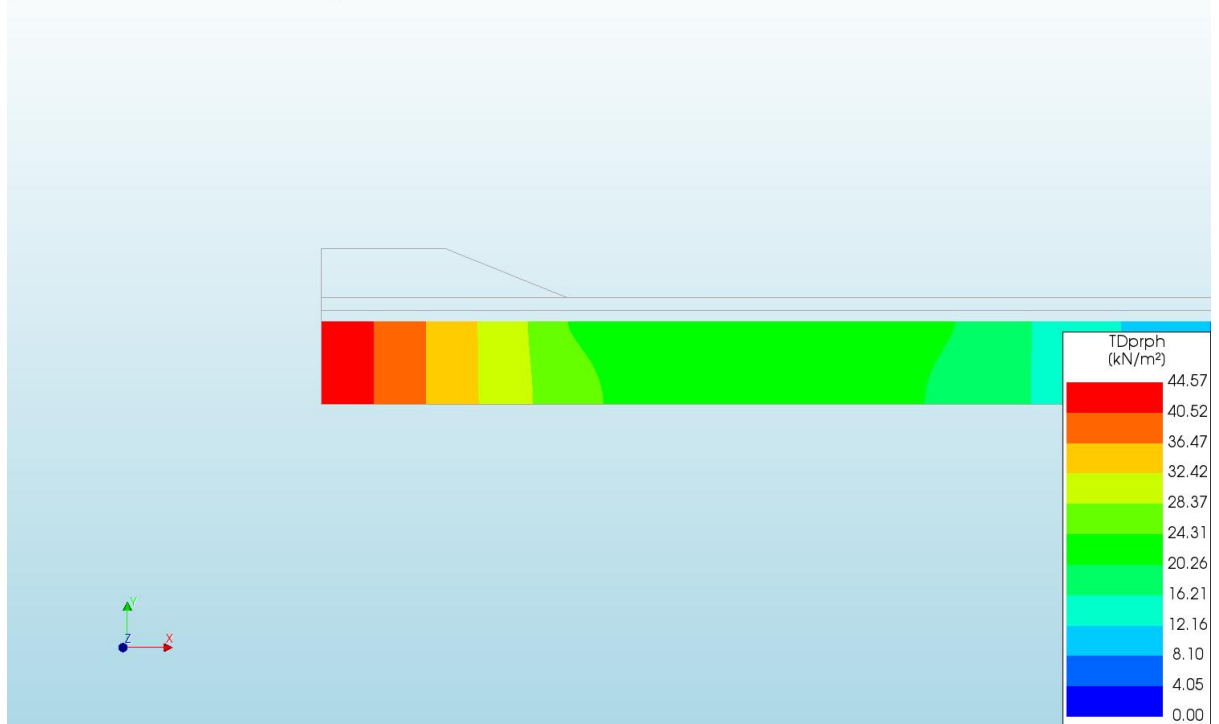
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Displacements TDtY  
min: -89.34mm max: 545.14mm



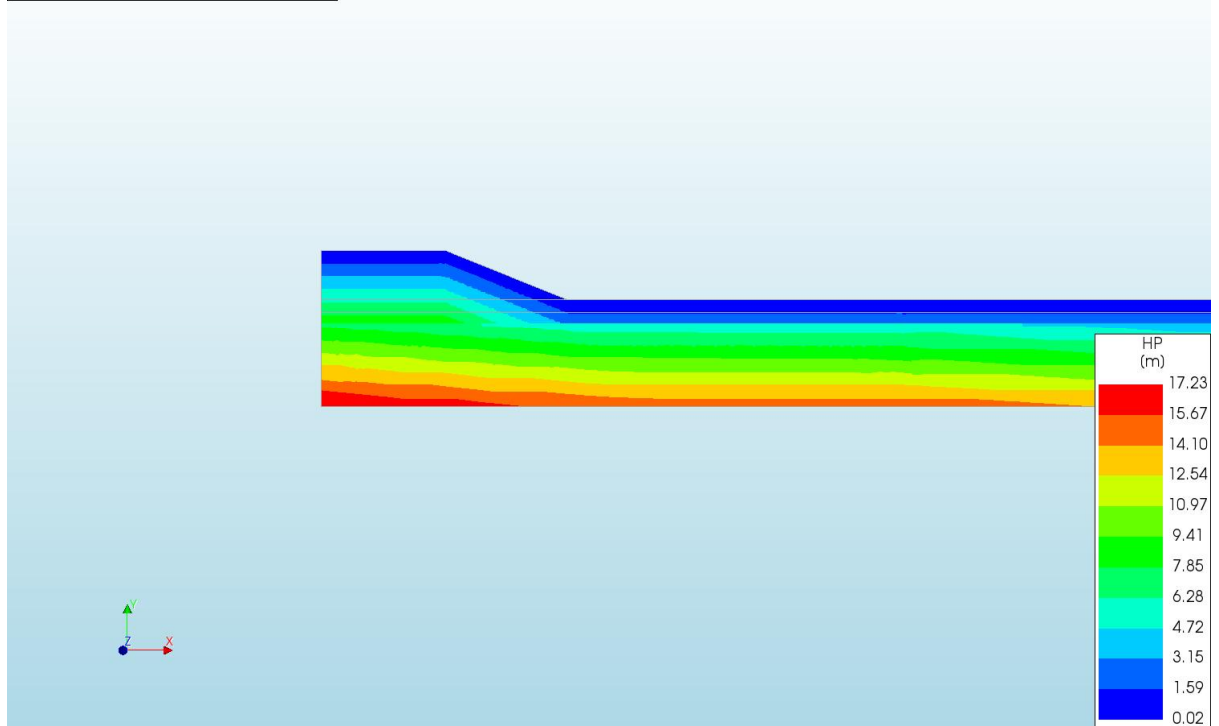
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 44.57kN/m<sup>2</sup>



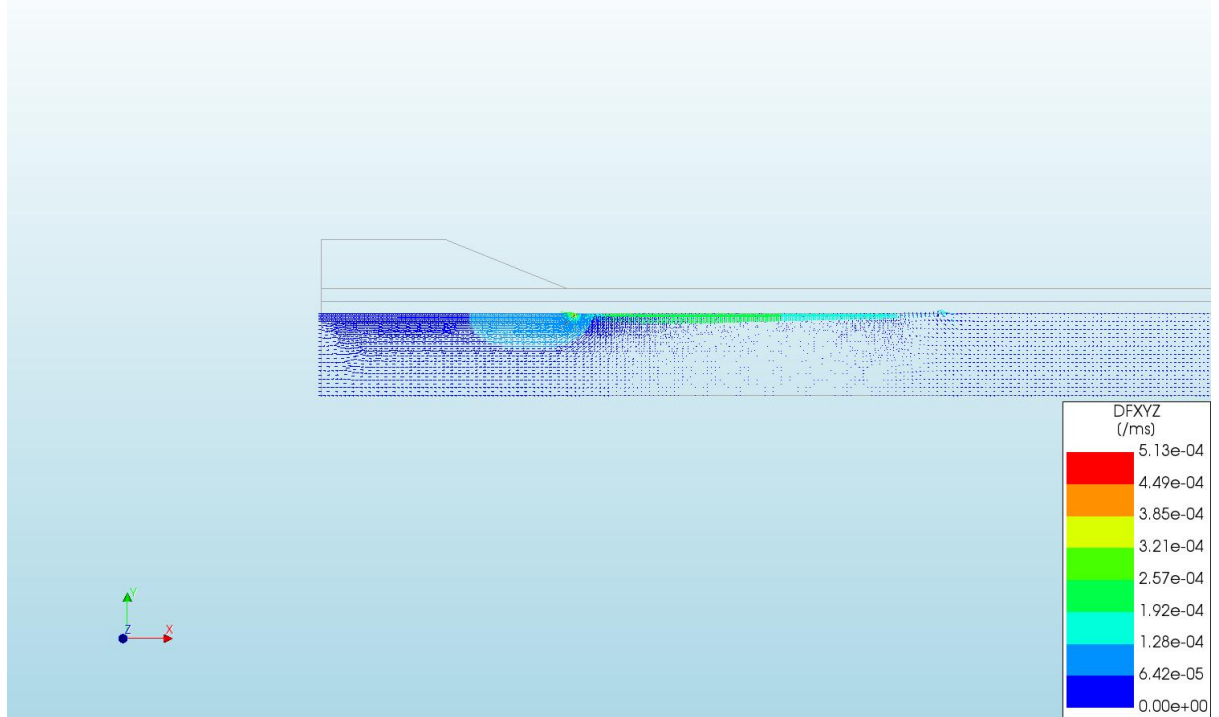
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 44.57kN/m<sup>2</sup>



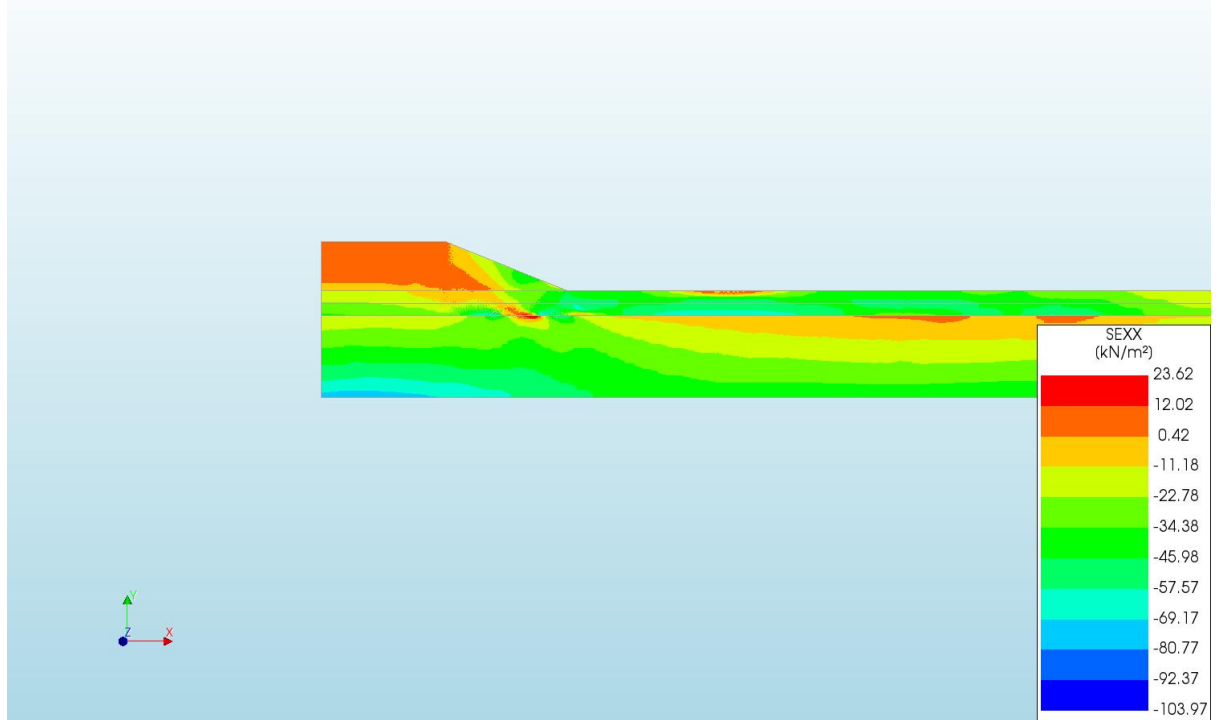
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 17.23m



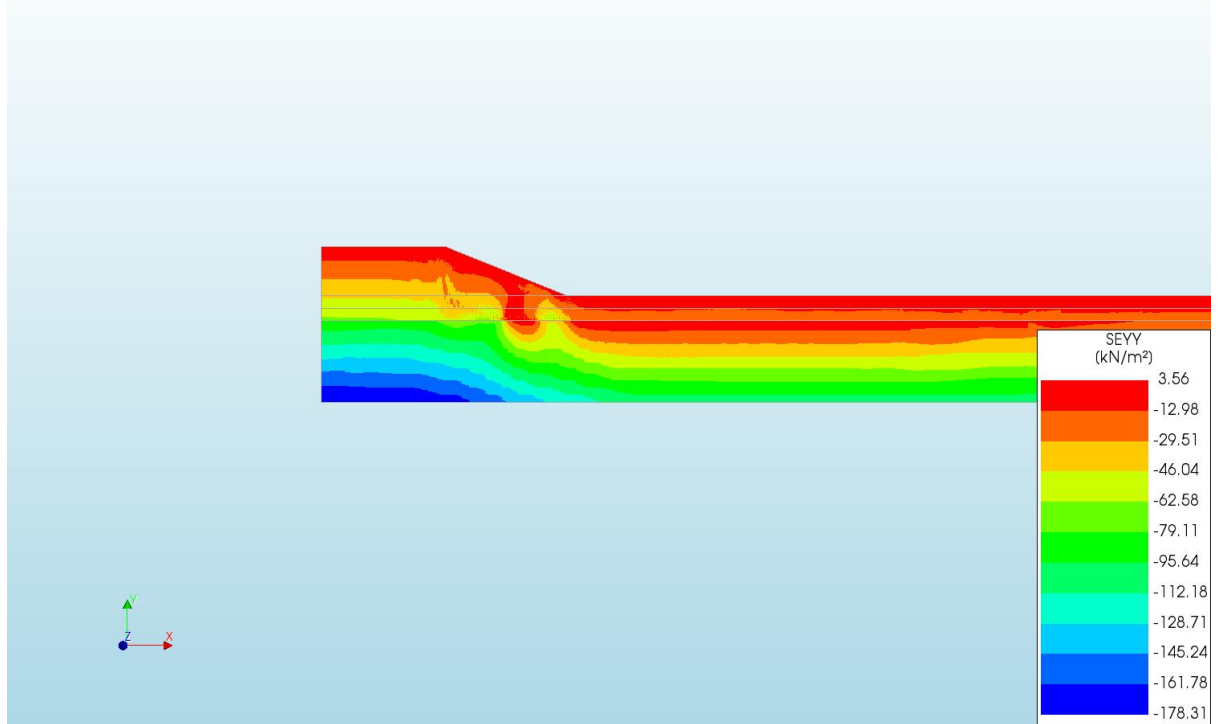
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 5.13e-04/ms



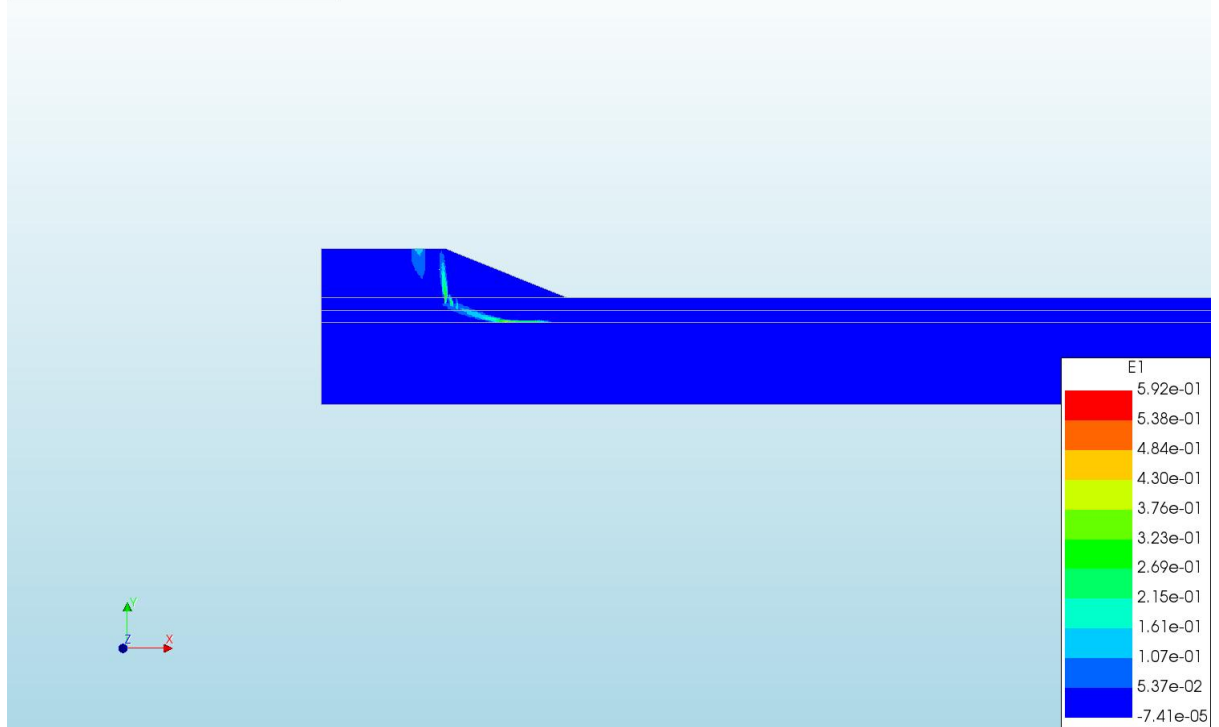
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -103.97kN/m<sup>2</sup> max: 23.62kN/m<sup>2</sup>



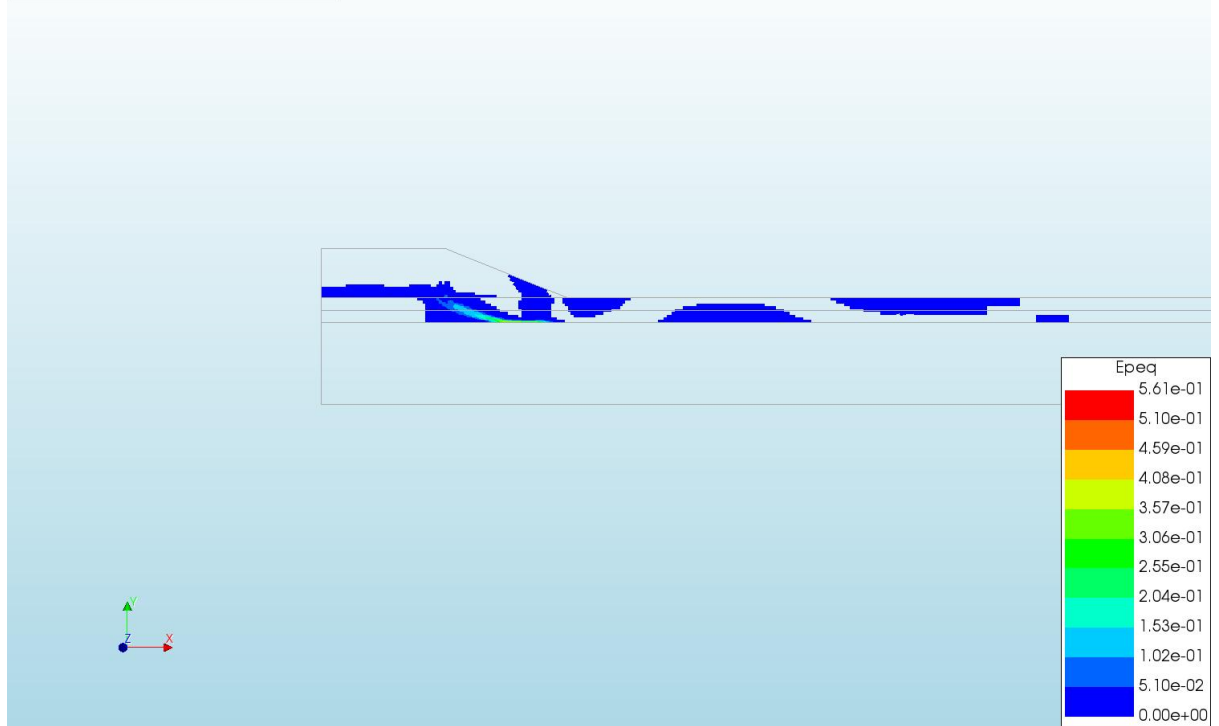
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -178,31kN/m<sup>2</sup> max: 3,56kN/m<sup>2</sup>



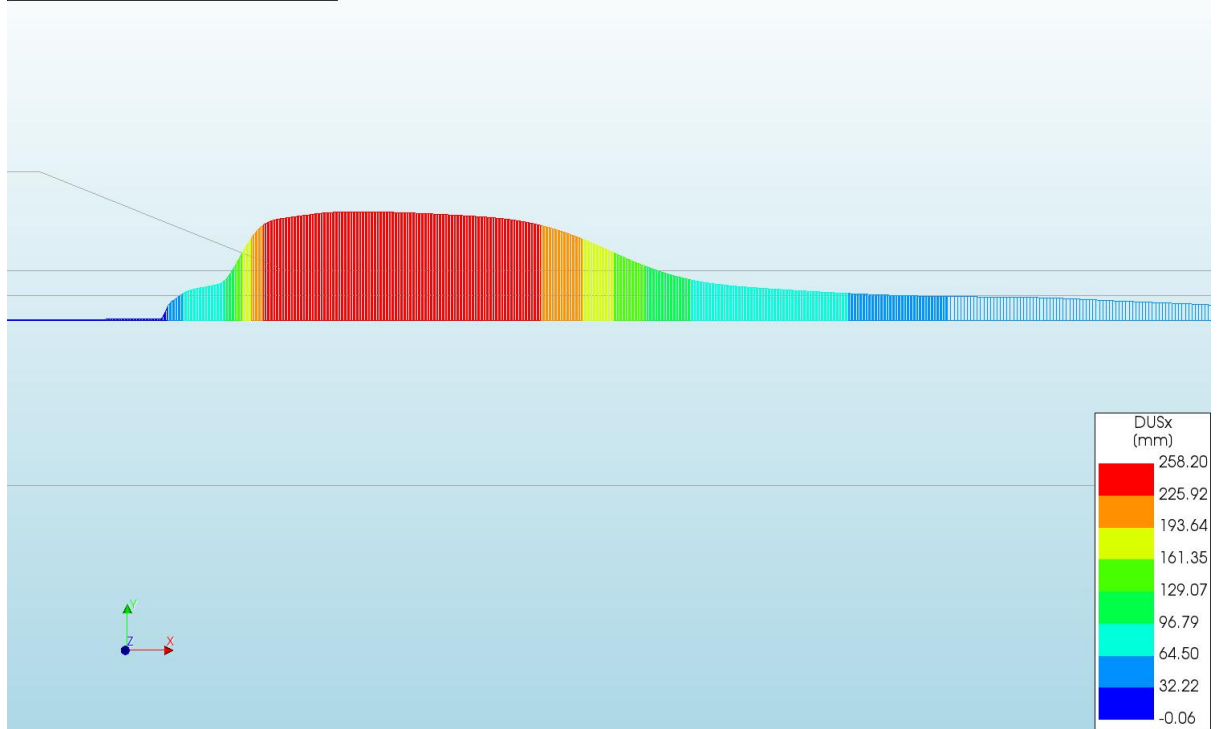
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Total Strains E1  
min: -7,41e-05 max: 5,92e-01



d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.61e-01

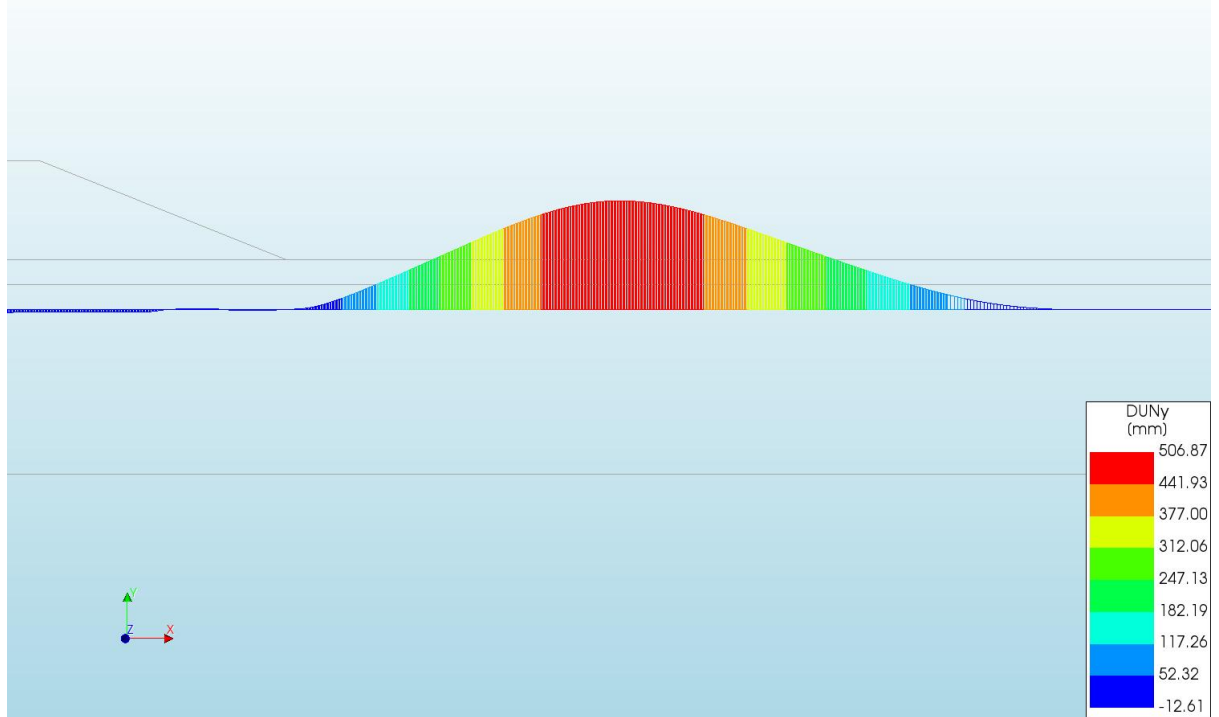


d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.06mm max: 258.20mm





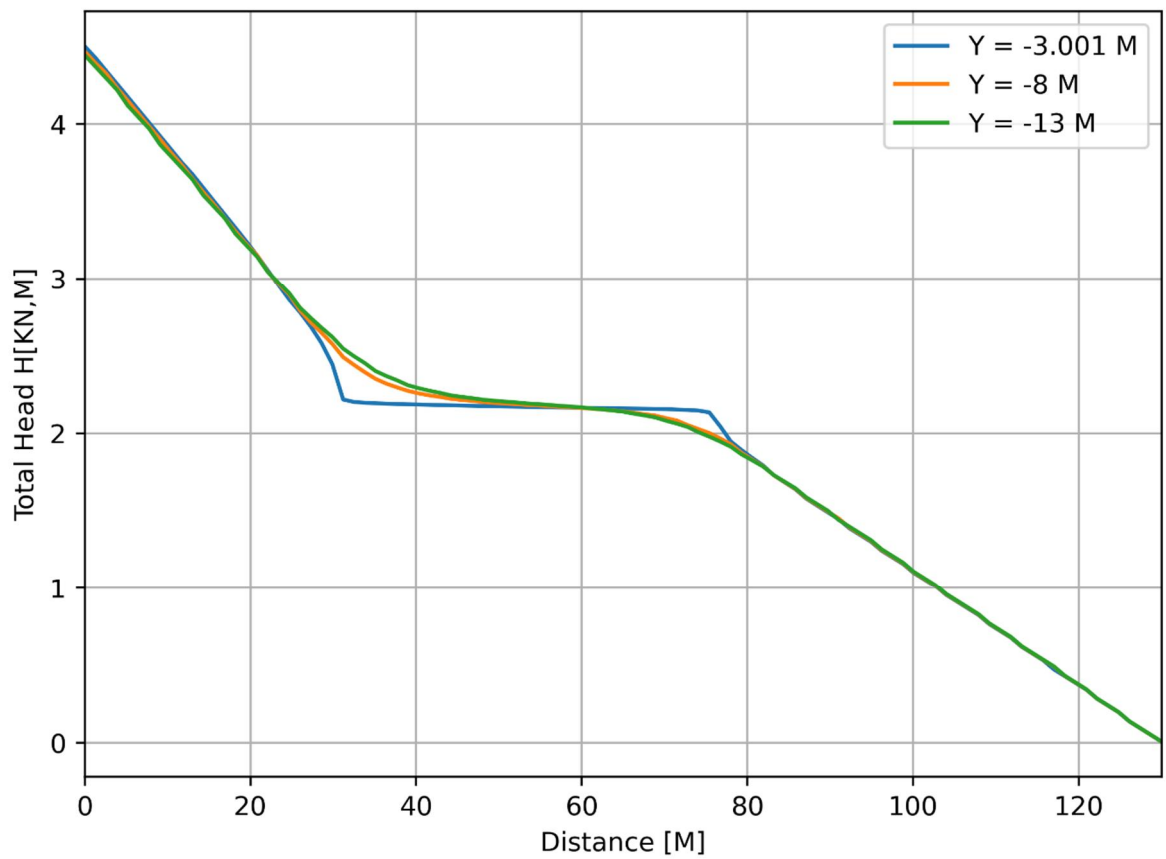
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -12.61mm max: 506.87mm

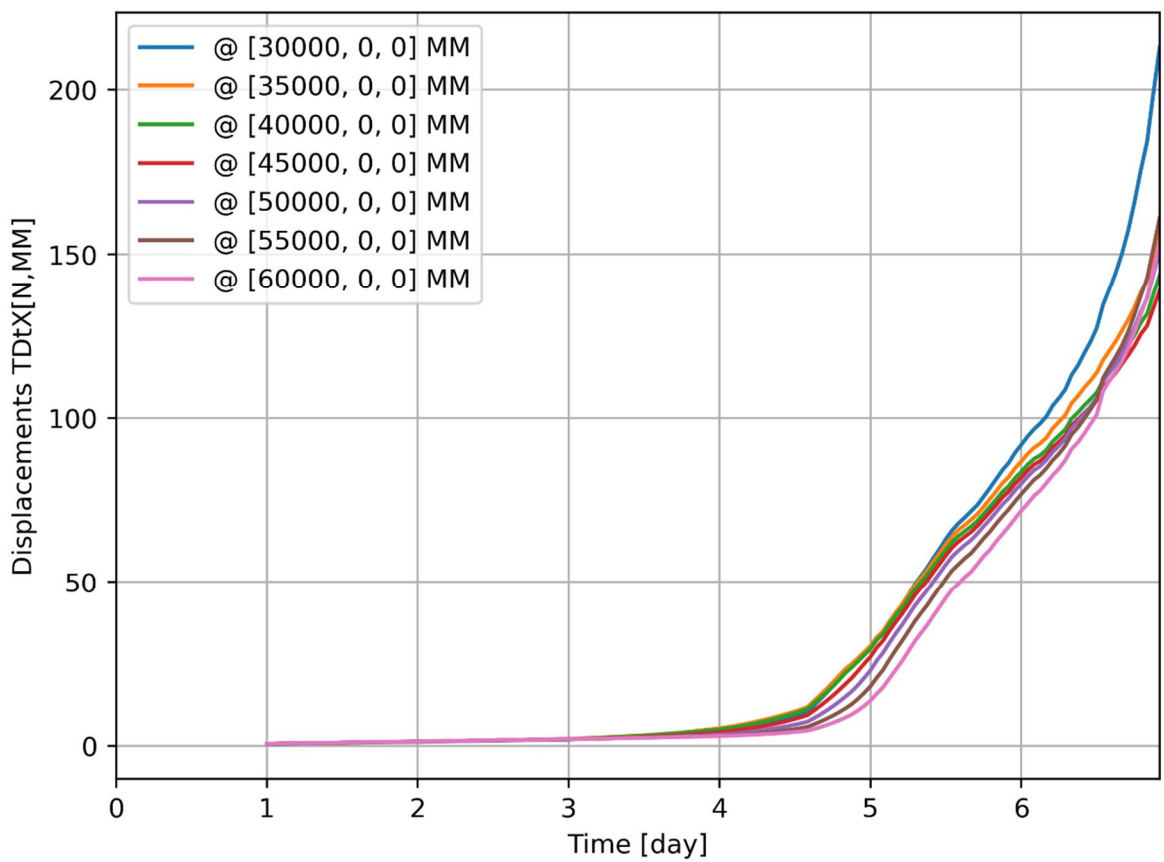
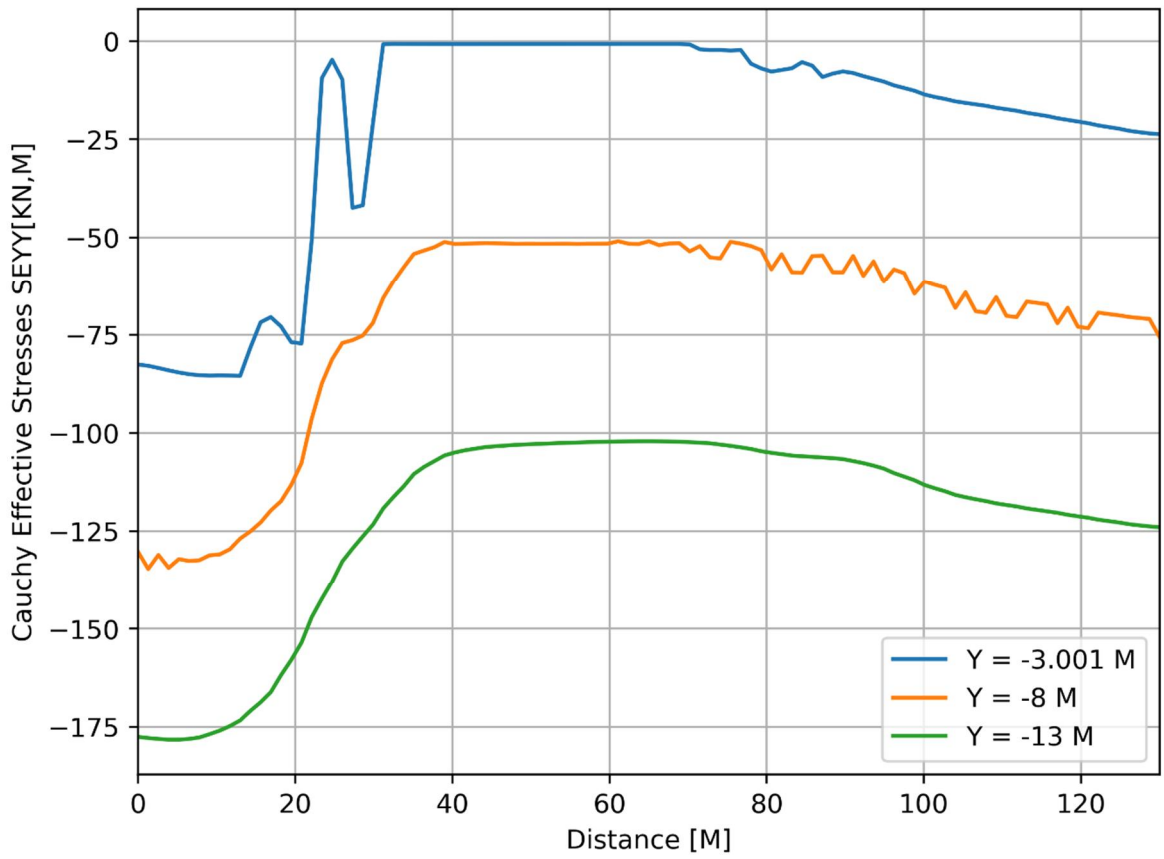


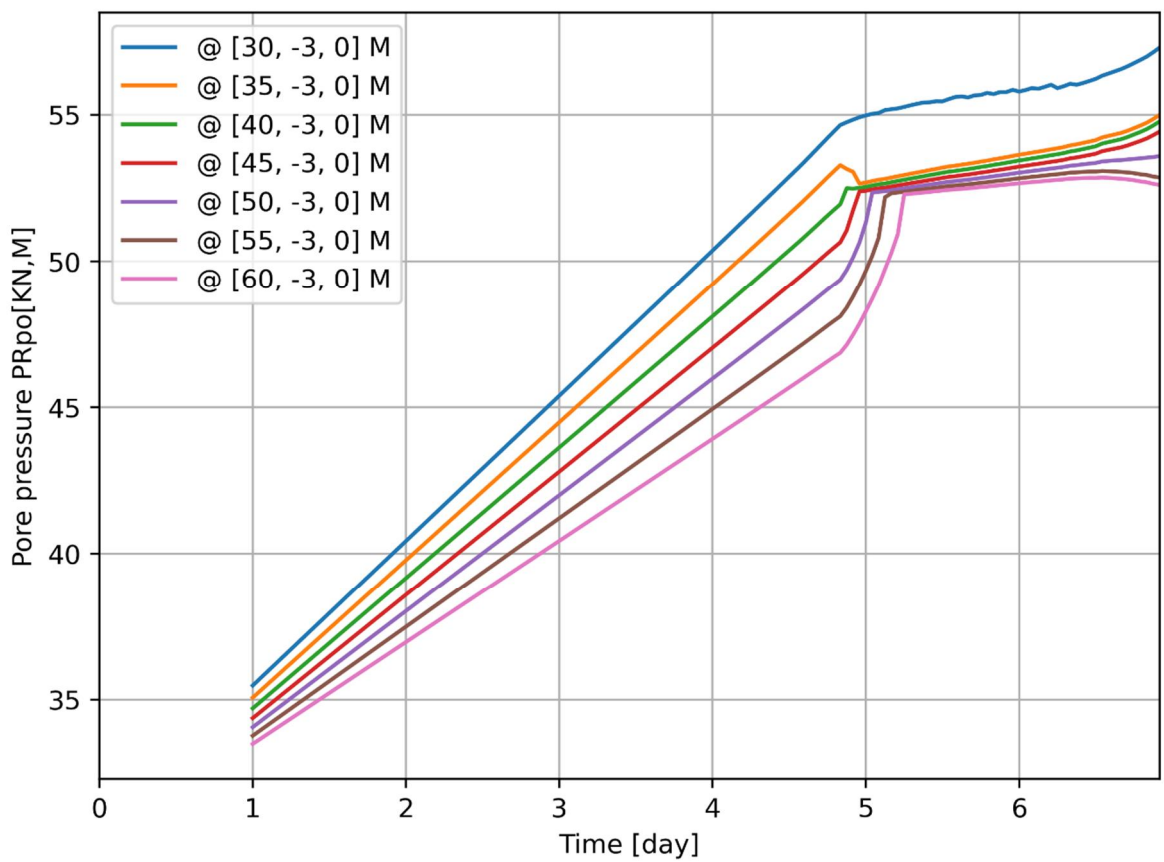
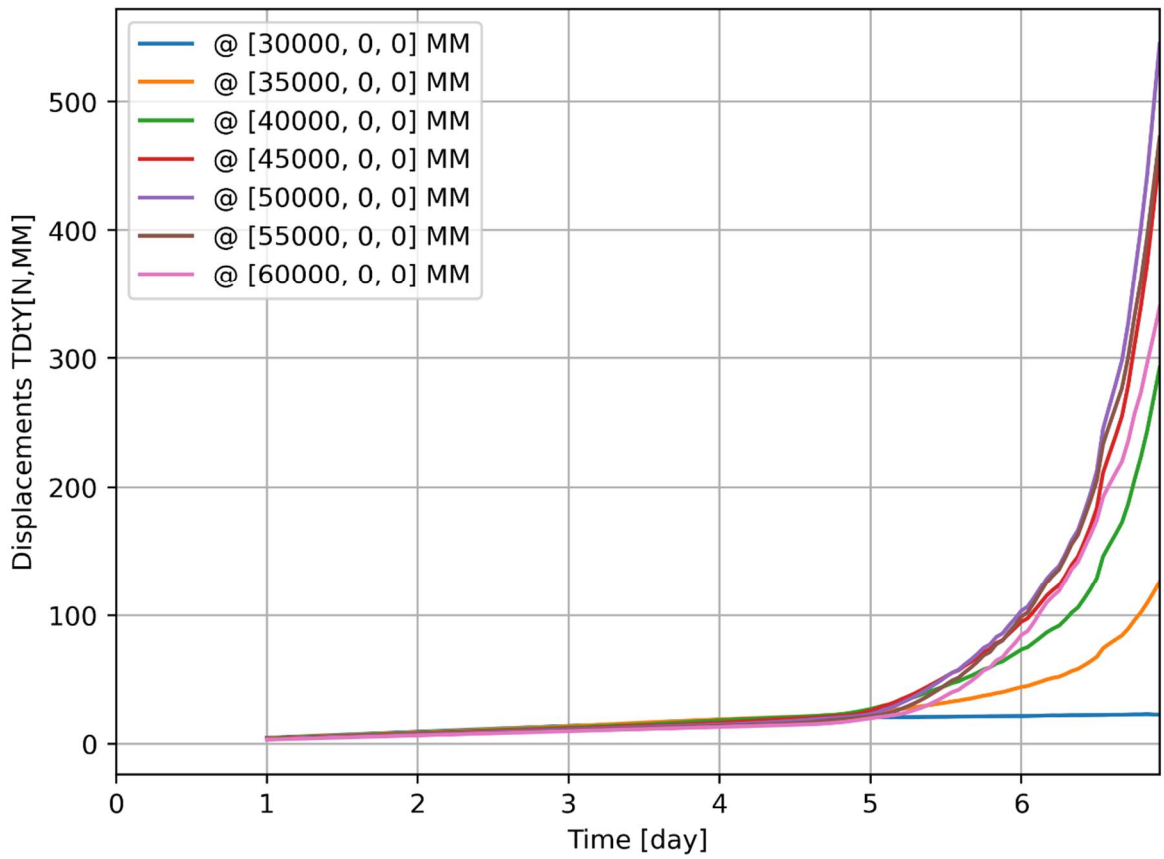
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -3.48kN/m<sup>2</sup> max: 28.04kN/m<sup>2</sup>

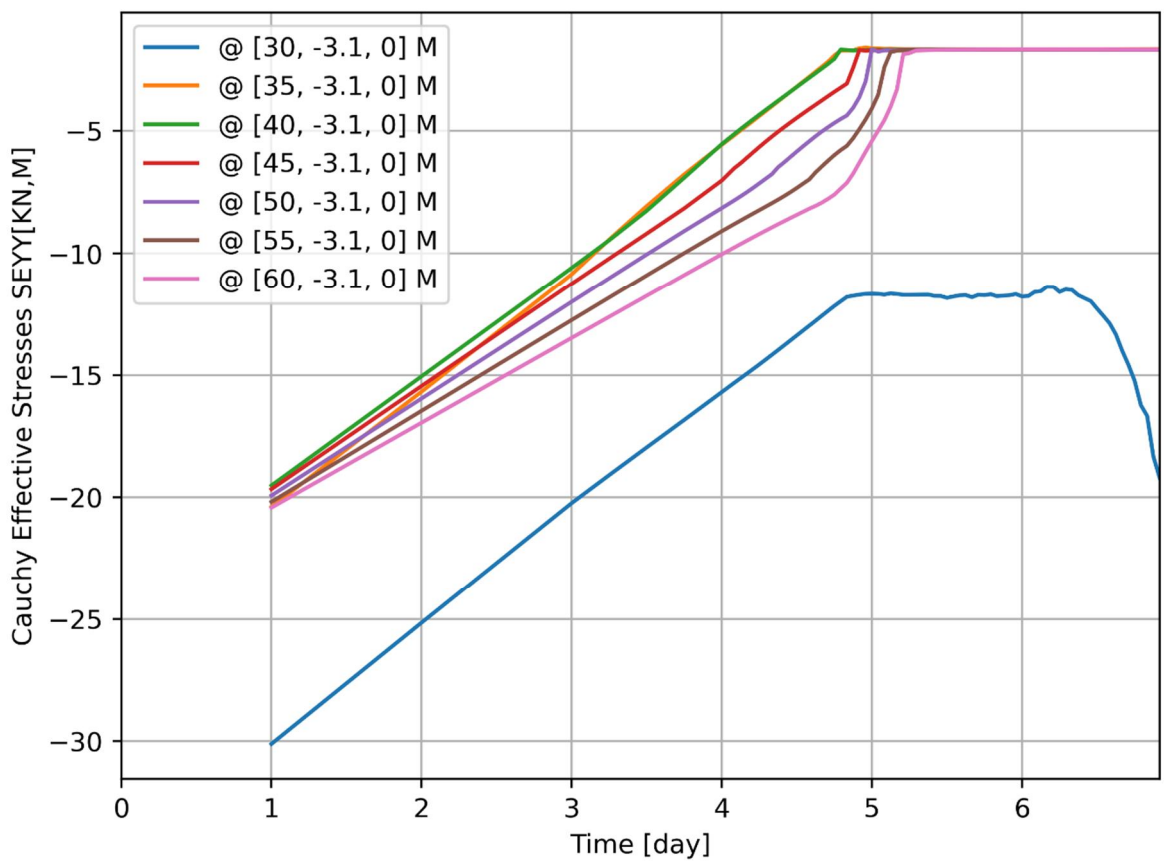
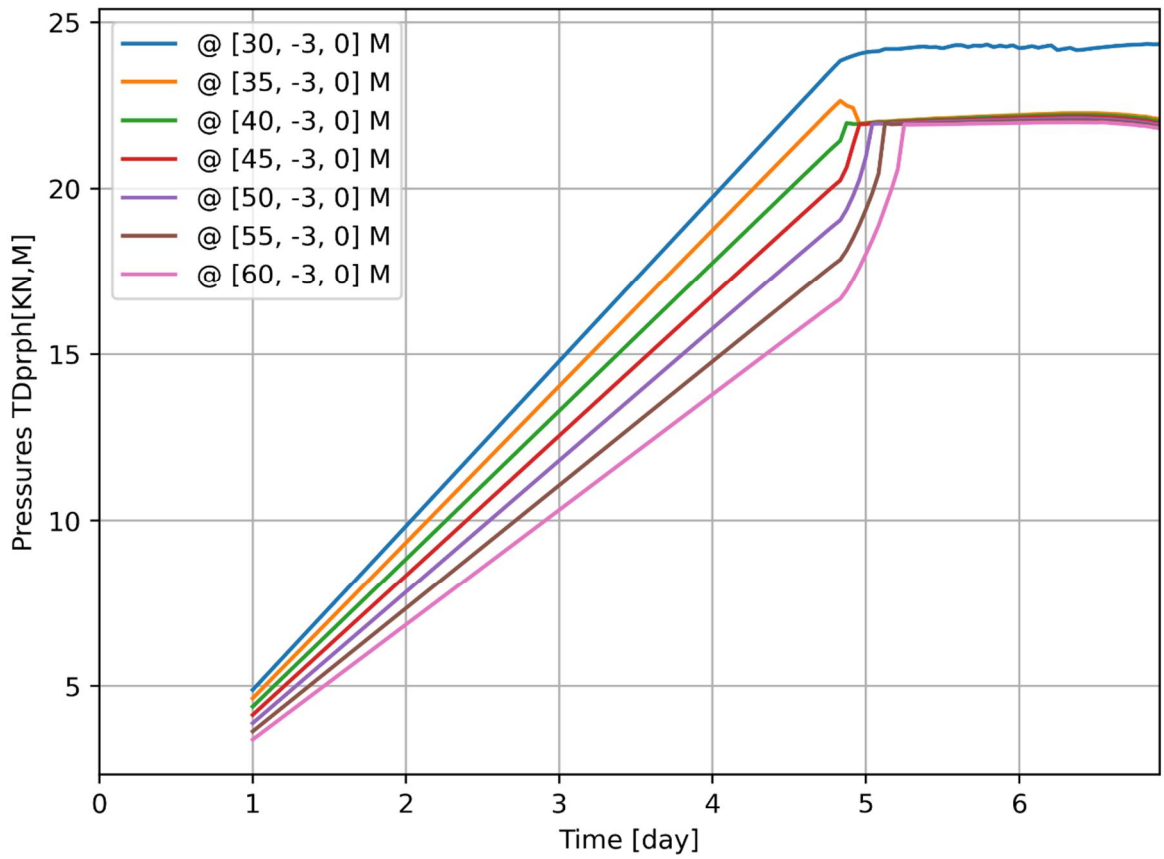


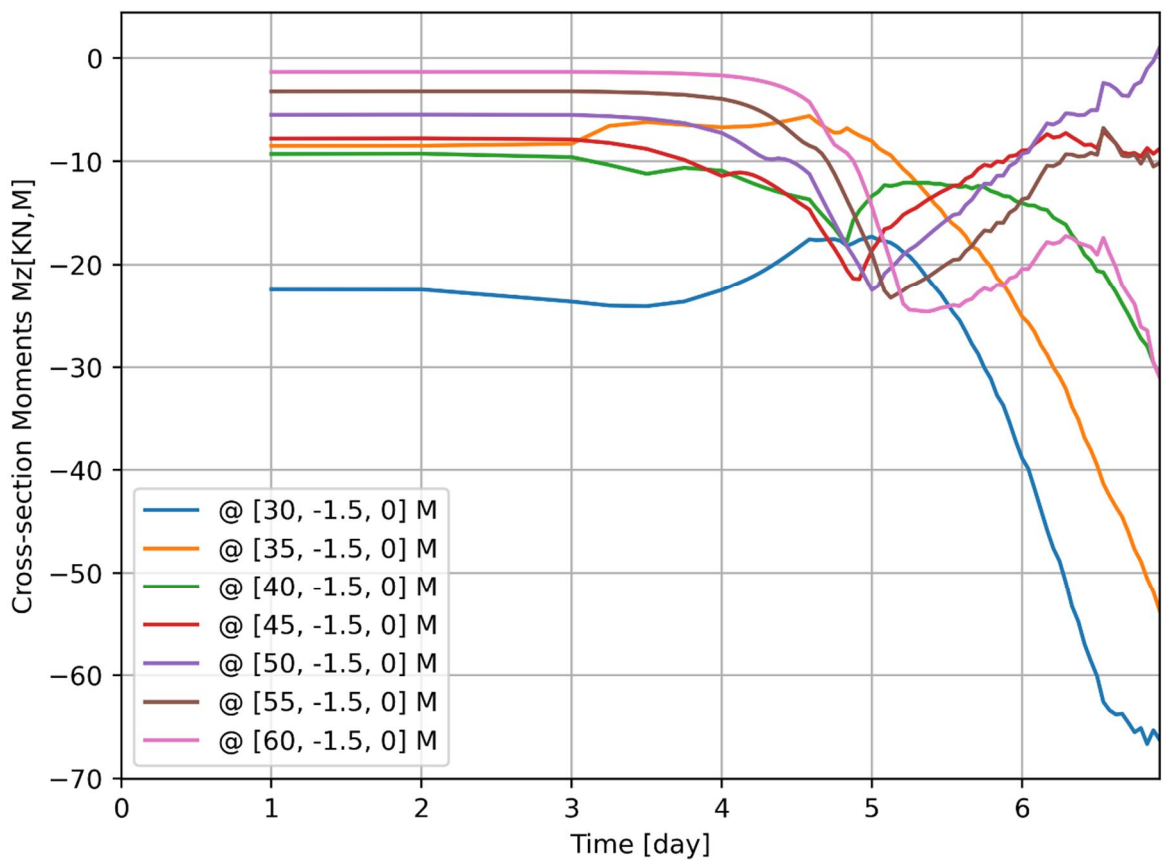
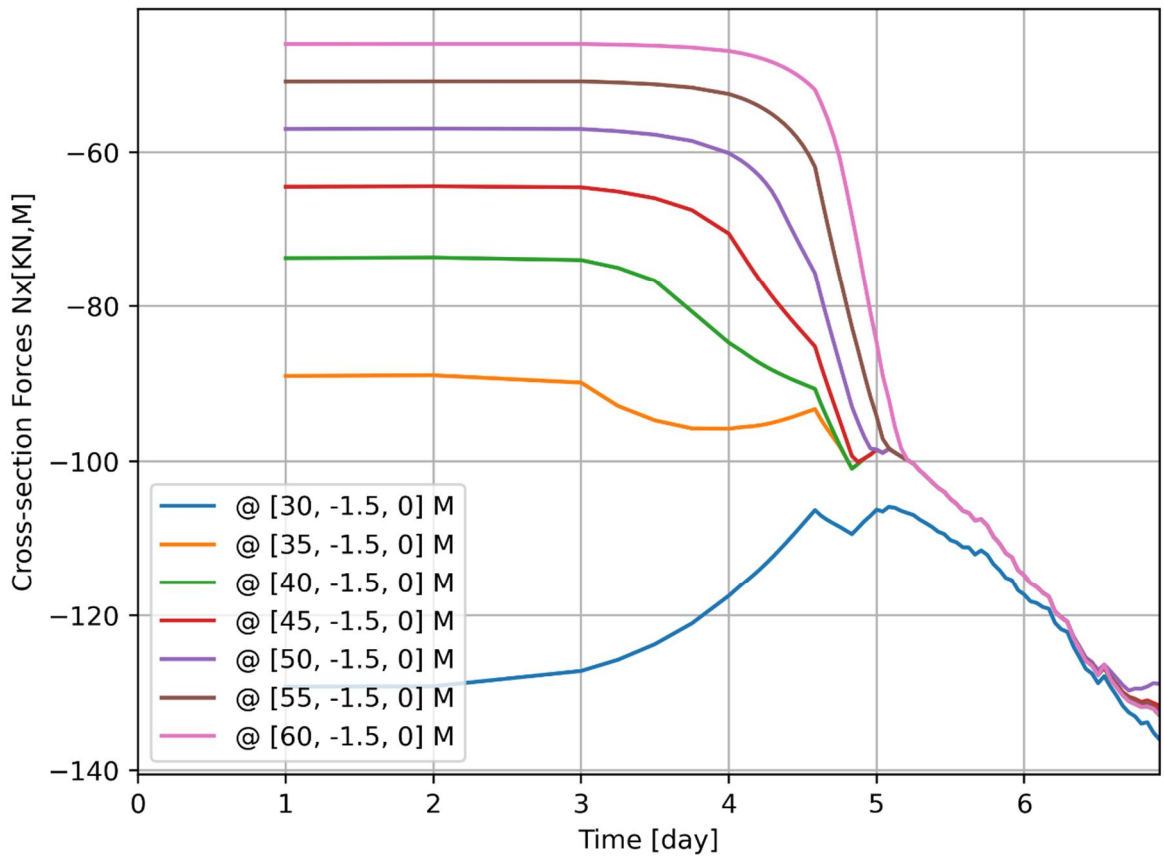
d=3\_c=18\_E=10\_k=1e-07\_20200821  
Phase 2, Time-step 82, Time 6 day 22 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -85.06kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







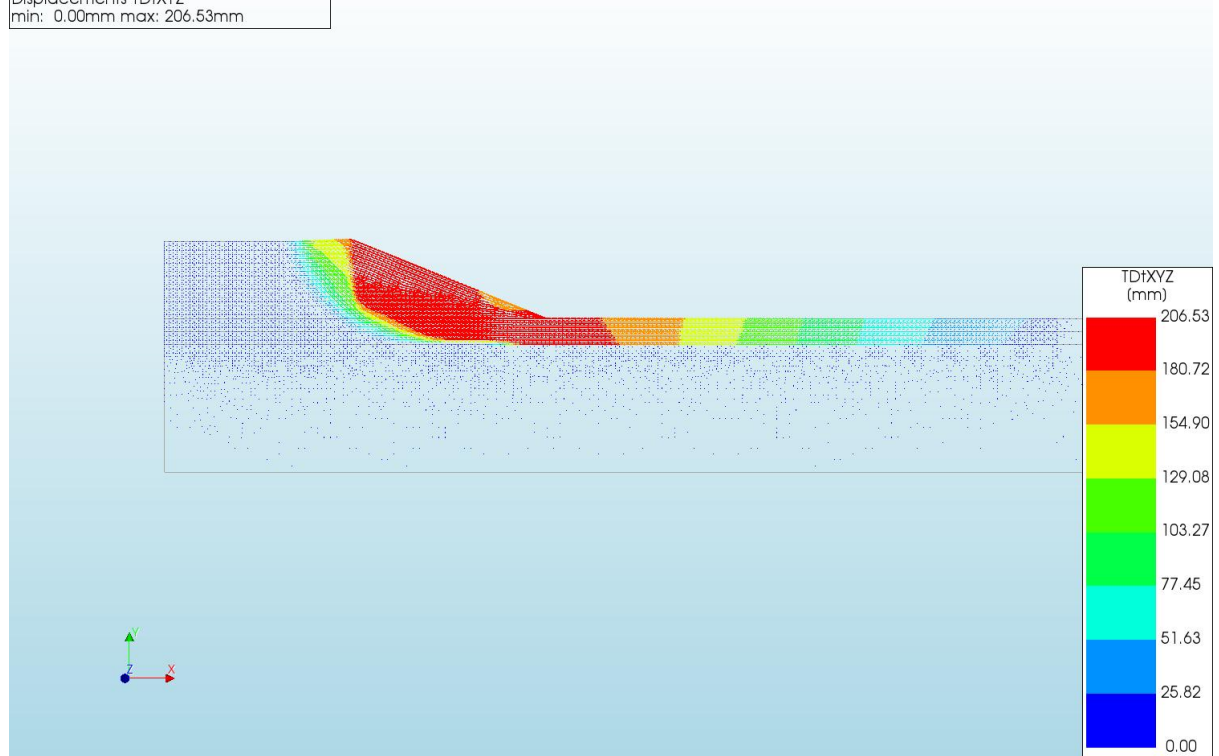




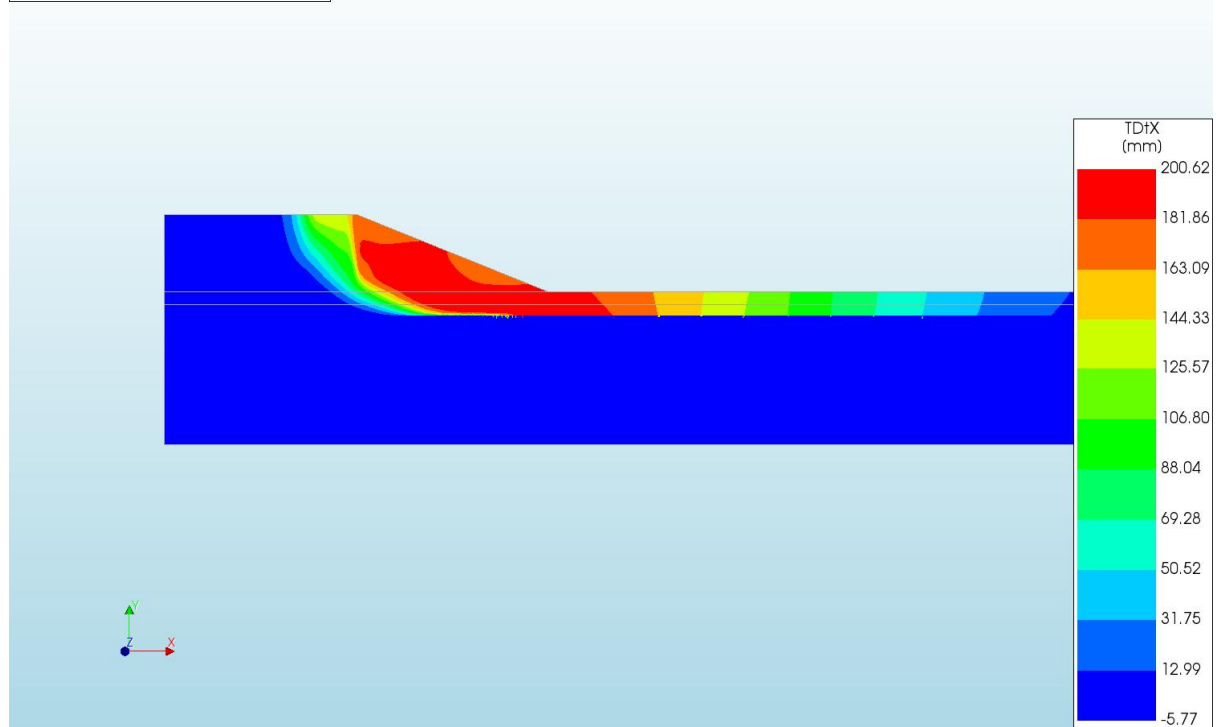
A.2.29

'Output\_d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818'

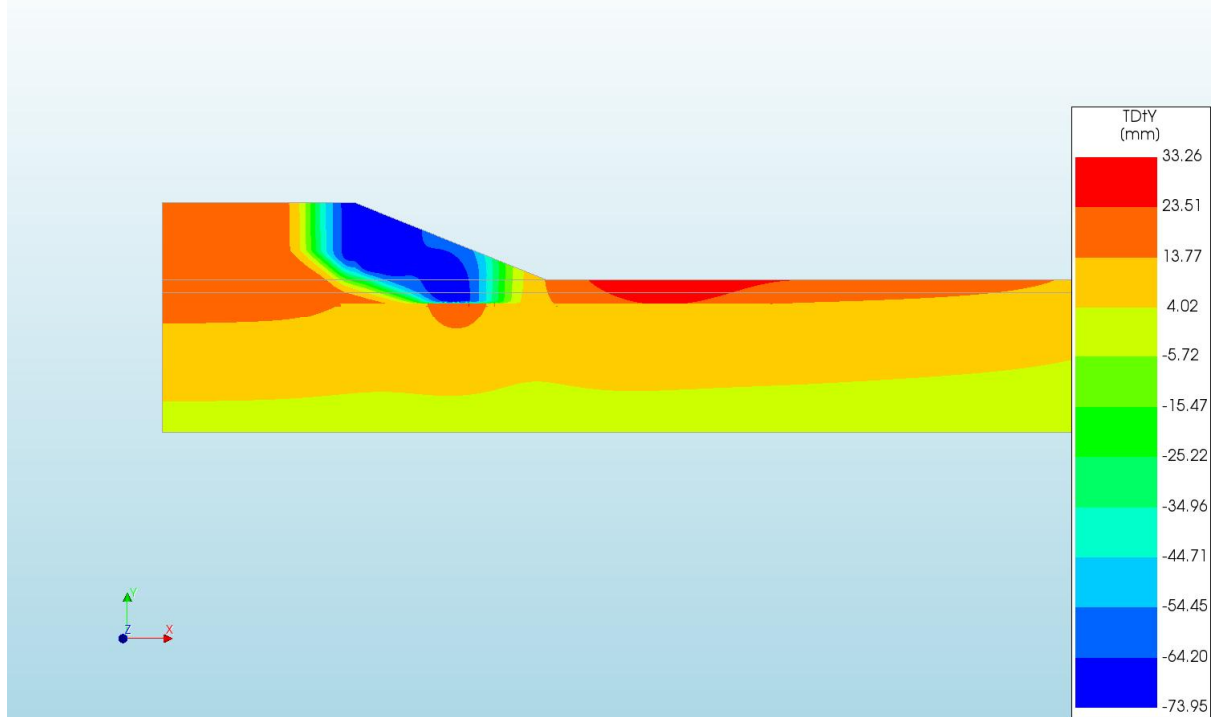
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 206.53mm



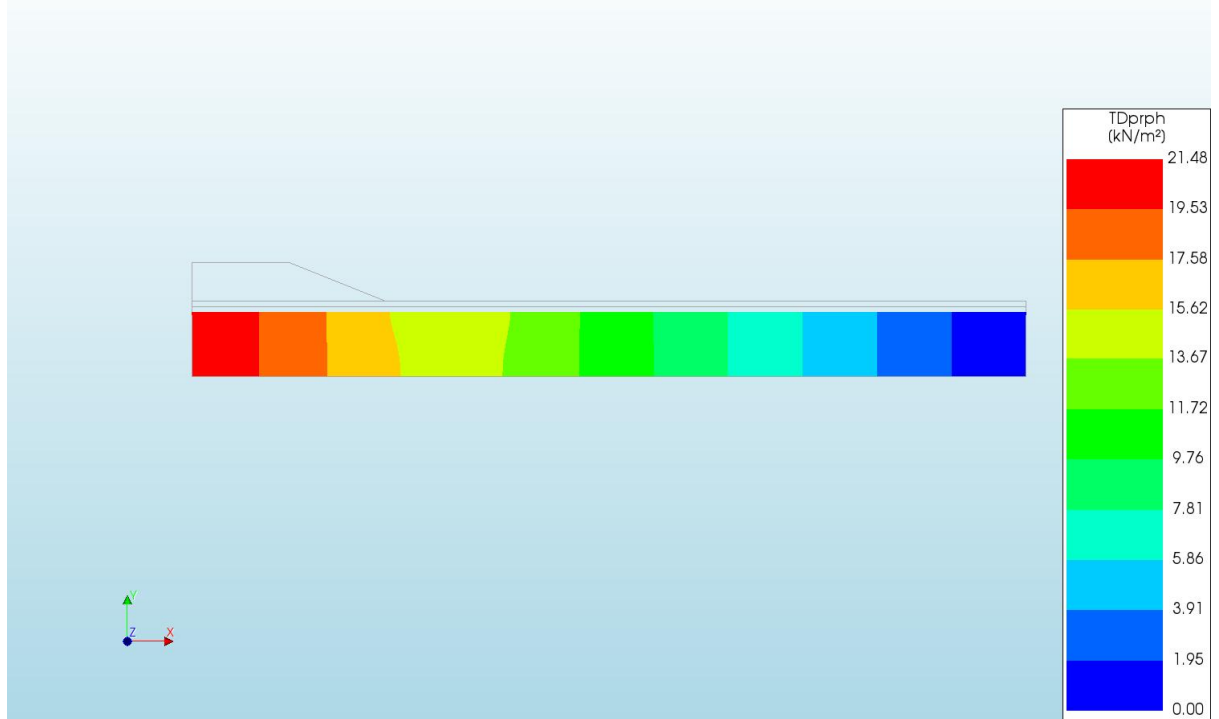
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -5.77mm max: 200.62mm



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Displacements TDtY  
min: -73.95mm max: 33.26mm

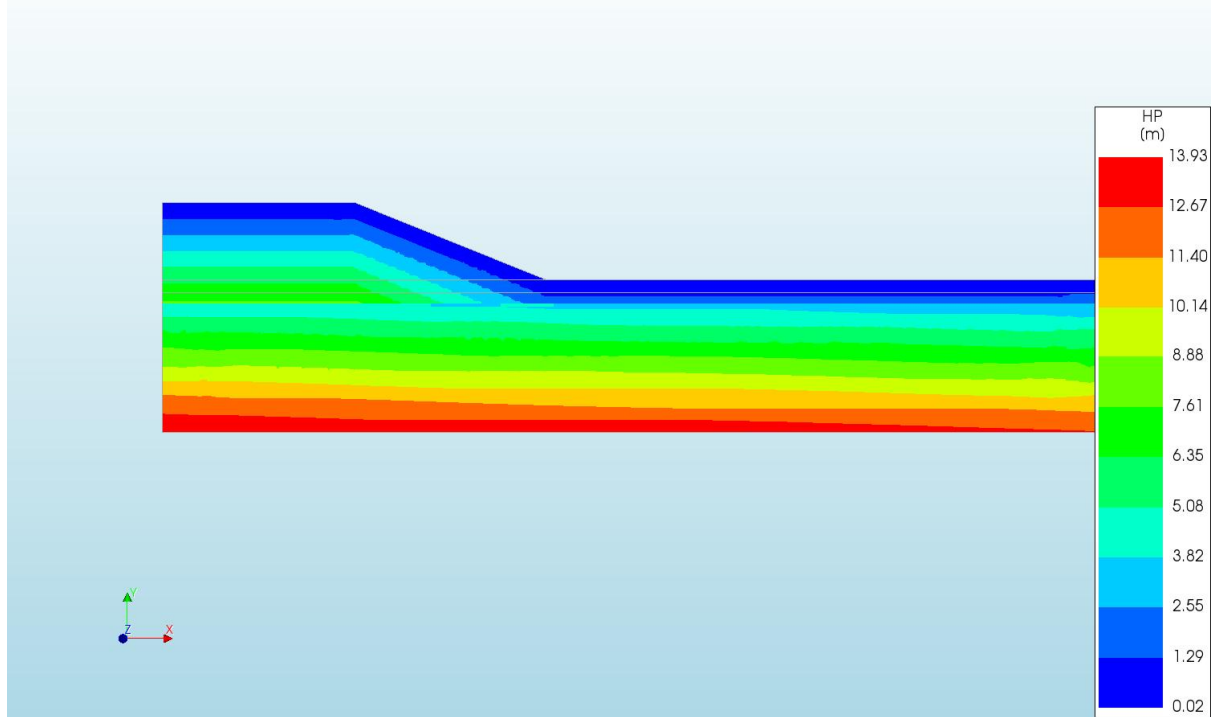


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 21.48kN/m<sup>2</sup>

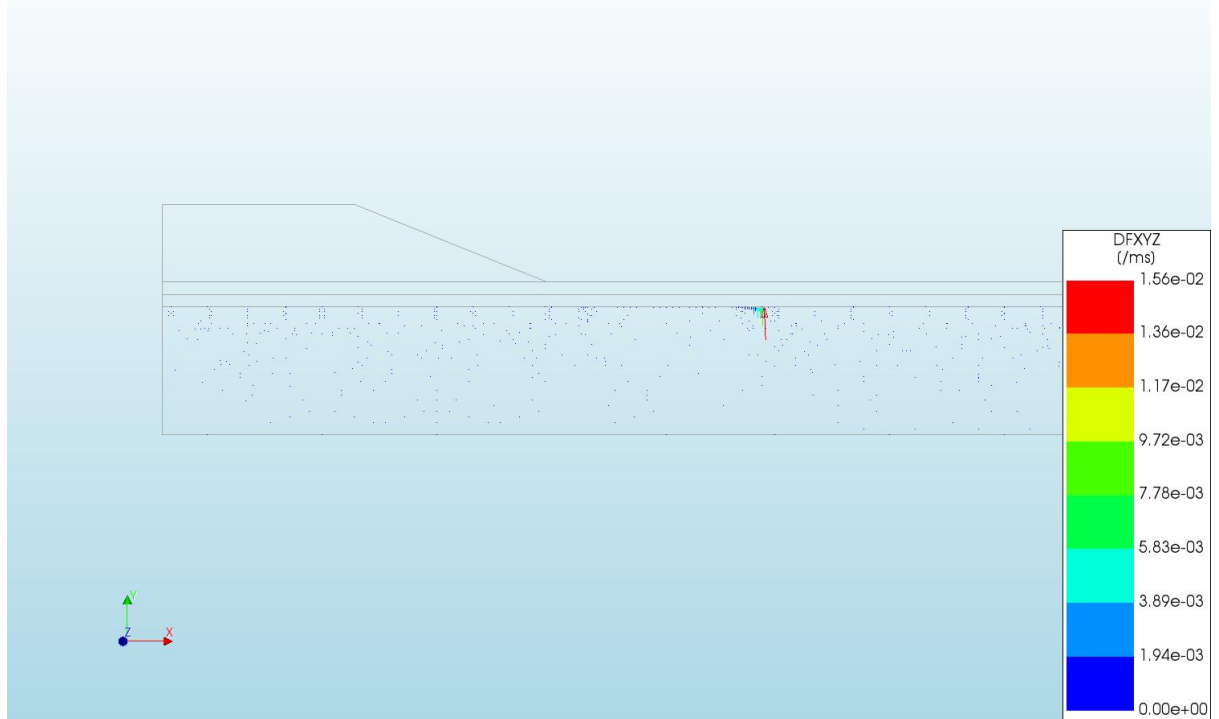




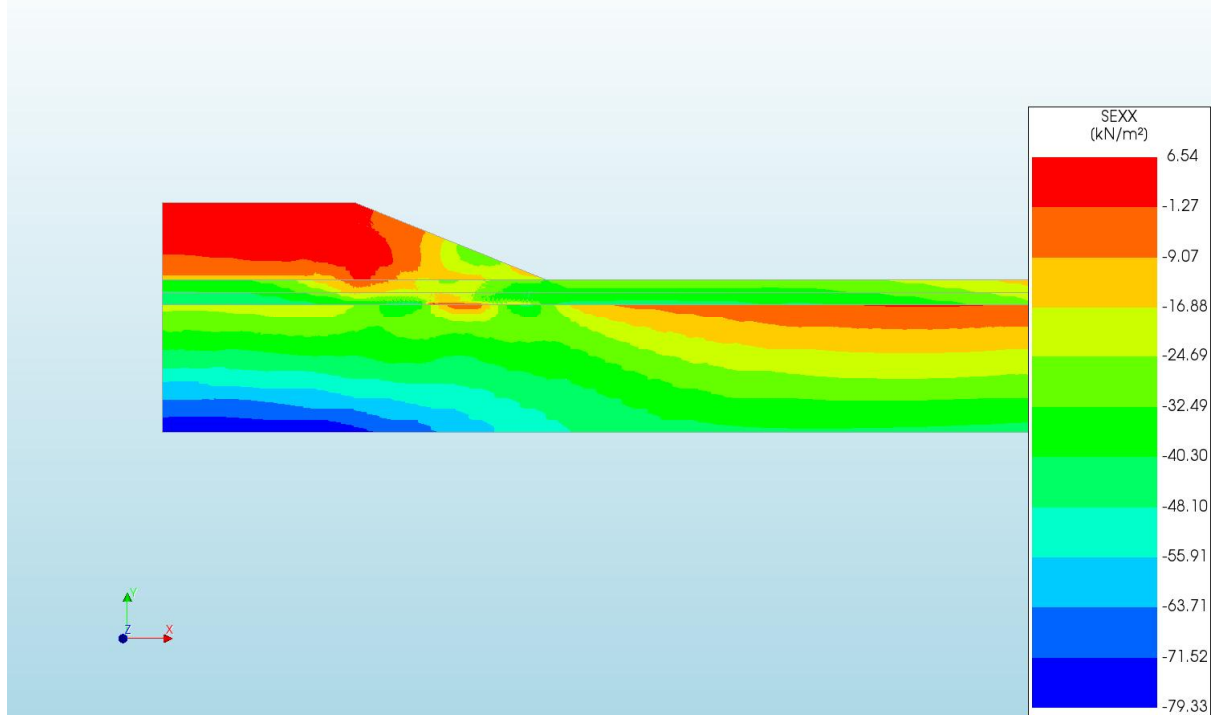
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.93m



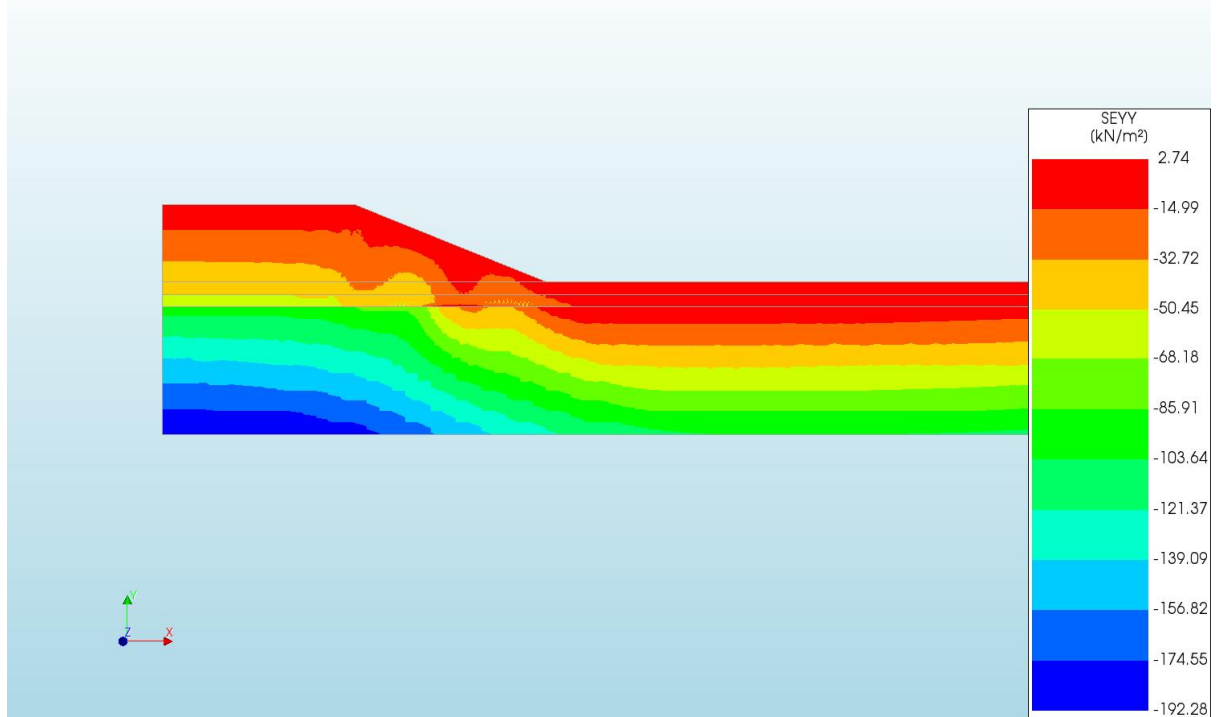
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.56e-02/ms



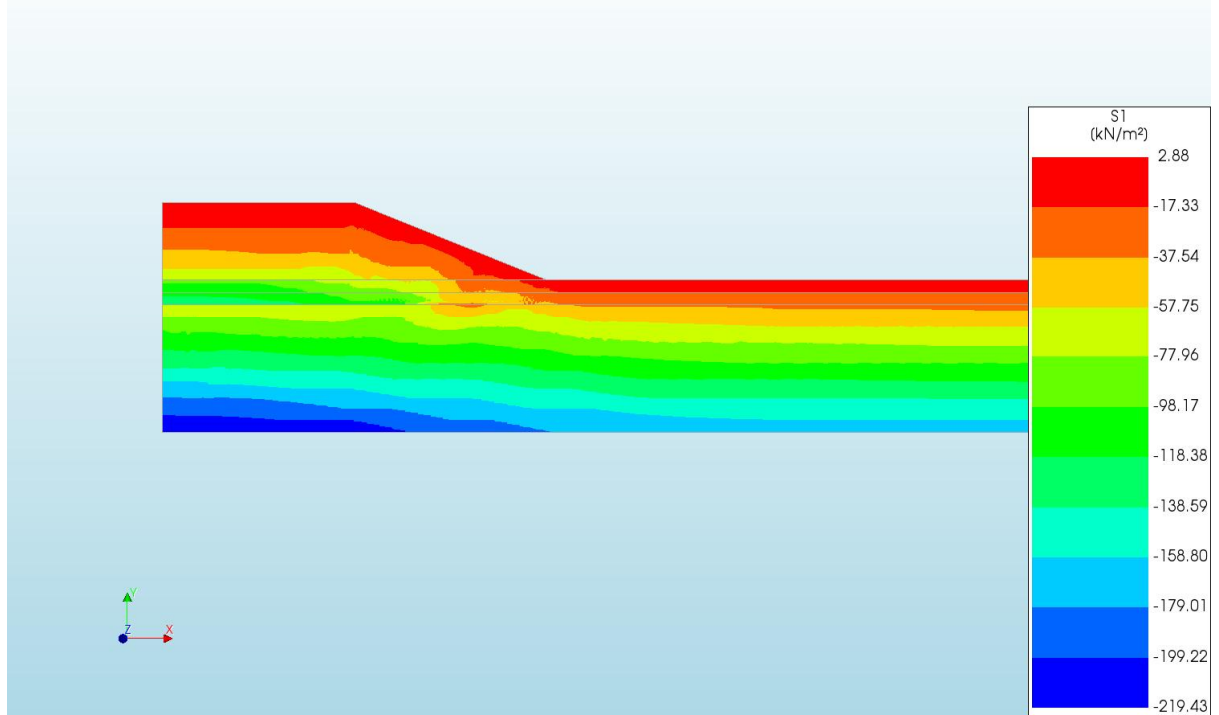
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.33kN/m<sup>2</sup> max: 6.54kN/m<sup>2</sup>



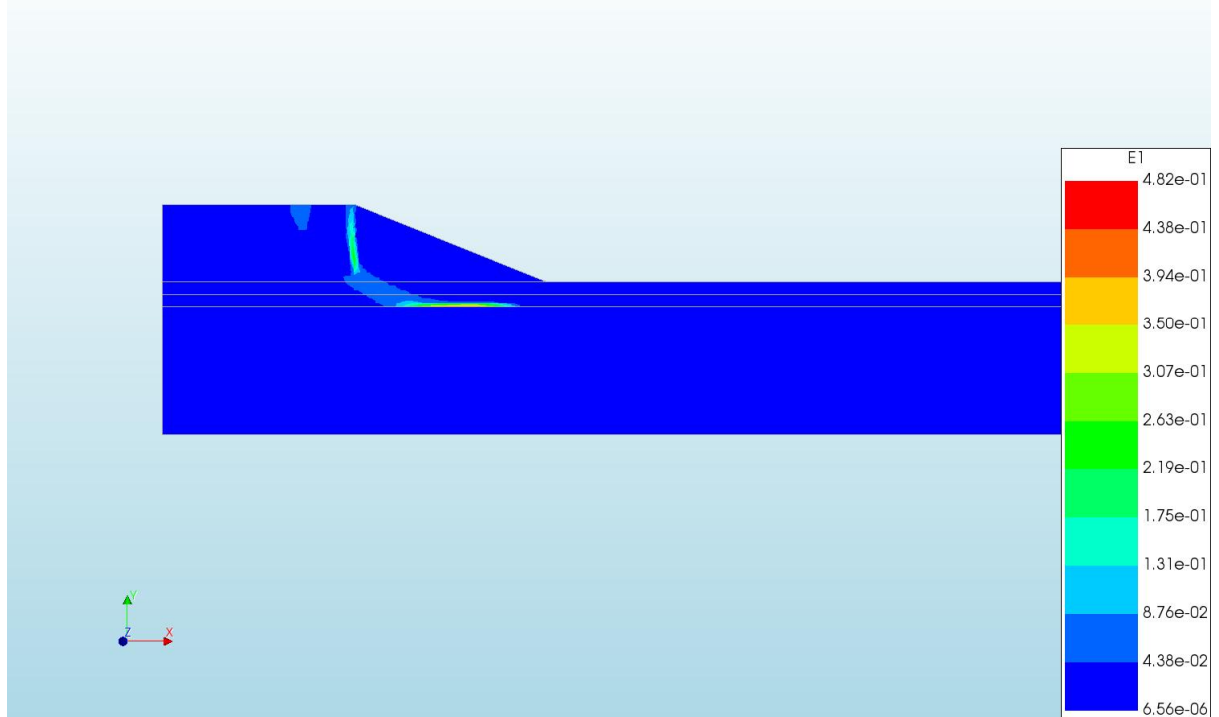
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.28kN/m<sup>2</sup> max: 2.74kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Cauchy Total Stresses S1  
min: -219.43kN/m<sup>2</sup> max: 2.88kN/m<sup>2</sup>



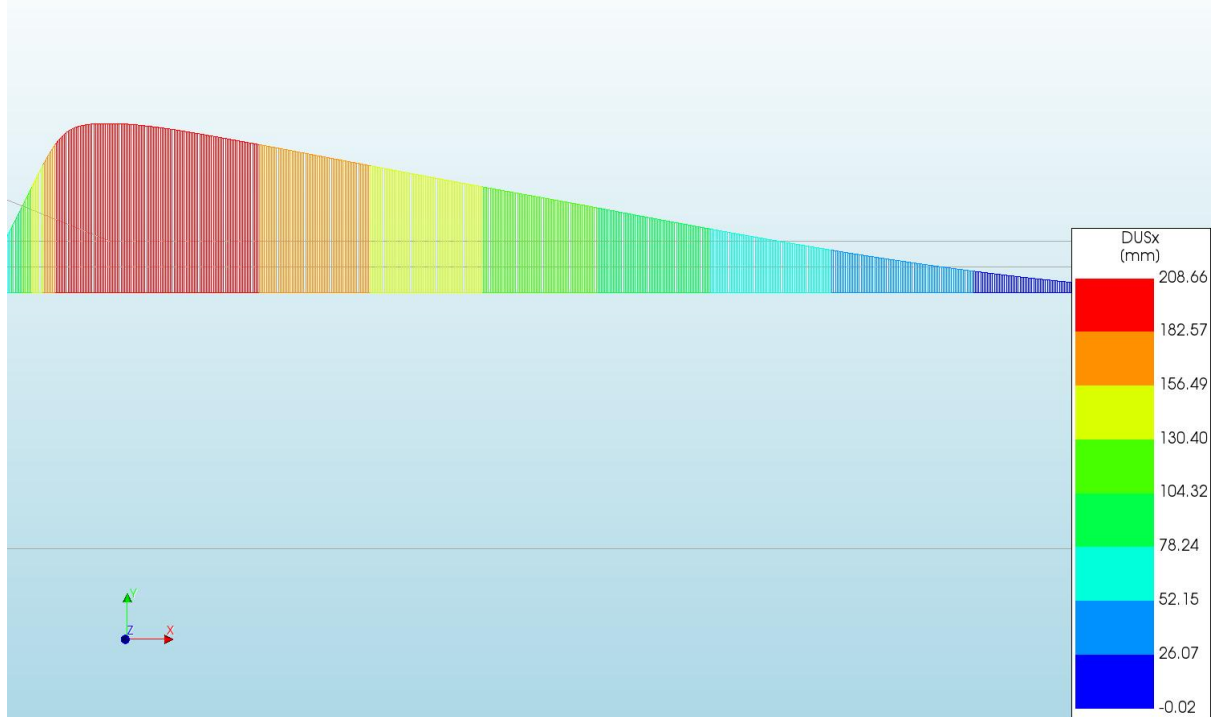
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
Total Strains E1  
min: 6.56e-06 max: 4.82e-01



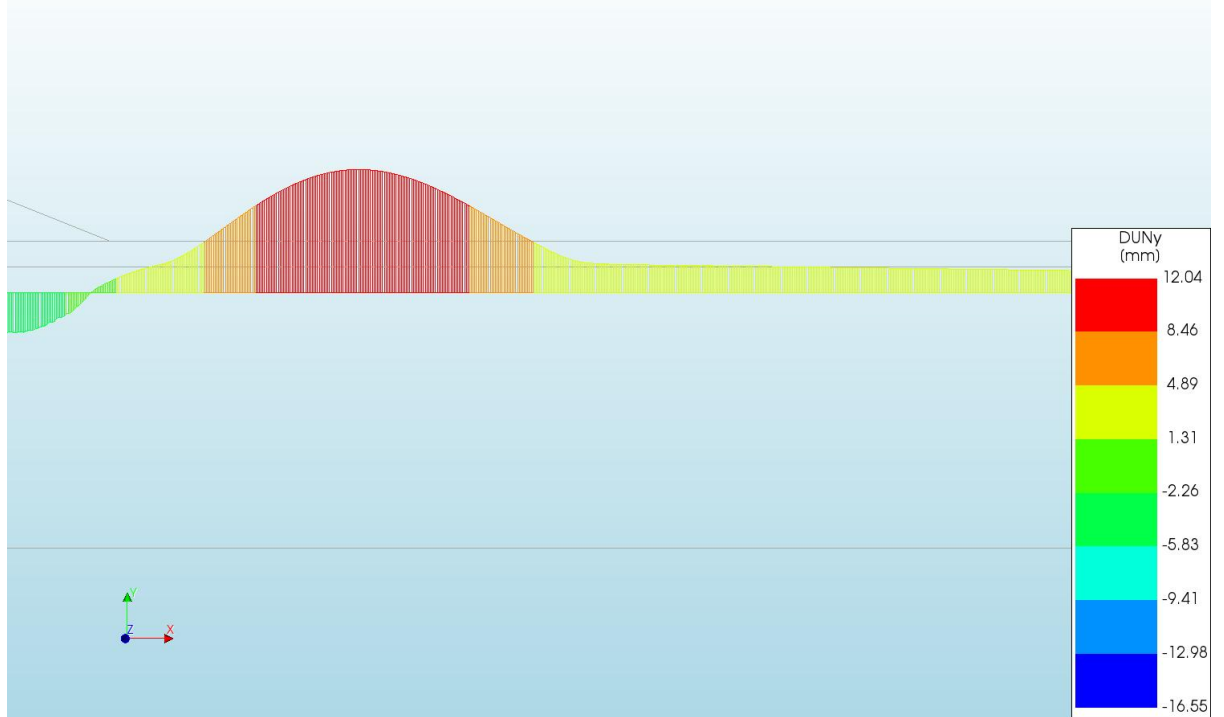
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Plastic Strains Epeq  
 min: 0.00e+00 max: 5.03e-01



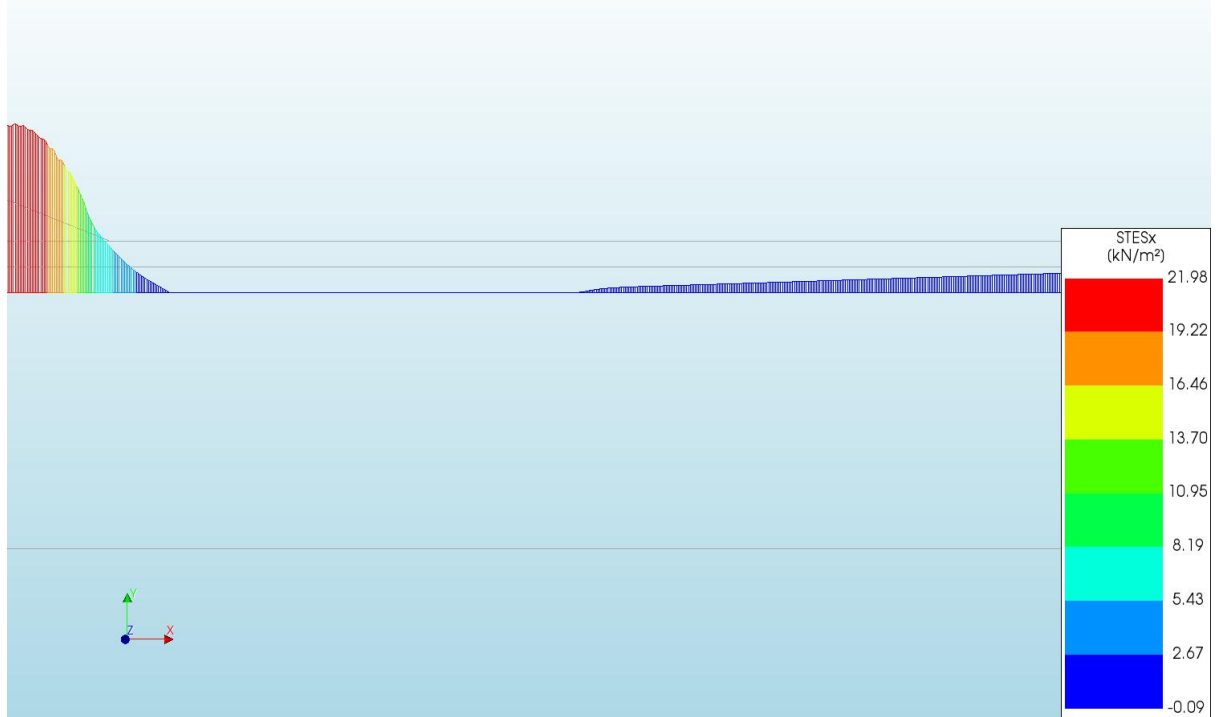
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.02mm max: 208.66mm



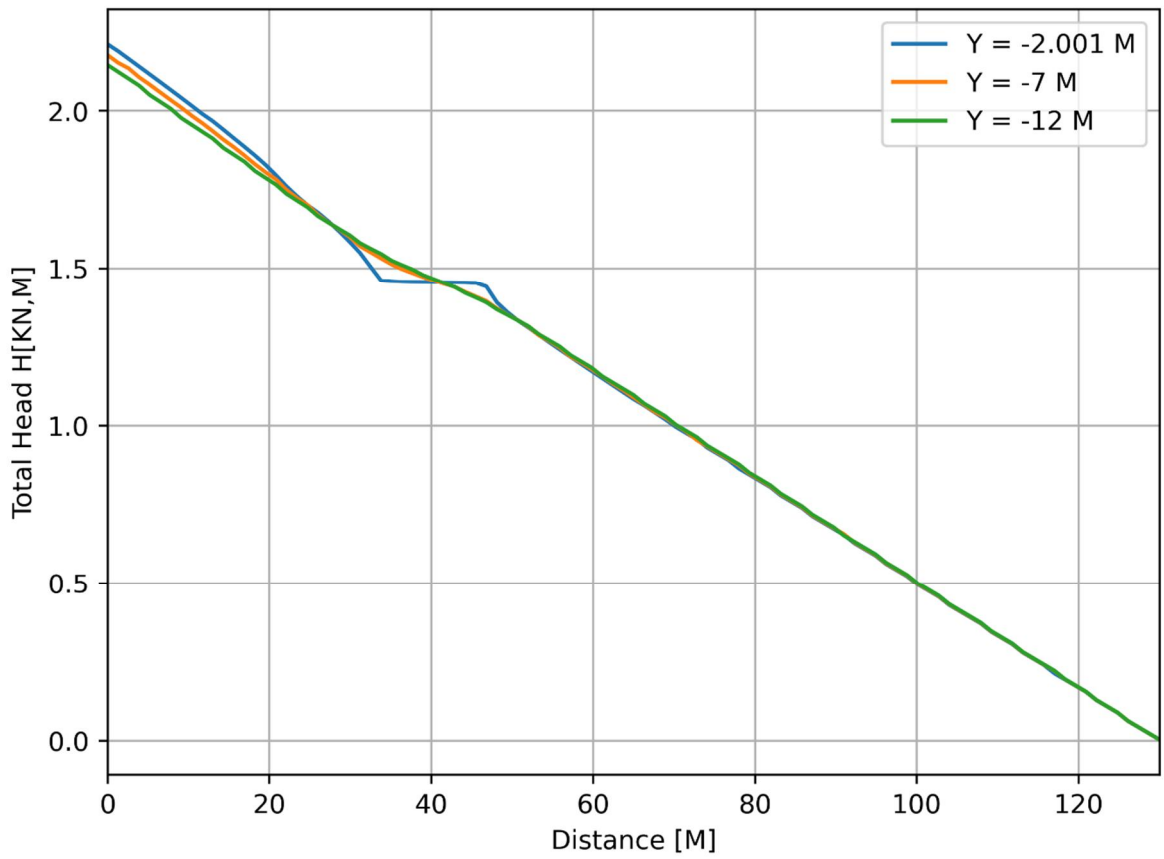
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -16.55mm max: 12.04mm

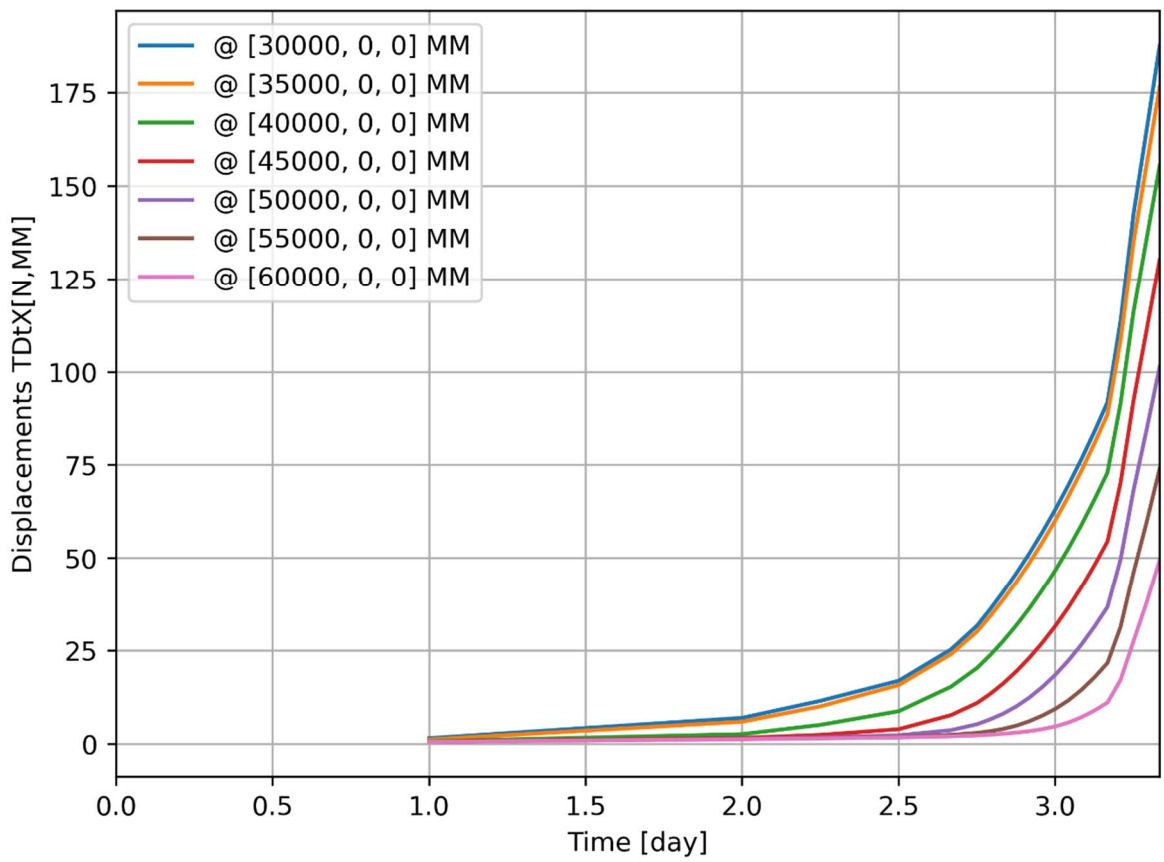
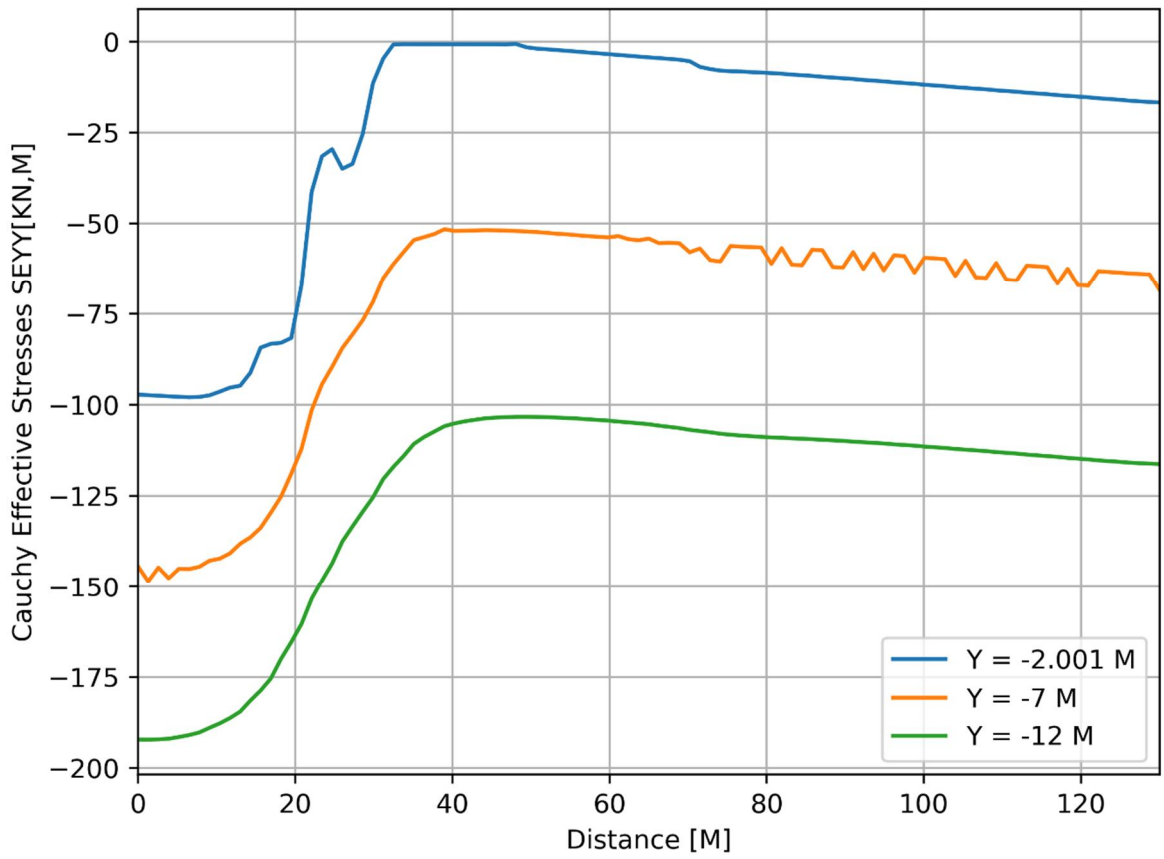


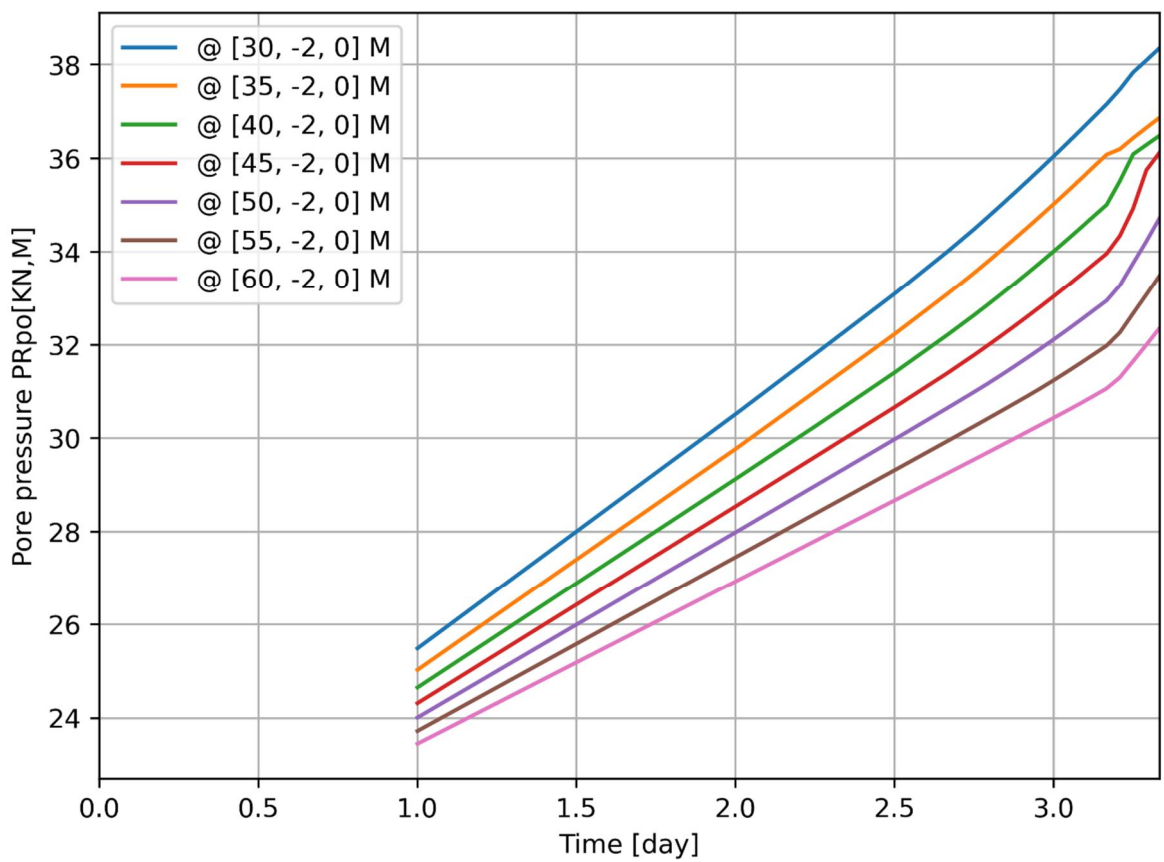
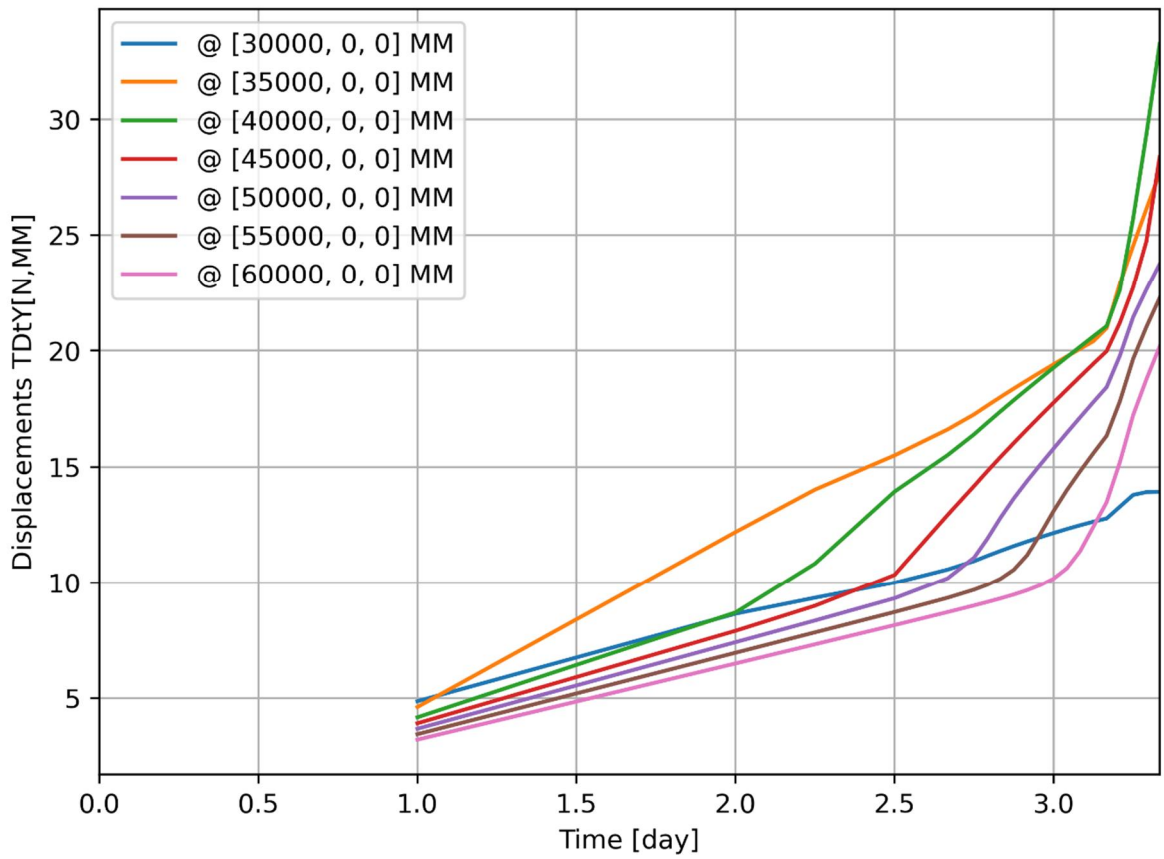
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.09kN/m<sup>2</sup> max: 21.98kN/m<sup>2</sup>



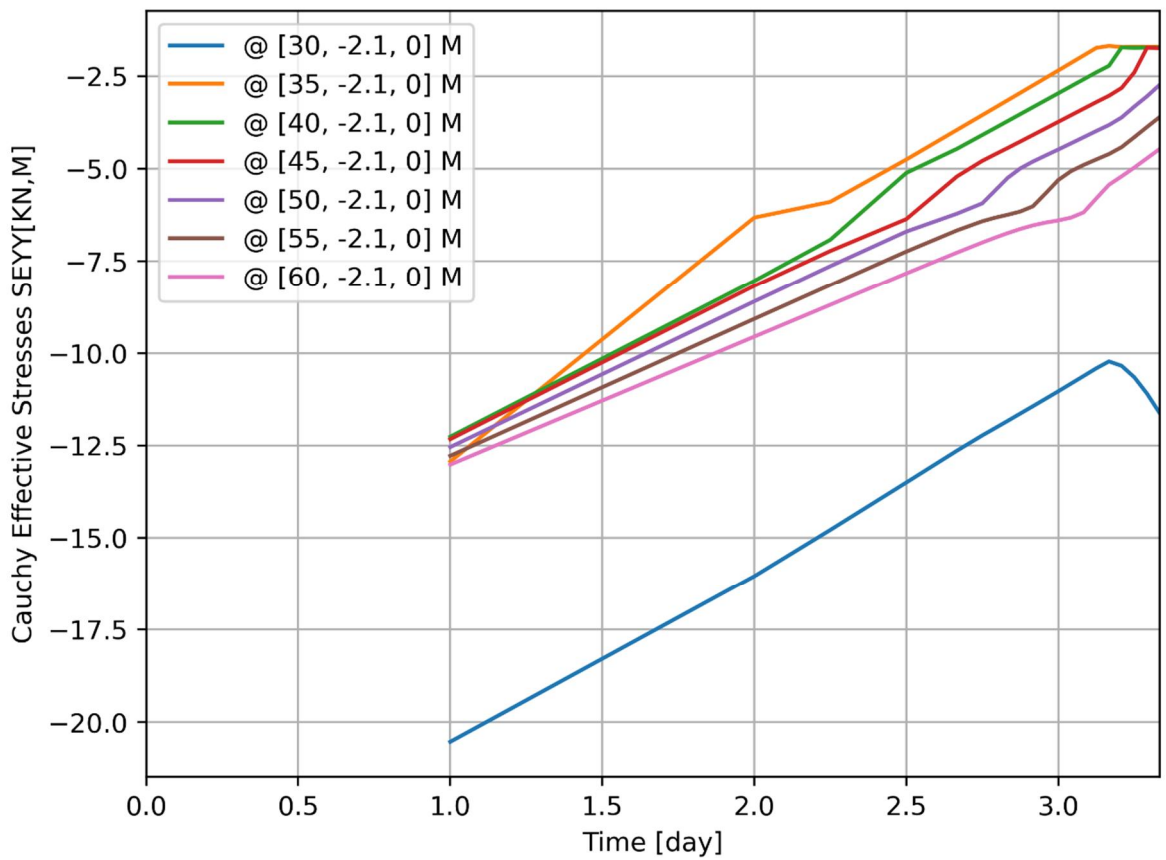
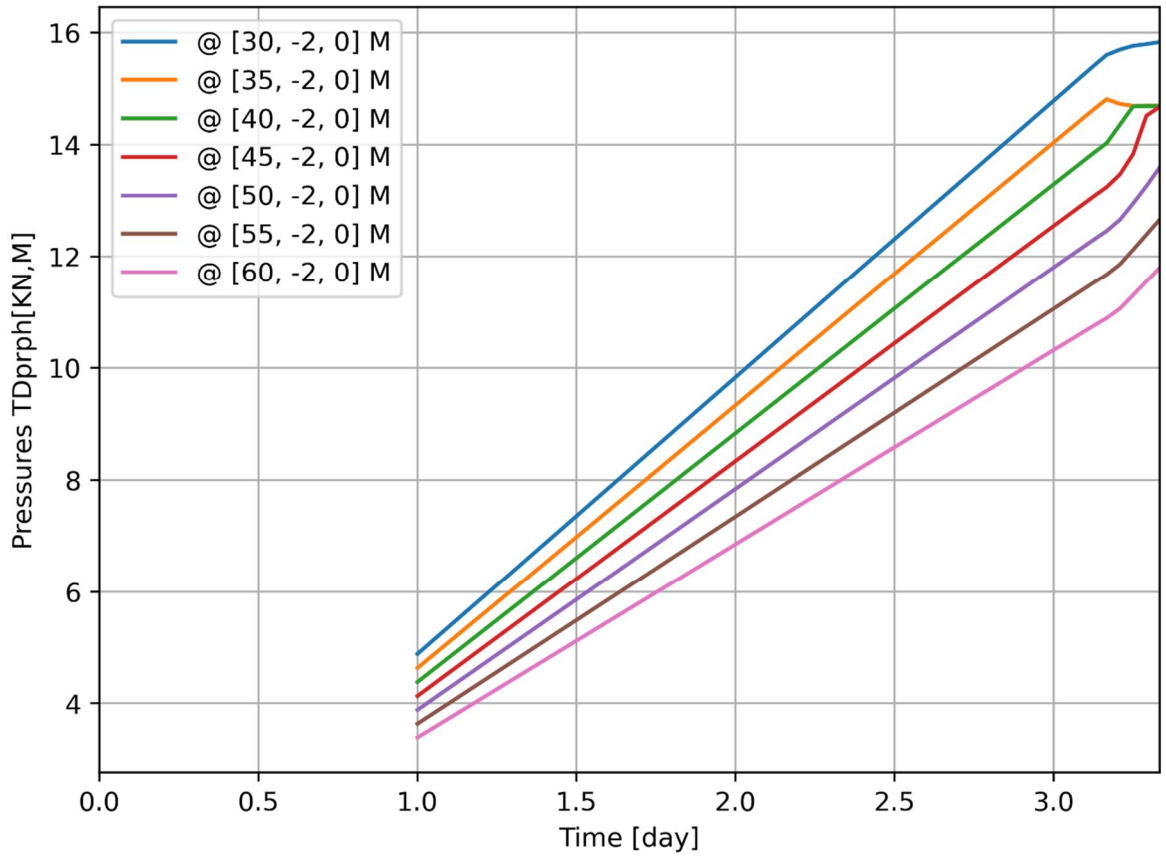
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_20200818  
 Phase 2, Time-step 26, Time 3 day 8 hour  
 Interface Effective Tractions STENy  
 min: -97.42kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

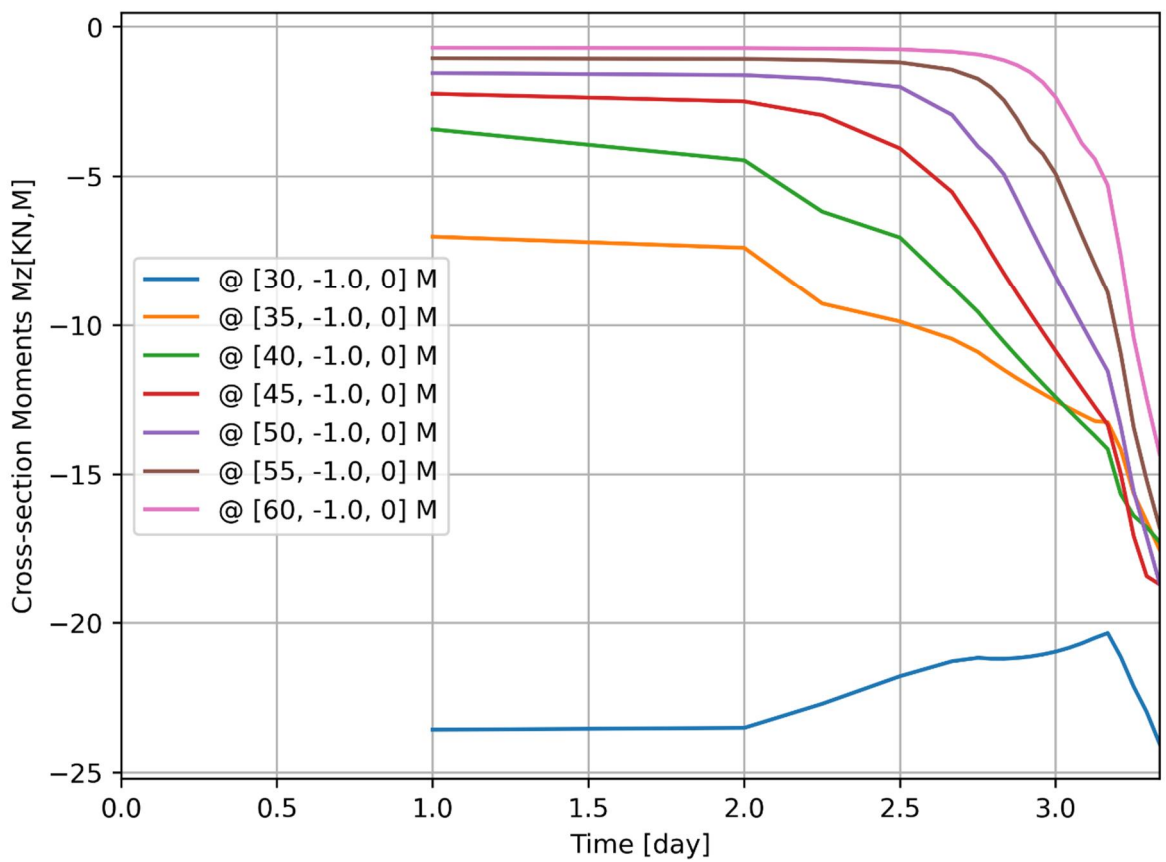
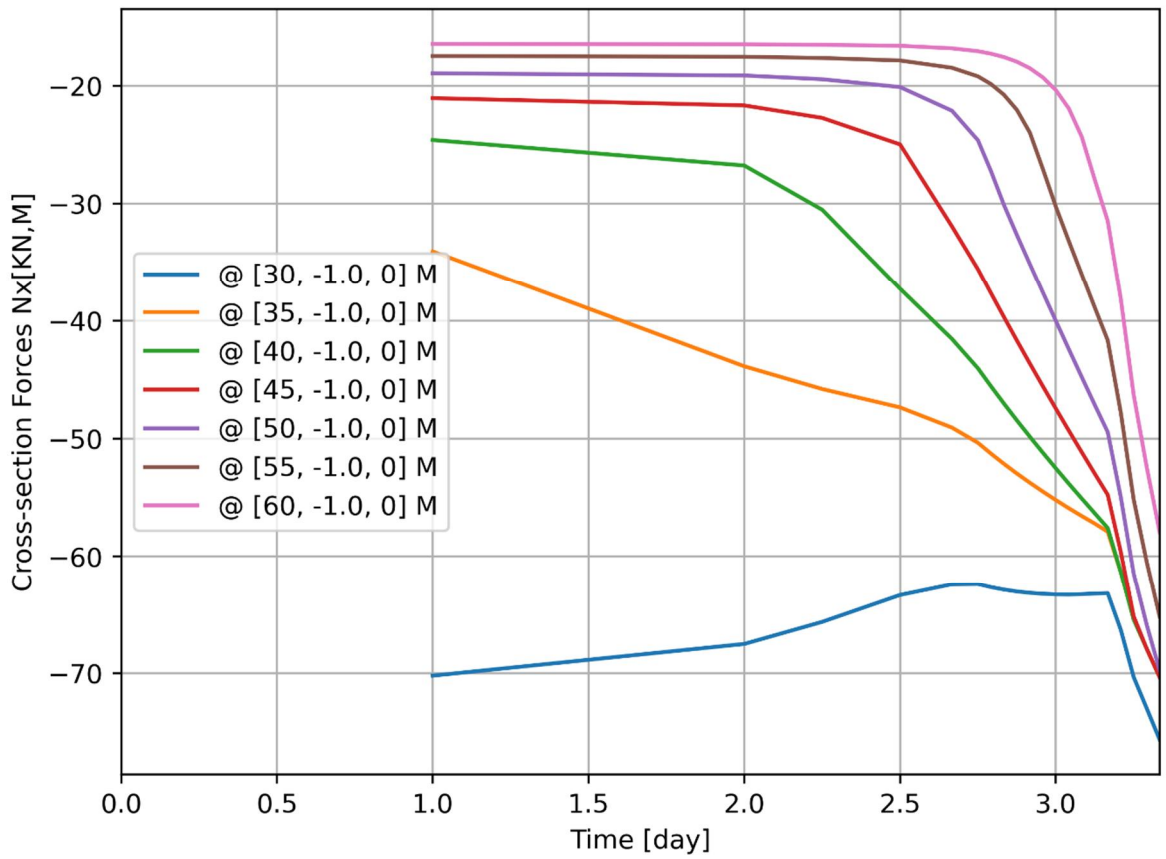








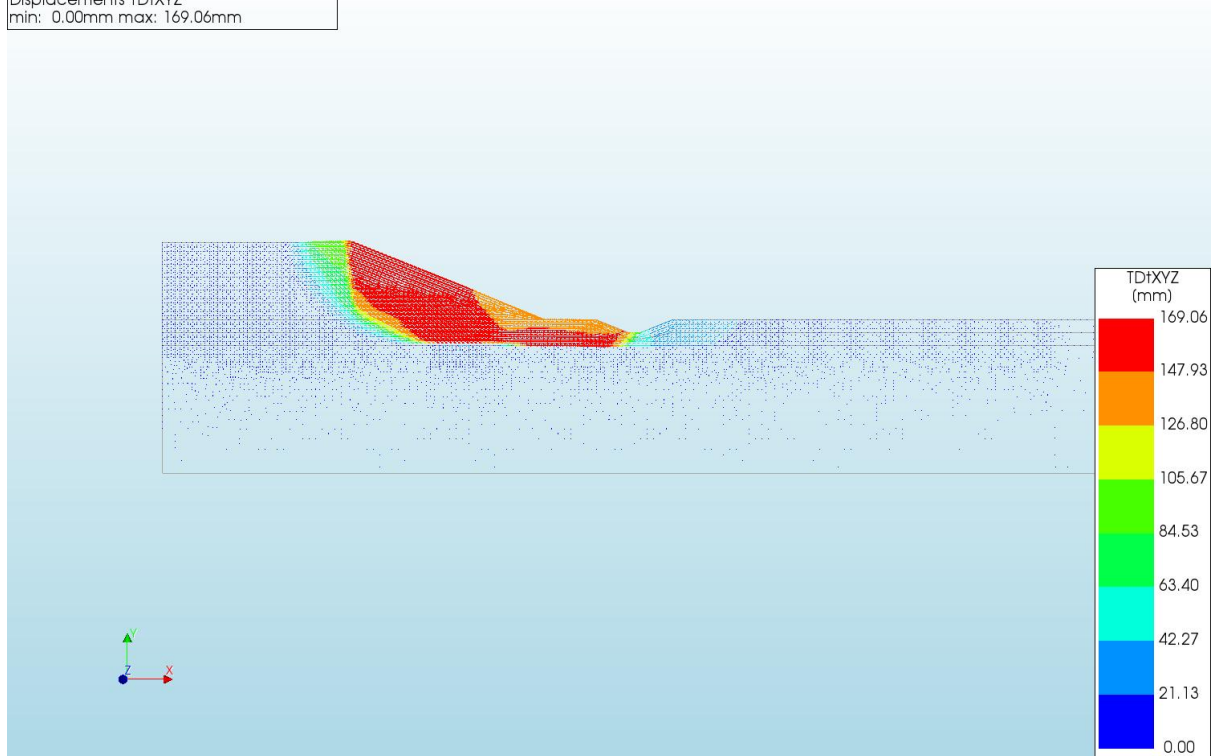




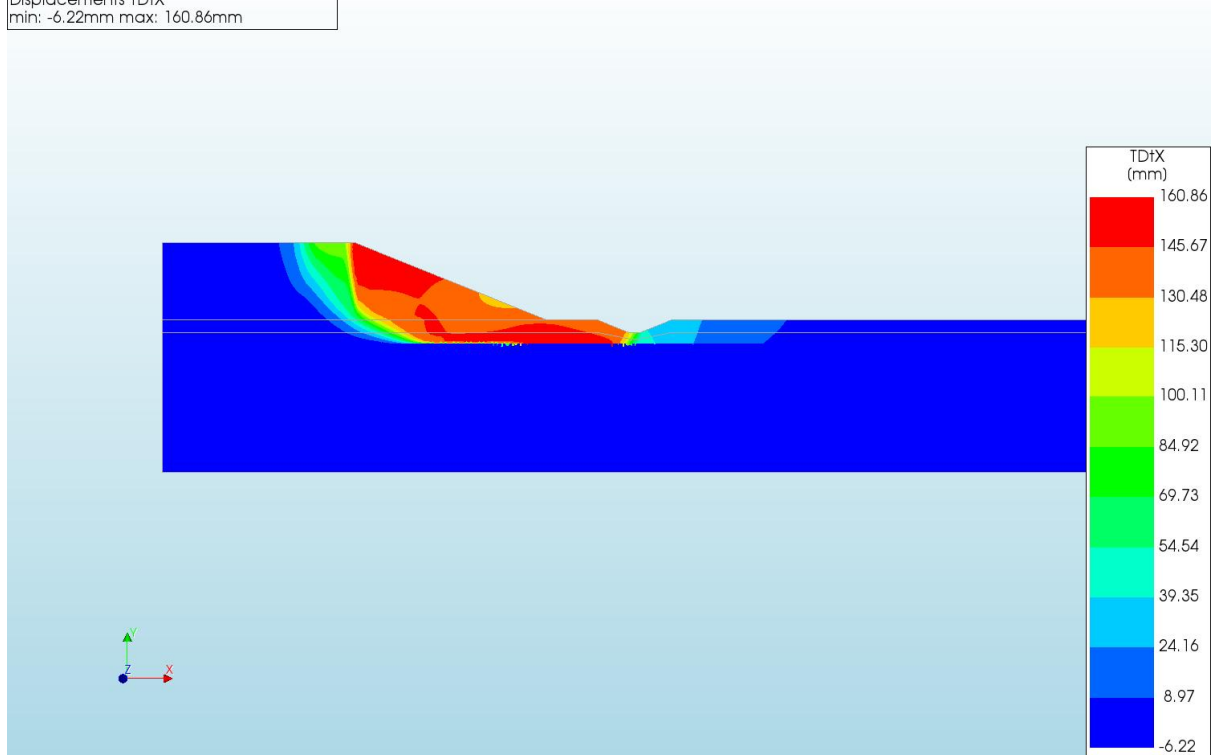
A.2.30

'Output\_d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818'

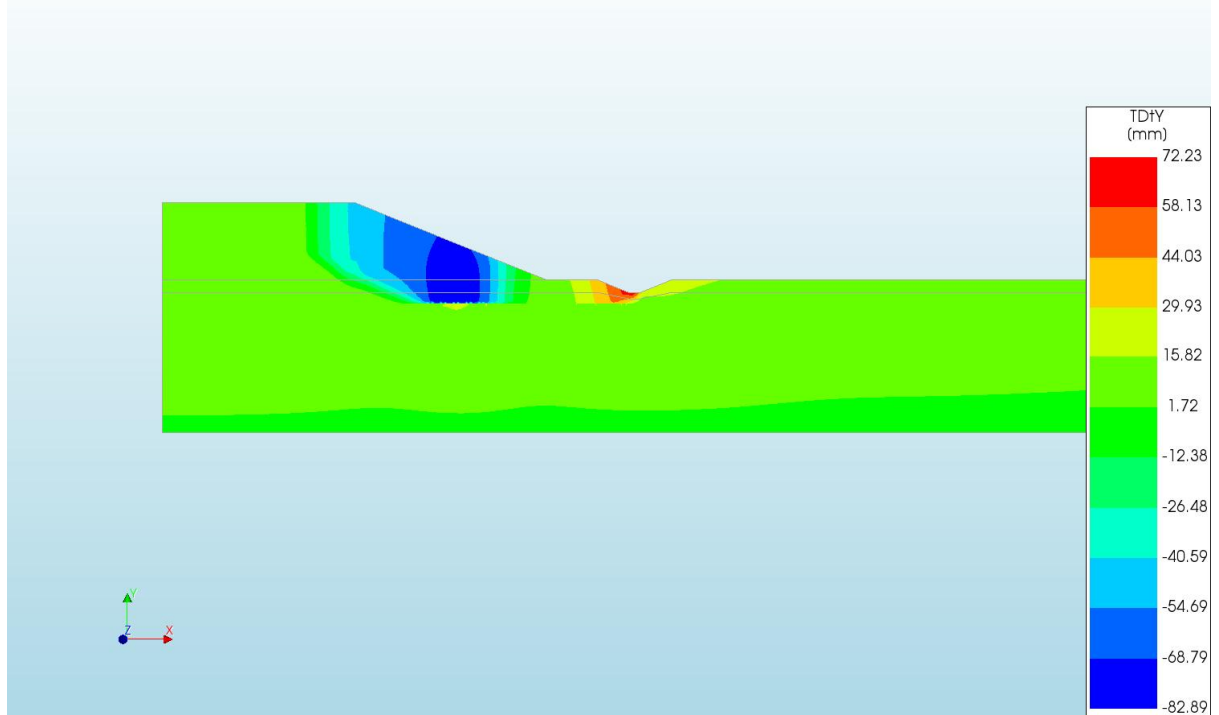
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 169.06mm



d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Displacements TDtX  
min: -6.22mm max: 160.86mm



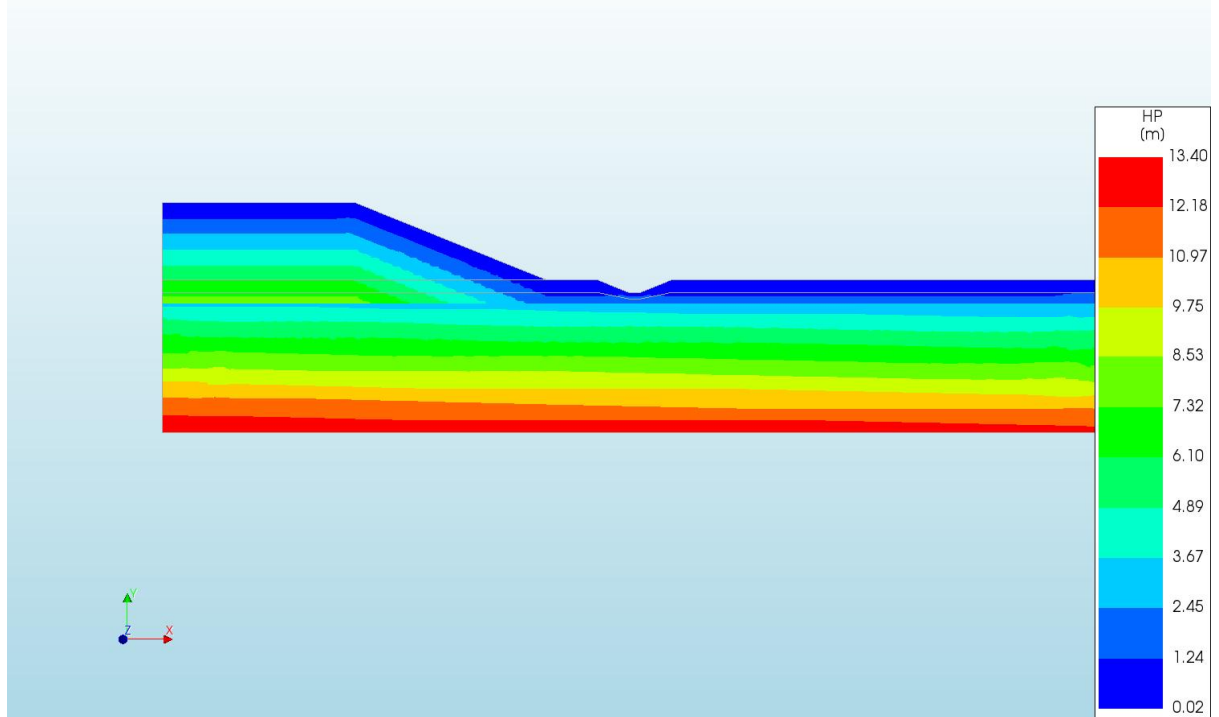
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Displacements TDtY  
min: -82.89mm max: 72.23mm



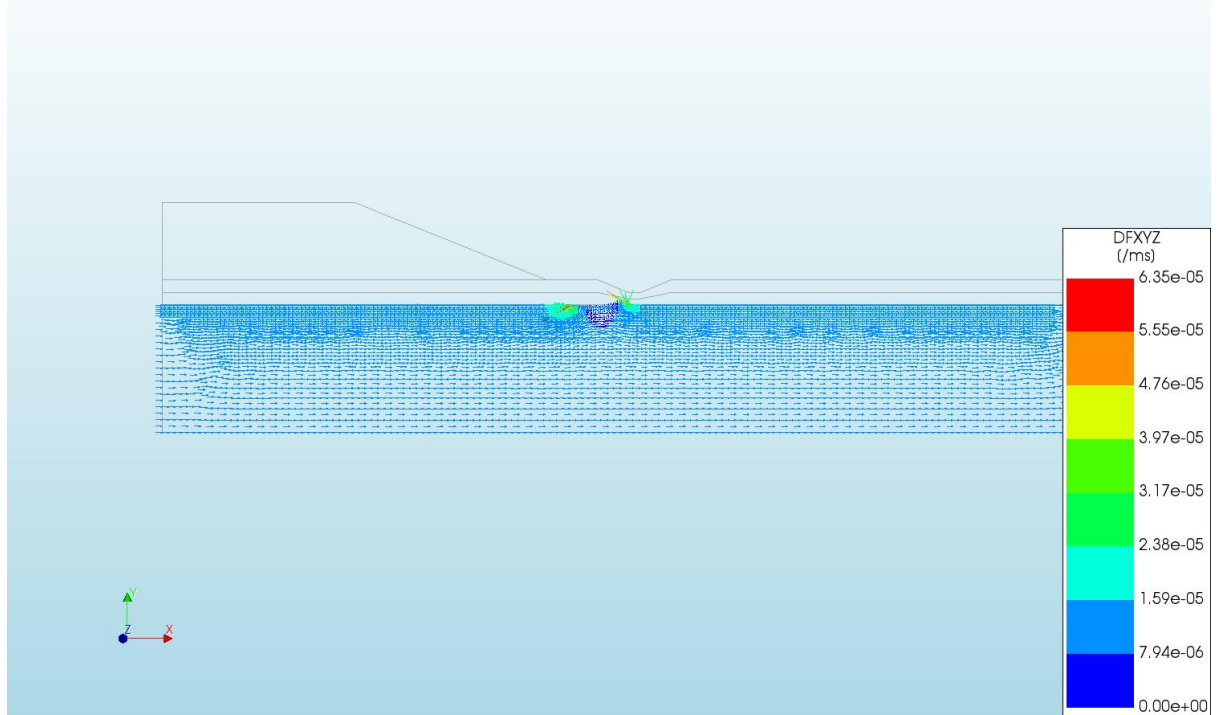
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 16.11kN/m<sup>2</sup>



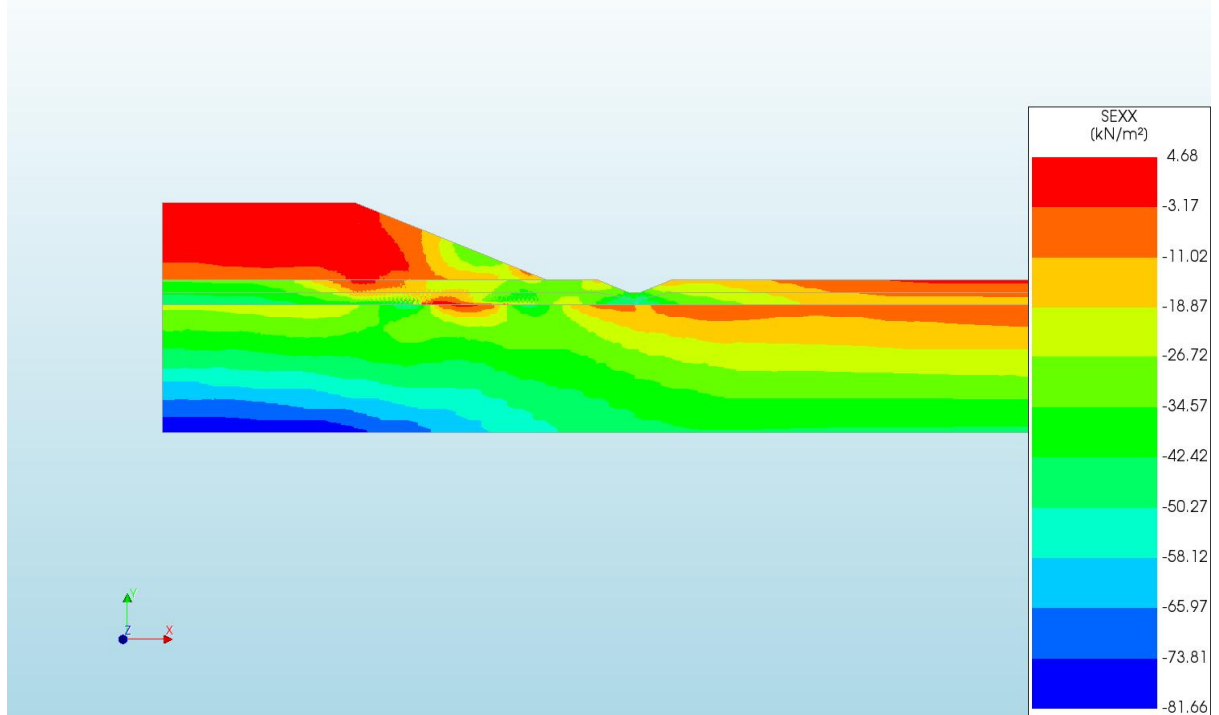
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.40m



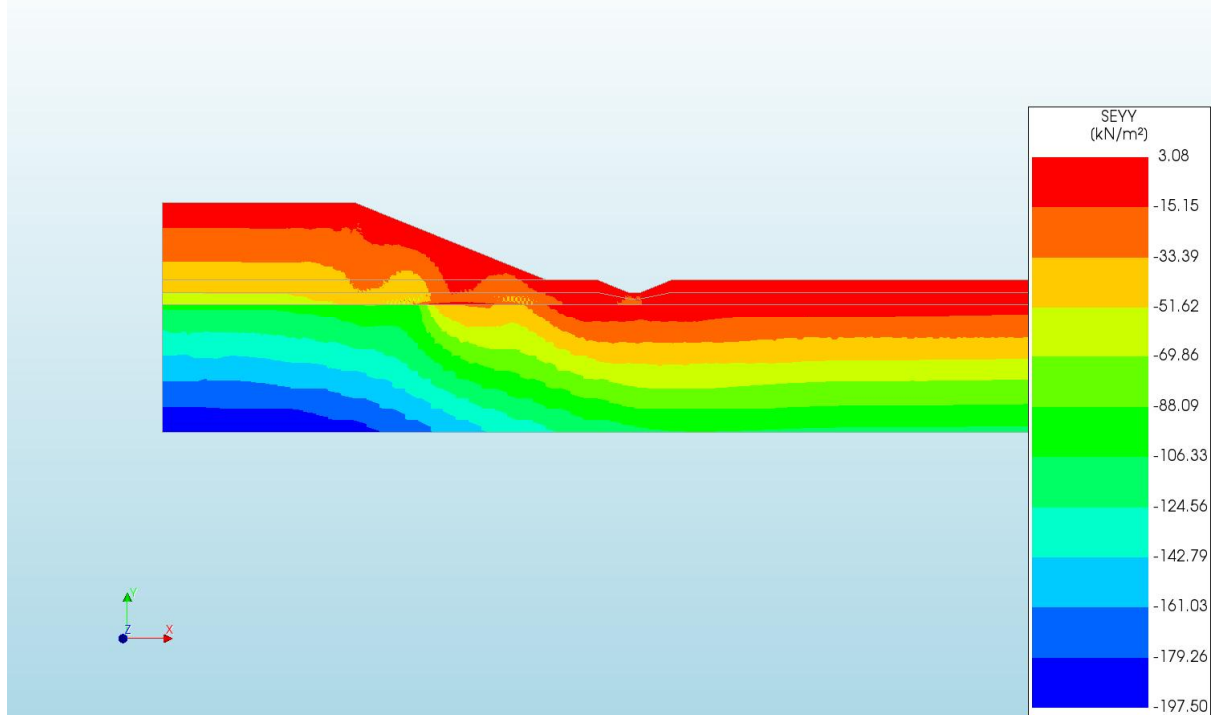
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 6.35e-05/ms



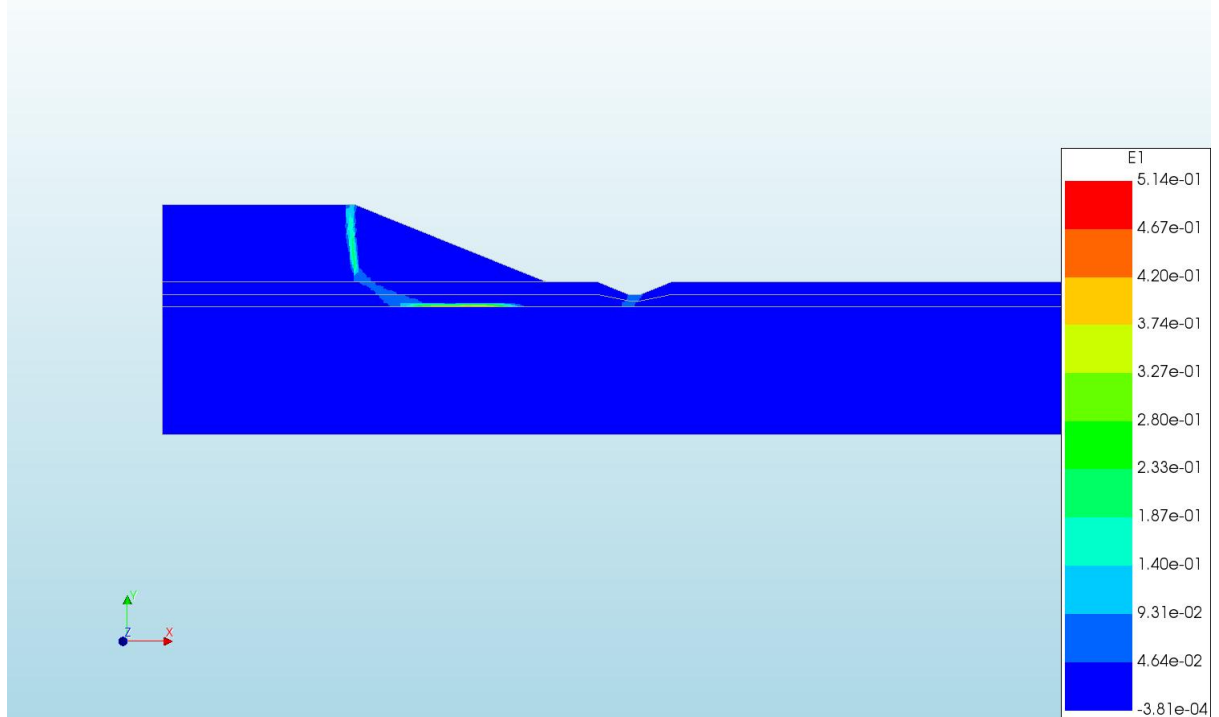
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -81.66kN/m<sup>2</sup> max: 4.68kN/m<sup>2</sup>



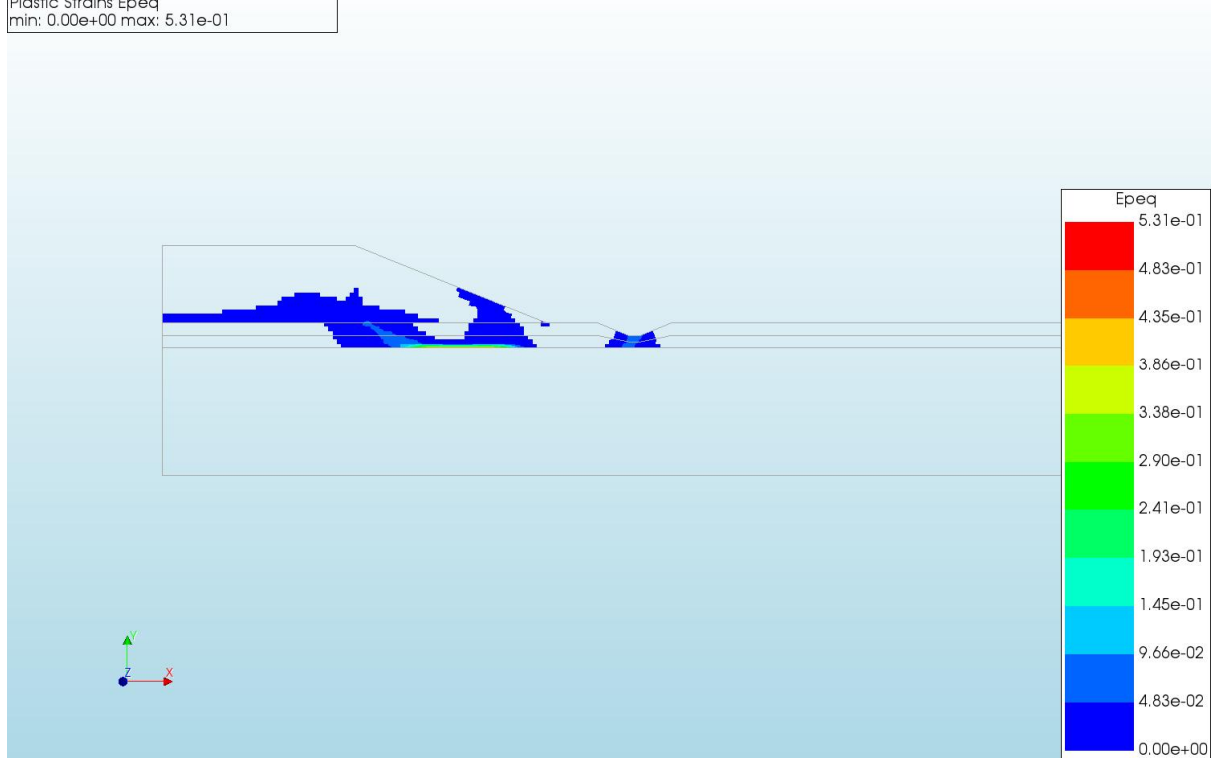
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -197,50kN/m<sup>2</sup> max: 3,08kN/m<sup>2</sup>



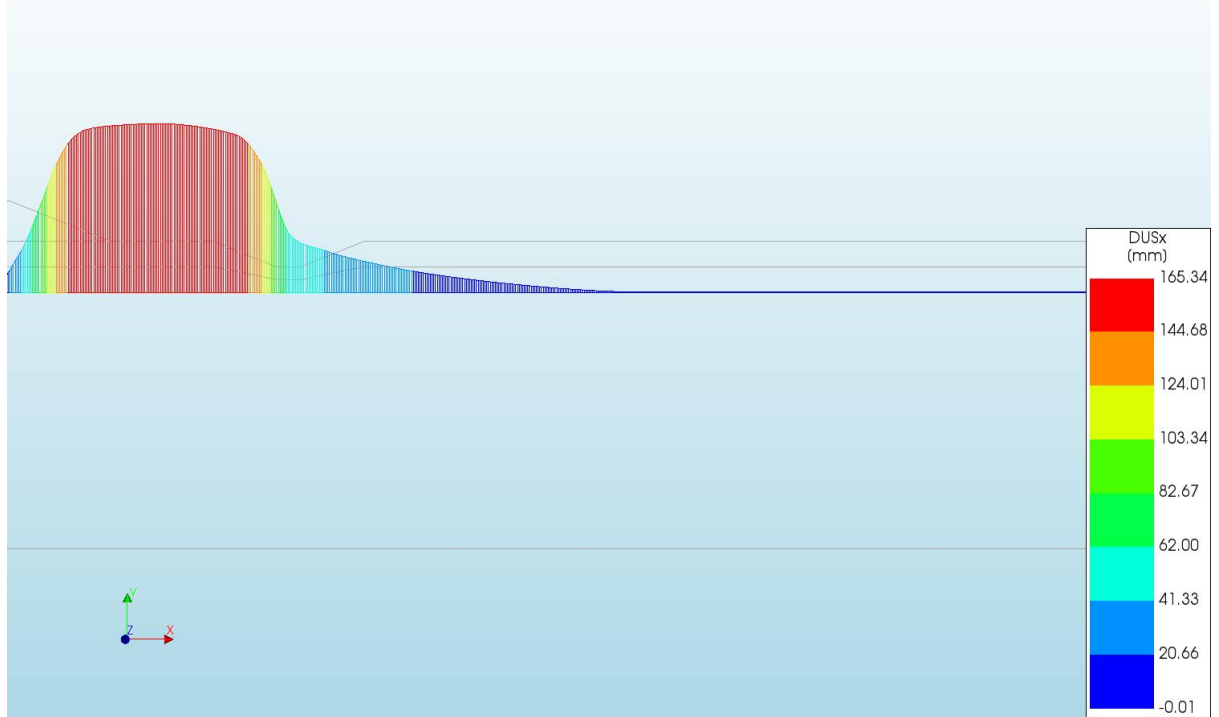
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Total Strains E1  
min: -3,81e-04 max: 5,14e-01



d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.31e-01

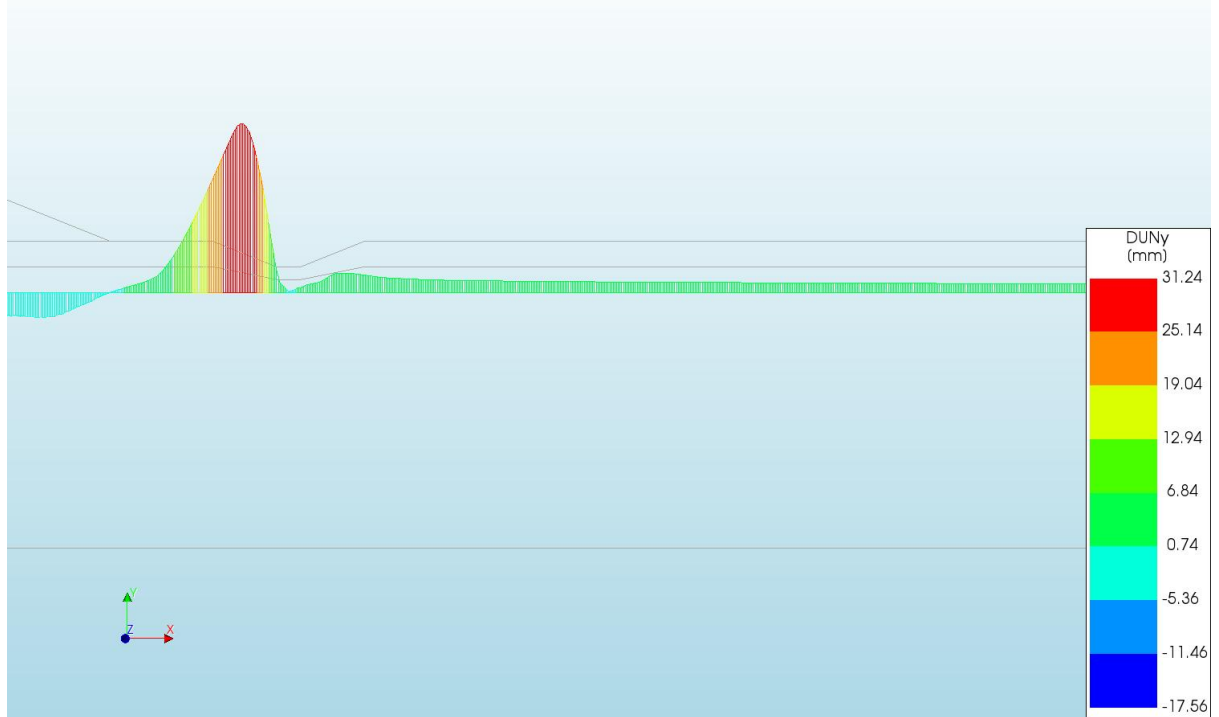


d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 165.34mm

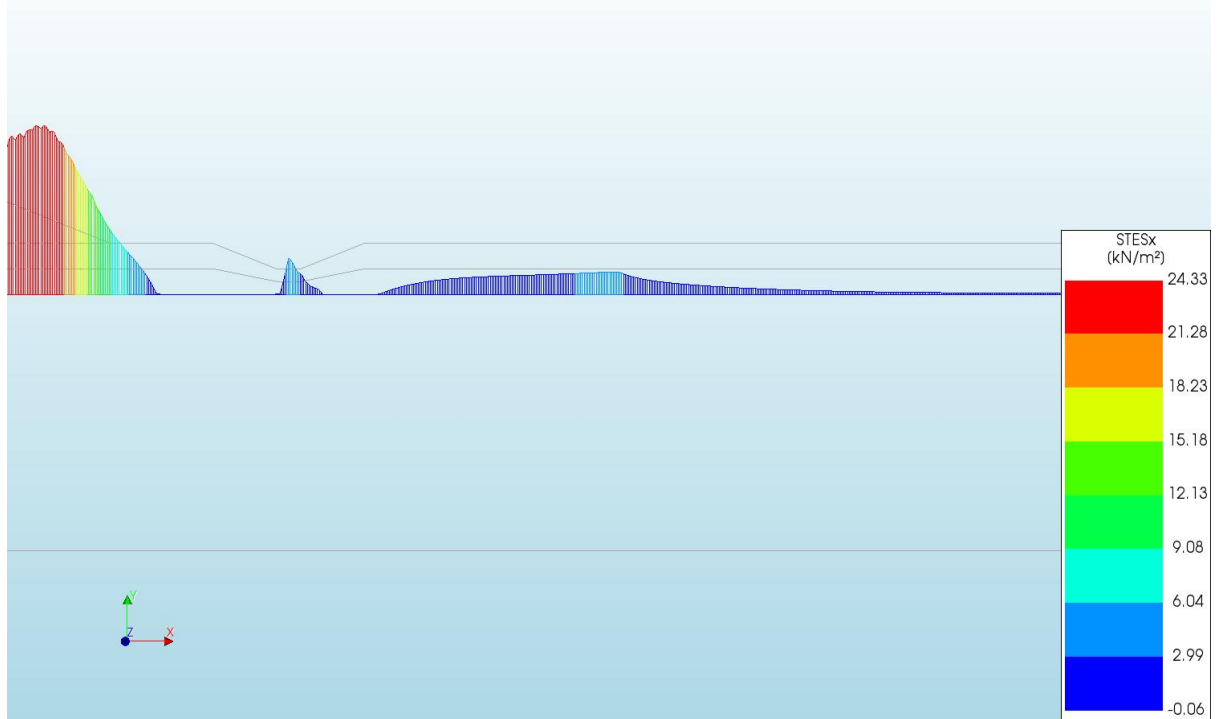




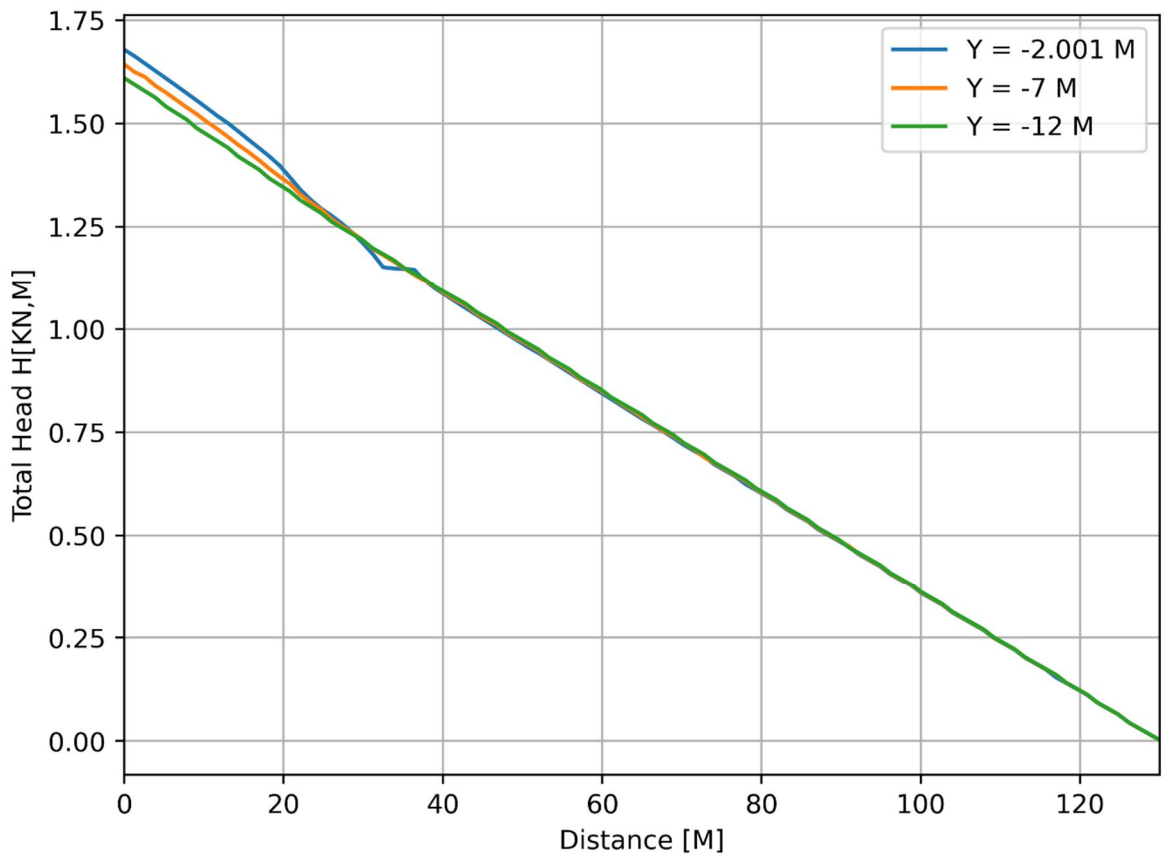
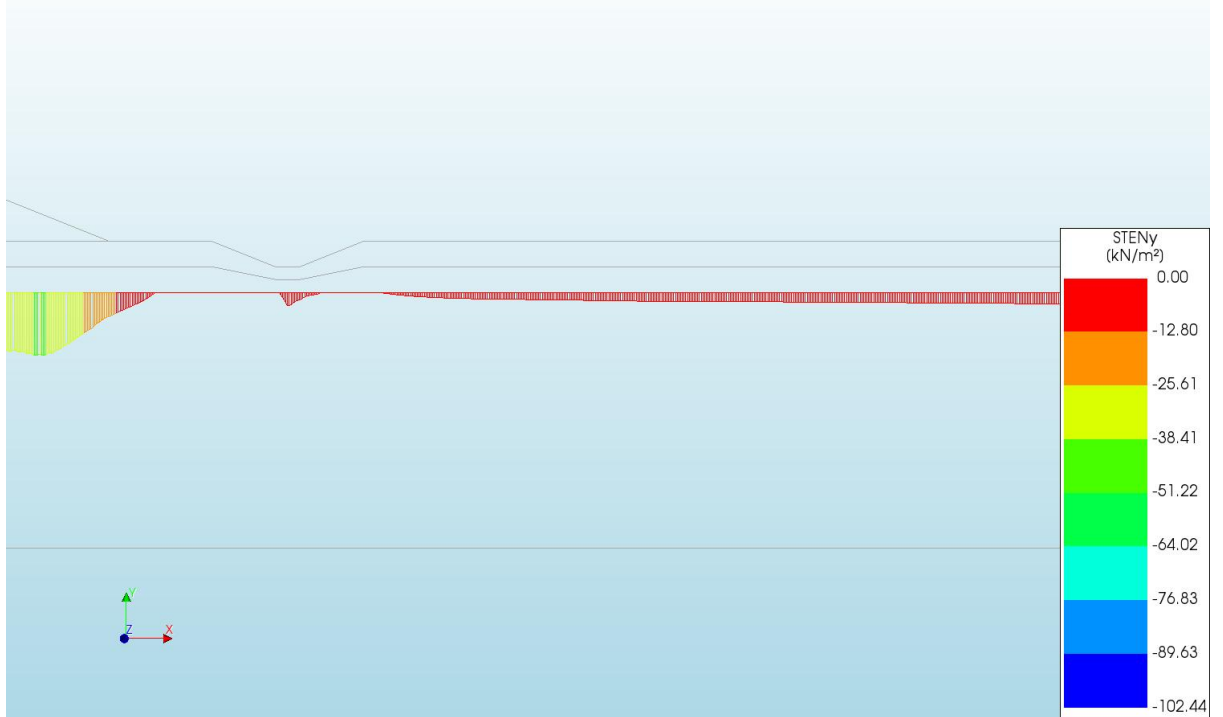
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -17.56mm max: 31.24mm

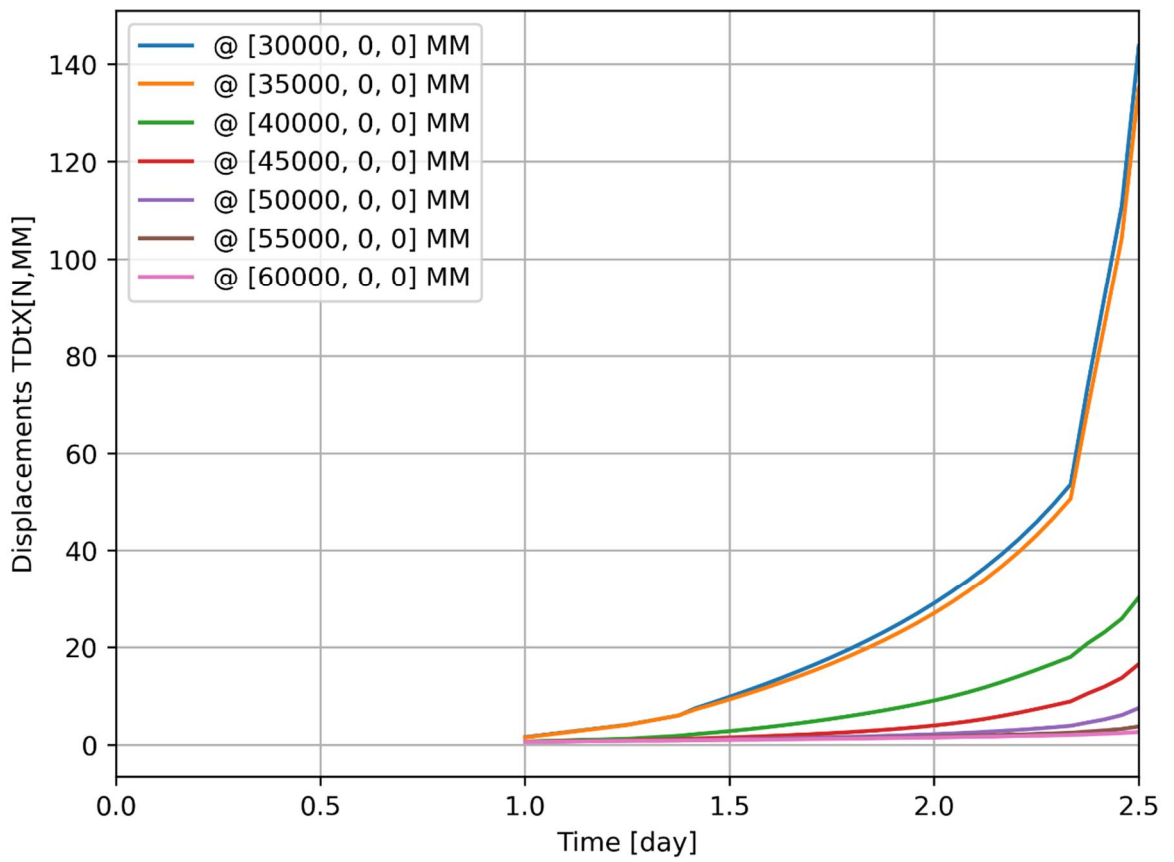
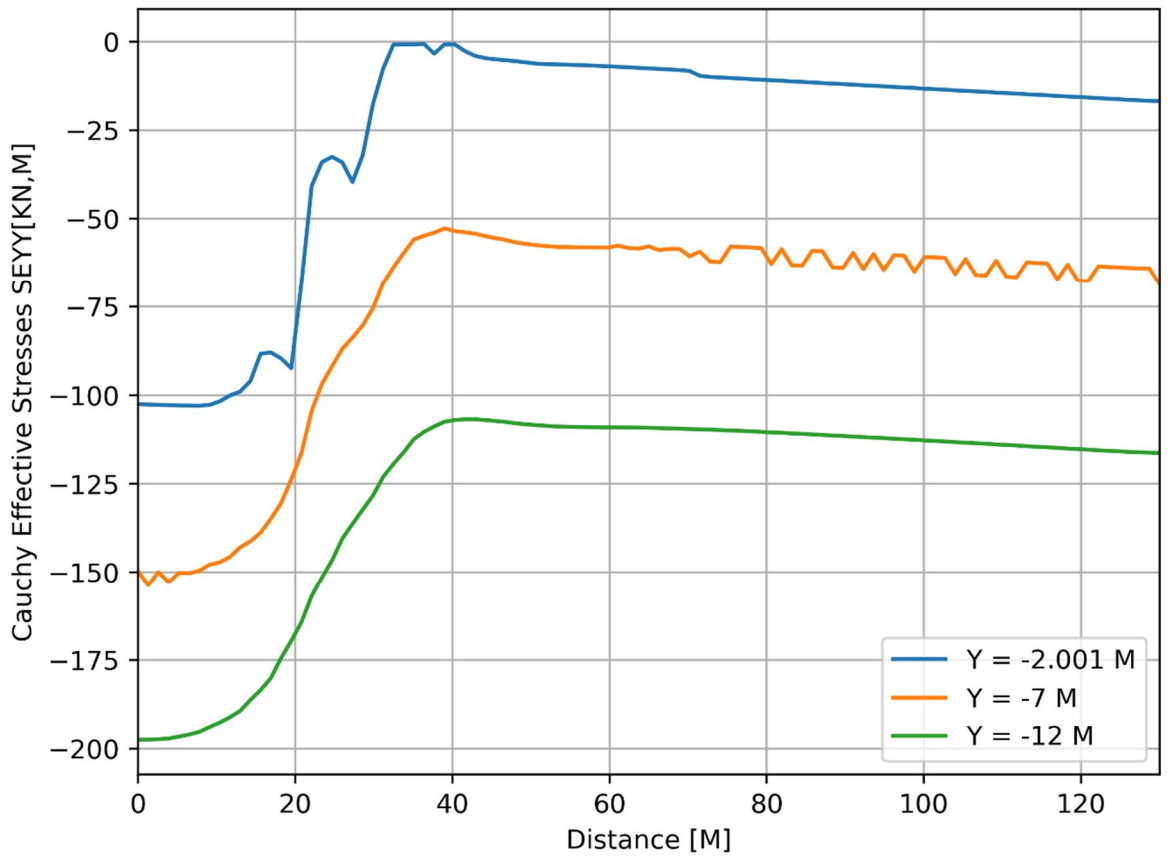


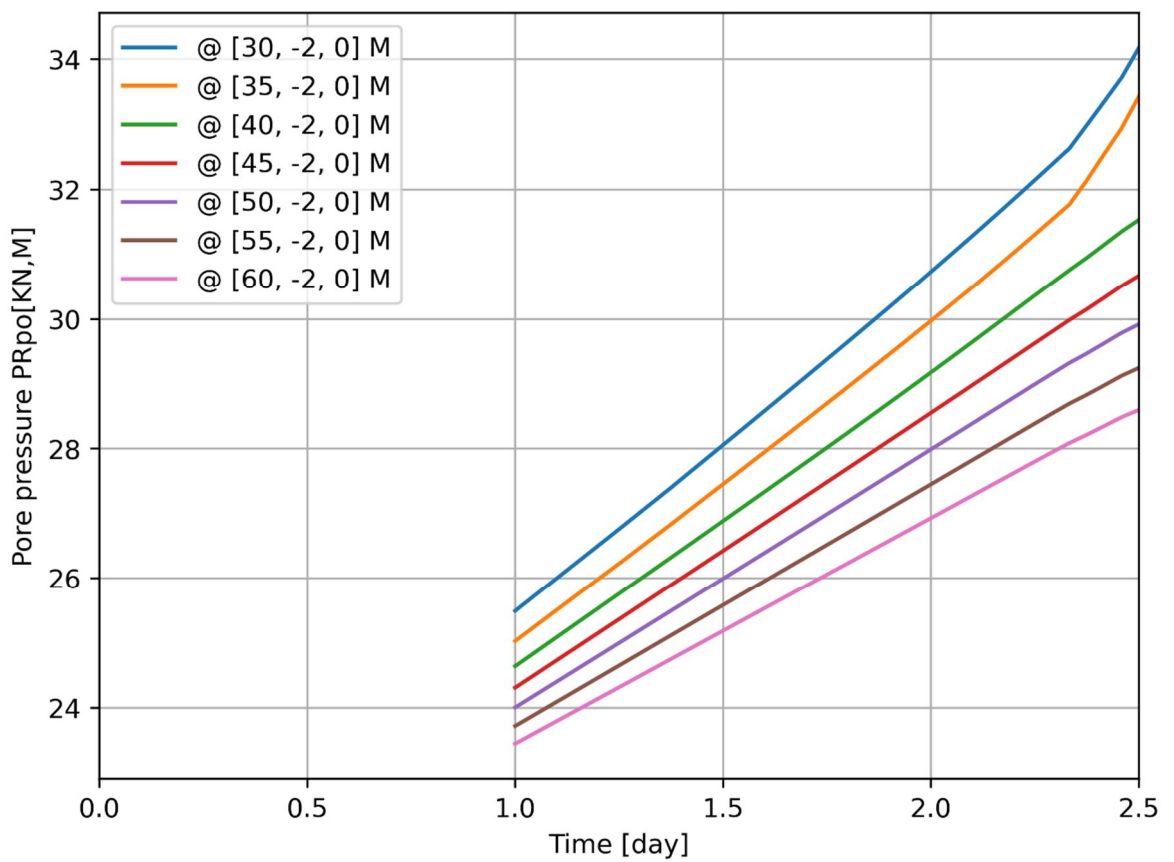
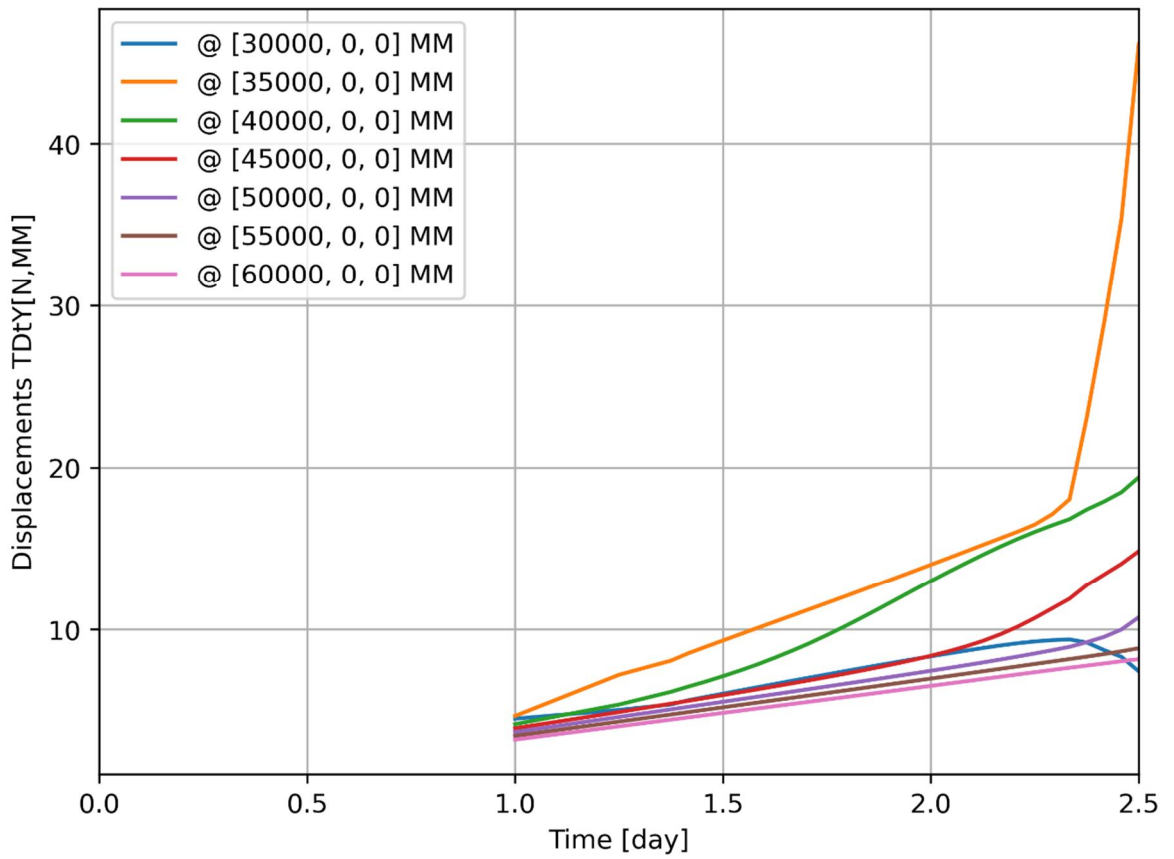
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.06kN/m<sup>2</sup> max: 24.33kN/m<sup>2</sup>

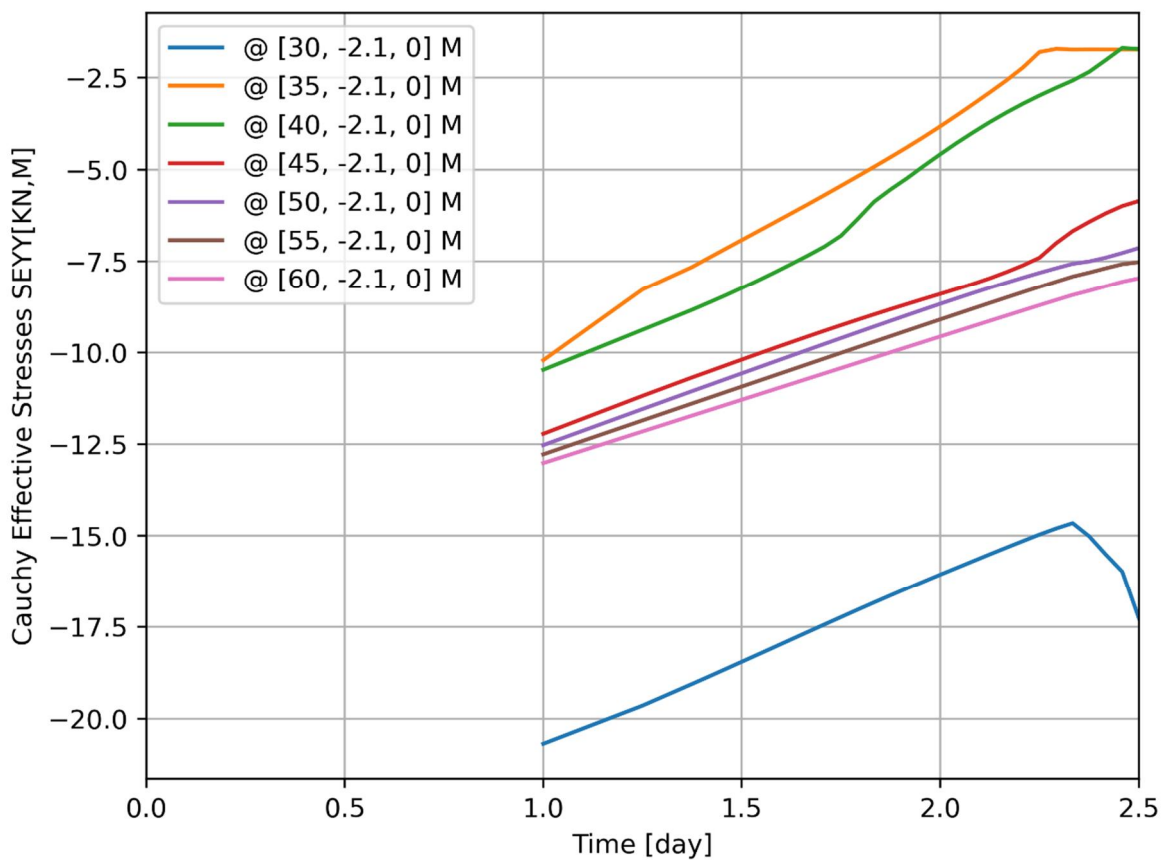
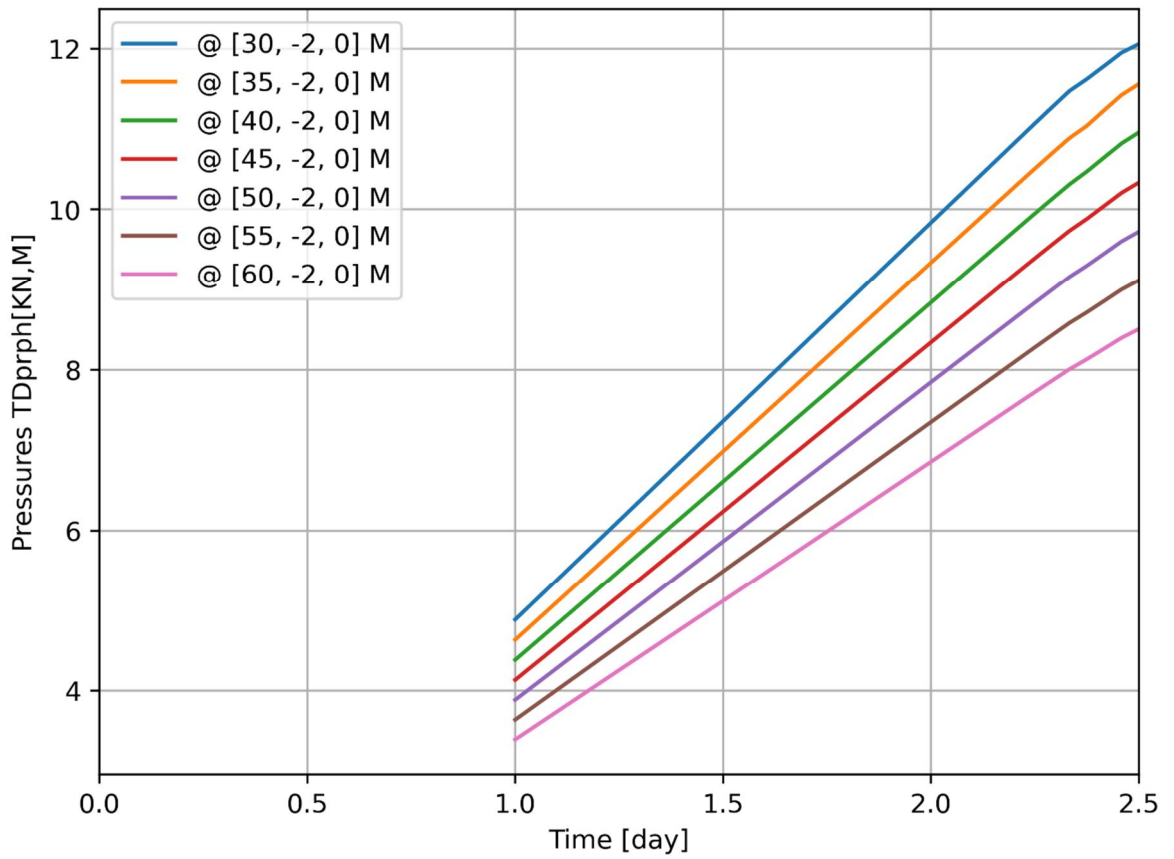


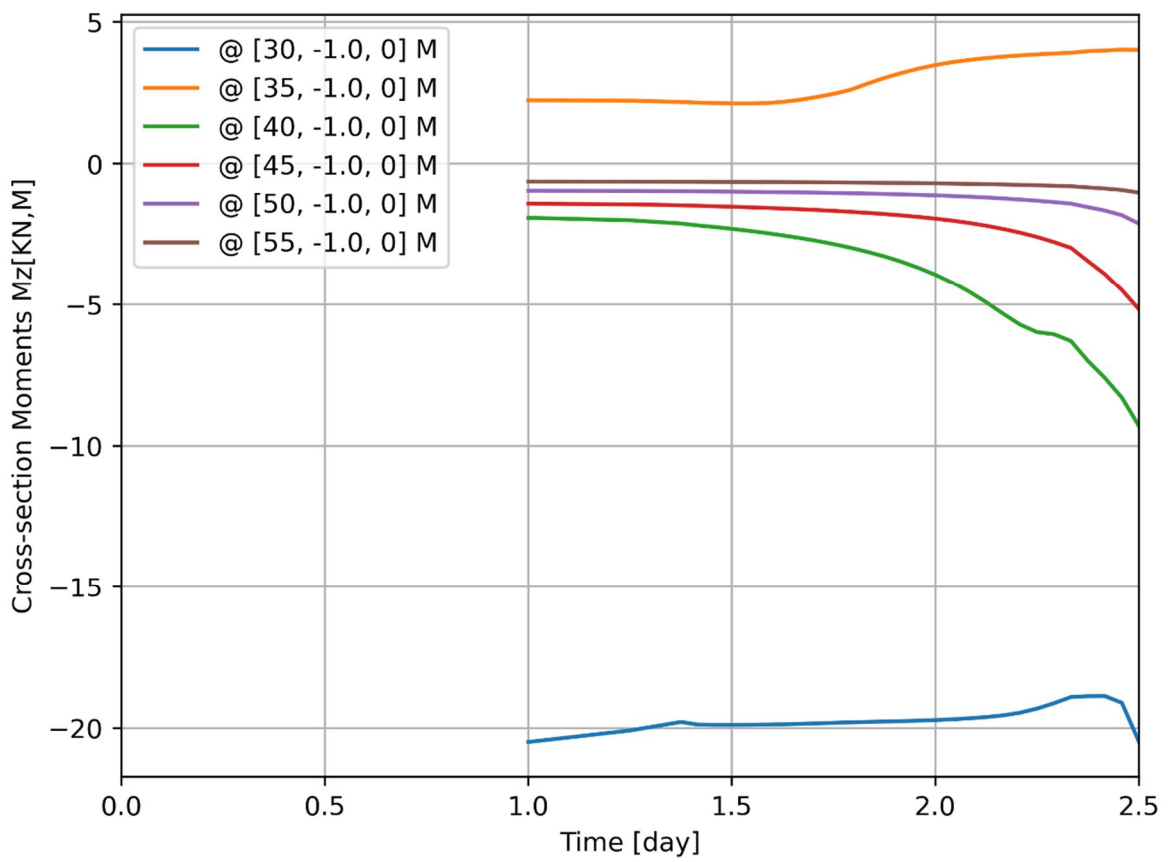
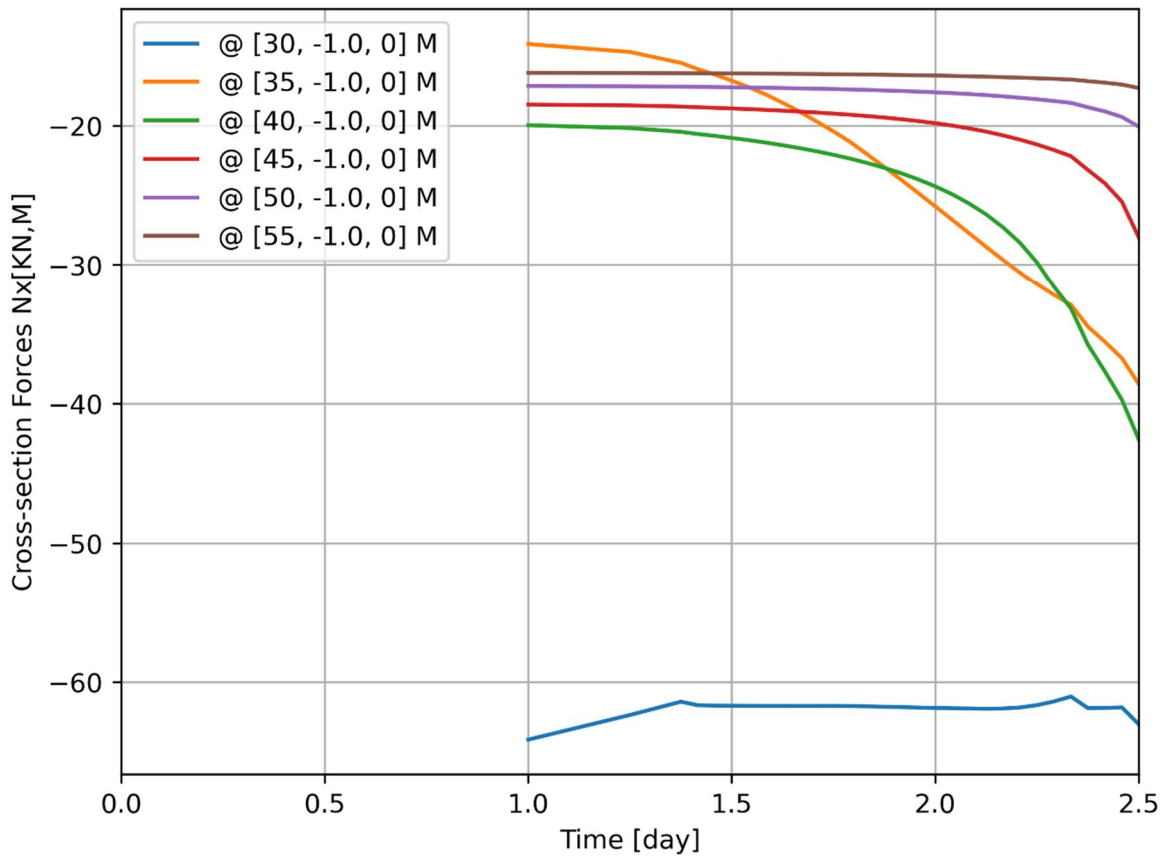
d=2\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -102.44kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







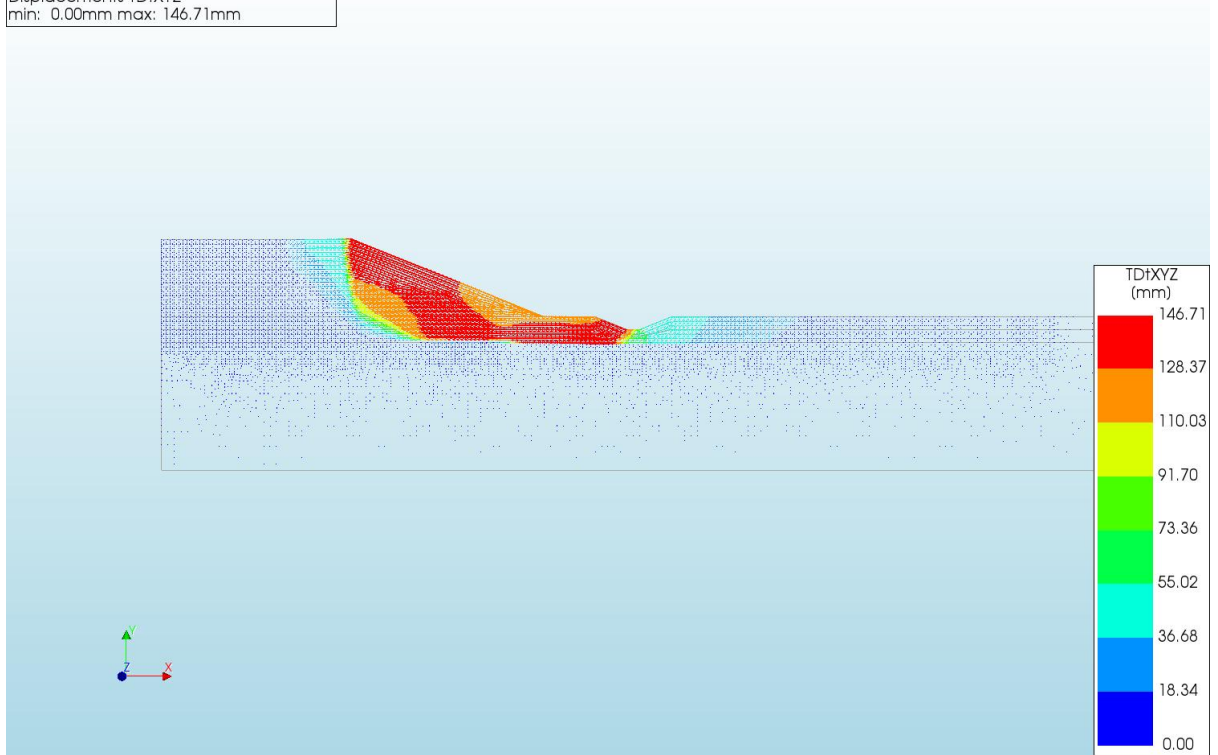




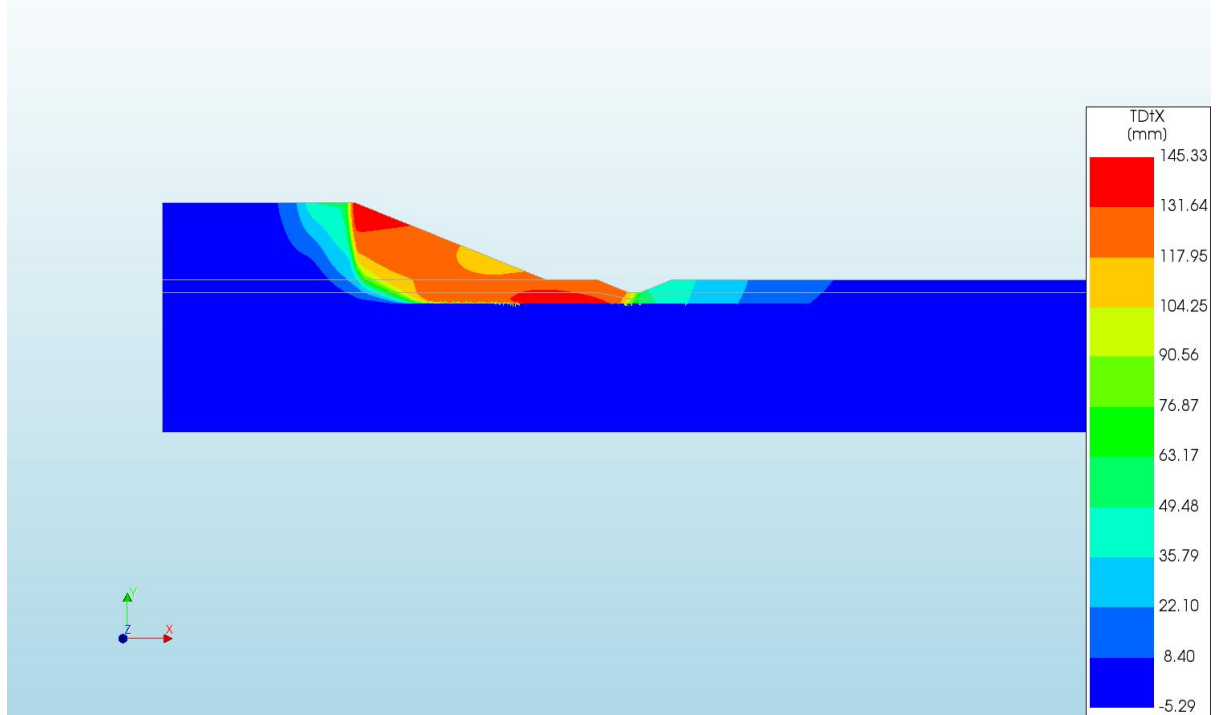
A.2.31

'Output\_d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818'

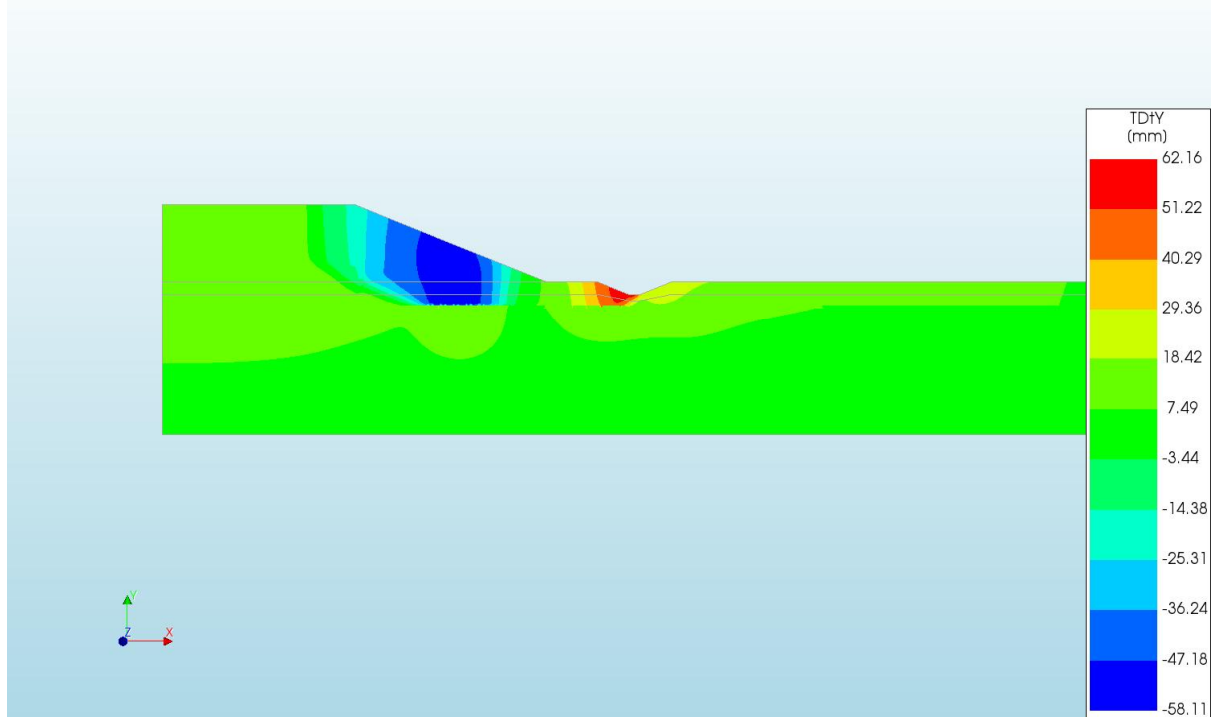
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 146.71mm



d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Displacements TDtX  
min: -5.29mm max: 145.33mm



d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Displacements TDtY  
min: -58.11mm max: 62.16mm

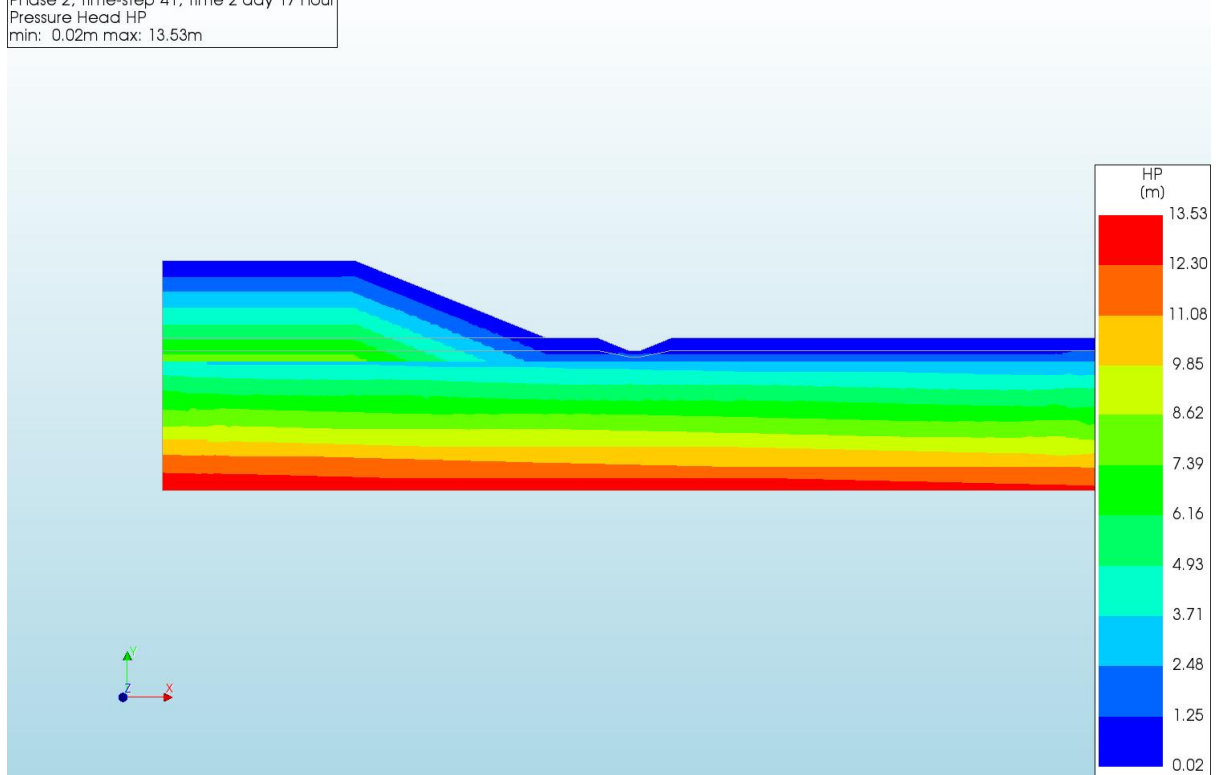




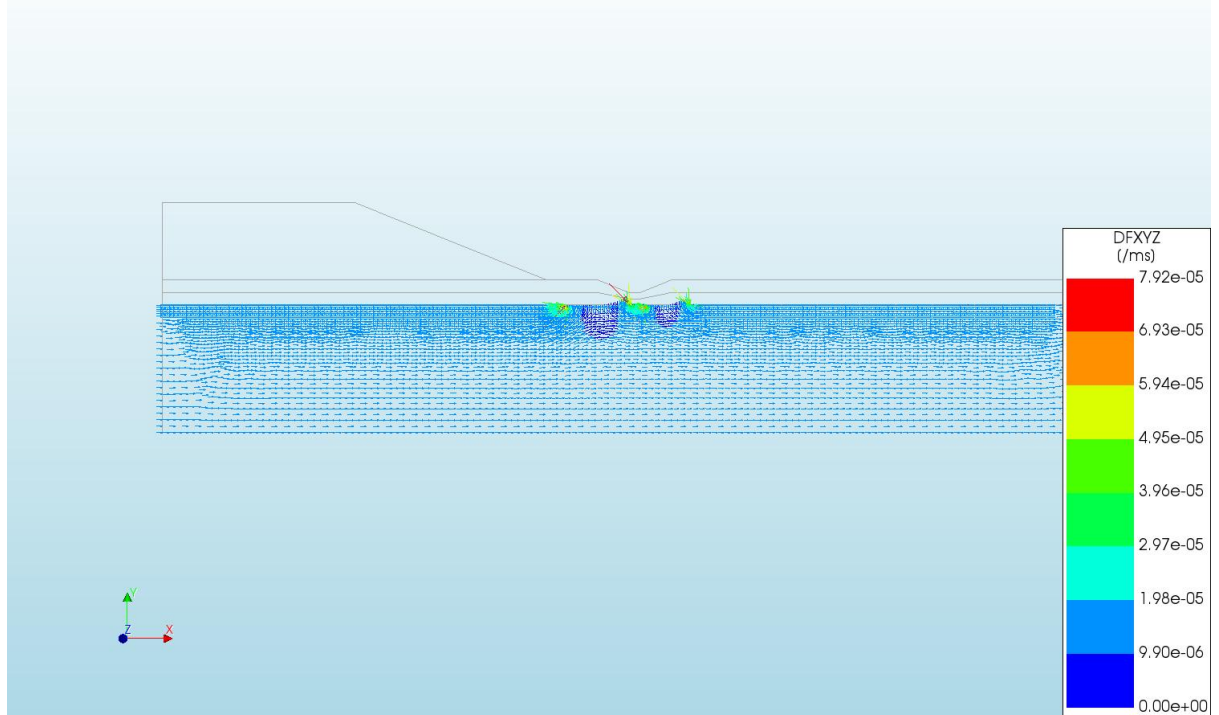
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 17.45kN/m<sup>2</sup>



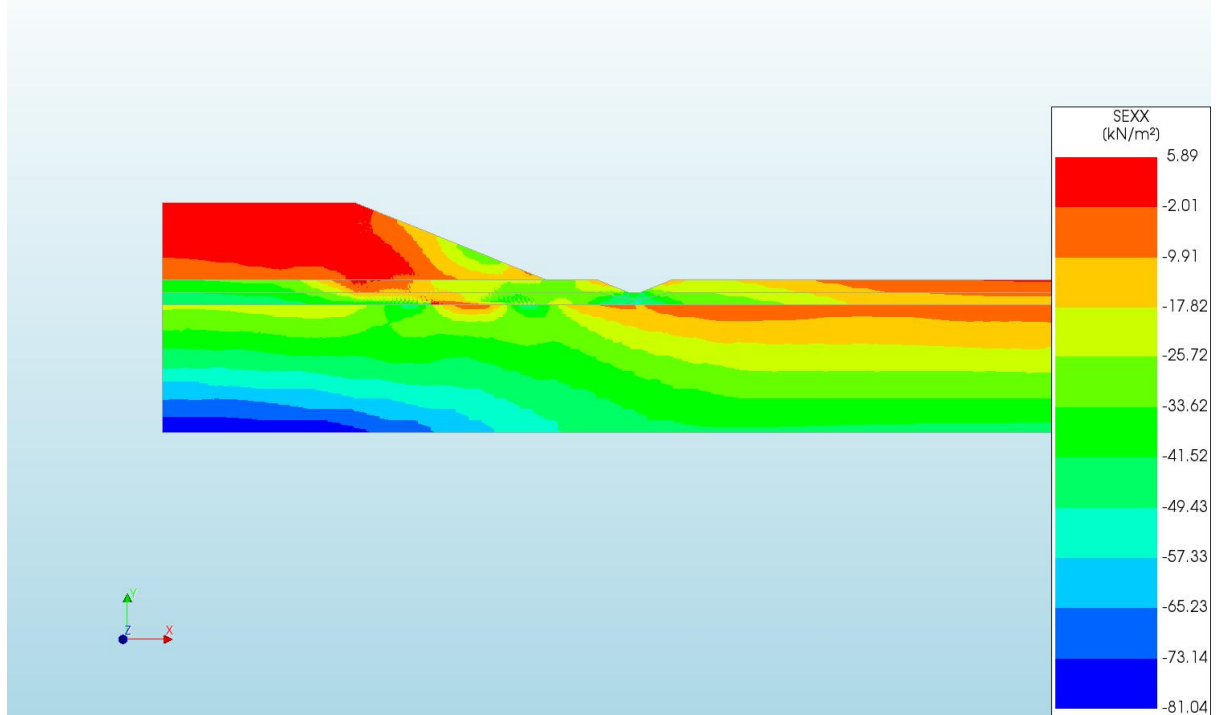
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.53m



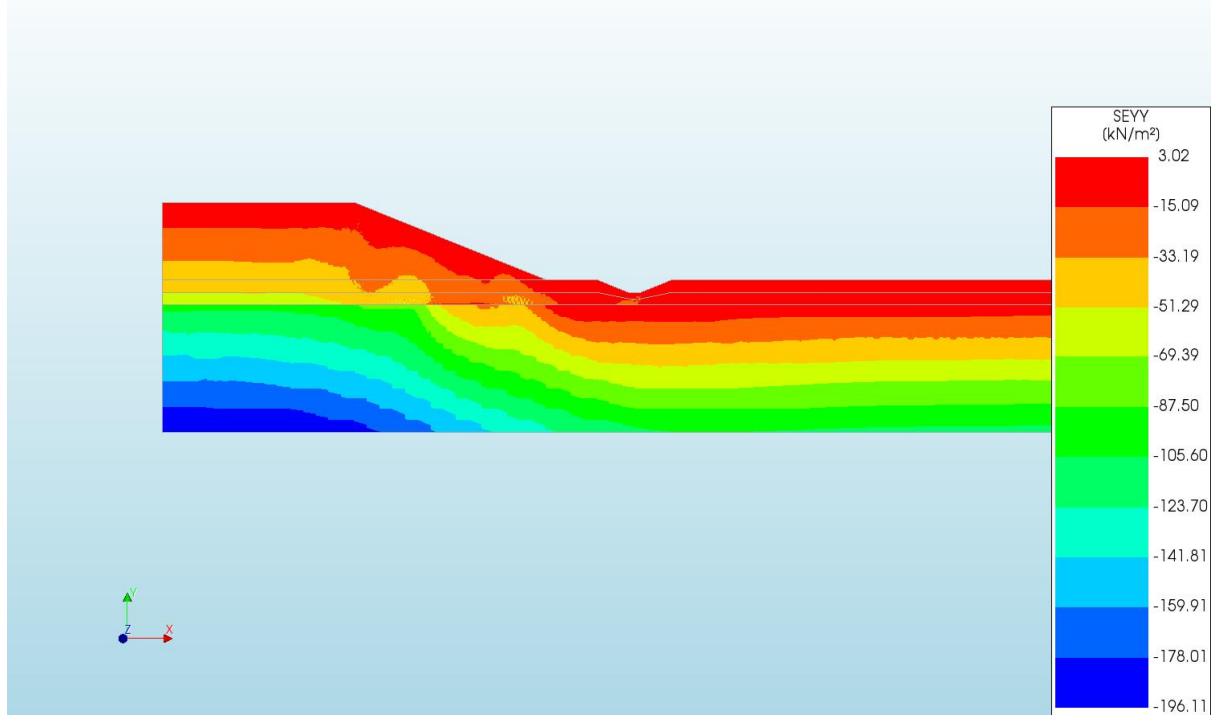
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 7.92e-05/ms



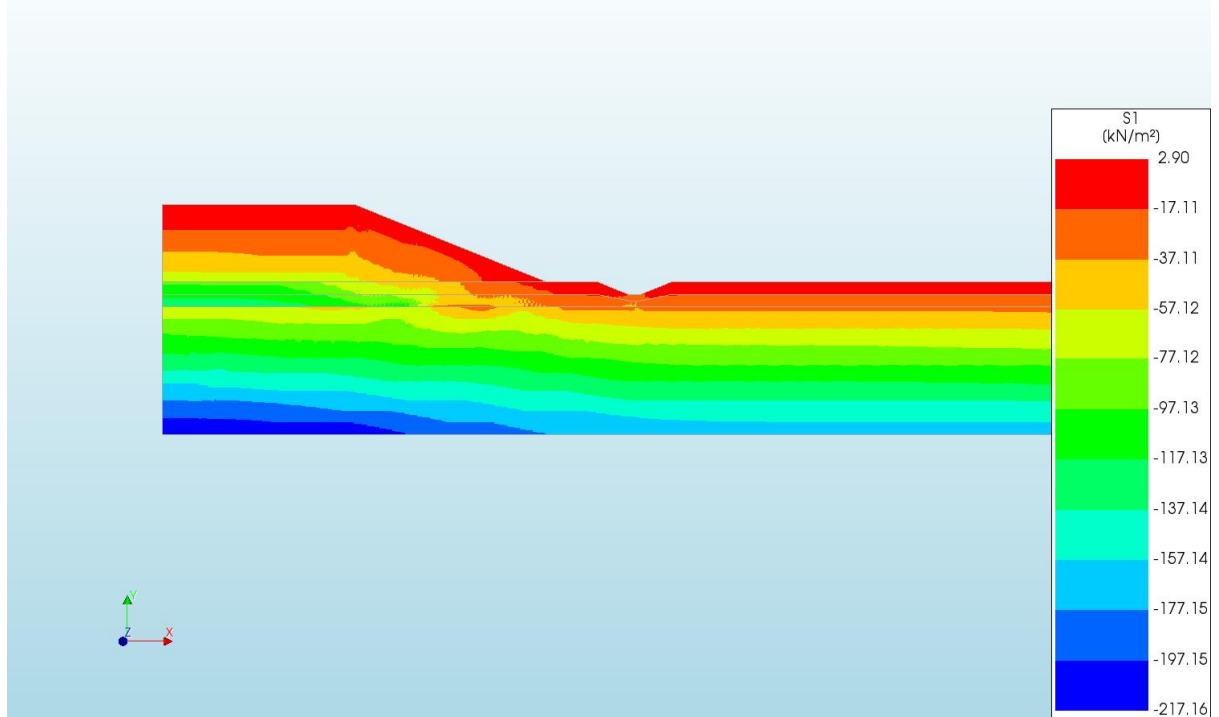
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -81.04kN/m<sup>2</sup> max: 5.89kN/m<sup>2</sup>



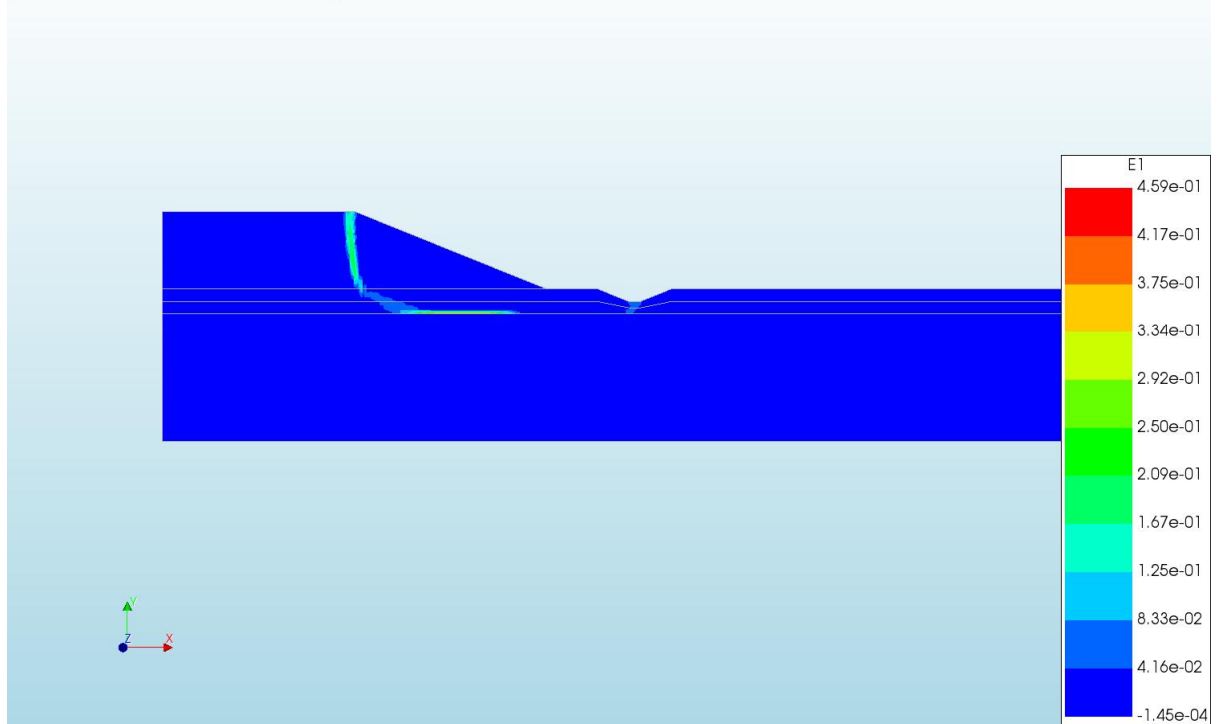
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -196.11kN/m<sup>2</sup> max: 3.02kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Cauchy Total Stresses S1  
min: -217.16kN/m<sup>2</sup> max: 2.90kN/m<sup>2</sup>



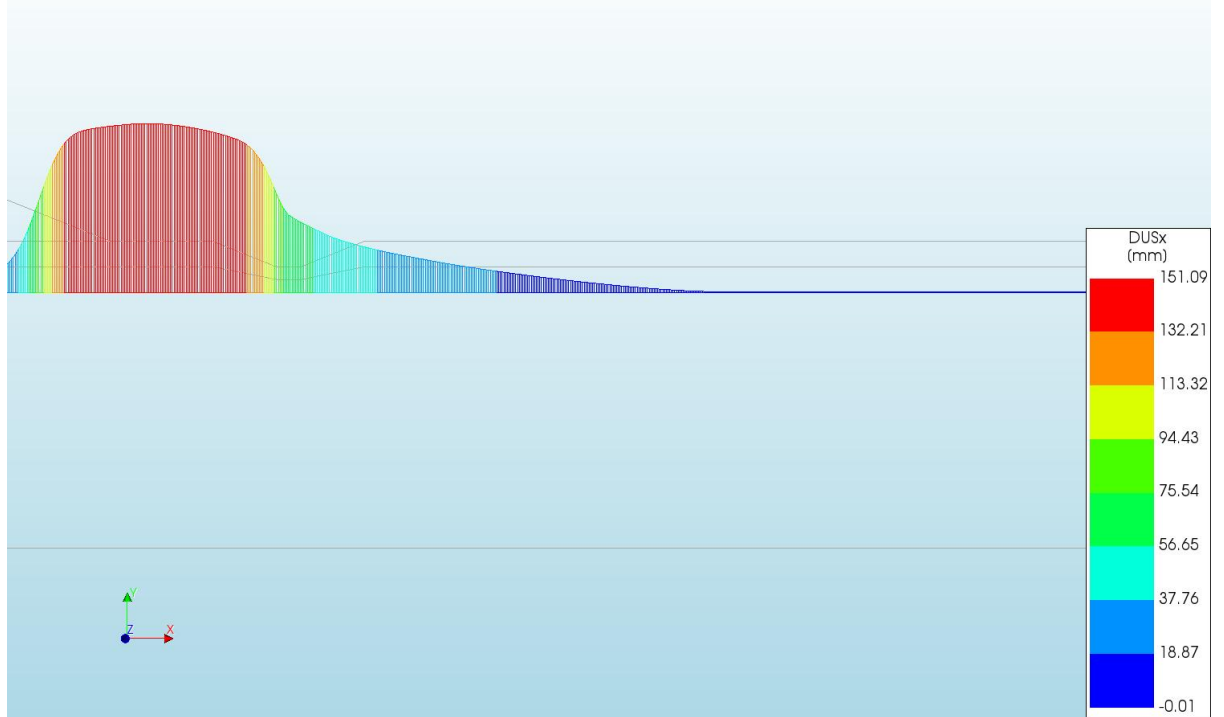
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Total Strains E1  
min: -1.45e-04 max: 4.59e-01



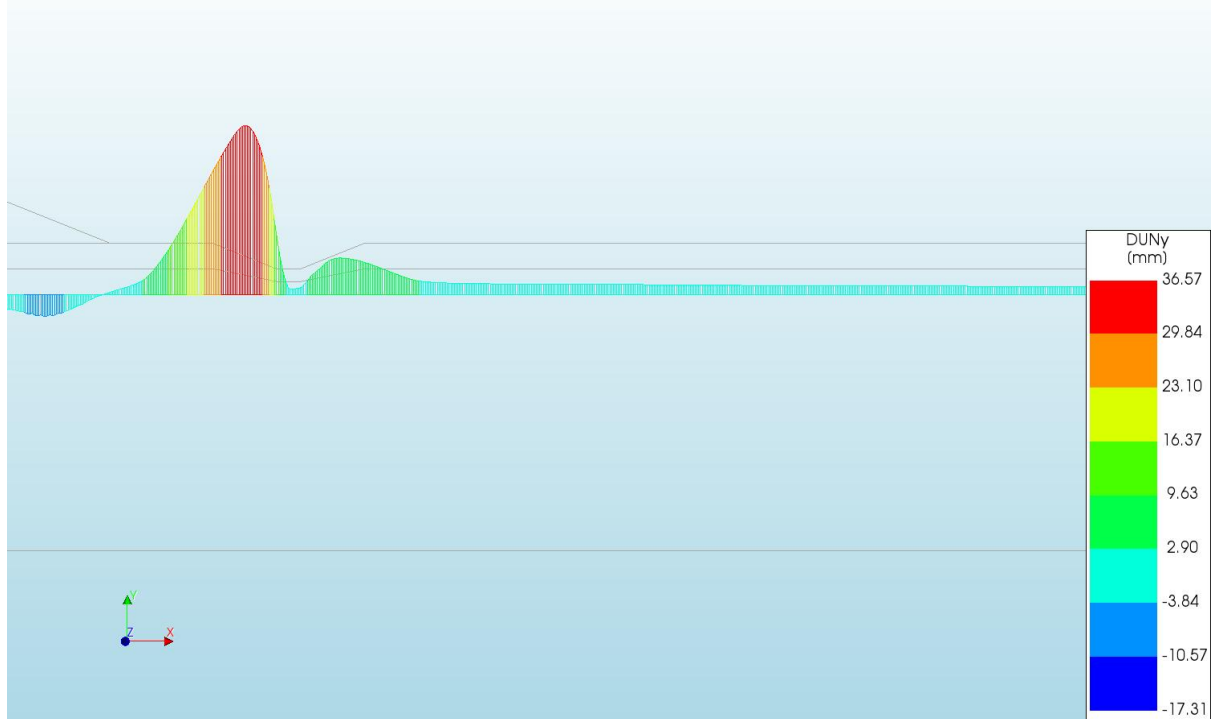
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.80e-01



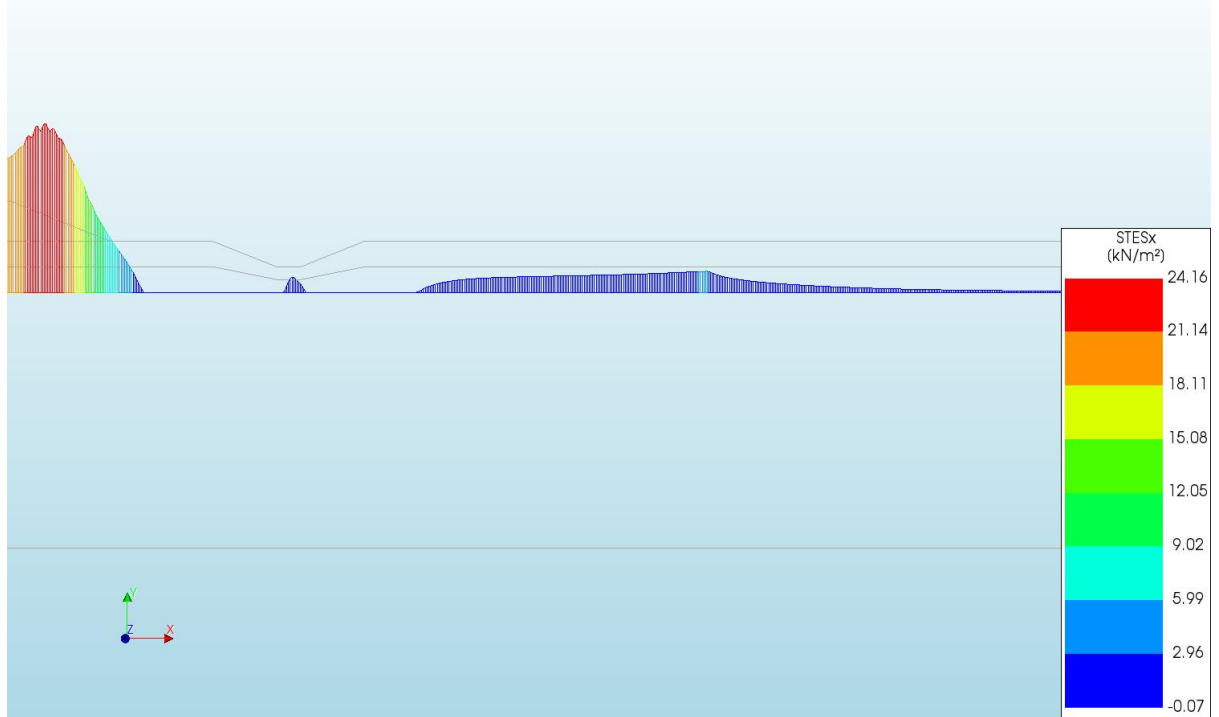
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 151.09mm



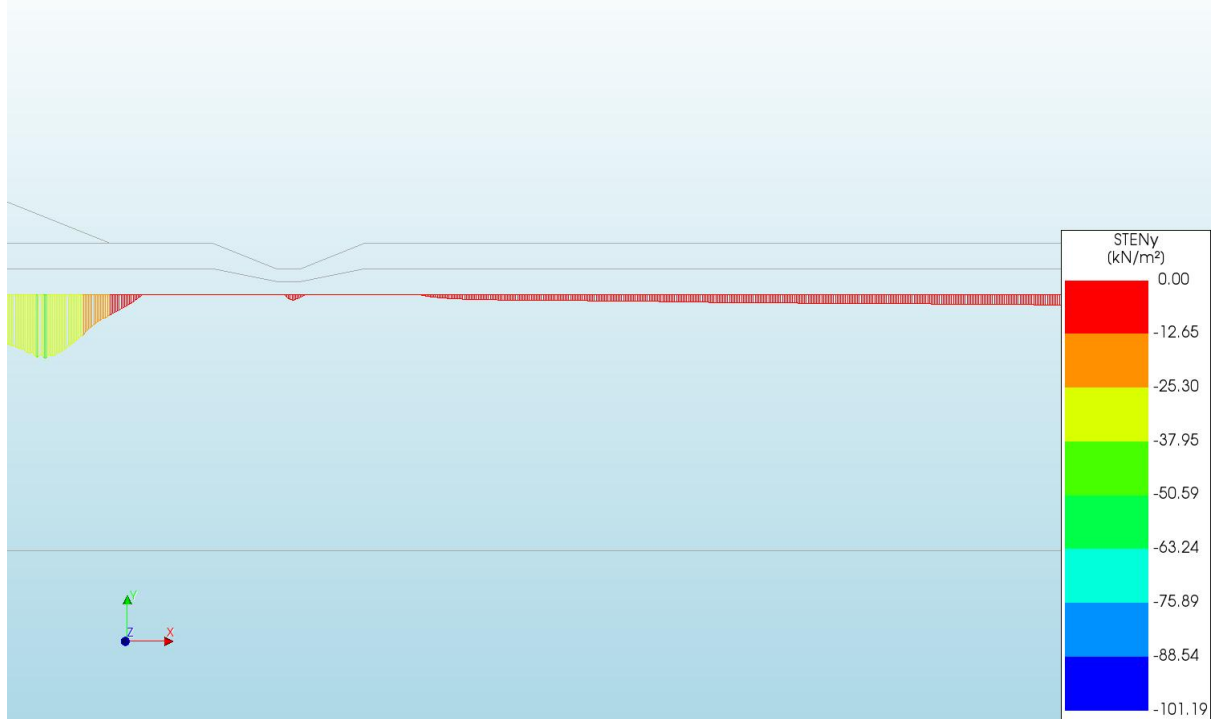
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -17.31mm max: 36.57mm

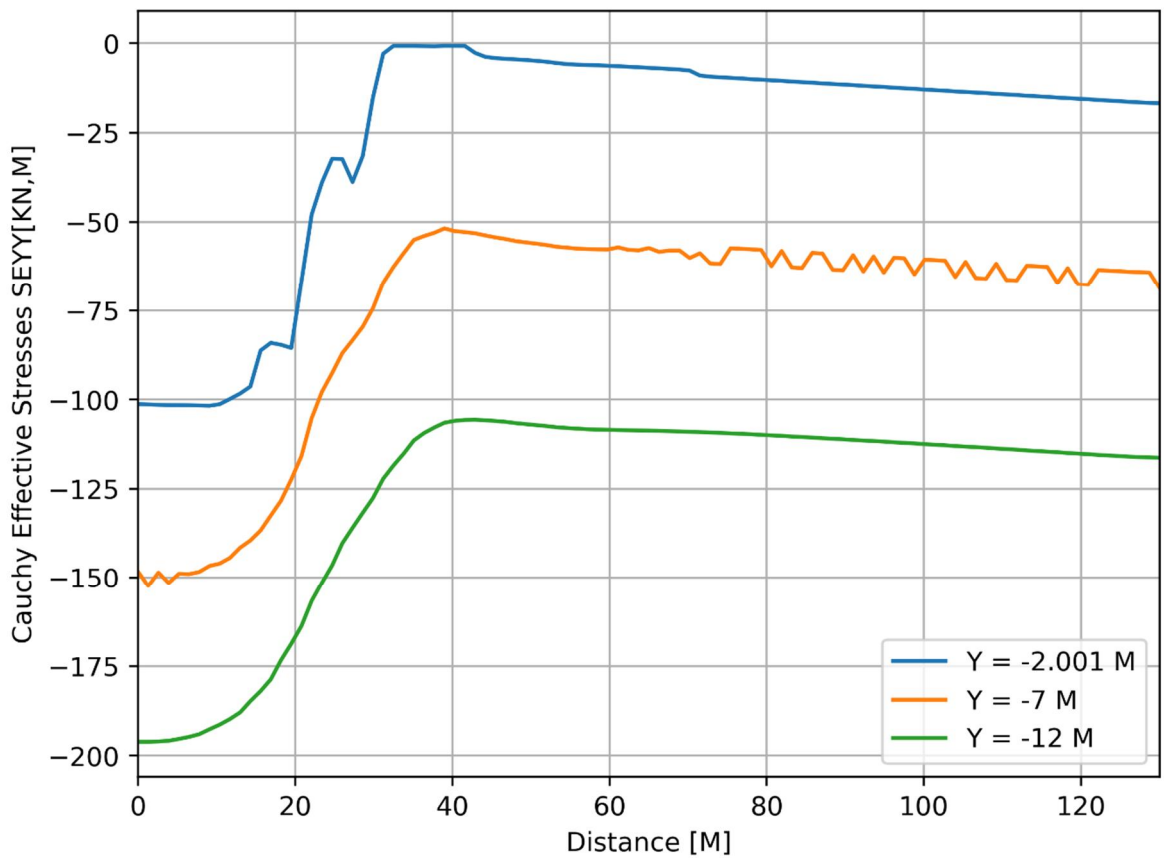
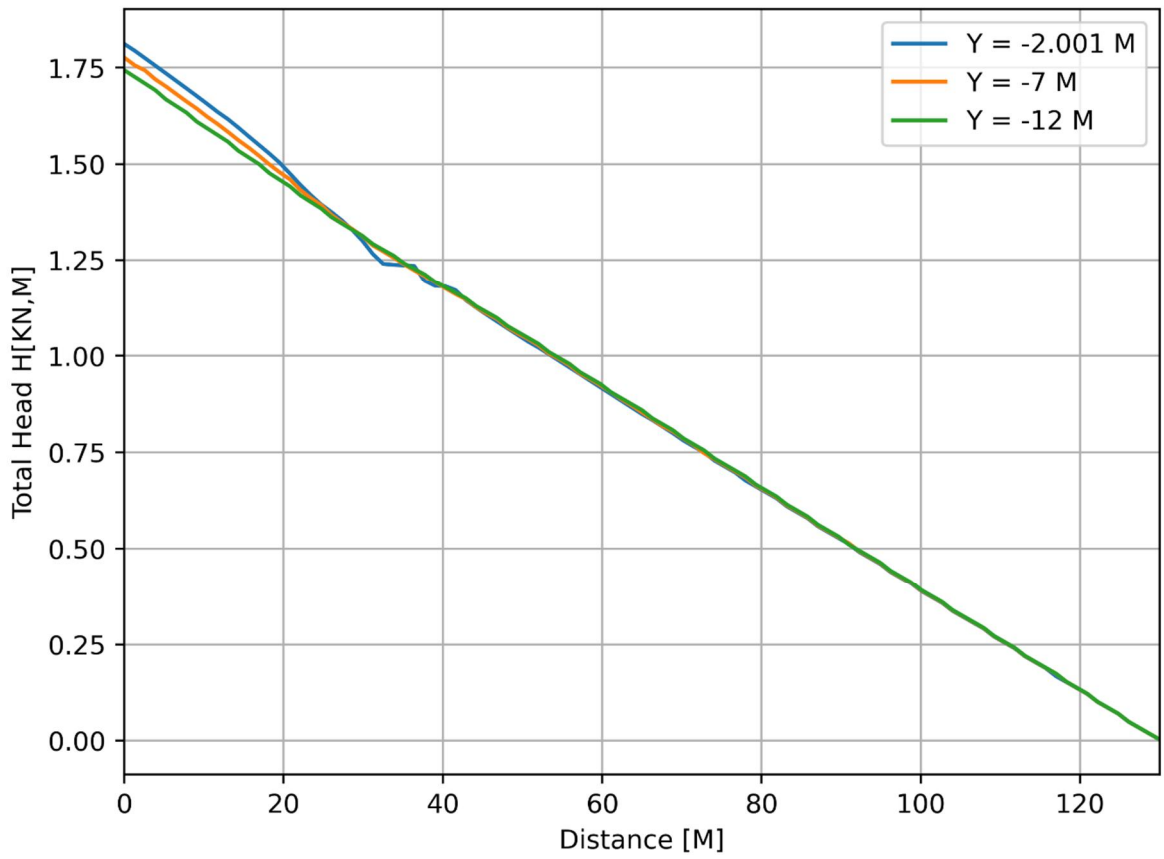


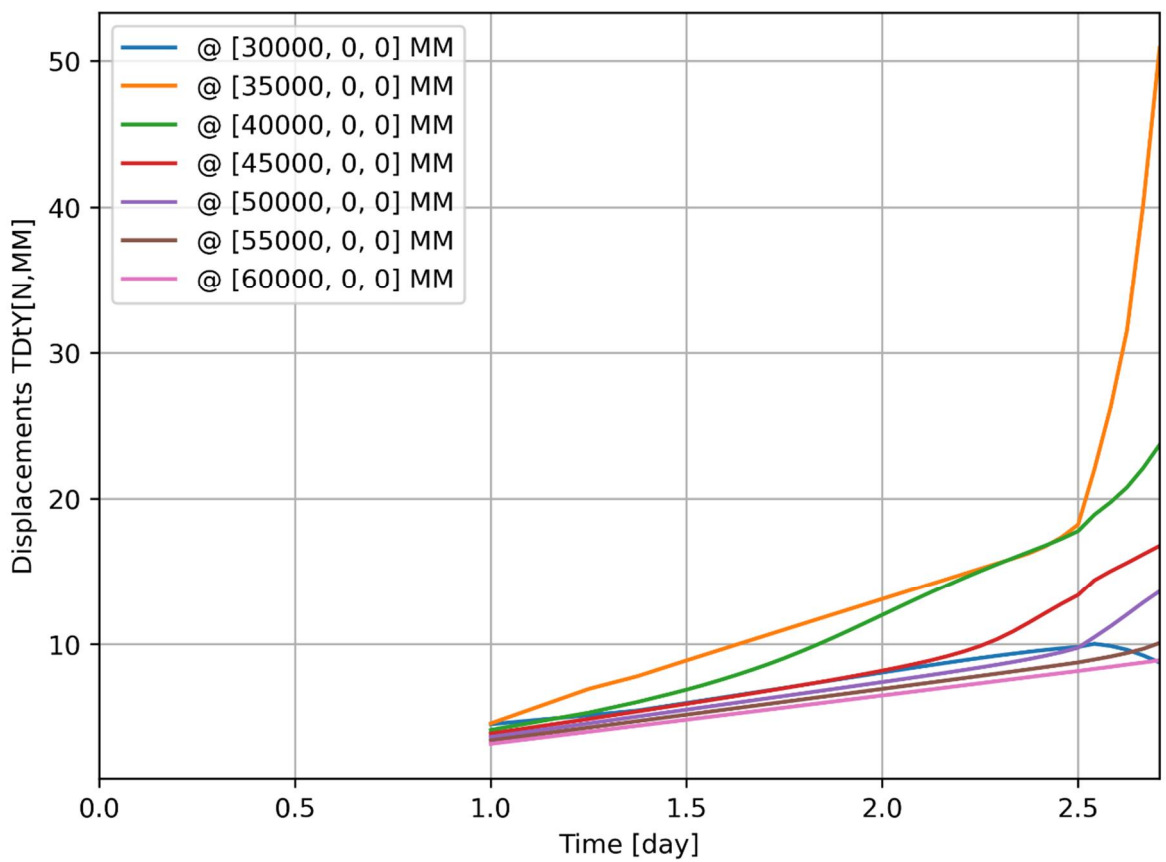
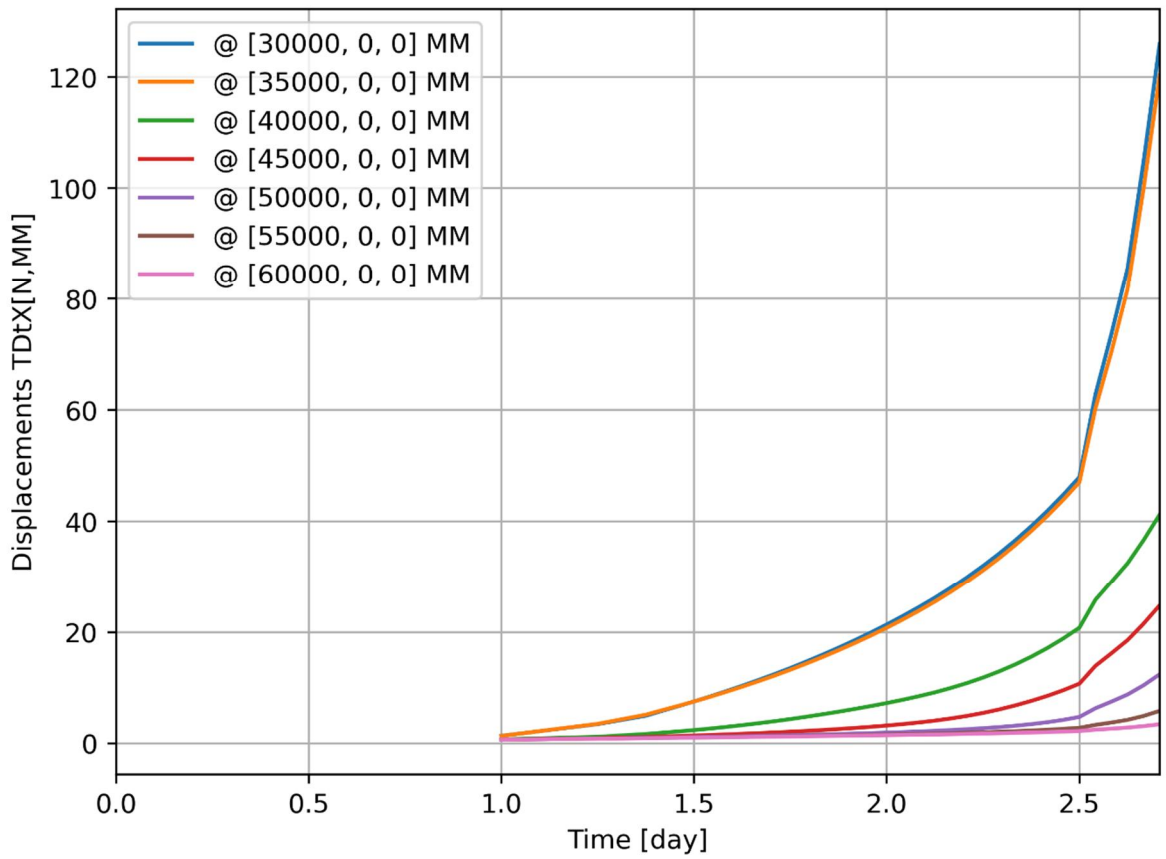
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.07kN/m<sup>2</sup> max: 24.16kN/m<sup>2</sup>



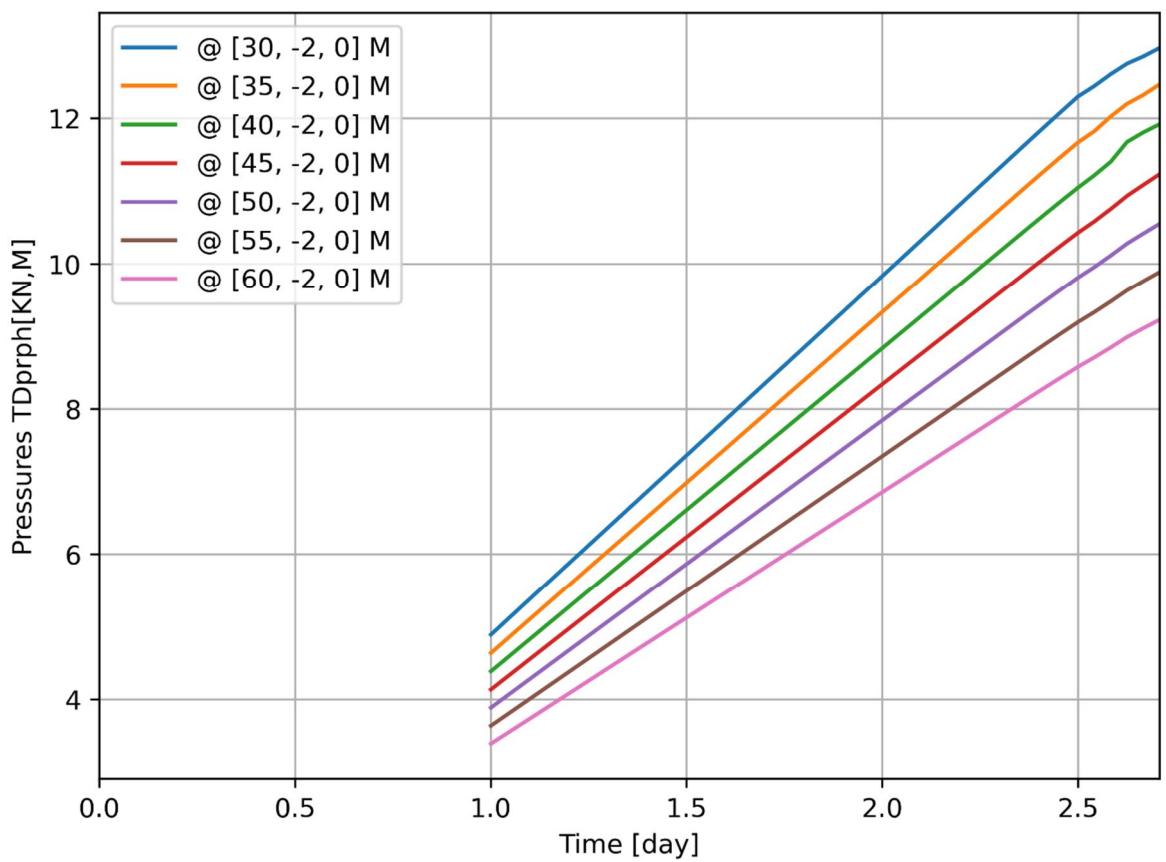
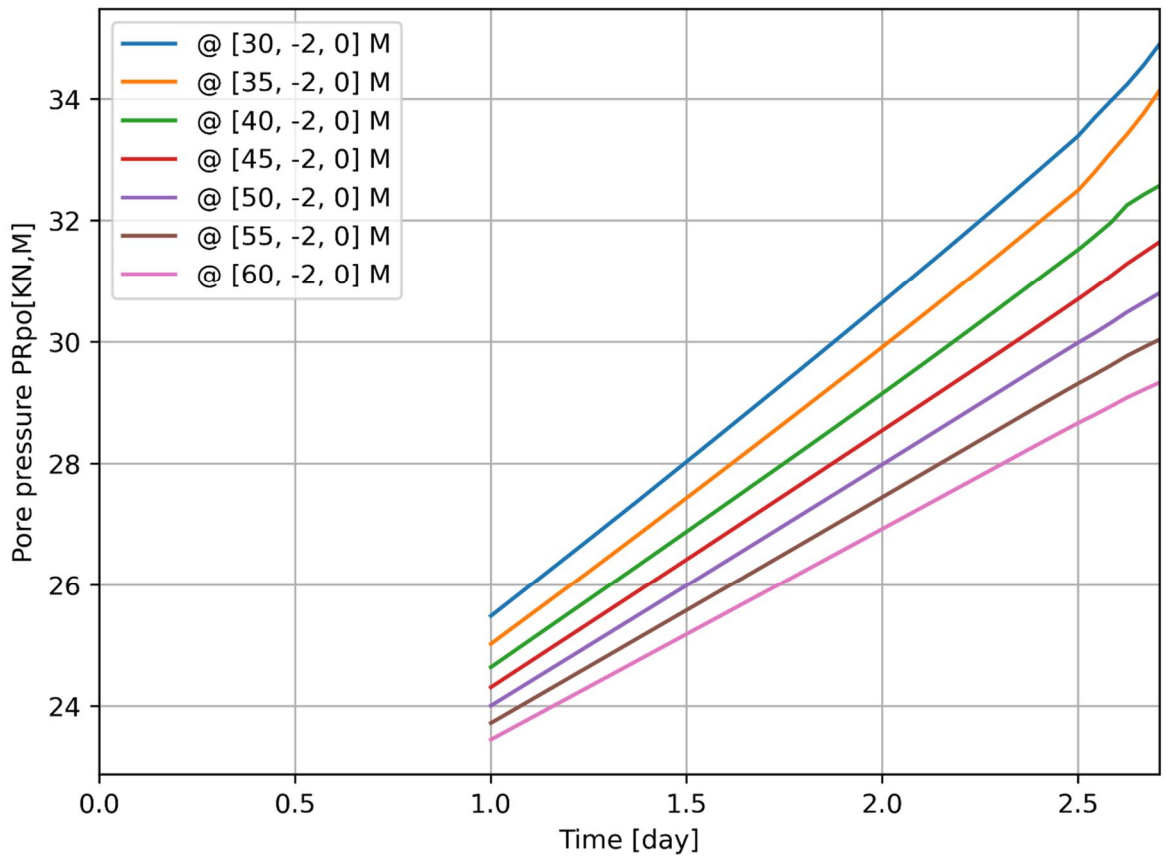
d=2\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=34\_20200818  
Phase 2, Time-step 41, Time 2 day 17 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -101.19kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

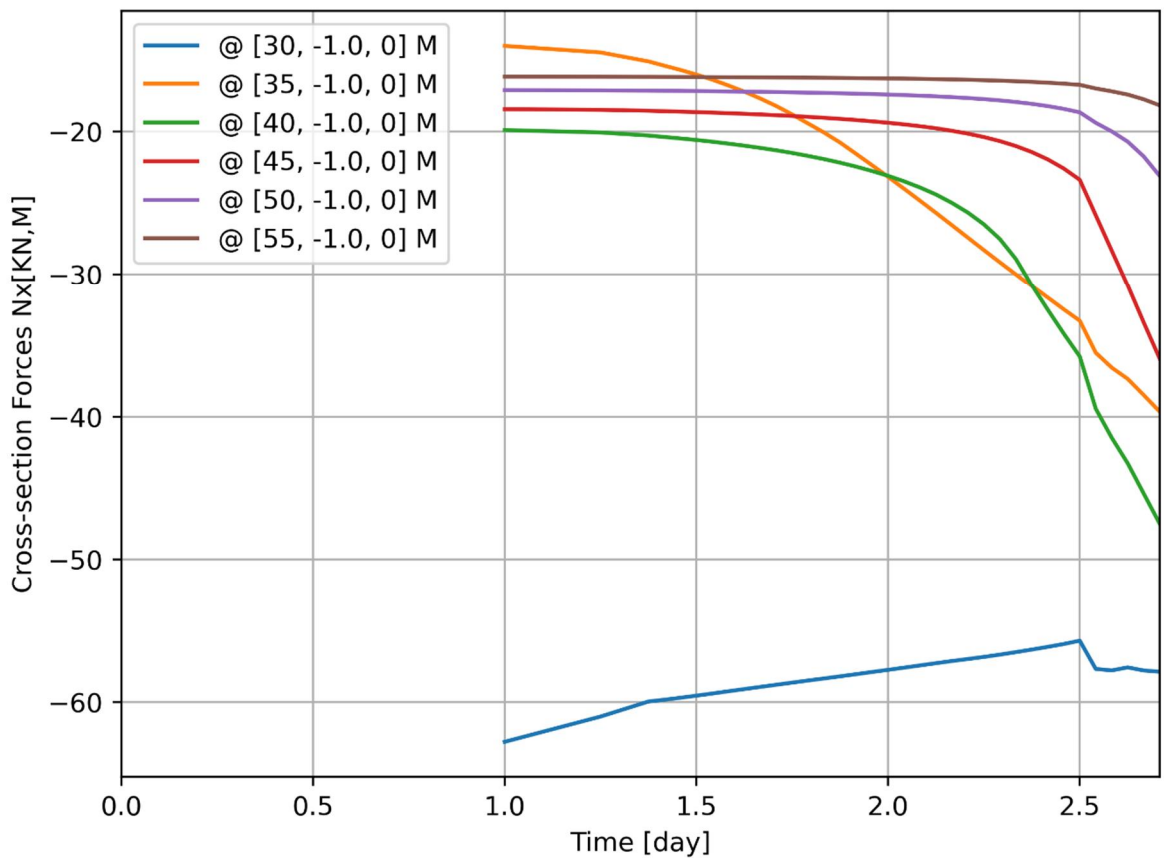
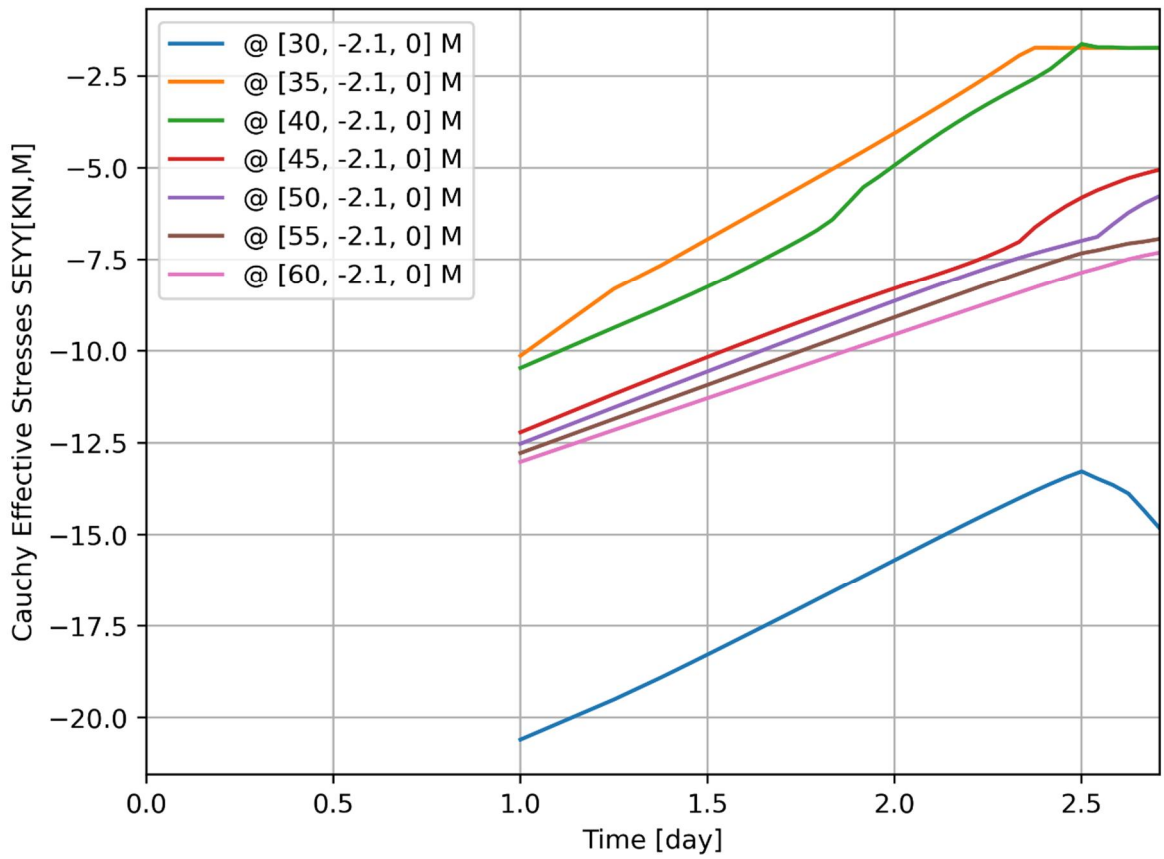


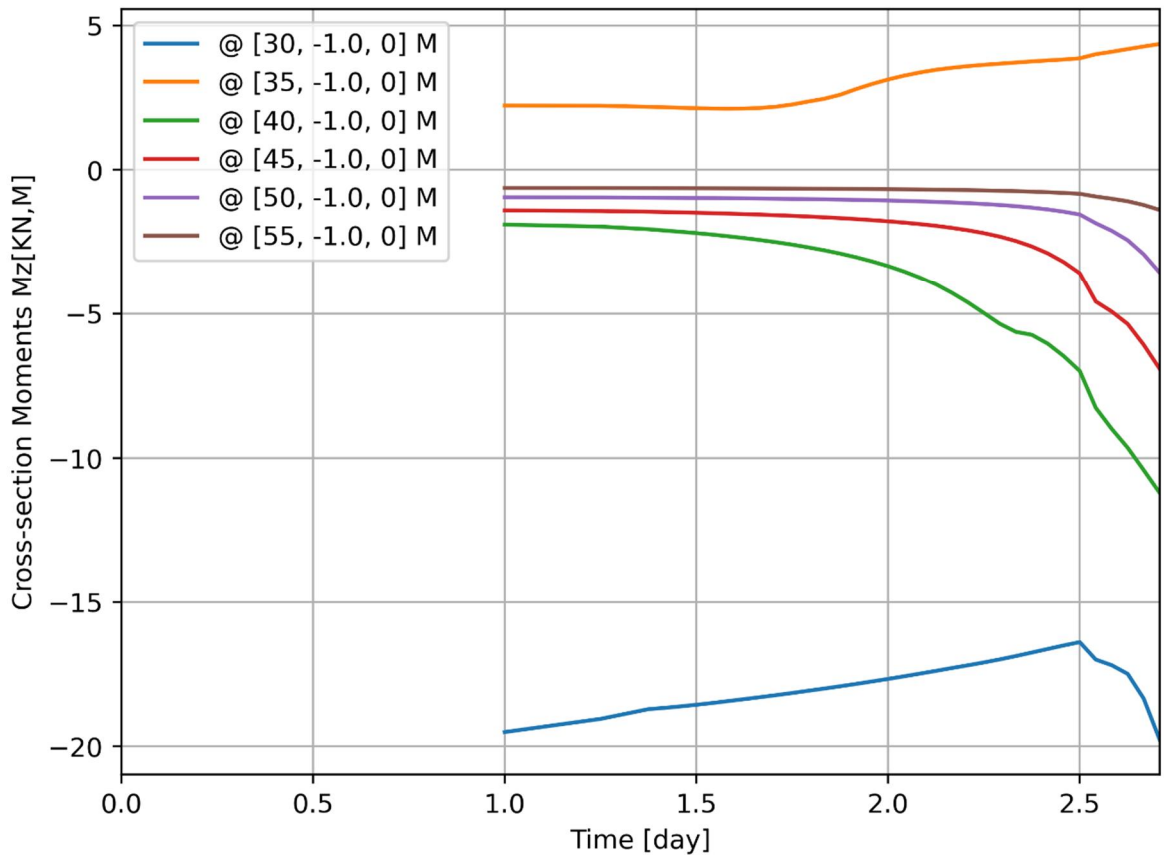










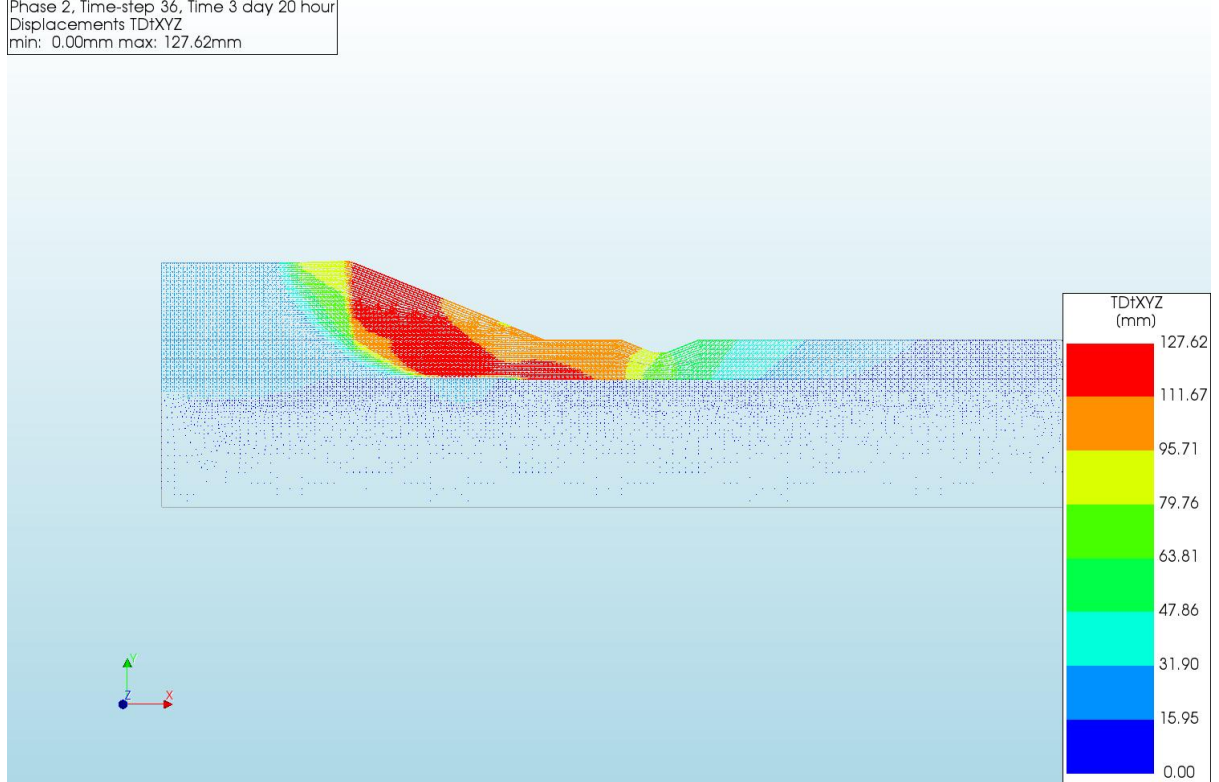


'Output\_d=3\_c=16\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818'

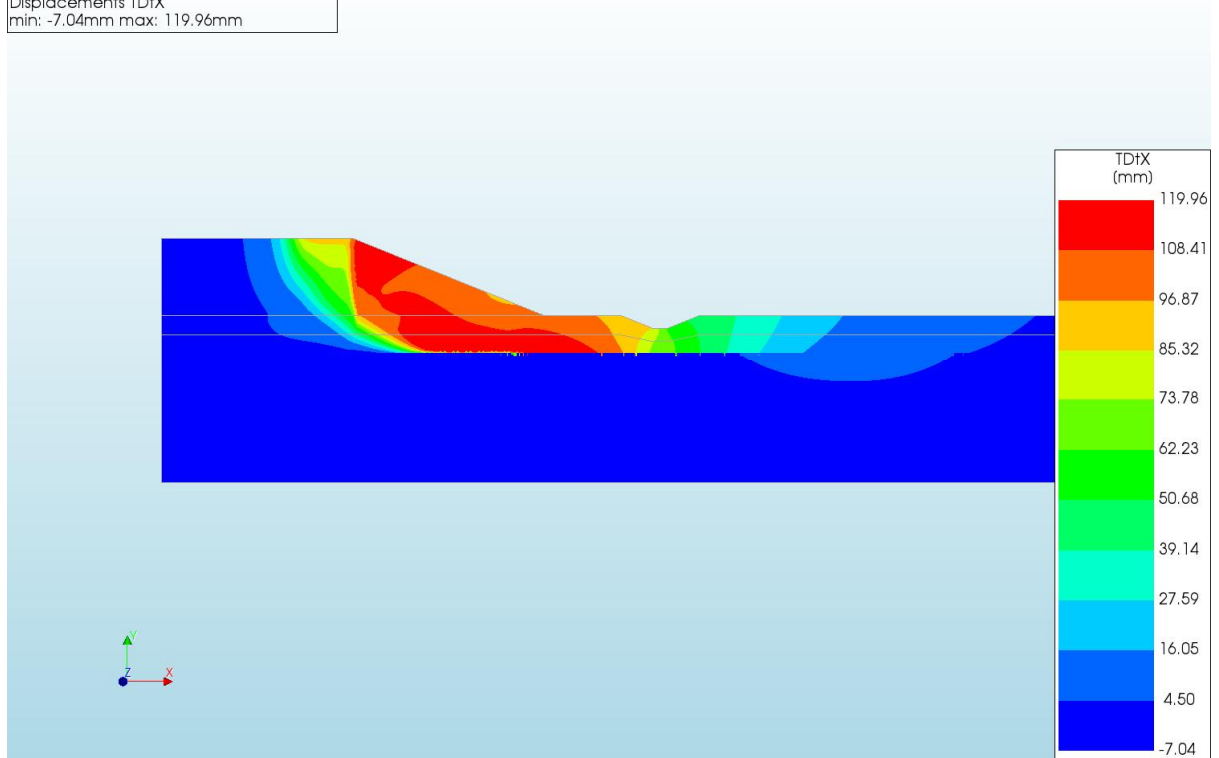
A.2.32

'Output d=3 c=17 E=3 k=1e-07 xs=36\_20200818'

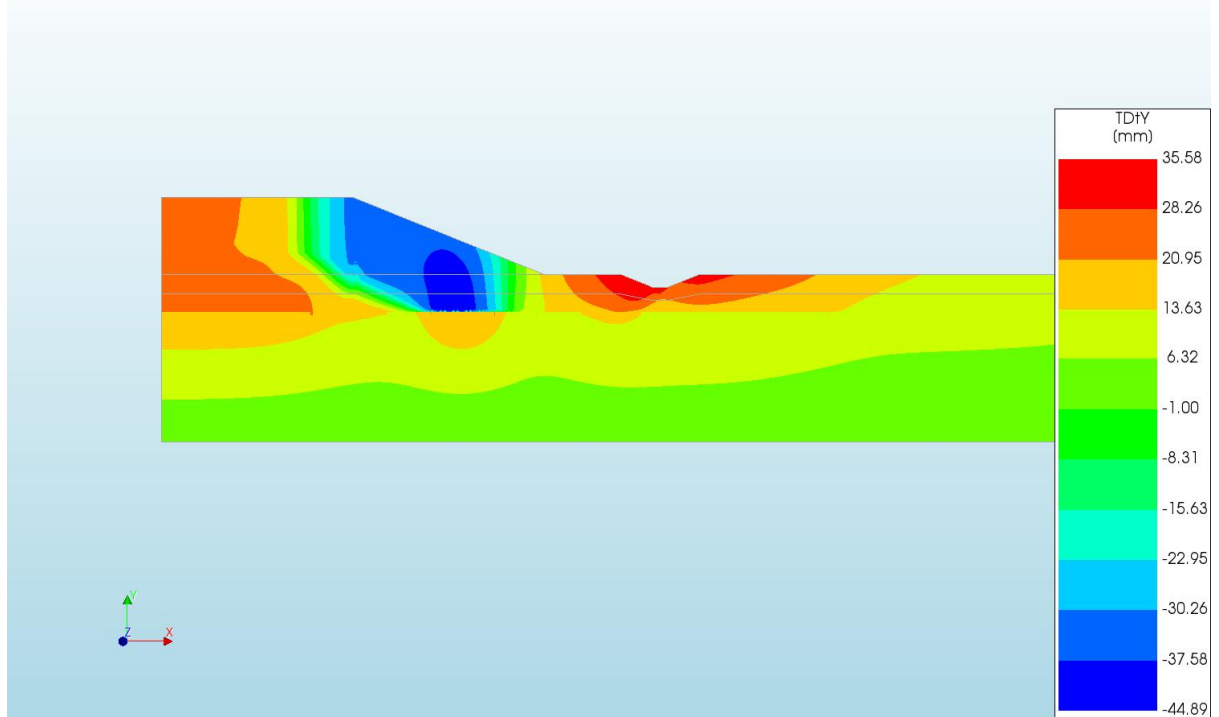
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 127.62mm



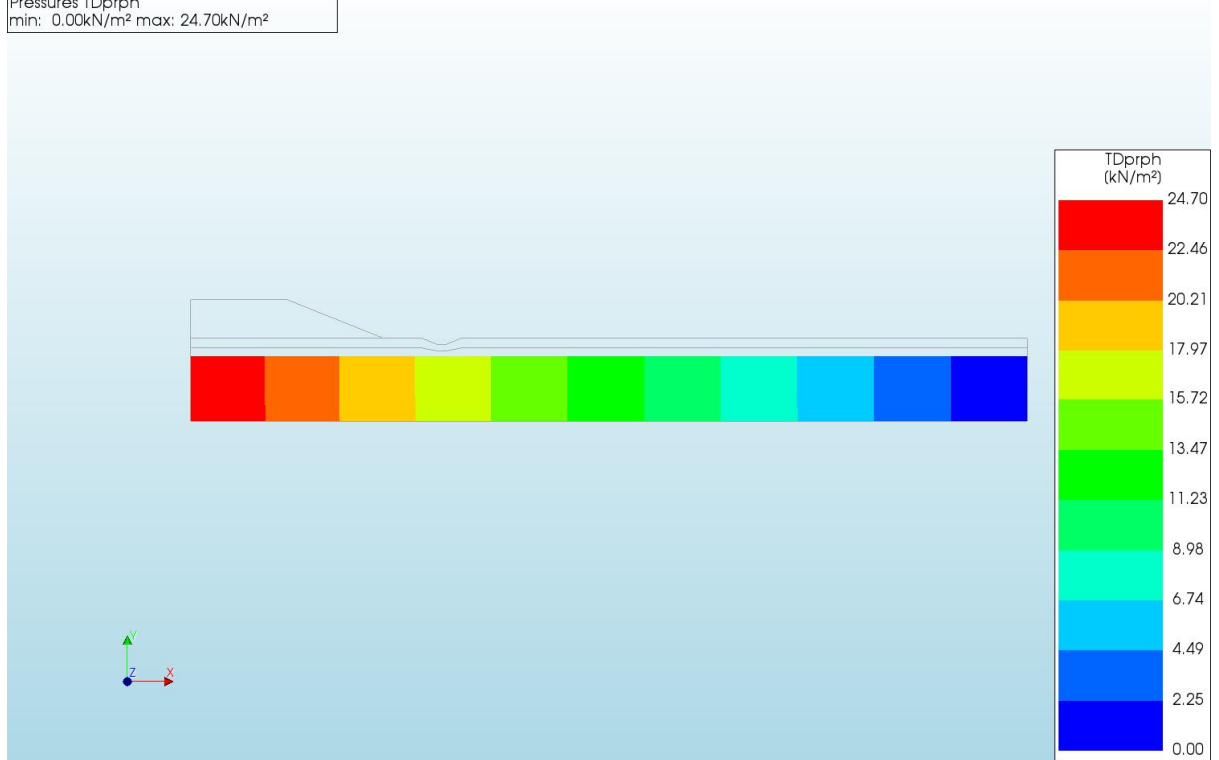
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Displacements TDtX  
min: -7.04mm max: 119.96mm



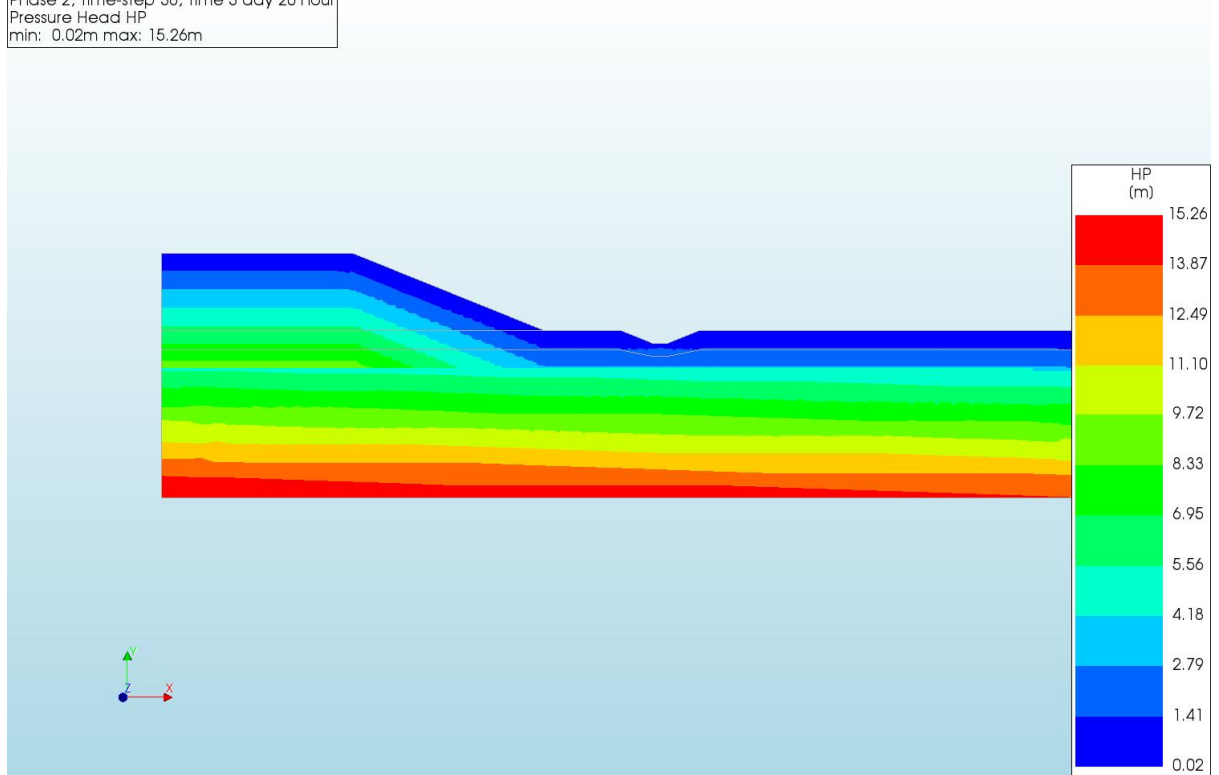
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Displacements TDtY  
min: -44.89mm max: 35.58mm



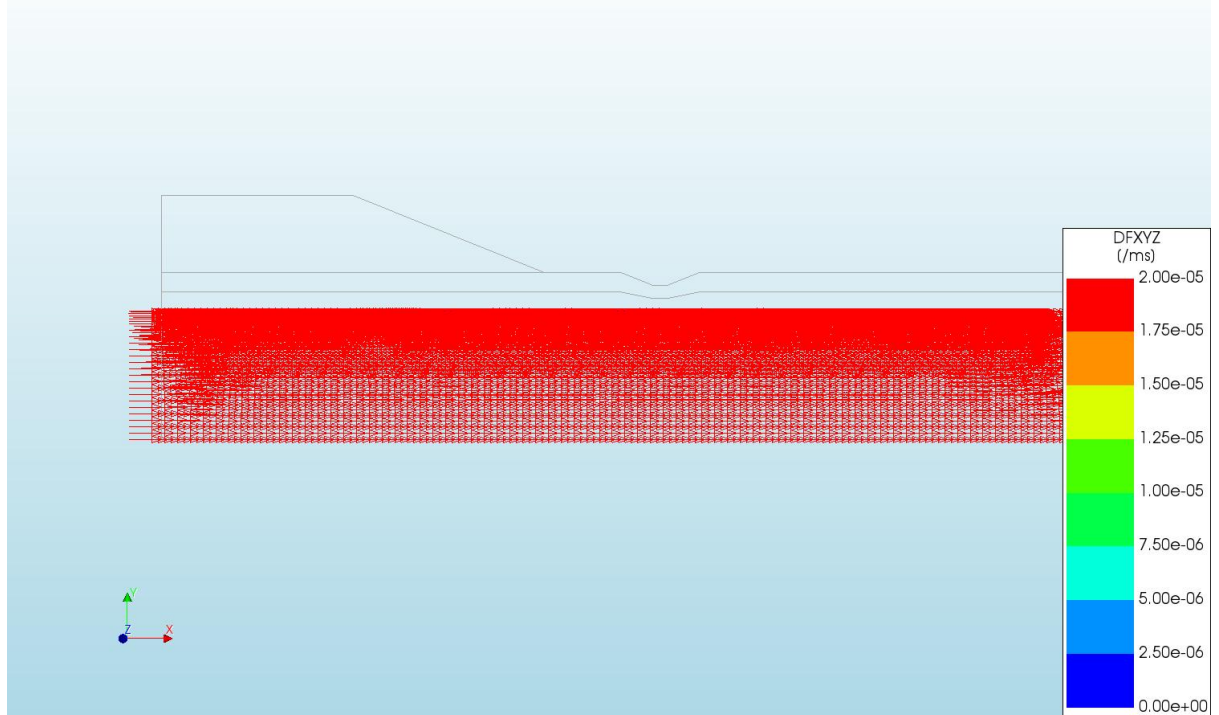
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 24.70kN/m<sup>2</sup>



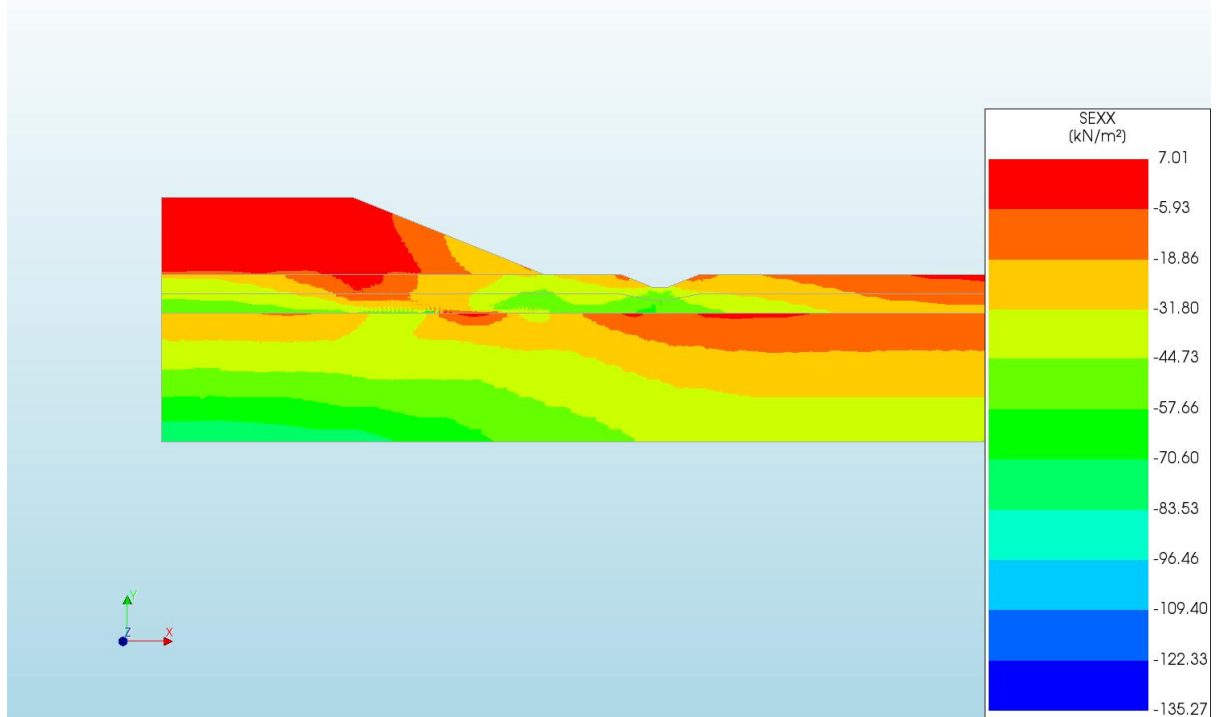
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.26m



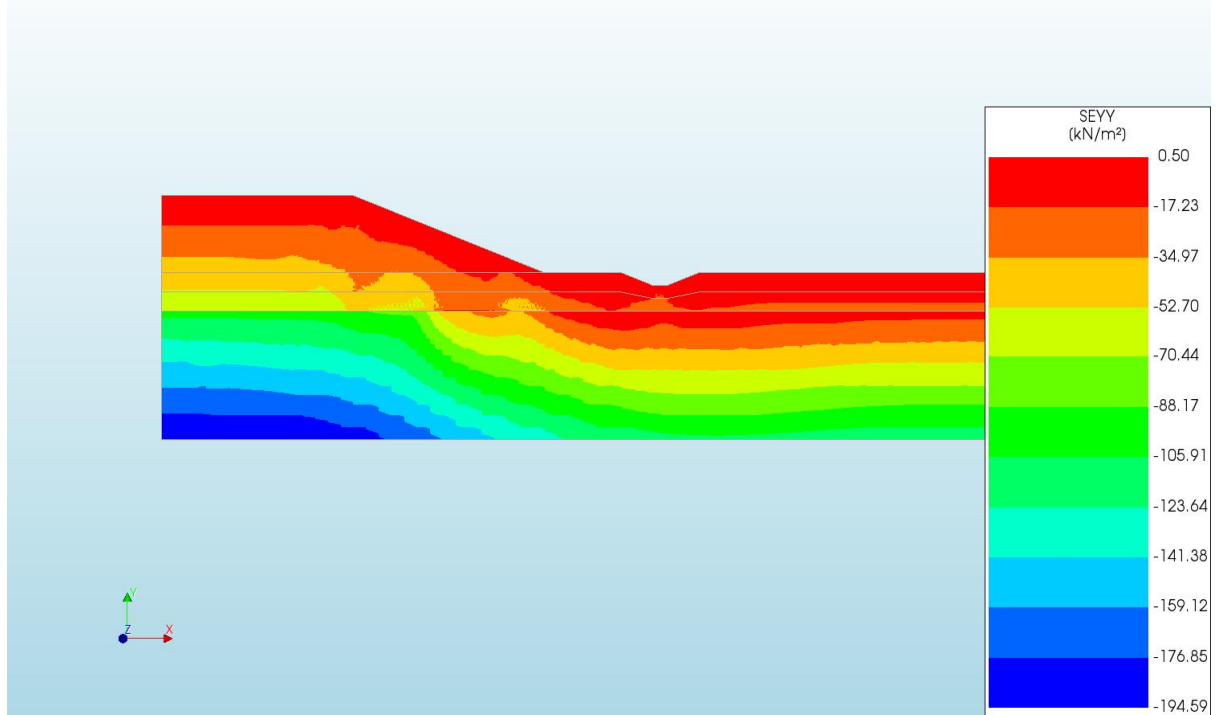
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.00e-05/ms



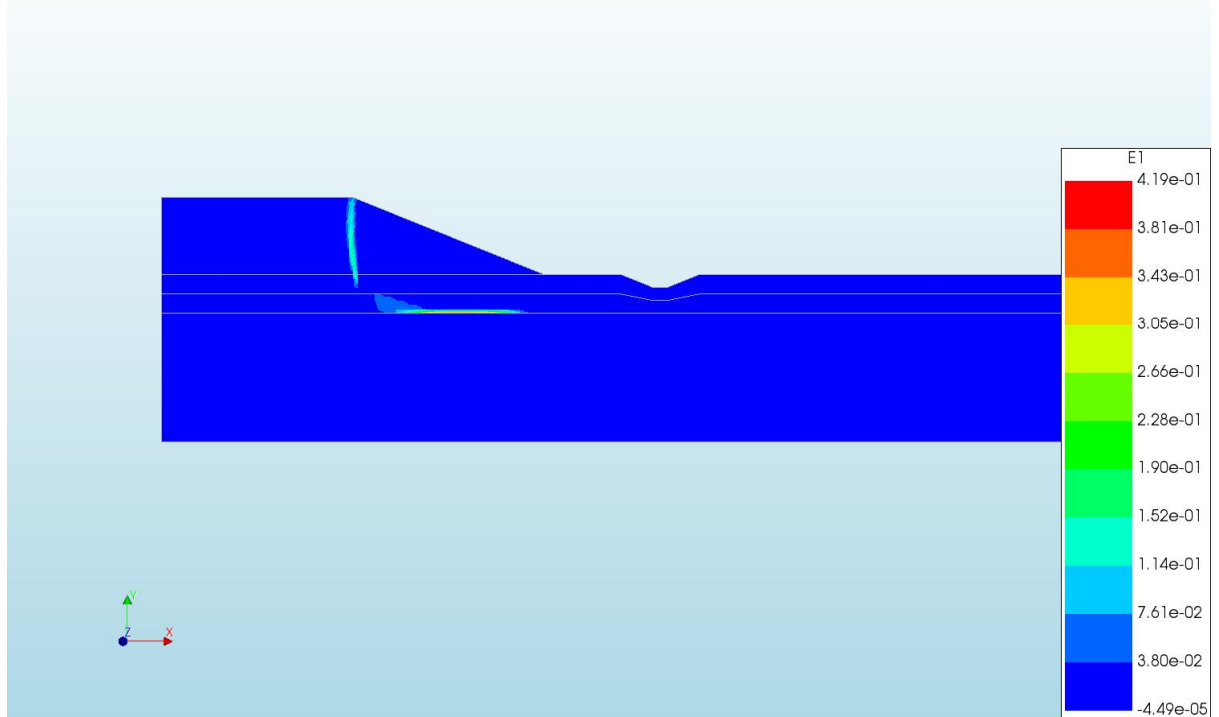
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -135.27kN/m<sup>2</sup> max: 7.01kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -194,59kN/m<sup>2</sup> max: 0.50kN/m<sup>2</sup>

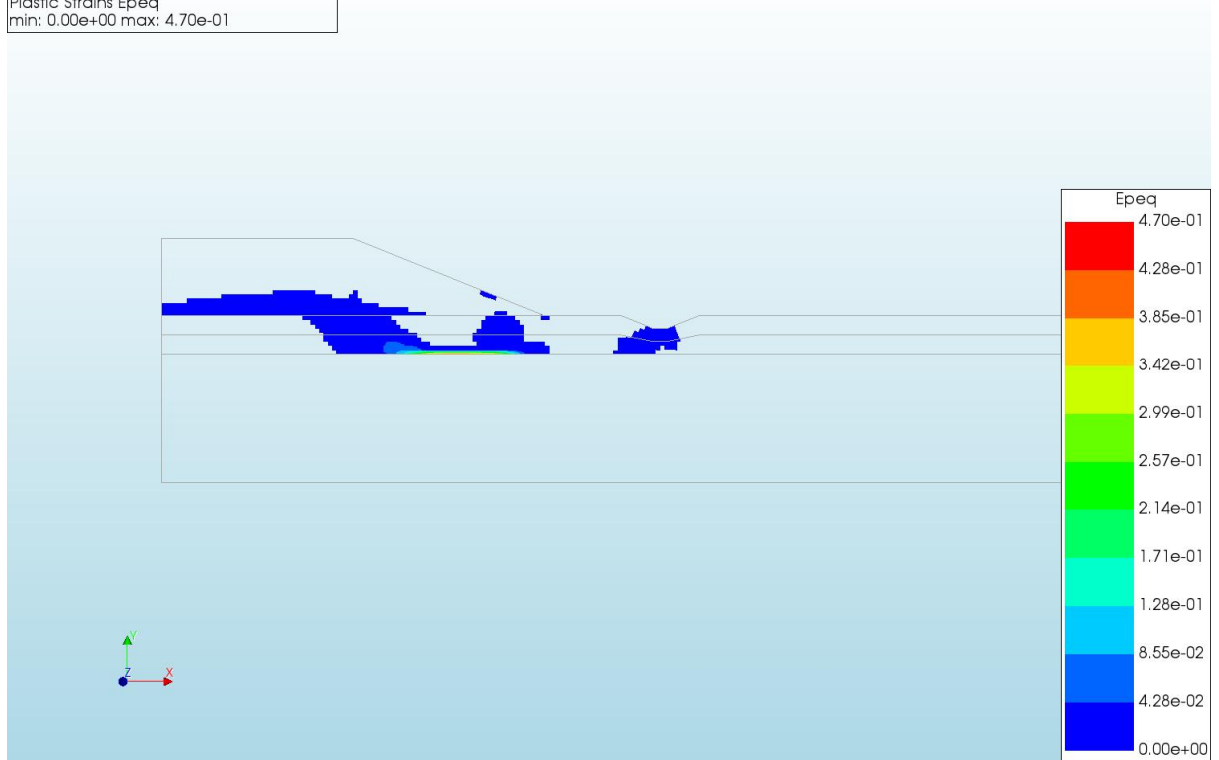


d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Total Strains E1  
min: -4.49e-05 max: 4.19e-01

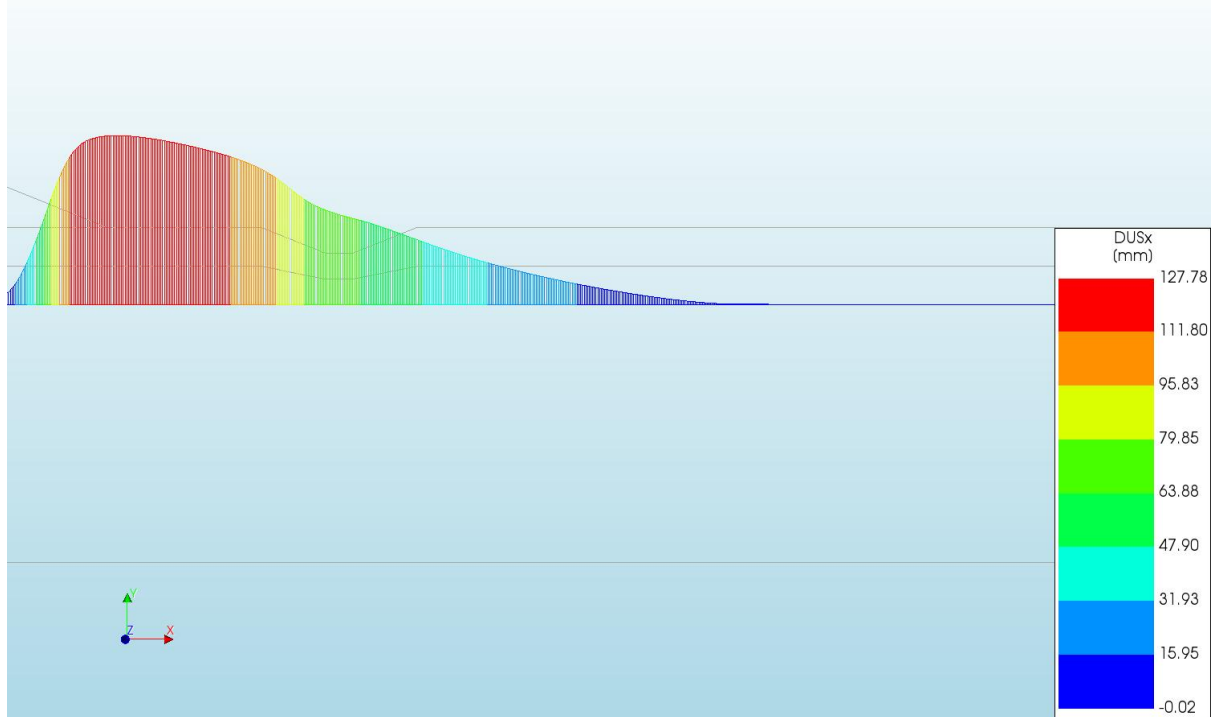




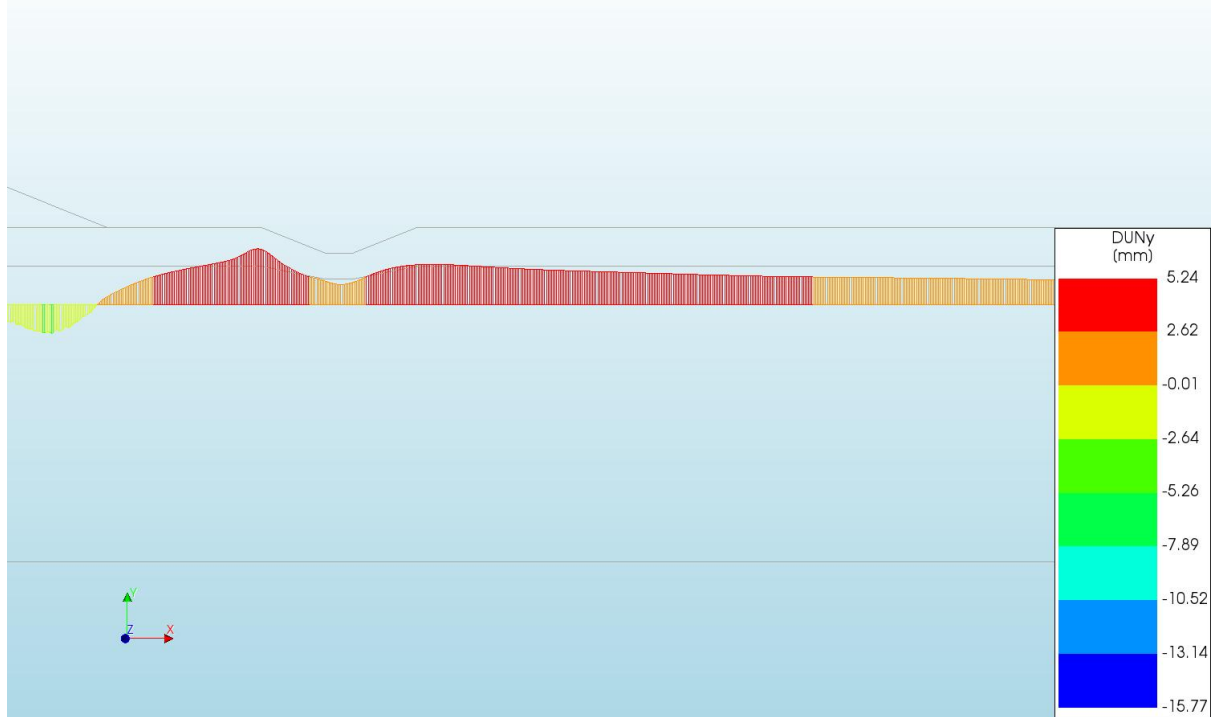
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.70e-01



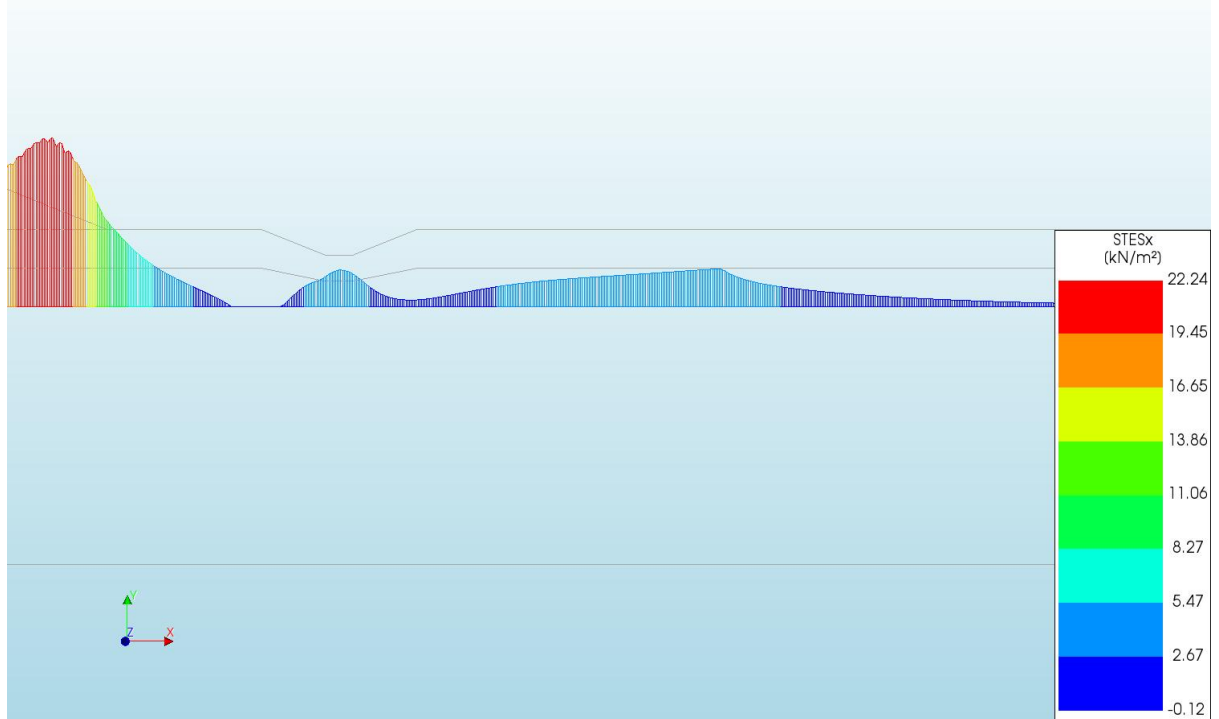
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 127.78mm



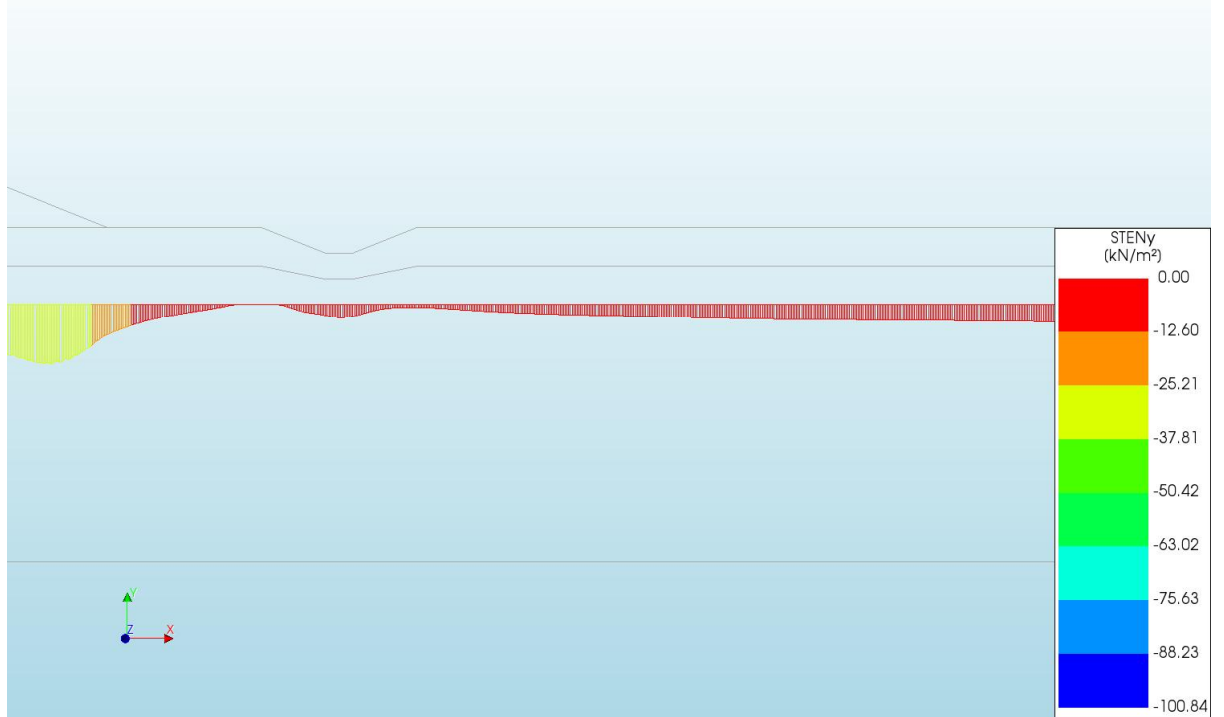
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -15.77mm max: 5.24mm



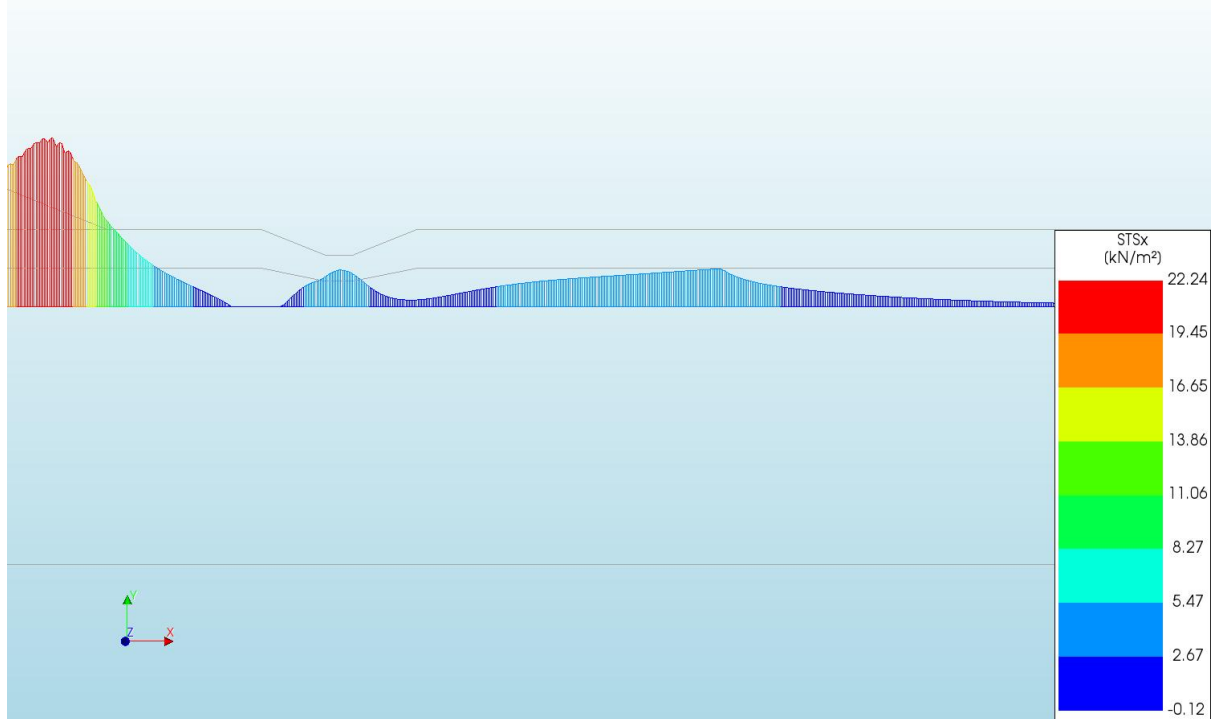
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.12kN/m<sup>2</sup> max: 22.24kN/m<sup>2</sup>



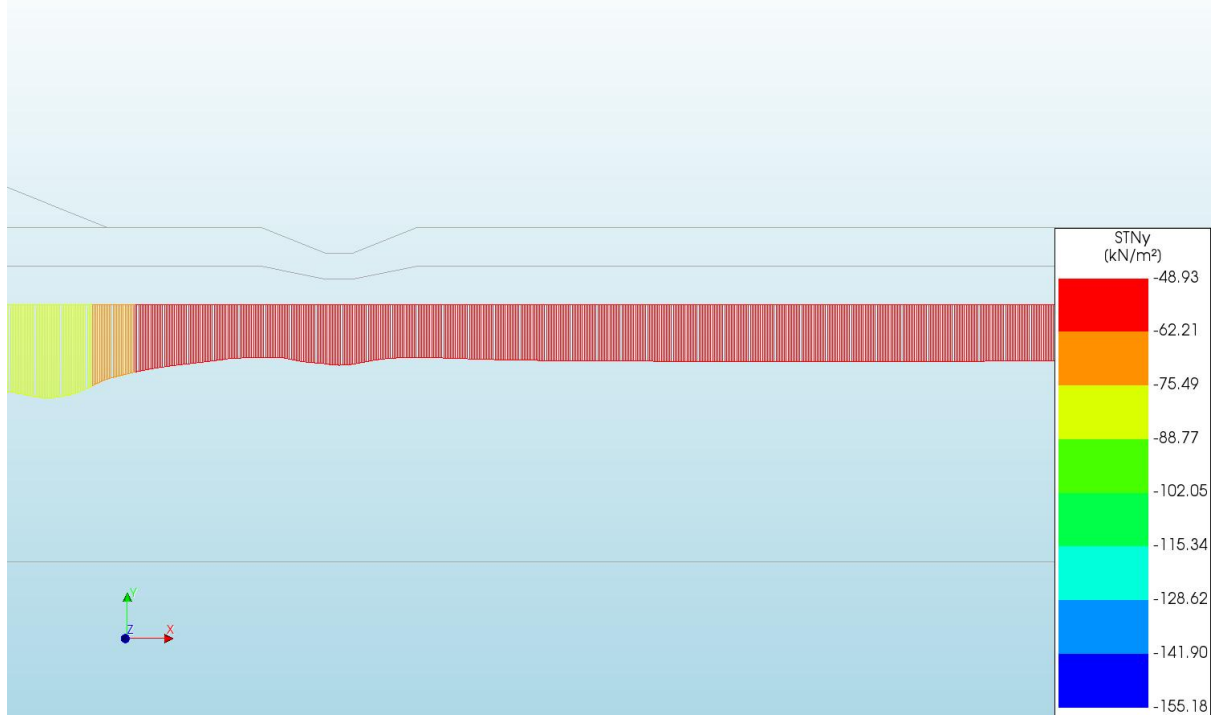
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -100,84kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>



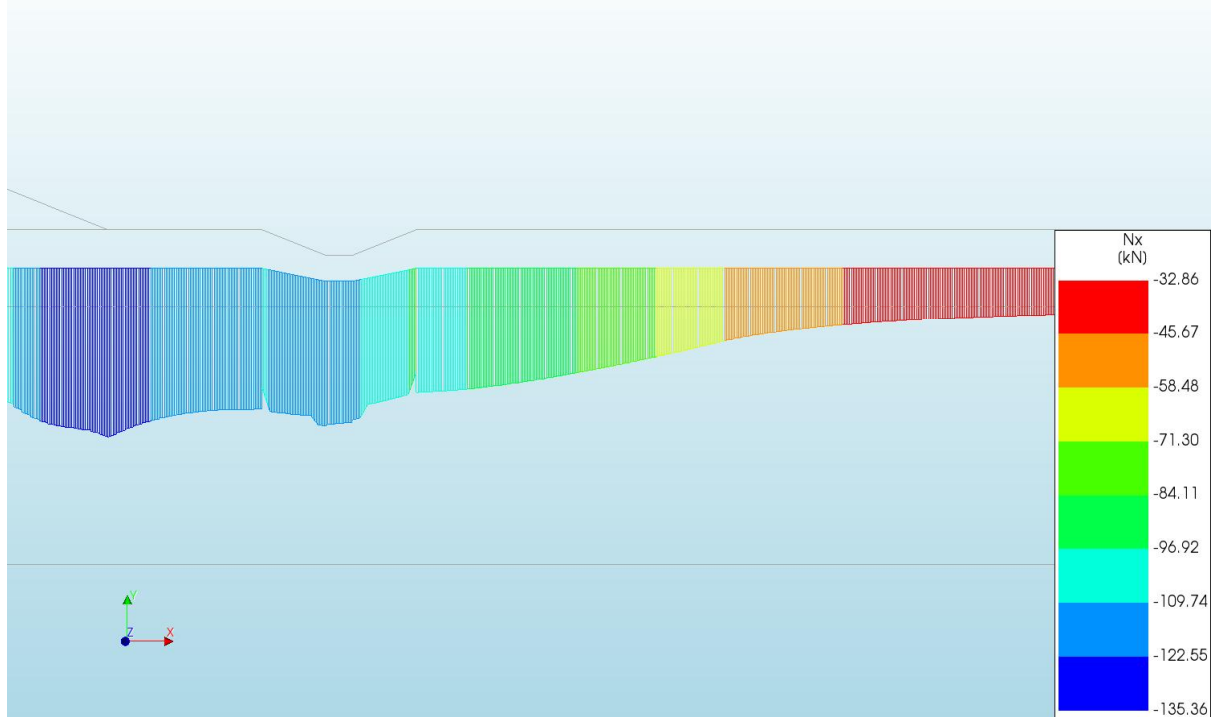
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
 Interface Total Traction STSx  
 min: -0.12kN/m<sup>2</sup> max: 22.24kN/m<sup>2</sup>



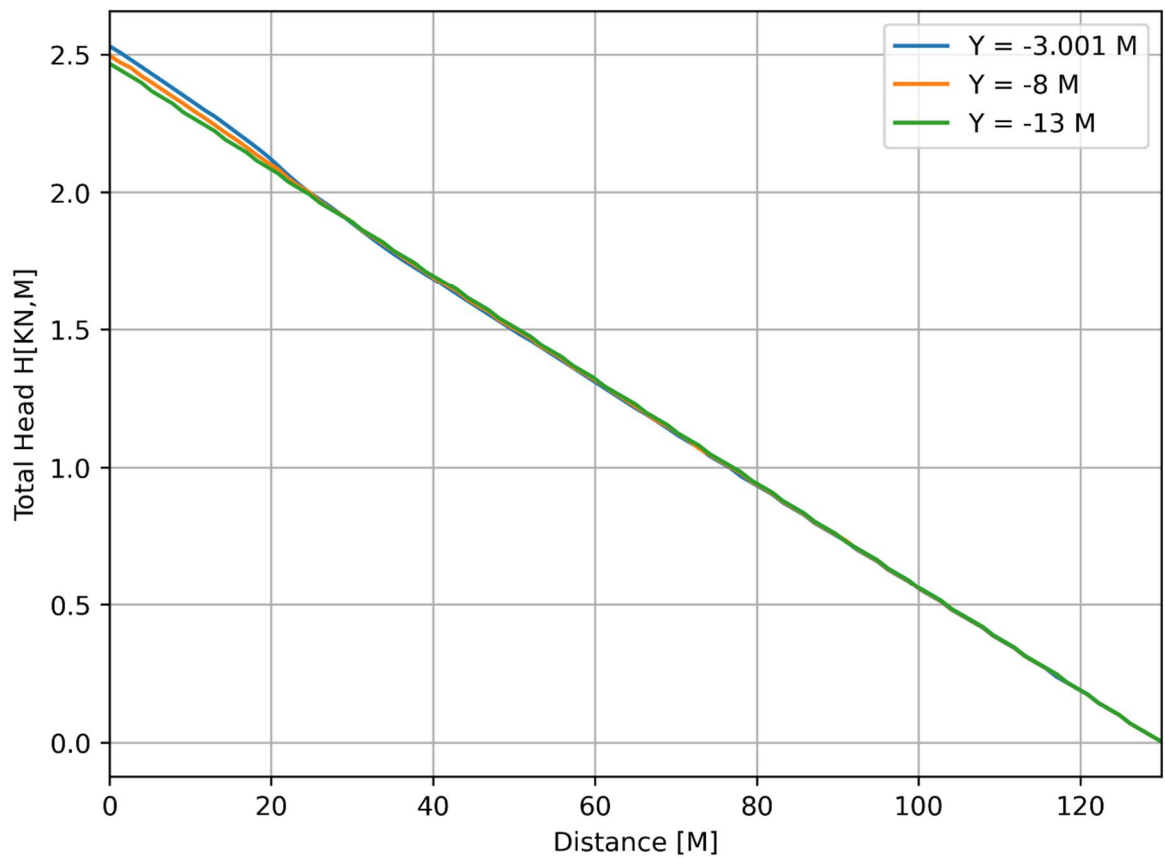
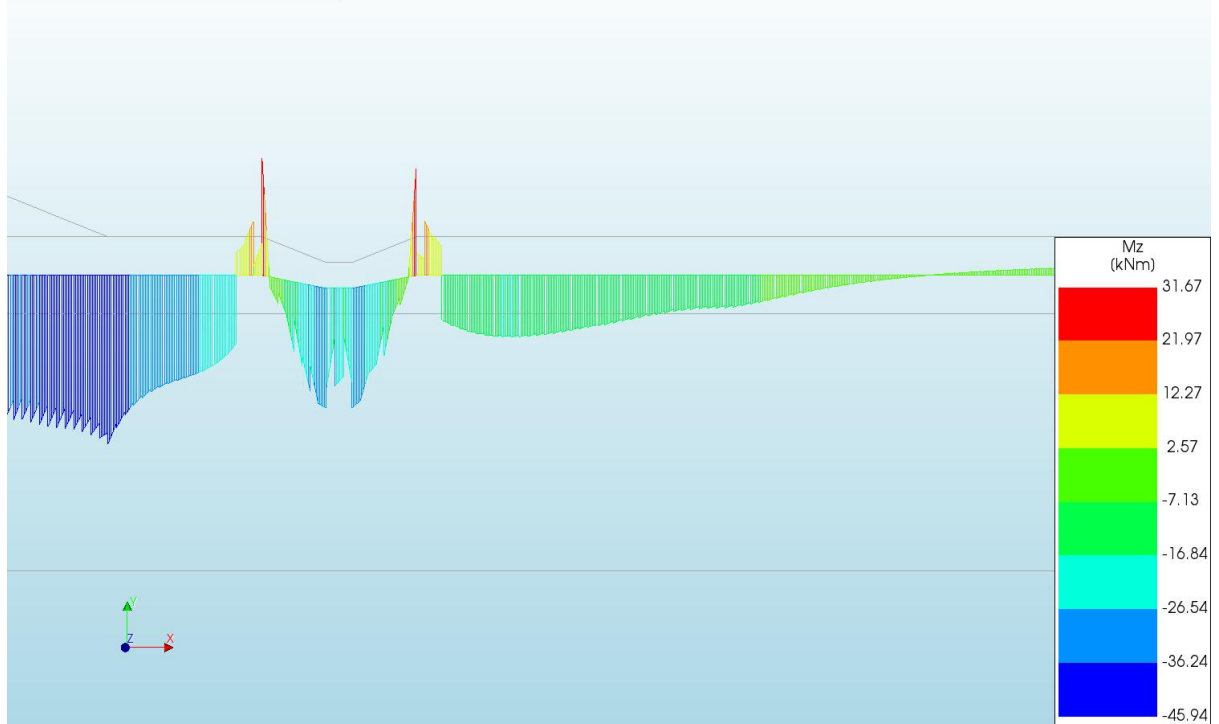
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Interface Total Tractions STNy  
min: -155.18kN/m<sup>2</sup> max: -48.93kN/m<sup>2</sup>

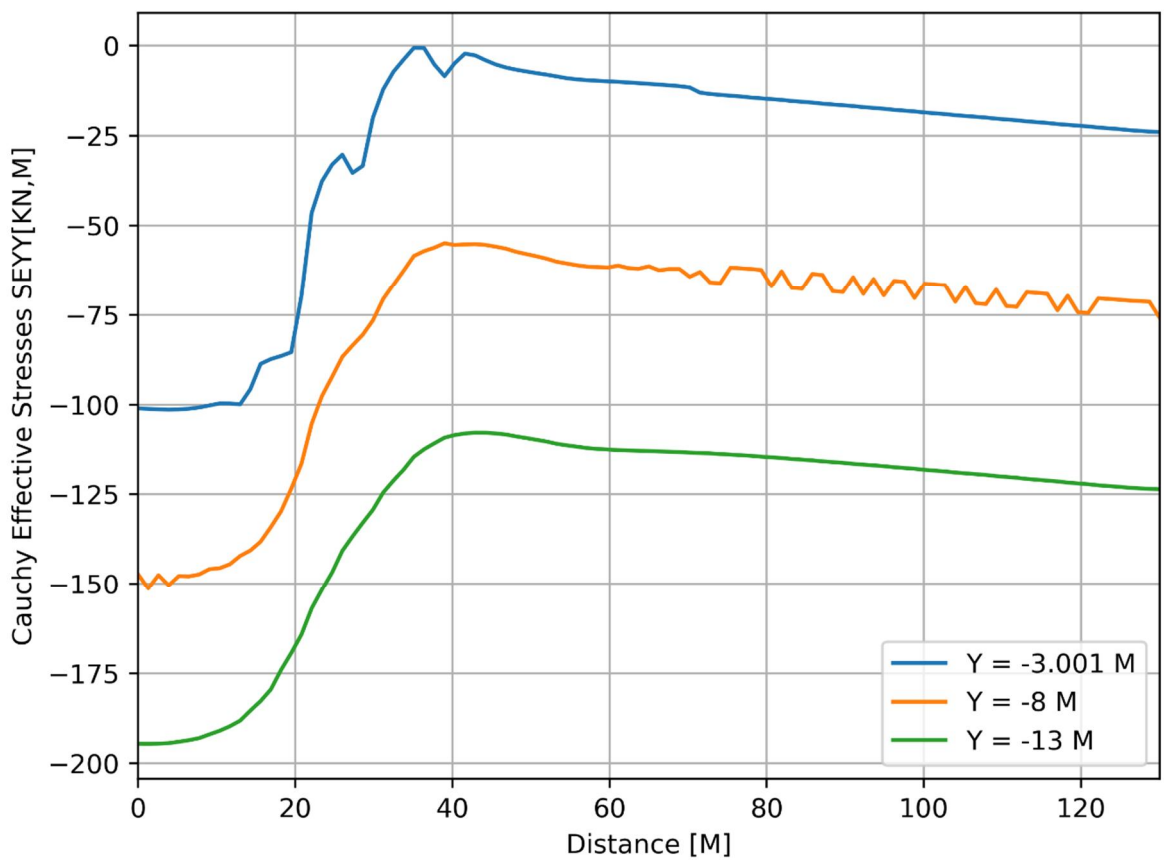
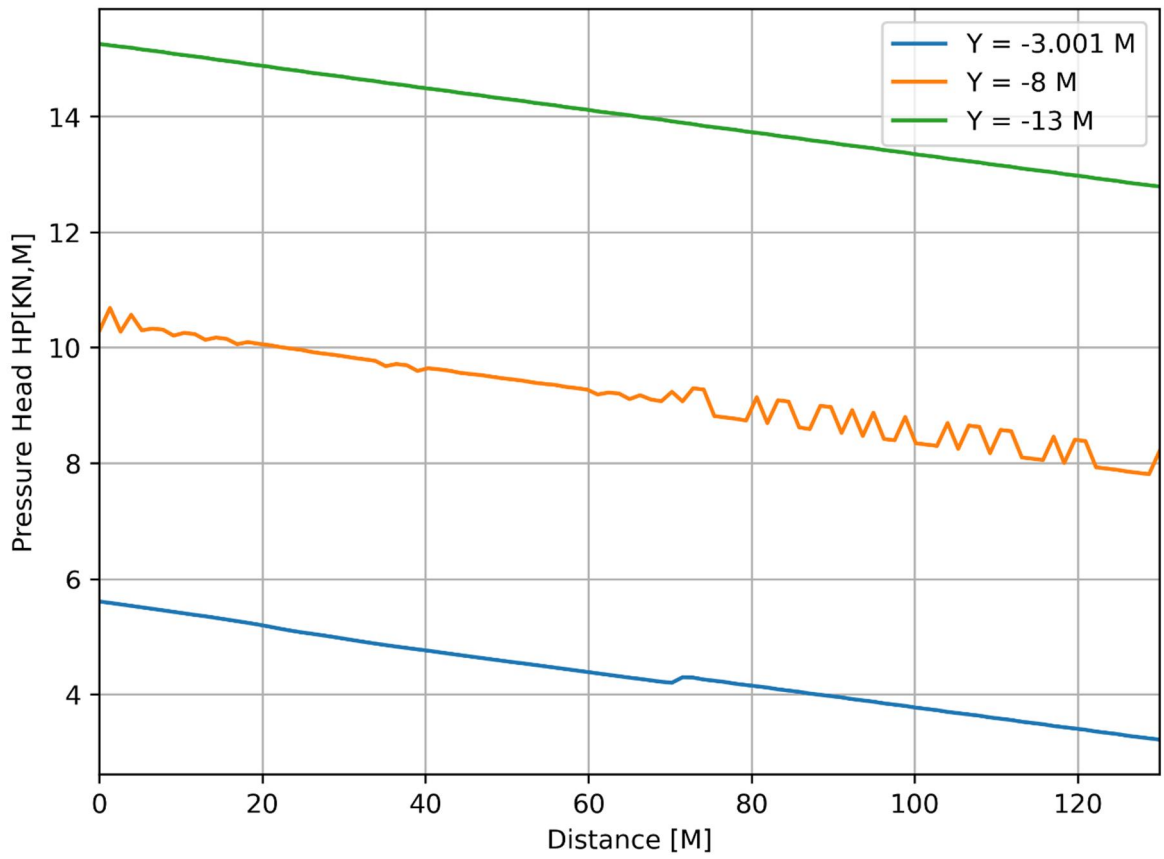


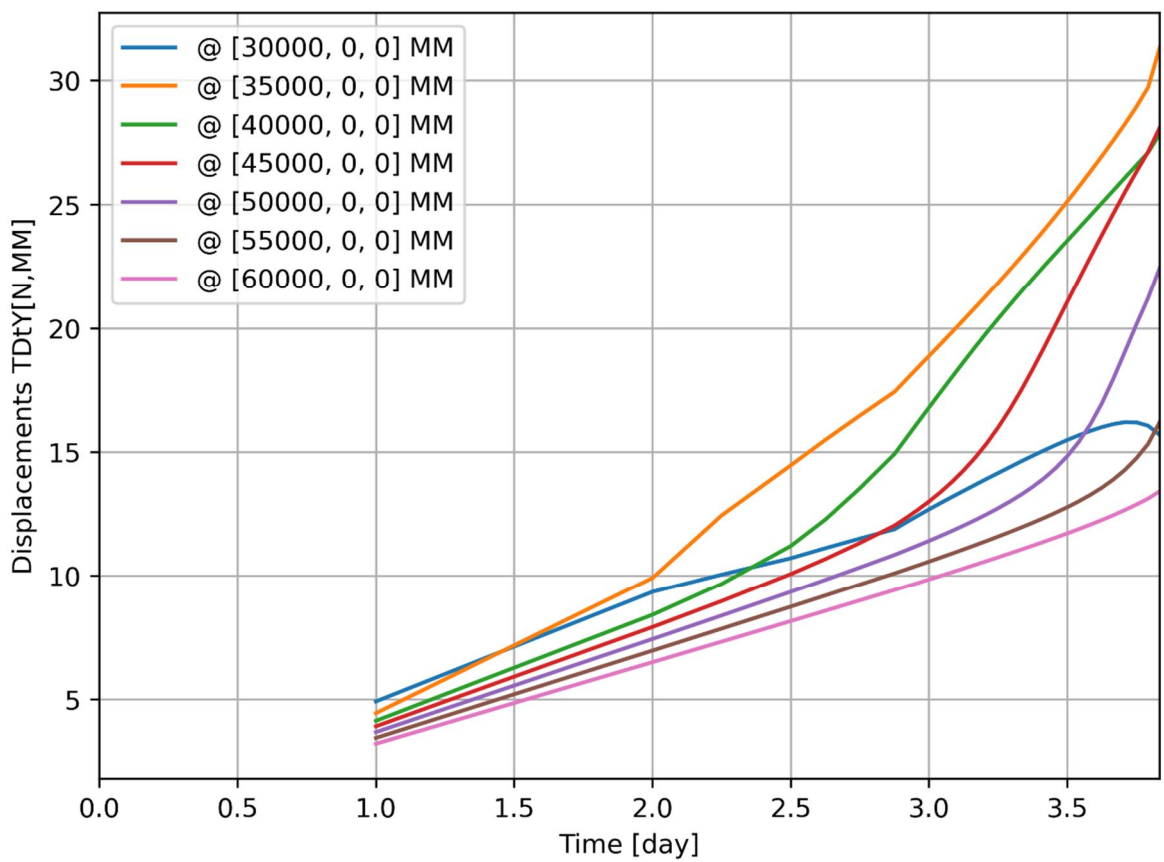
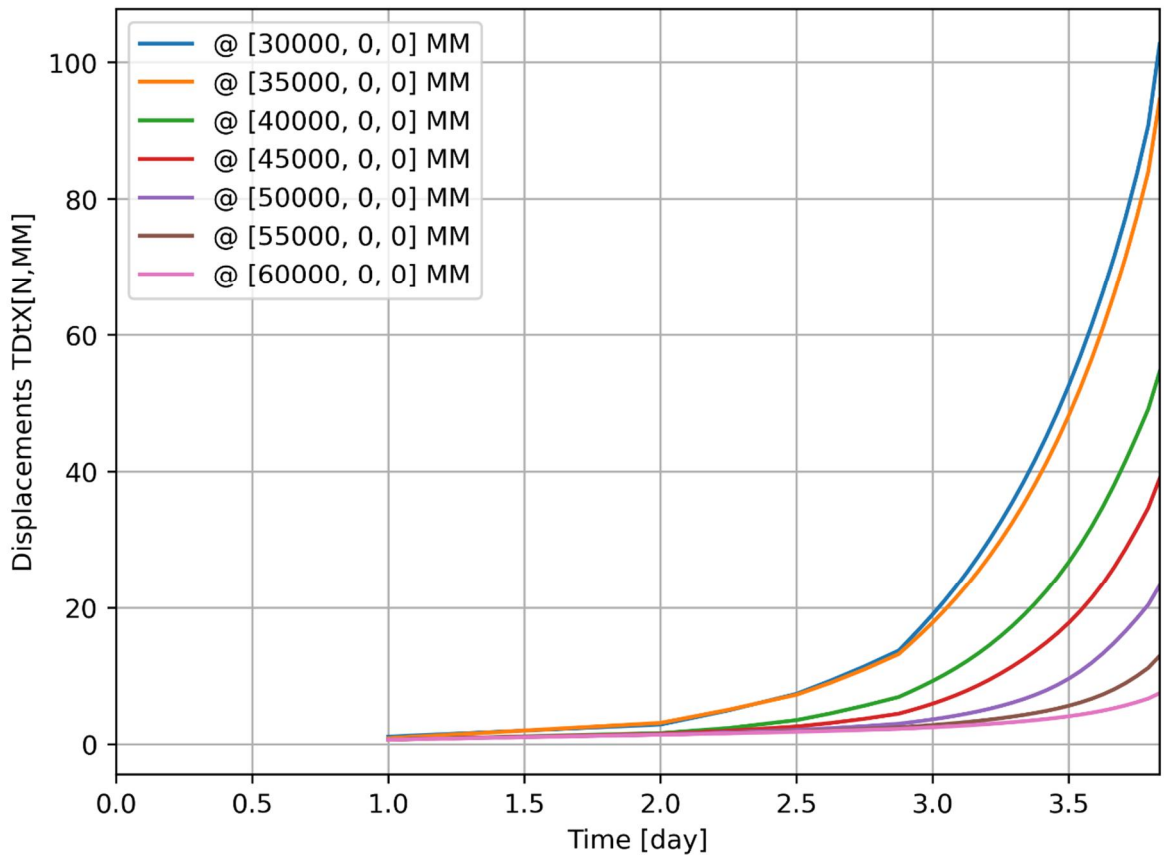
d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Cross-section Forces Nx  
min: -135.36kN max: -32.86kN

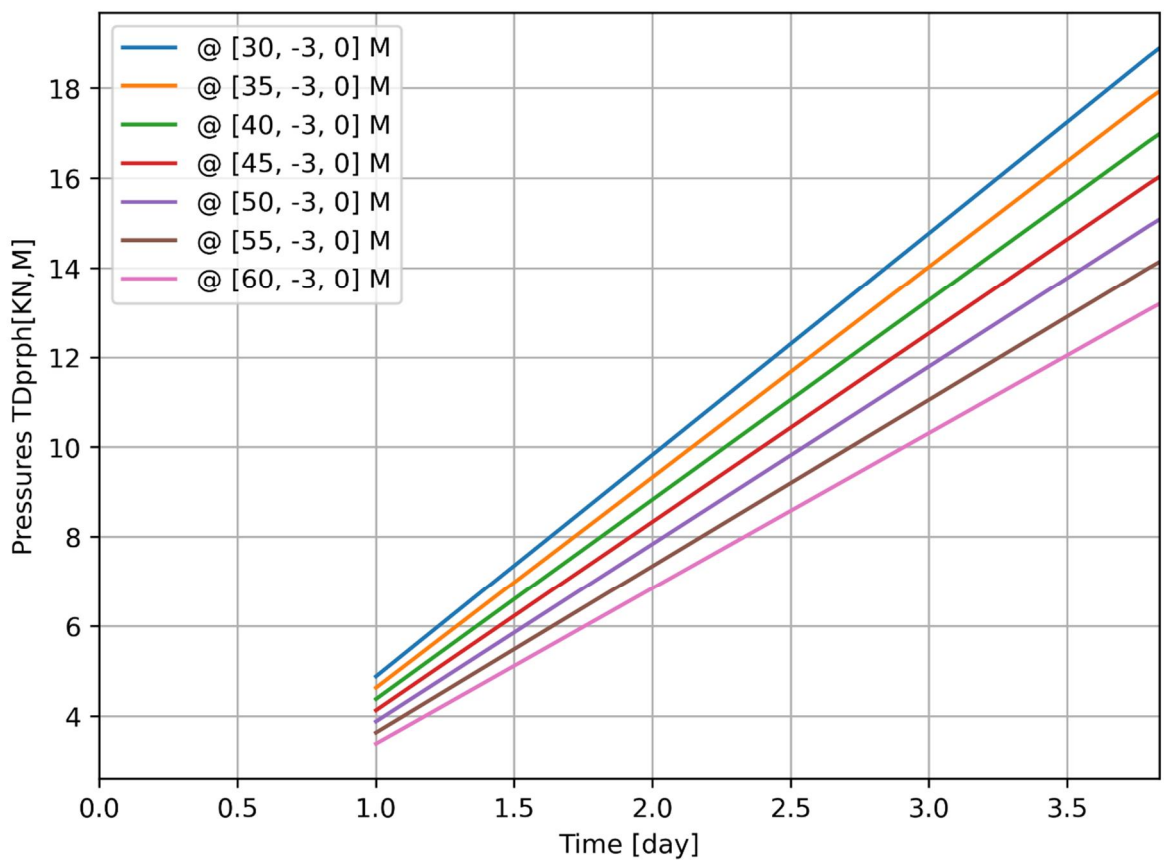
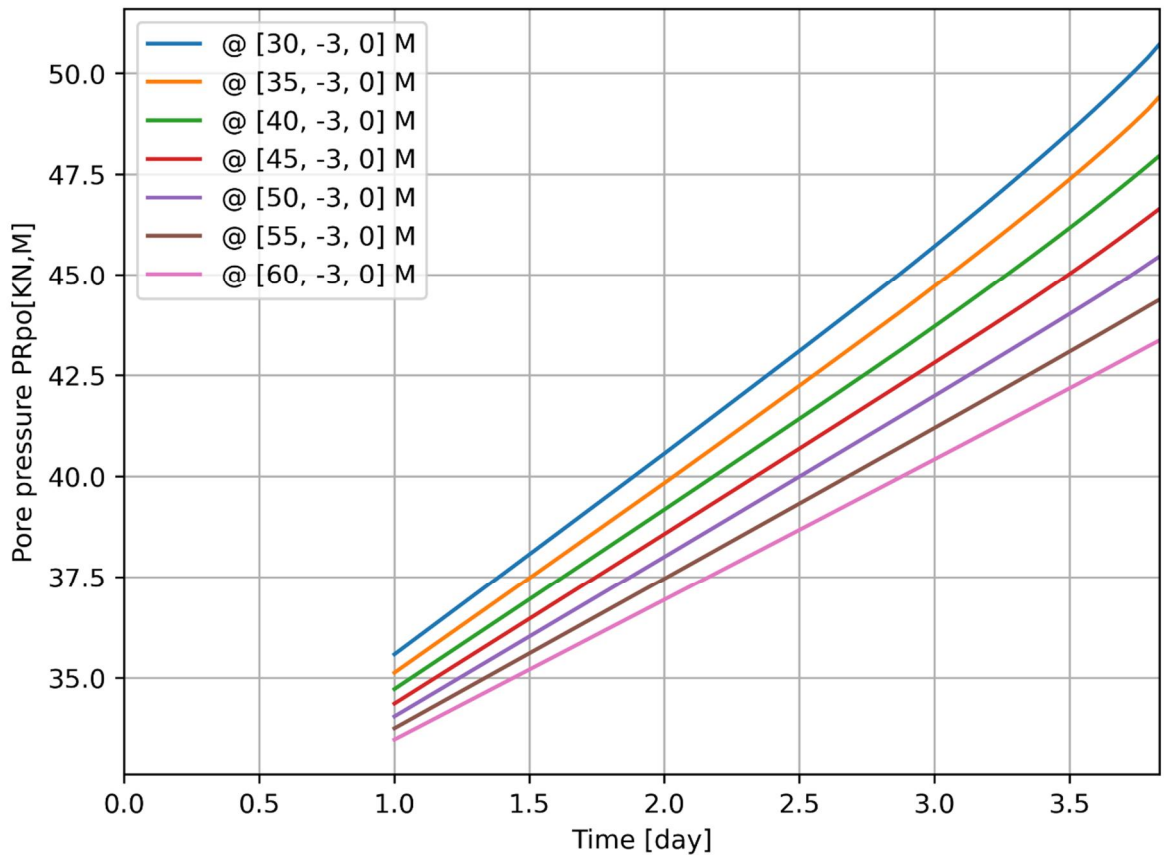


d=3\_c=17\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 3 day 20 hour  
Cross-section Moments Mz  
min: -45.94kNm max: 31.67kNm

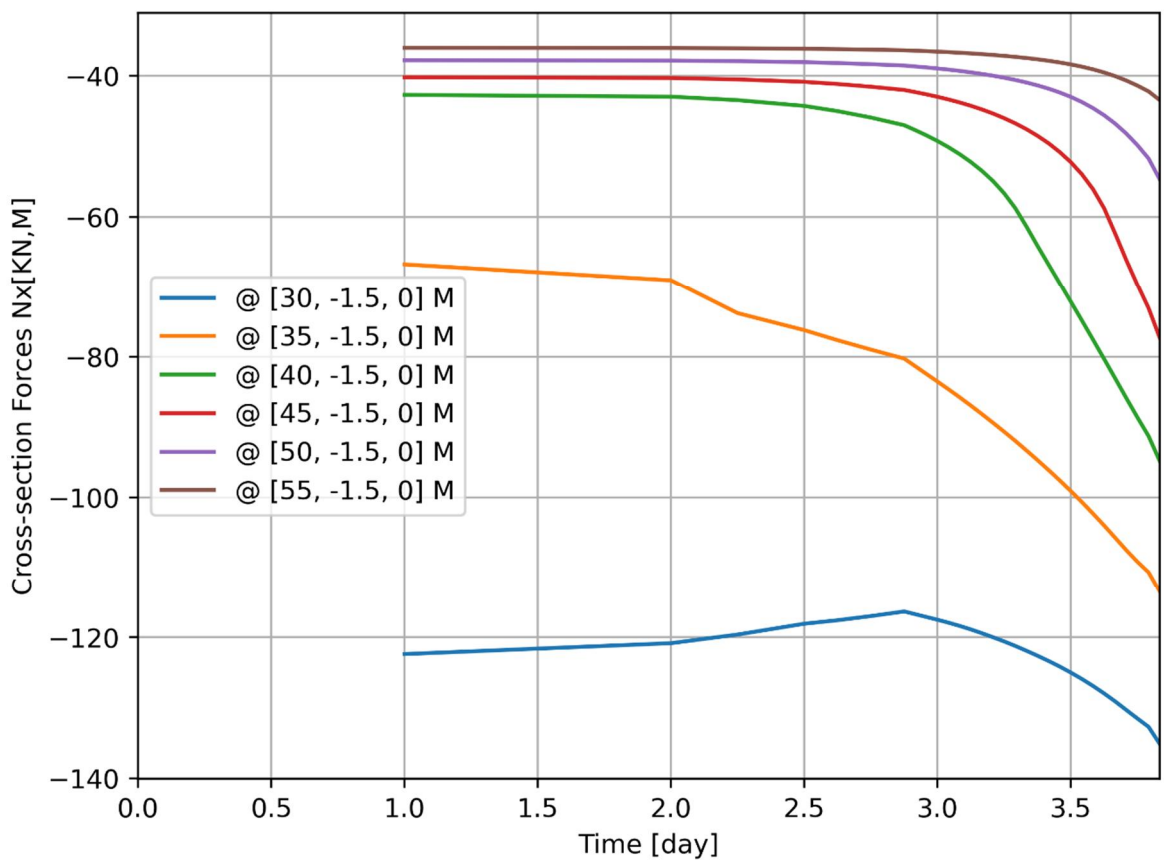
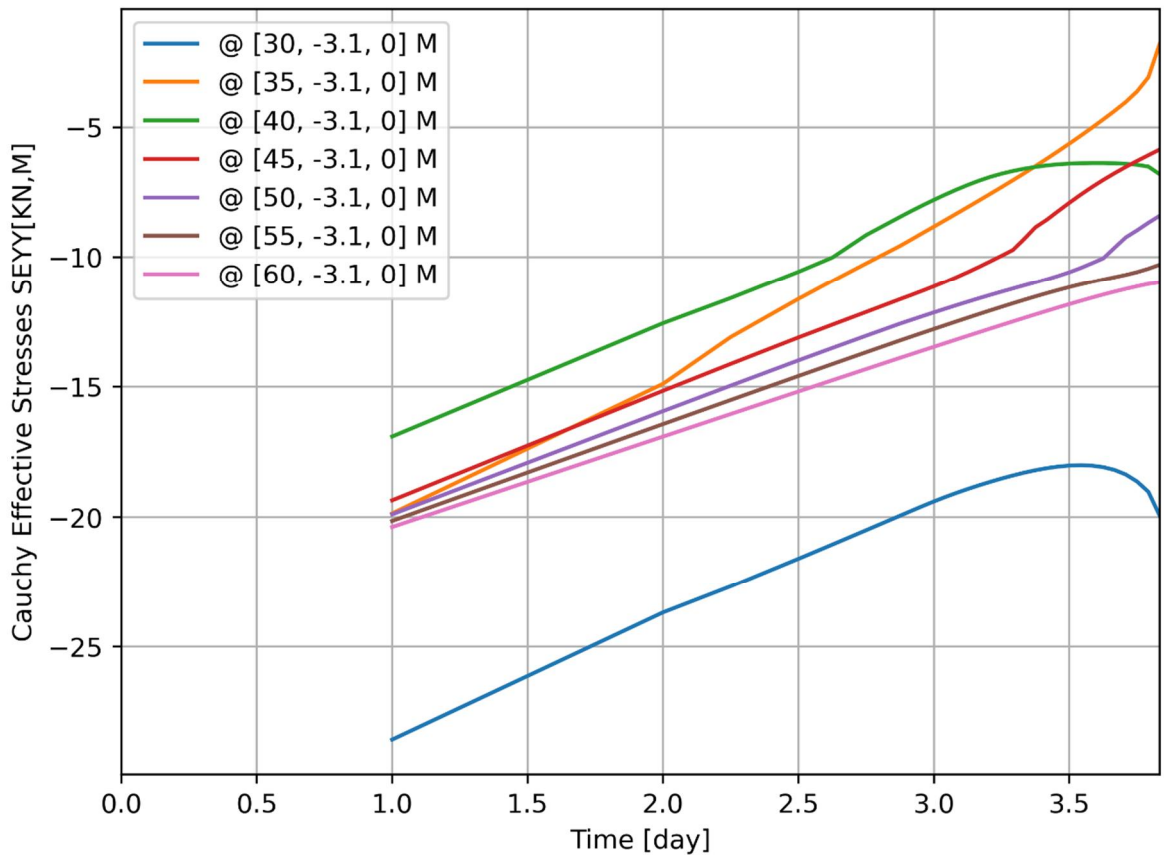


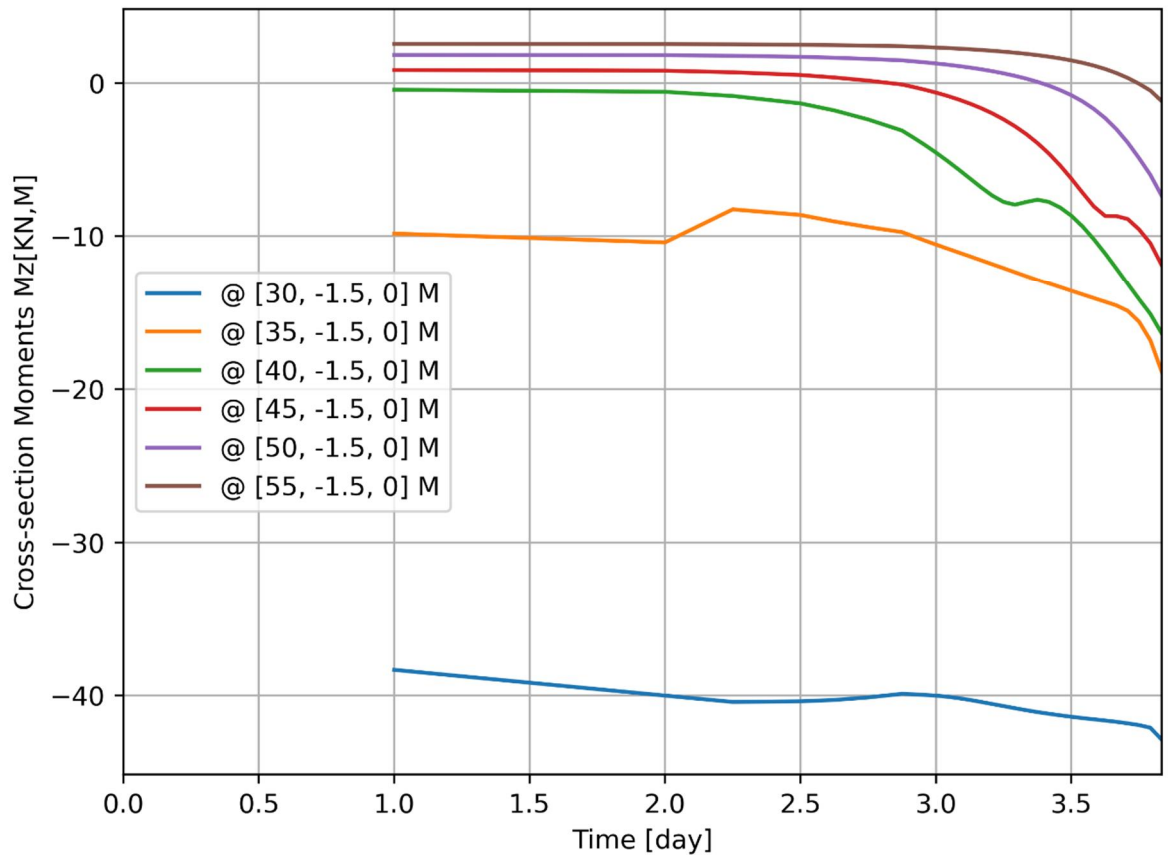








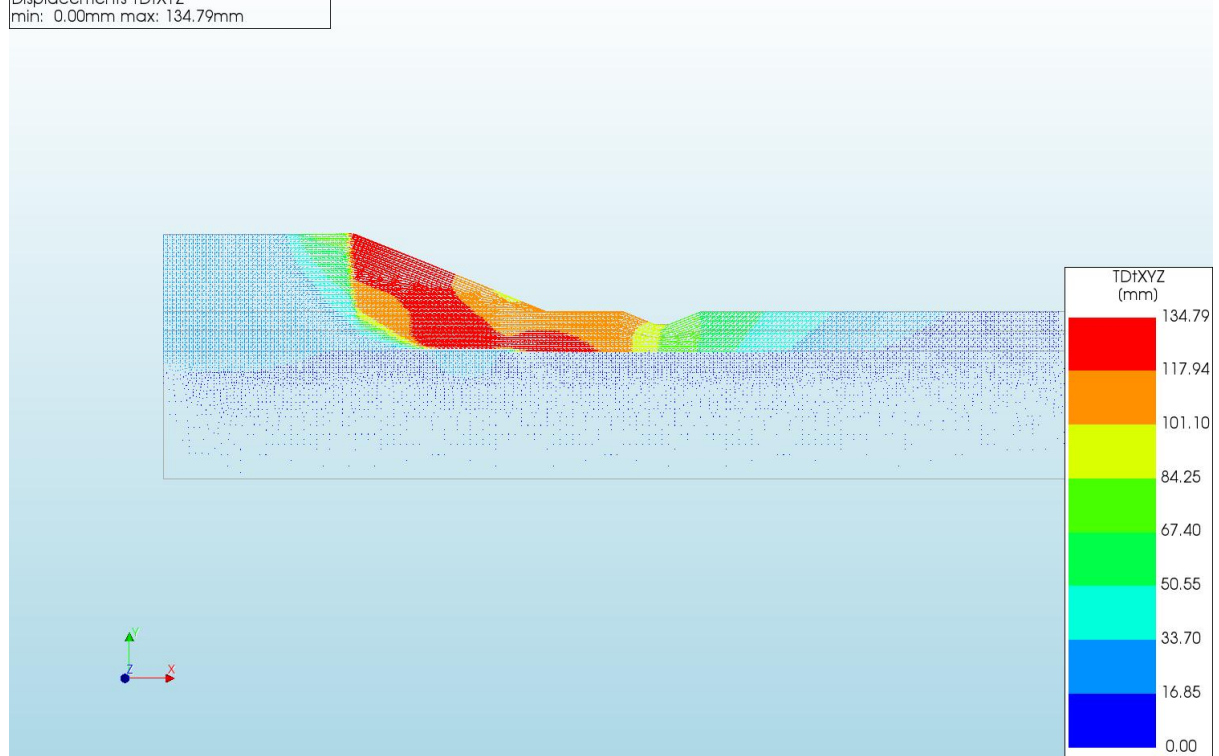




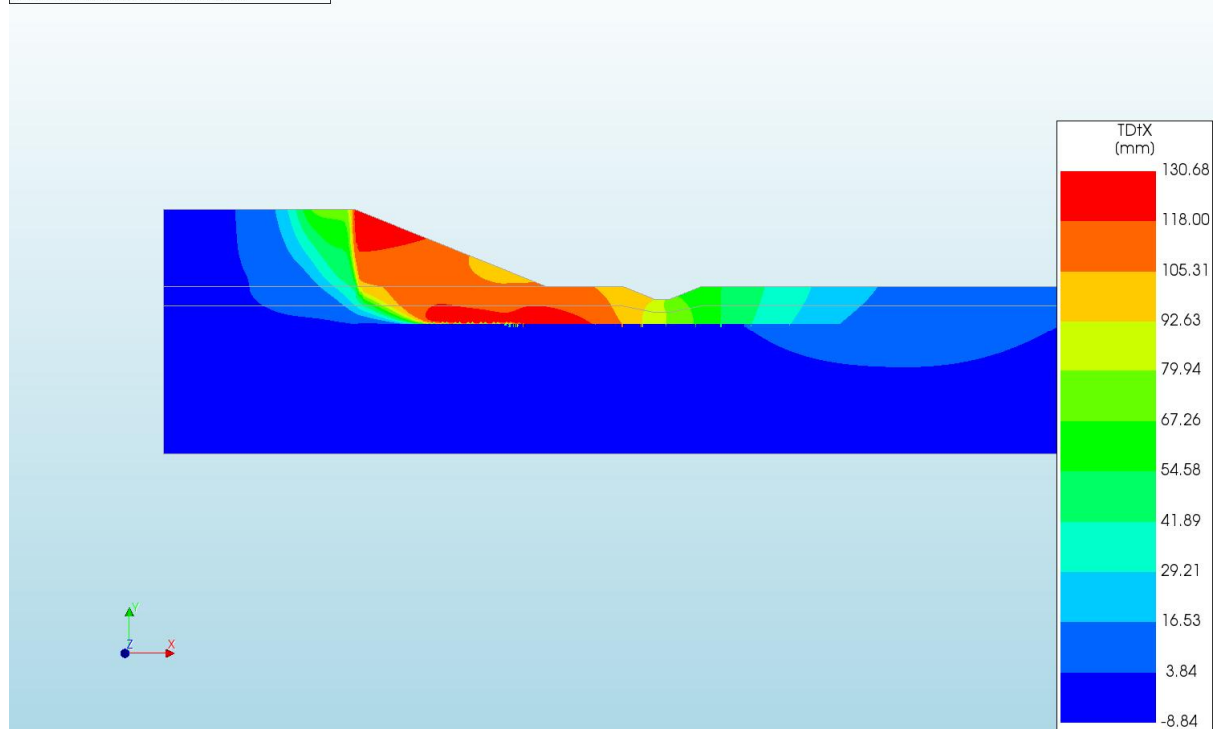
A.2.33

'Output d=3 c=18 E=3 k=1e-07 xs=36\_20200818'

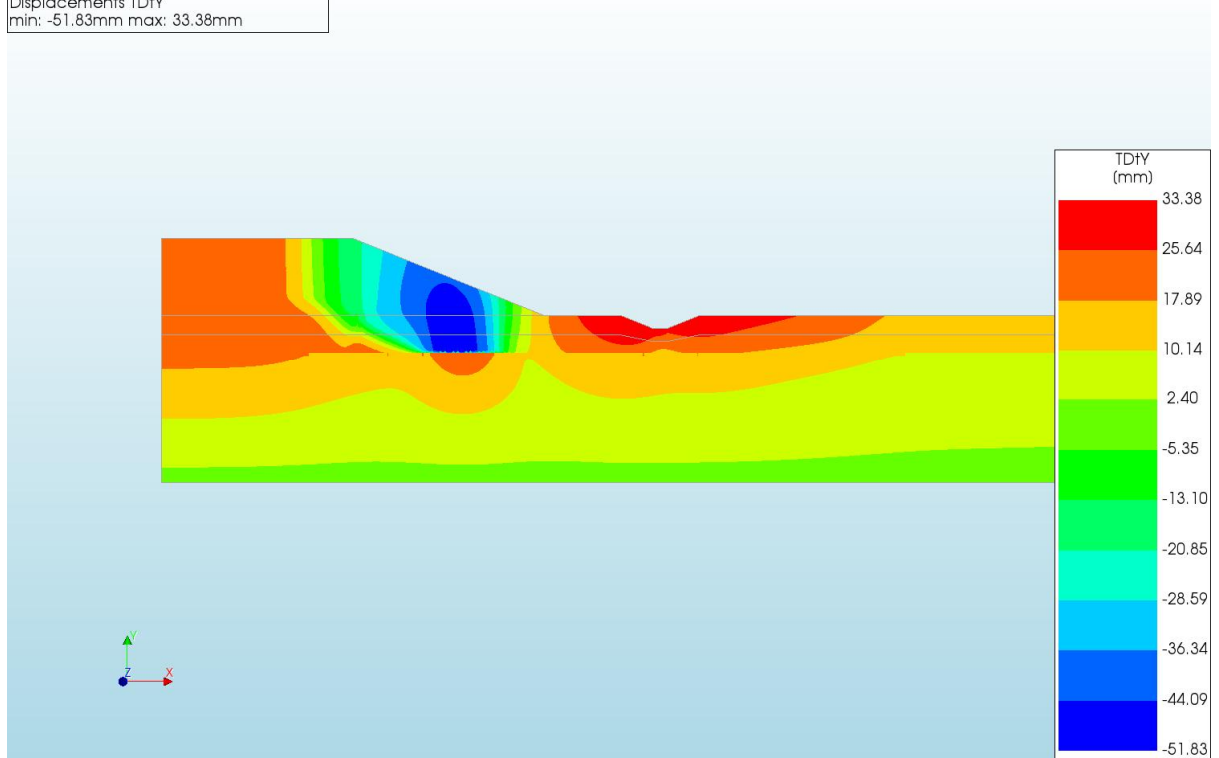
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Displacements TdXYZ  
 min: 0.00mm max: 134.79mm



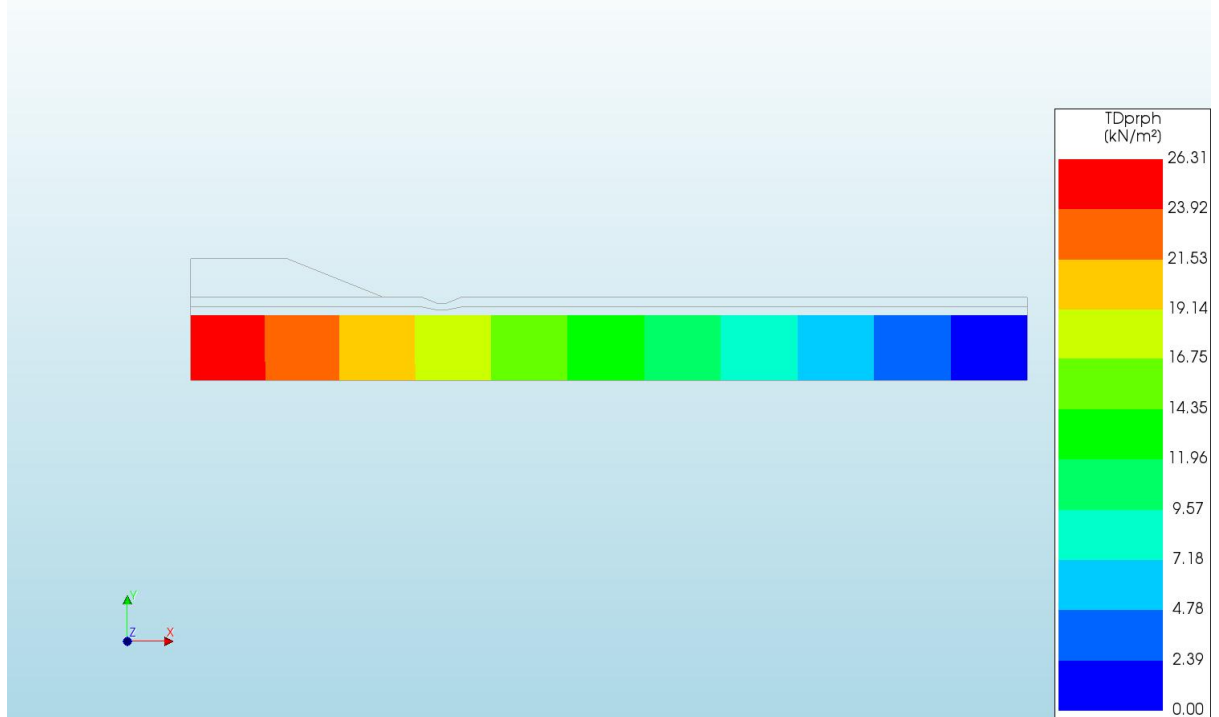
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Displacements TdX  
 min: -8.84mm max: 130.68mm



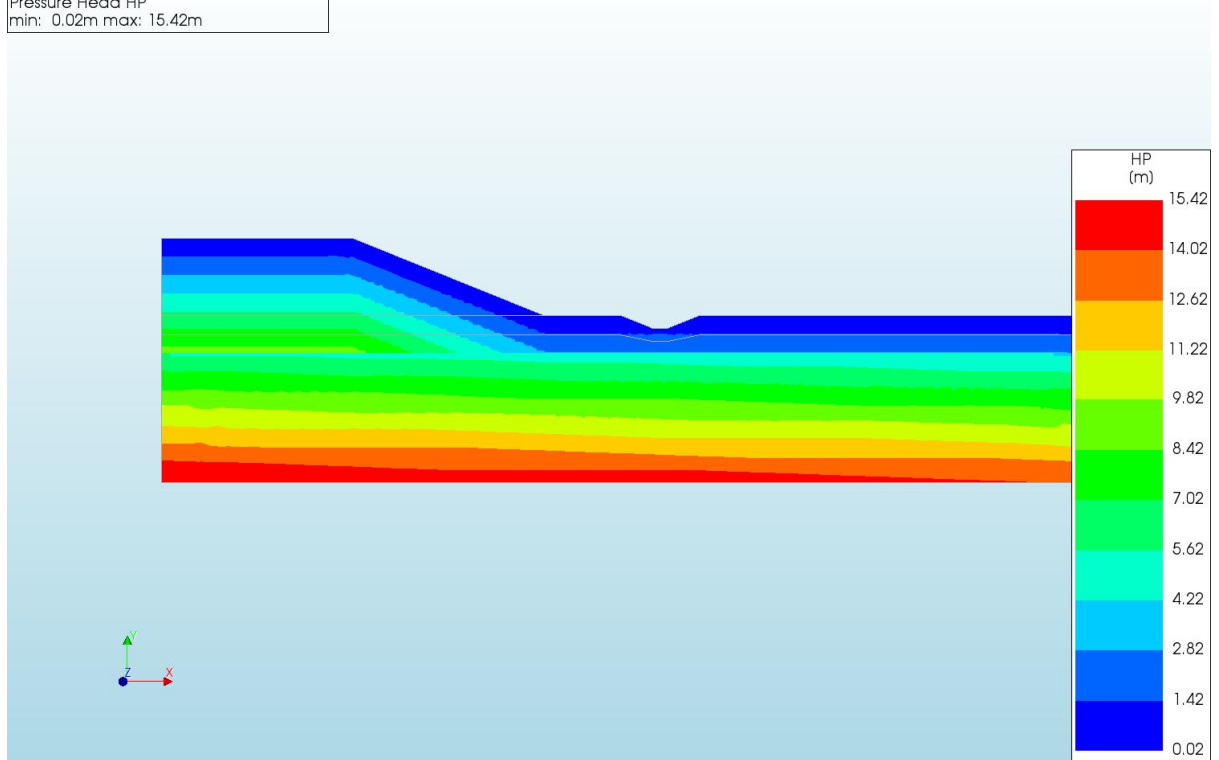
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
Displacements TDY  
min: -51.83mm max: 33.38mm



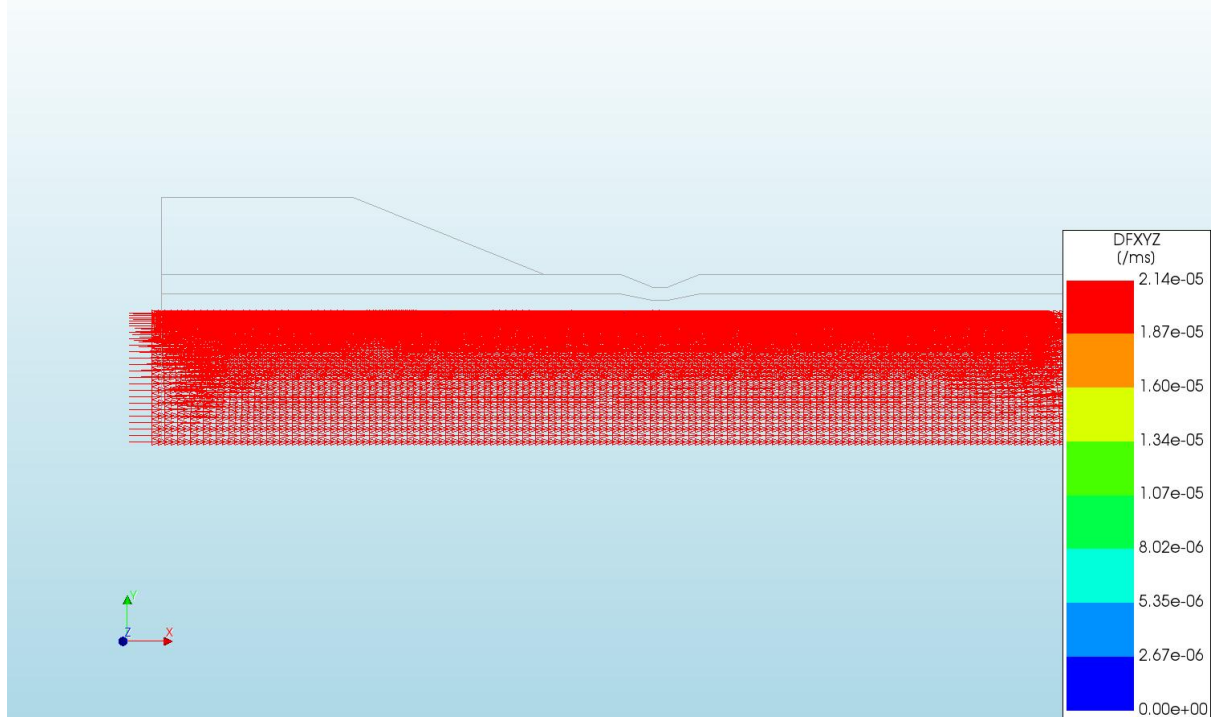
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 26.31kN/m<sup>2</sup>



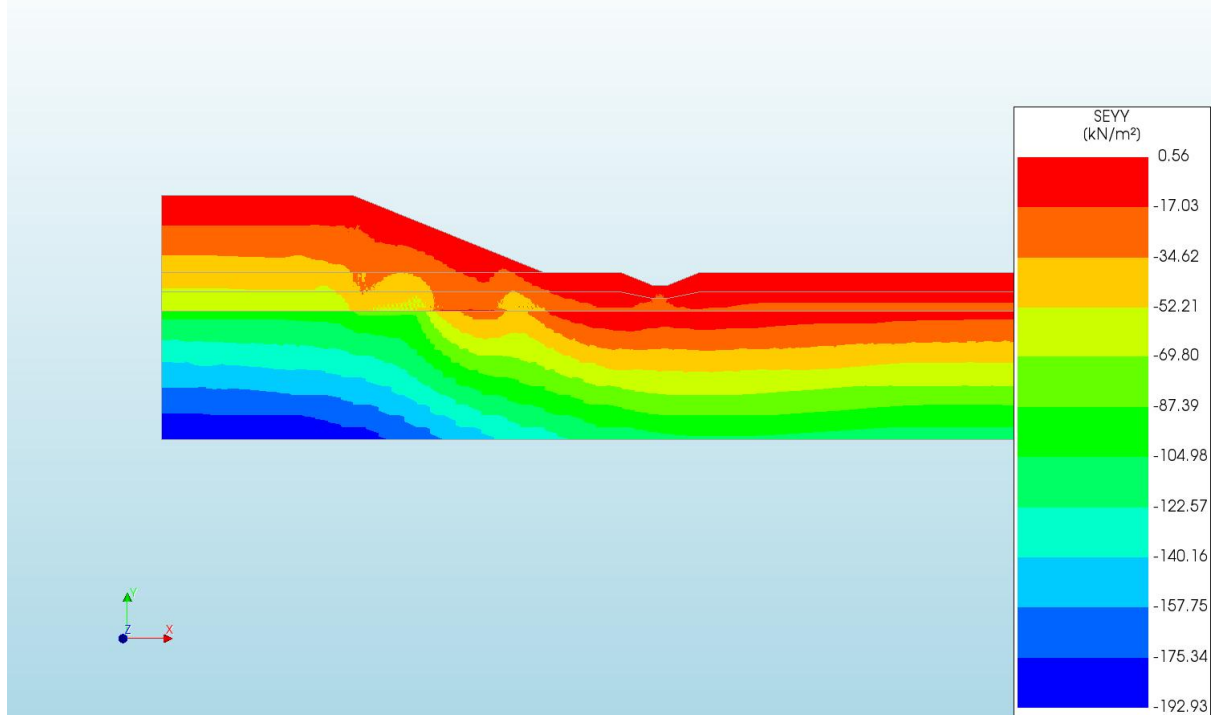
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.42m



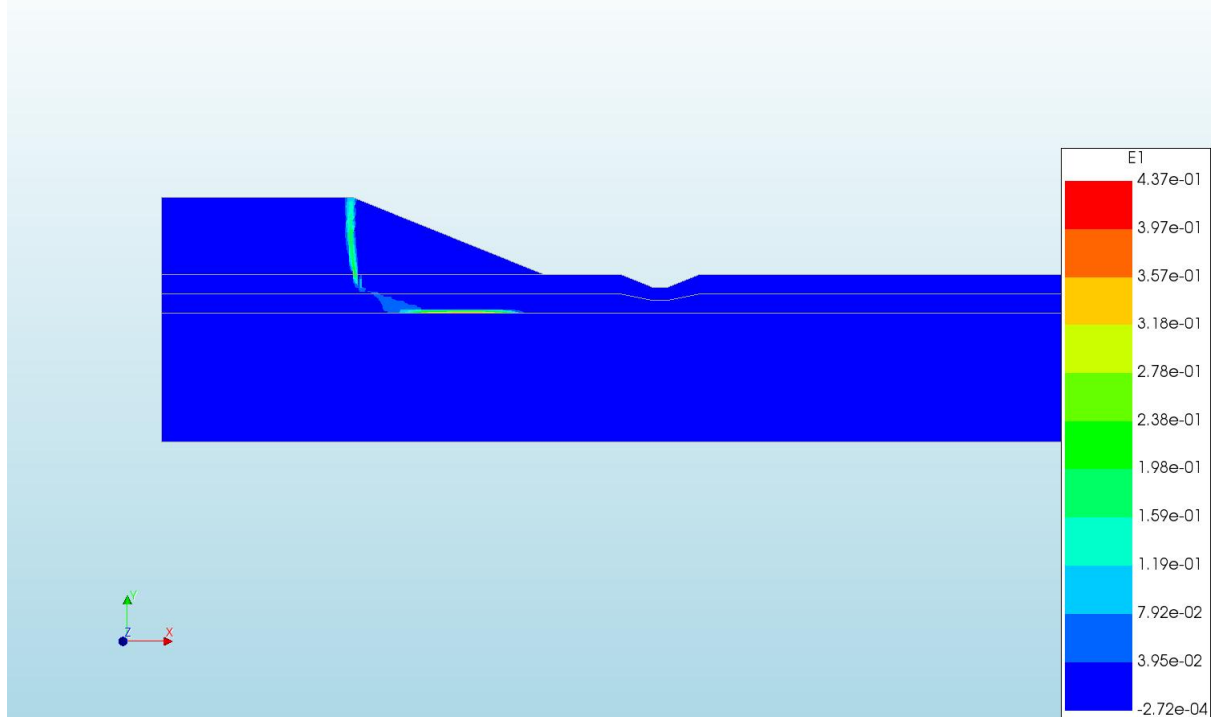
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.14e-05/ms



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.93kN/m<sup>2</sup> max: 0.56kN/m<sup>2</sup>



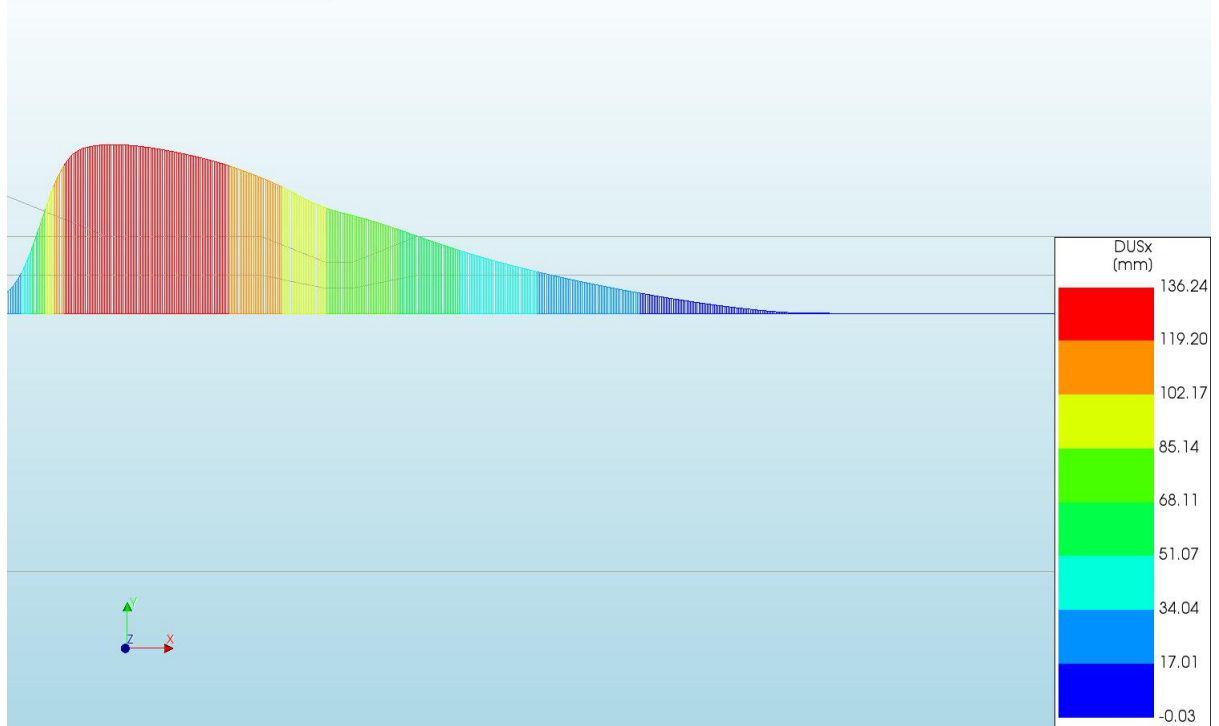
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
Total Strains E1  
min: -2.72e-04 max: 4.37e-01



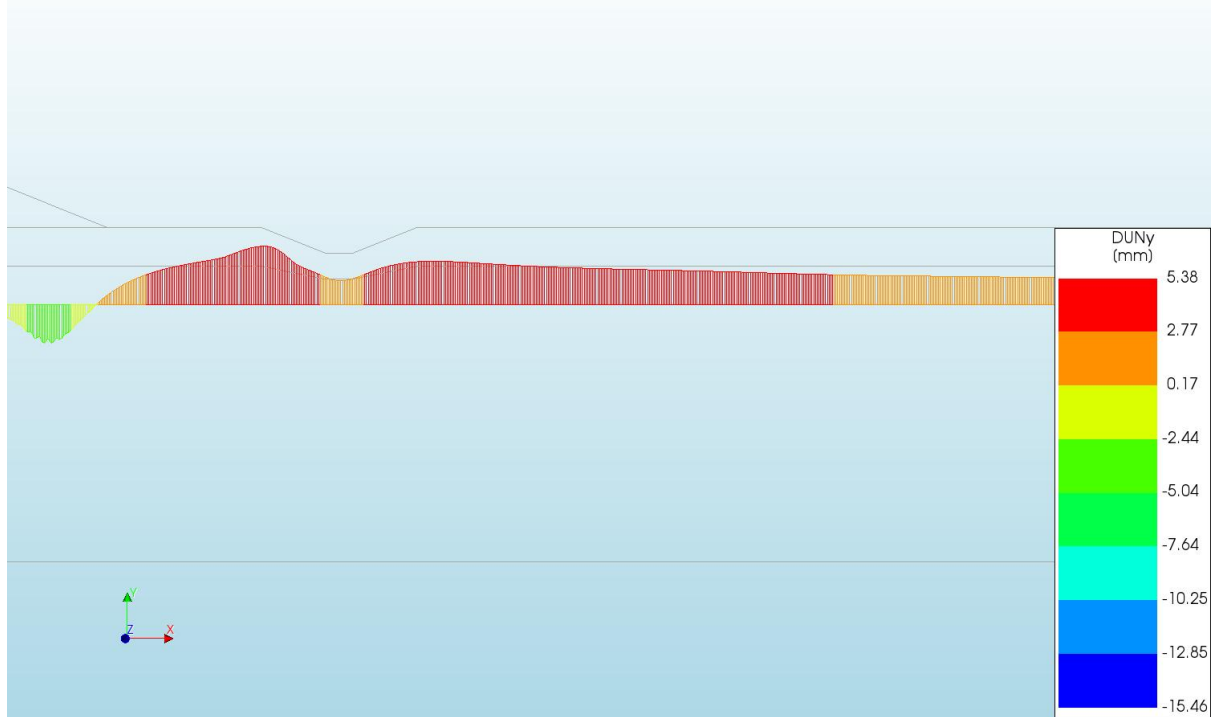
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Plastic Strains Epeq  
 min: 0.00e+00 max: 4.89e-01



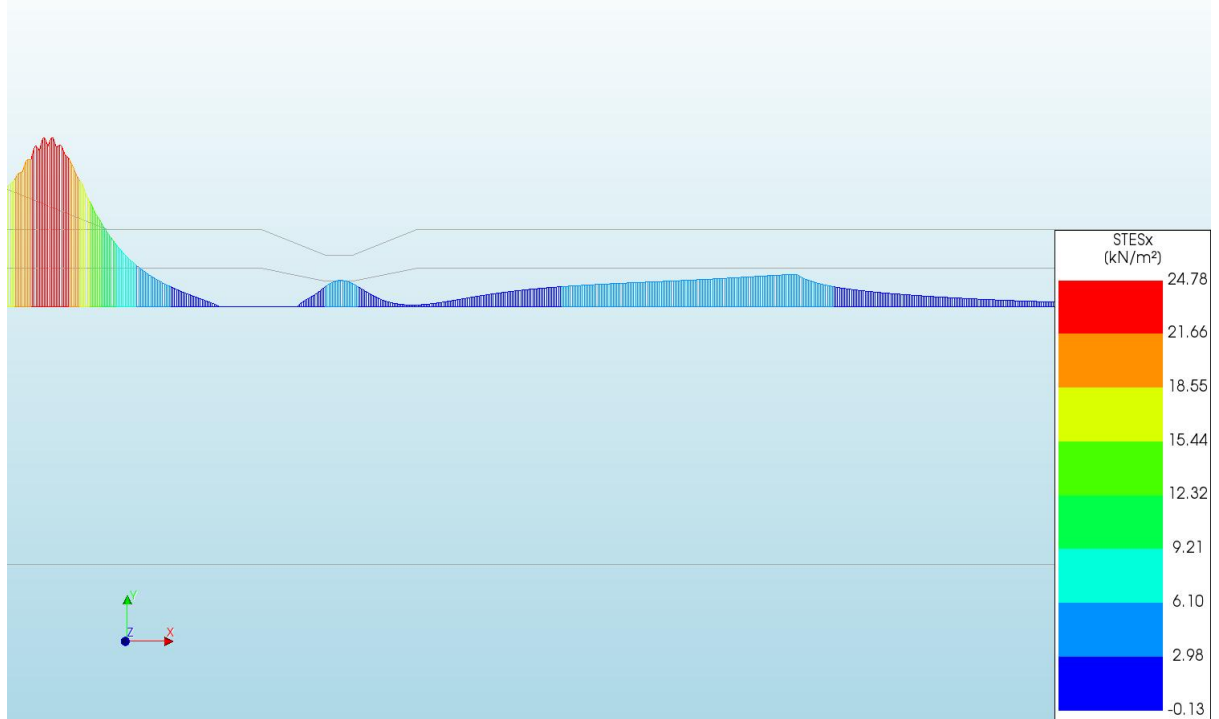
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Interface Relative Displacements DUSx  
 min: -0.03mm max: 136.24mm



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -15.46mm max: 5.38mm

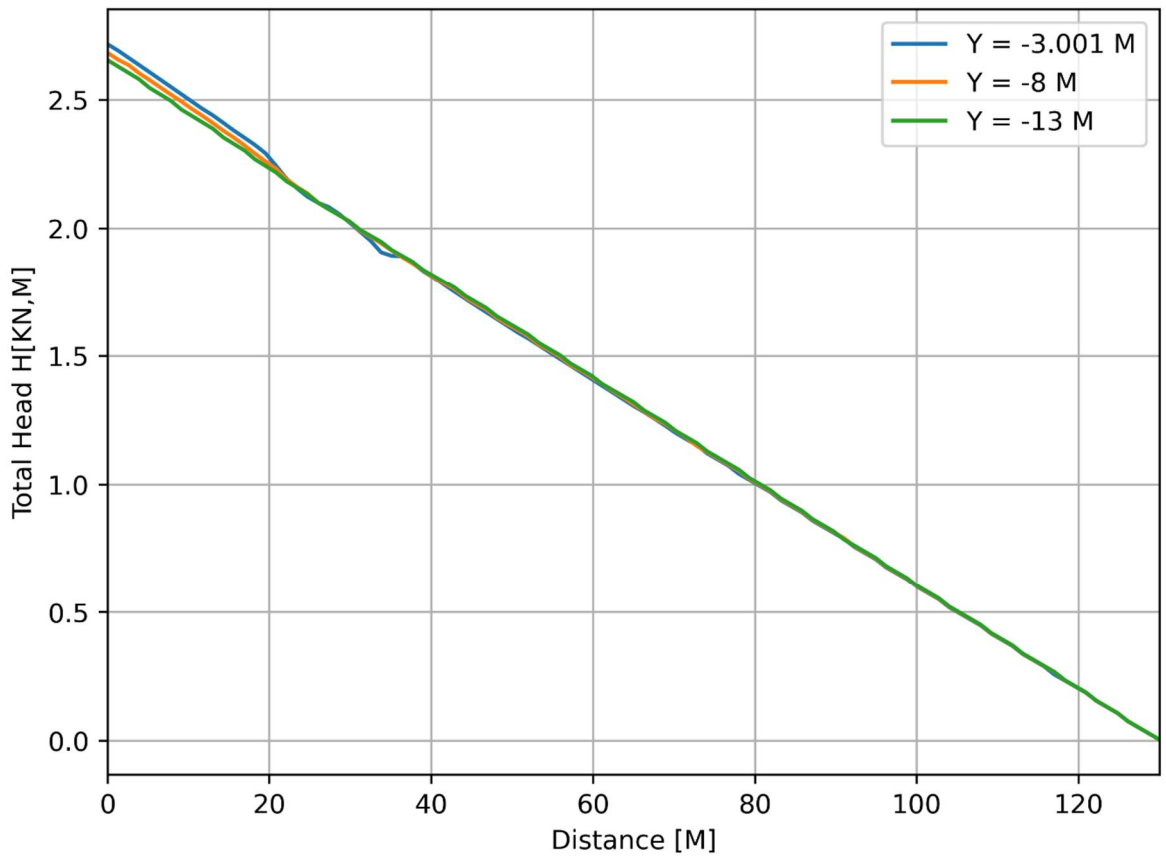


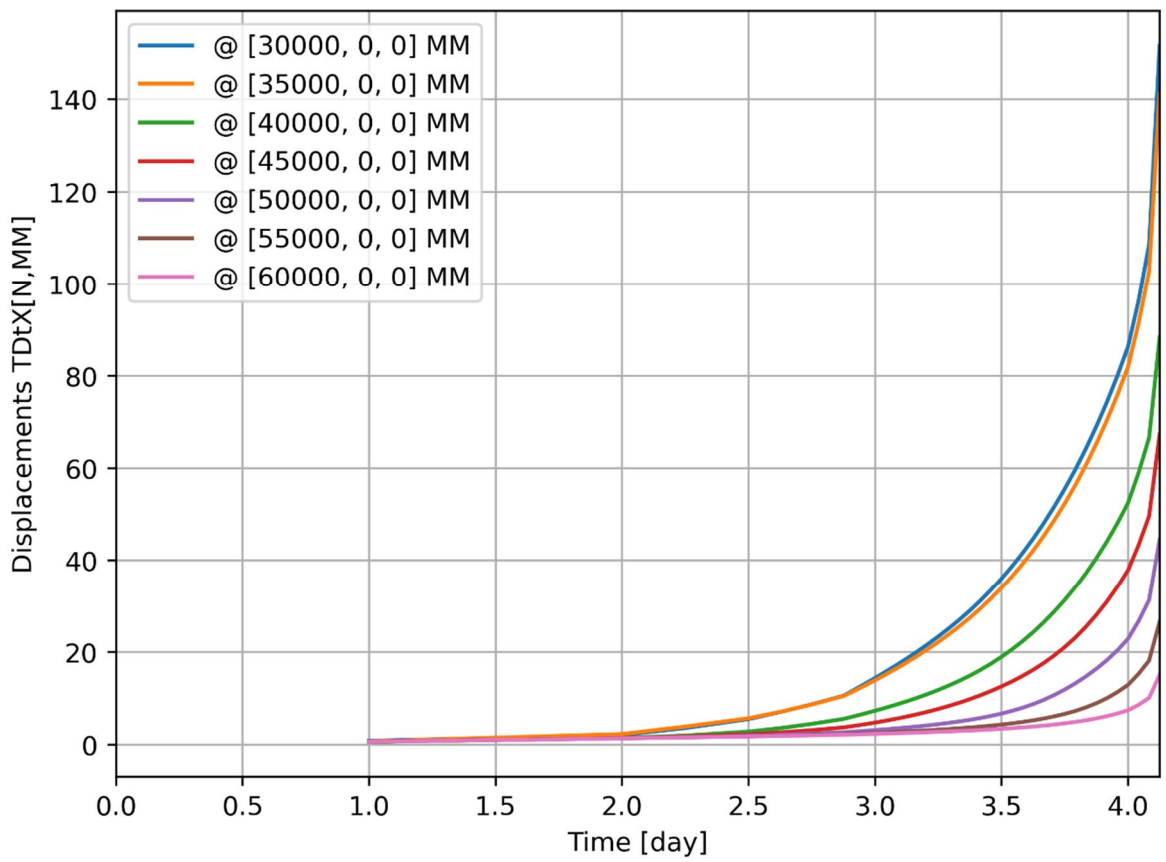
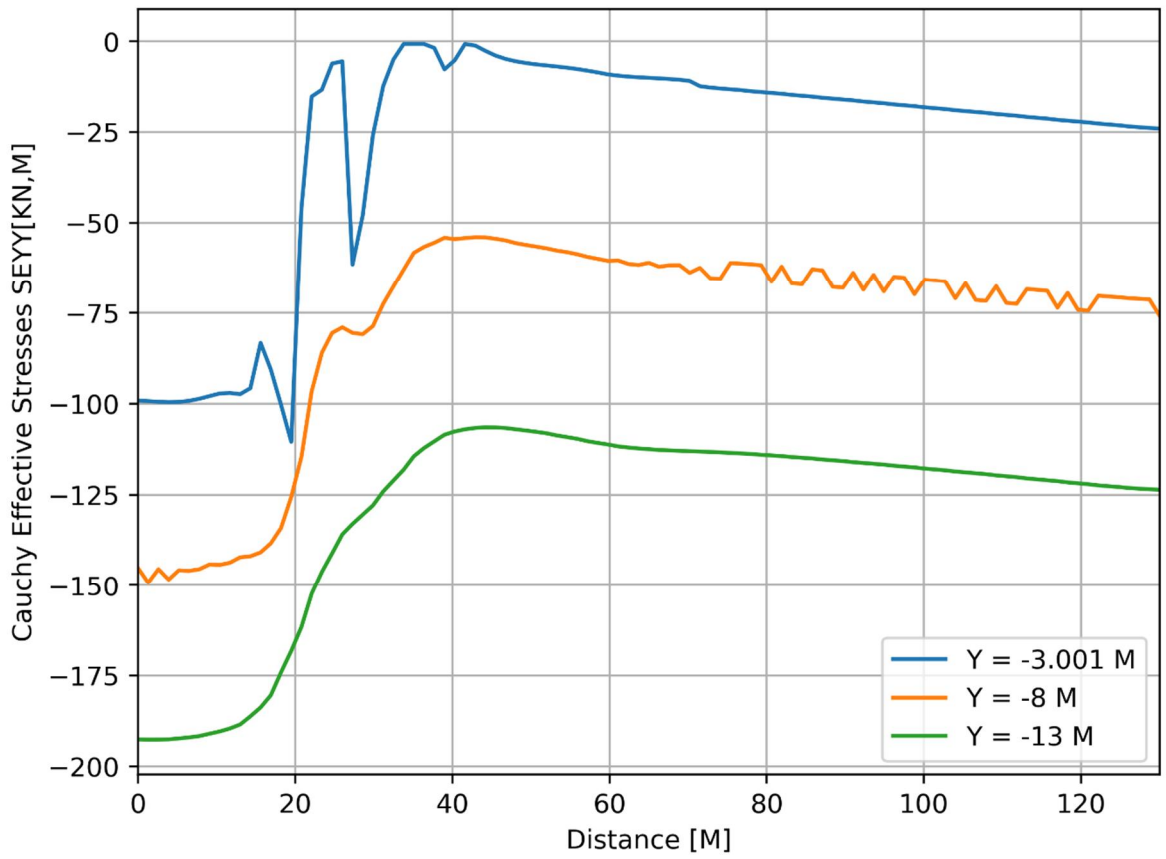
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.13kN/m<sup>2</sup> max: 24.78kN/m<sup>2</sup>

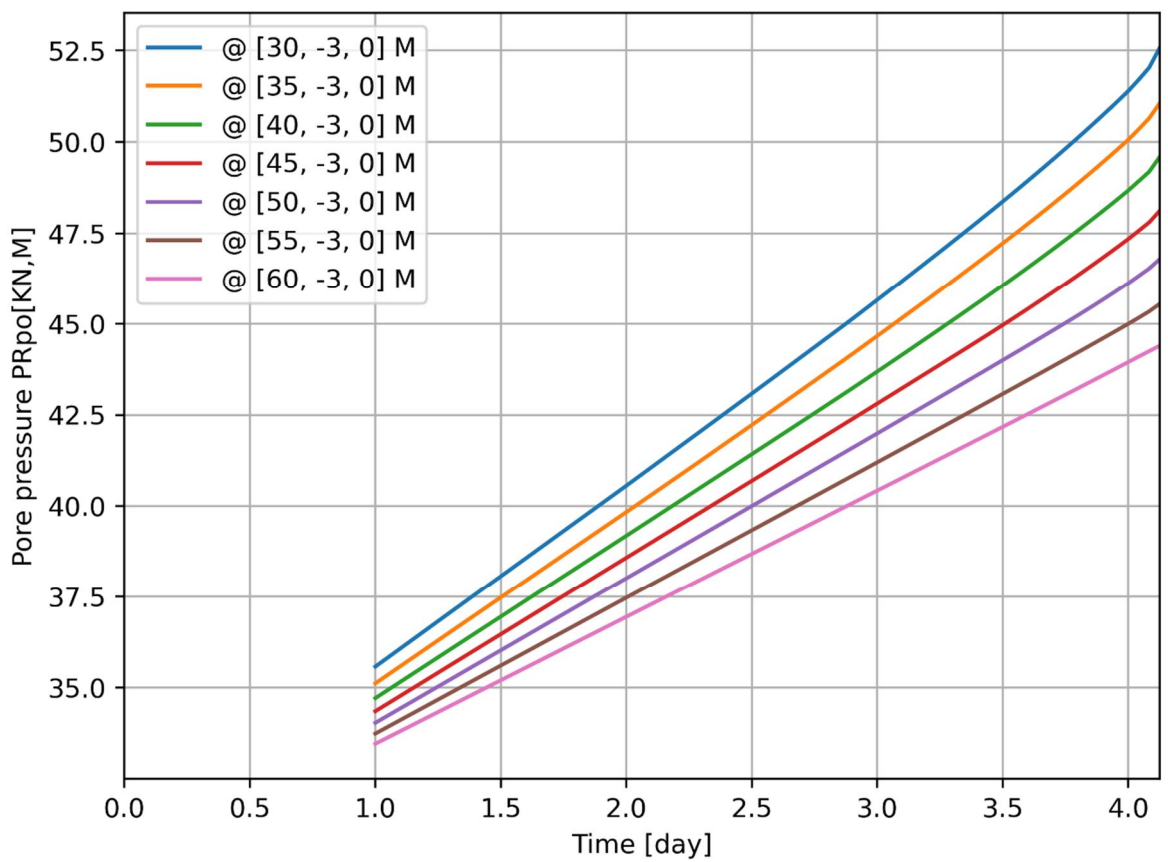
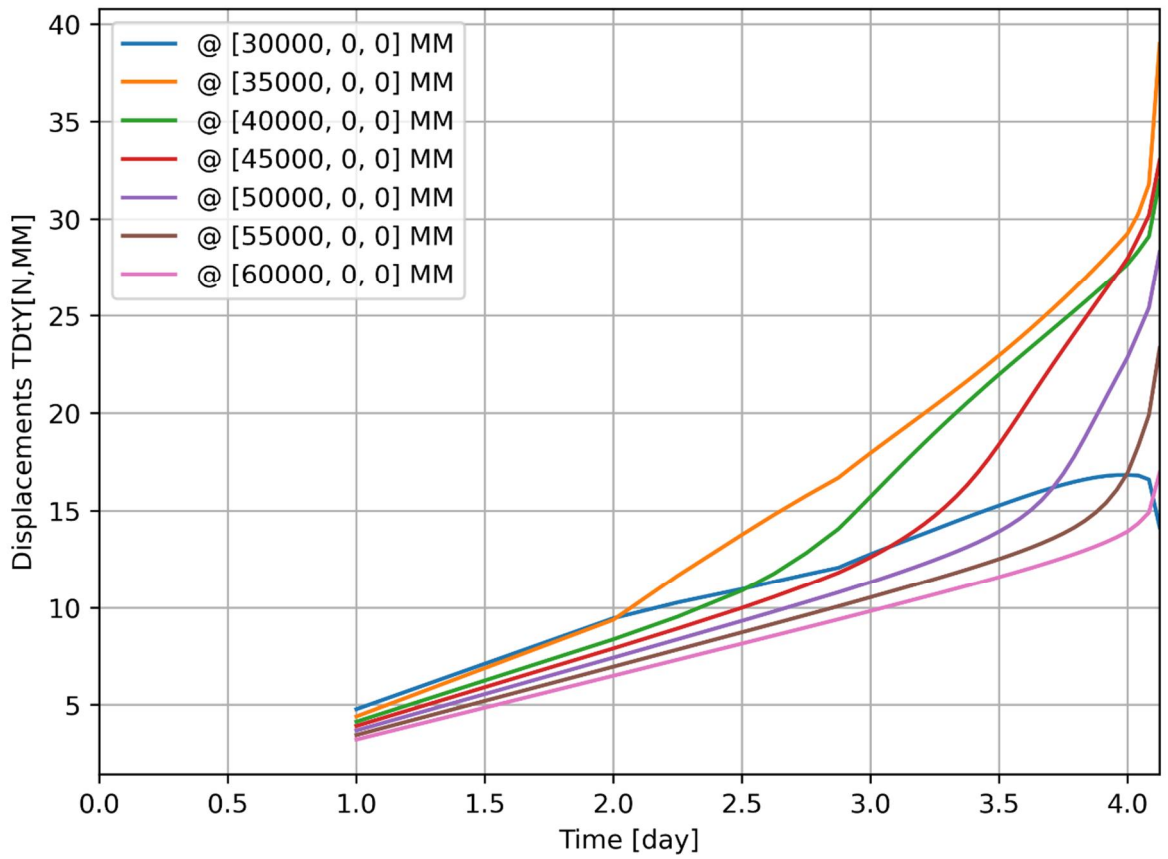


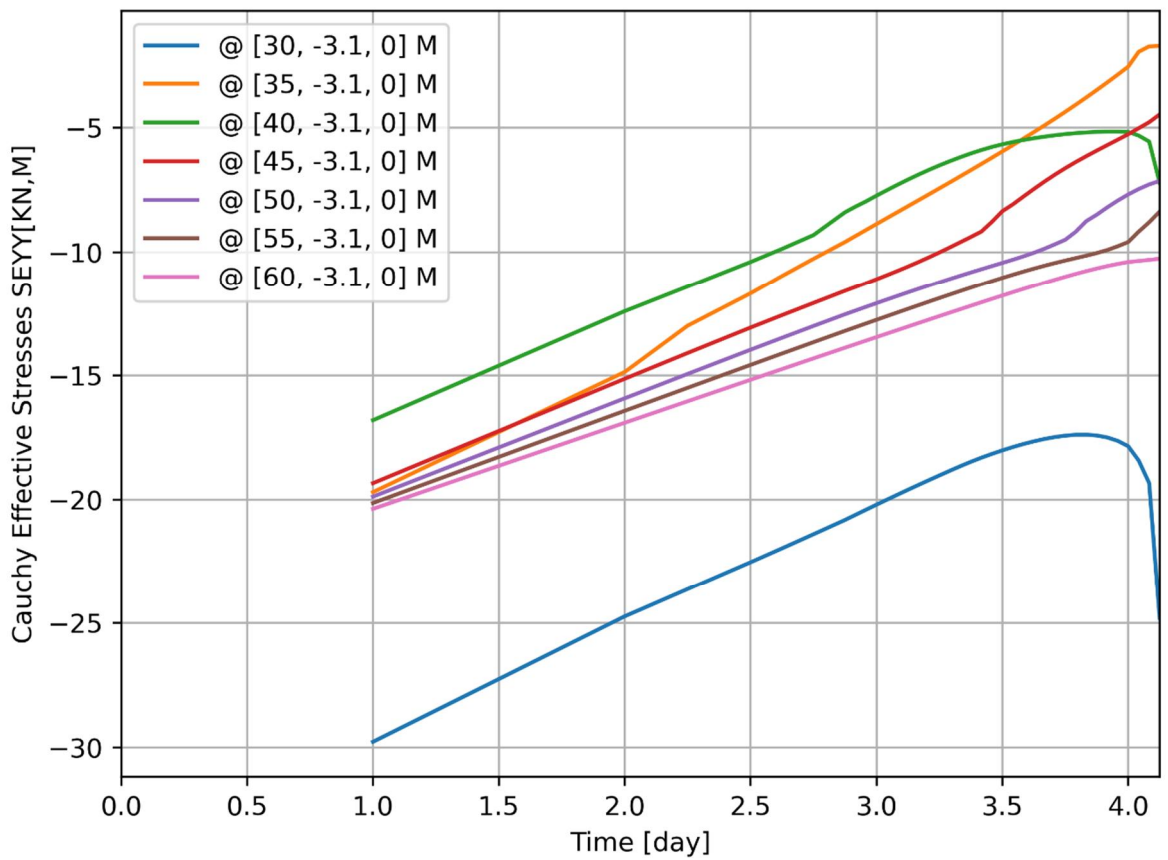
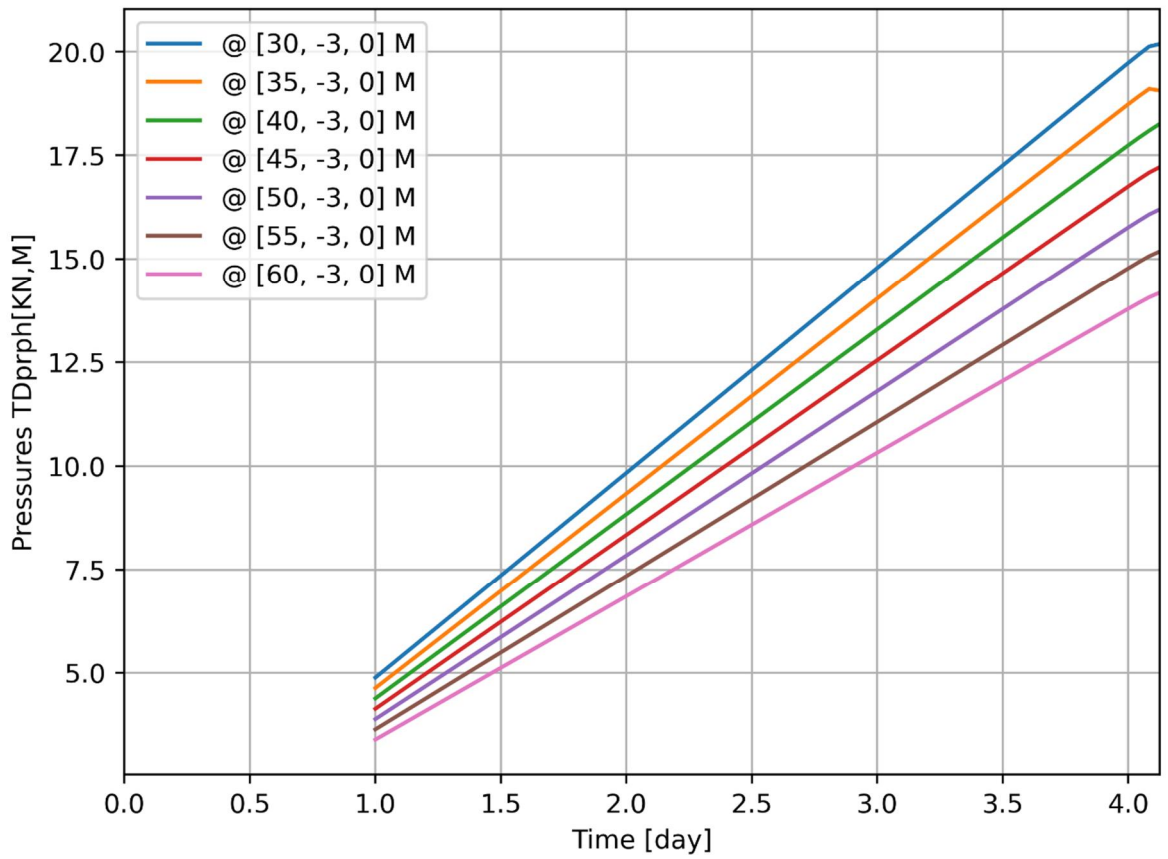


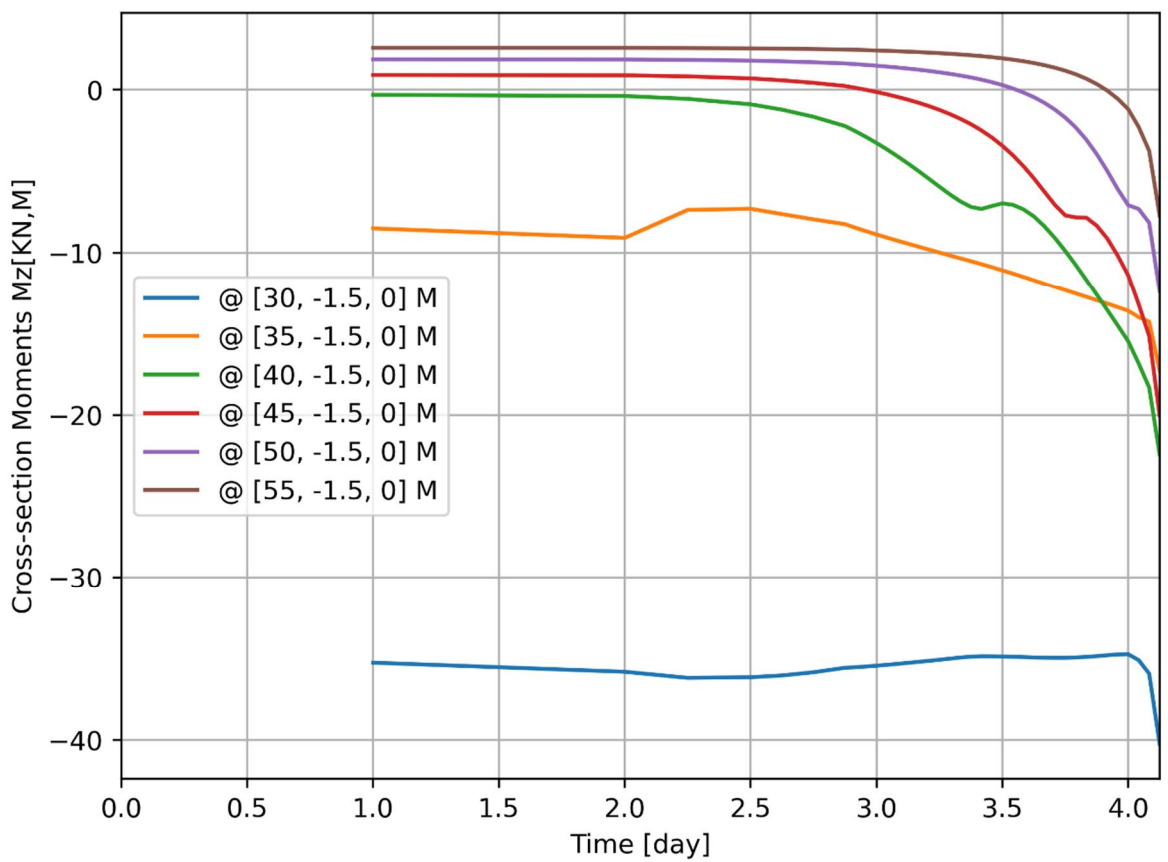
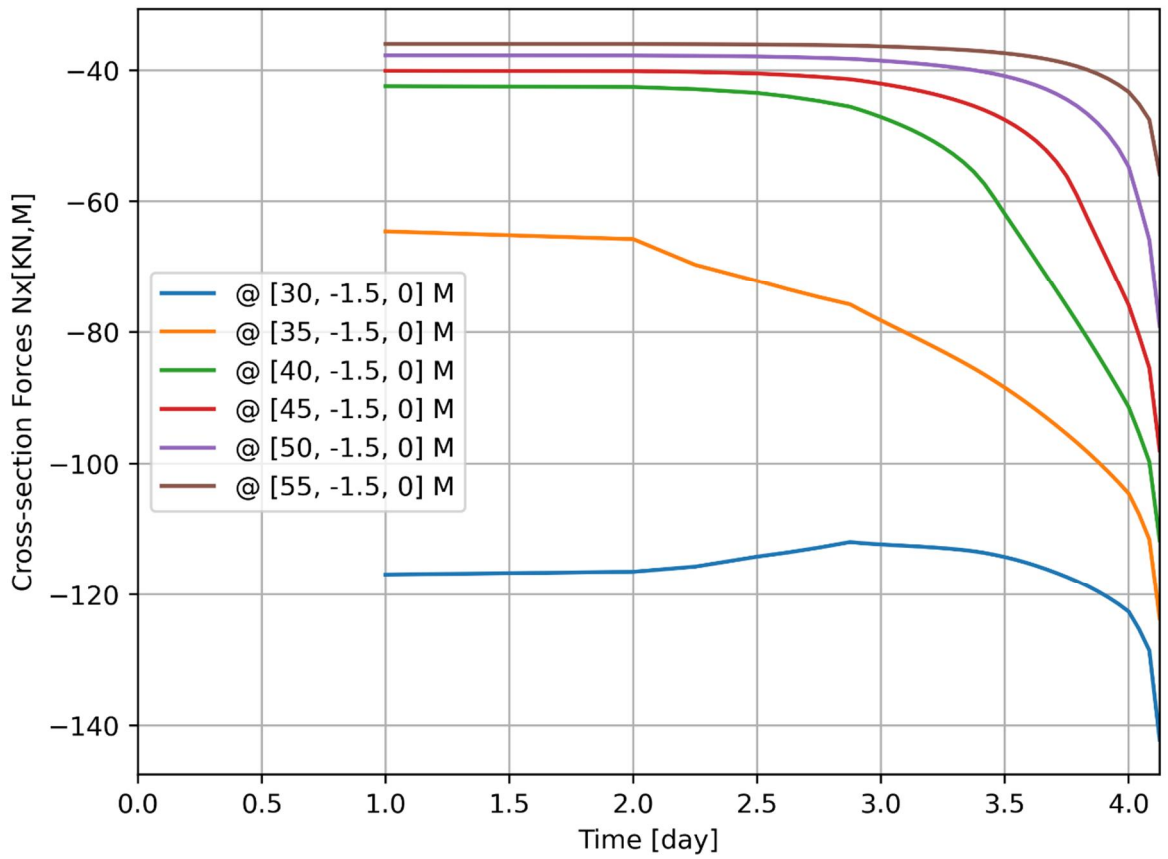
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 42, Time 4 day 2 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -99.27kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







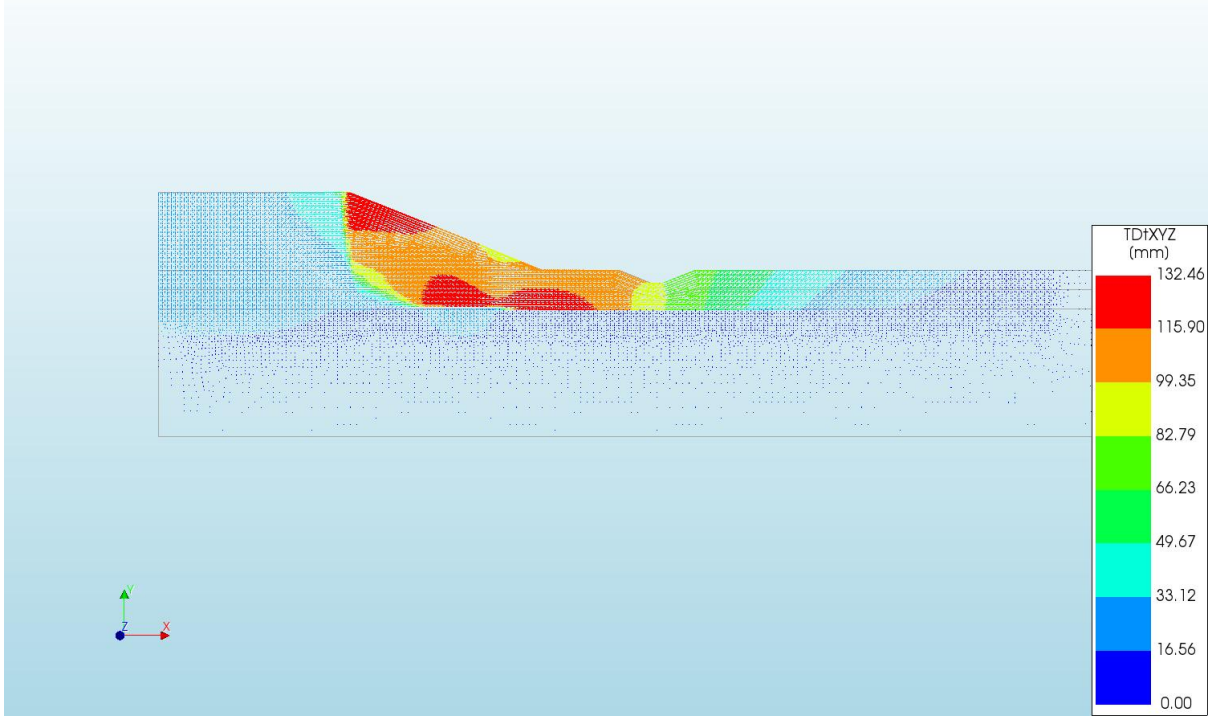




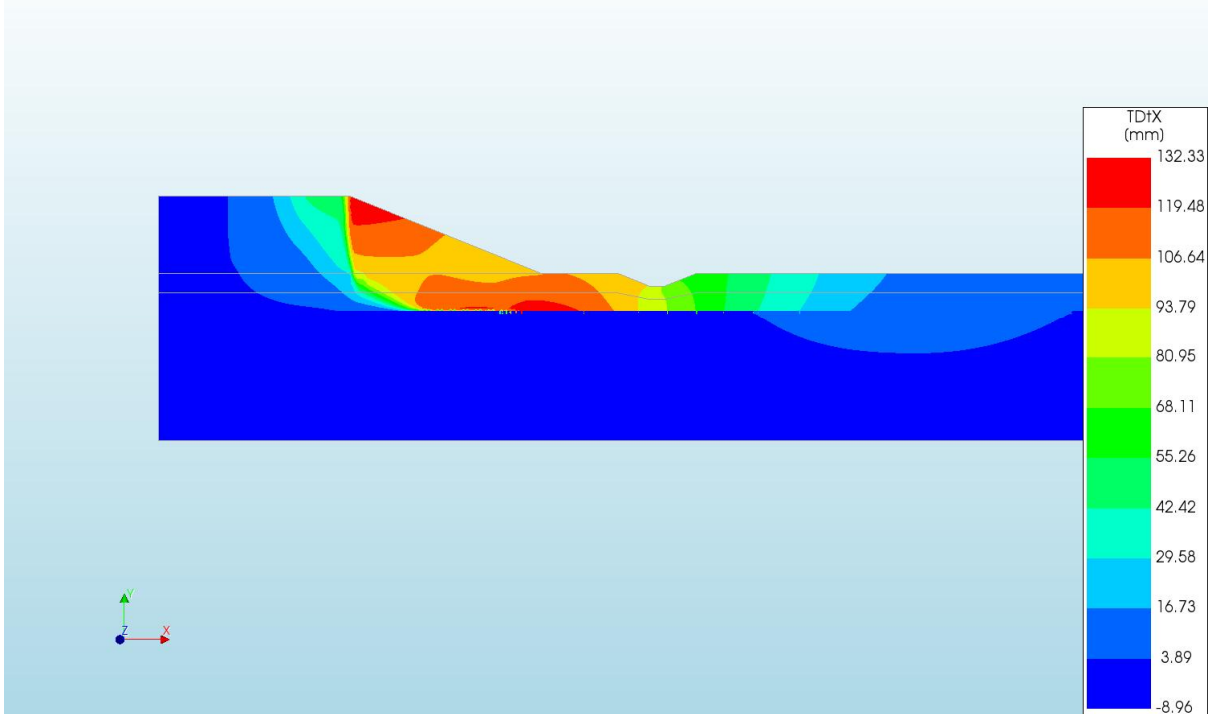
A.2.34

'Output d=3 c=19 E=3 k=1e-07 xs=36\_20200818'

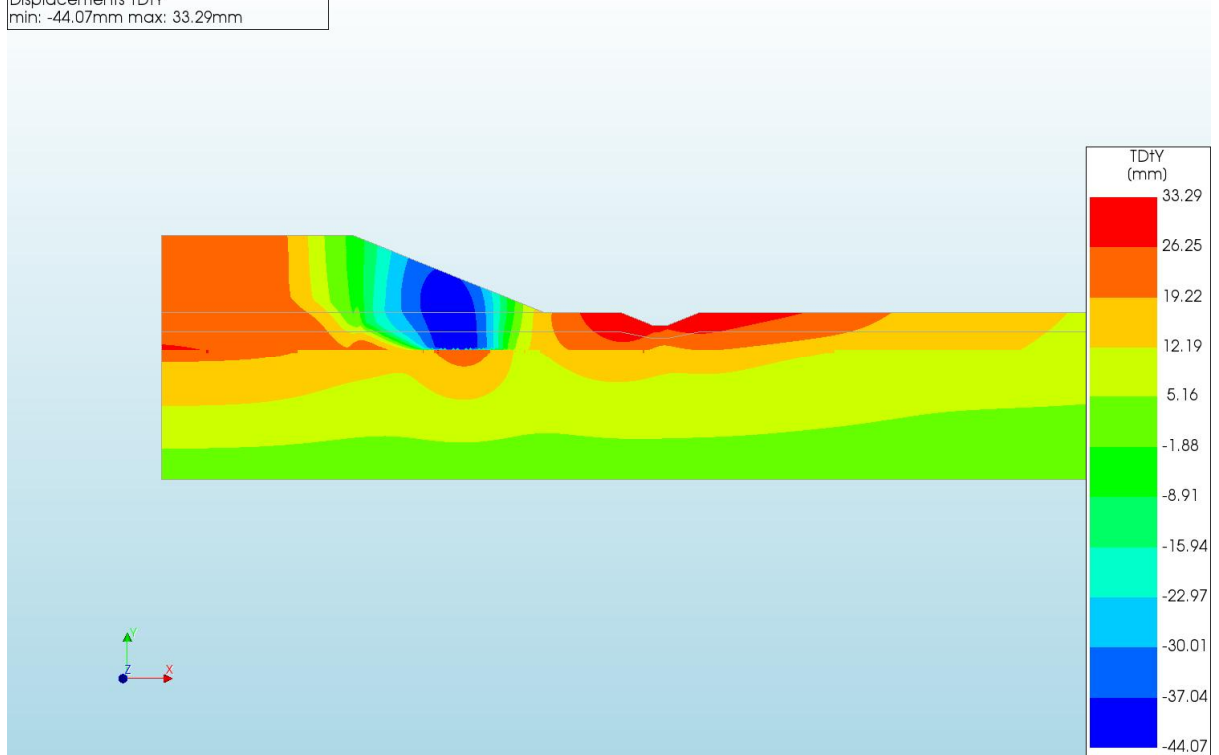
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 132.46mm



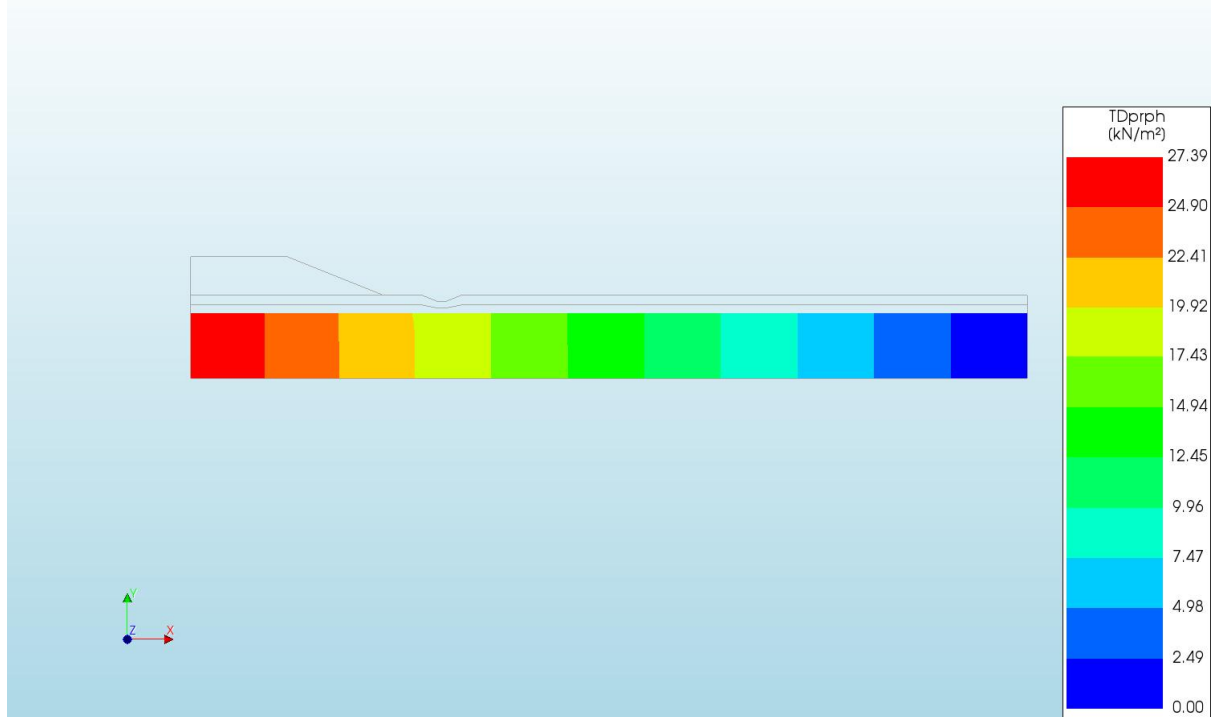
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -8.96mm max: 132.33mm



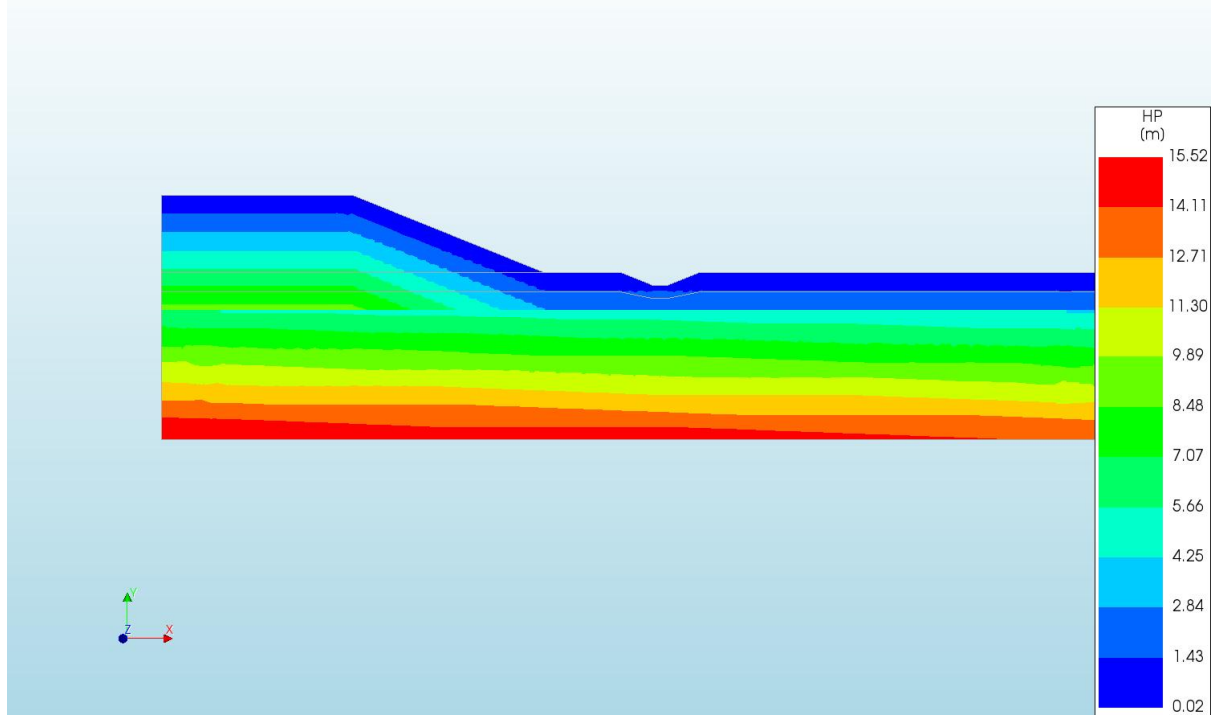
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Displacements TDtY  
min: -44.07mm max: 33.29mm



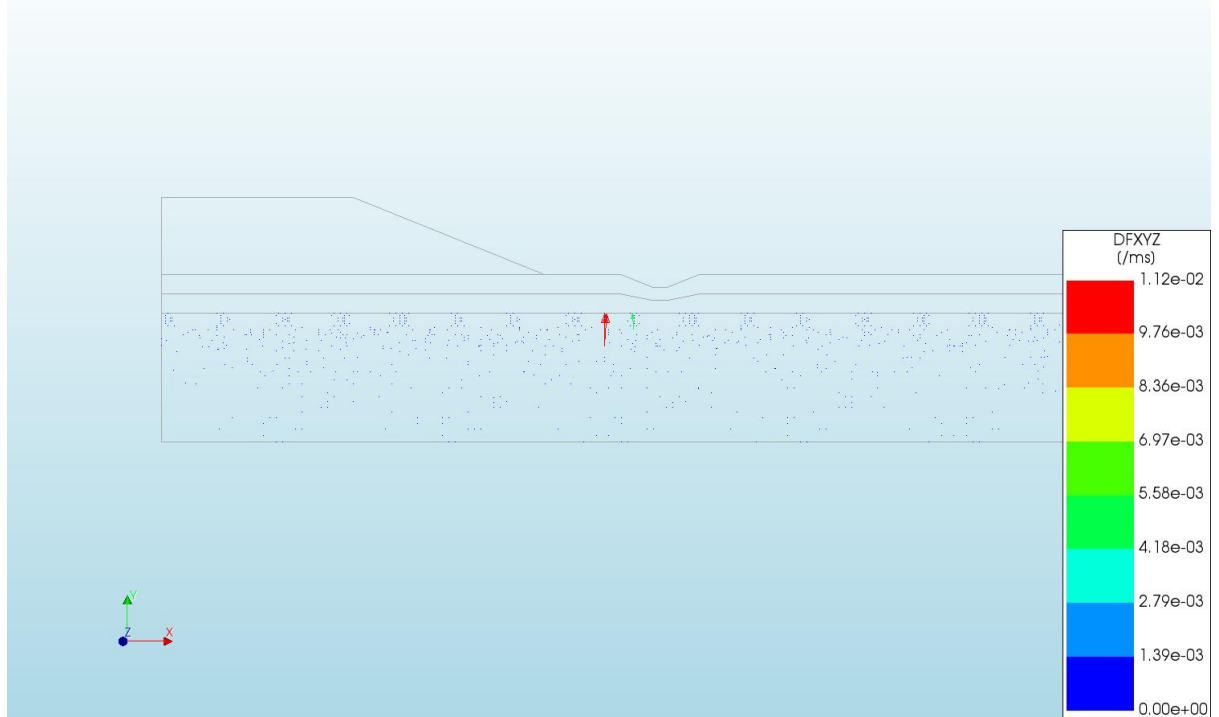
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 27.39kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.52m

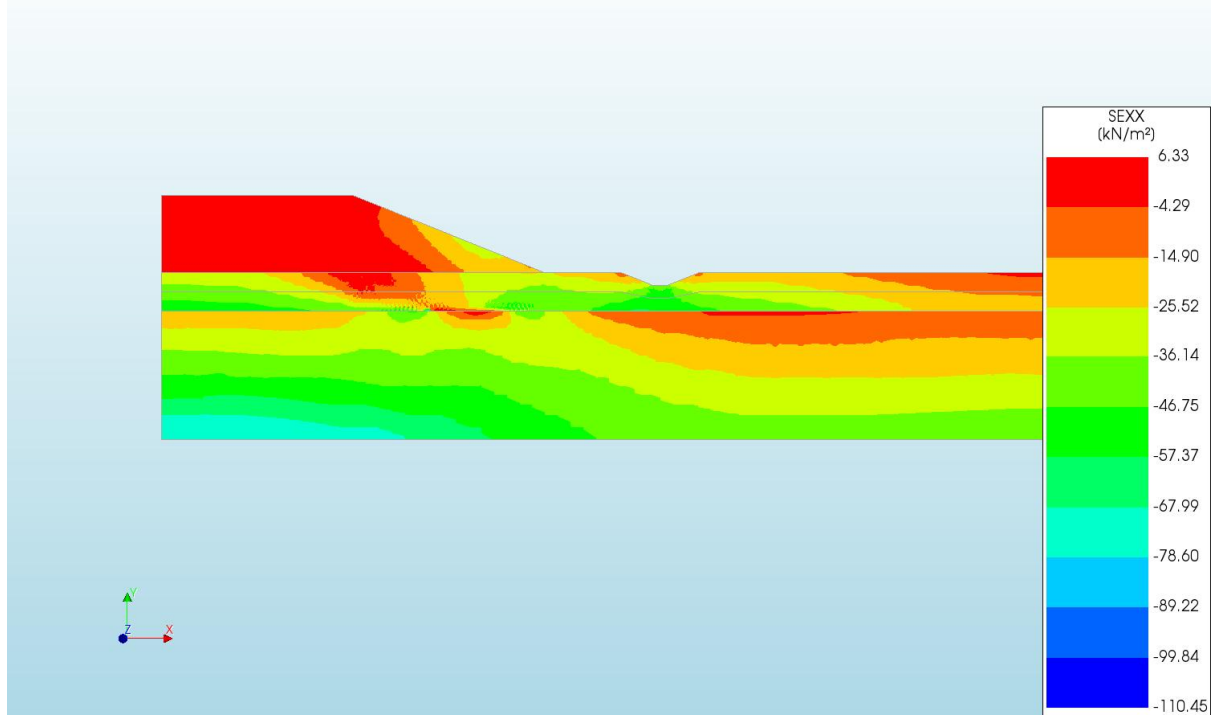


d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.12e-02/ms

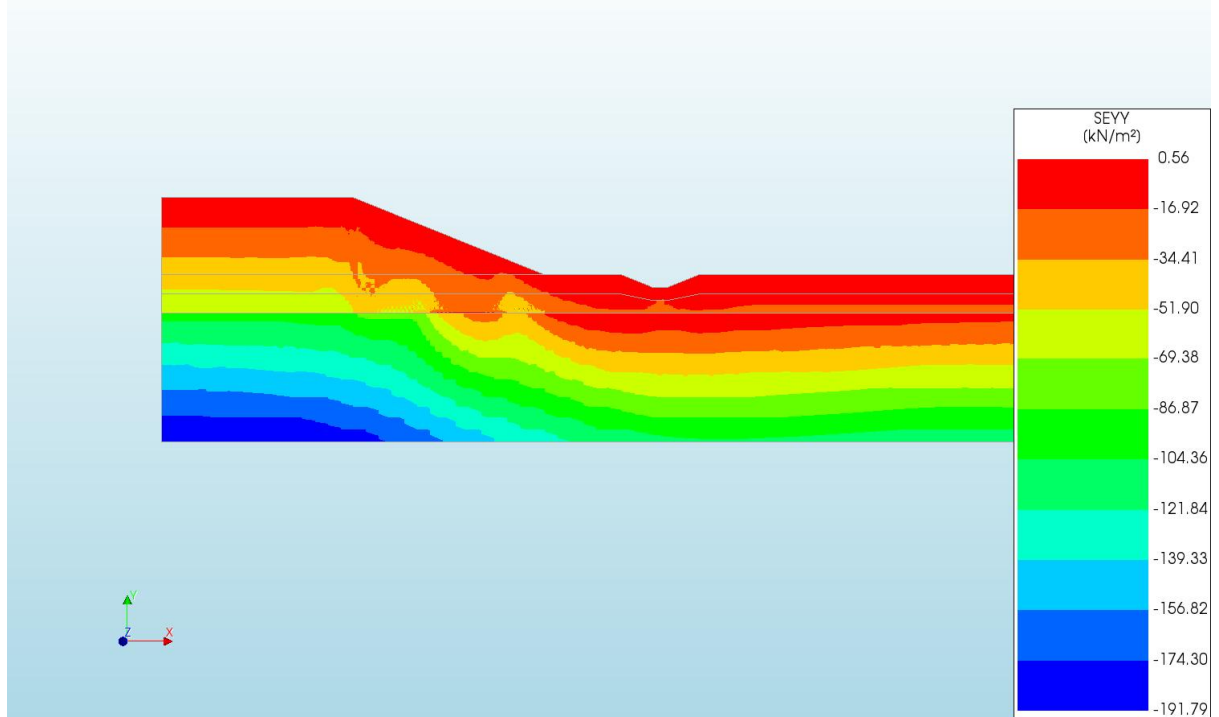




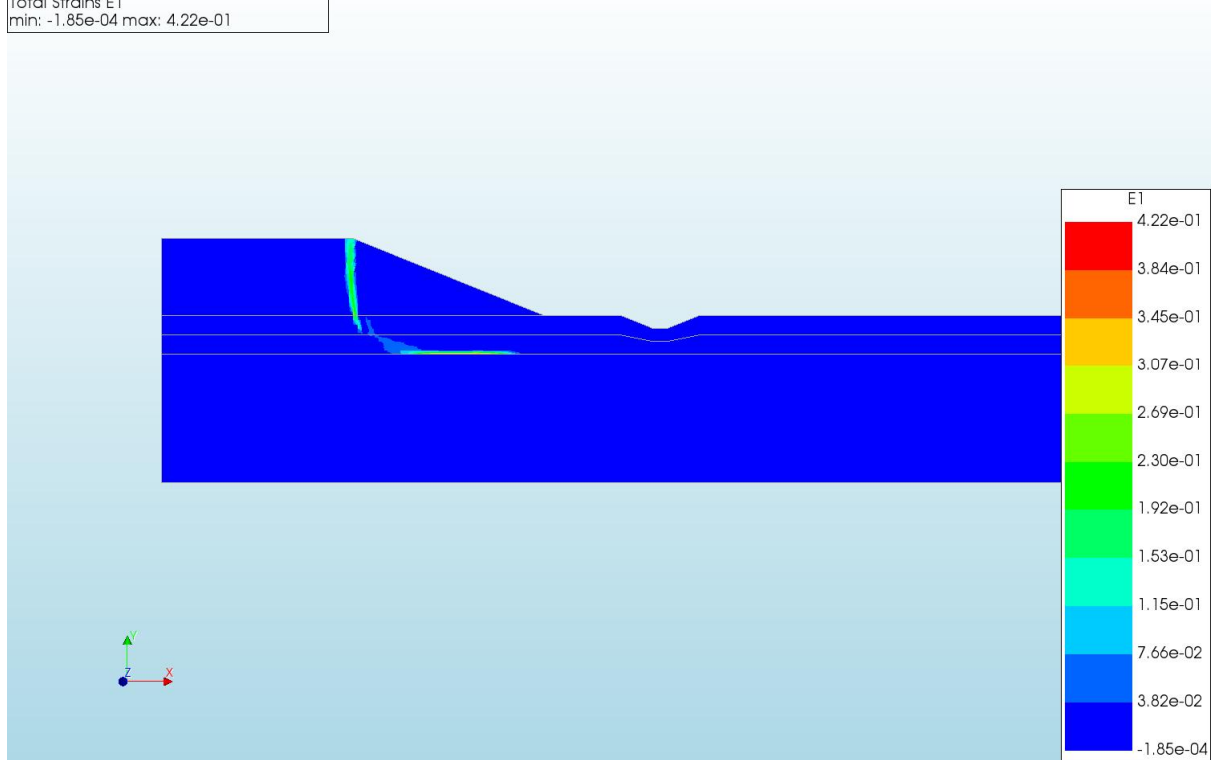
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -110.45kN/m<sup>2</sup> max: 6.33kN/m<sup>2</sup>



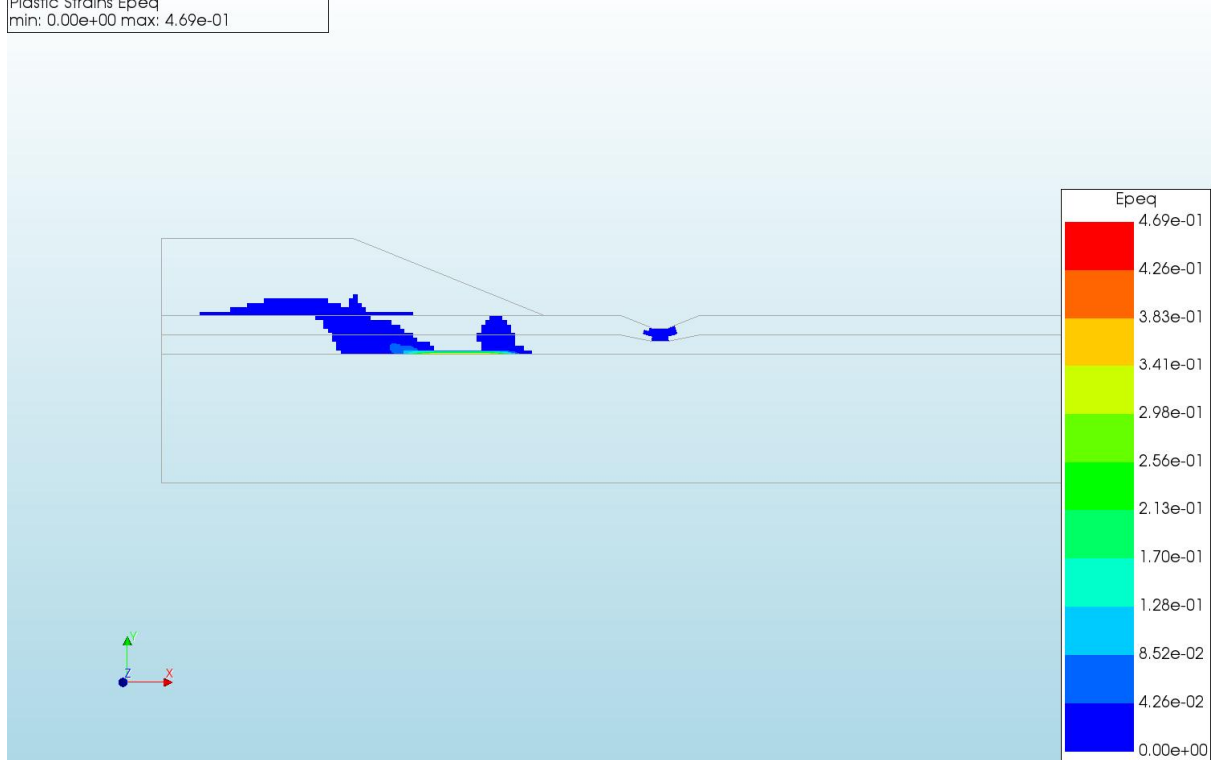
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -191.79kN/m<sup>2</sup> max: 0.56kN/m<sup>2</sup>



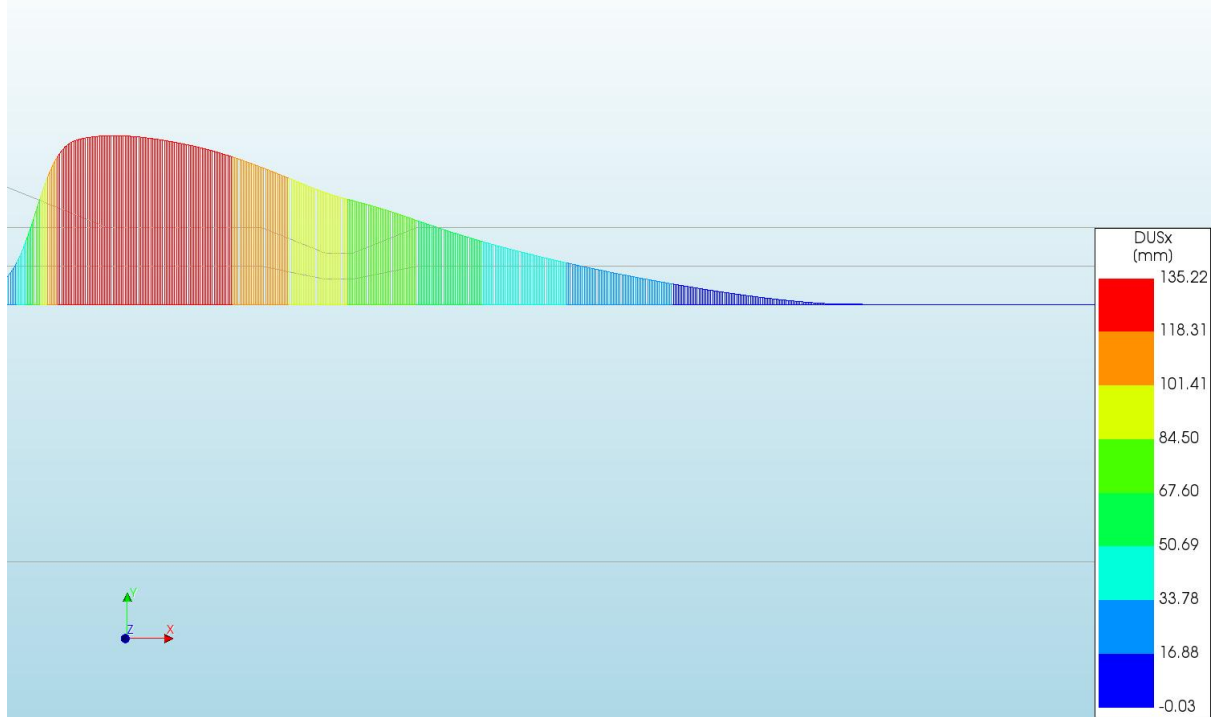
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Total Strains E1  
min: -1.85e-04 max: 4.22e-01



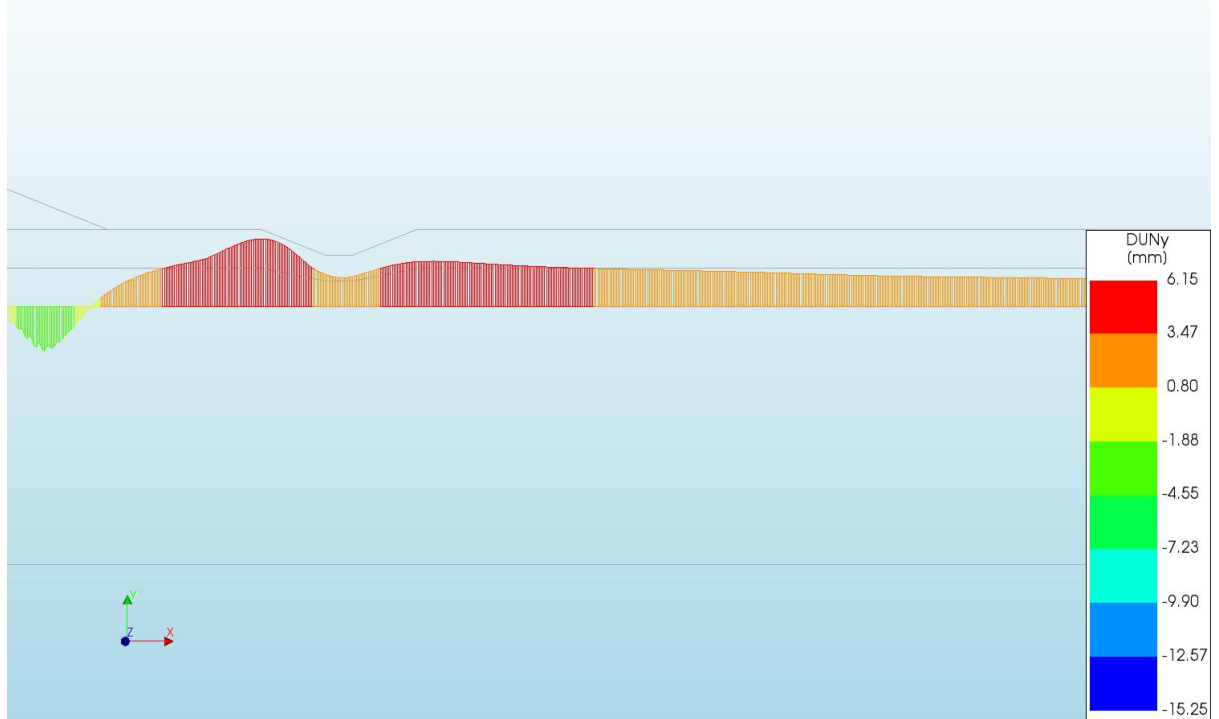
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.69e-01



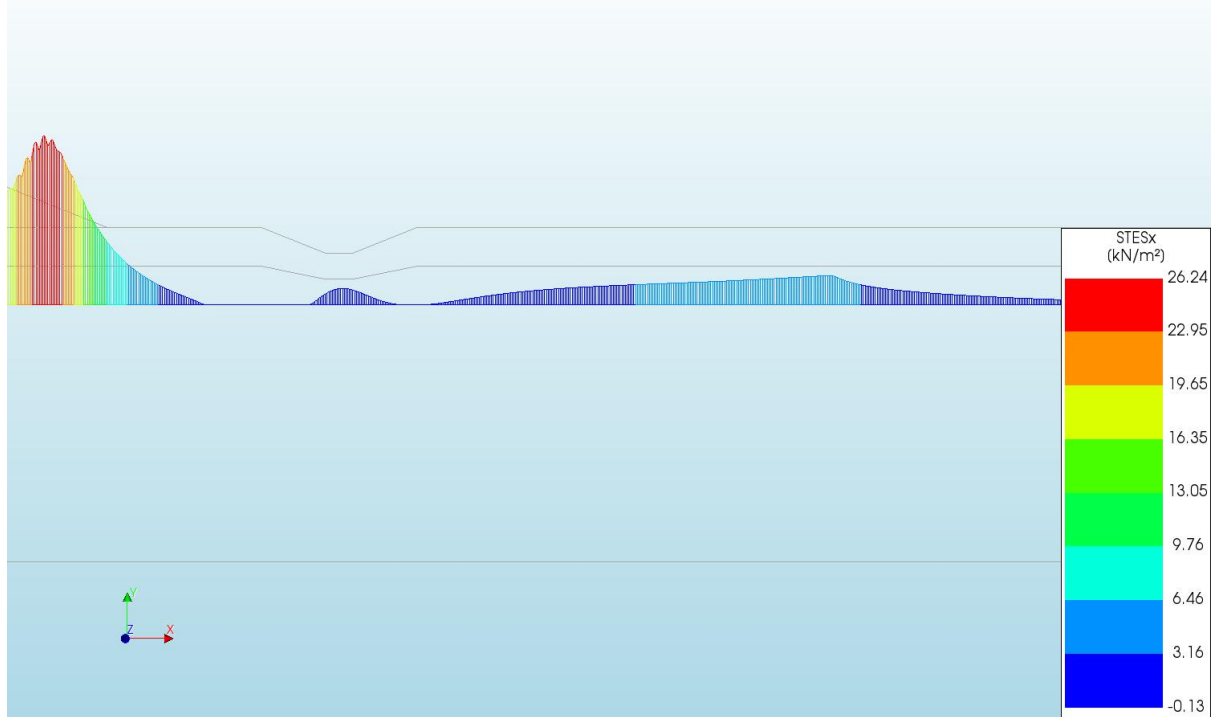
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 135.22mm



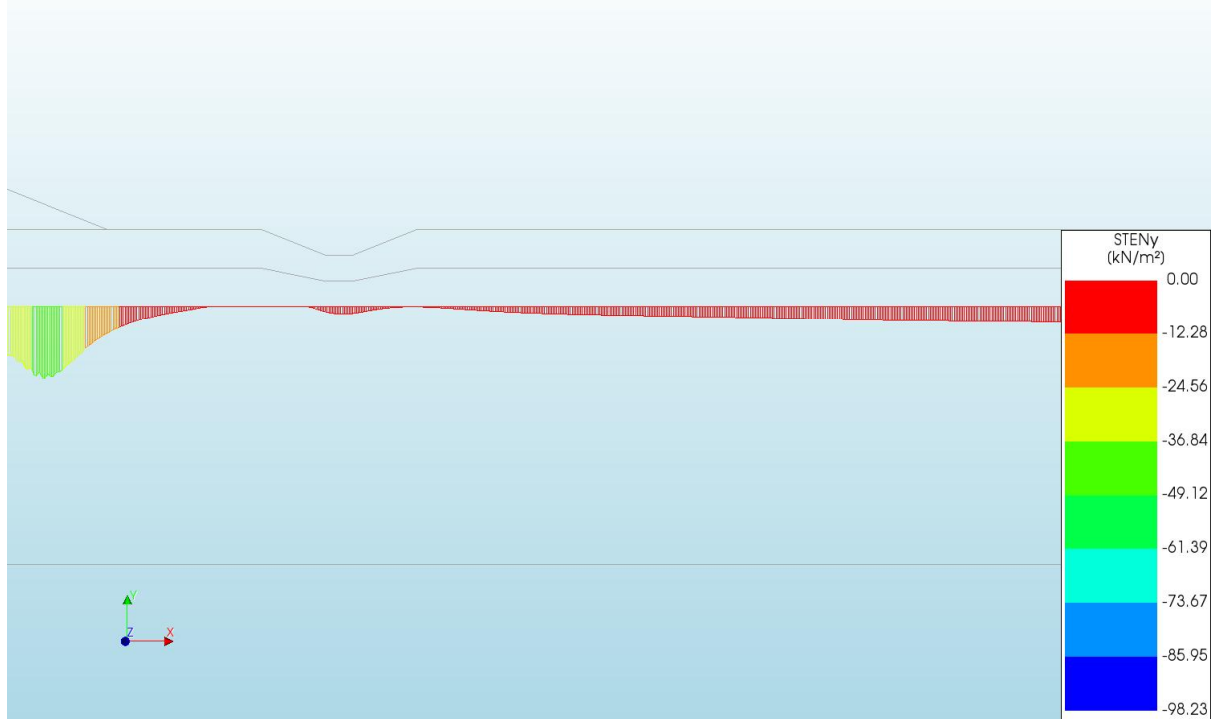
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -15.25mm max: 6.15mm

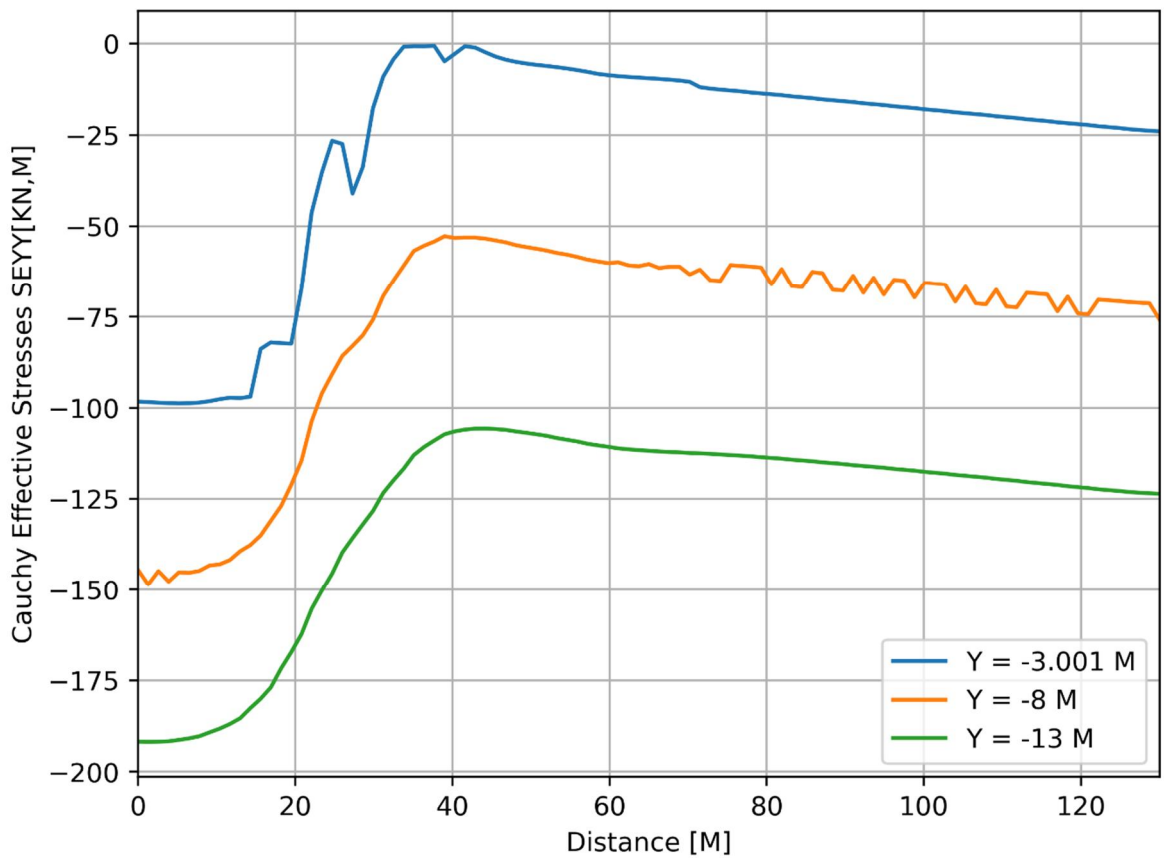
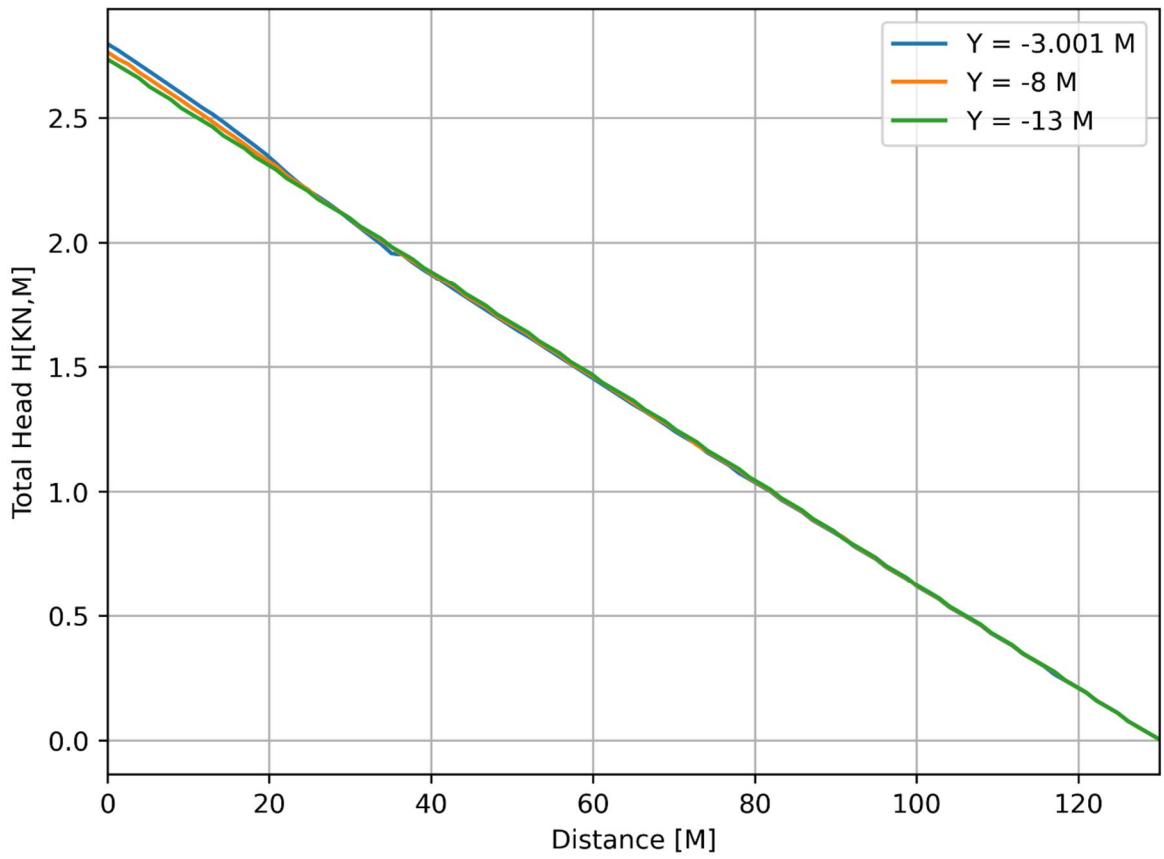


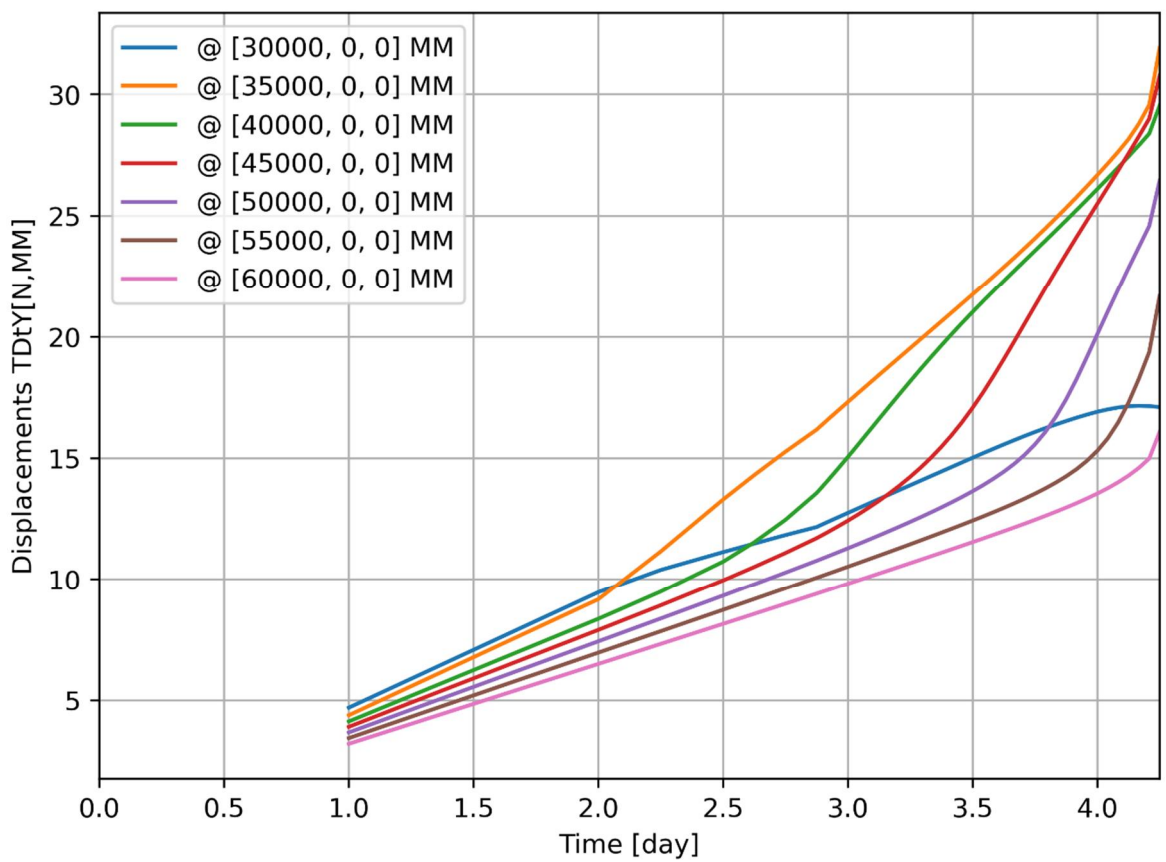
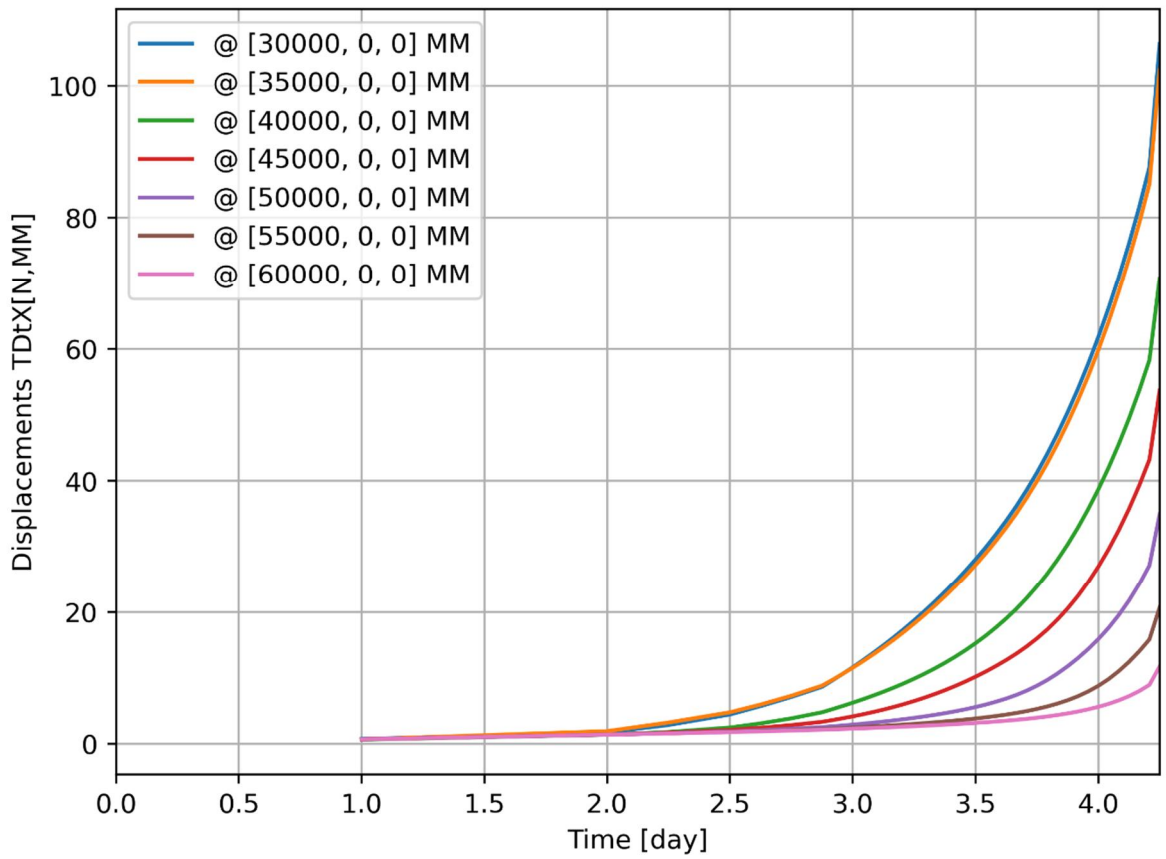
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.13kN/m<sup>2</sup> max: 26.24kN/m<sup>2</sup>

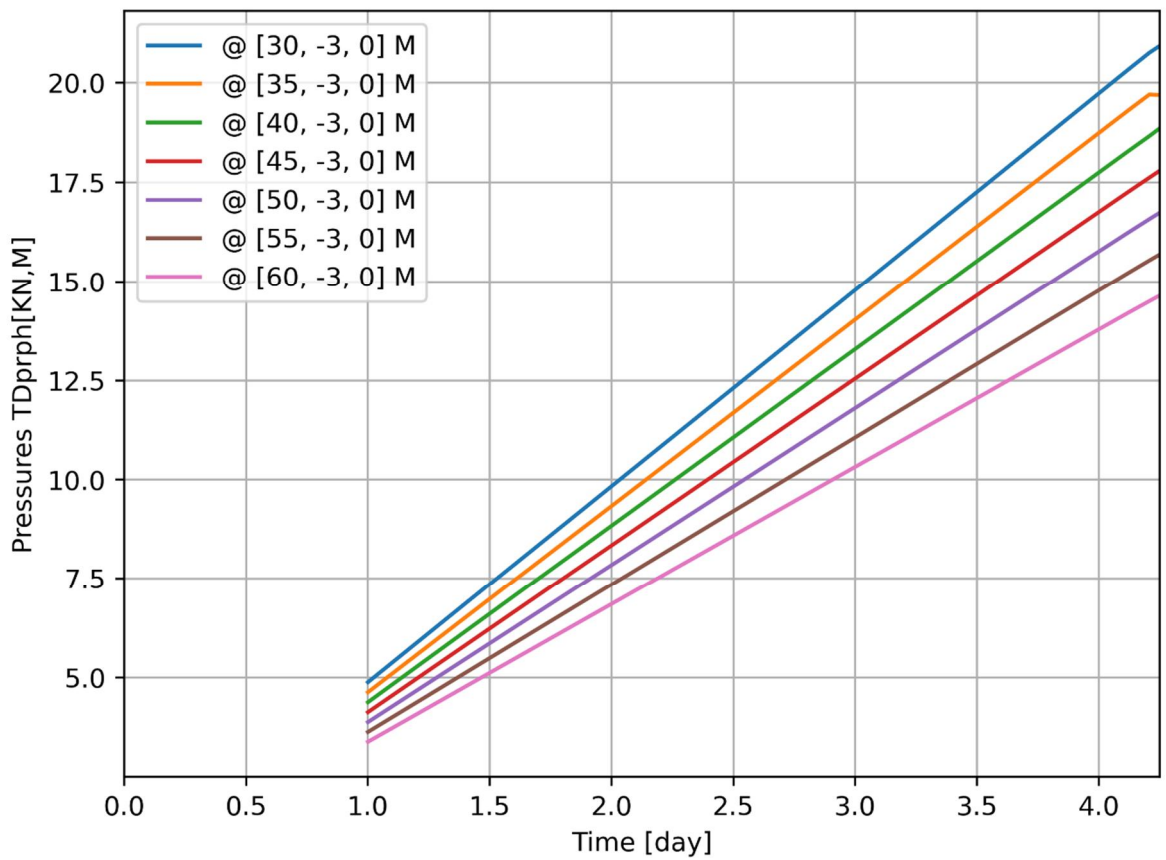
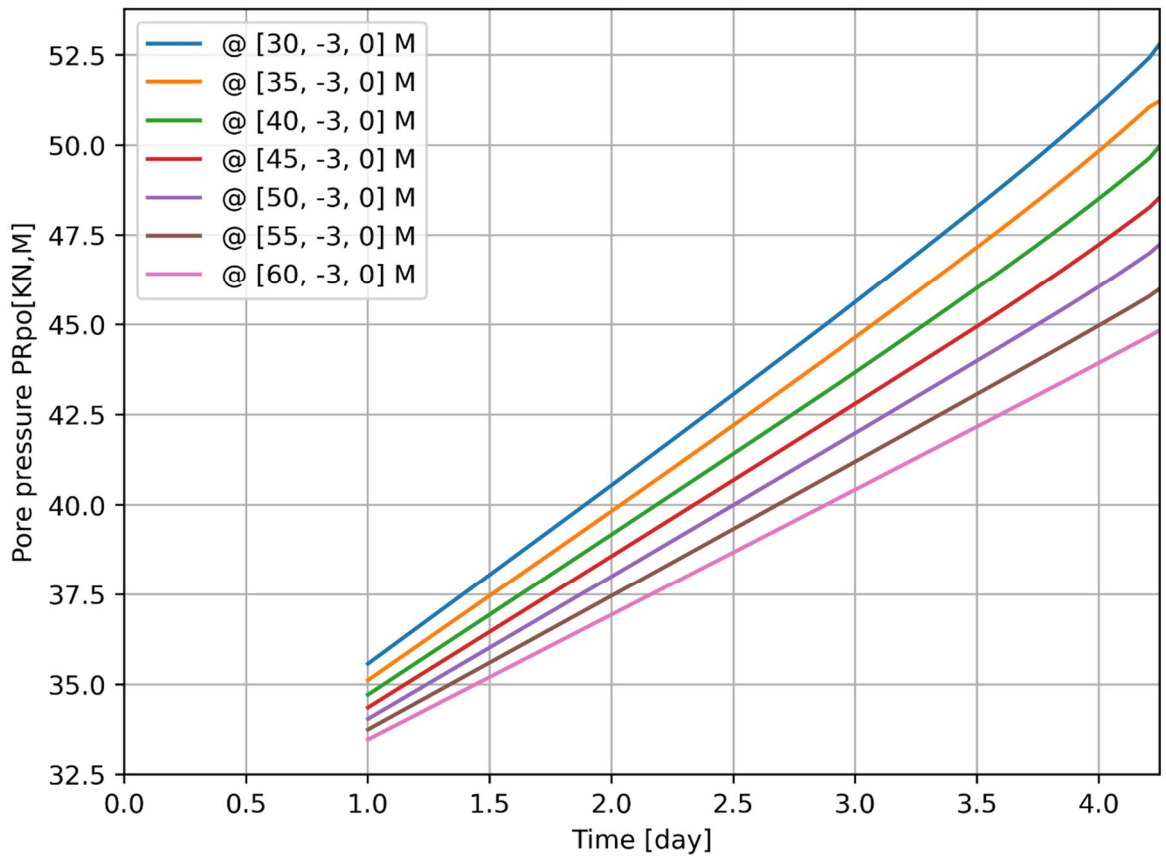


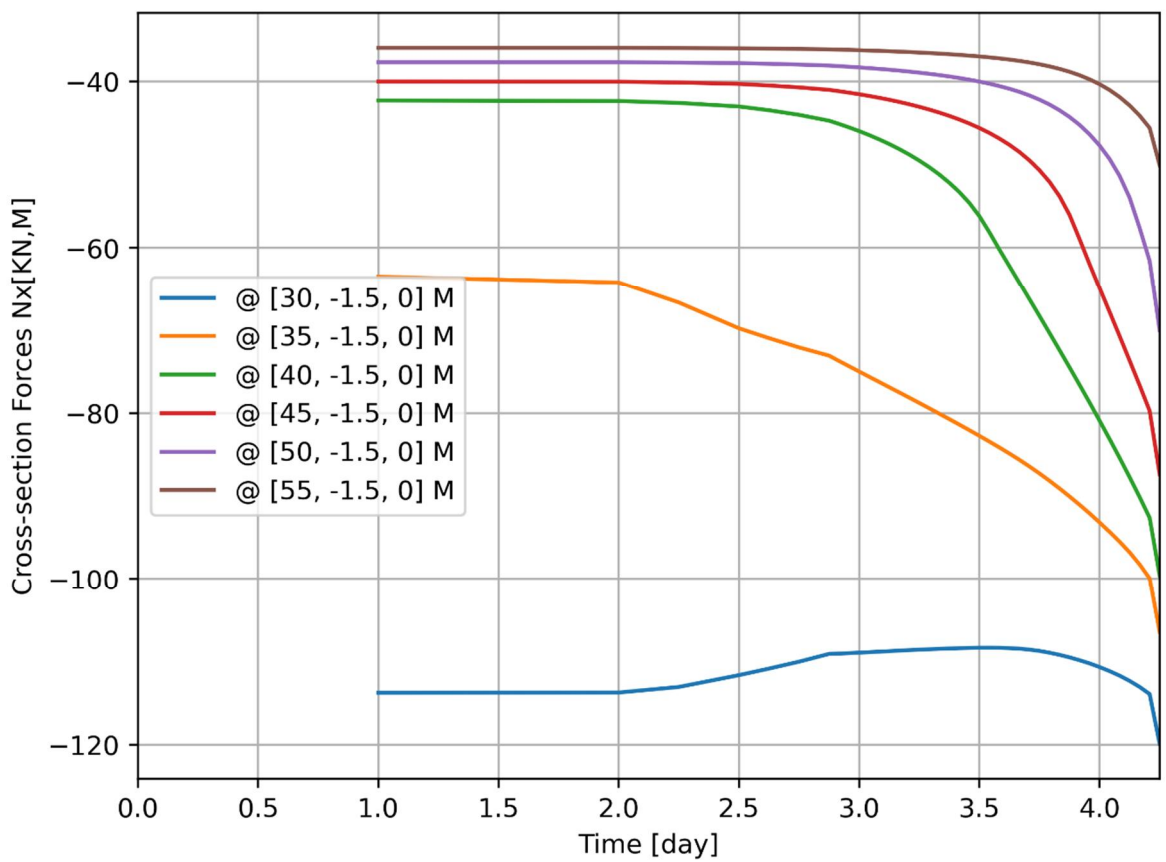
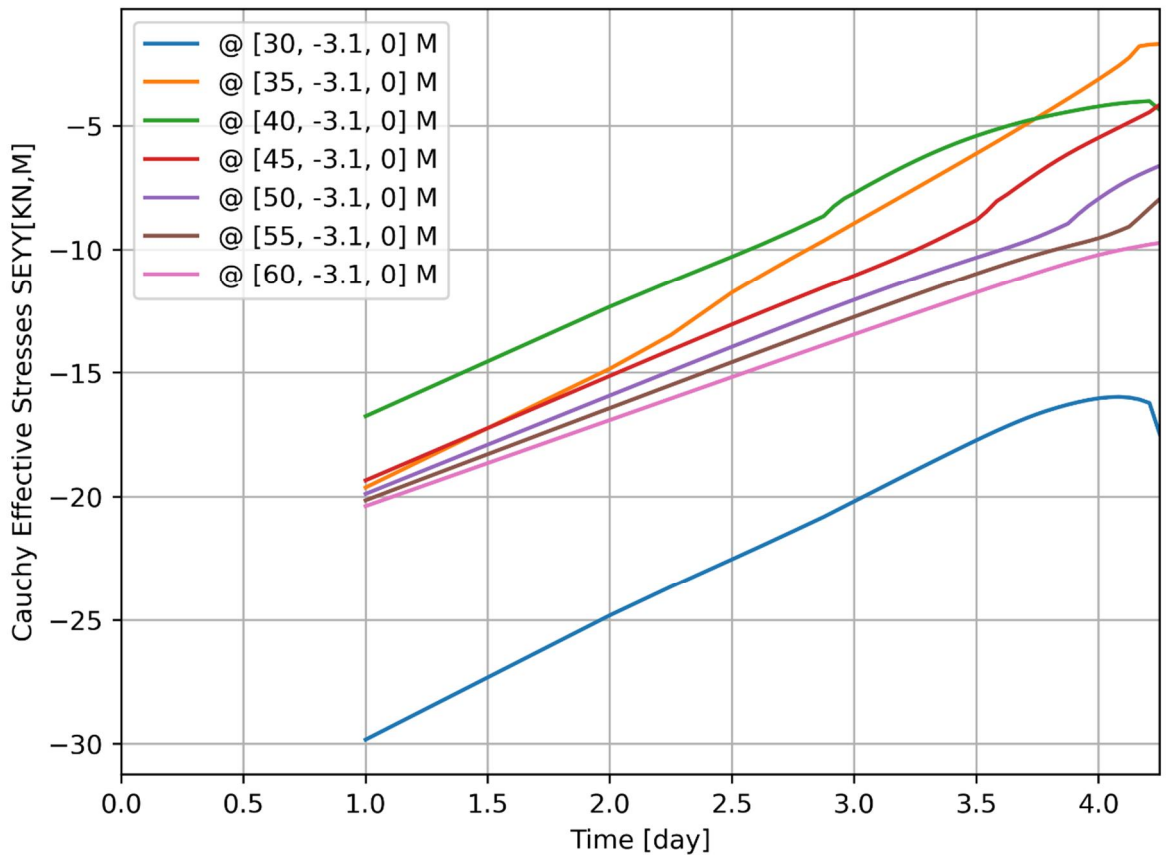
d=3\_c=19\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 46, Time 4 day 6 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -98.23kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>



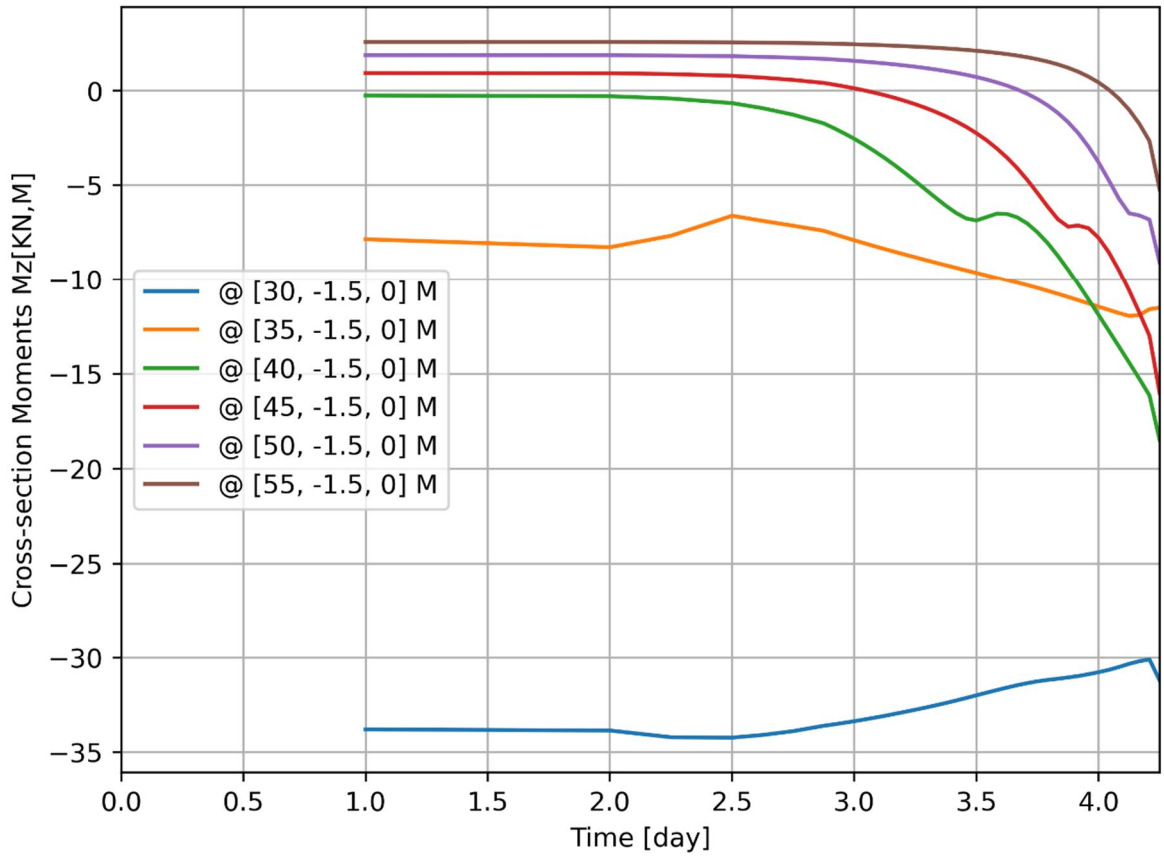






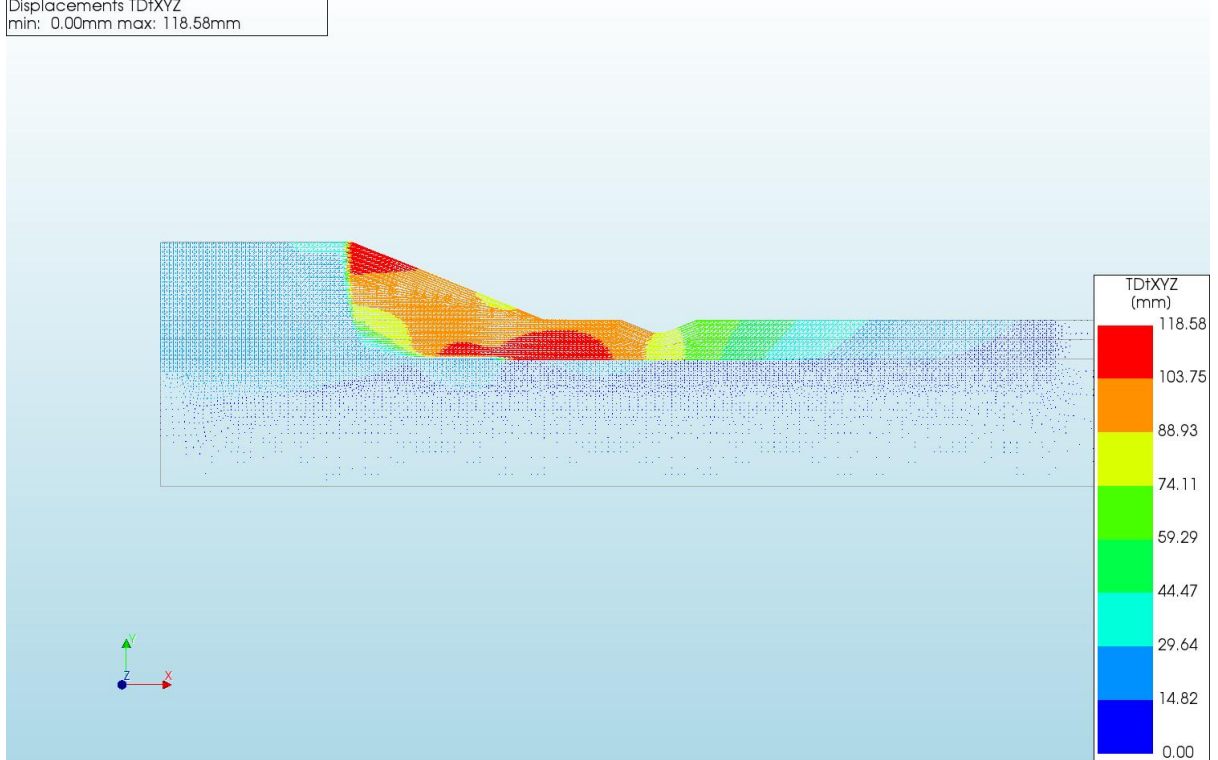




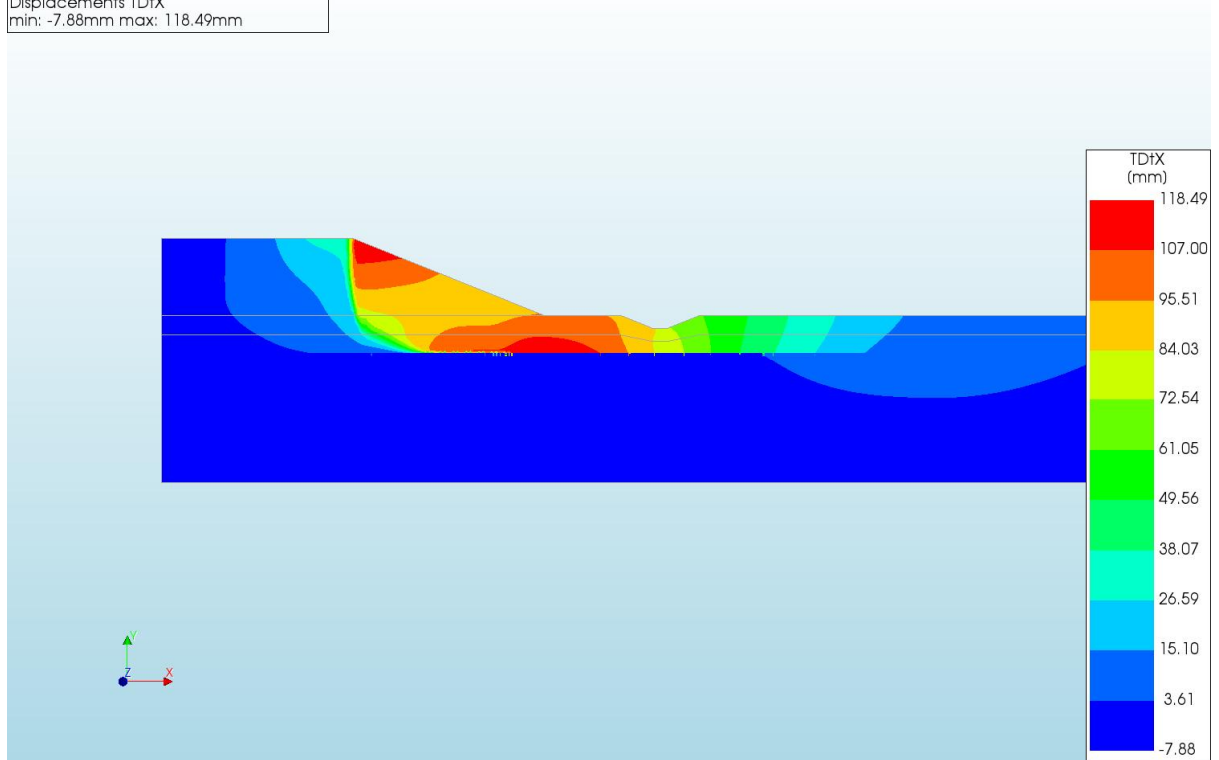


**A.2.35 'Output d=3 c=20 E=3 k=1e-07 xs=36\_20200818'**

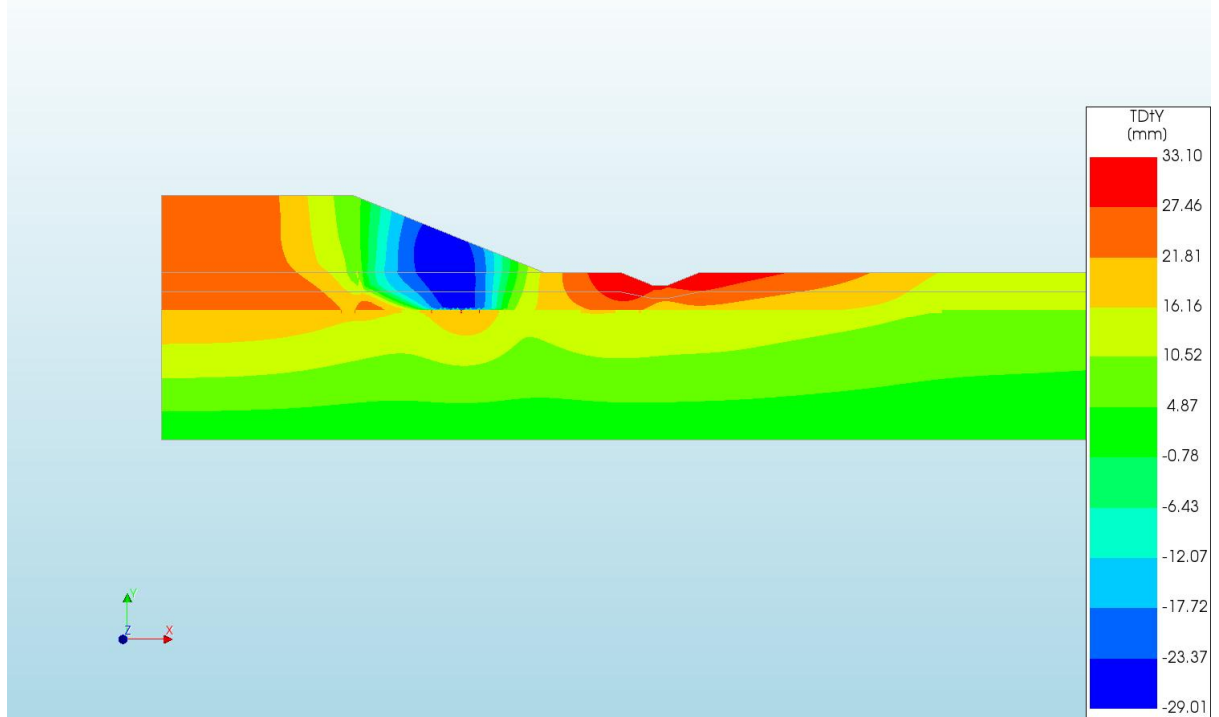
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
 Displacements TdXYZ  
 min: 0.00mm max: 118.58mm



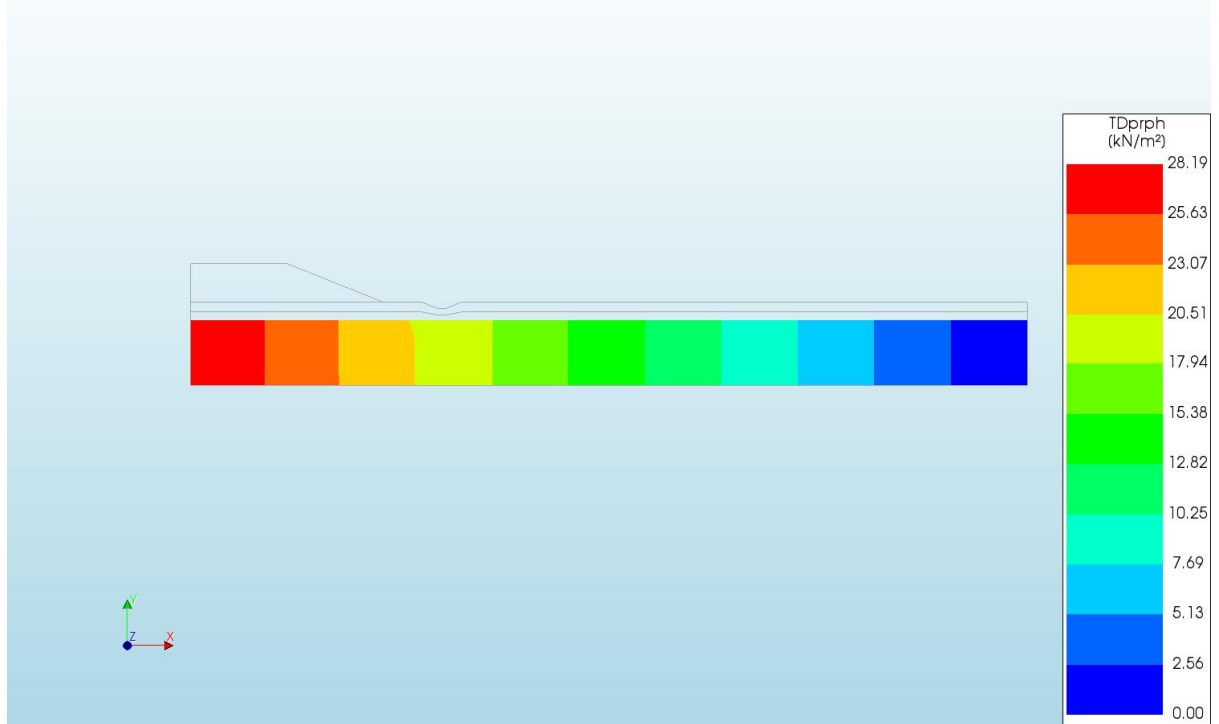
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Displacements TDtX  
min: -7.88mm max: 118.49mm



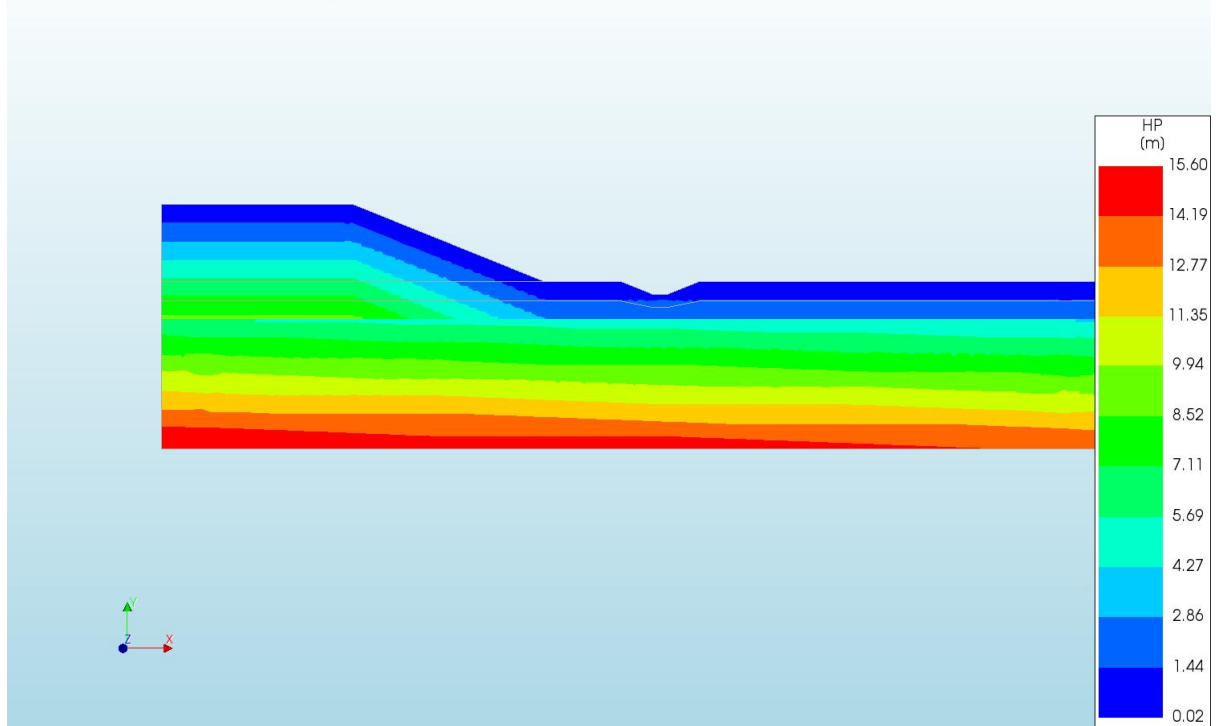
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Displacements TDtY  
min: -29.01mm max: 33.10mm



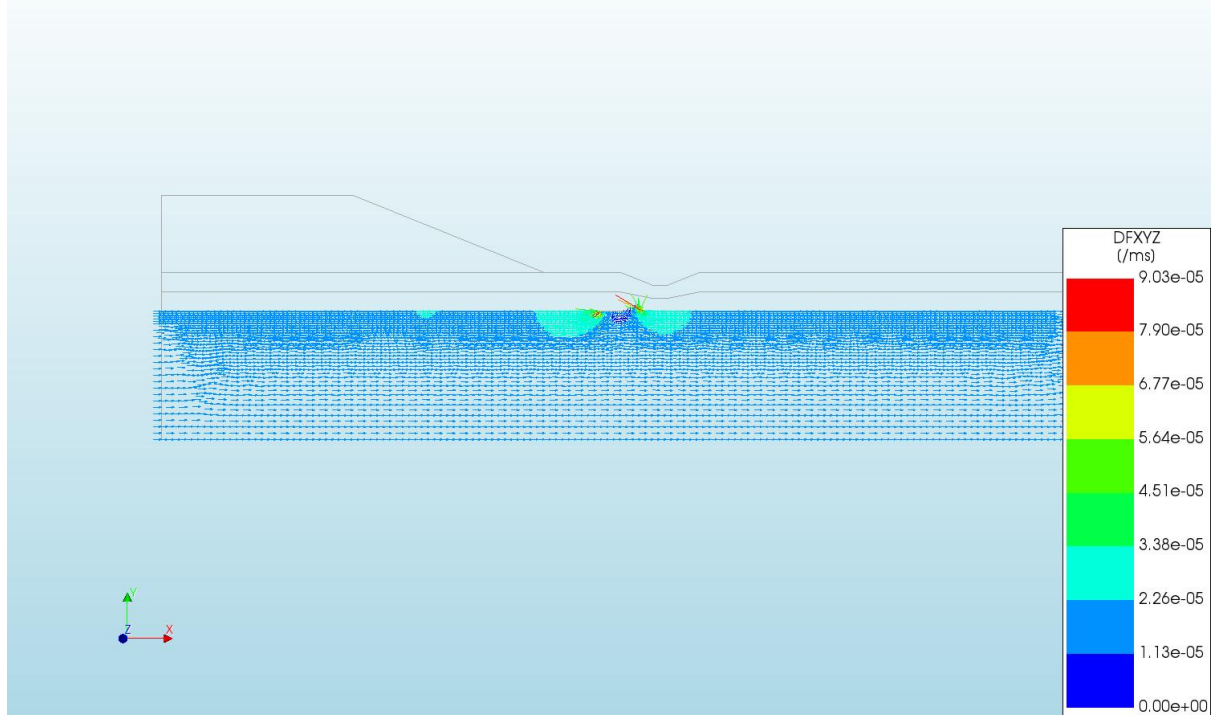
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 28.19kN/m<sup>2</sup>



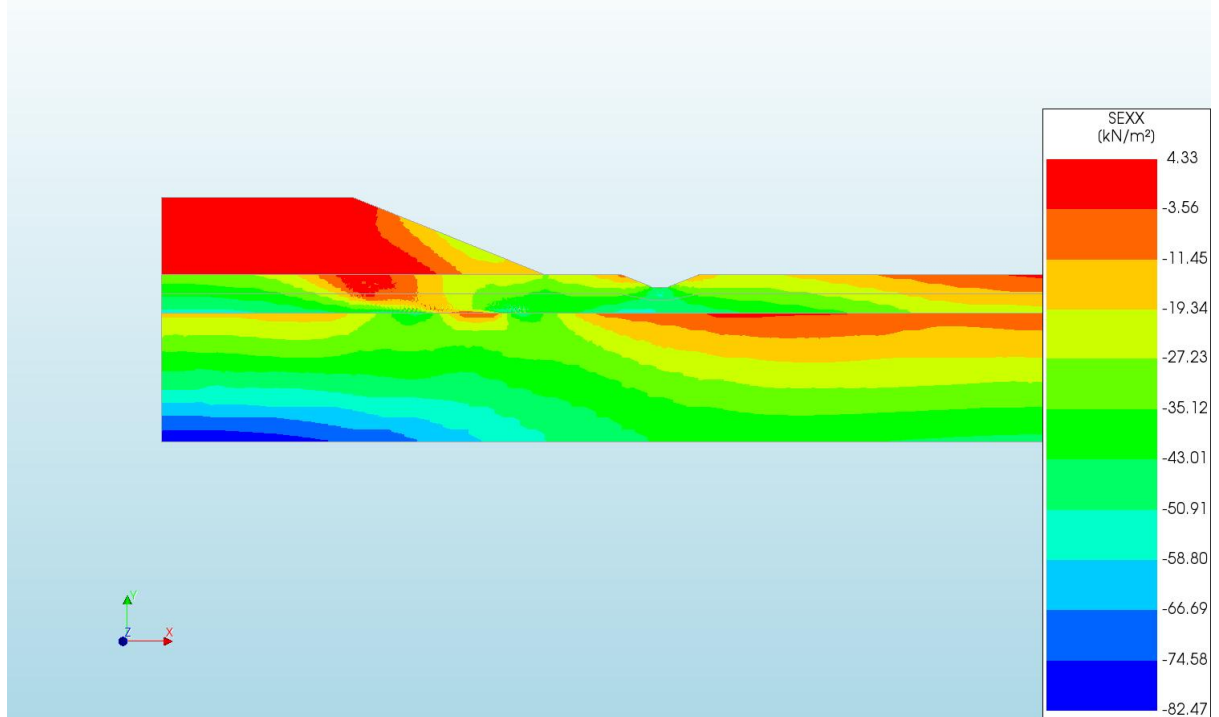
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.60m



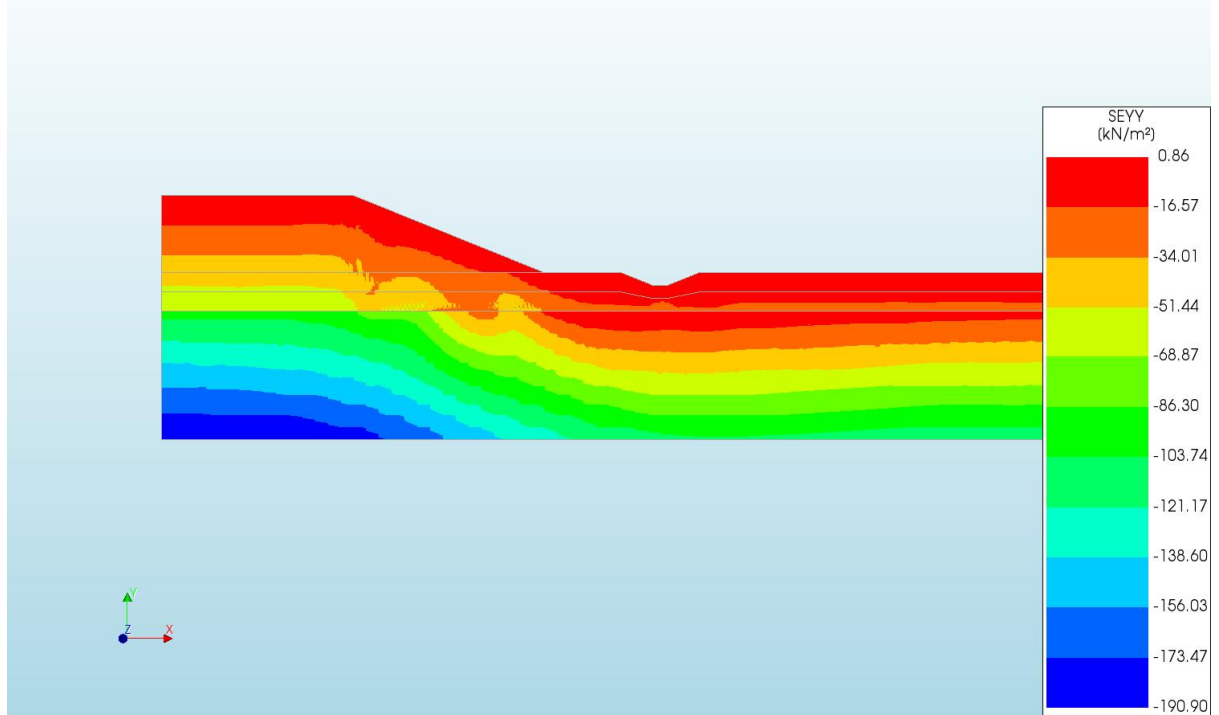
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 9.03e-05/ms



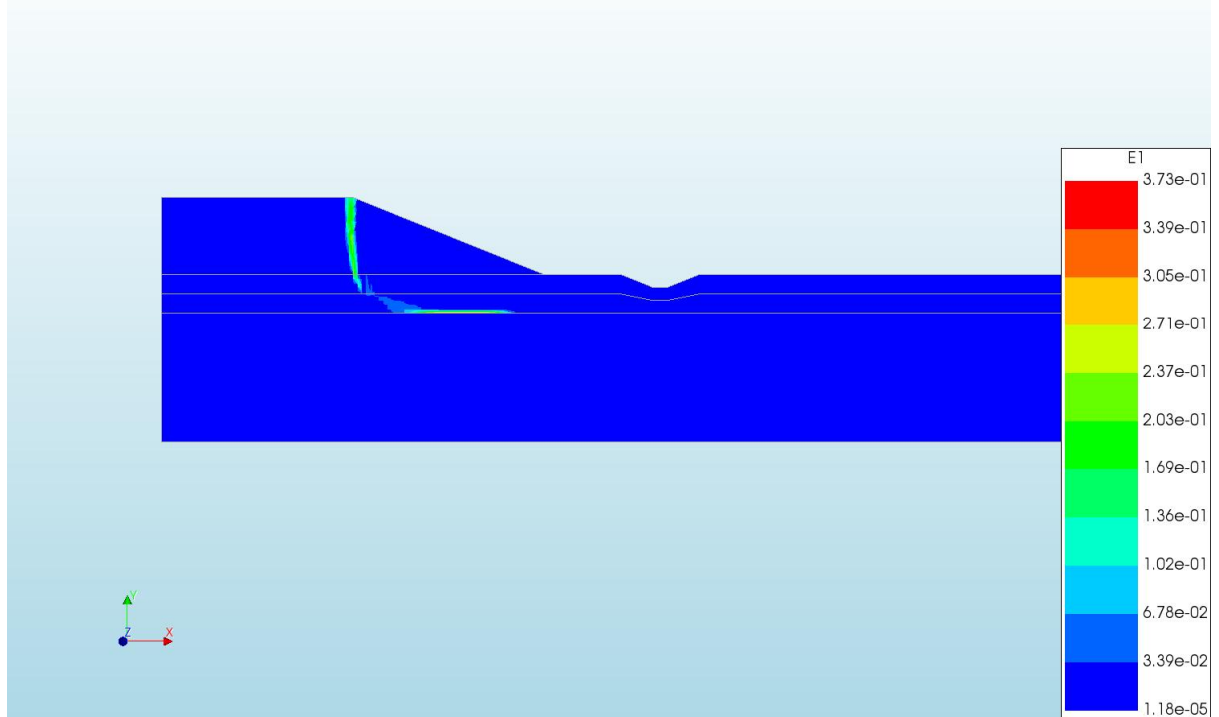
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -82.47kN/m<sup>2</sup> max: 4.33kN/m<sup>2</sup>



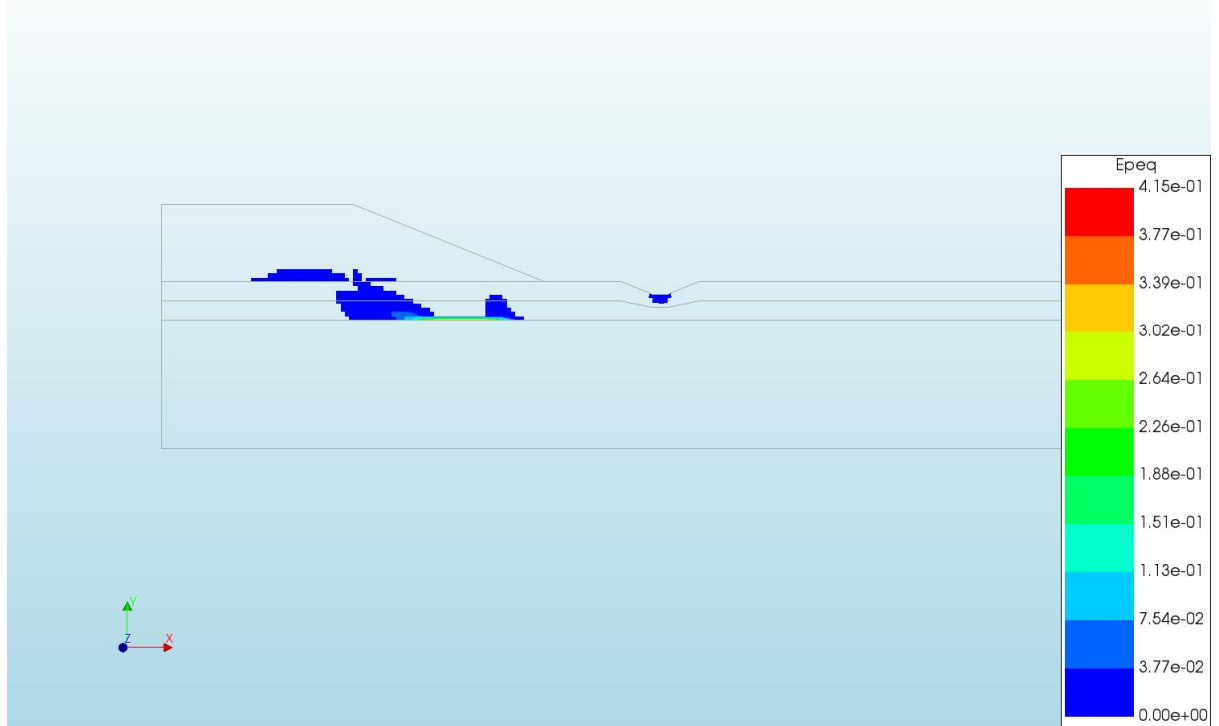
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -190.90kN/m<sup>2</sup> max: 0.86kN/m<sup>2</sup>



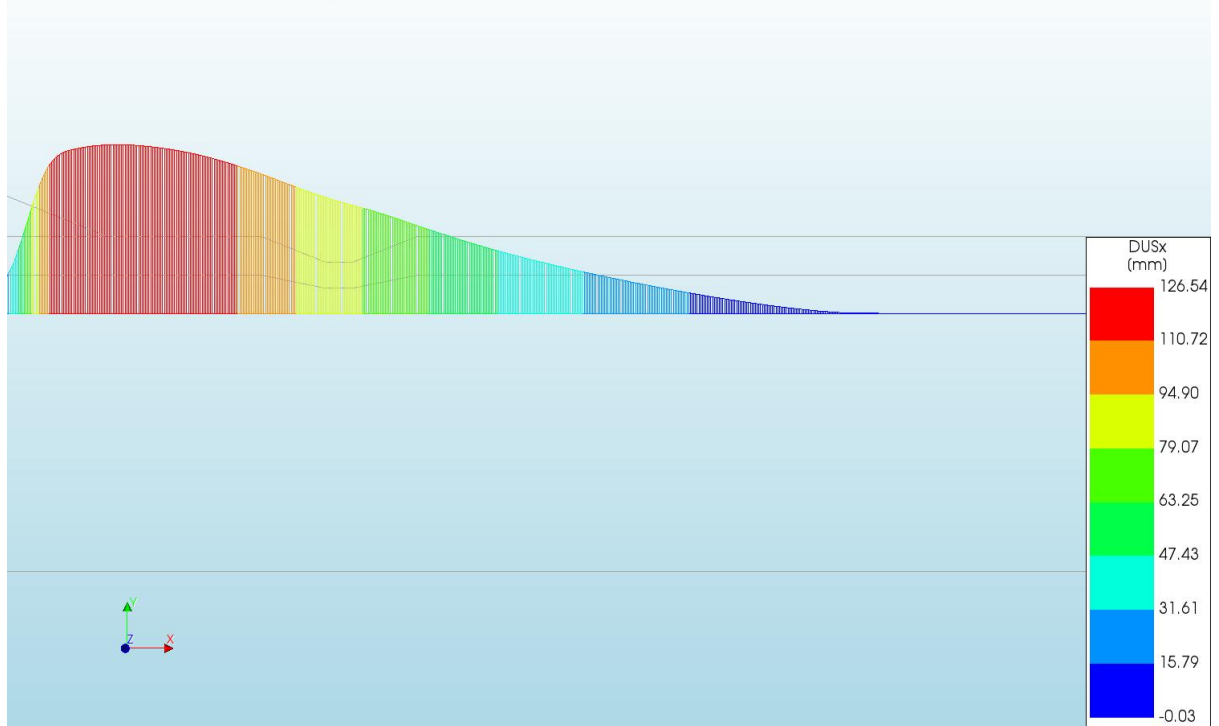
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Total Strains E1  
min: 1.18e-05 max: 3.73e-01



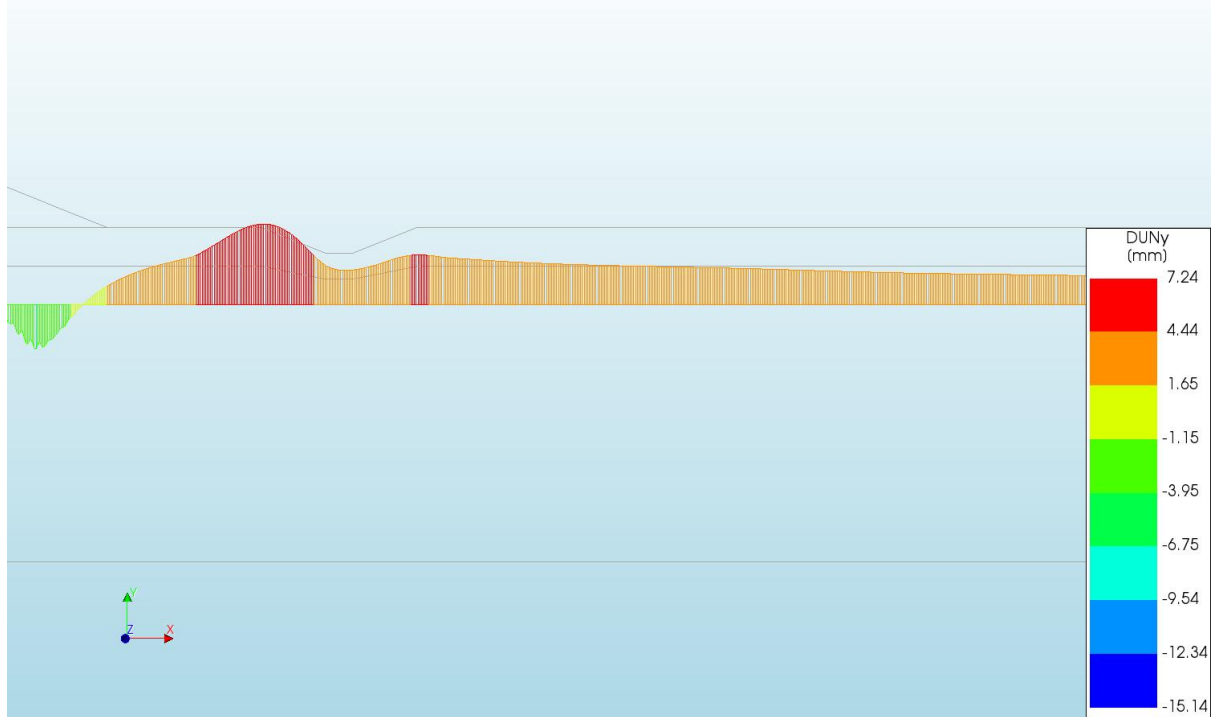
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.15e-01



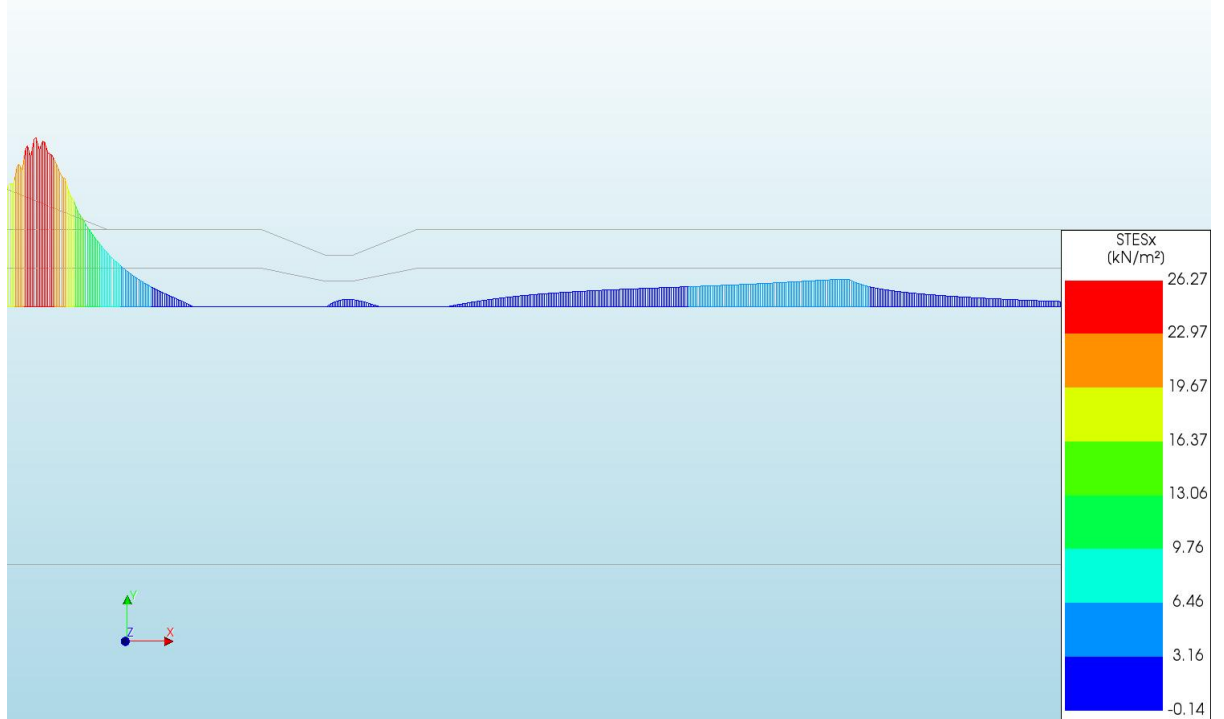
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 126.54mm



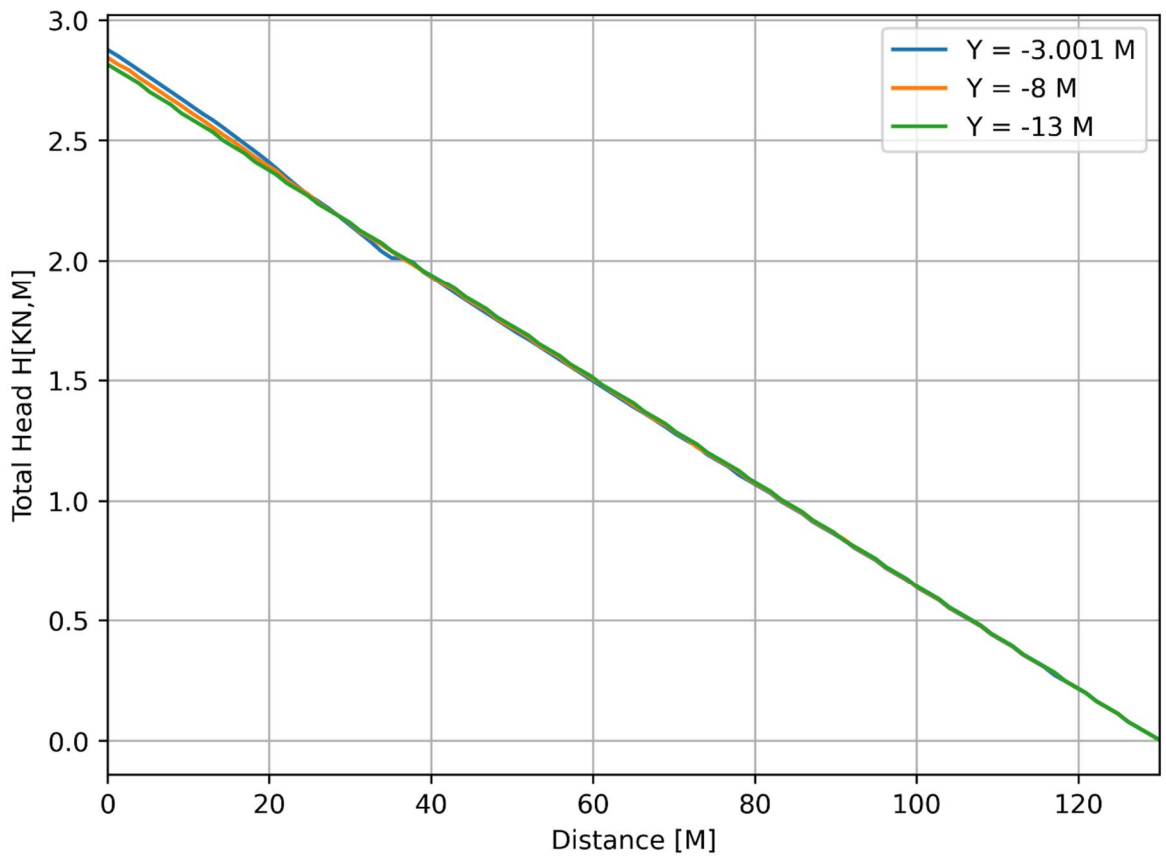
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
 Interface Relative Displacements DUNy  
 min: -15.14mm max: 7.24mm



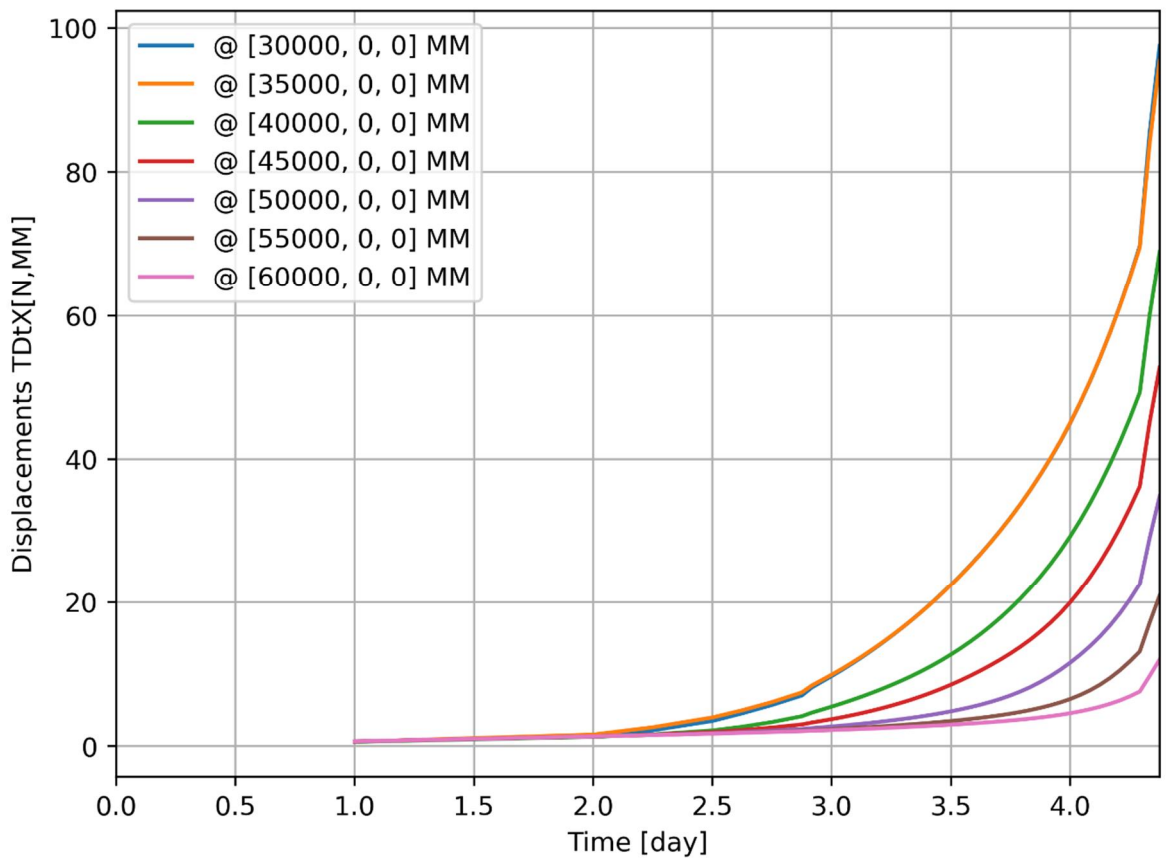
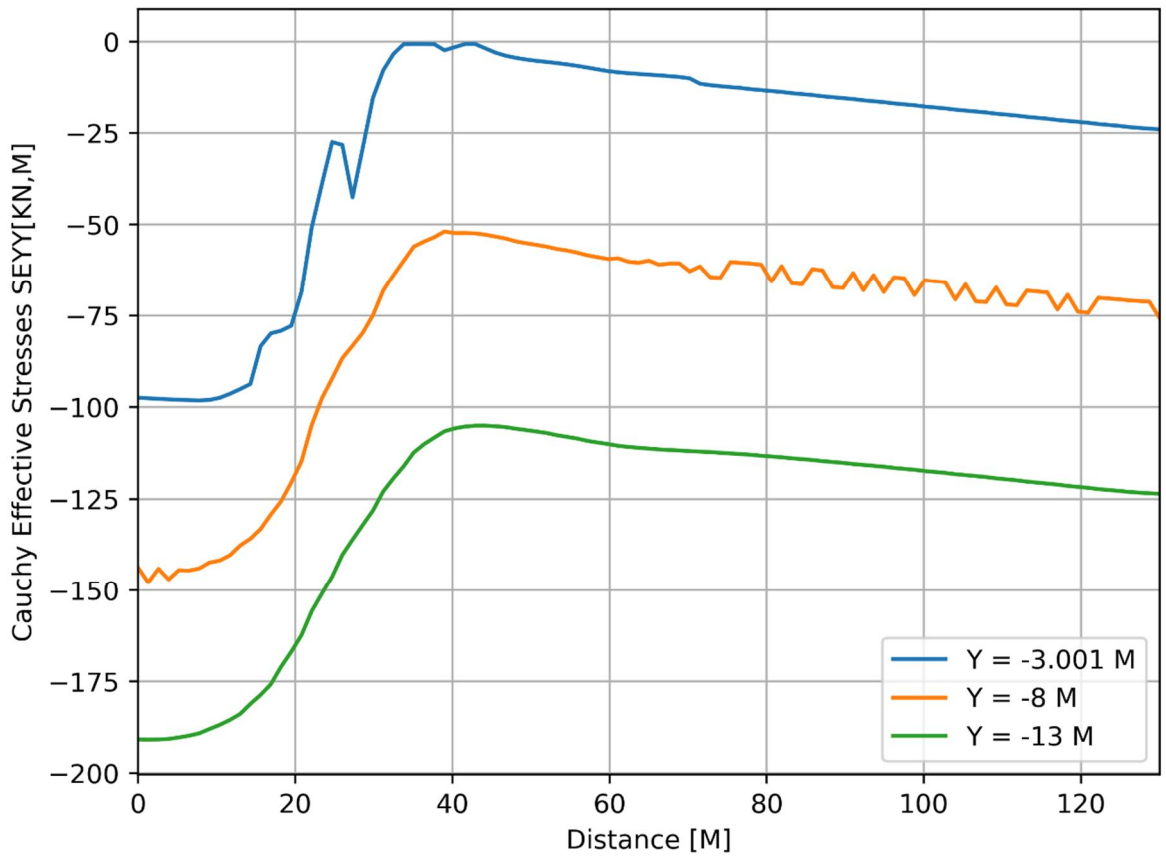
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
 Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.14kN/m<sup>2</sup> max: 26.27kN/m<sup>2</sup>

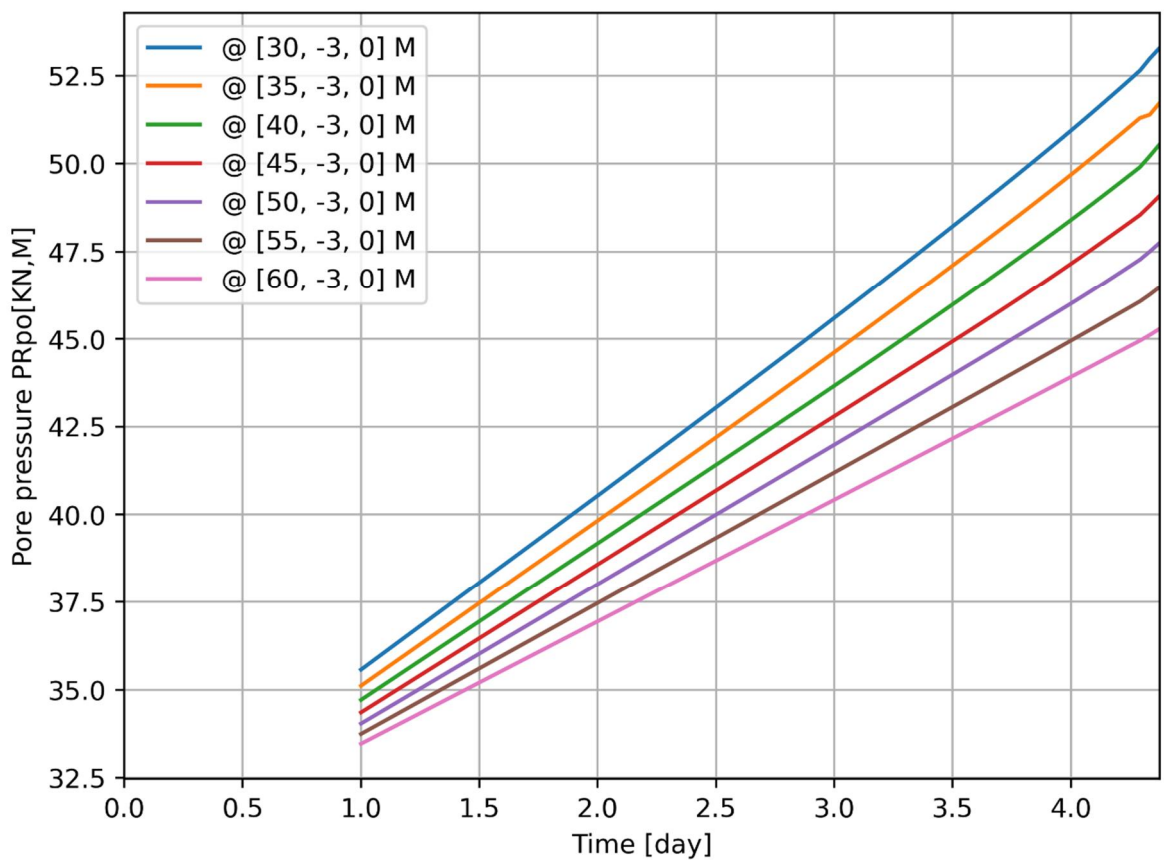
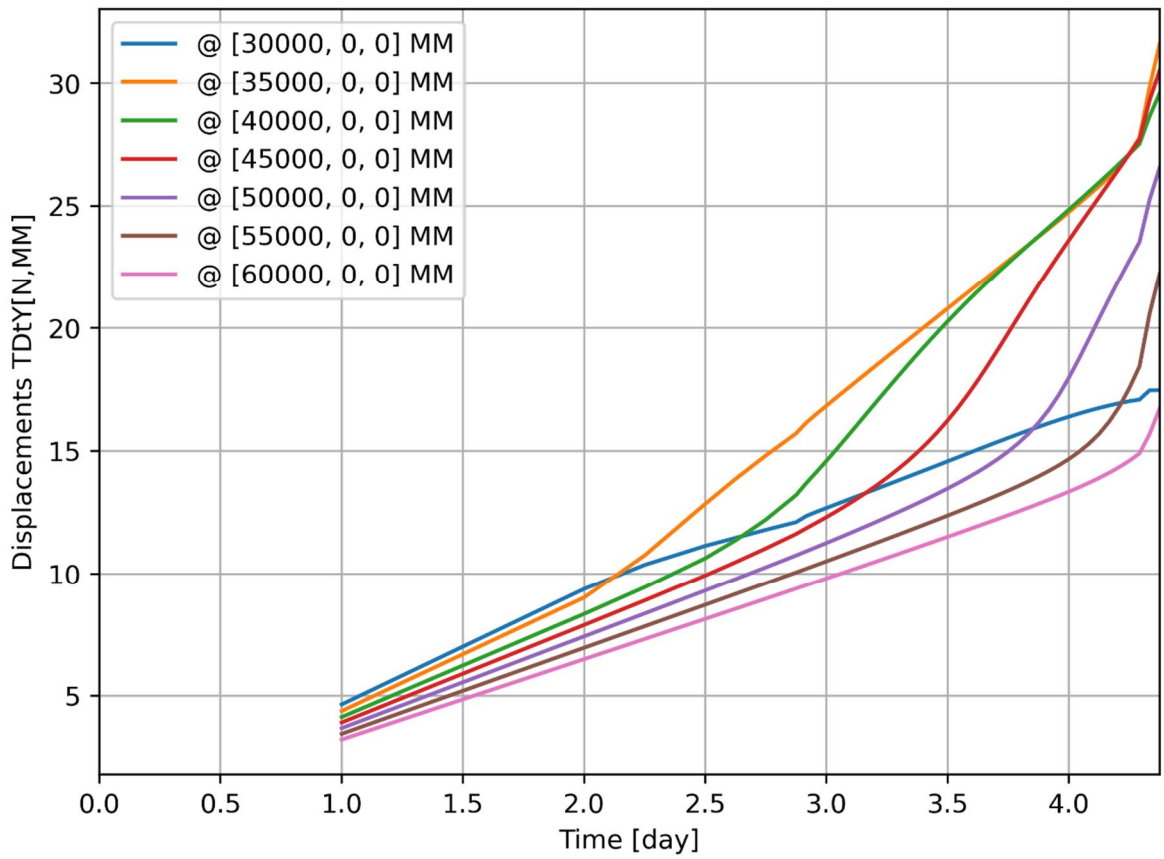


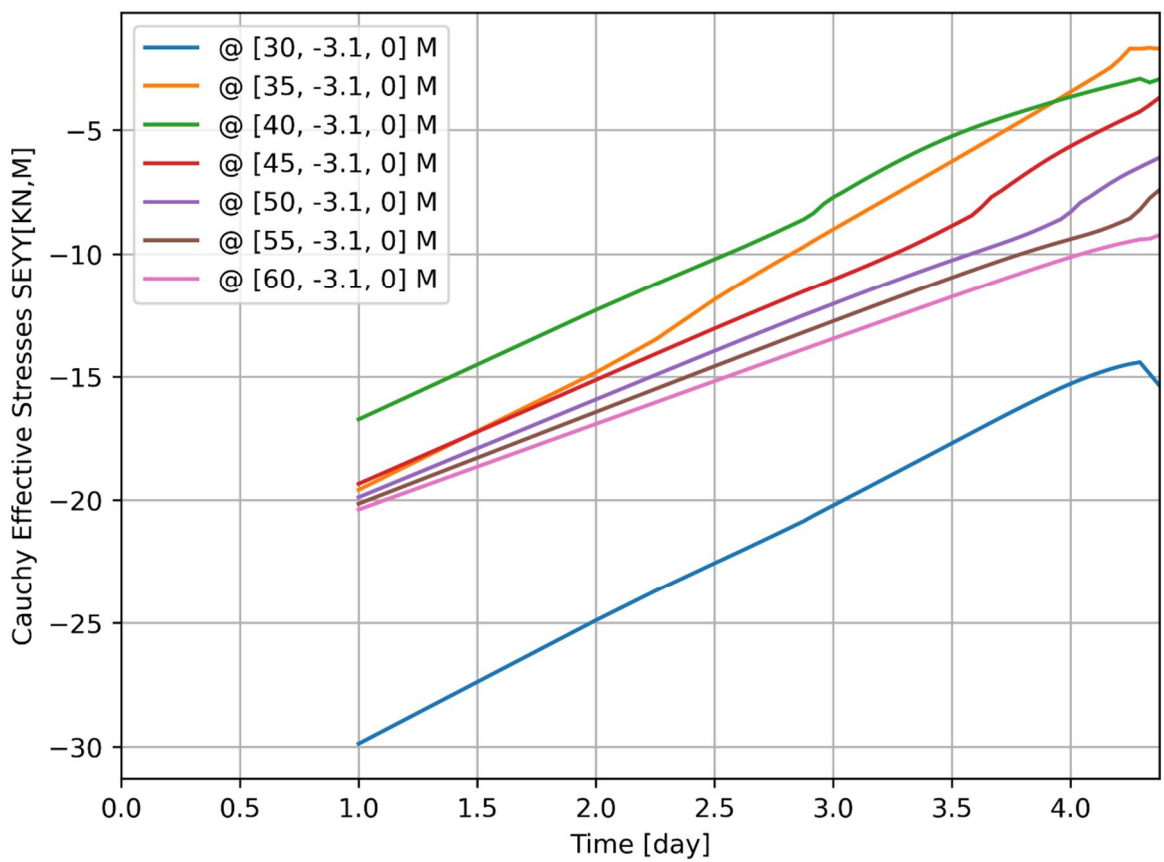
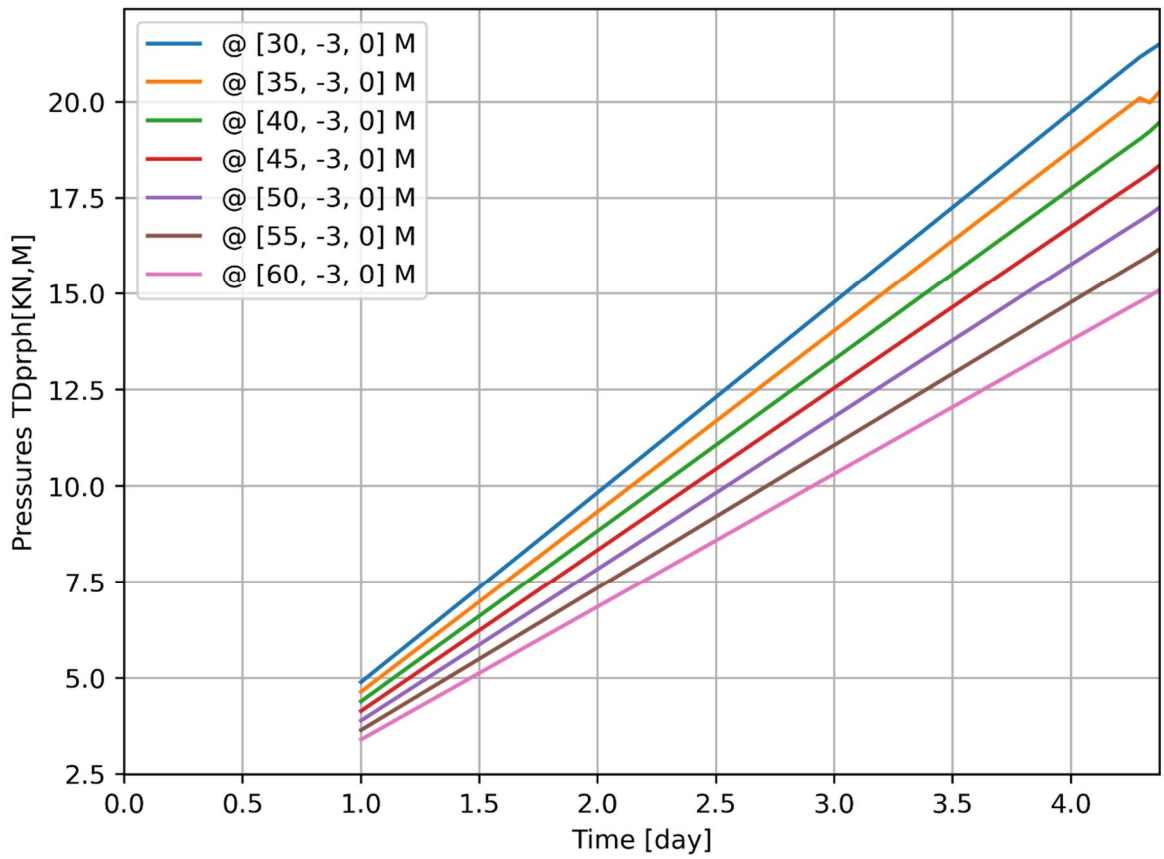
d=3\_c=20\_E=3\_k=1e-07\_xs=36\_20200818  
Phase 2, Time-step 49, Time 4 day 9 hour  
Interface Effective Tractions STENy  
min: -97.67kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

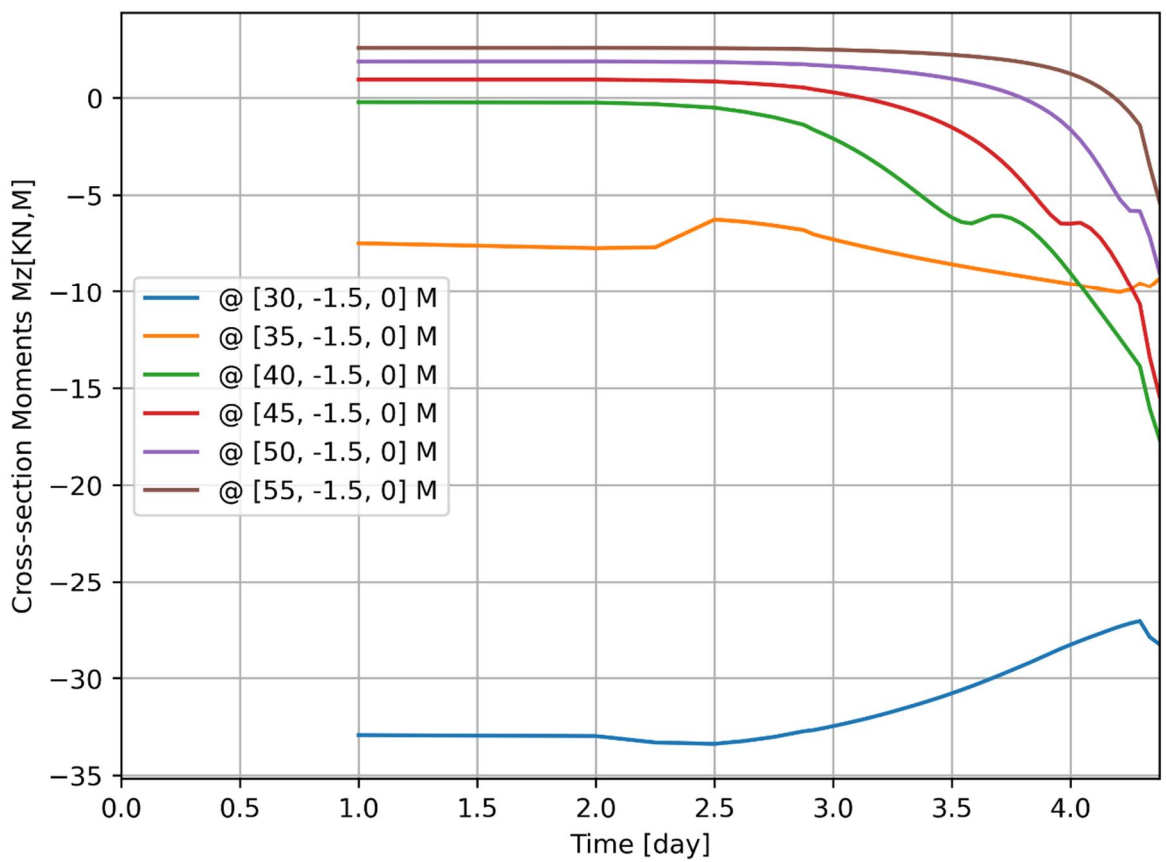
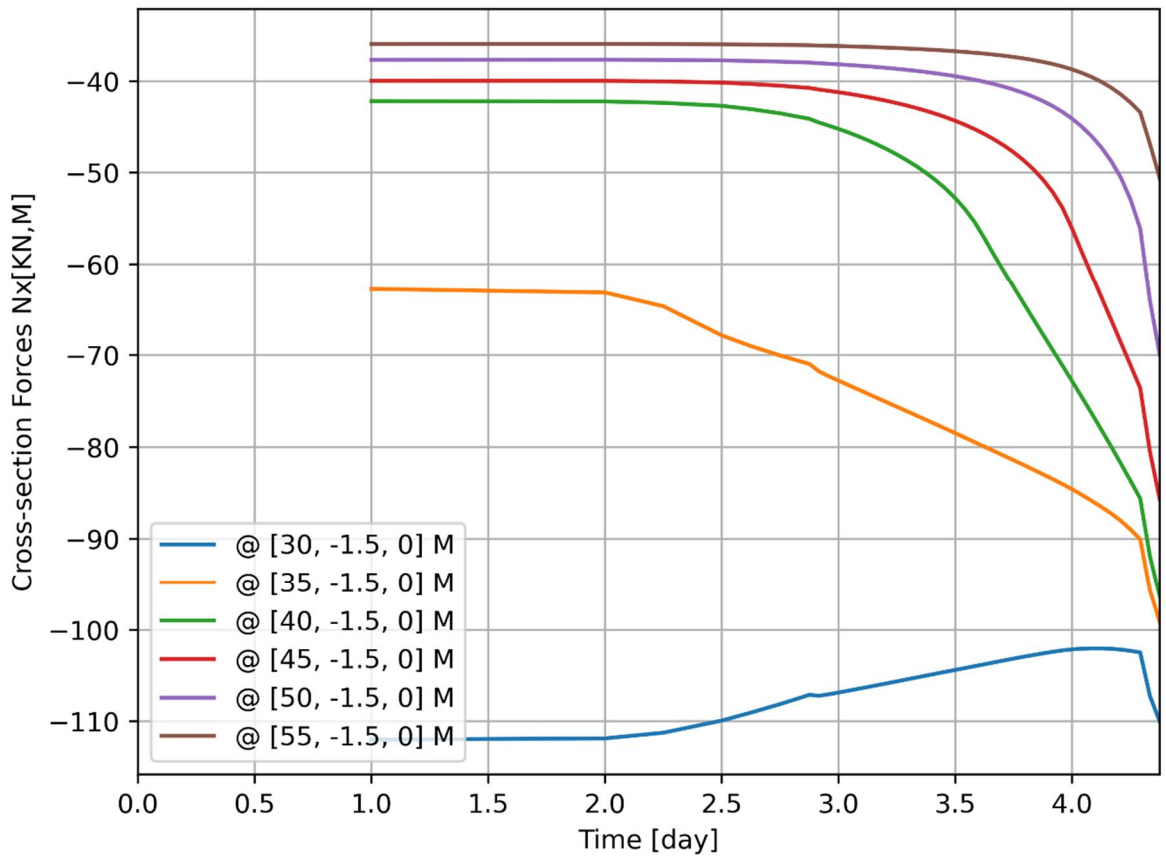








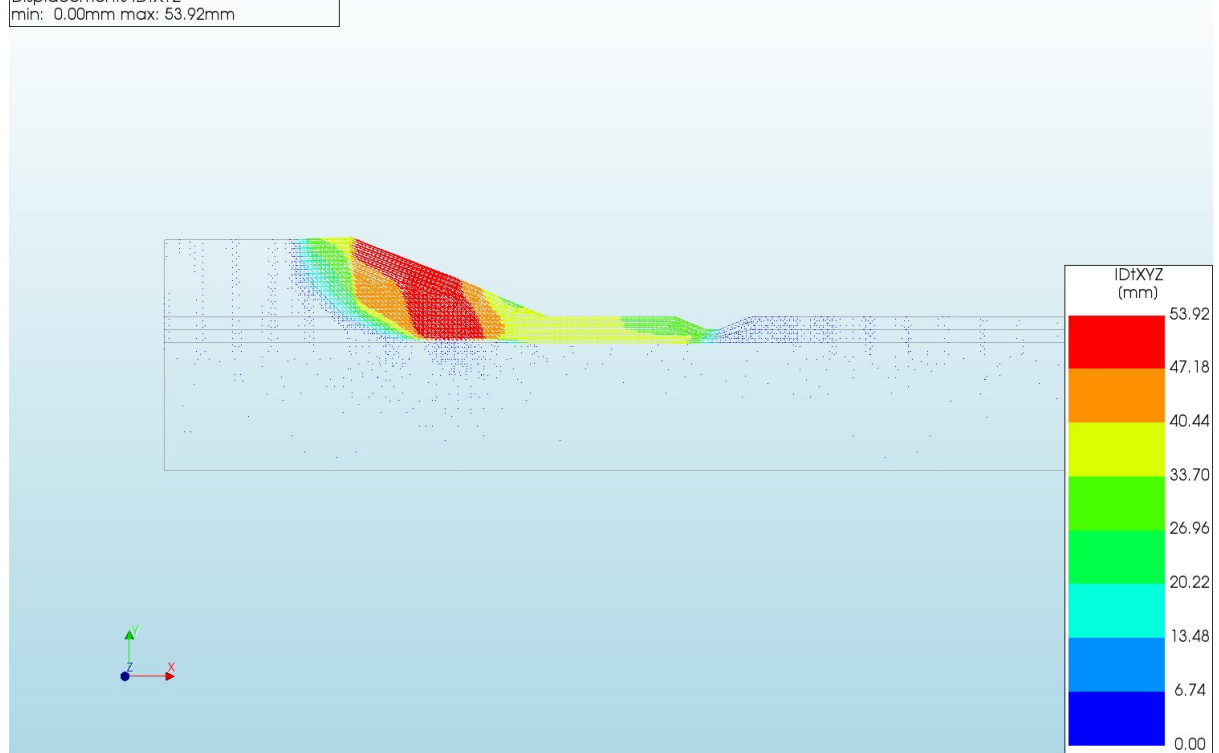




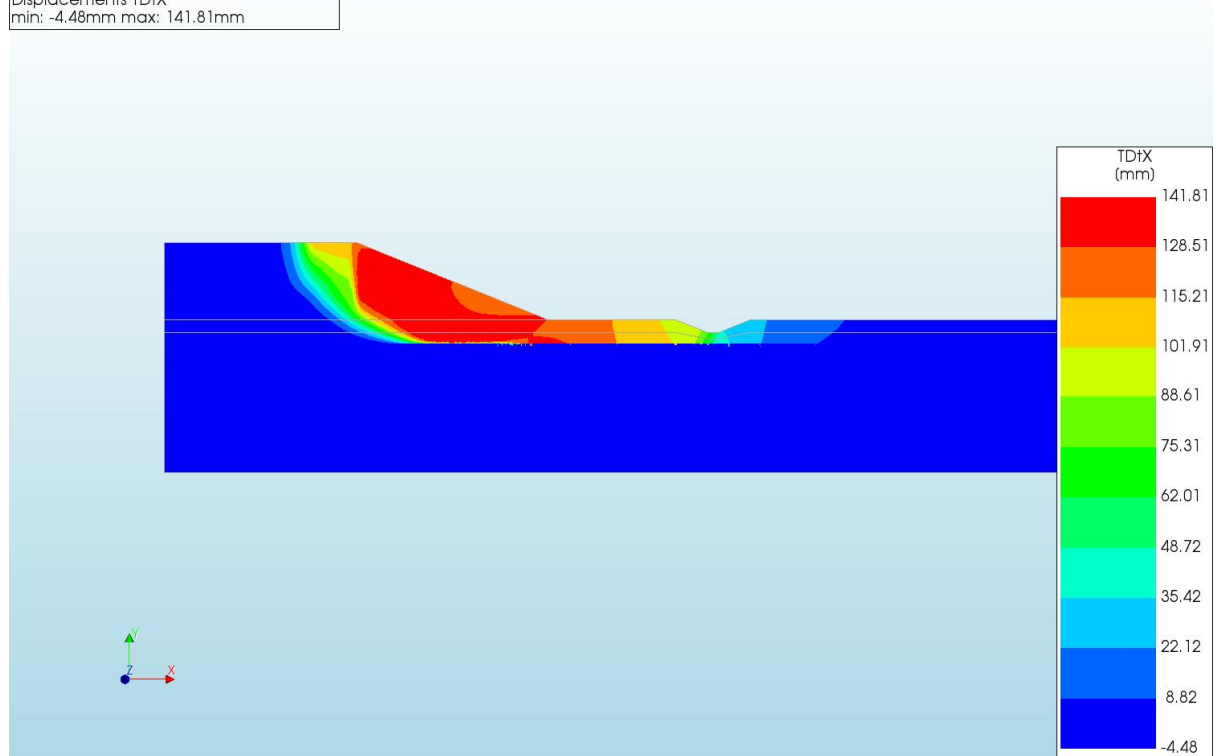
A.2.36

'Output d=2 c=15 E=3 k=1e-07 xs=40\_20200818'

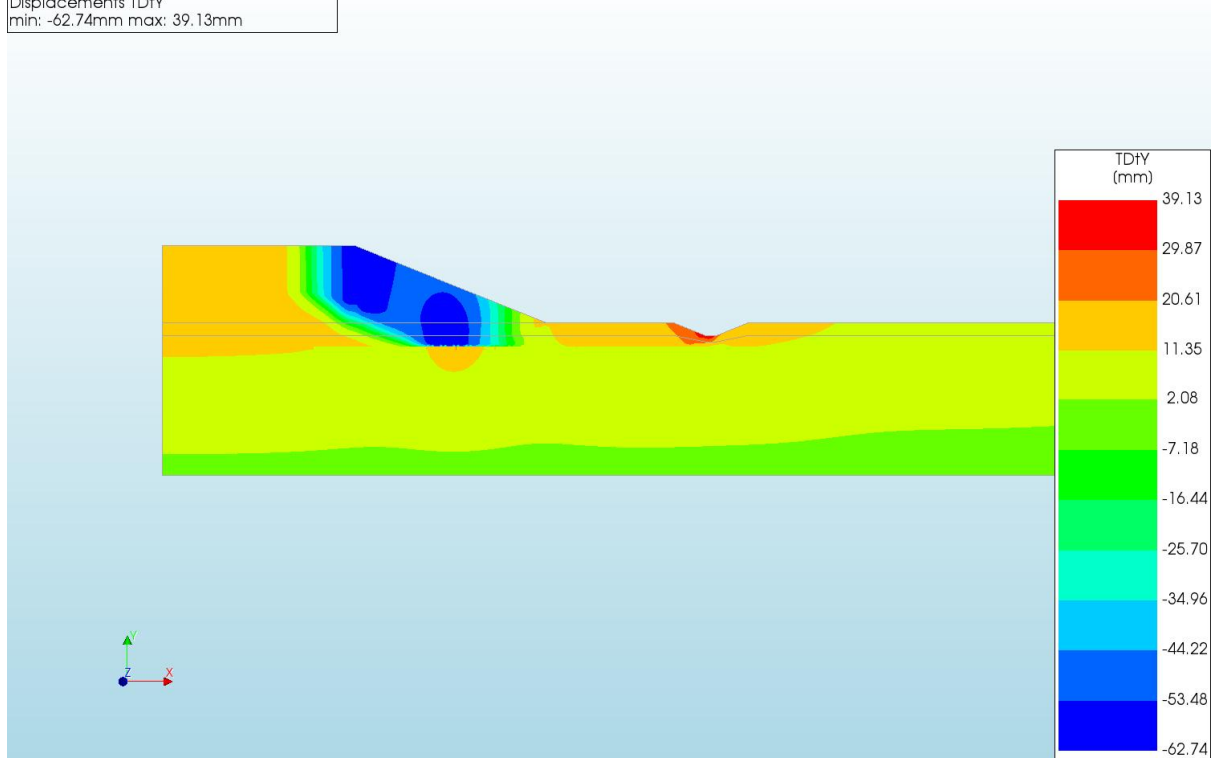
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
 Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
 Displacements IDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 53.92mm



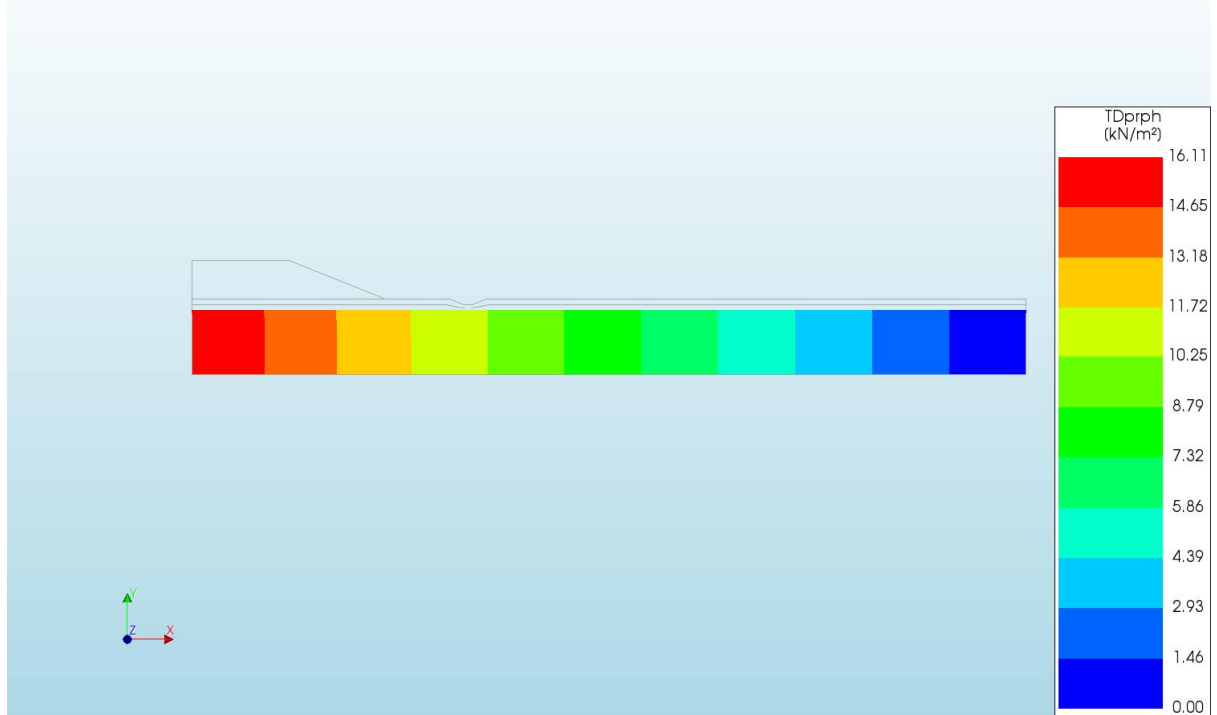
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
 Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -4.48mm max: 141.81mm



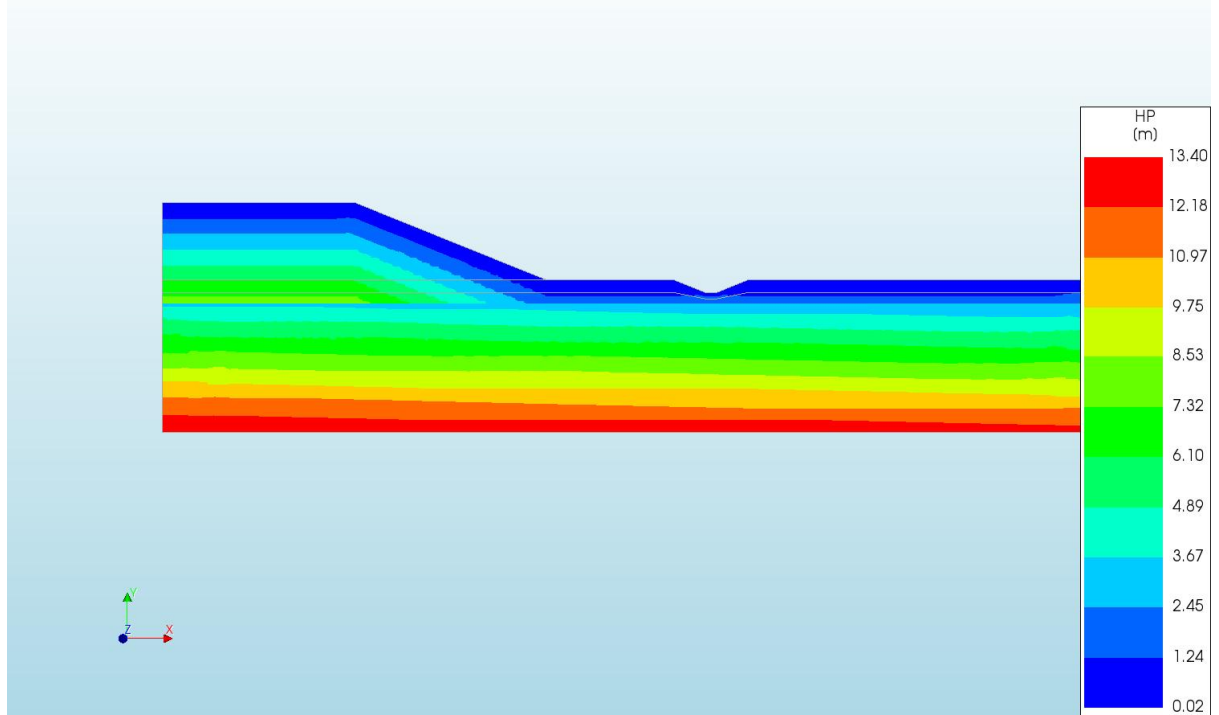
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Displacements TDtY  
min: -62.74mm max: 39.13mm



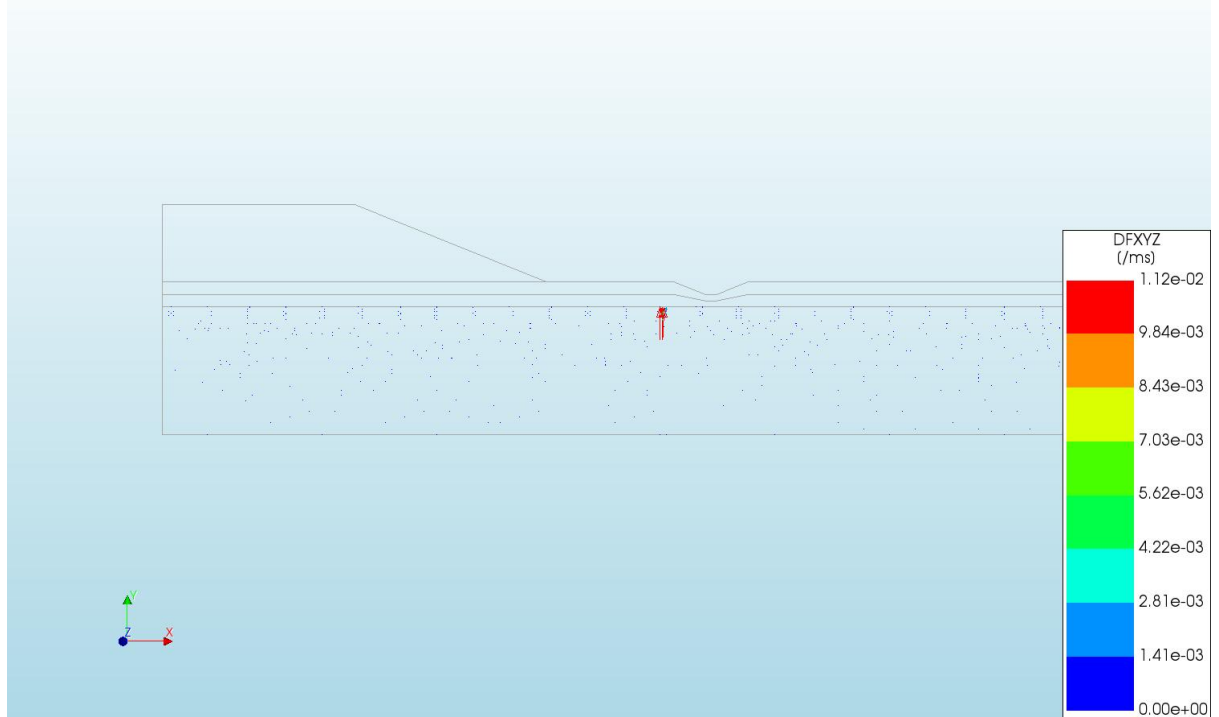
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 16.11kN/m<sup>2</sup>



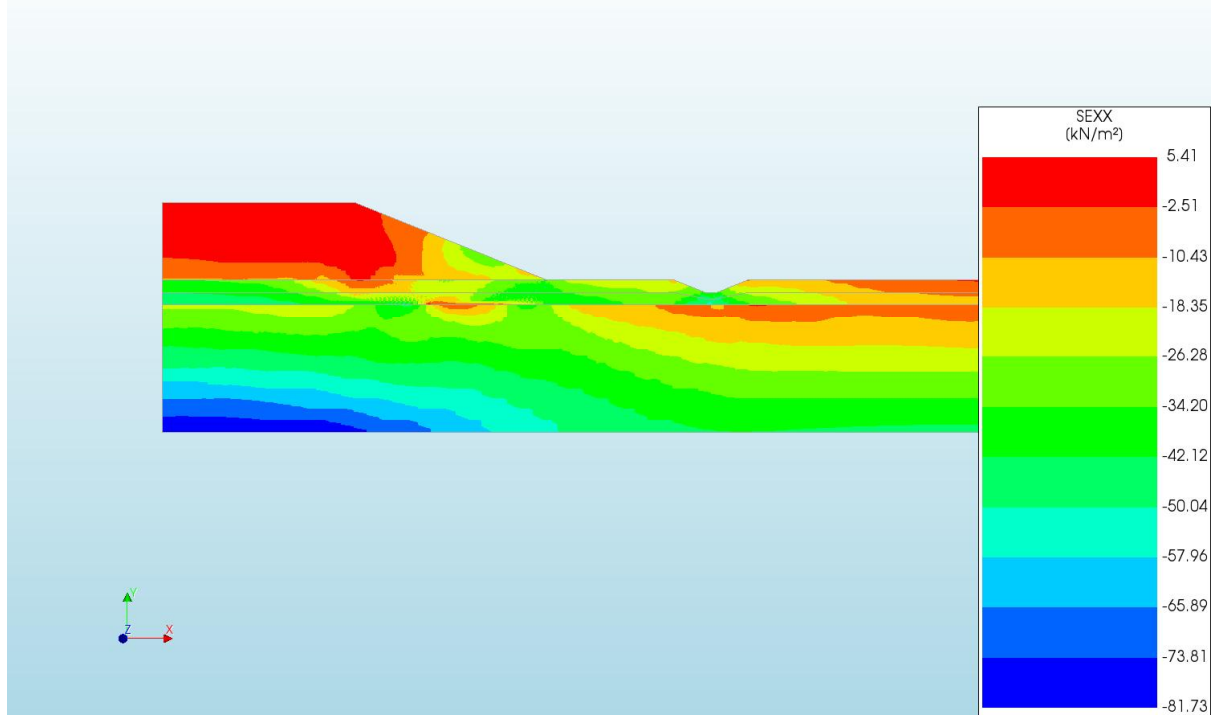
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.40m



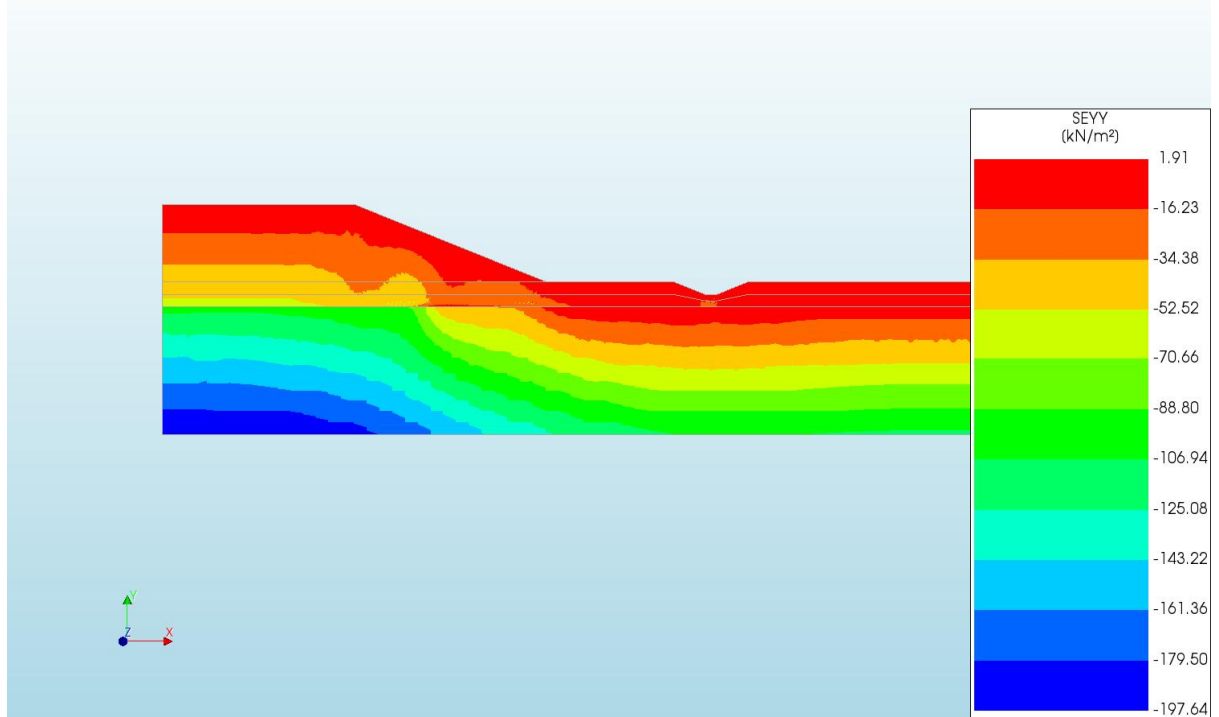
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.12e-02/ms



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -81.73kN/m<sup>2</sup> max: 5.41kN/m<sup>2</sup>

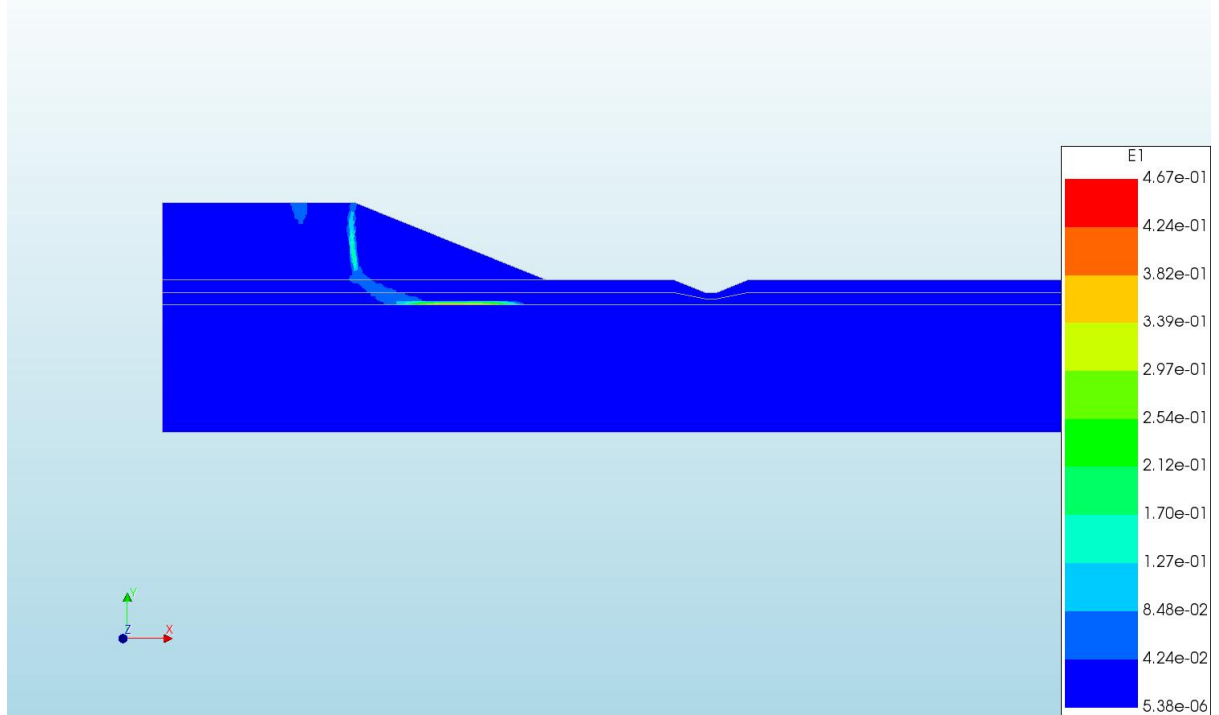


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -197.64kN/m<sup>2</sup> max: 1.91kN/m<sup>2</sup>





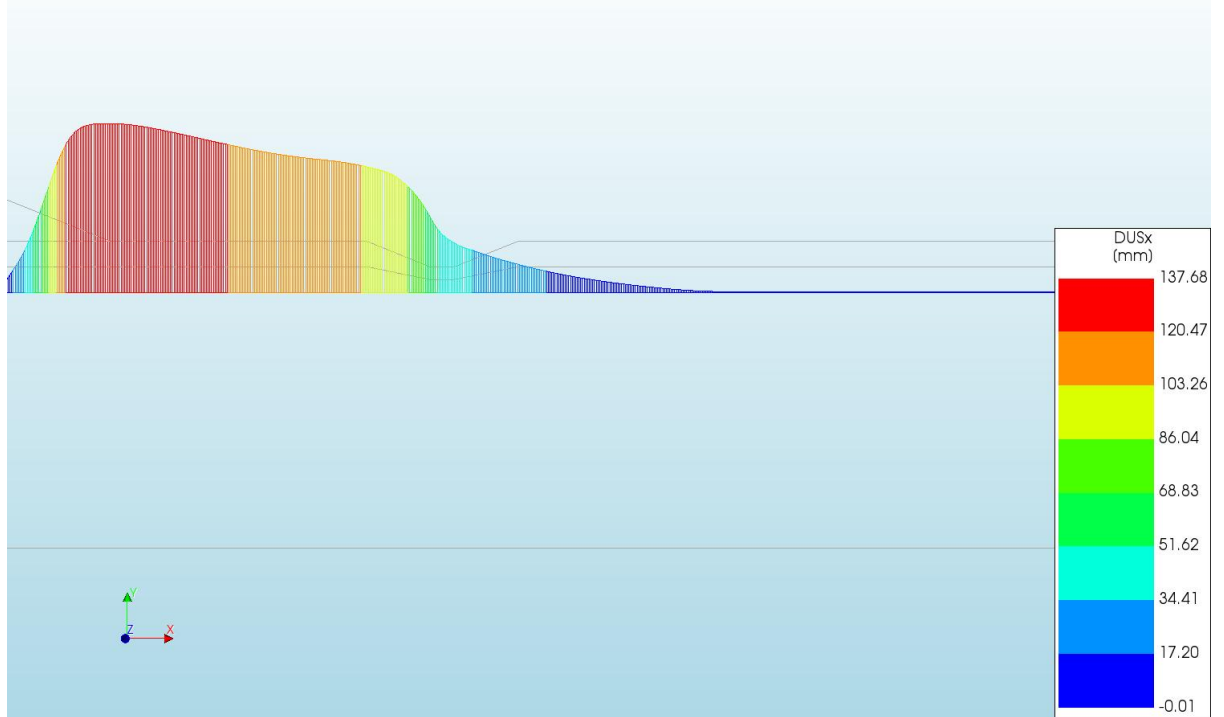
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Total Strains E1  
min: 5.38e-06 max: 4.67e-01



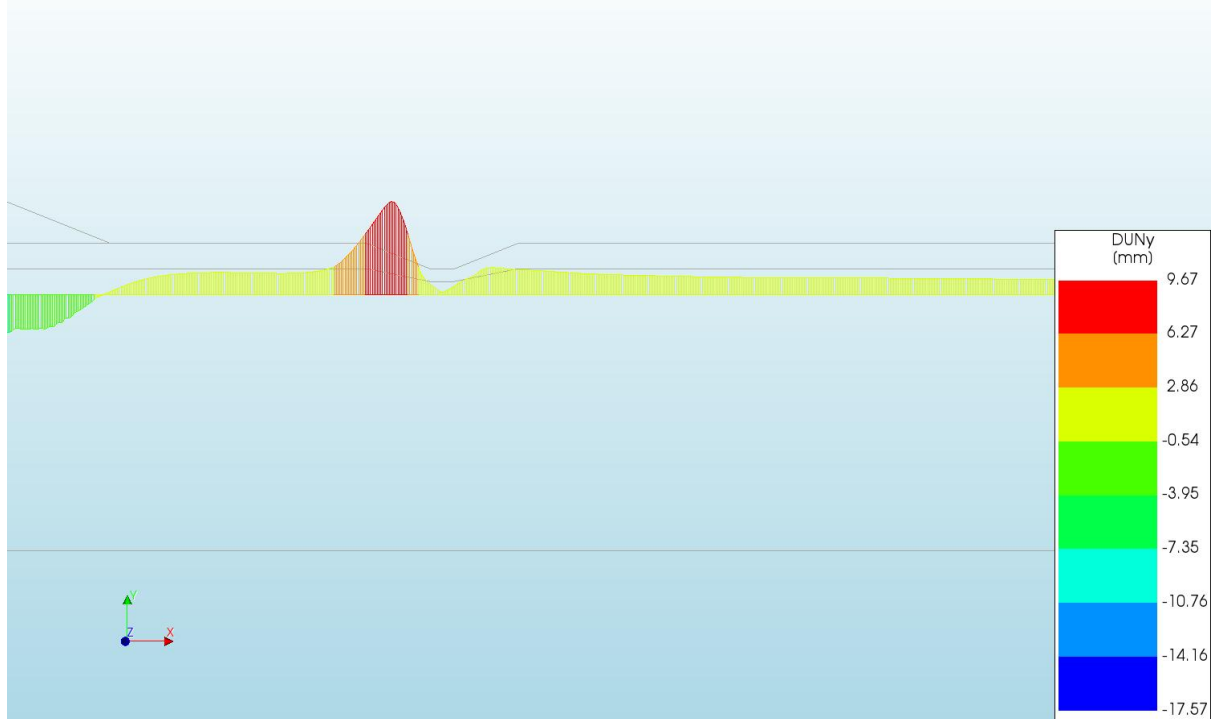
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.96e-01



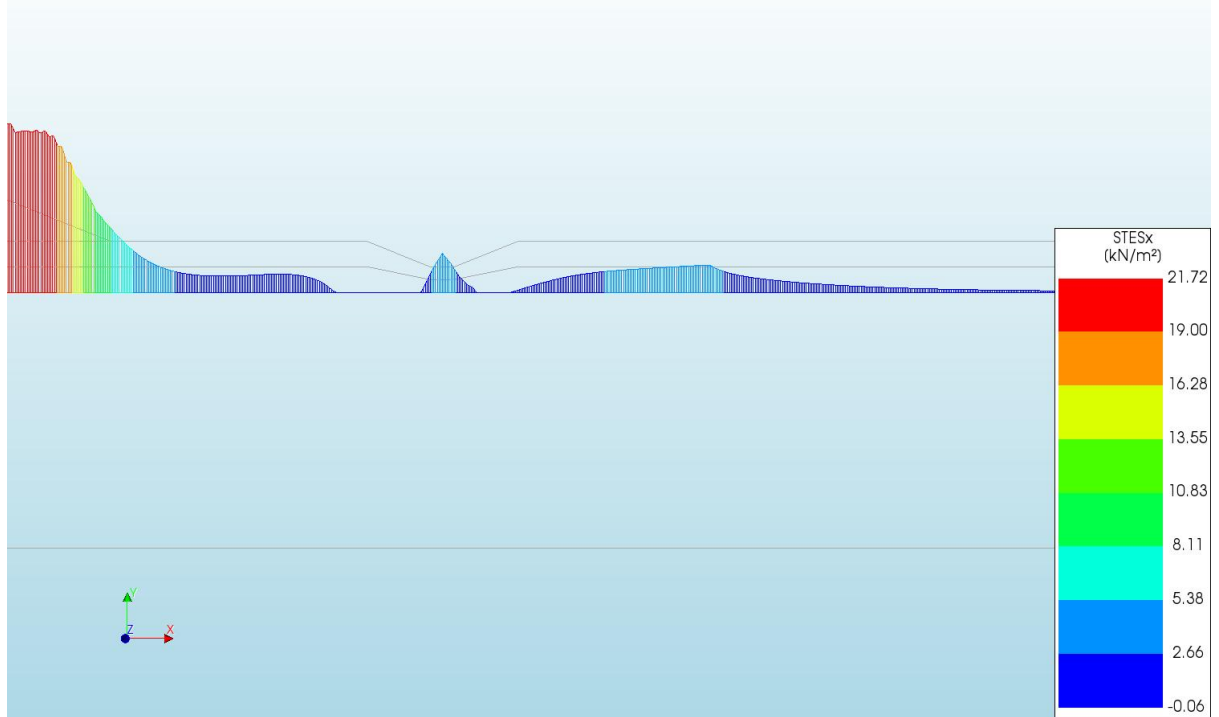
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 137.68mm



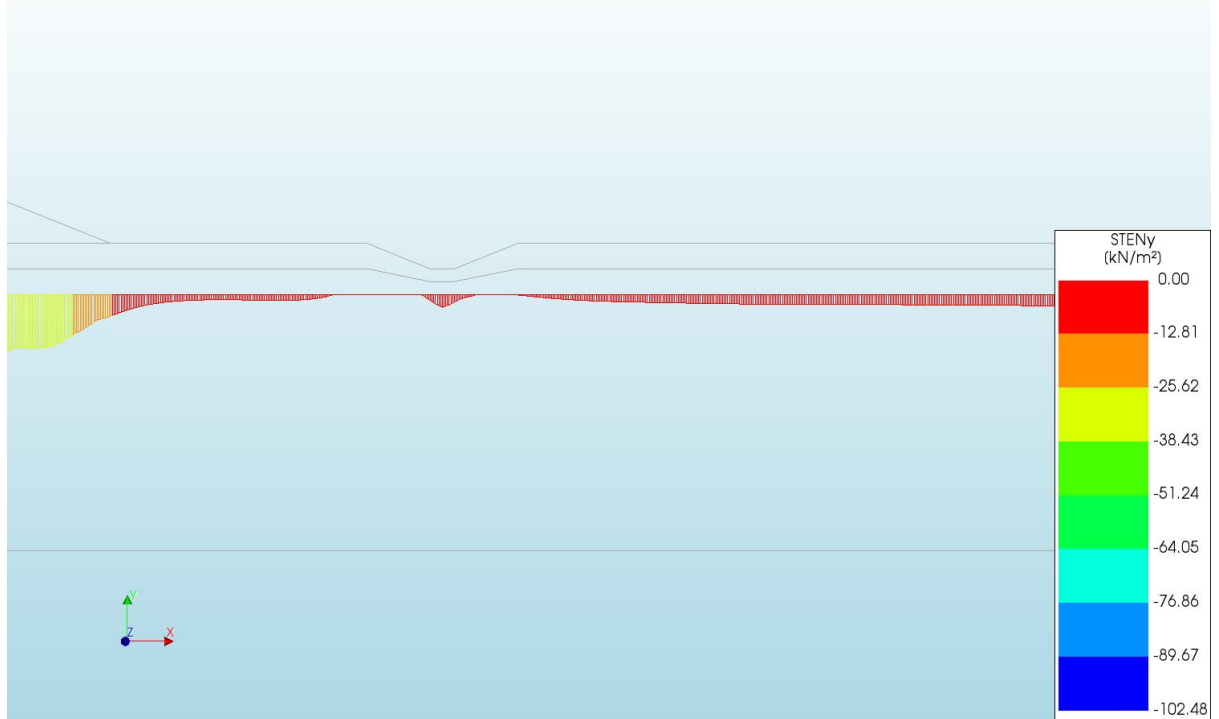
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -17.57mm max: 9.67mm

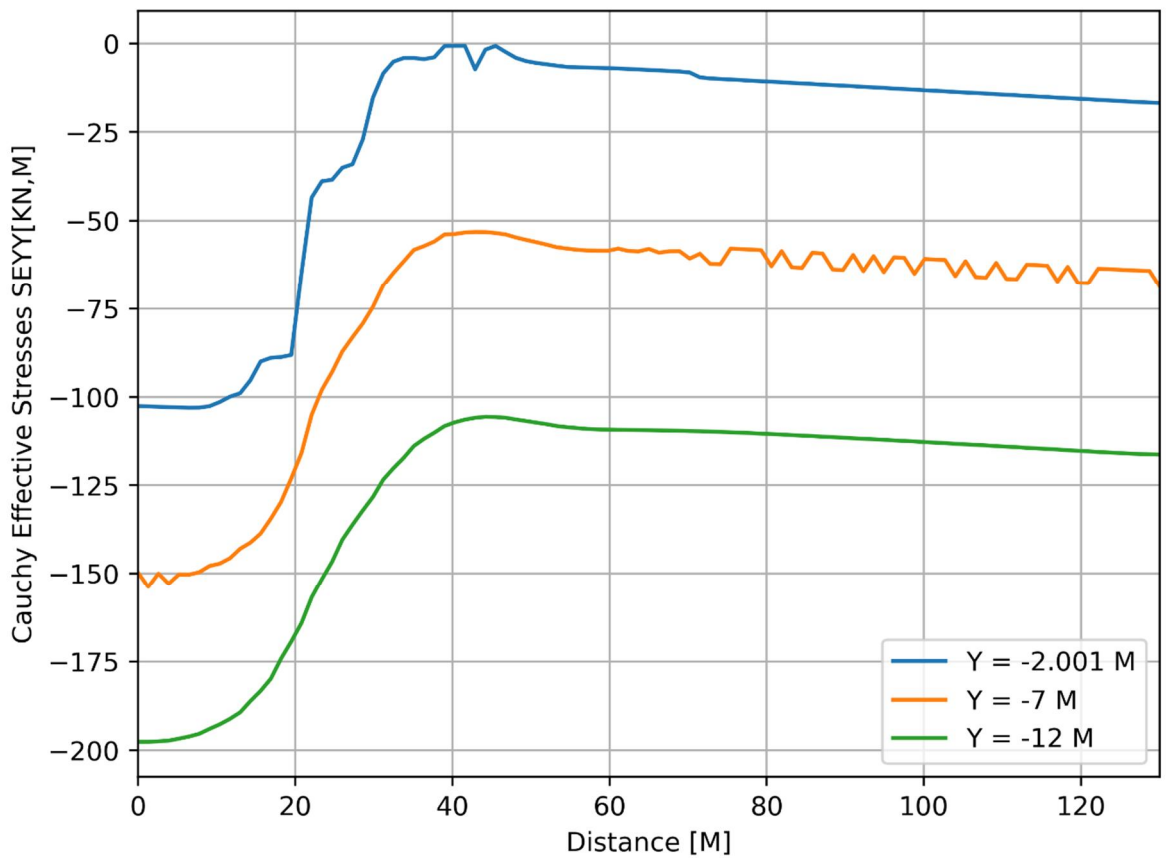
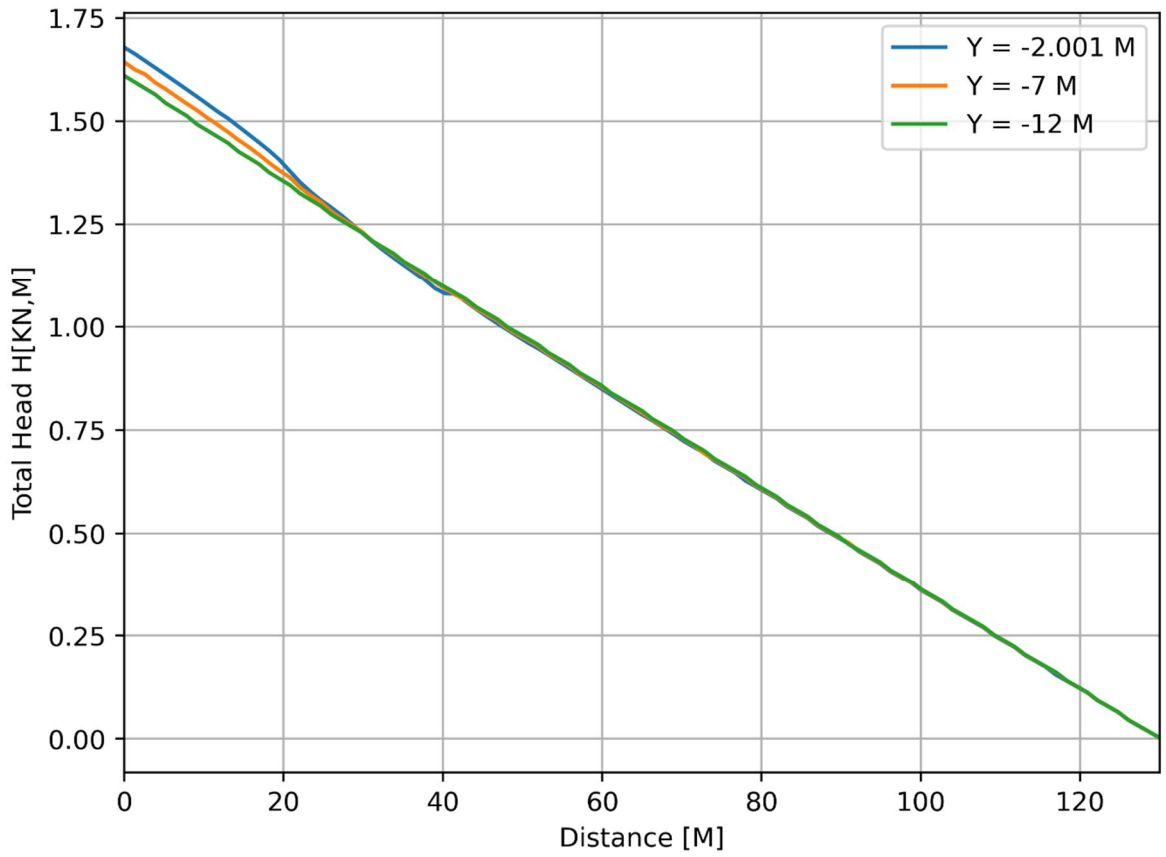


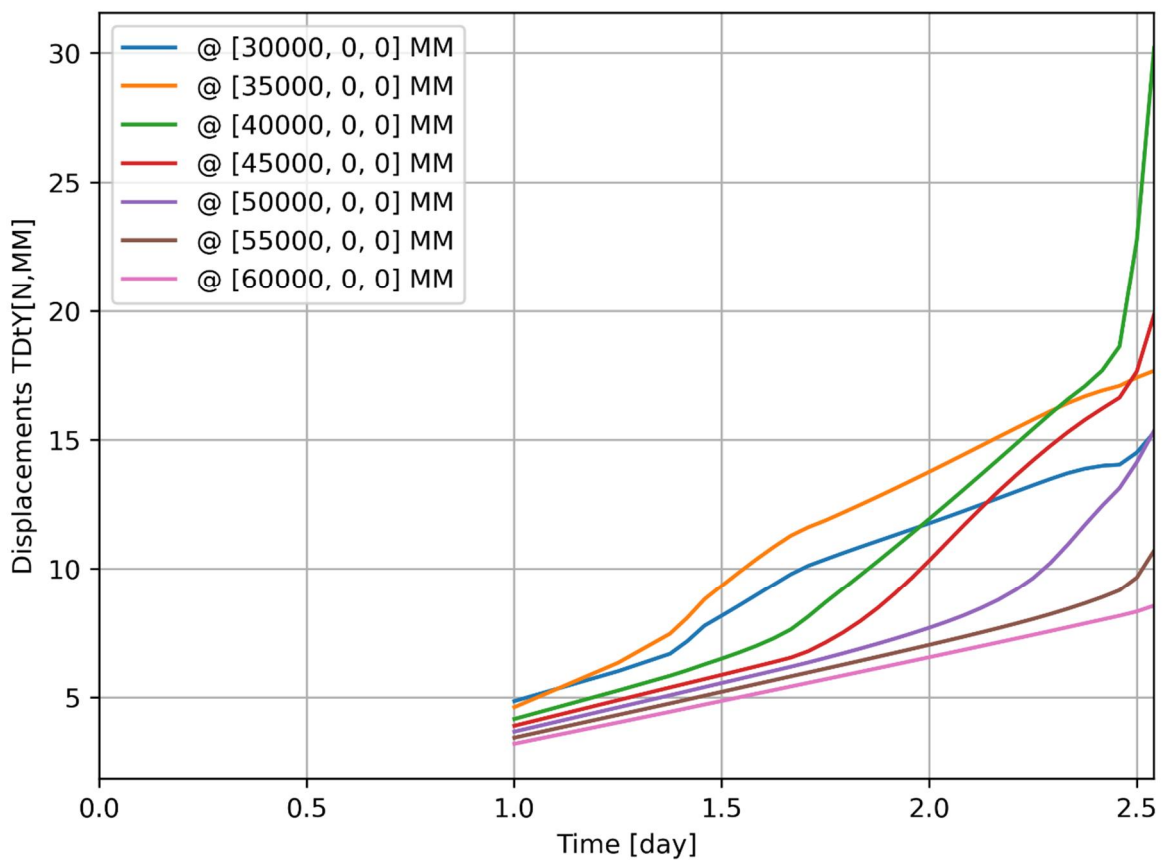
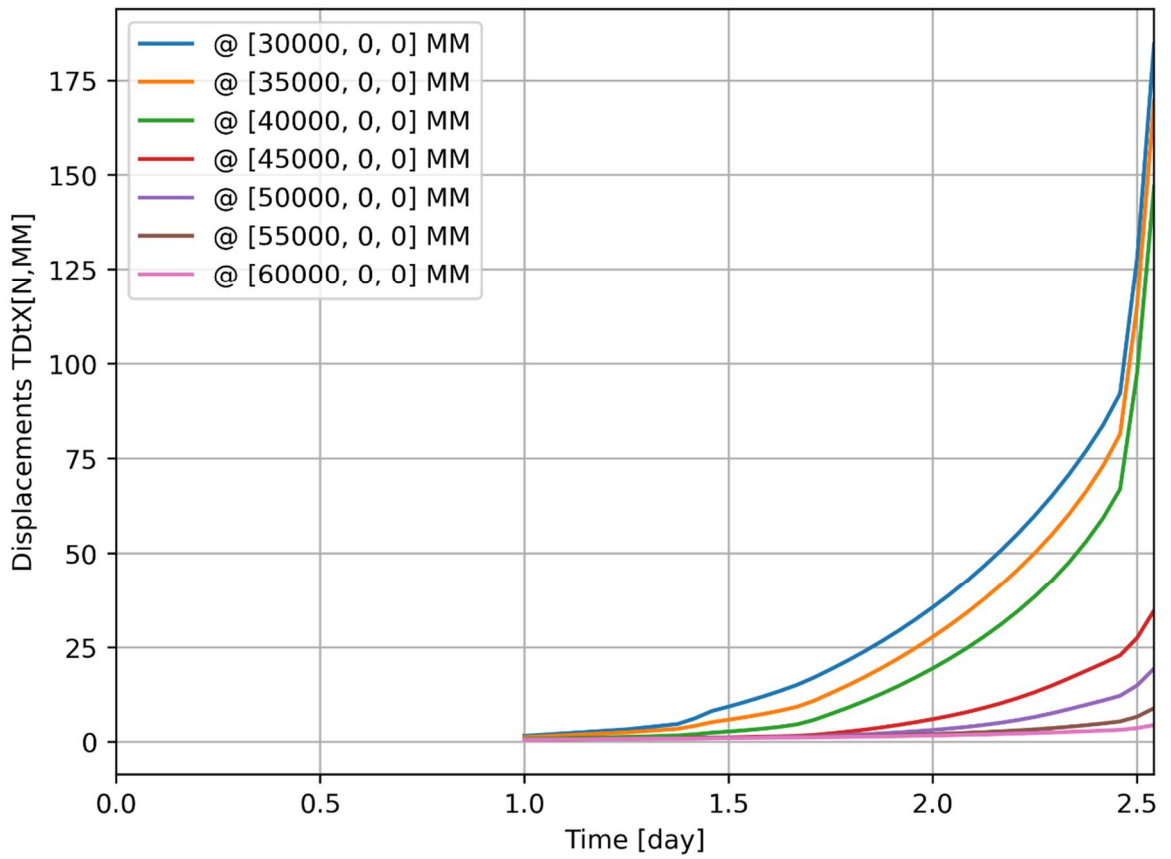
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.06kN/m<sup>2</sup> max: 21.72kN/m<sup>2</sup>

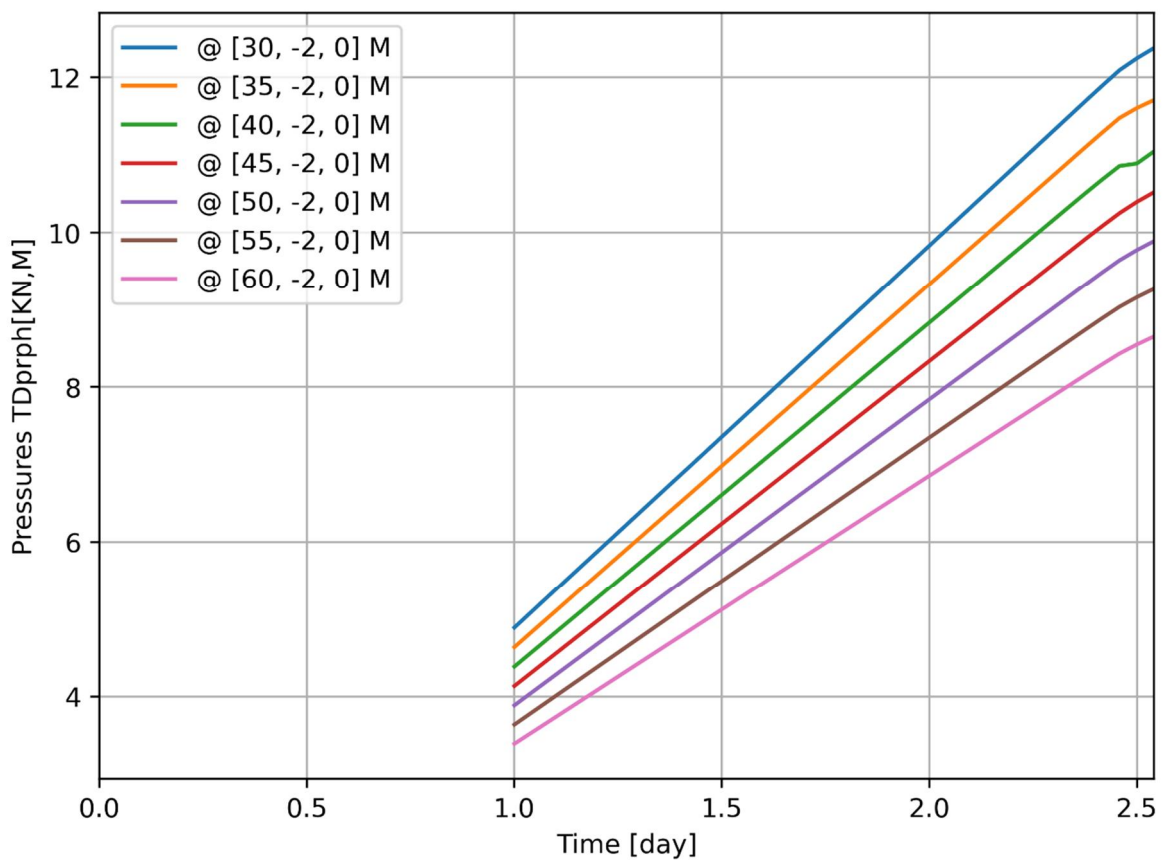
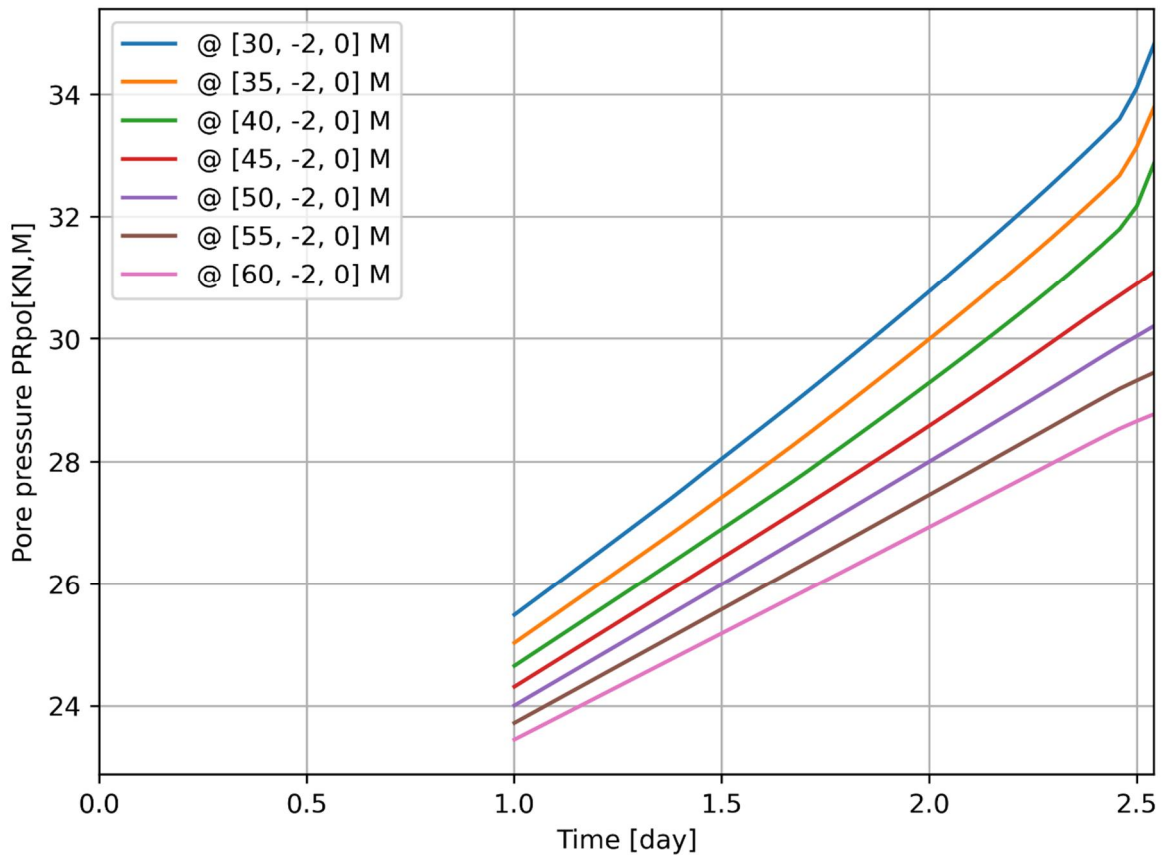


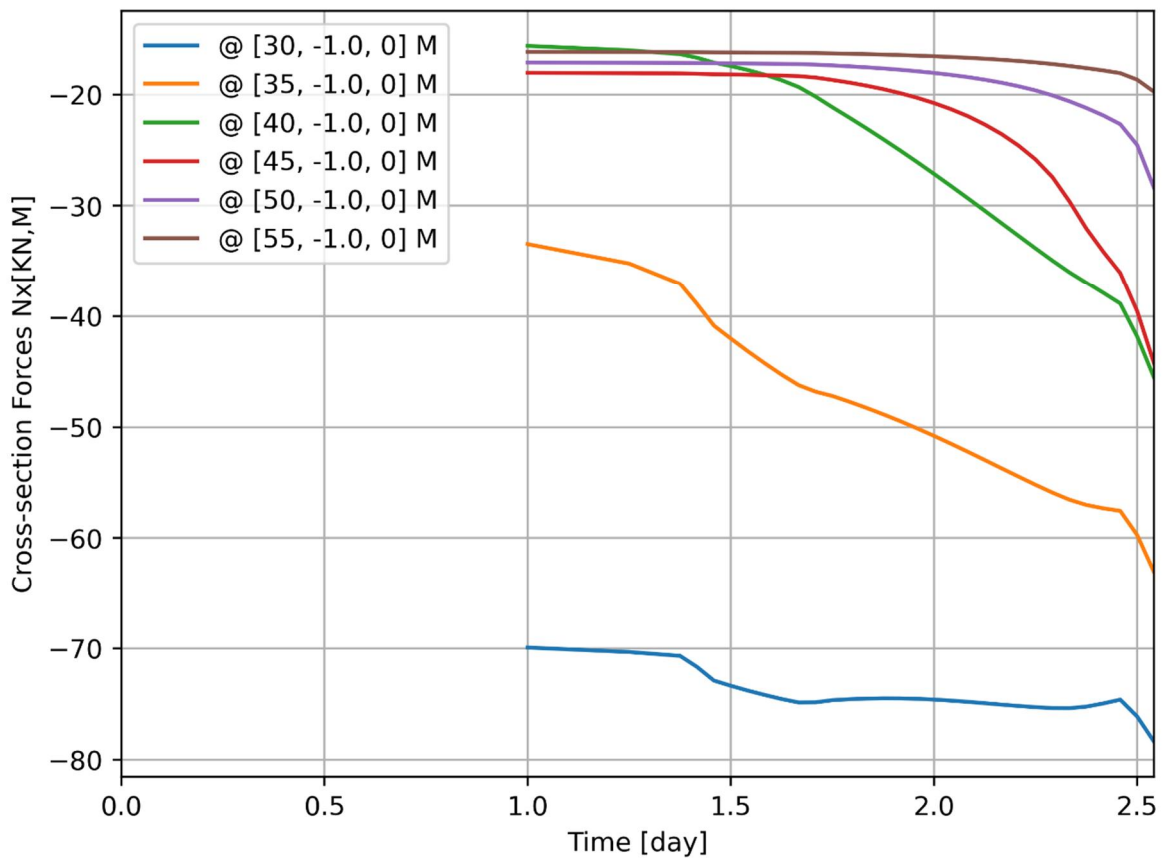
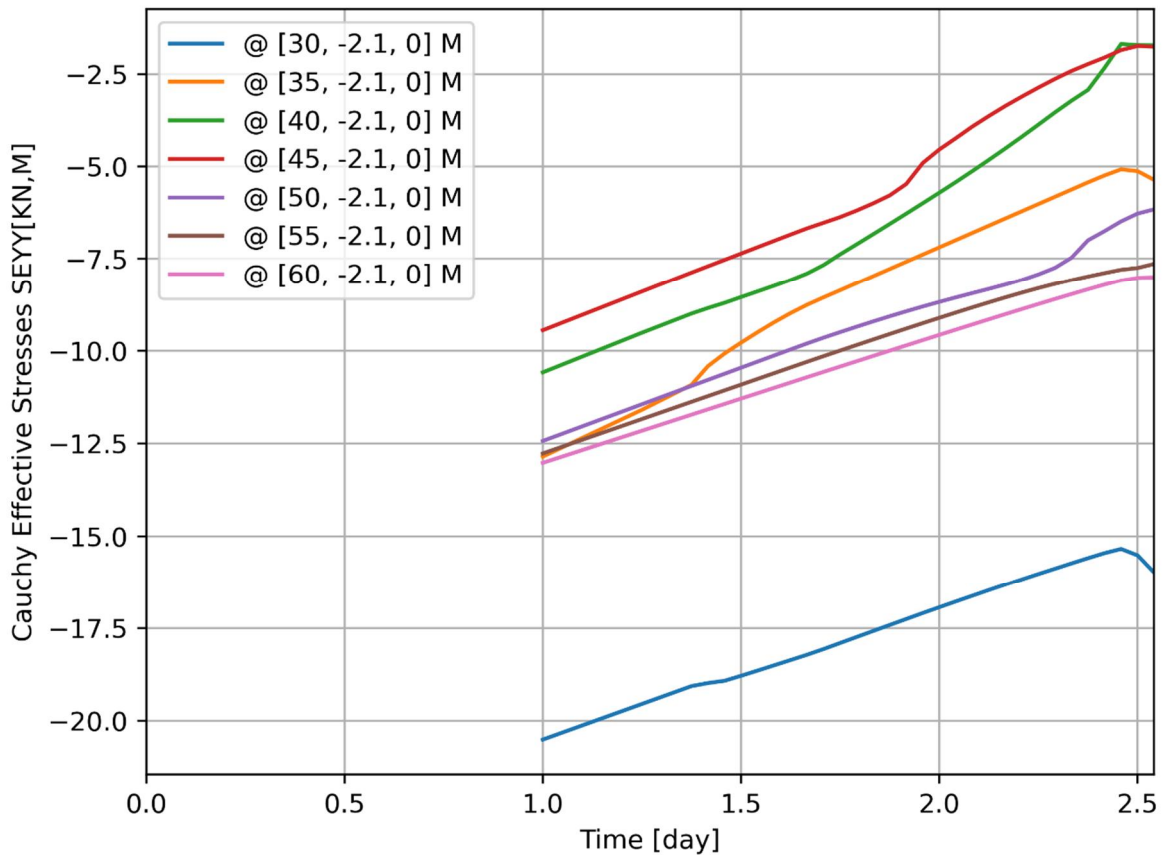
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_xs=40\_20200818  
Phase 2, Time-step 36, Time 2 day 12 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -102.48kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

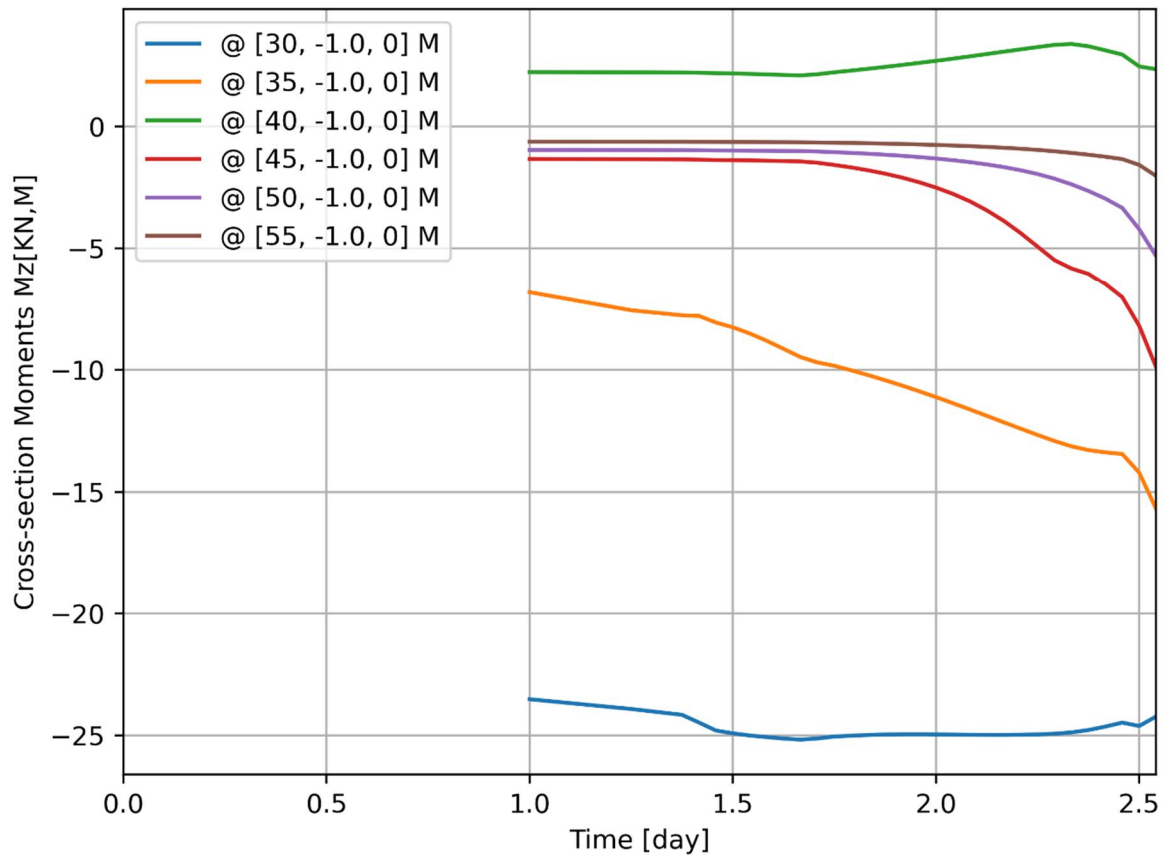










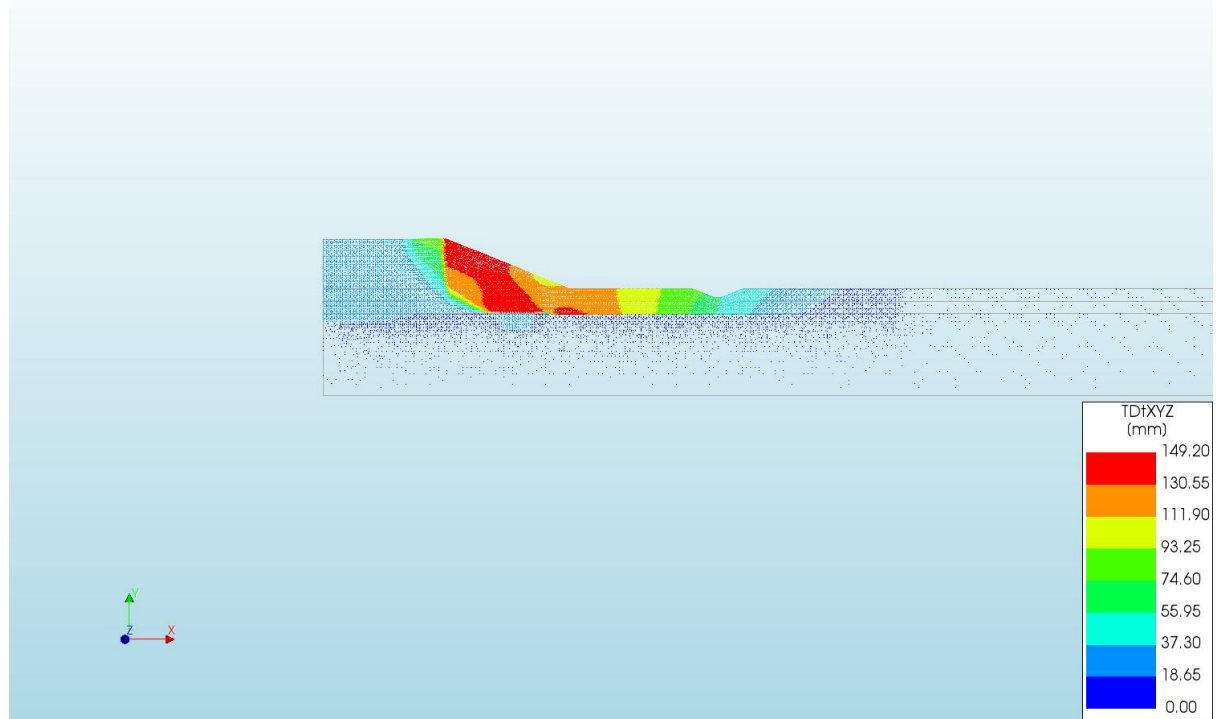




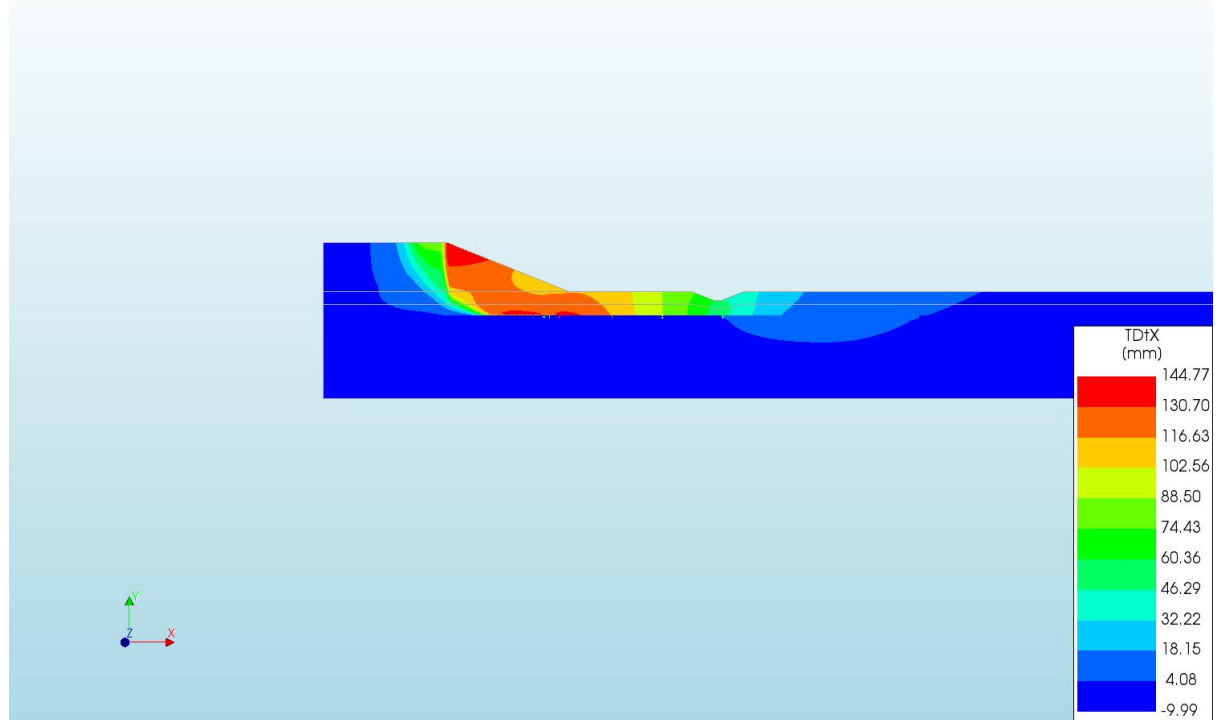
A.2.37

'Output d=3 c=18 E=3 k=1e-07 xs=45\_20200821'

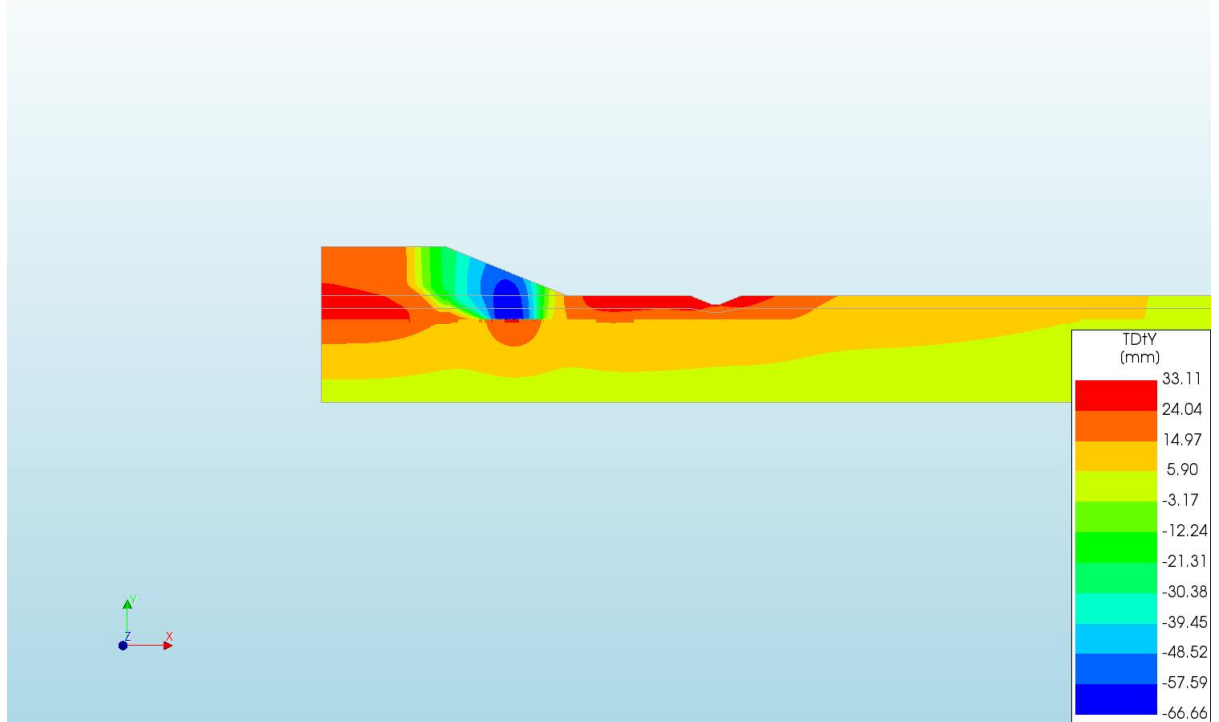
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
 Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
 Displacements TdXYZ  
 min: 0.00mm max: 149.20mm



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
 Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
 Displacements TdX  
 min: -9.99mm max: 144.77mm



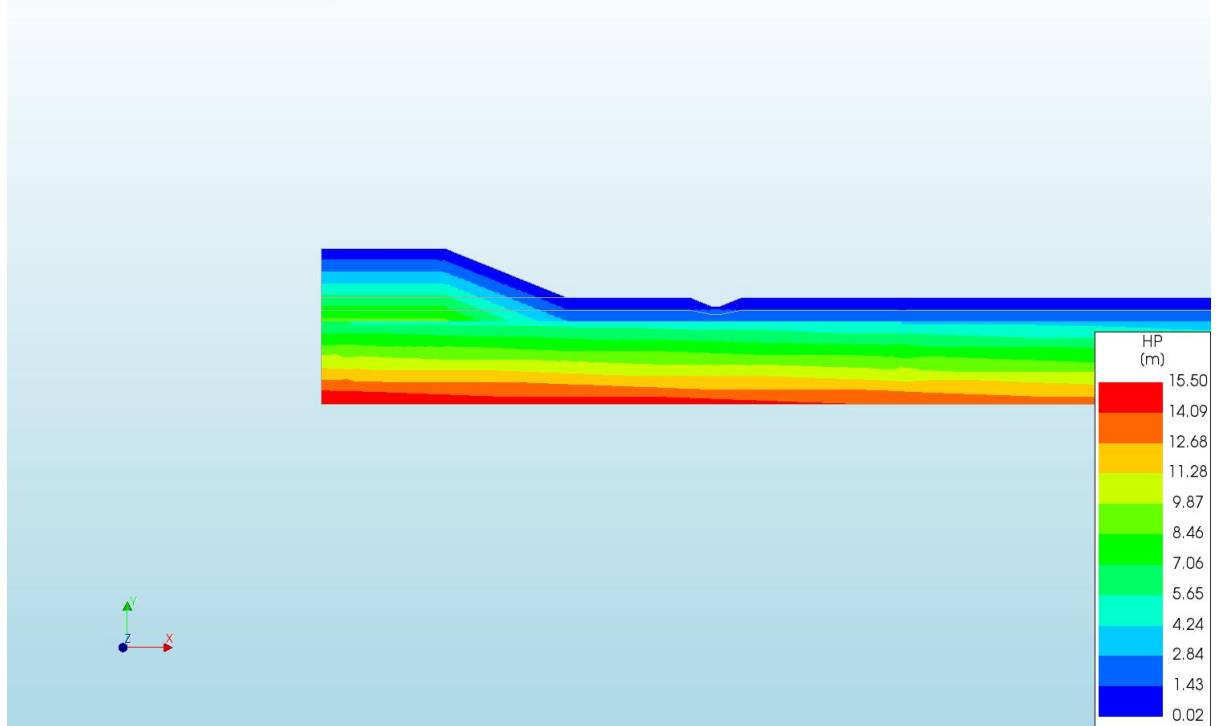
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Displacements TDtY  
min: -66.66mm max: 33.11mm



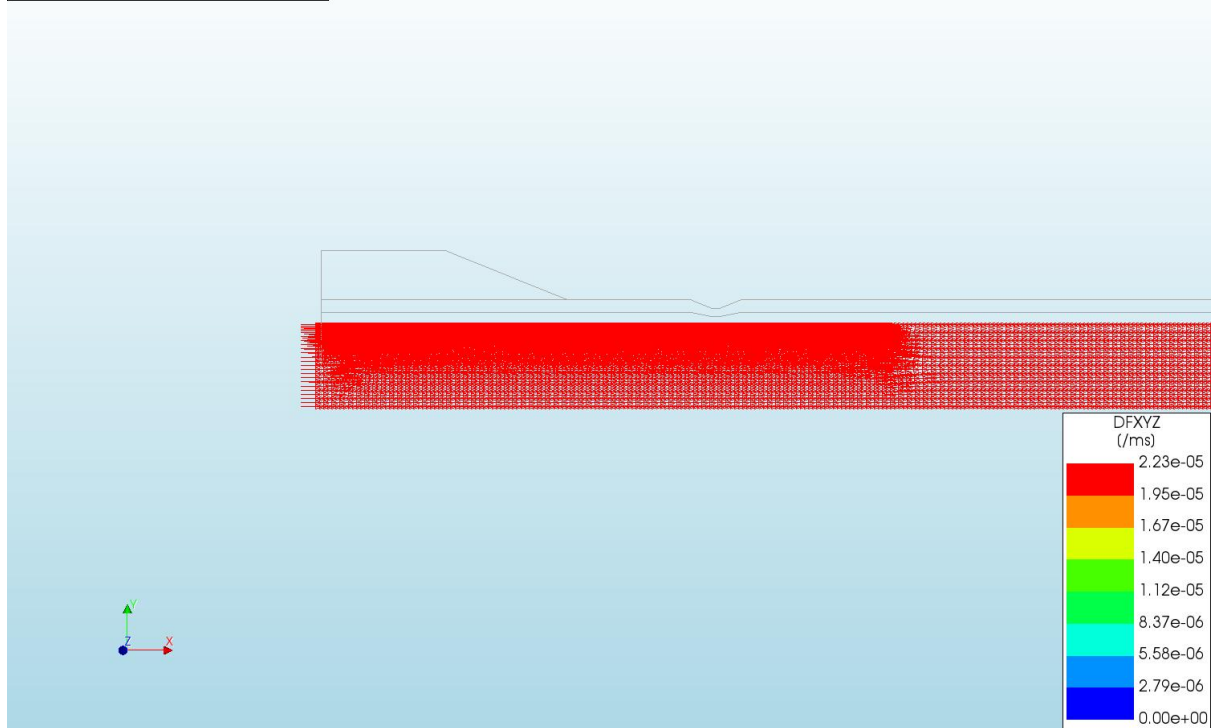
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 27.12kN/m<sup>2</sup>



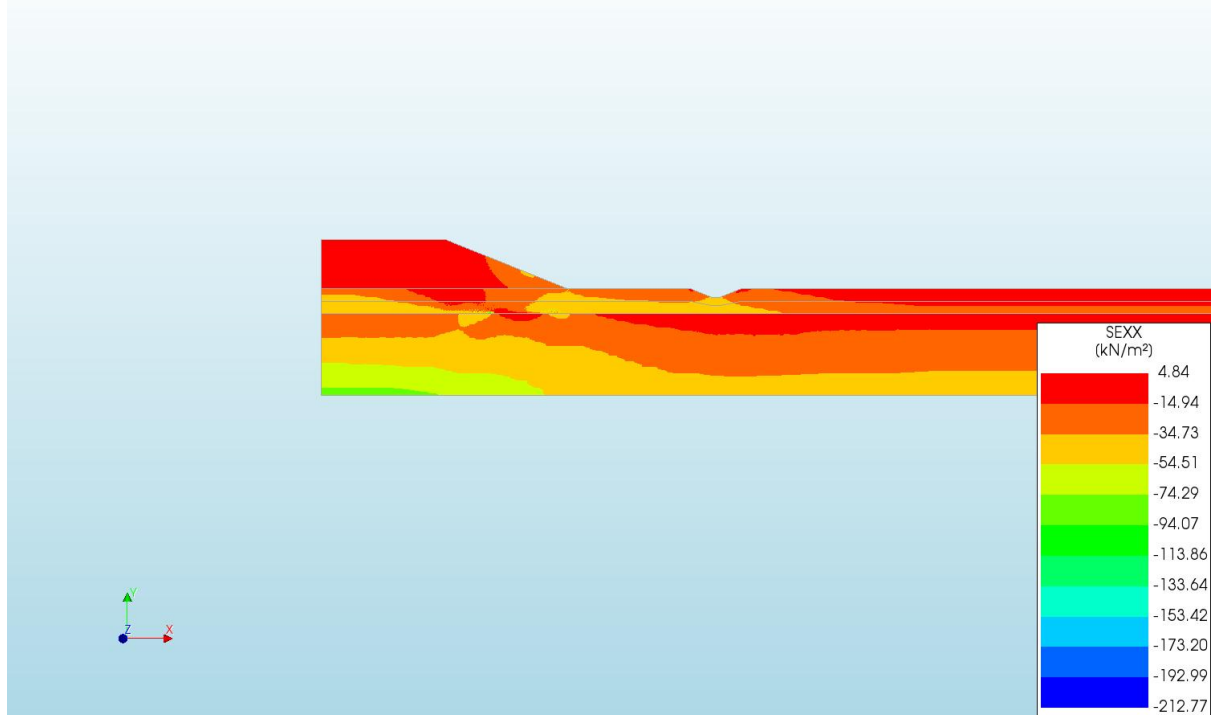
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.50m



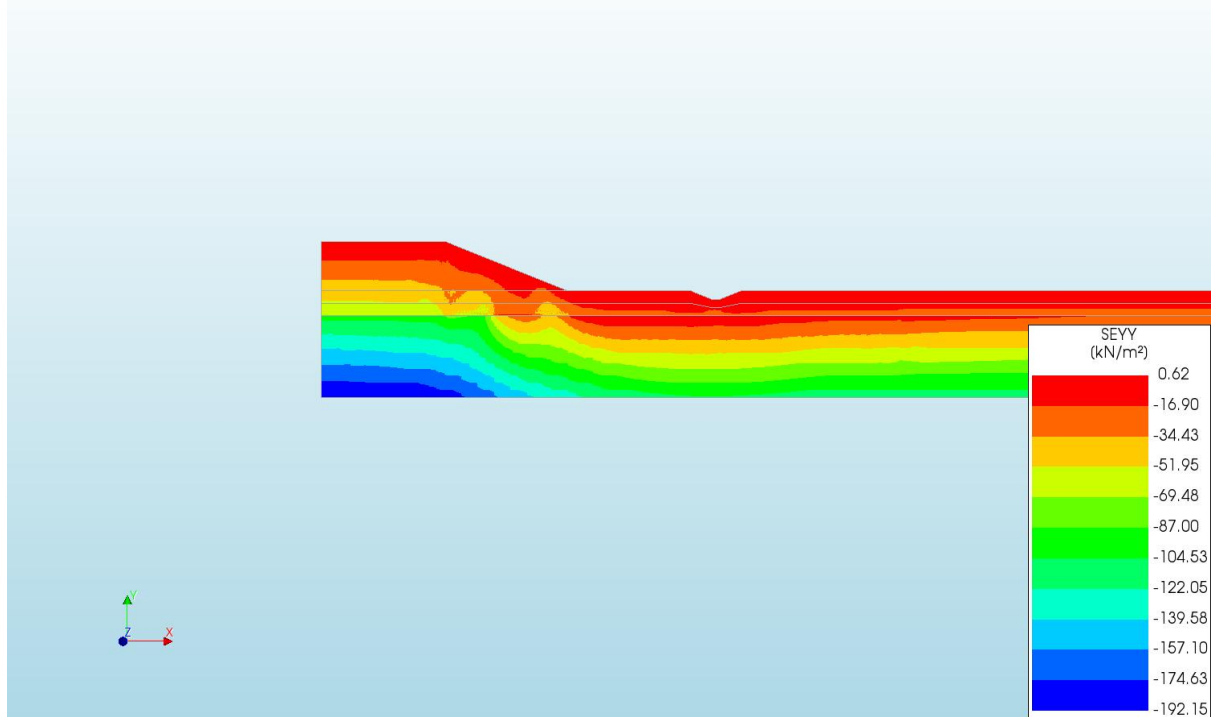
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.23e-05/ms



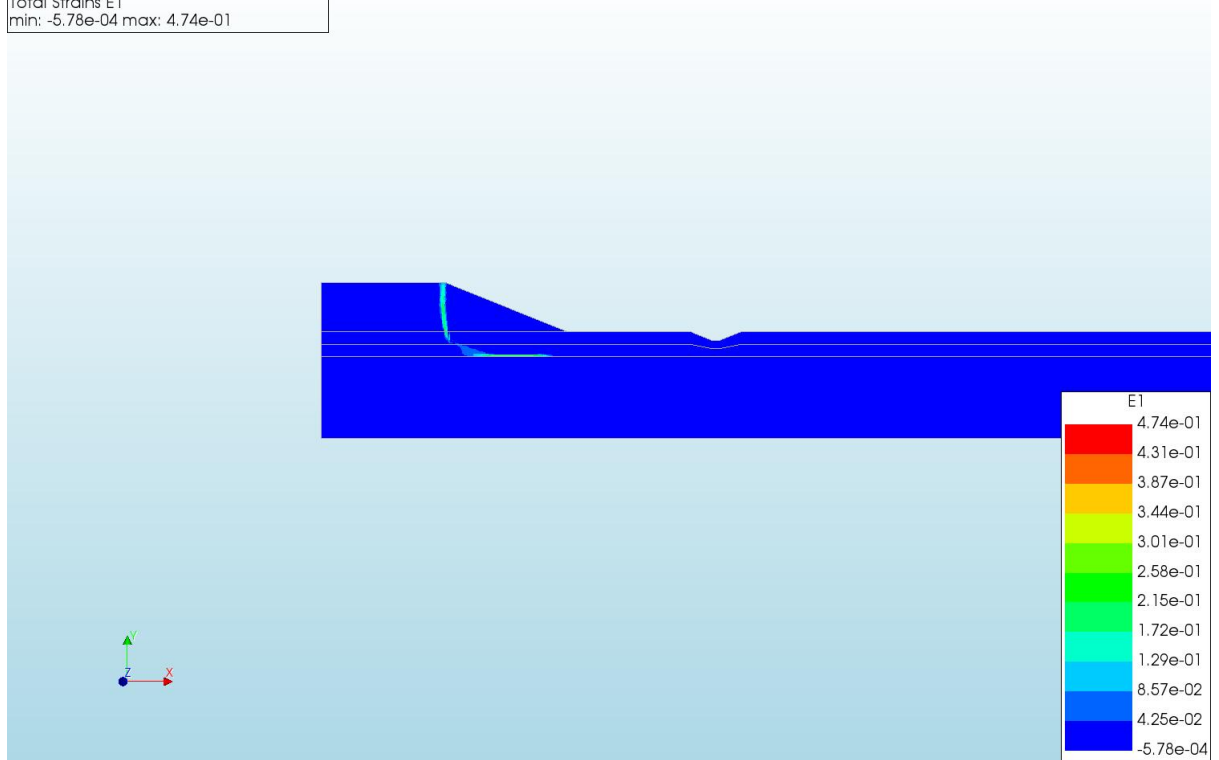
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -212.77kN/m<sup>2</sup> max: 4.84kN/m<sup>2</sup>



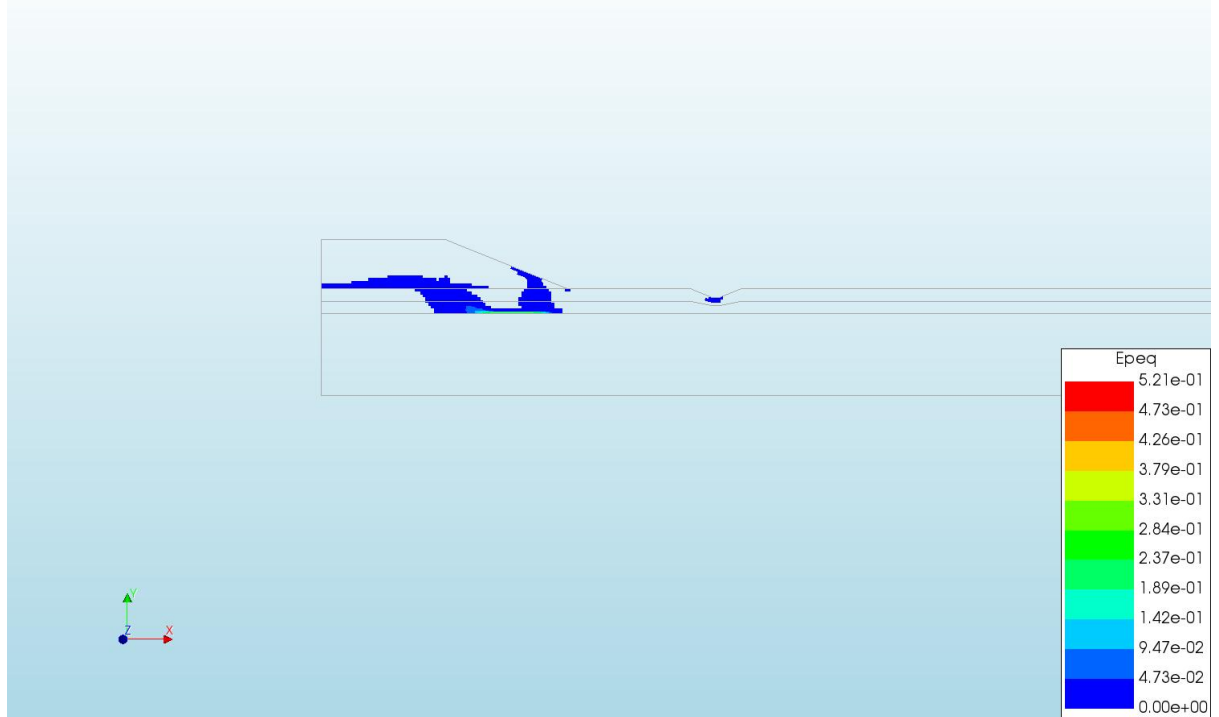
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.15kN/m<sup>2</sup> max: 0.62kN/m<sup>2</sup>



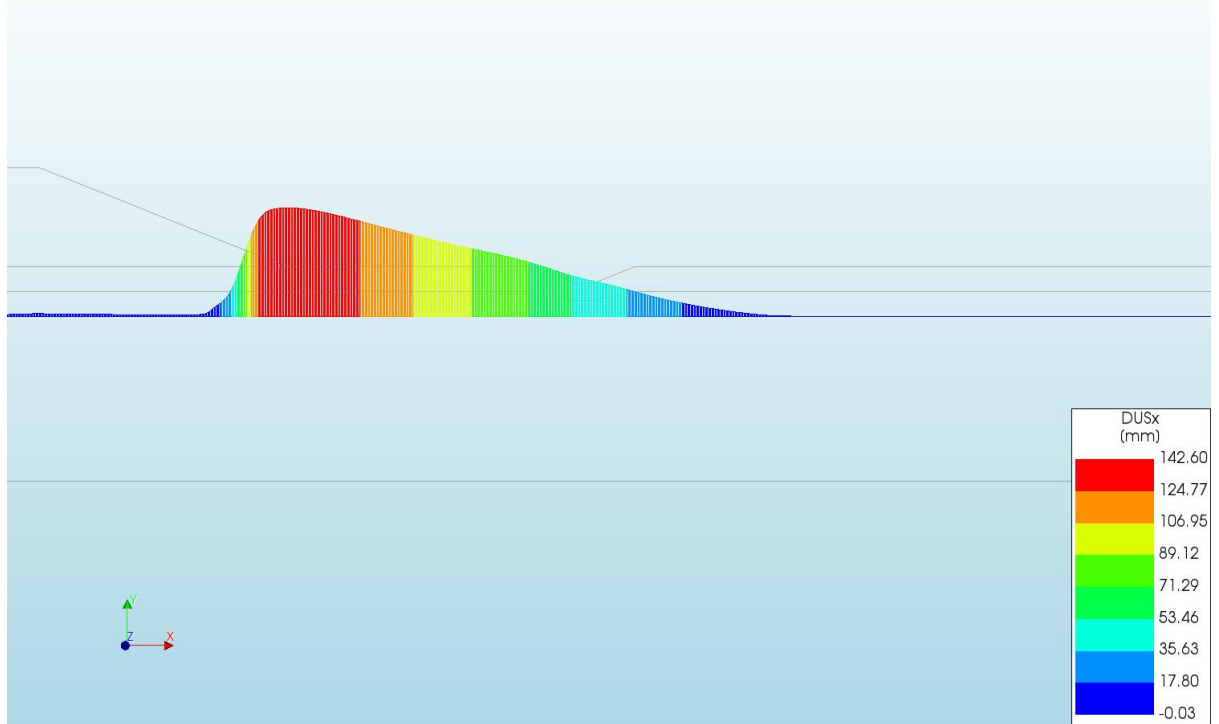
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Total Strains E1  
min: -5.78e-04 max: 4.74e-01



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.21e-01



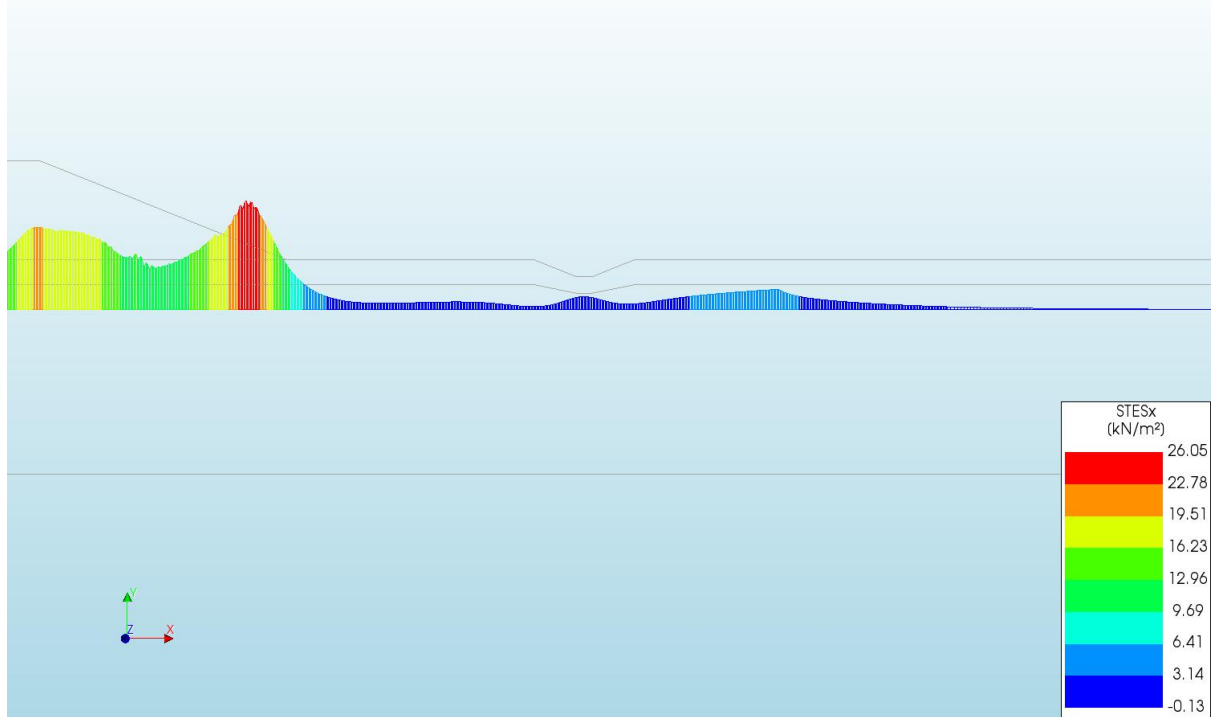
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 142.60mm



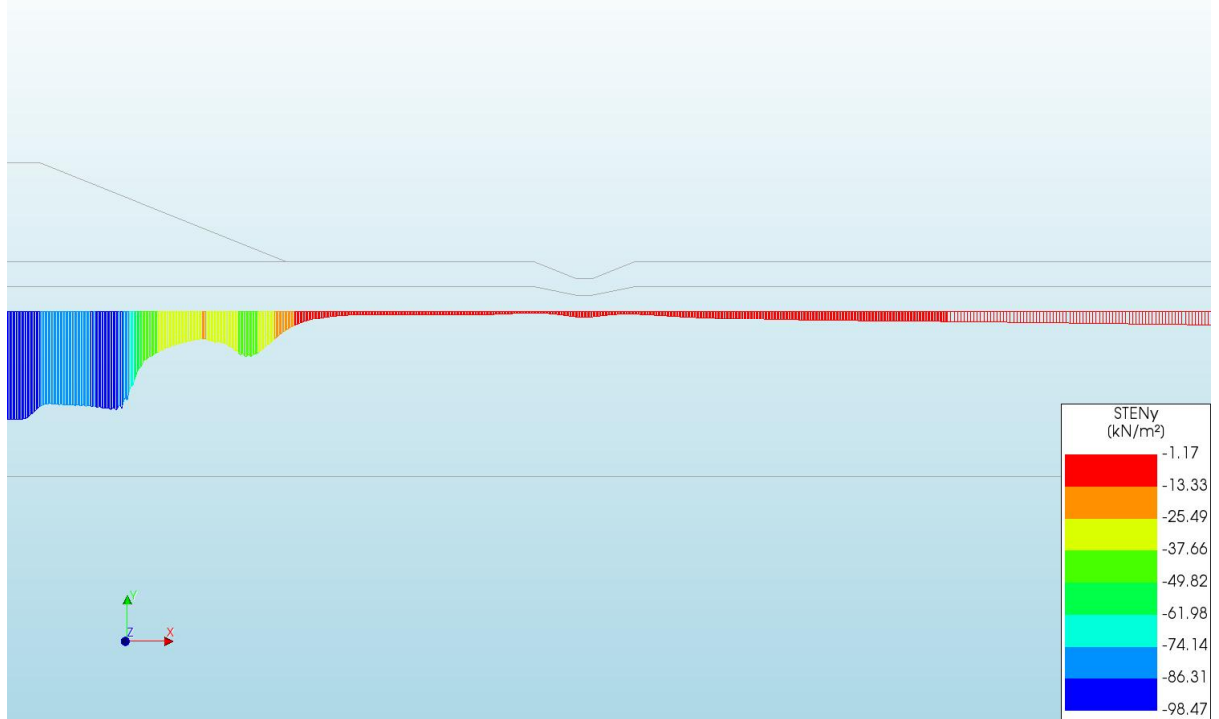
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -15.30mm max: 3.93mm

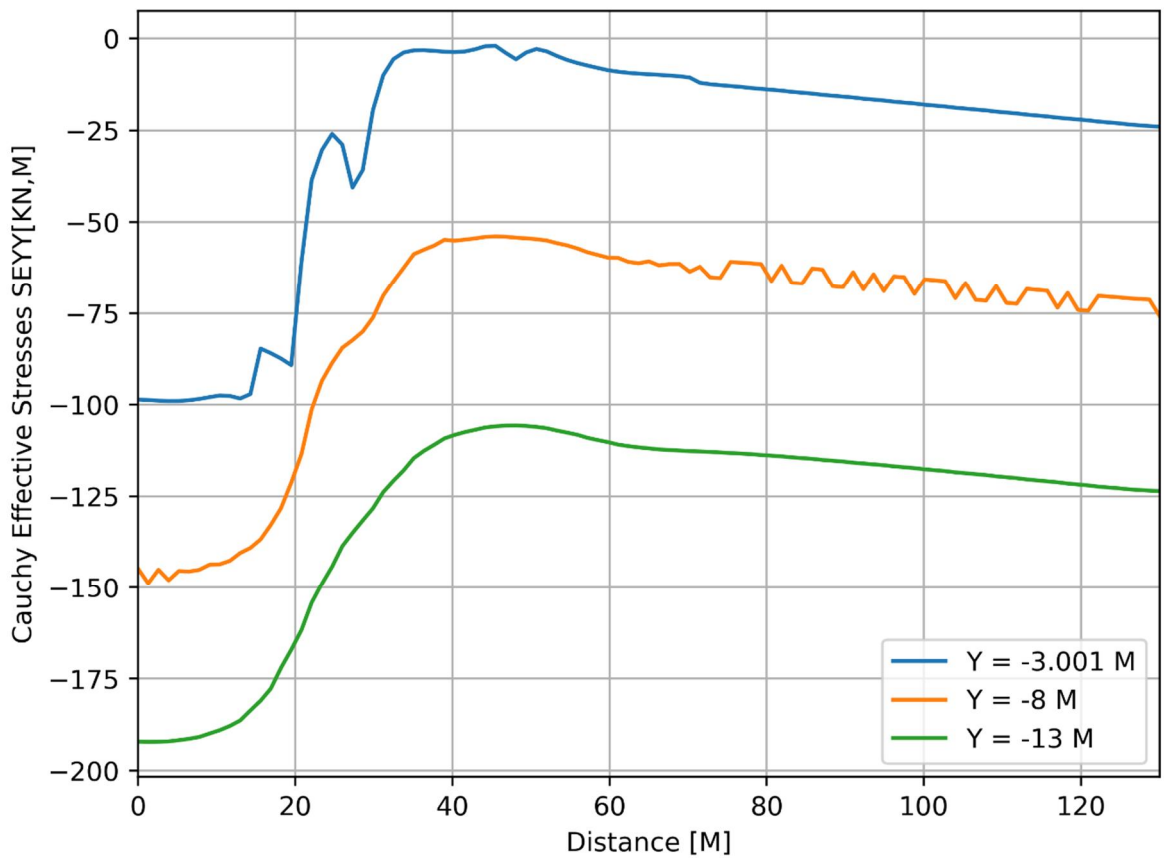
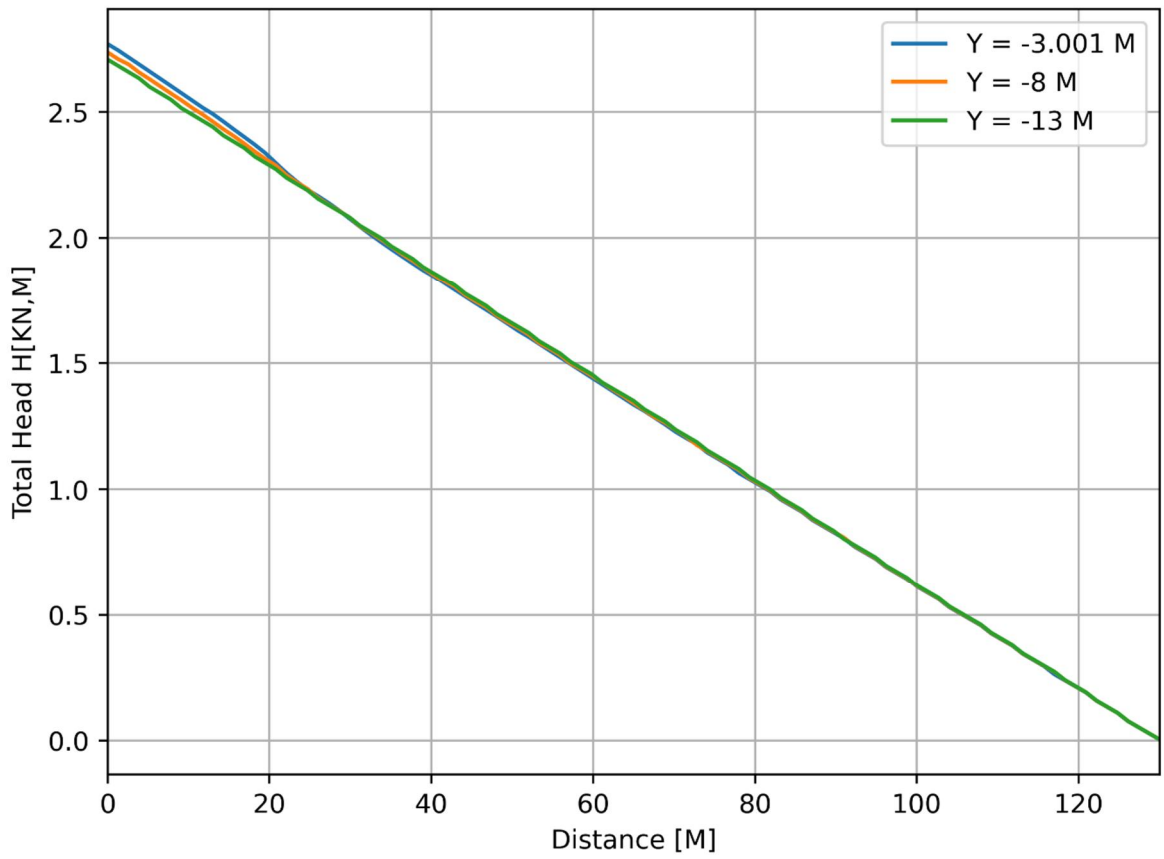


d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.13kN/m<sup>2</sup> max: 26.05kN/m<sup>2</sup>

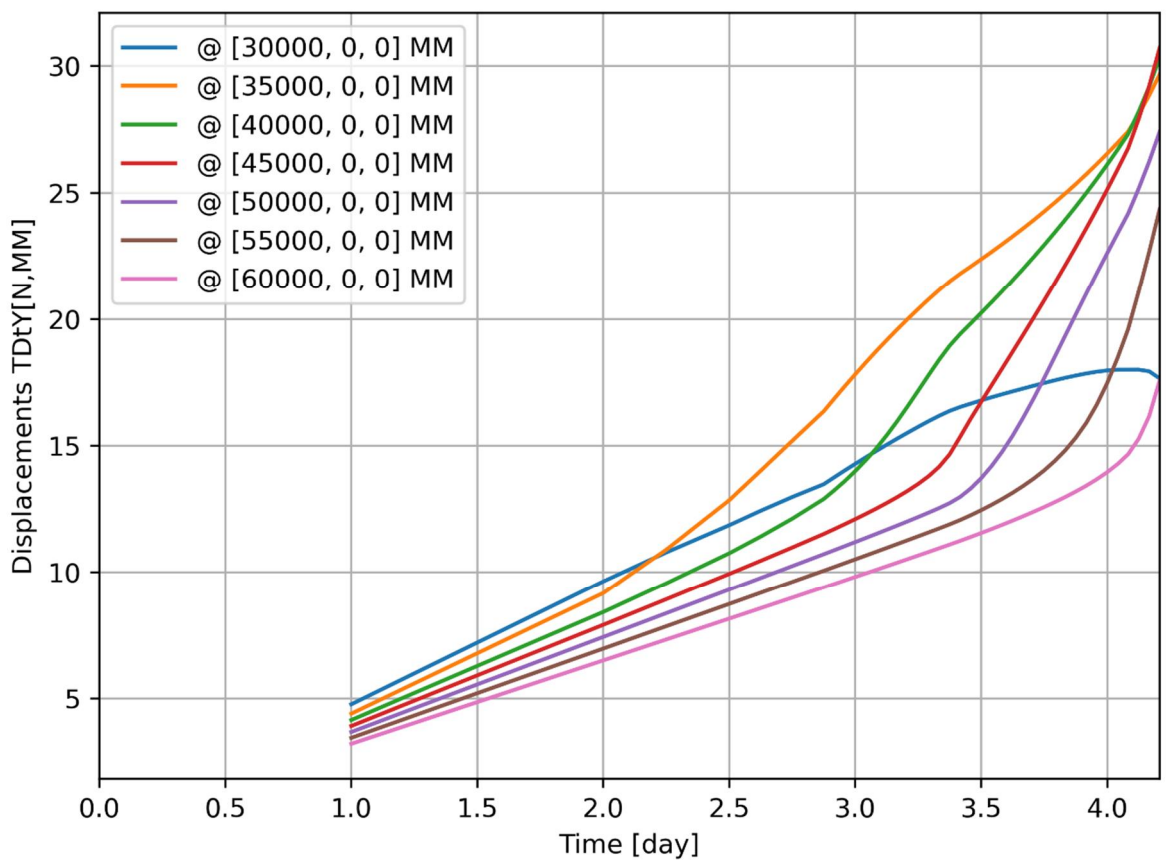
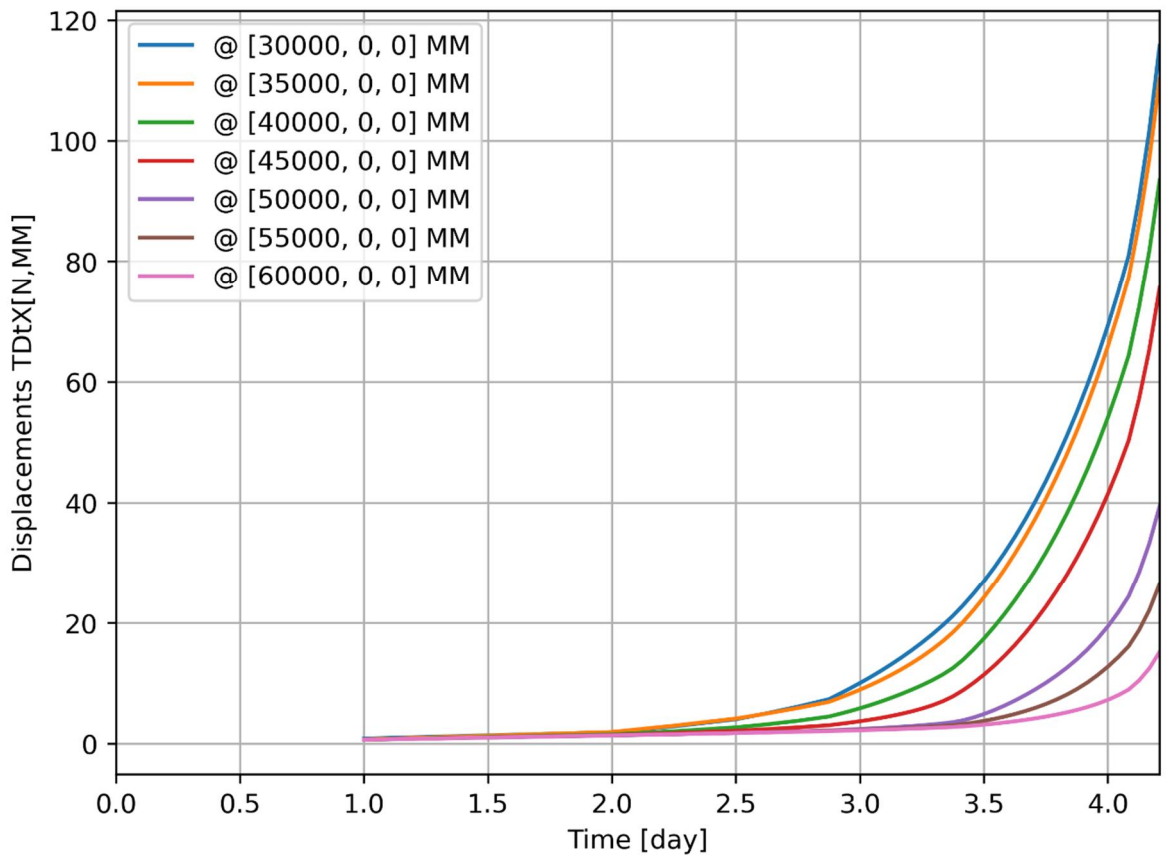


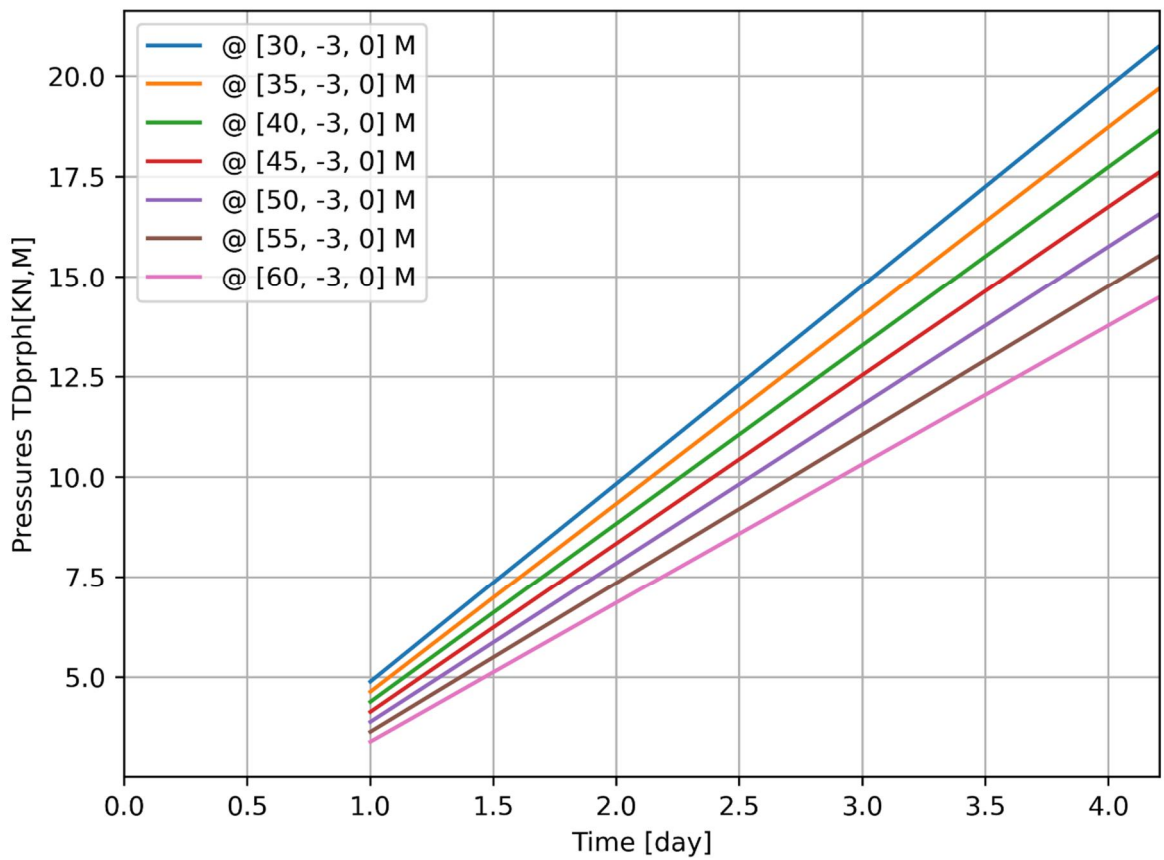
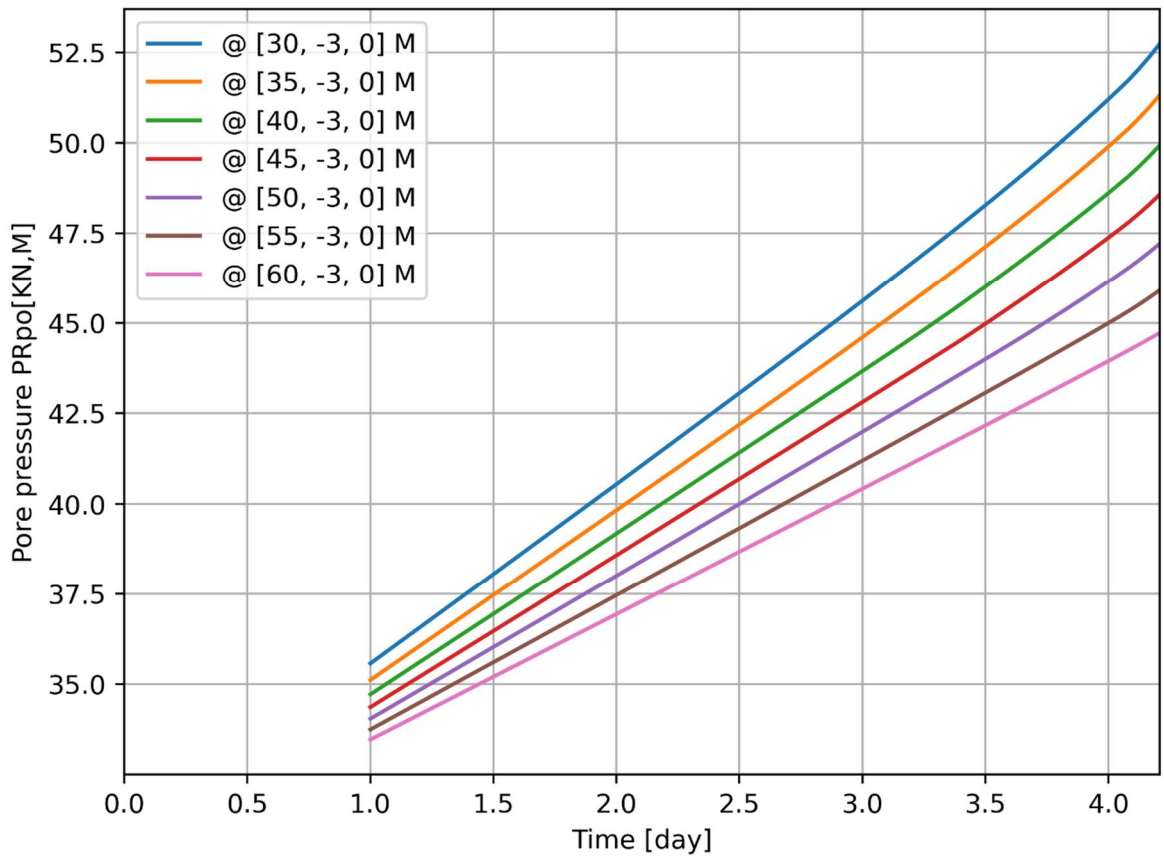
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_xs=45\_20200821  
Phase 2, Time-step 45, Time 4 day 5 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -98.47kN/m<sup>2</sup> max: -1.17kN/m<sup>2</sup>

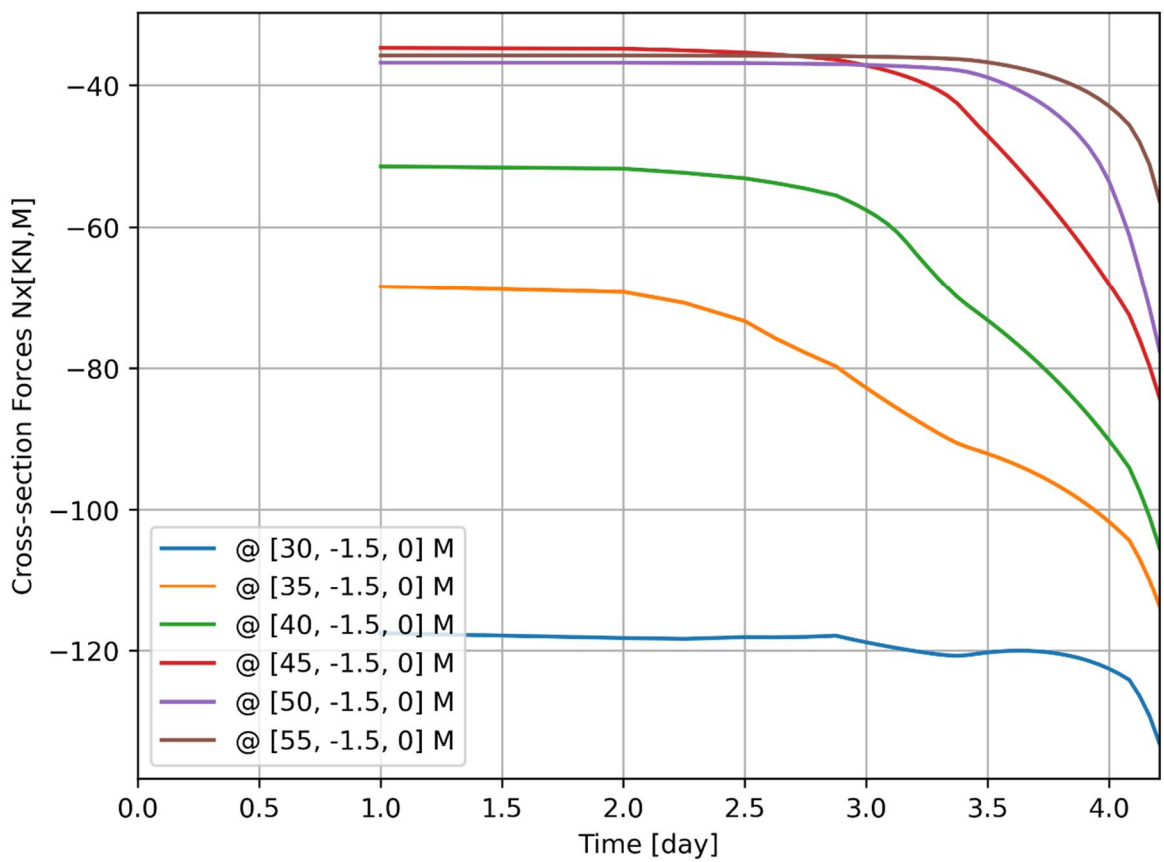
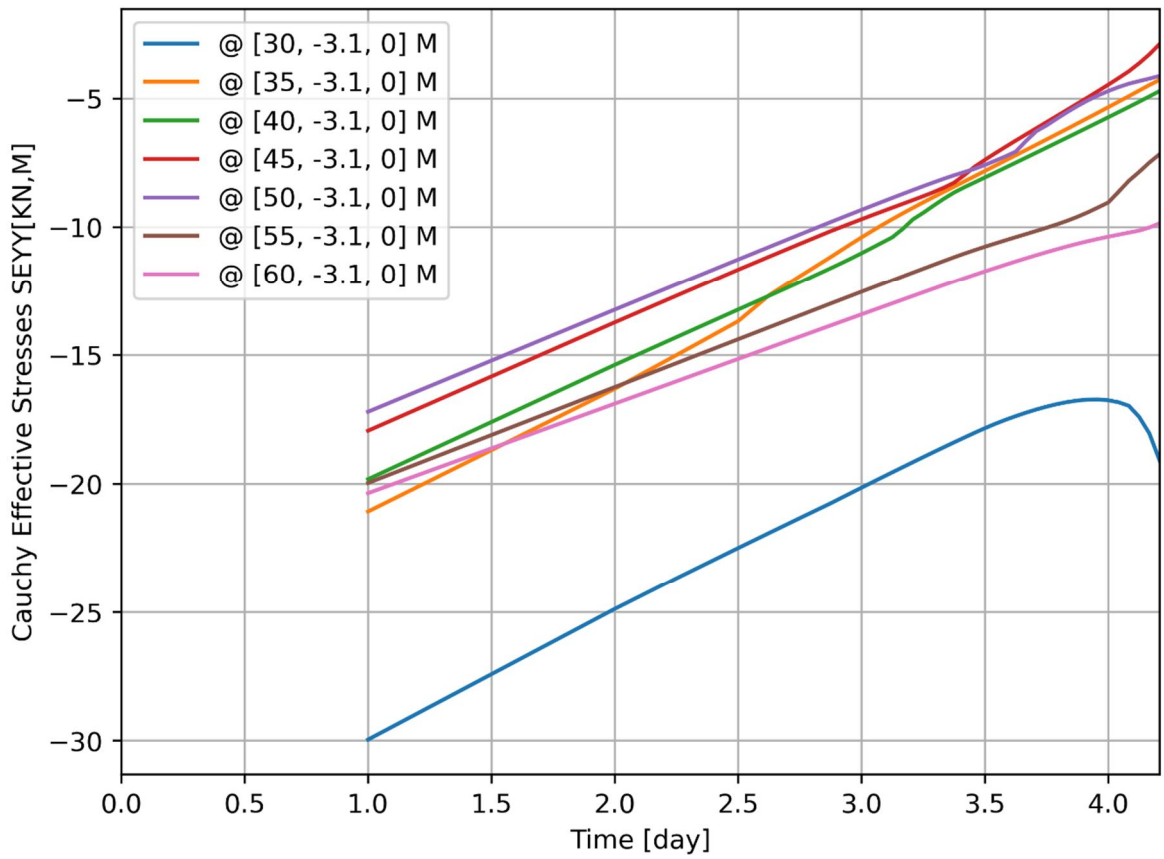












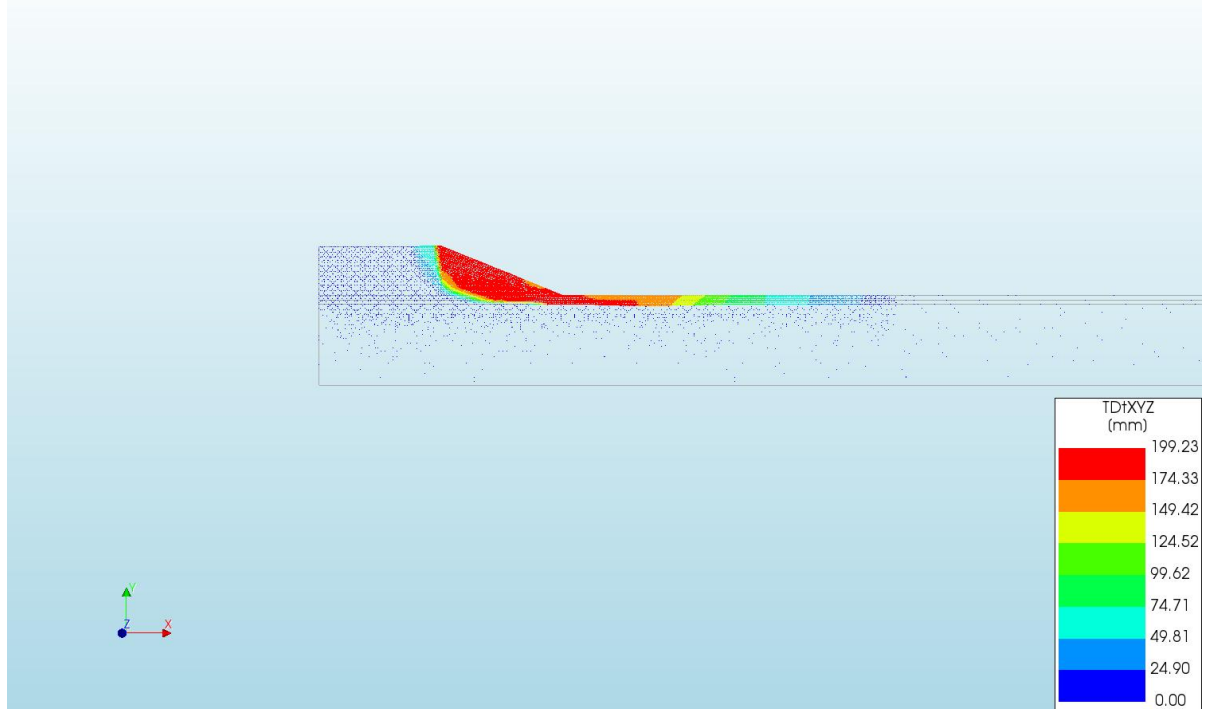
## A.3 Resultaten voor de aanvullende variatie van de treksterkte

### A.3.1 Inleiding

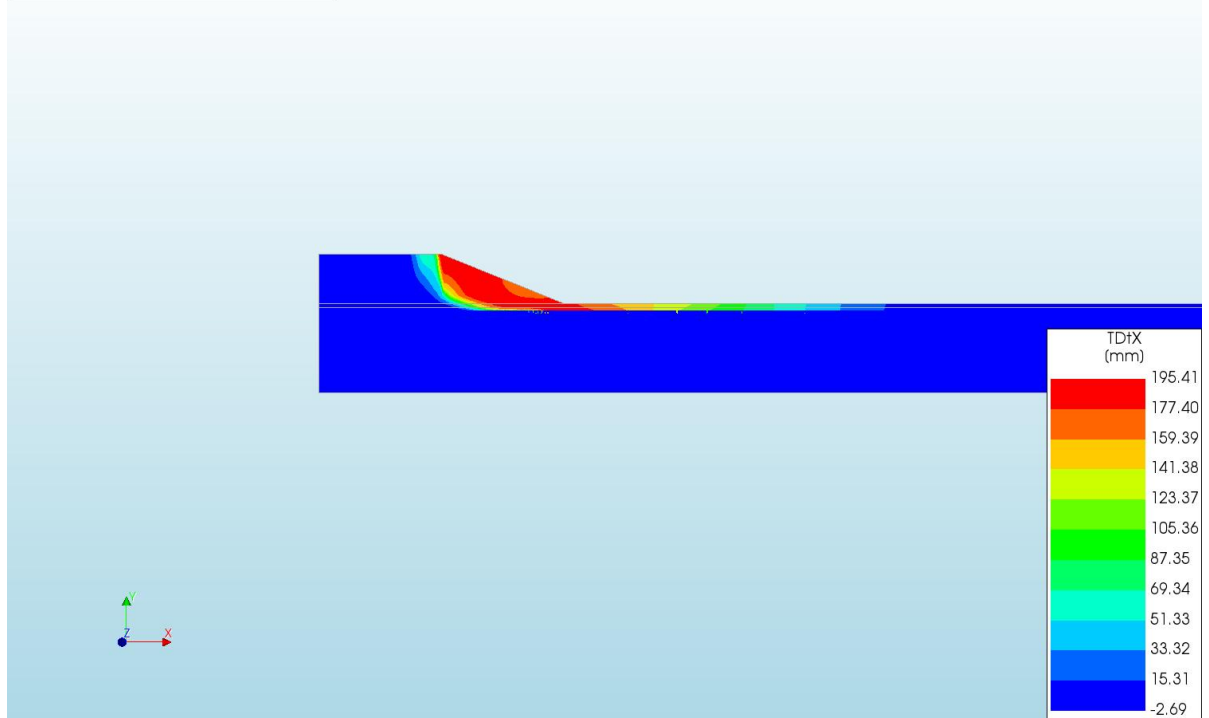
Hierna volgen de resultaten voor een aanvullende variatie van de treksterkte (1 kPa en 5 kPa, in plaats van de in de andere varianten gehanteerde 3 kPa). Ten opzichte van de conceptversie 1.0 zijn deze resultaten aan de voorliggende definitieve versie 1.1 toegevoegd, op verzoek van het POVM kernteam. De variatie is uitgevoerd ten opzichte van de basisgevallen met dikte 1 m, 2 m, en 3 m.

### A.3.2 Output d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927

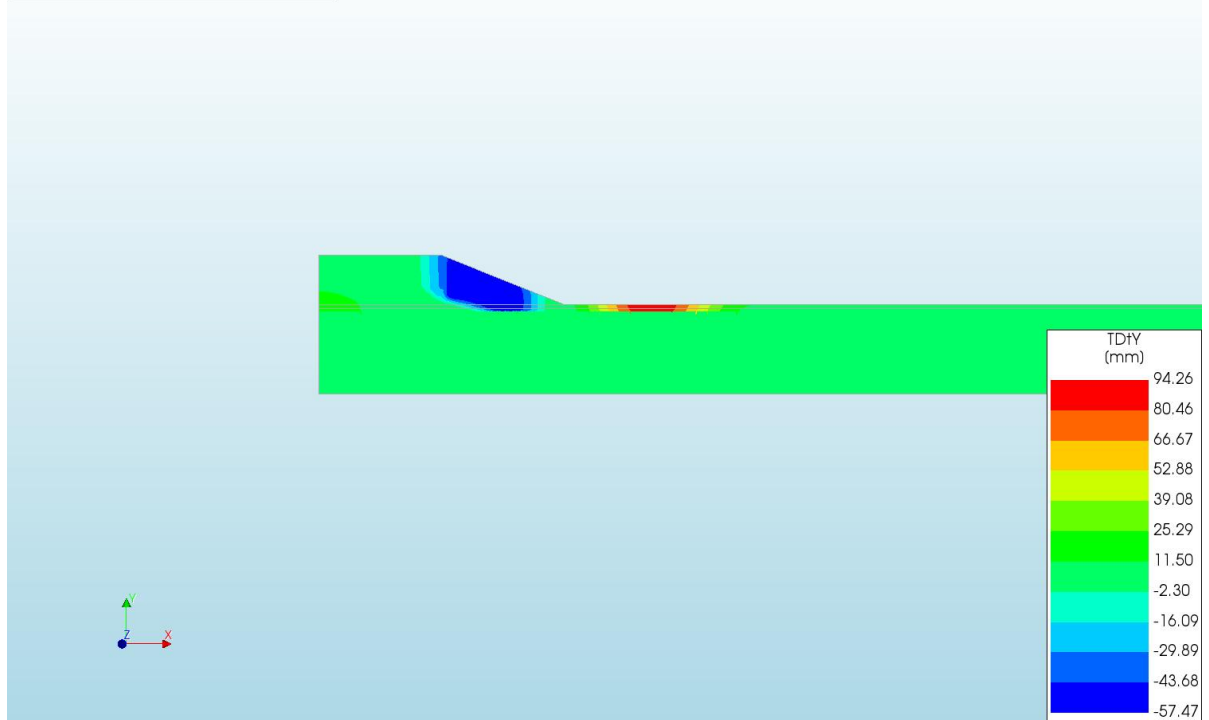
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Displacements TD:XYZ  
min: 0.00mm max: 199.23mm



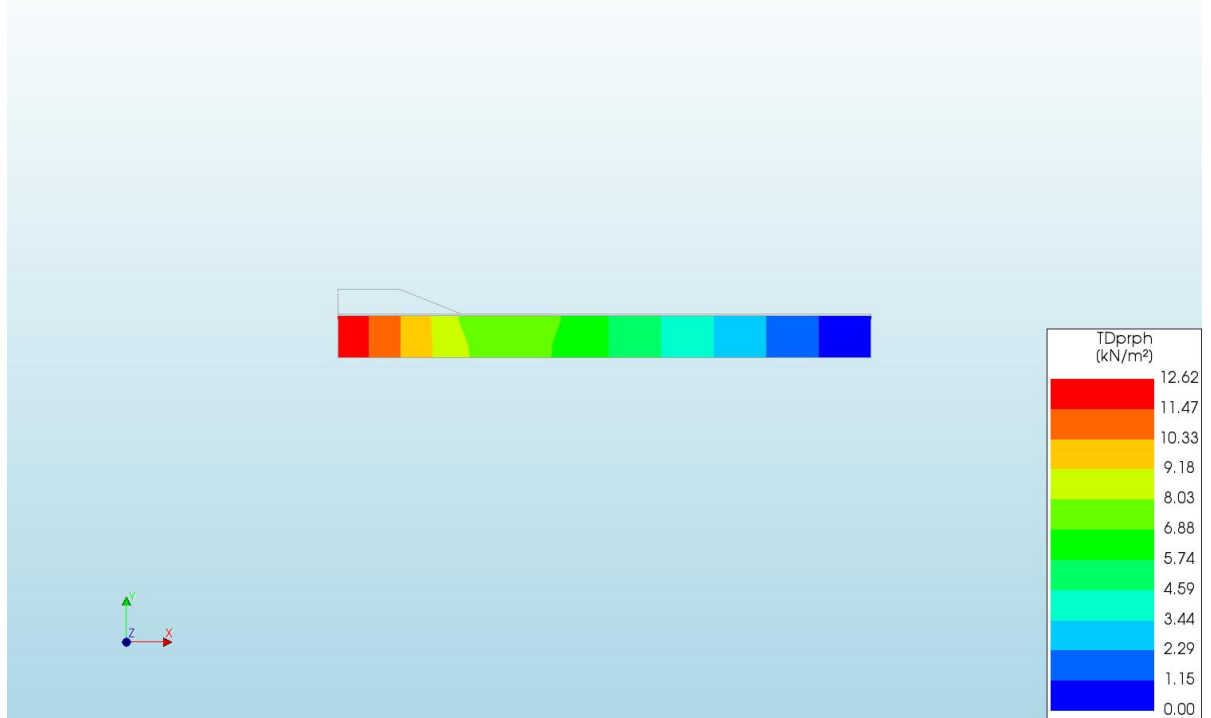
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Displacements TDfX  
min: -2.69mm max: 195.41mm



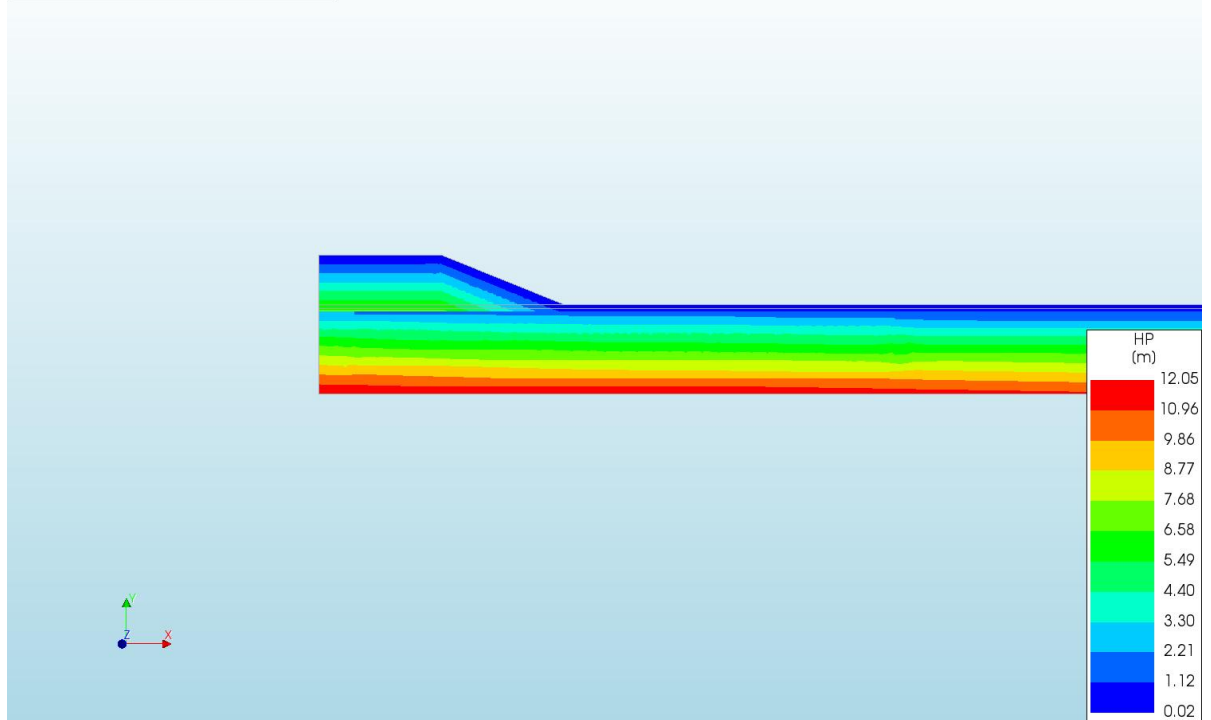
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Displacements TDfY  
min: -57.47mm max: 94.26mm



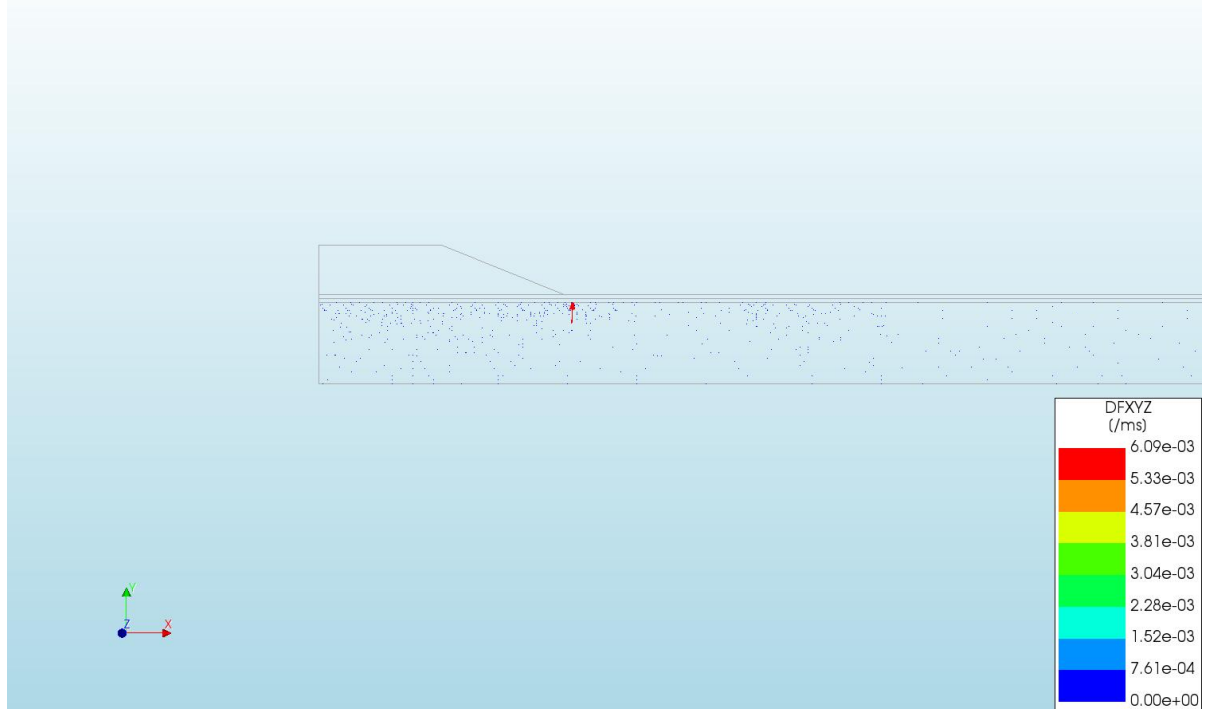
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 12.62kN/m<sup>2</sup>



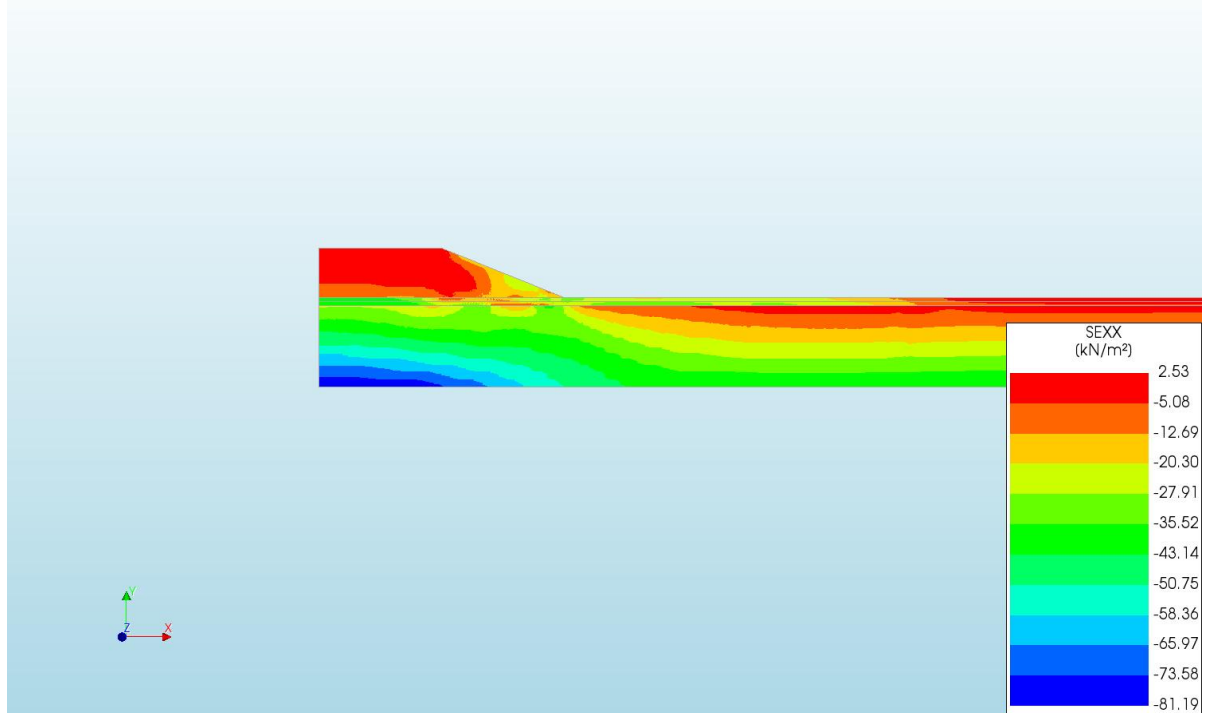
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.05m



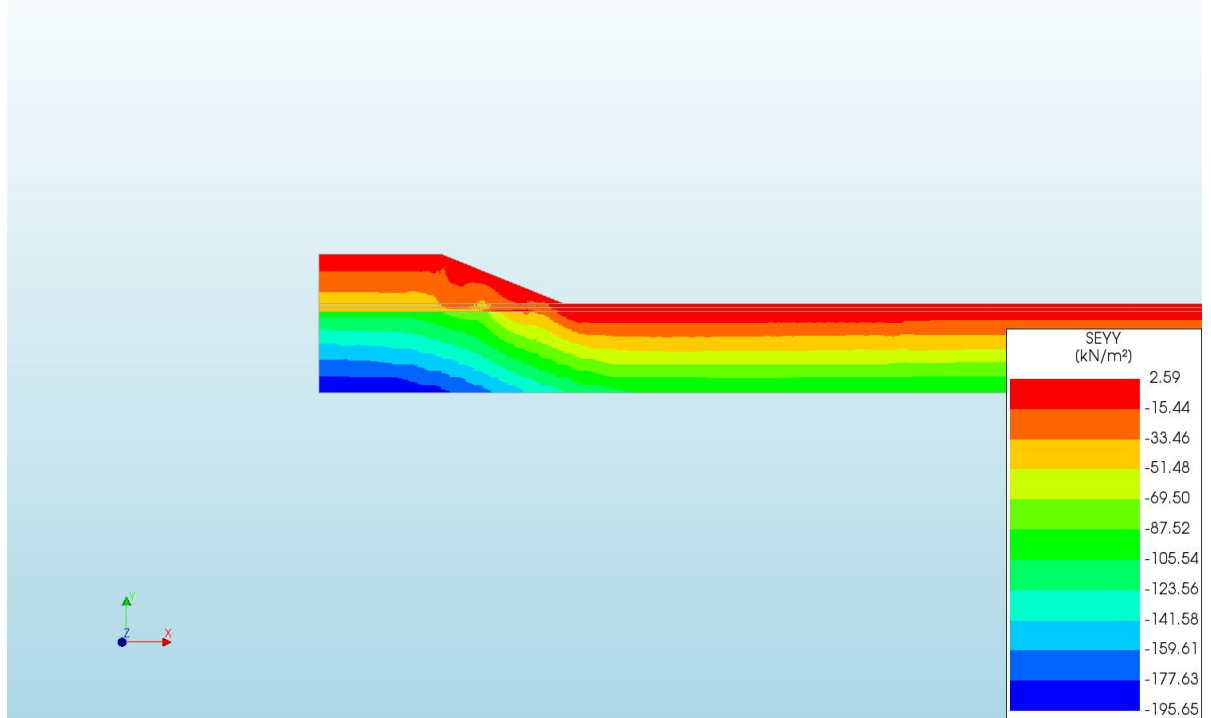
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 6.09e-03/ms



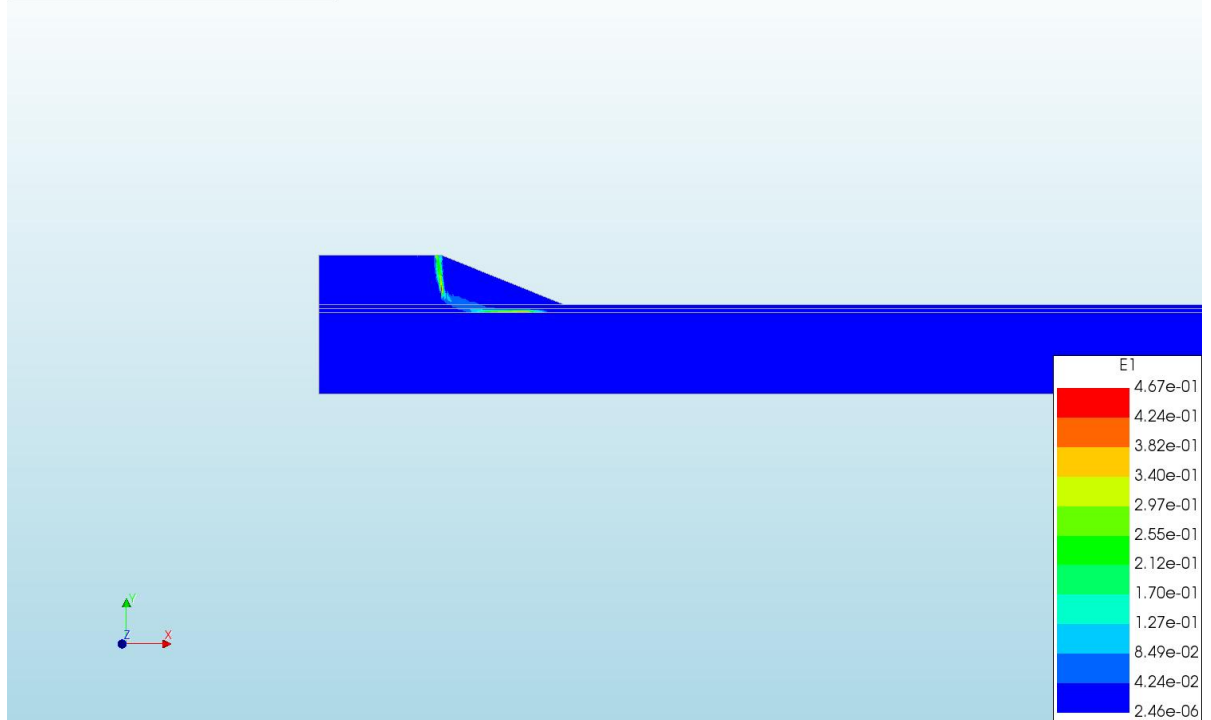
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -81.19kN/m<sup>2</sup> max: 2.53kN/m<sup>2</sup>



d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -195.65kN/m<sup>2</sup> max: 2.59kN/m<sup>2</sup>

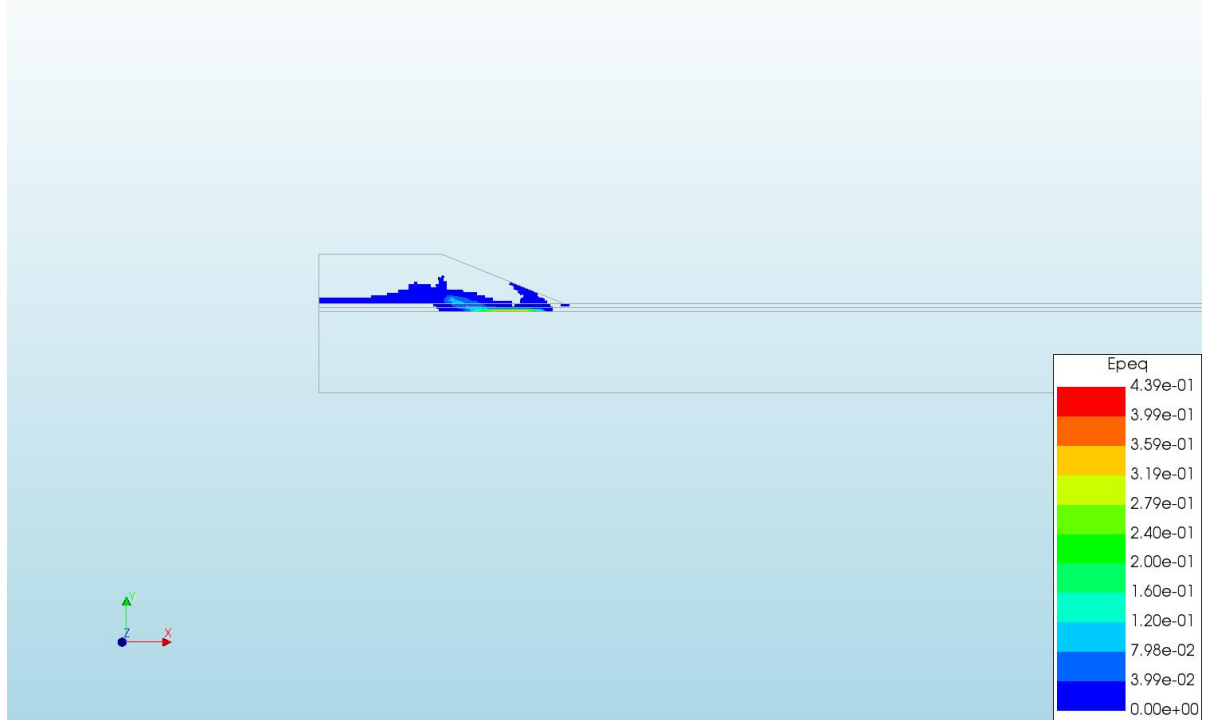


d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Total Strains E1  
min: 2.46e-06 max: 4.67e-01

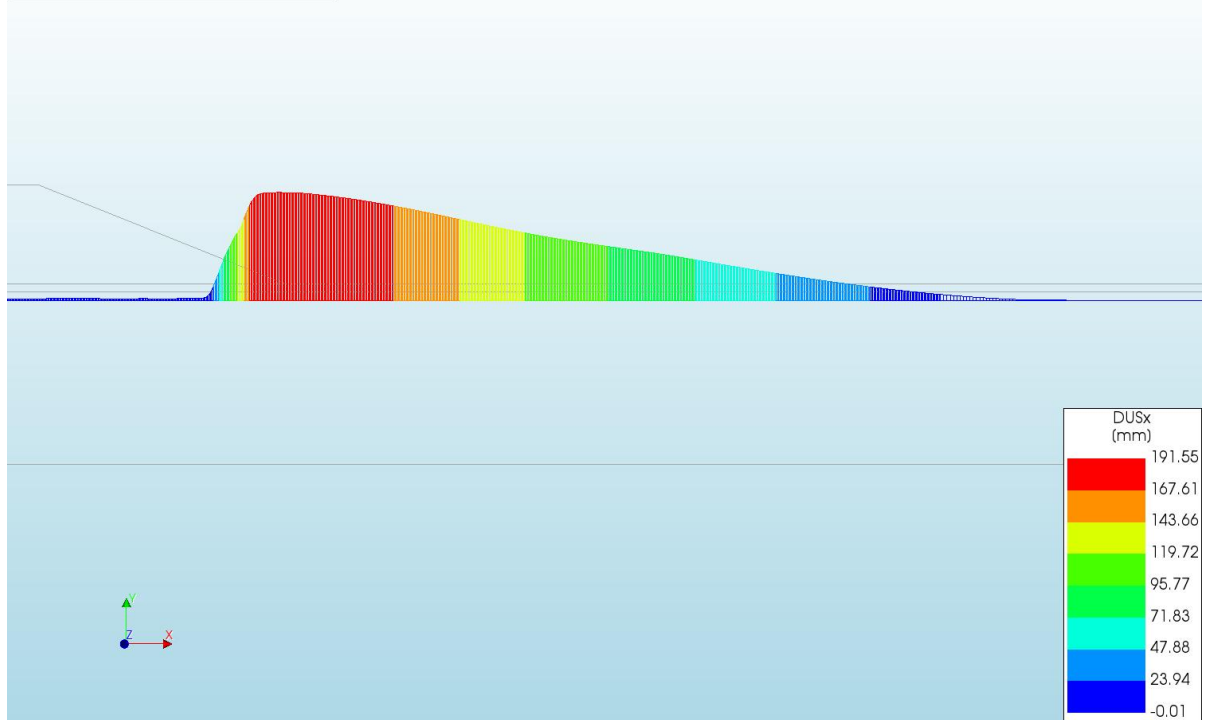




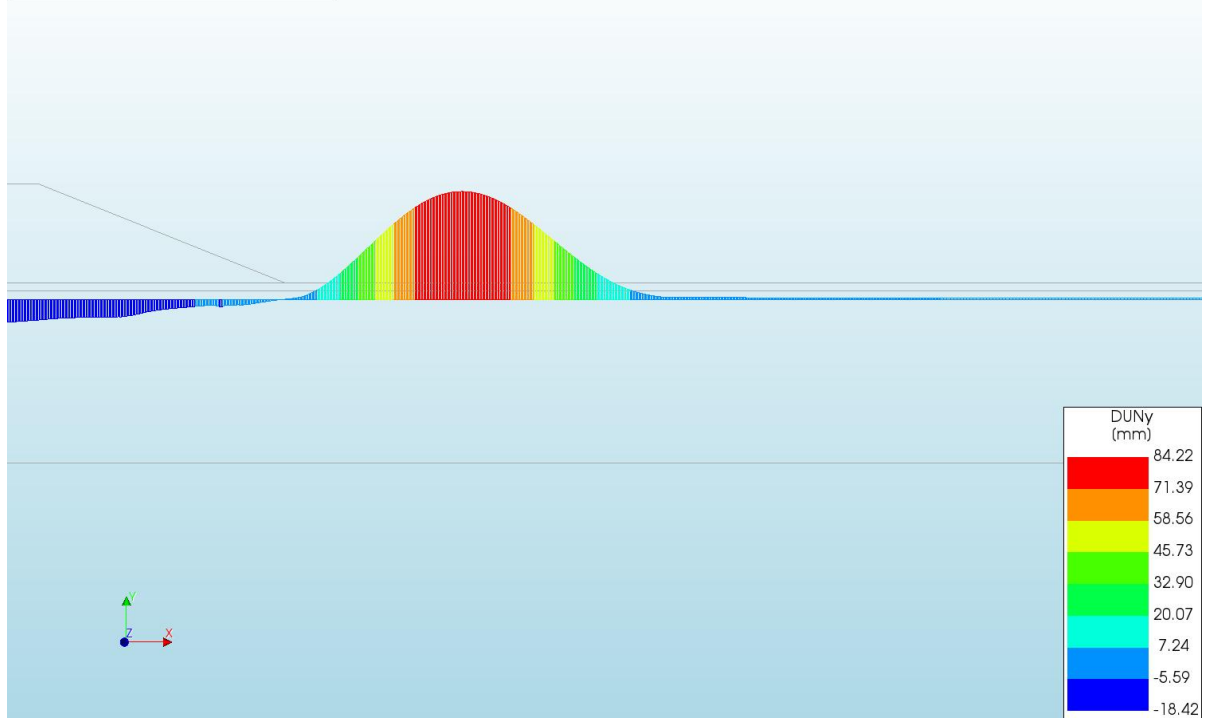
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.39e-01



d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 191.55mm



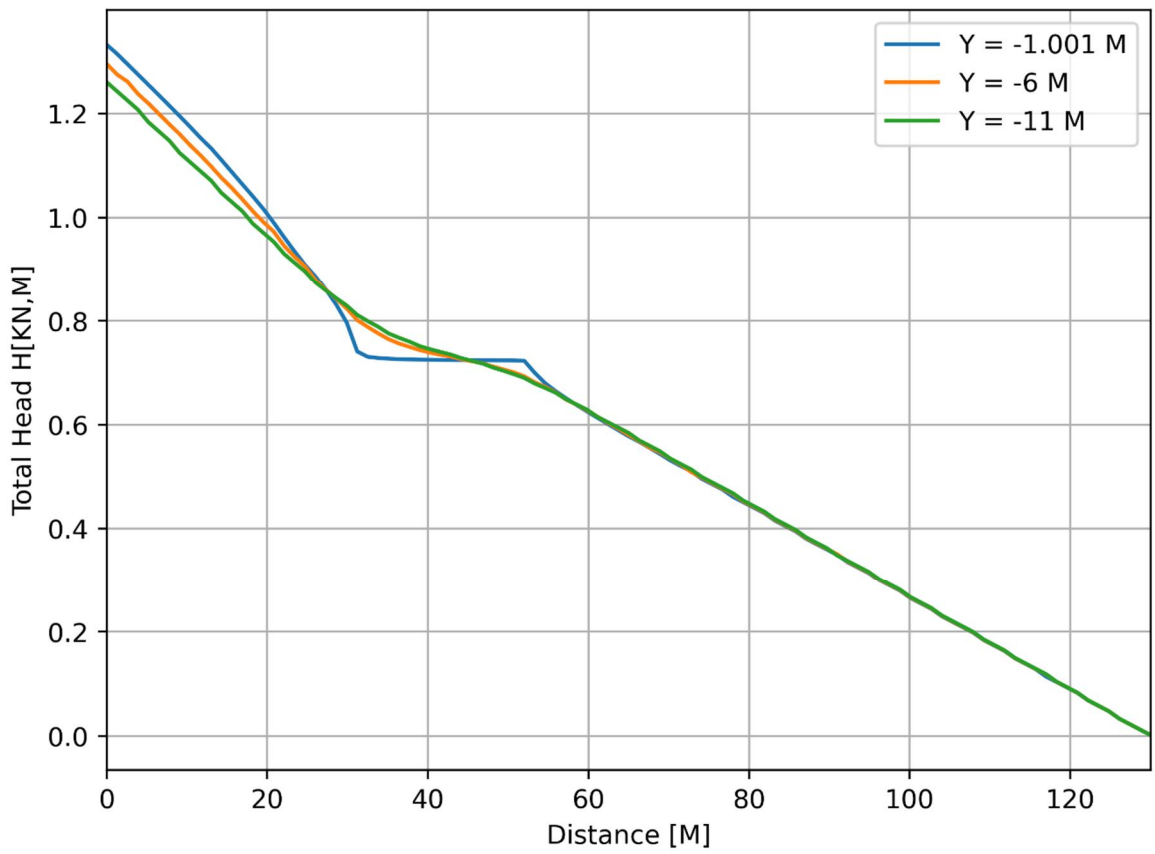
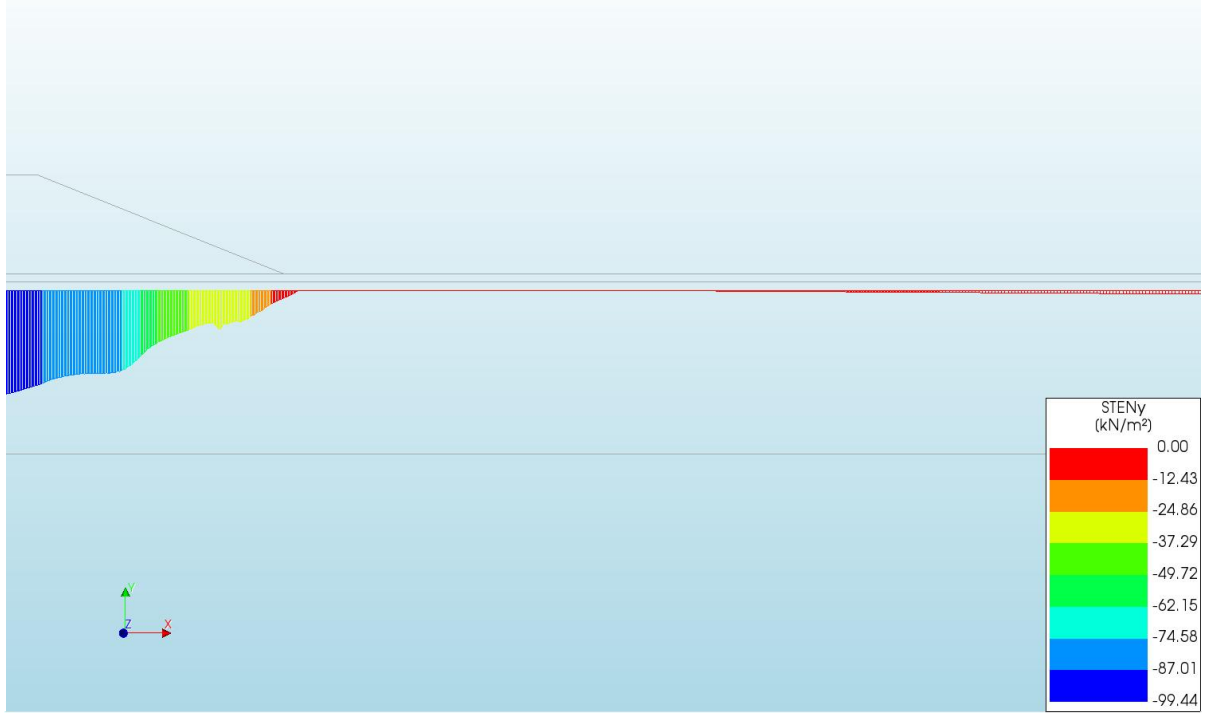
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -18.42mm max: 84.22mm

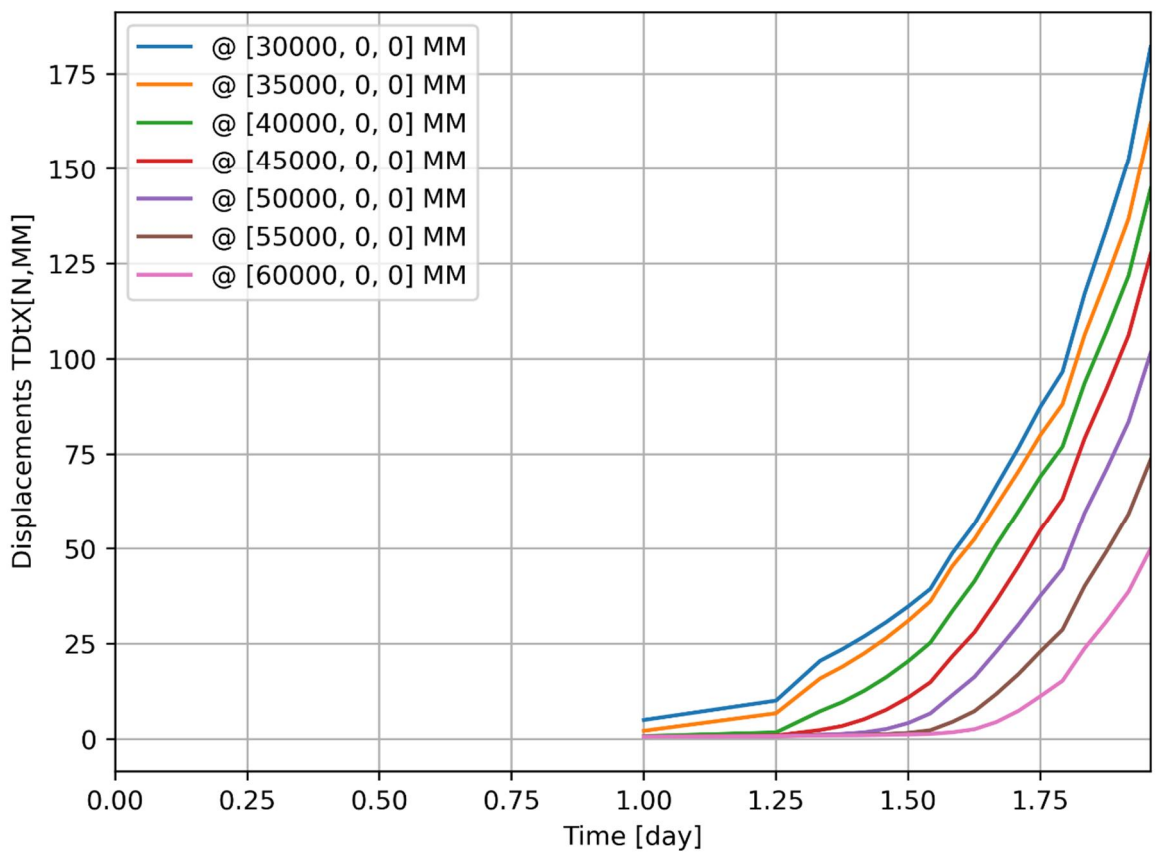
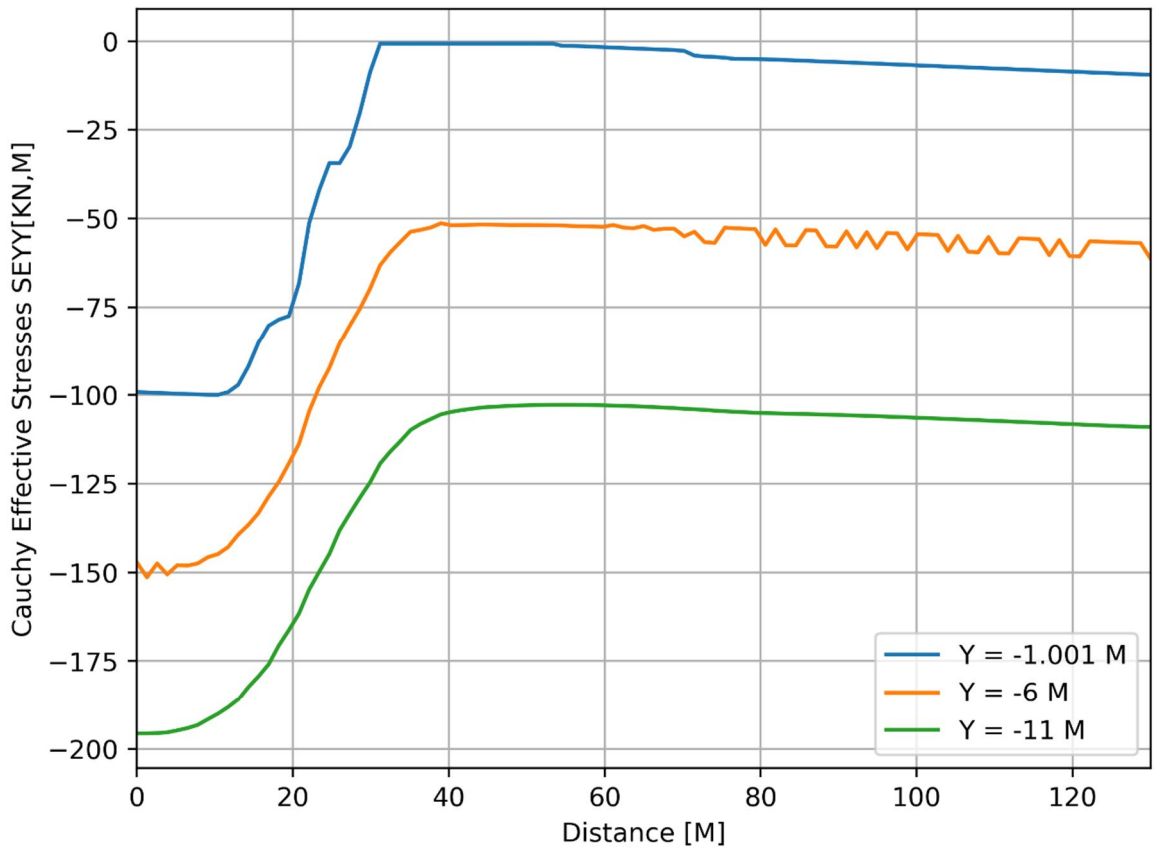


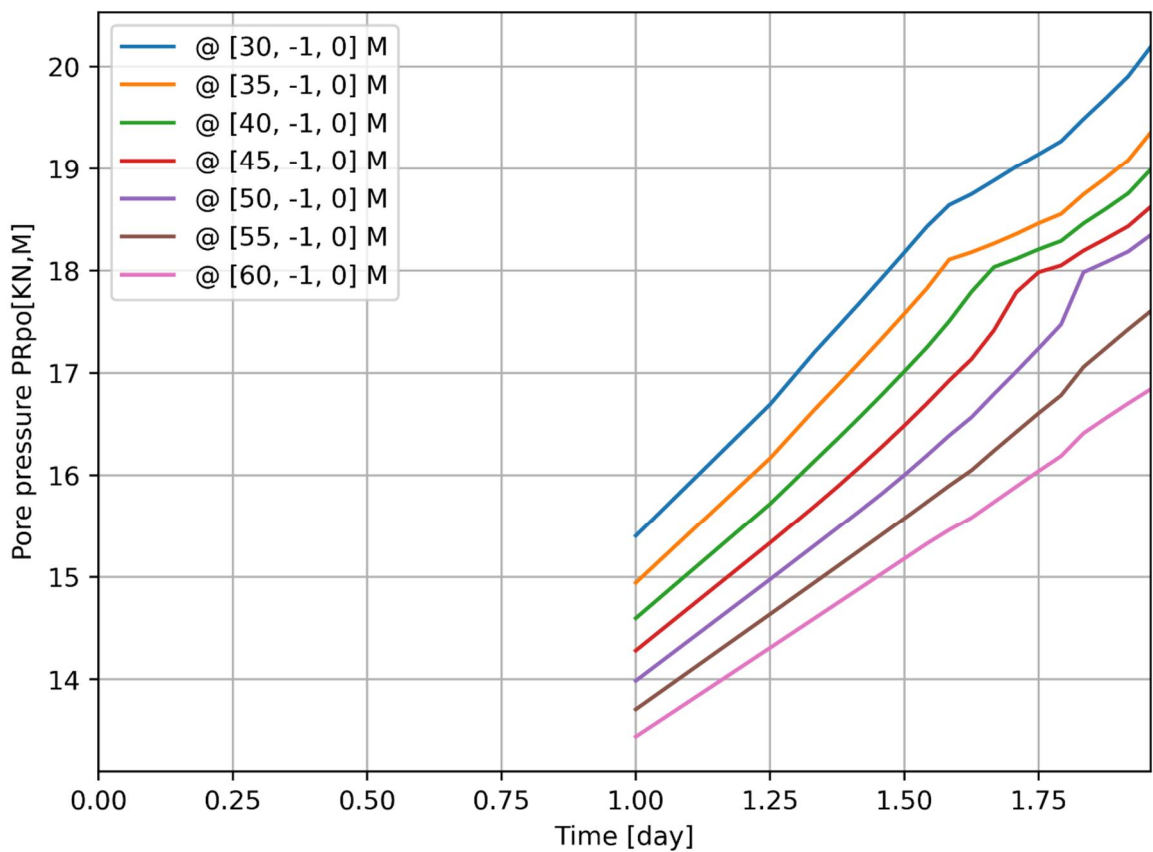
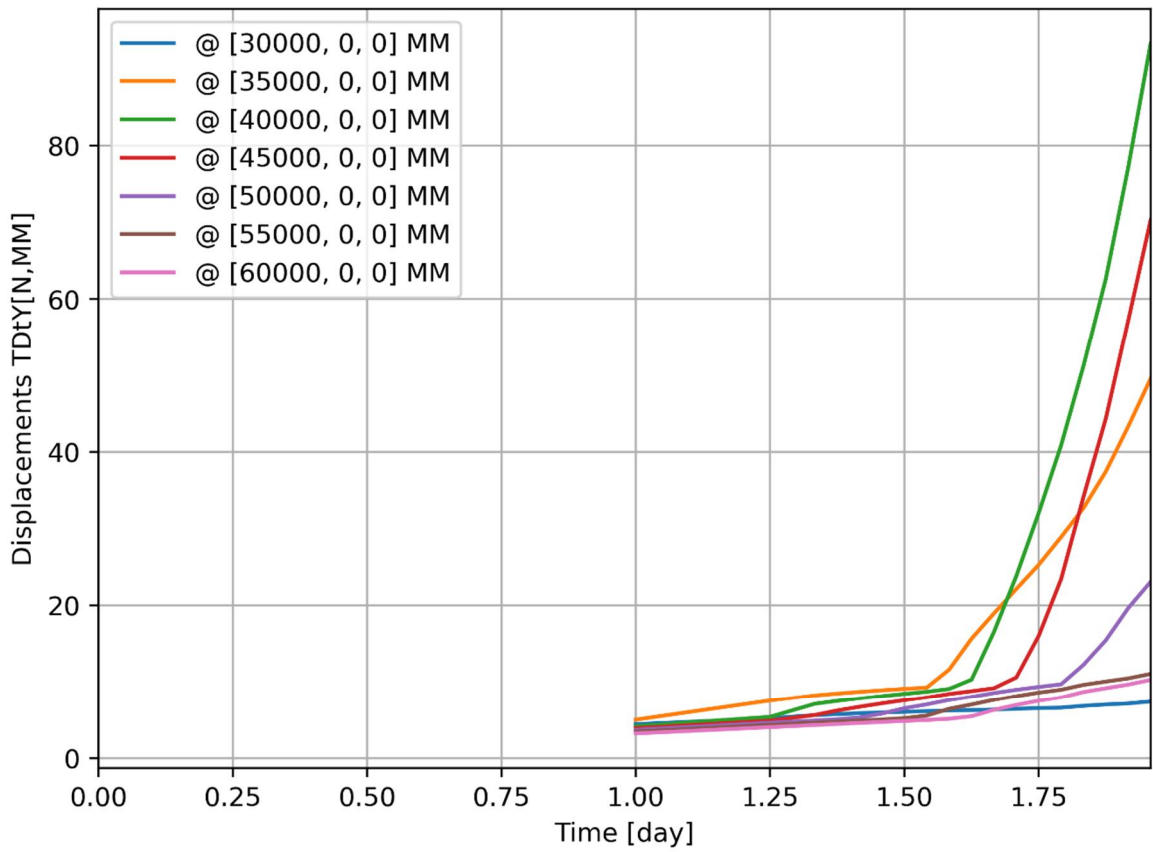
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.03kN/m<sup>2</sup> max: 22.61kN/m<sup>2</sup>

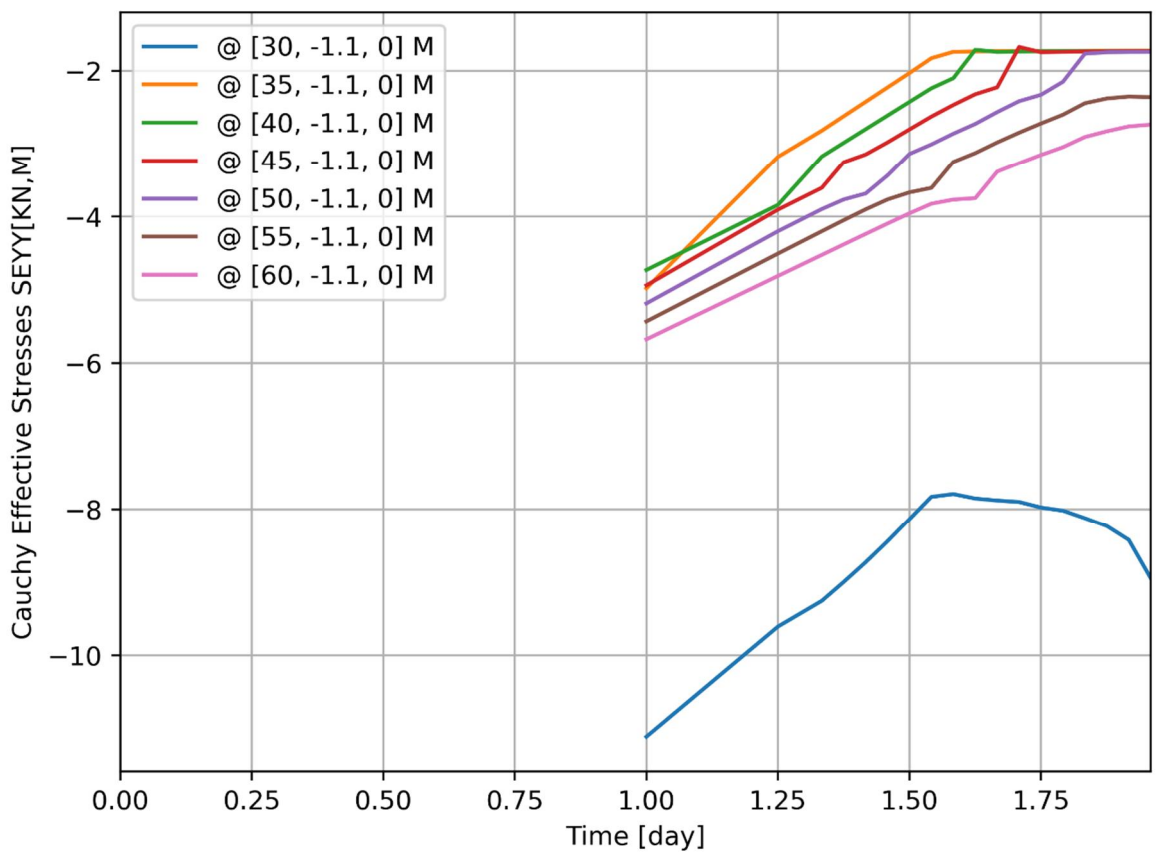
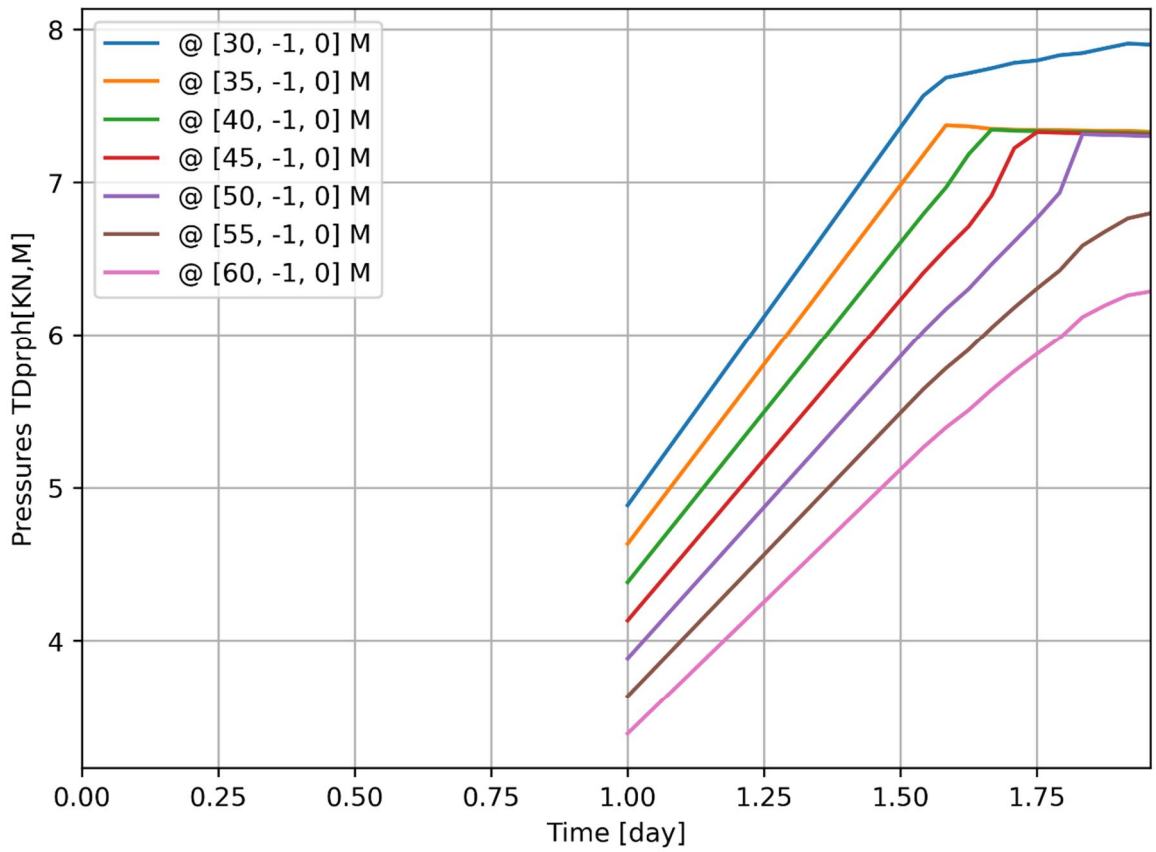


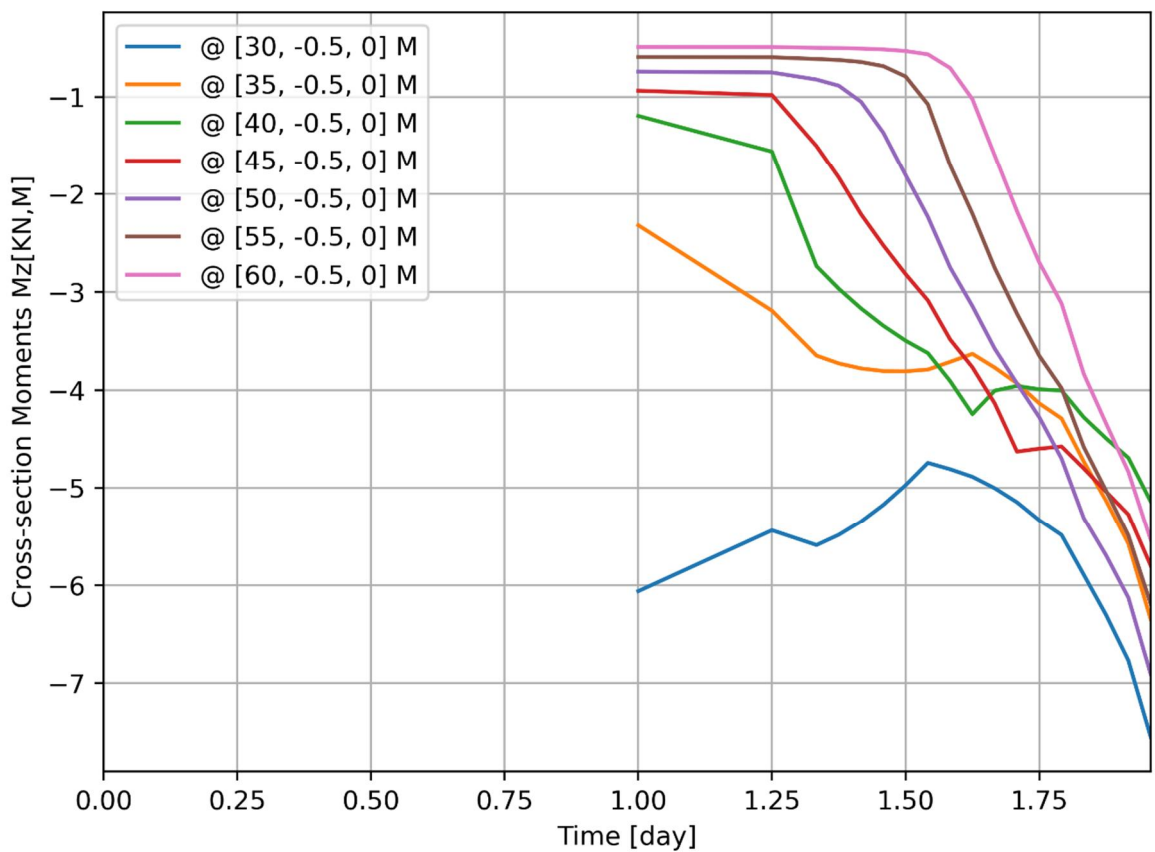
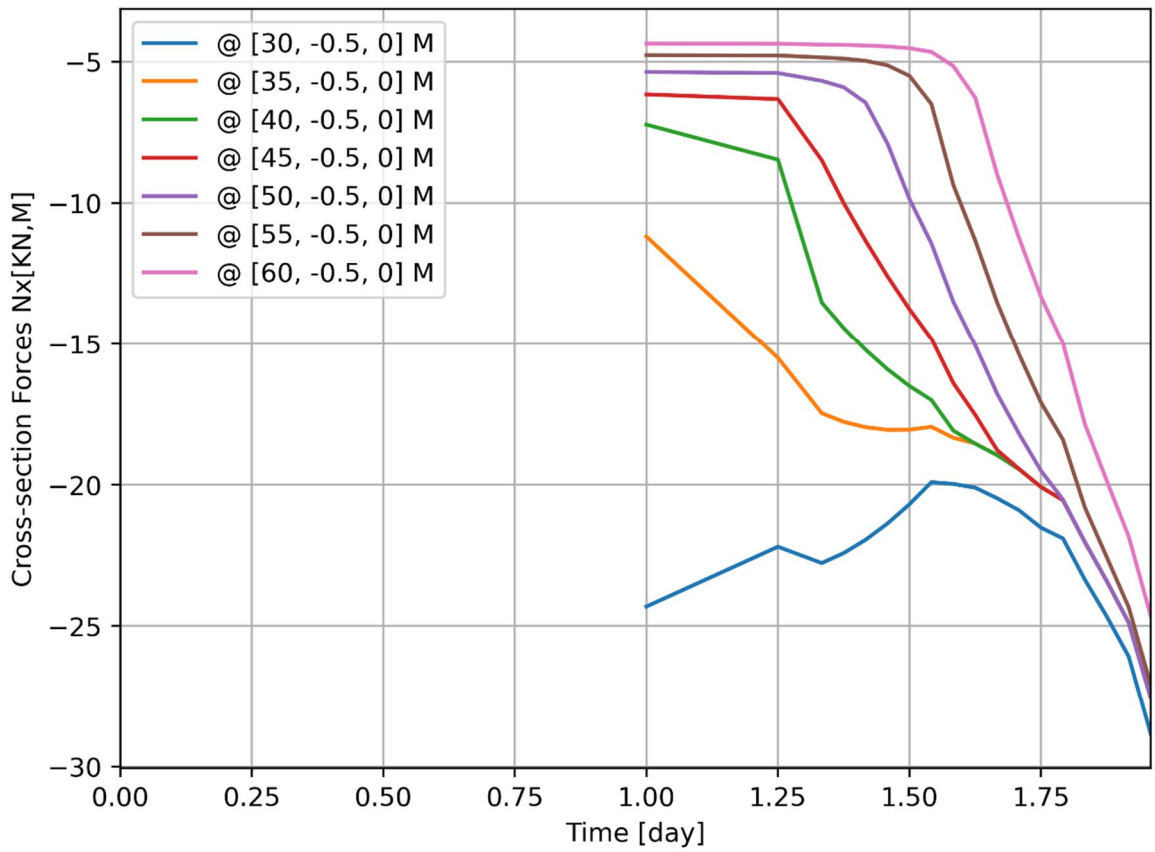
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
 Phase 2, Time-step 24, Time 1 day 23 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -99.44kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







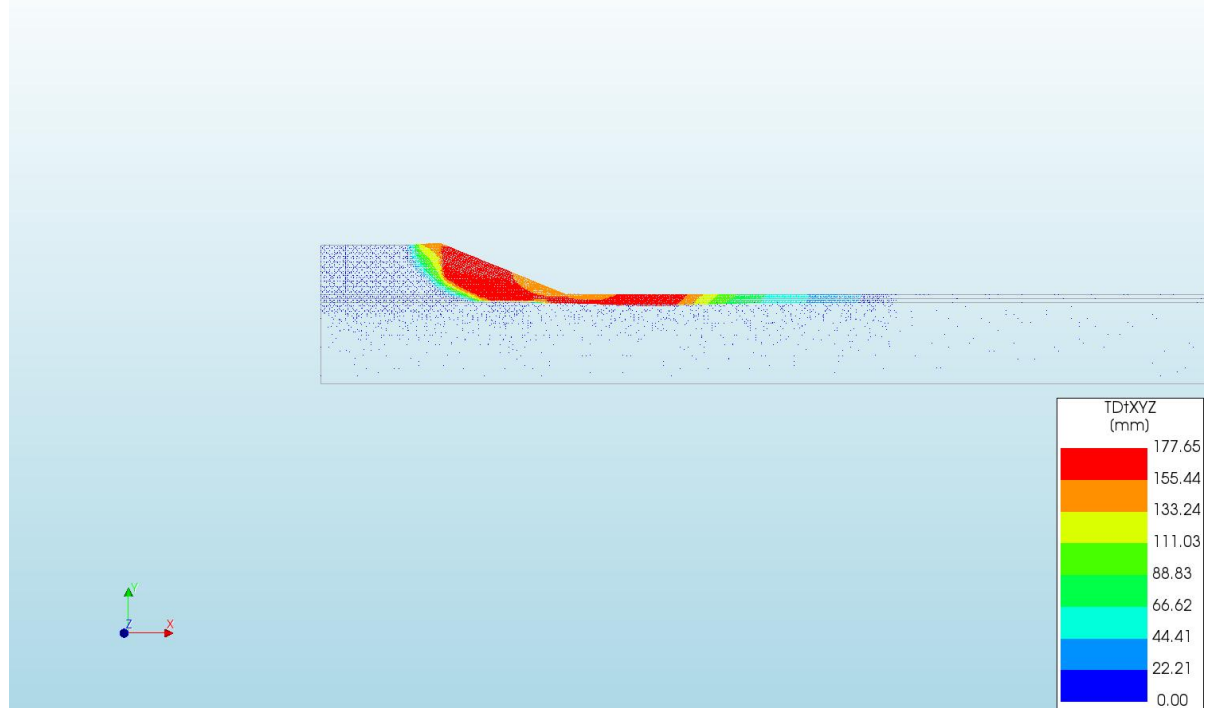




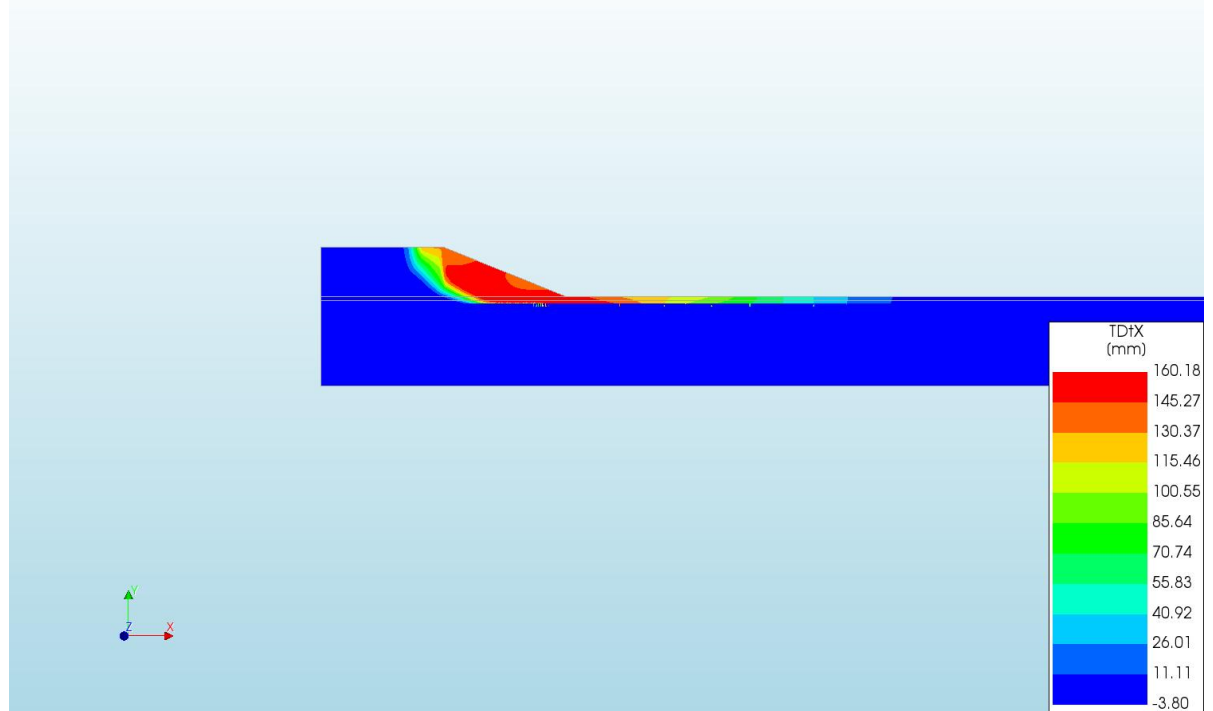
A.3.3

Output d=1 c=14 E=3 k=1e-07 tc=5\_20200927

d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Displacements TDtXYZ  
min: 0.00mm max: 177.65mm

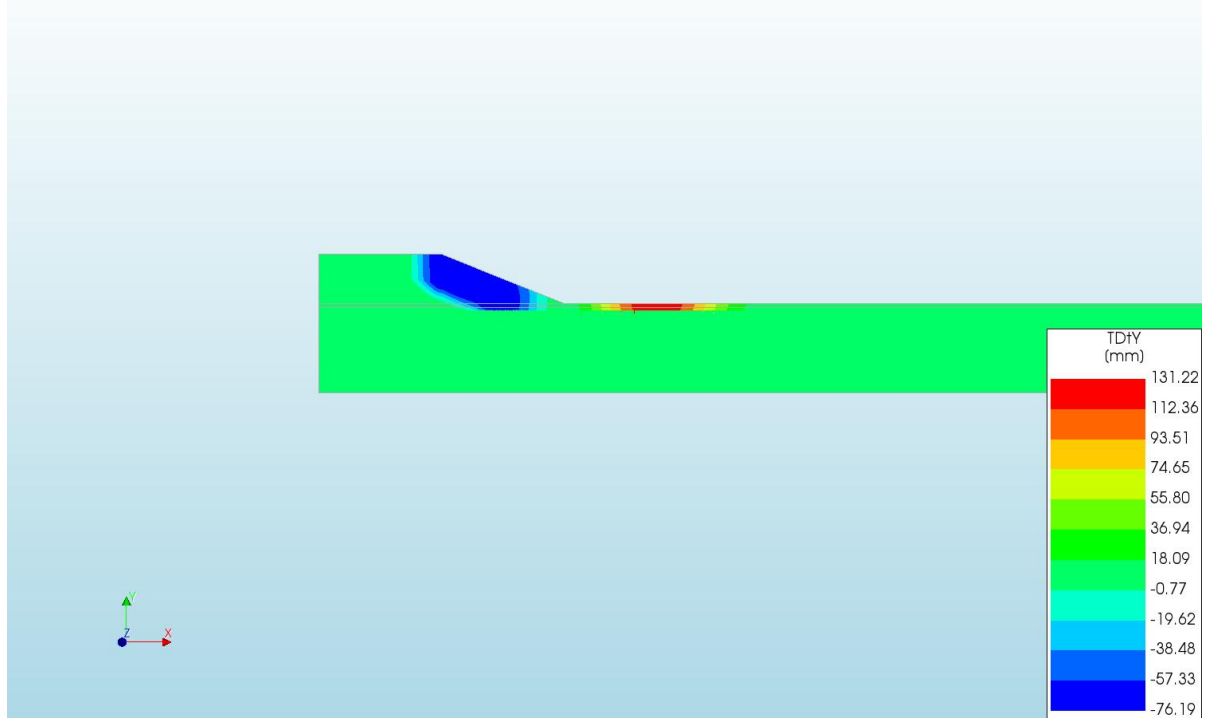


d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Displacements TDtX  
min: -3.80mm max: 160.18mm





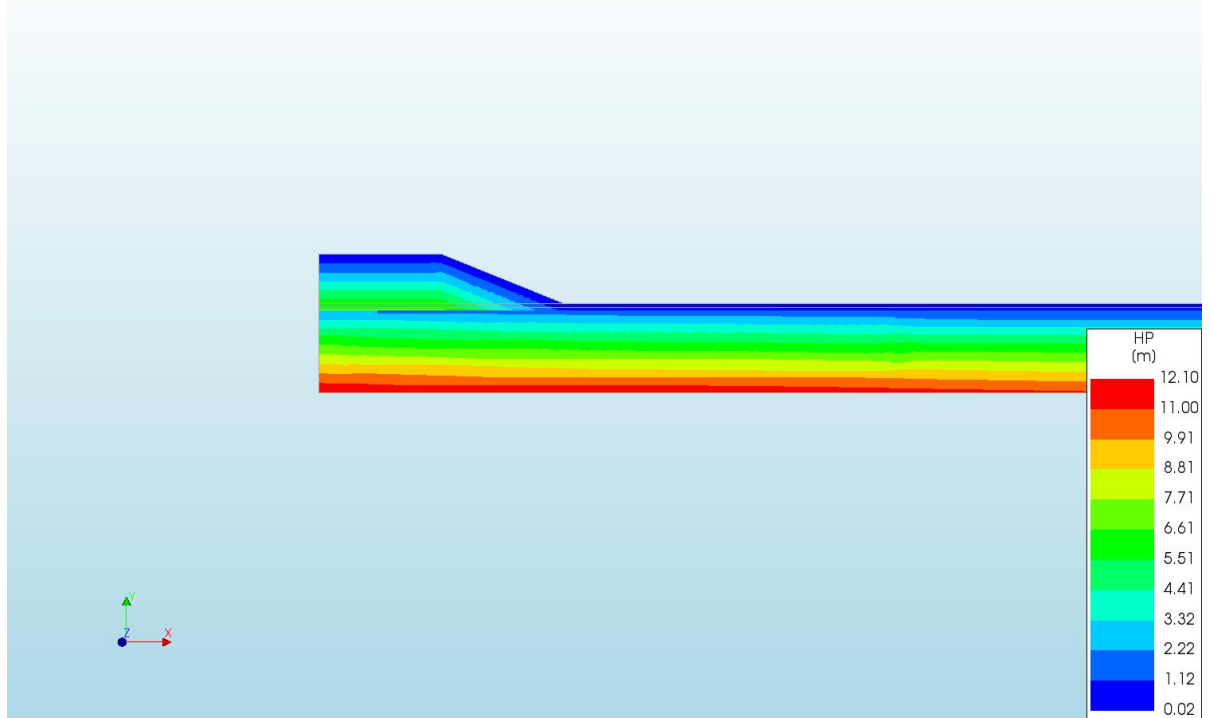
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Displacements TDfY  
min: -76.19mm max: 131.22mm



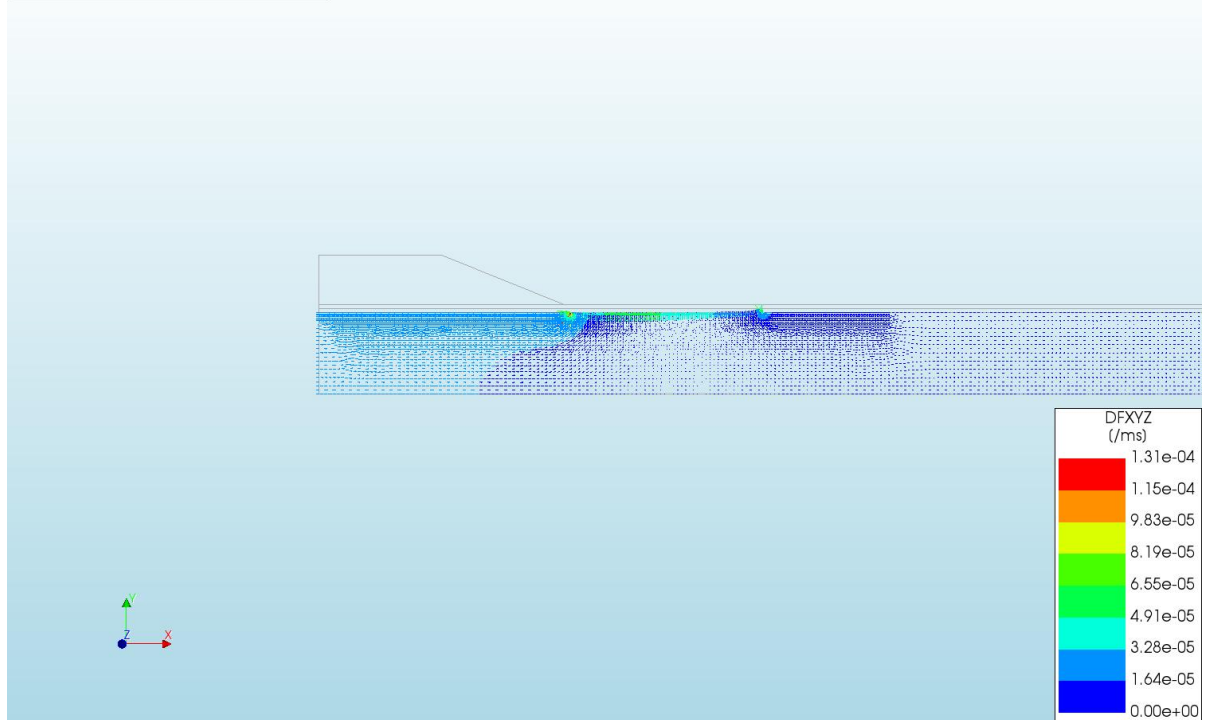
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 13.16kN/m<sup>2</sup>



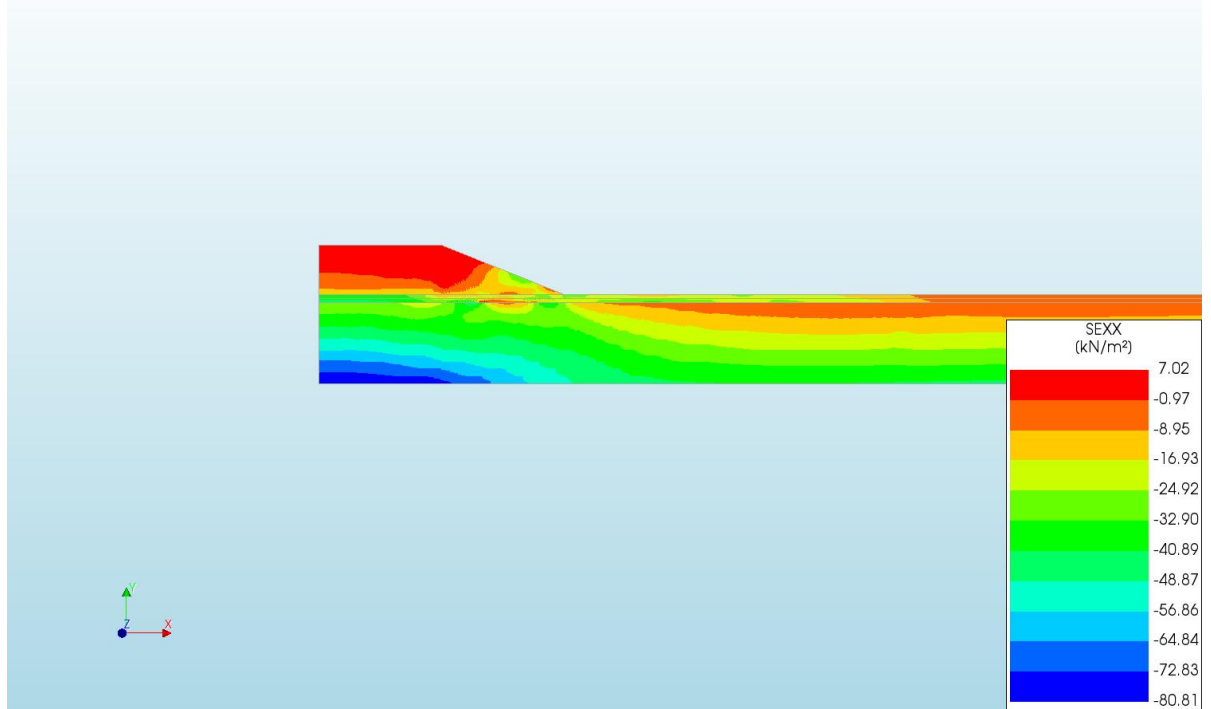
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 12.10m



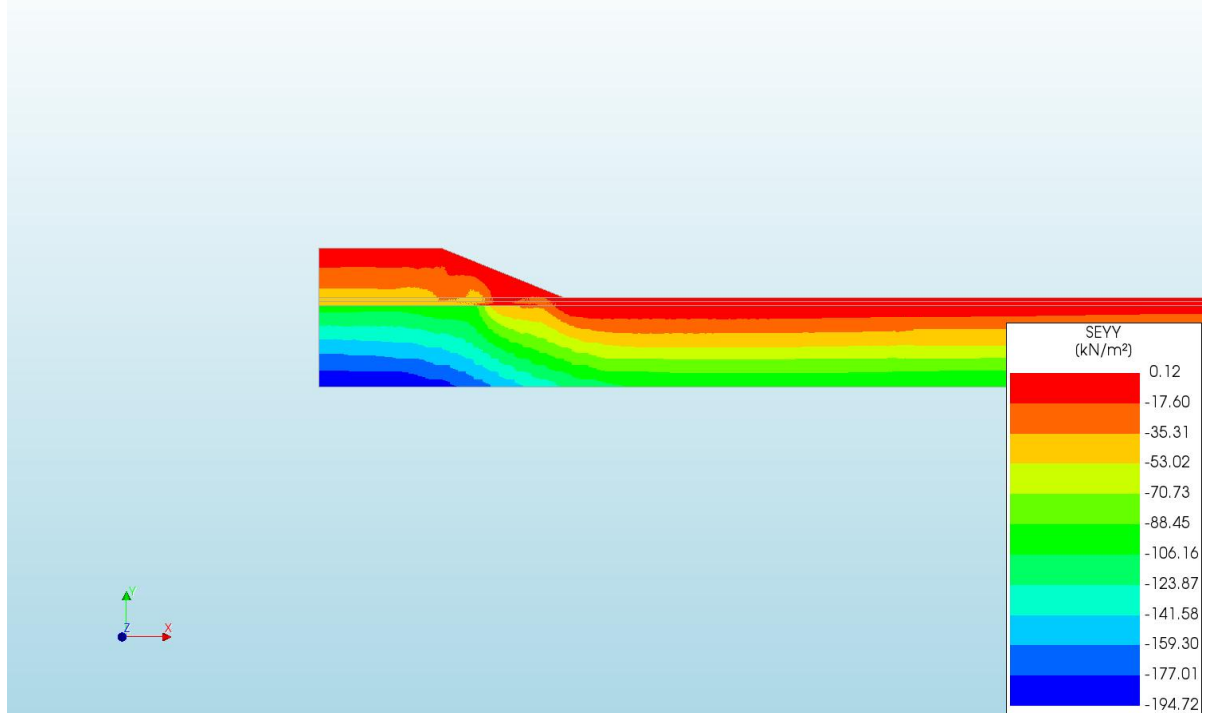
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.31e-04/ms



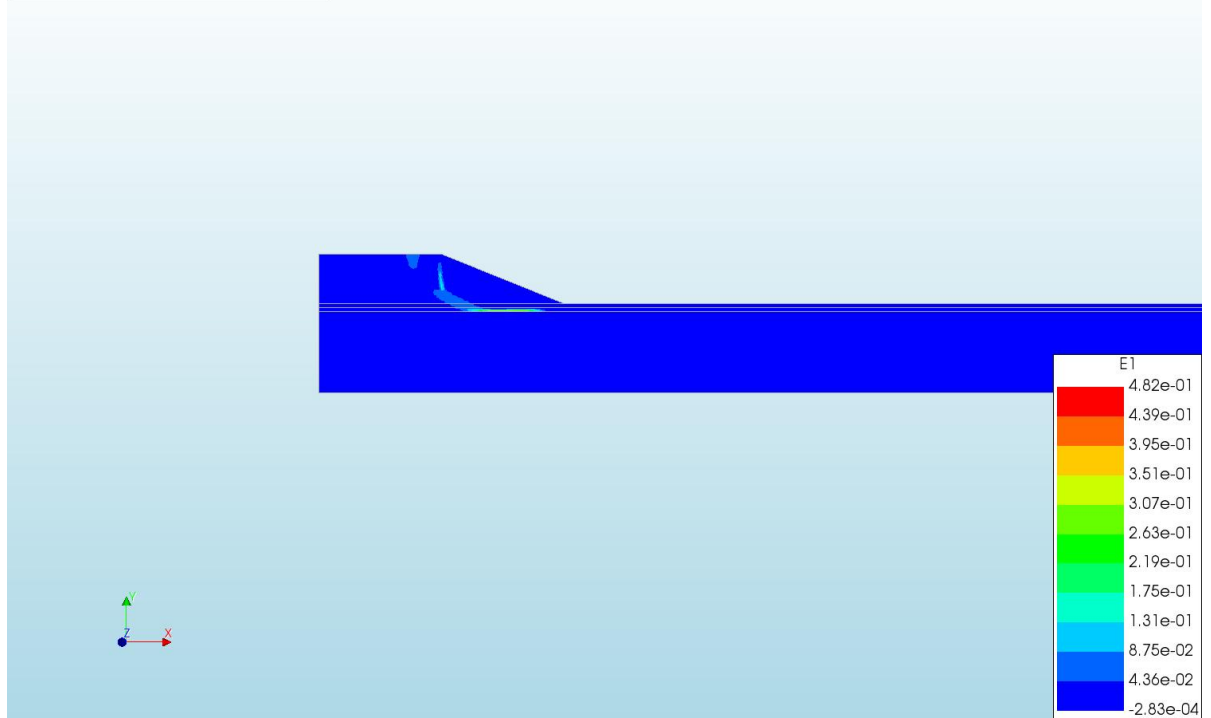
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Cauchy Effective Stresses S<sub>EXX</sub>  
min: -80.81kN/m<sup>2</sup> max: 7.02kN/m<sup>2</sup>



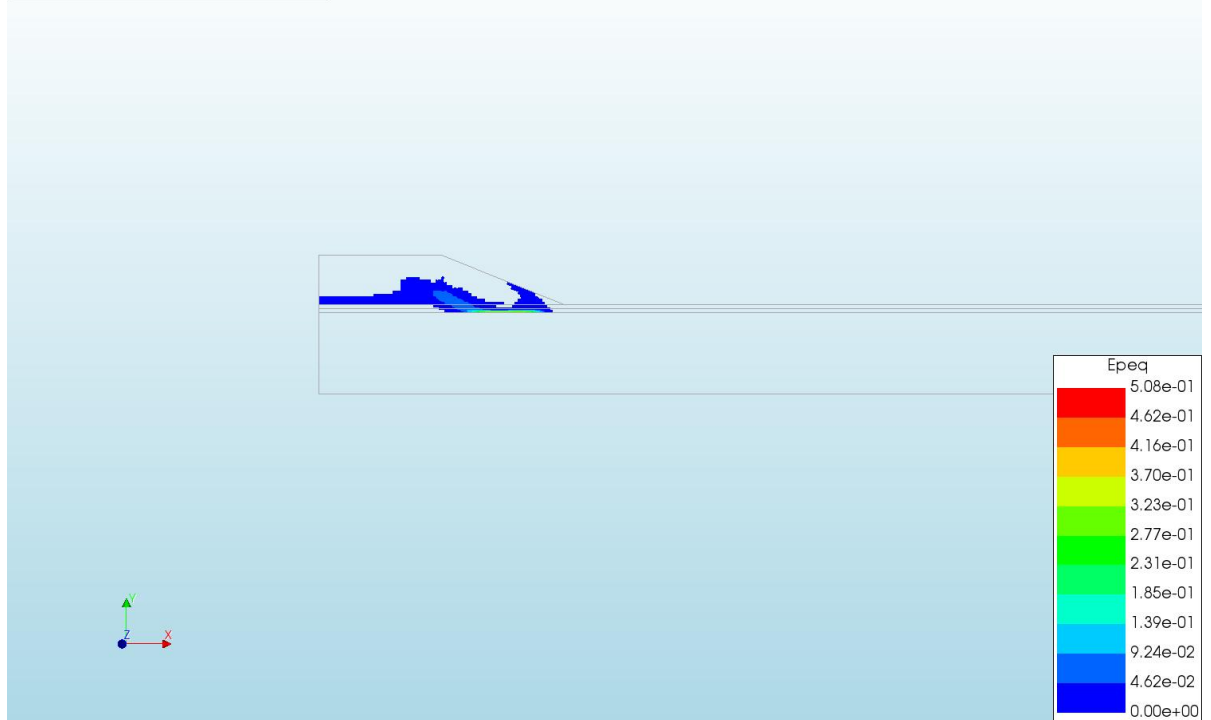
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Cauchy Effective Stresses S<sub>EYY</sub>  
min: -194.72kN/m<sup>2</sup> max: 0.12kN/m<sup>2</sup>



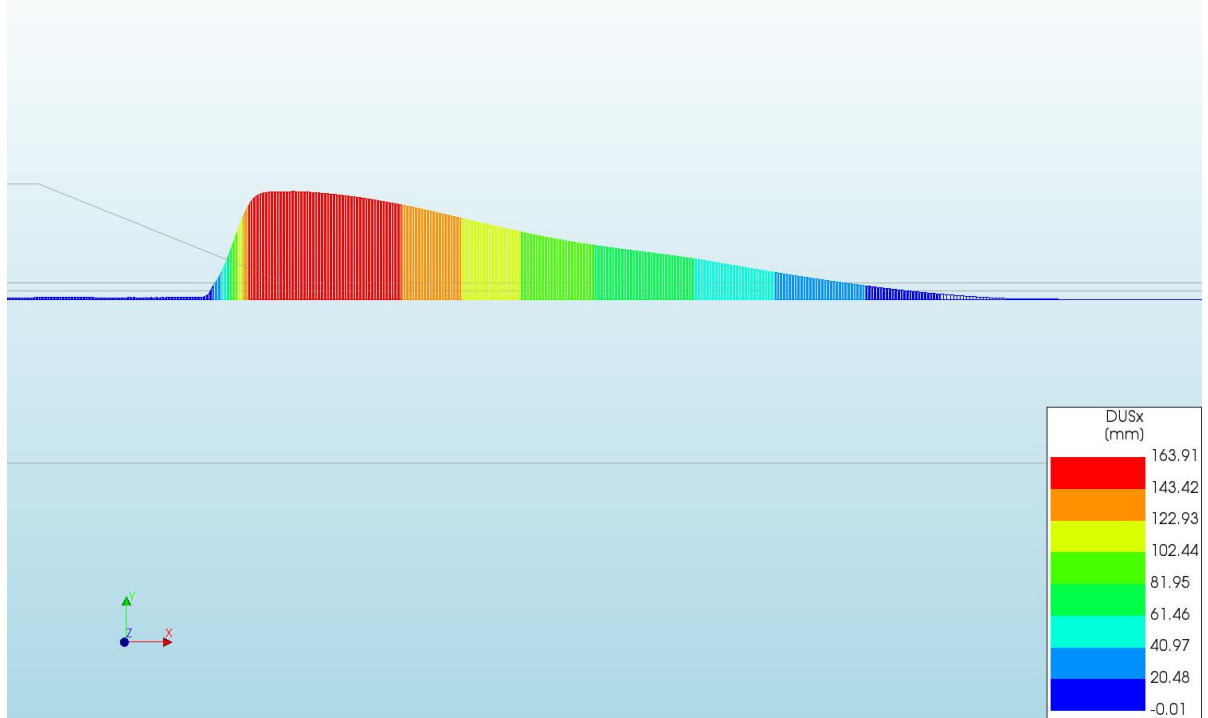
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Total Strains E1  
min: -2.83e-04 max: 4.82e-01



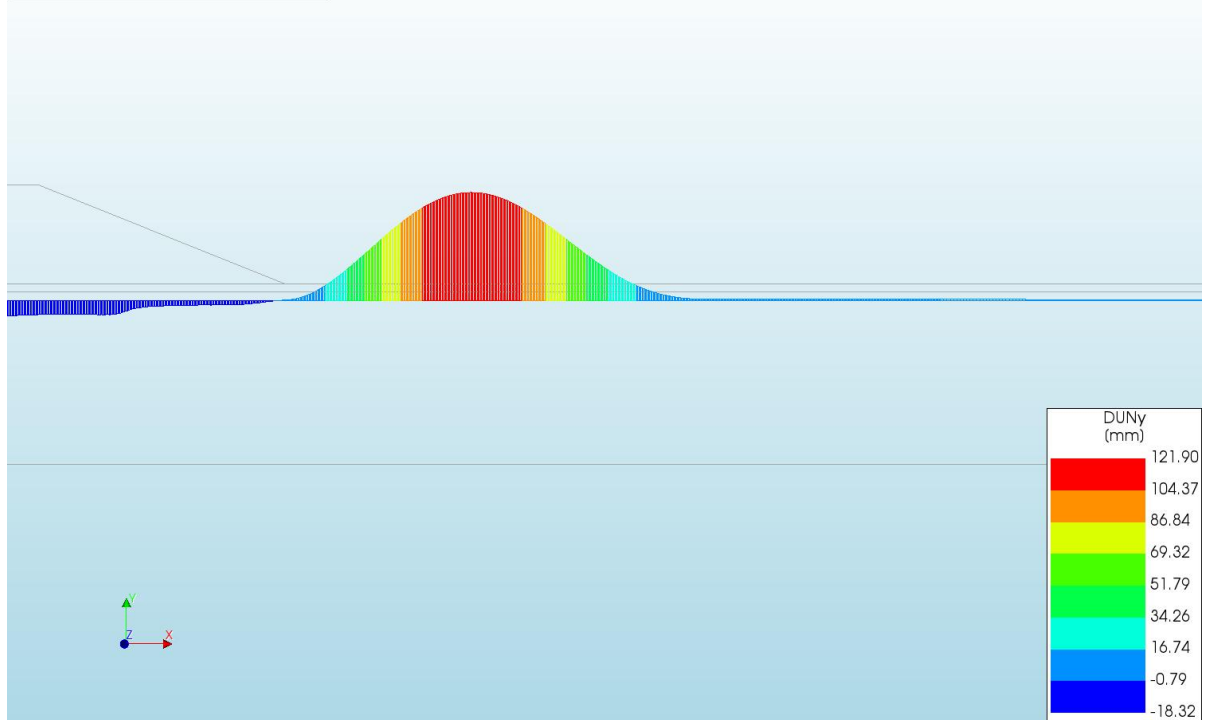
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.08e-01



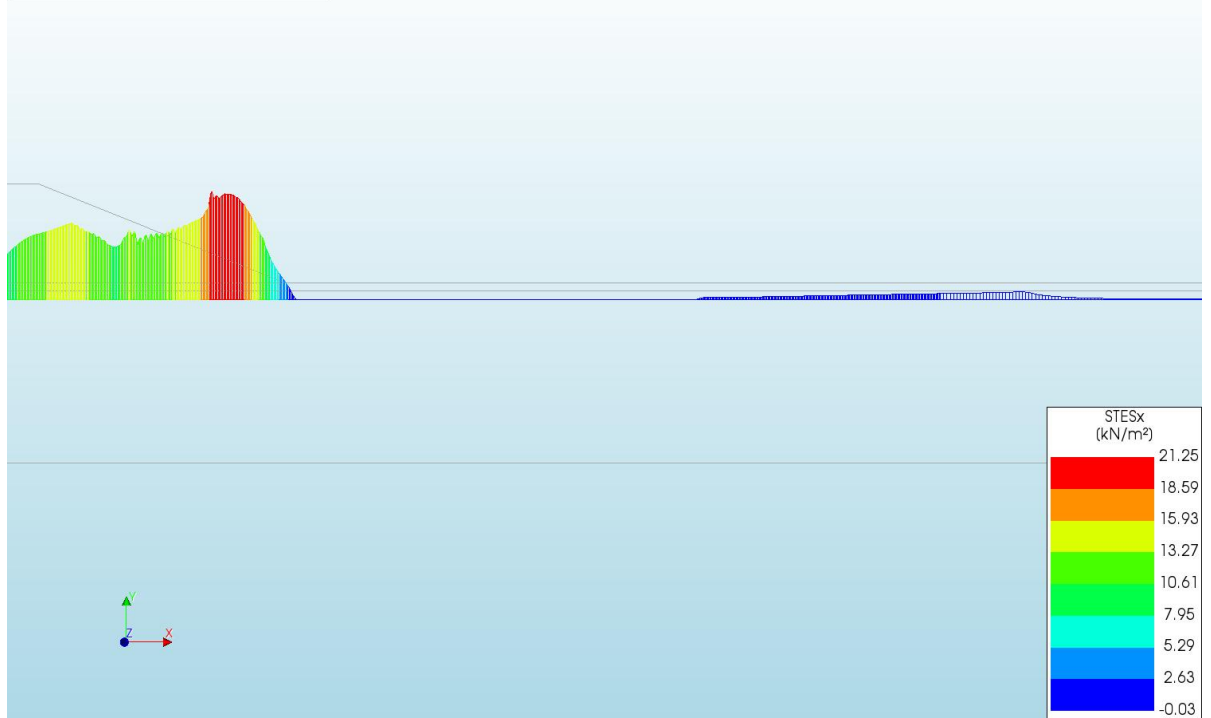
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.01mm max: 163.91mm



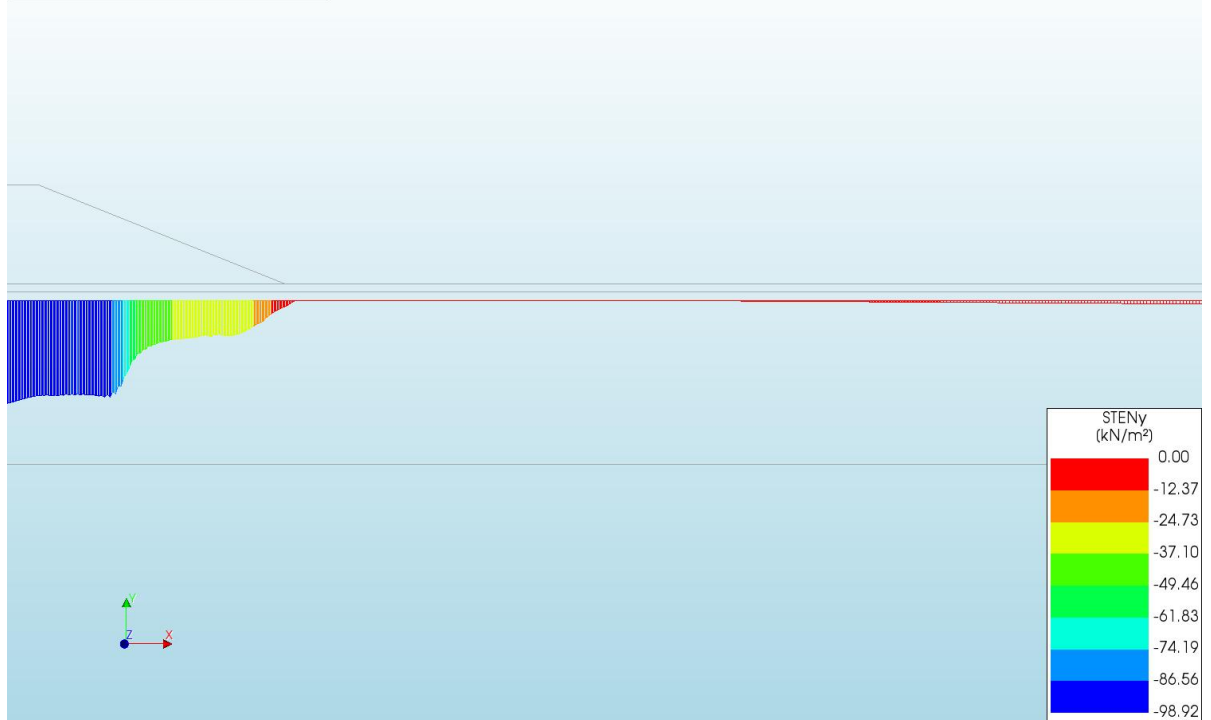
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -18.32mm max: 121.90mm

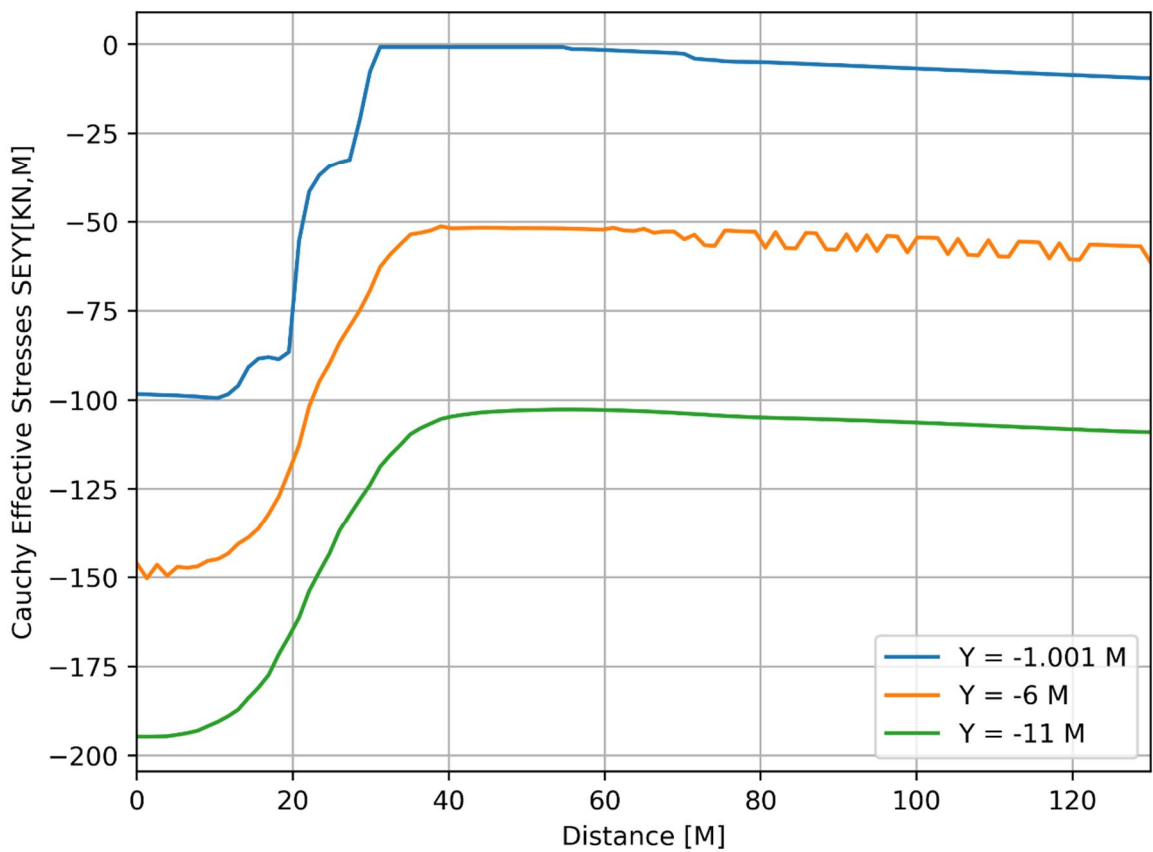
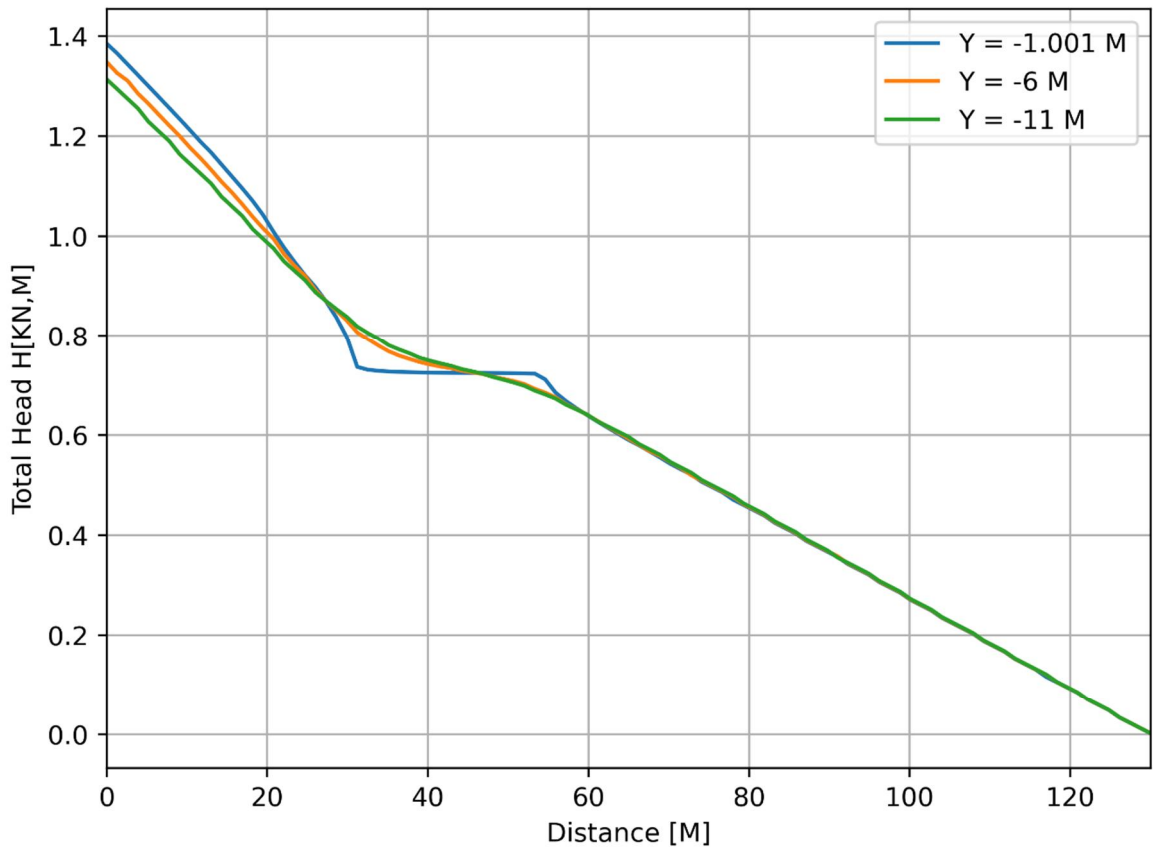


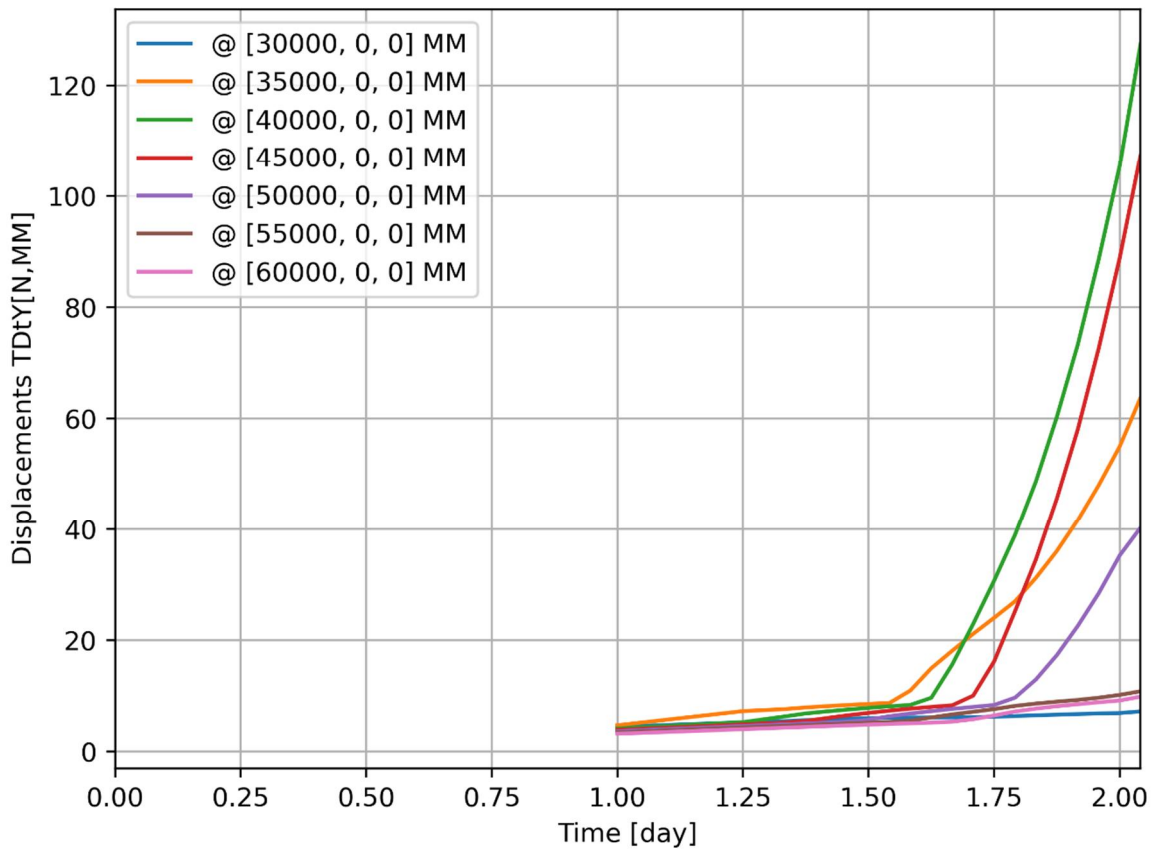
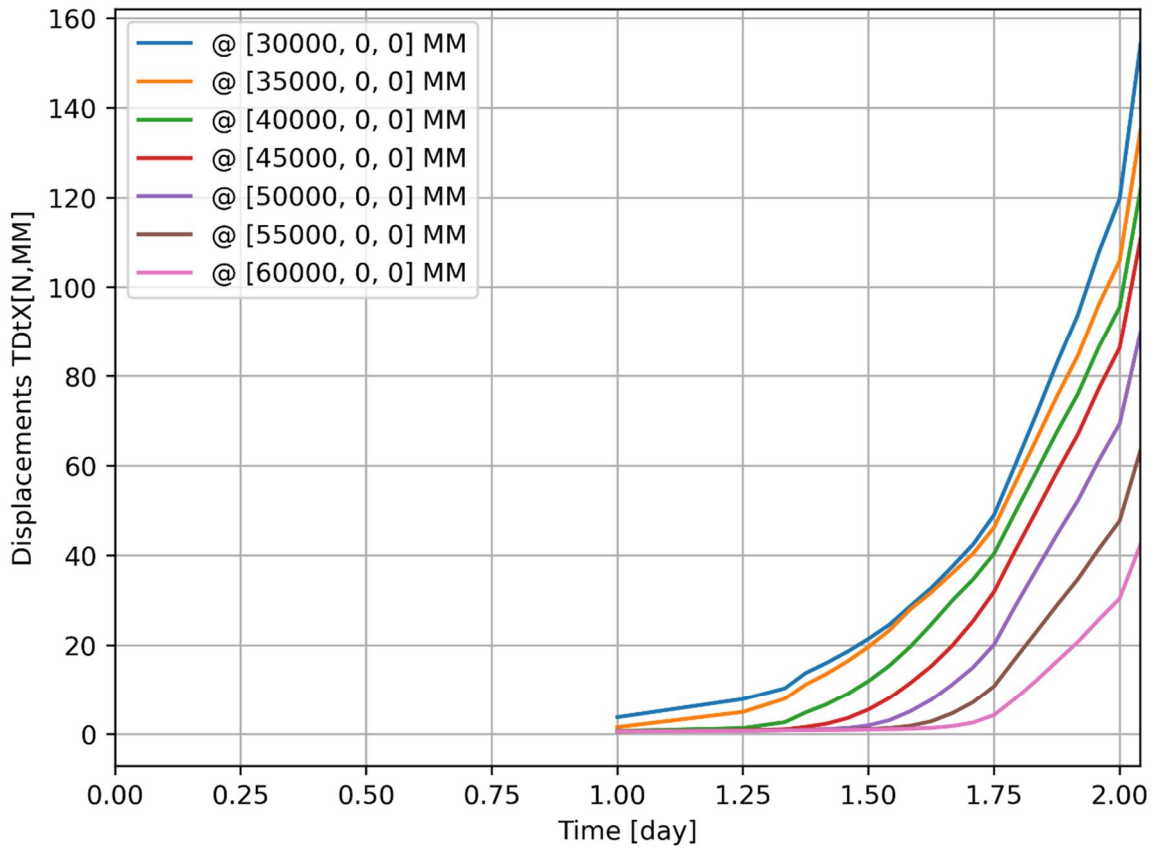
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.03kN/m<sup>2</sup> max: 21.25kN/m<sup>2</sup>



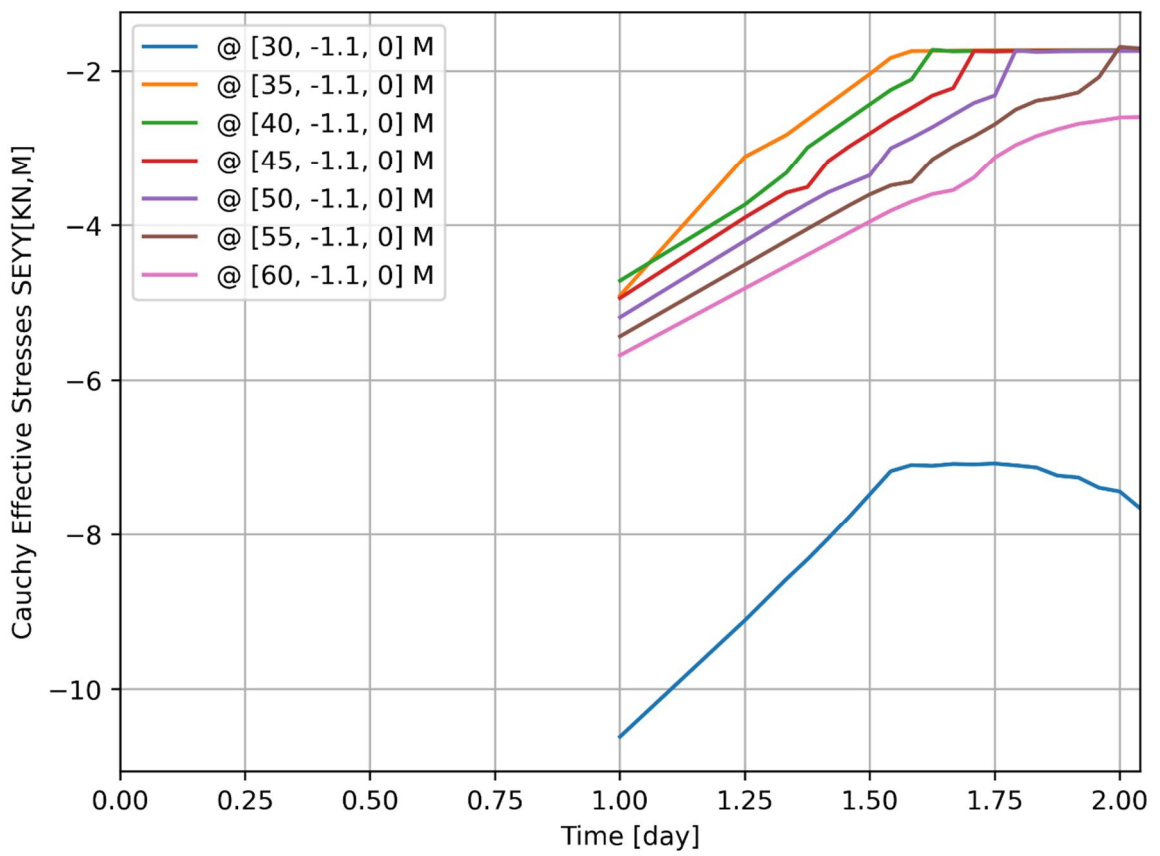
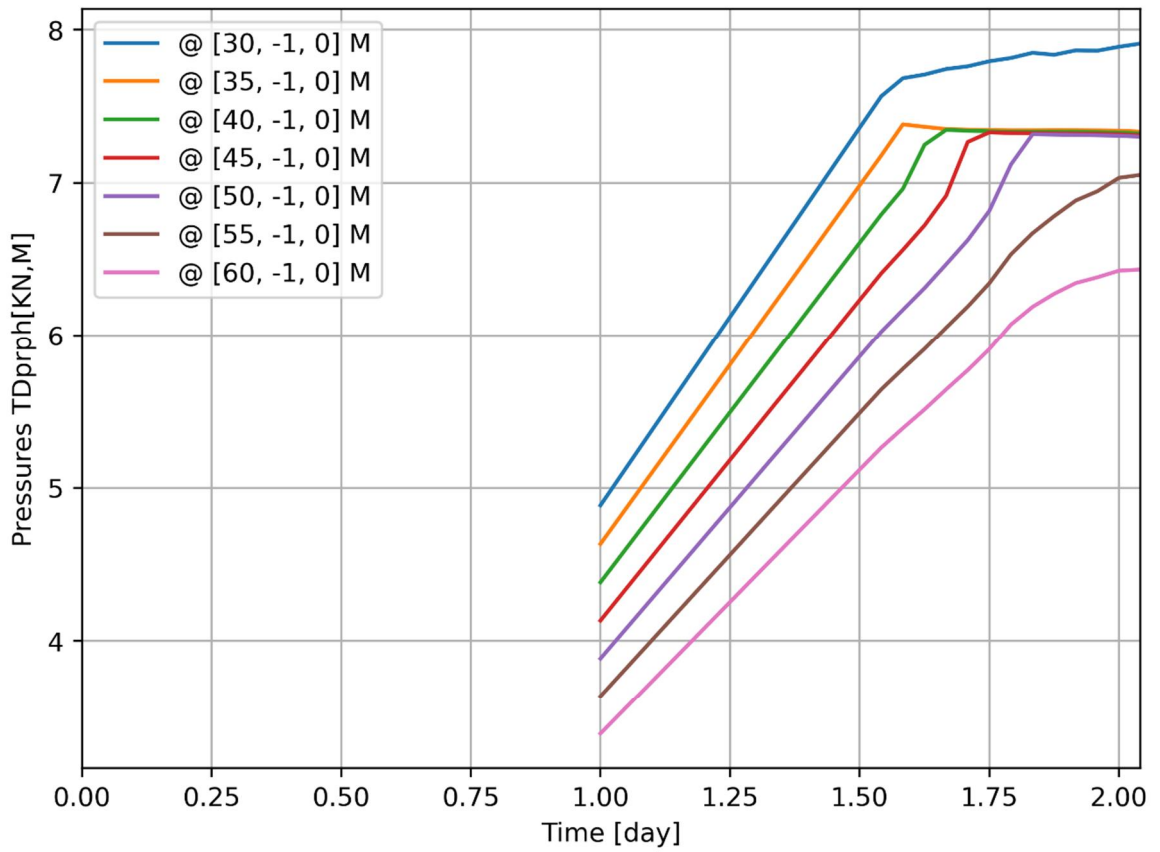
d=1\_c=14\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 26, Time 2 day 1 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -98.92kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

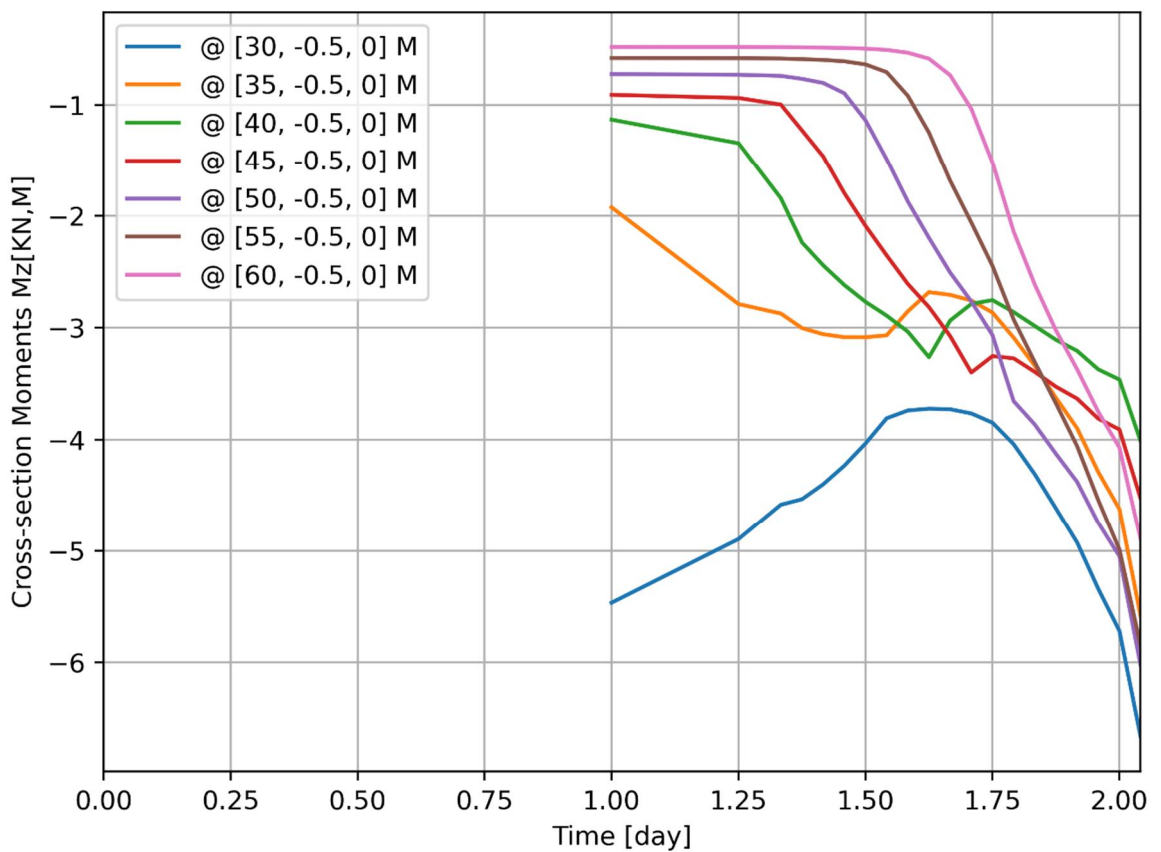
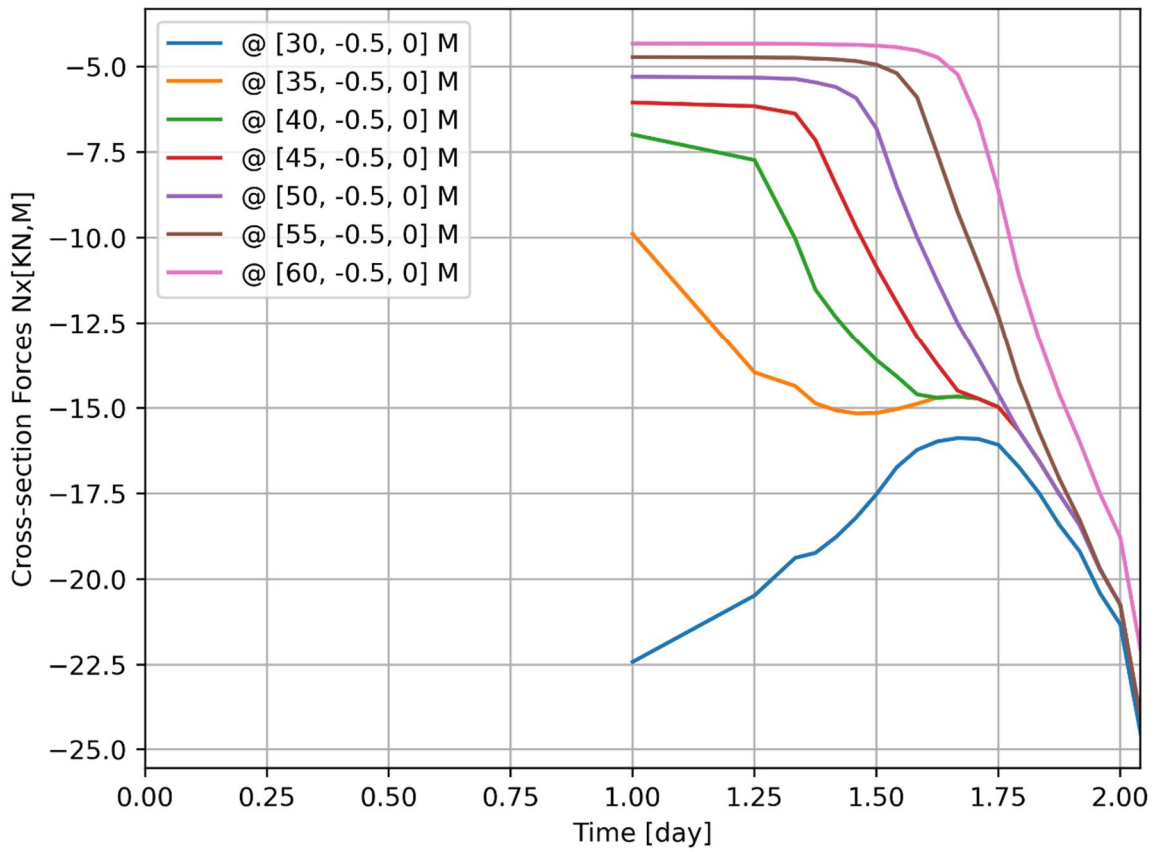








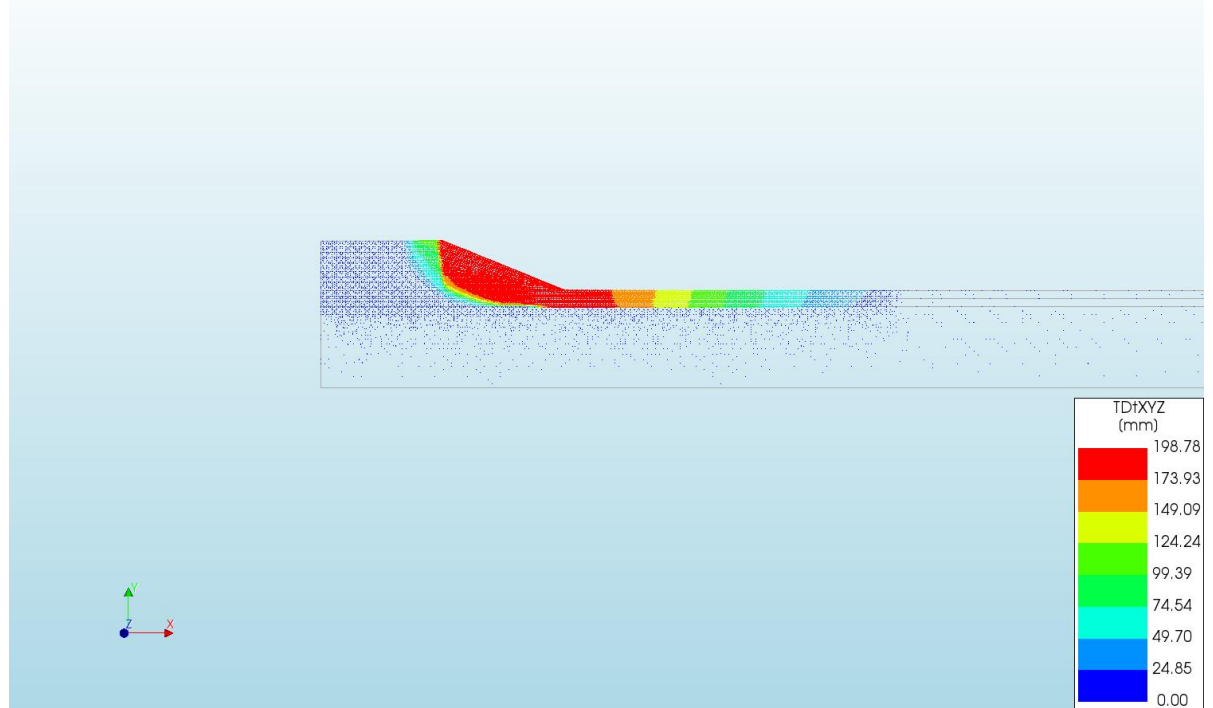




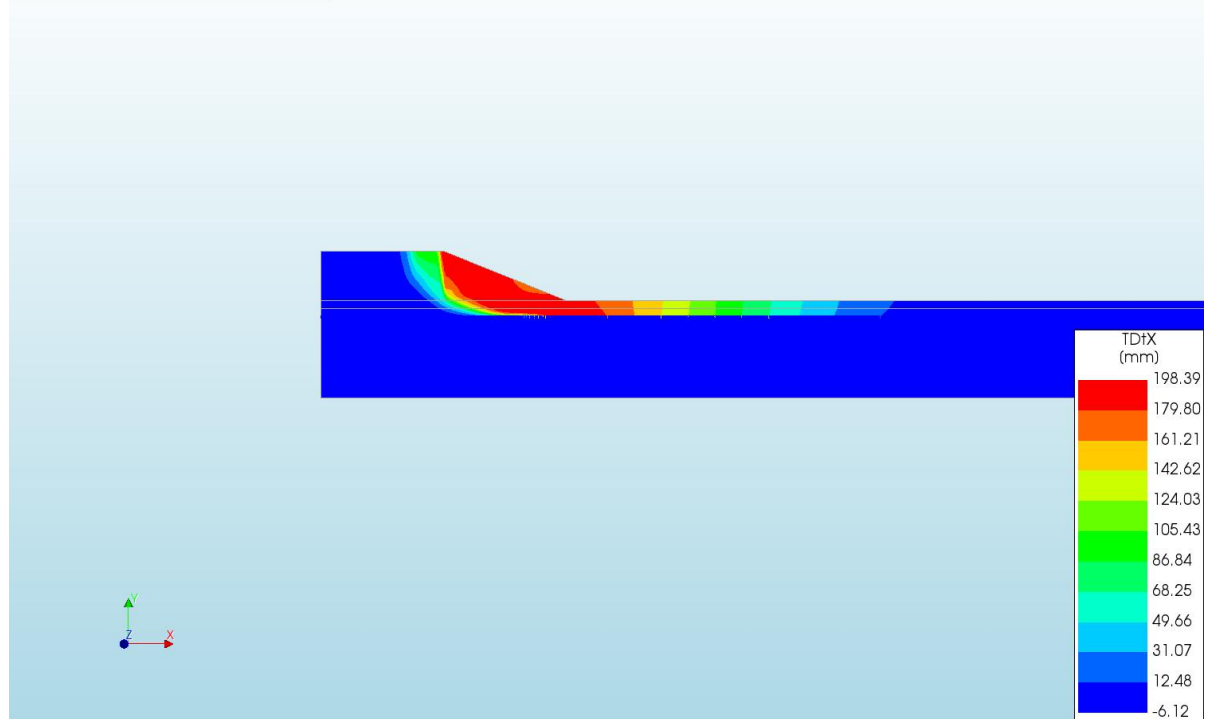
A.3.4

Output d=2 c=15 E=3 k=1e-07 tc=1\_20200927

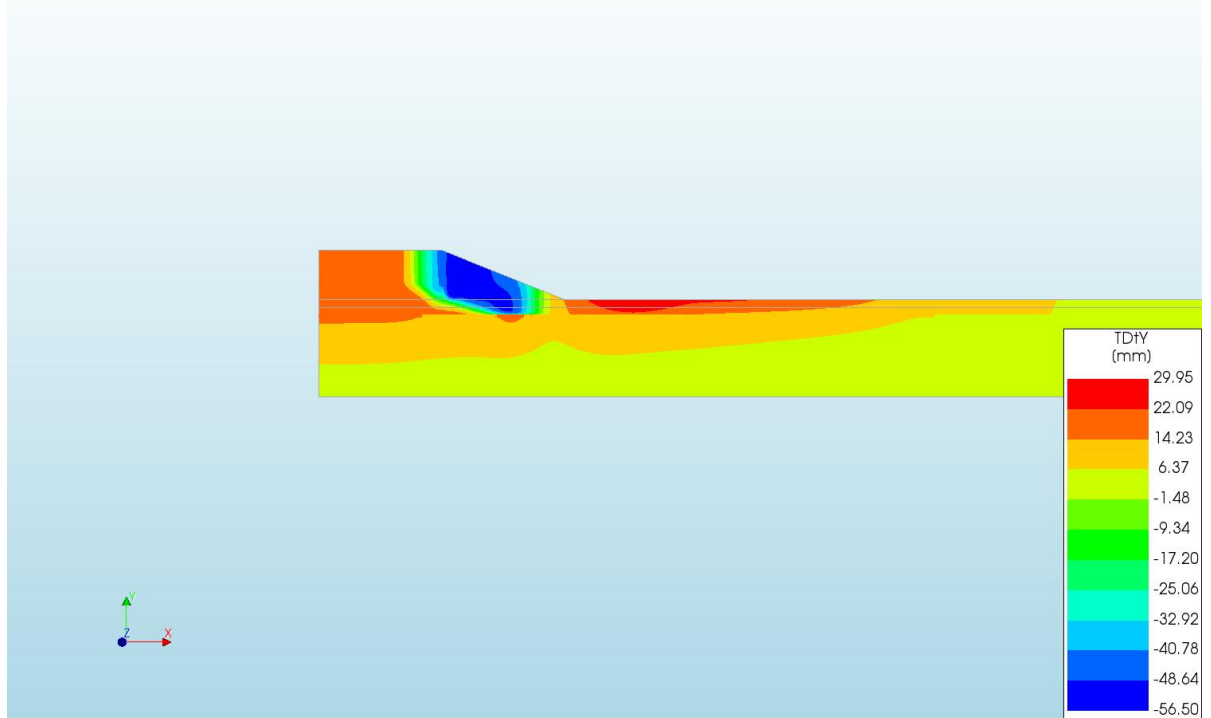
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Displacements TdXYZ  
min: 0.00mm max: 198.78mm



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Displacements TdX  
min: -6.12mm max: 198.39mm



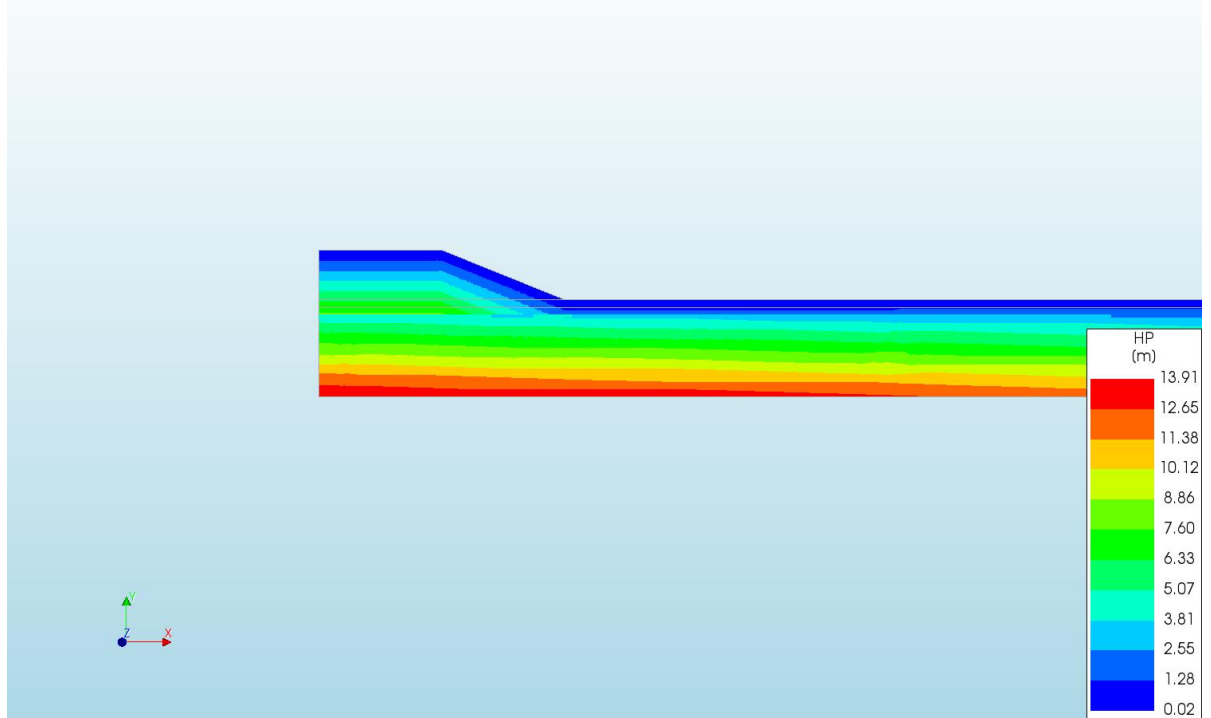
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Displacements TDfY  
min: -56.50mm max: 29.95mm



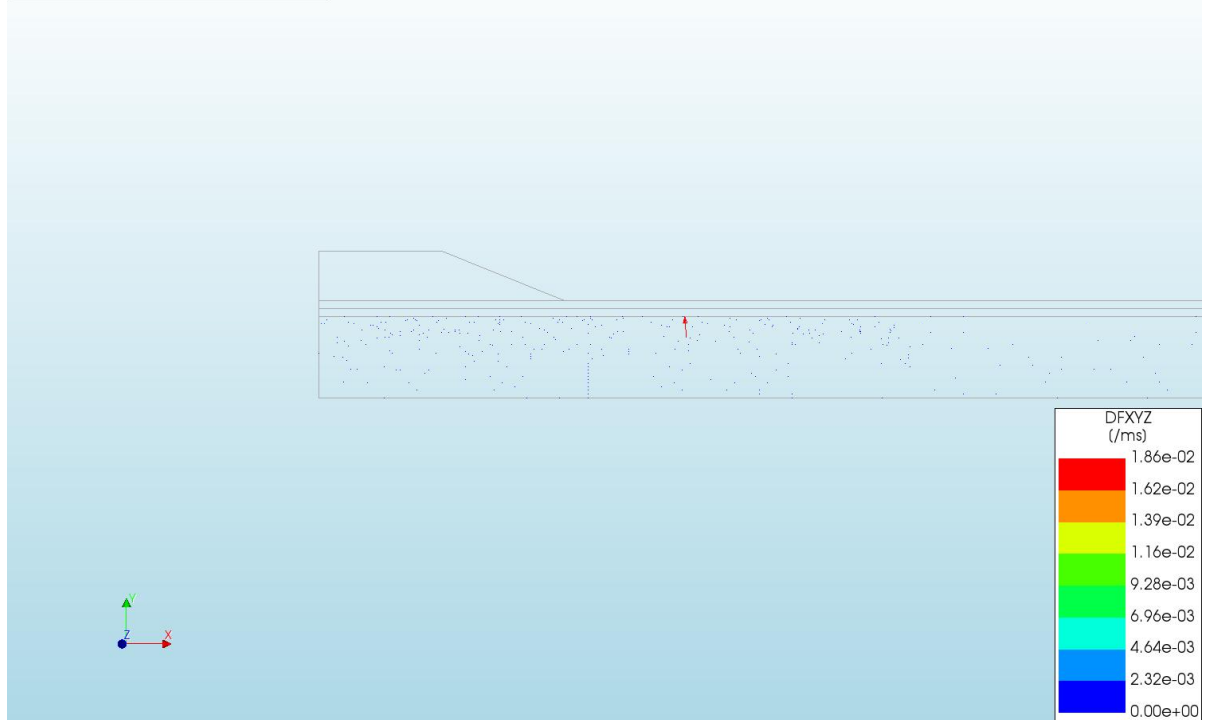
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 21.21kN/m<sup>2</sup>



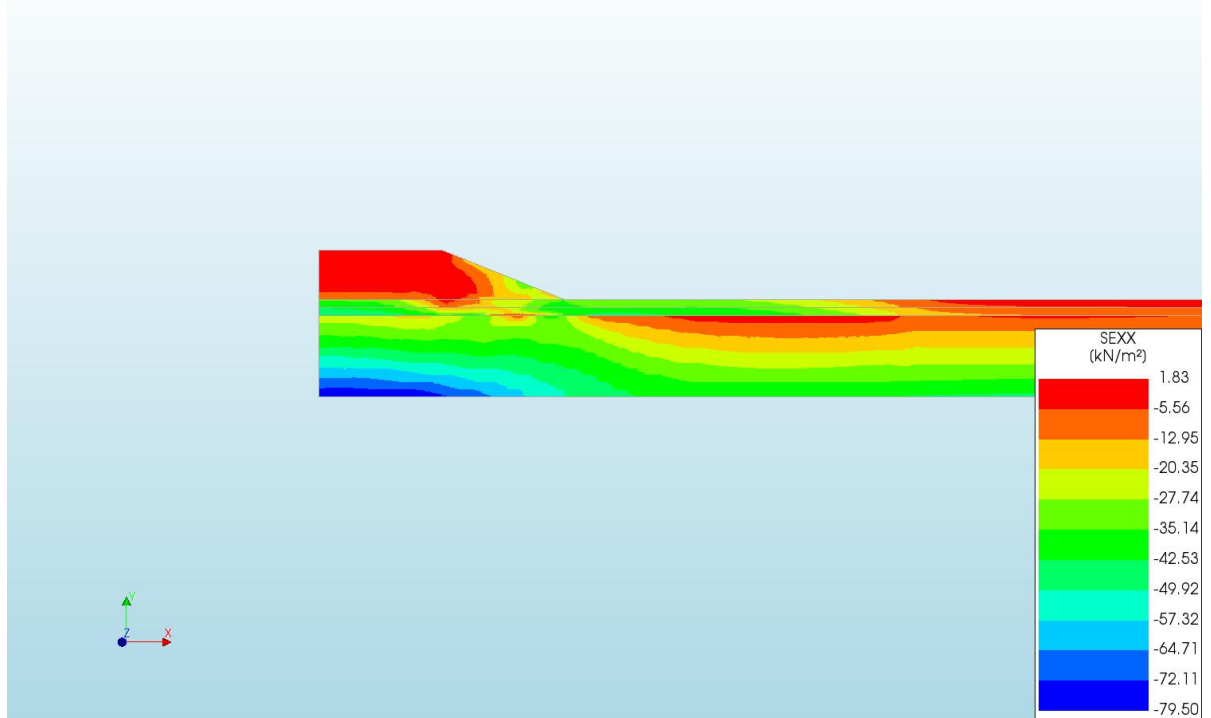
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.91m



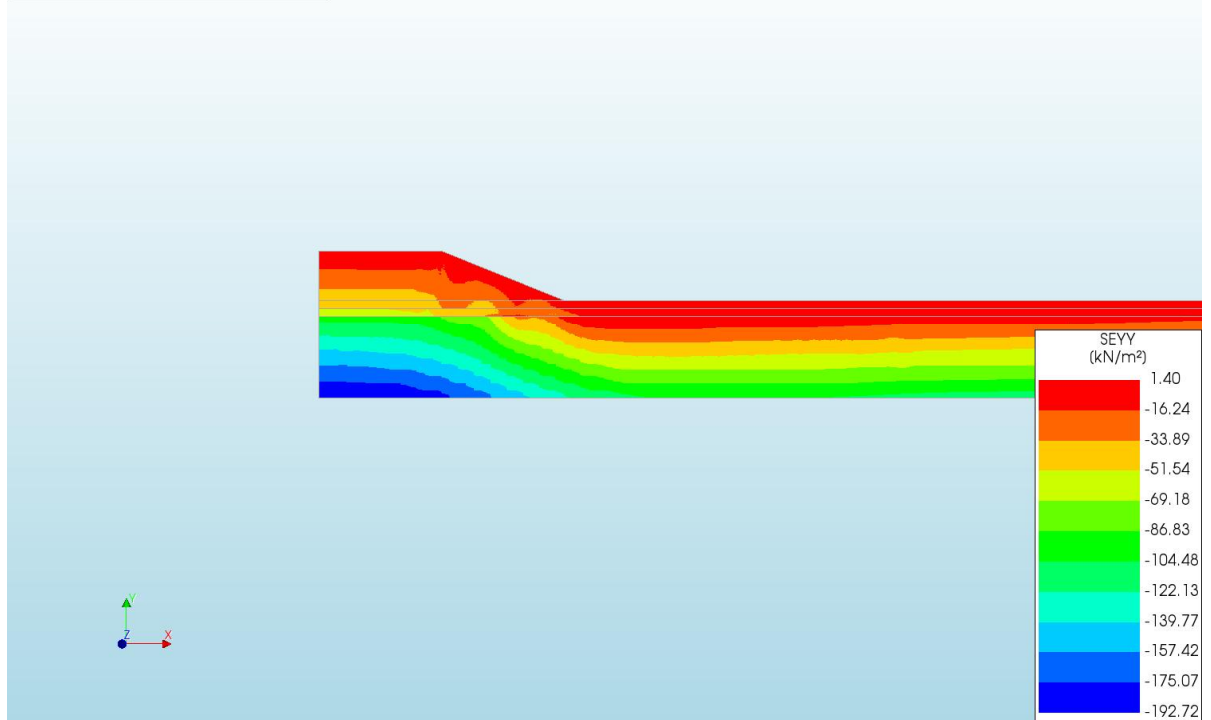
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.86e-02/ms



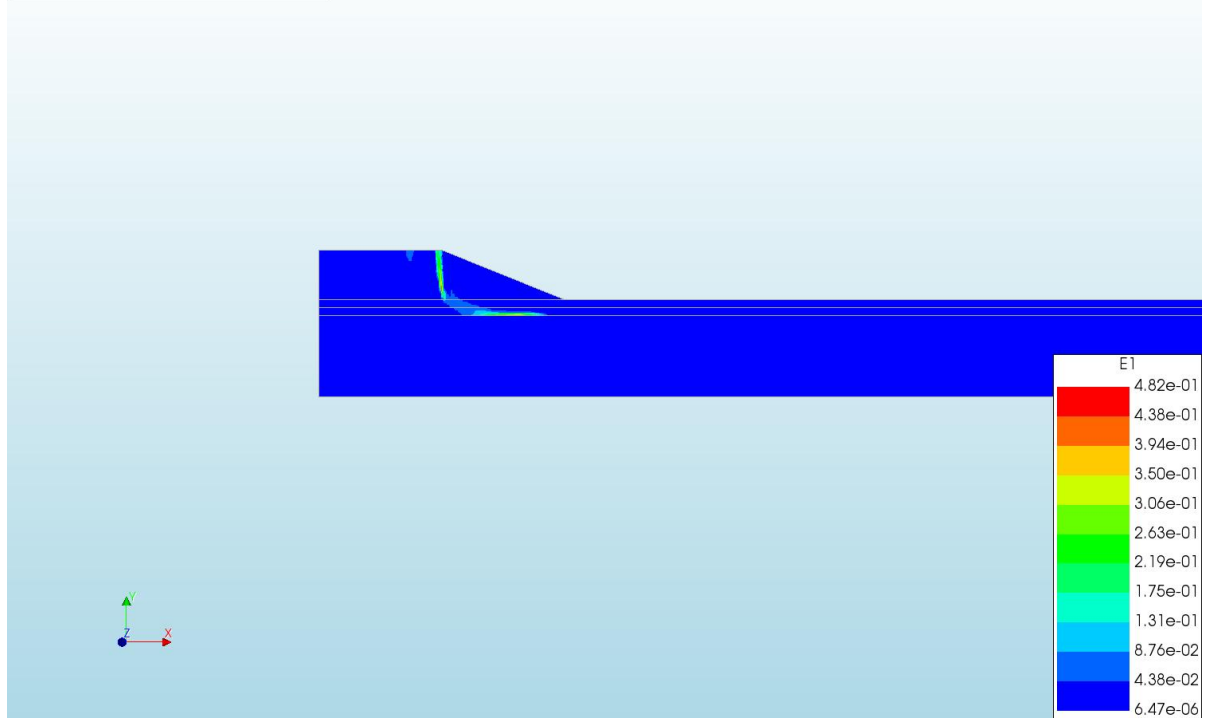
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.50kN/m<sup>2</sup> max: 1.83kN/m<sup>2</sup>



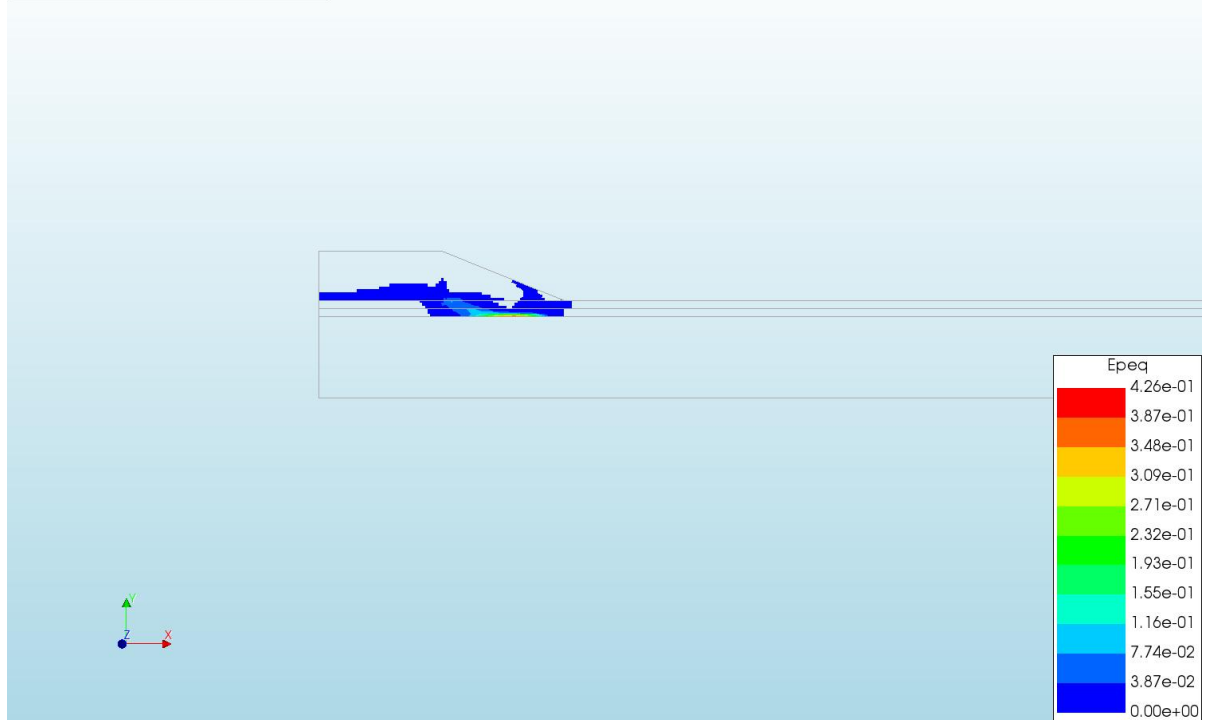
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.72kN/m<sup>2</sup> max: 1.40kN/m<sup>2</sup>



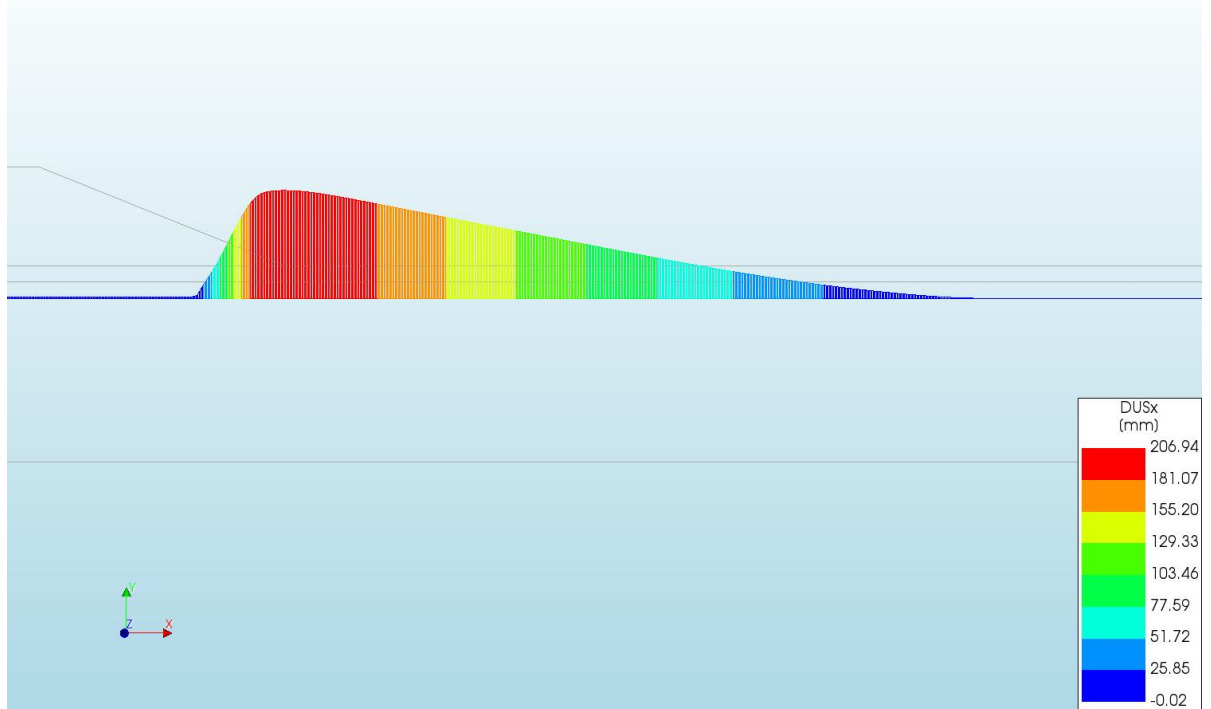
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Total Strains E1  
min: 6.47e-06 max: 4.82e-01



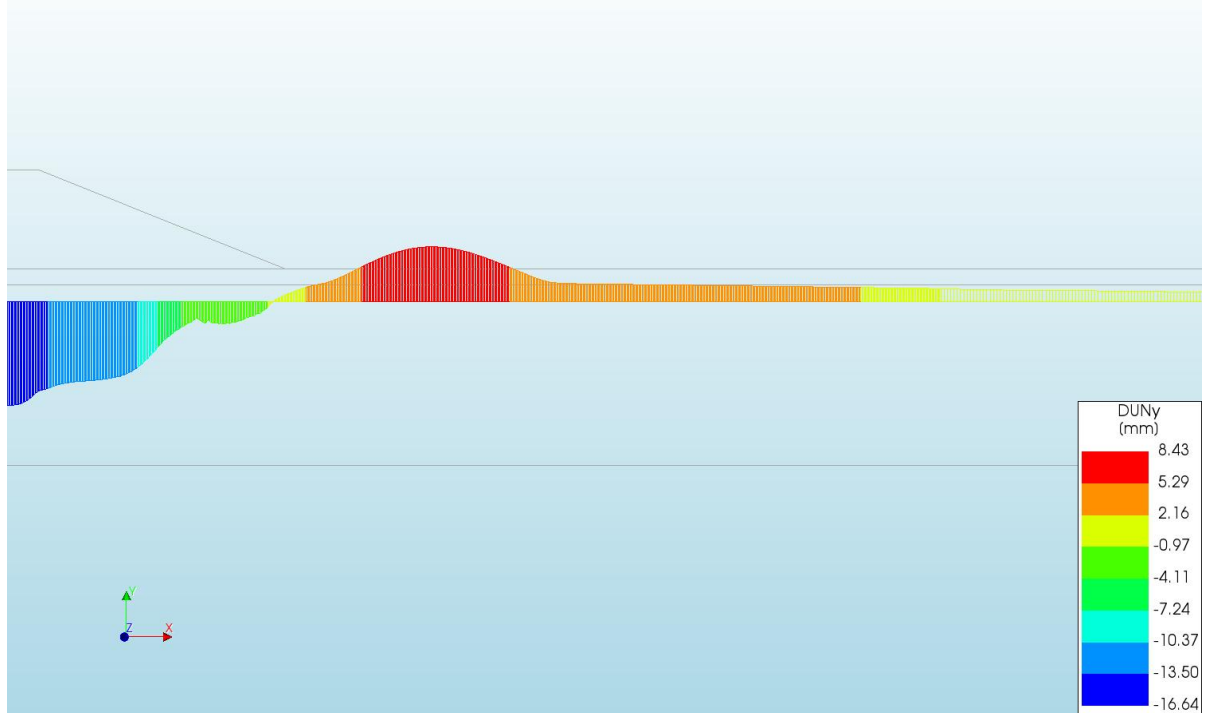
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.26e-01



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 206.94mm

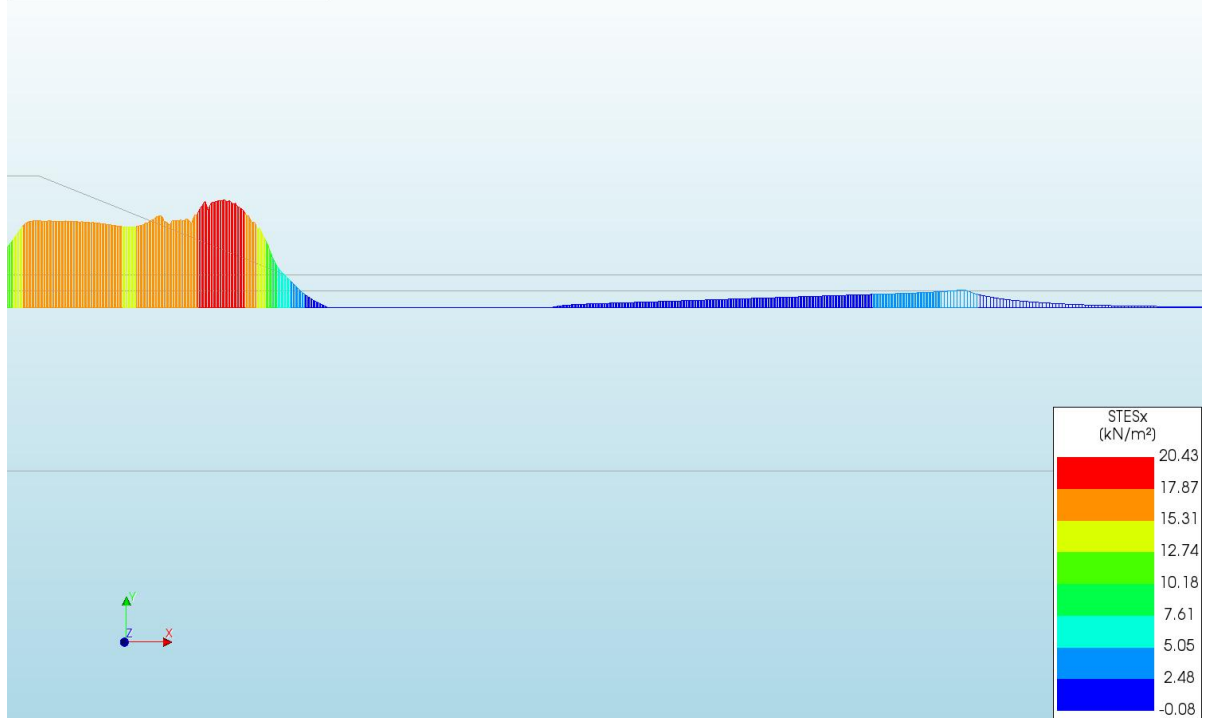


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.64mm max: 8.43mm

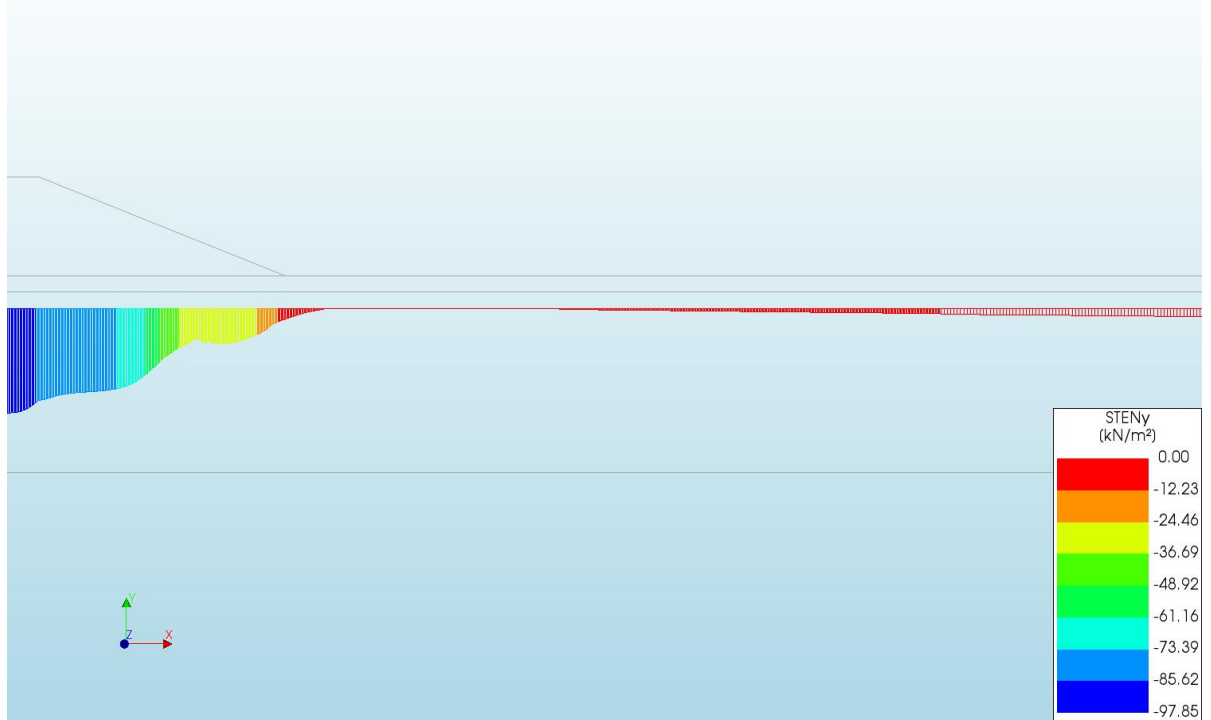


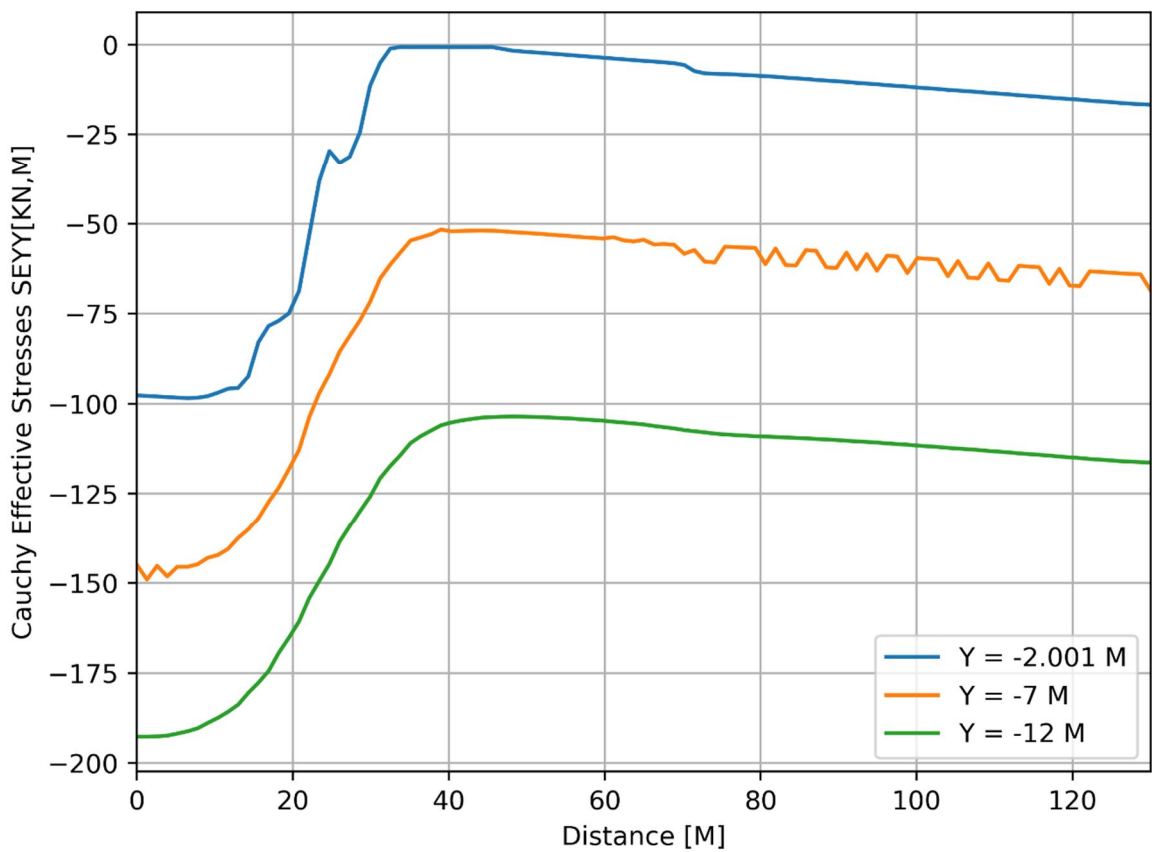
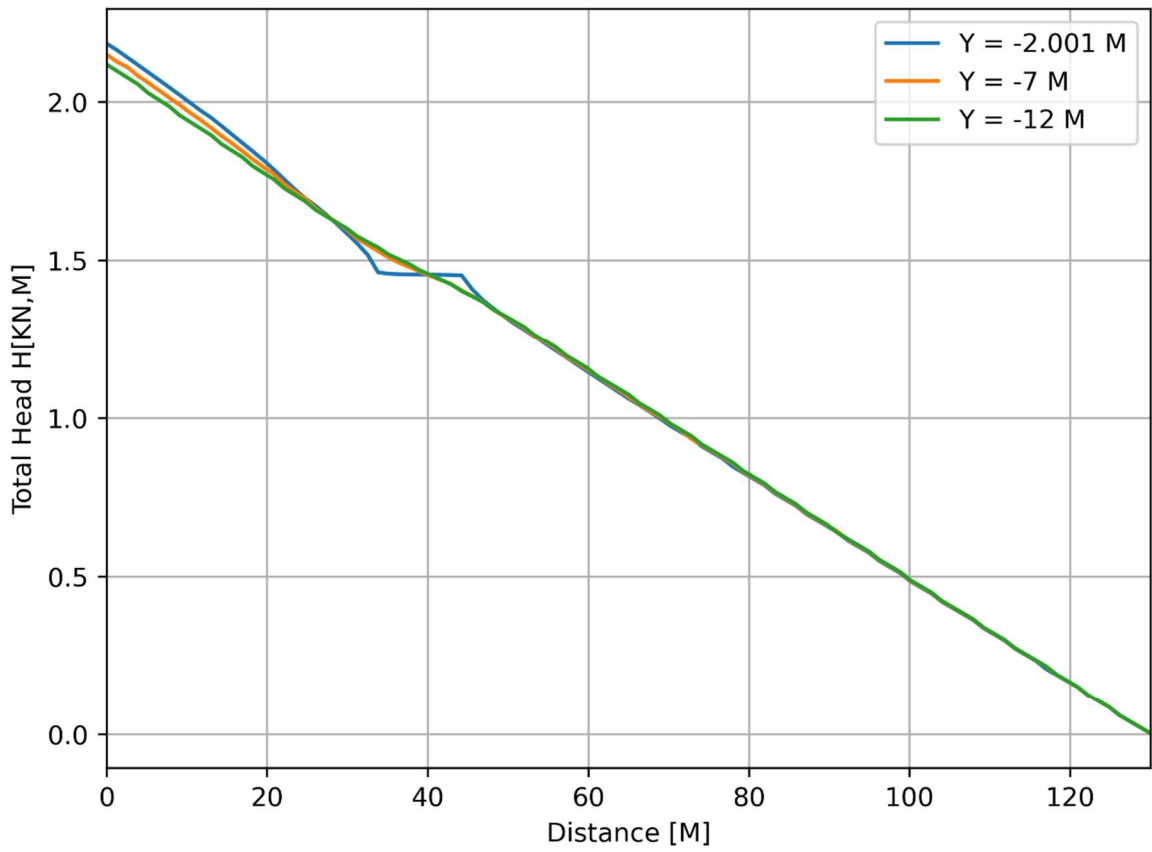


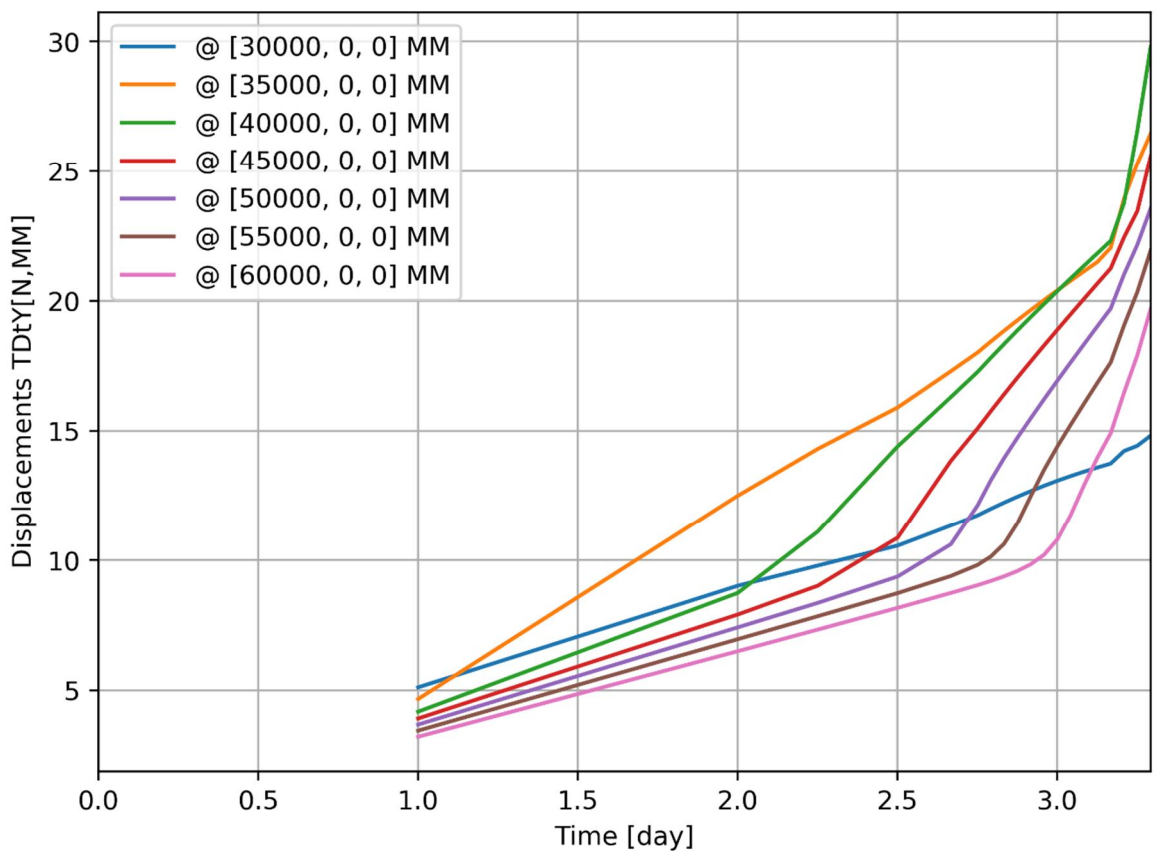
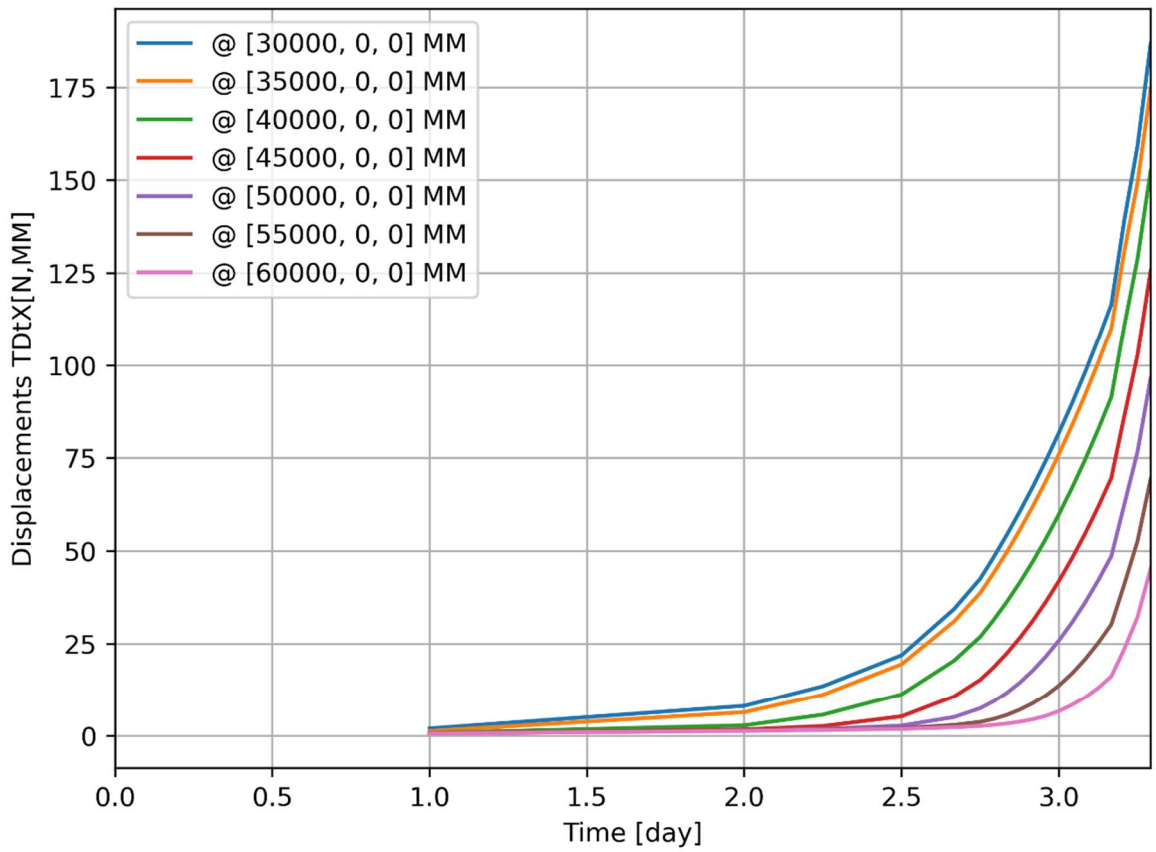
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.08kN/m<sup>2</sup> max: 20.43kN/m<sup>2</sup>

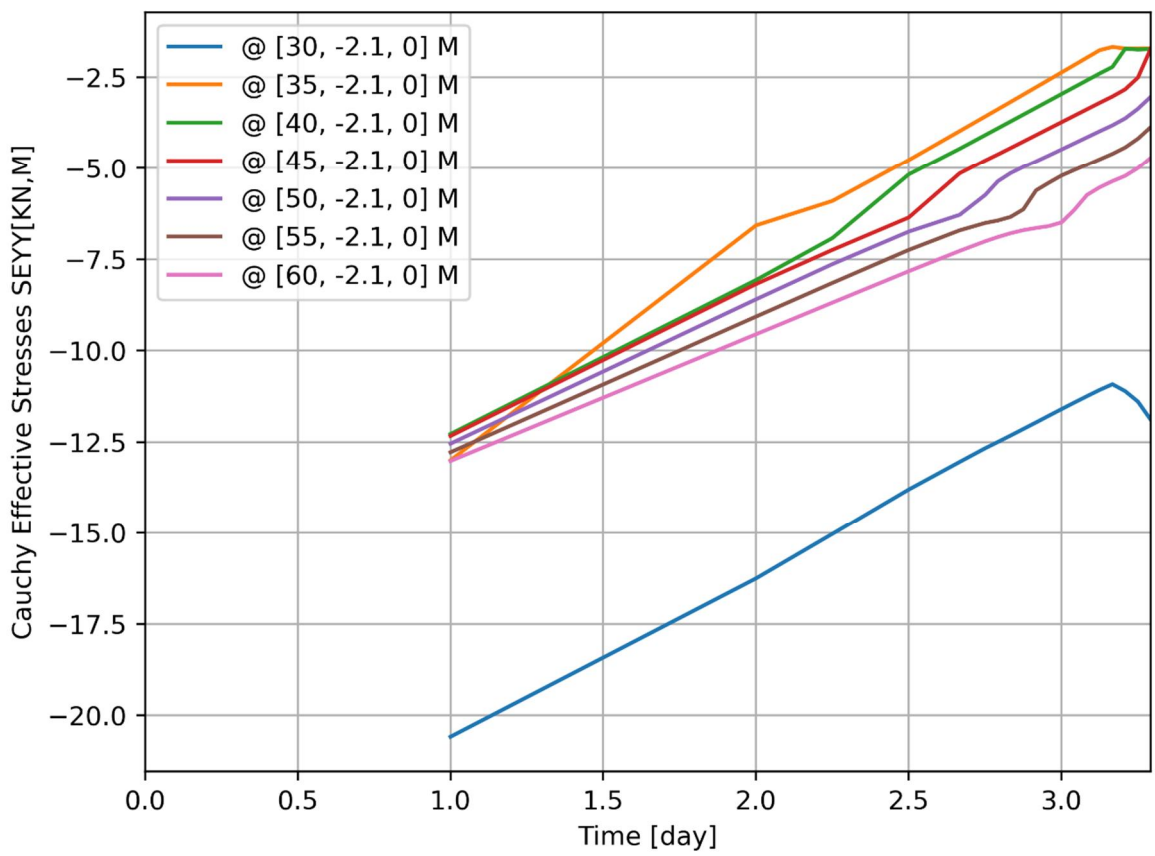
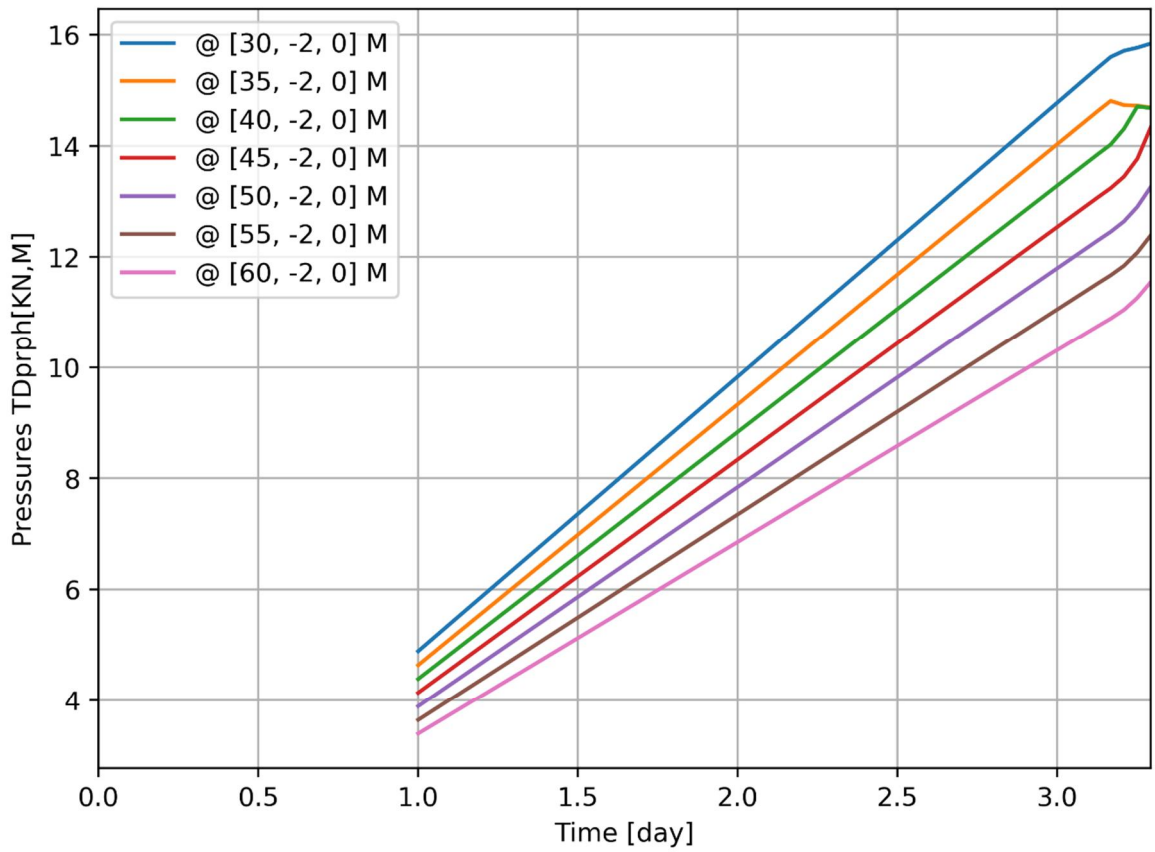


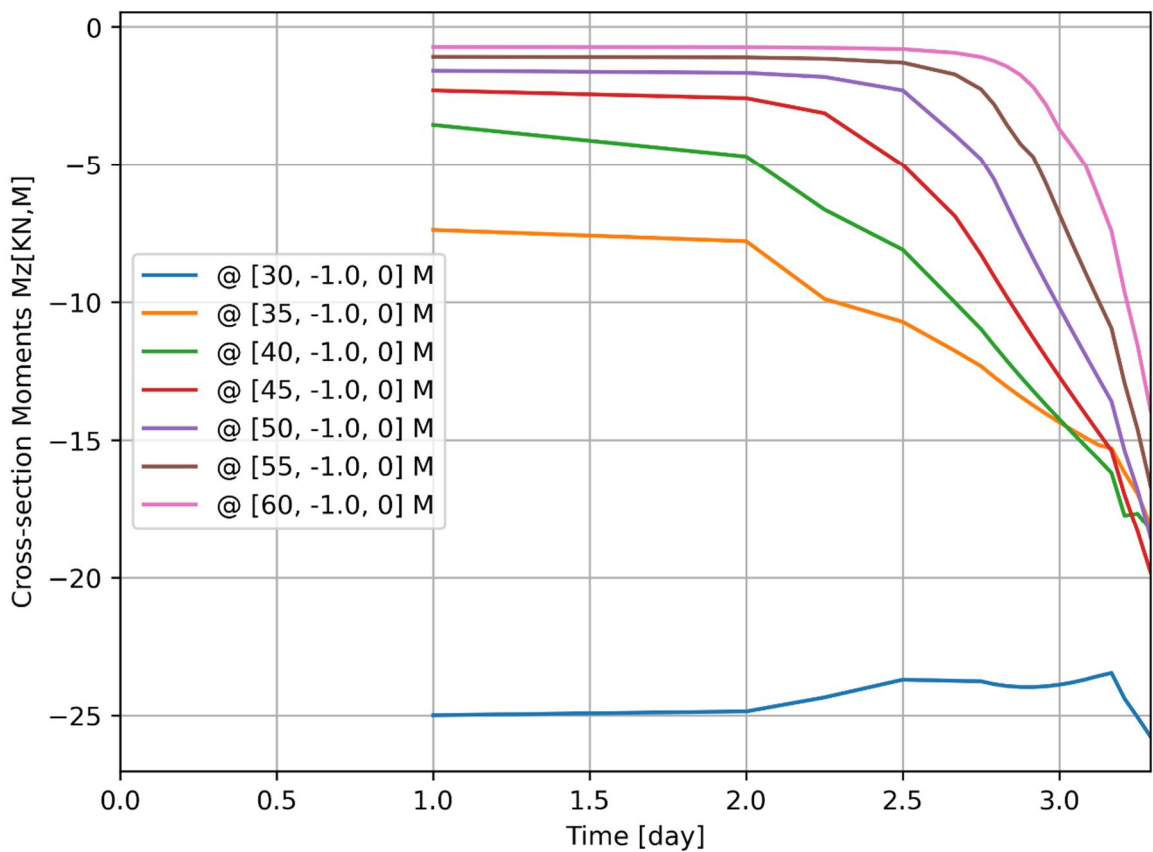
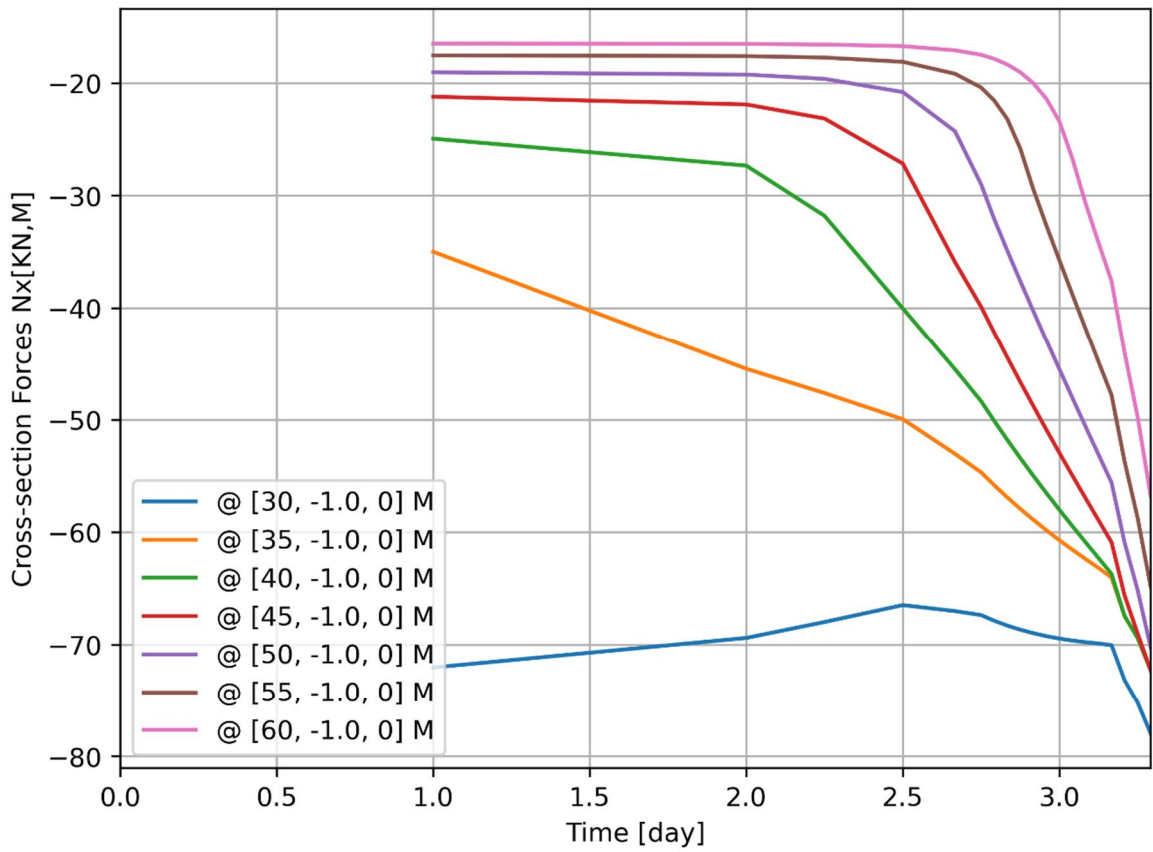
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -97.85kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>







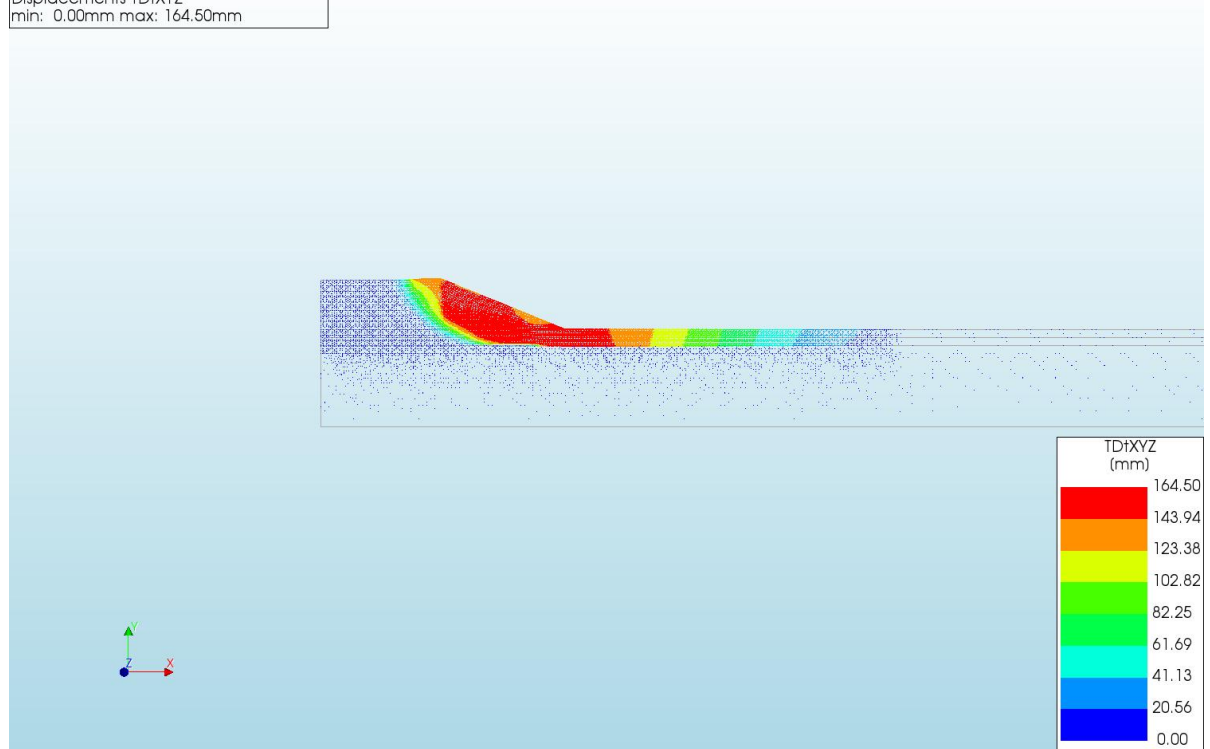




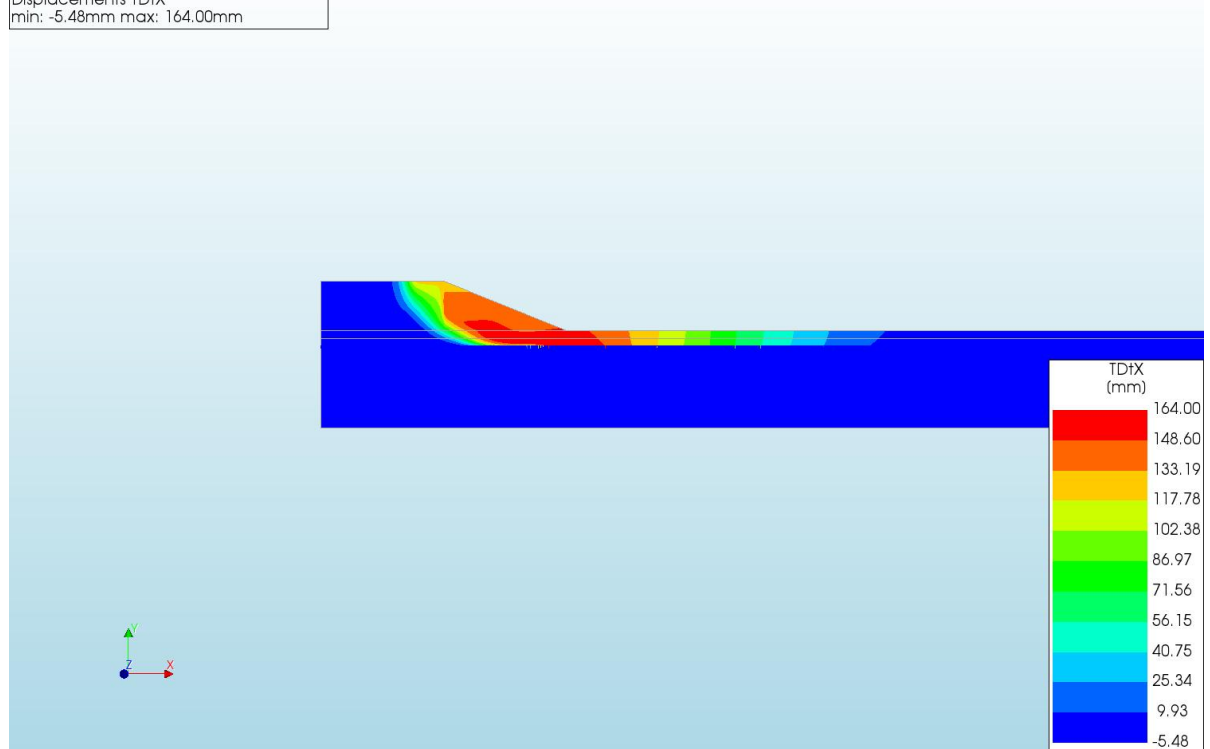
A.3.5

Output d=2 c=15 E=3 k=1e-07 tc=5\_20200927

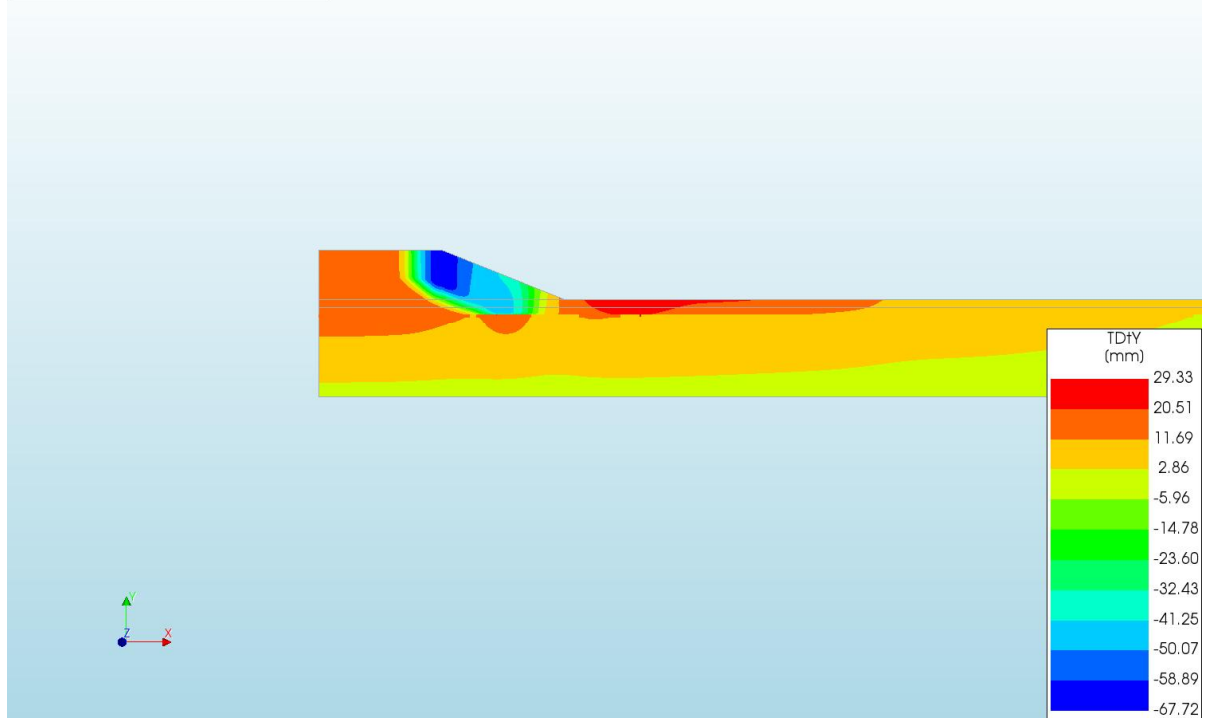
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
 Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 164.50mm



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
 Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -5.48mm max: 164.00mm



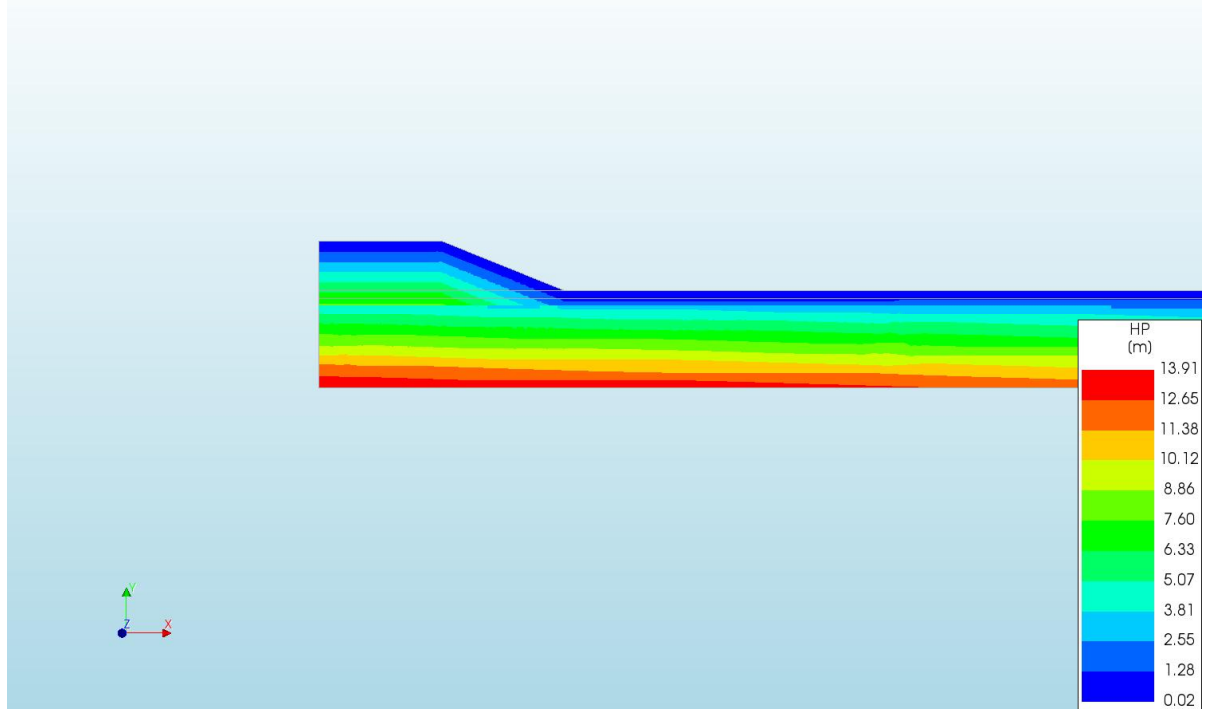
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Displacements TDfY  
min: -67.72mm max: 29.33mm



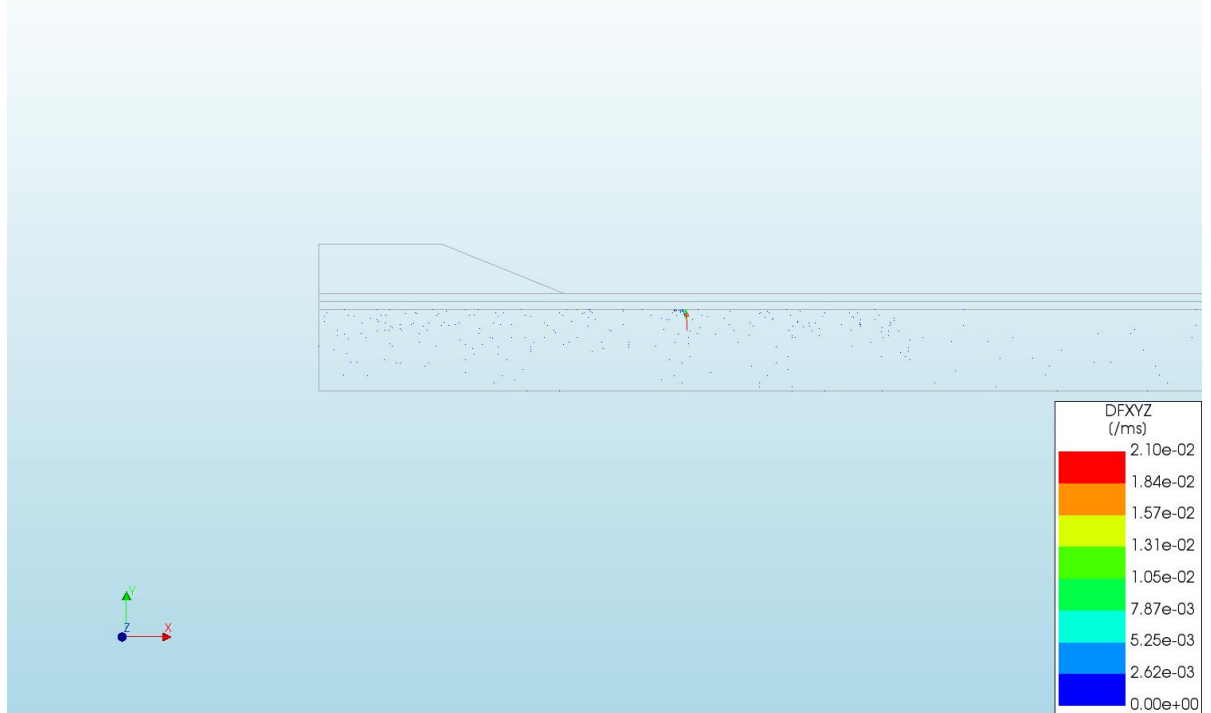
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 21.21kN/m<sup>2</sup>



d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 13.91m

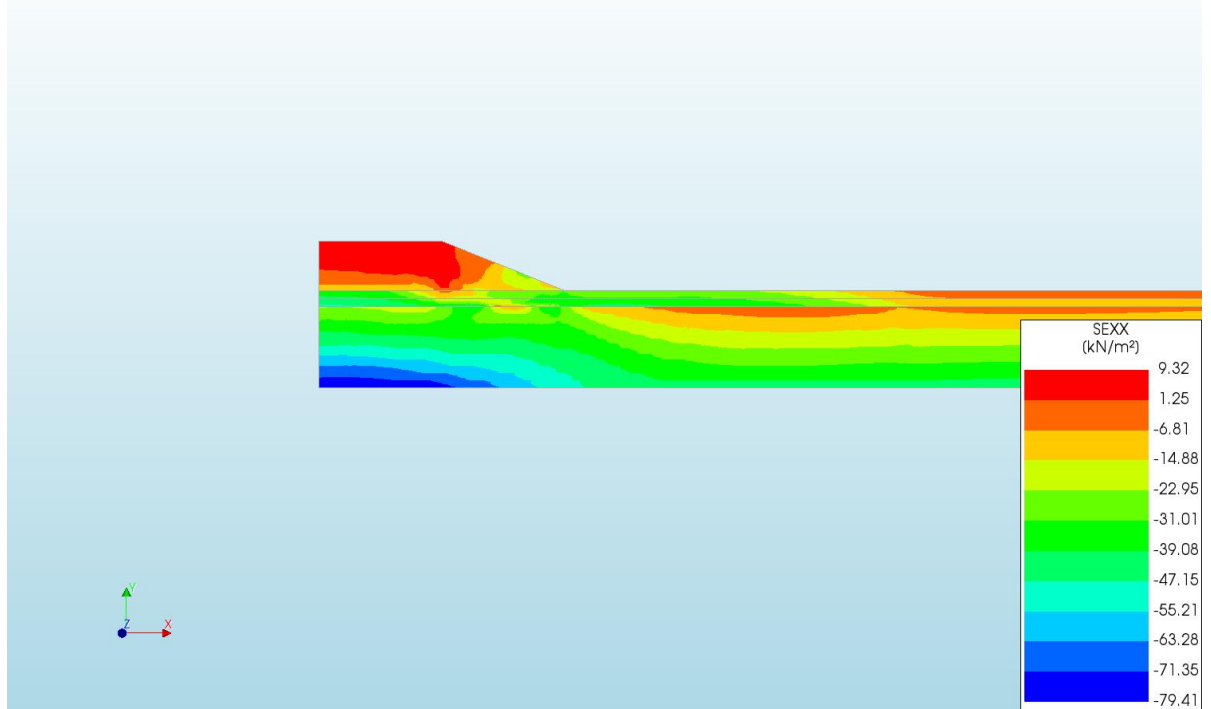


d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.10e-02/ms

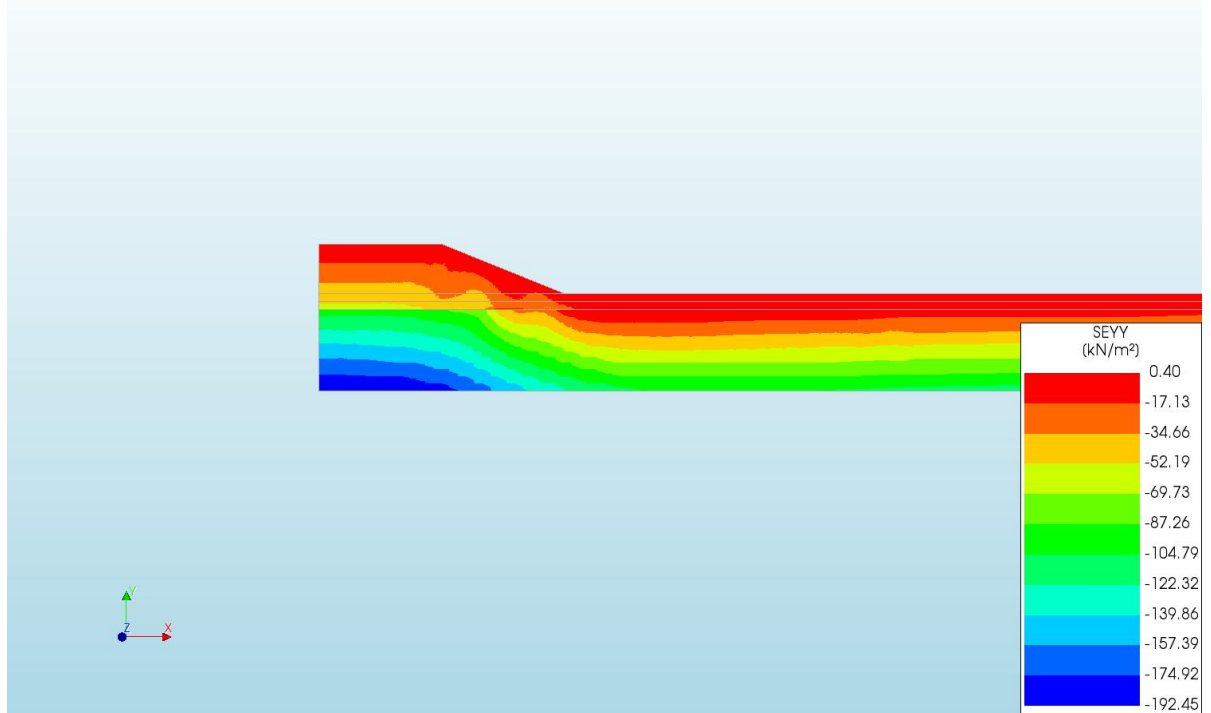




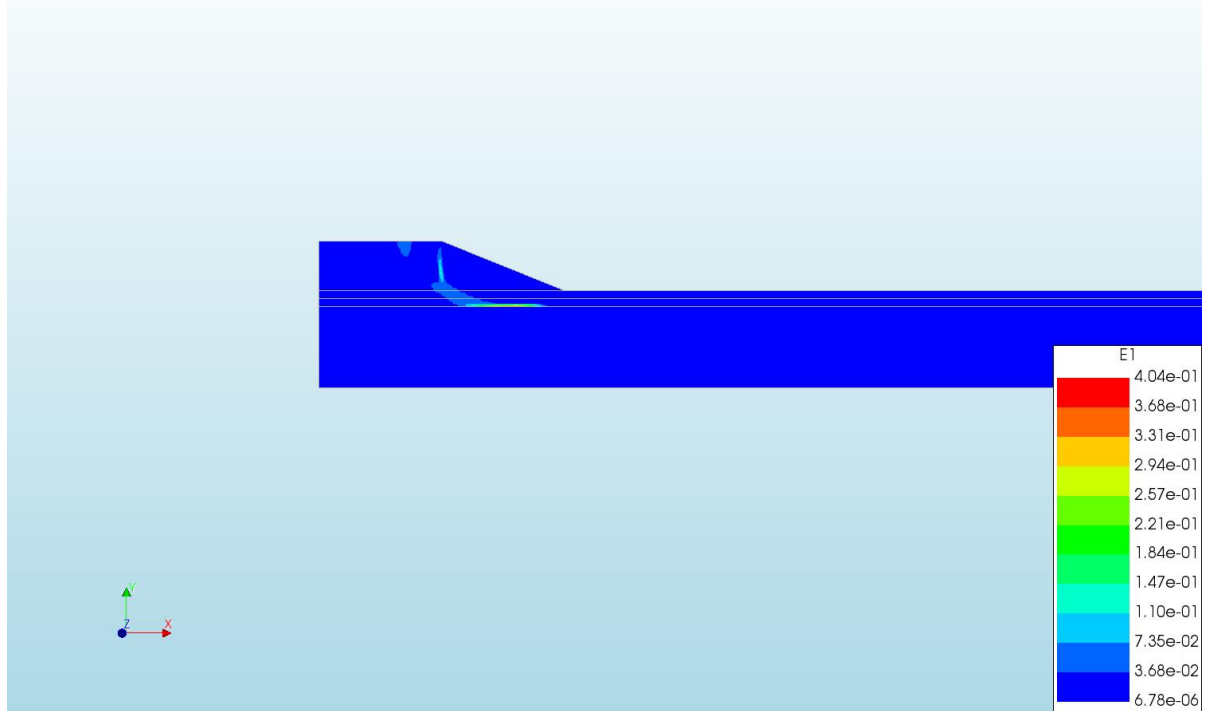
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -79.41kN/m<sup>2</sup> max: 9.32kN/m<sup>2</sup>



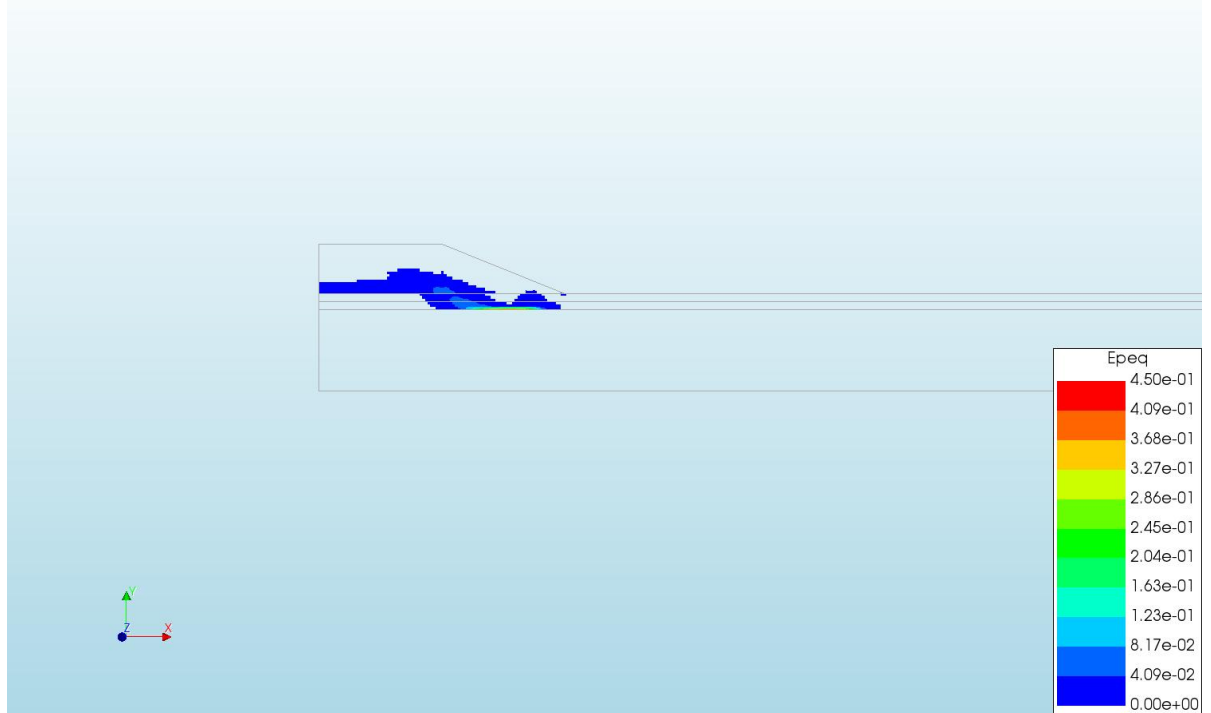
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -192.45kN/m<sup>2</sup> max: 0.40kN/m<sup>2</sup>



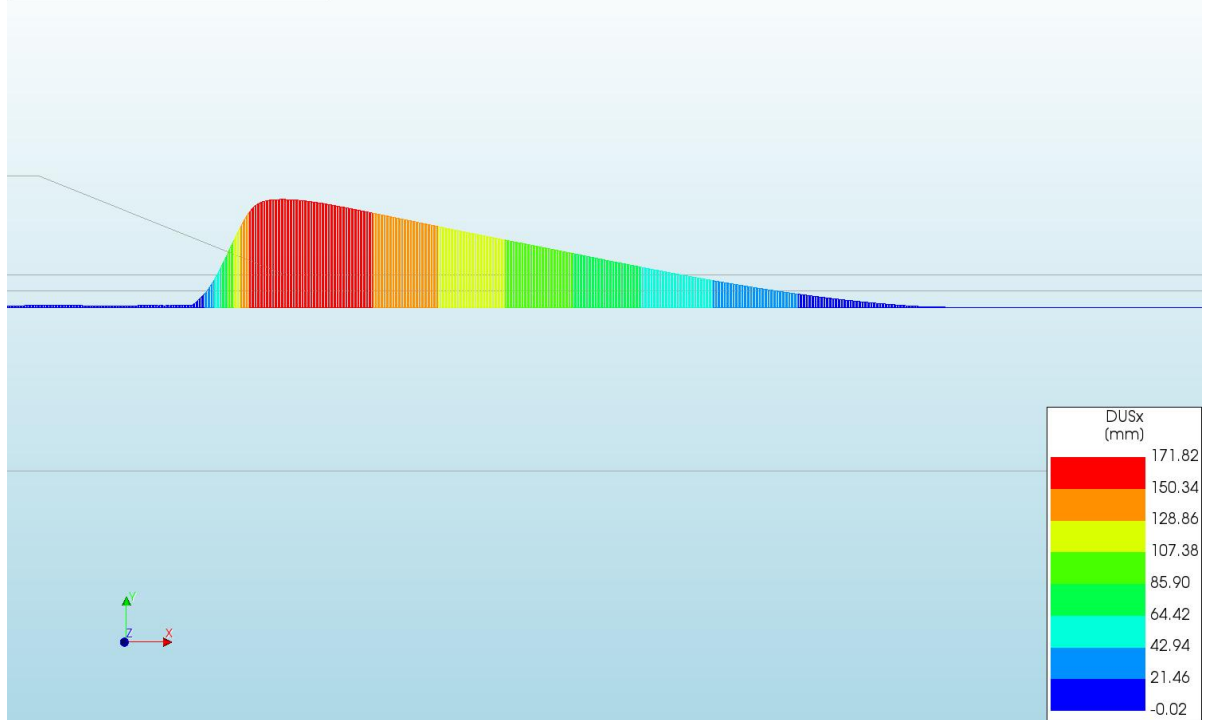
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Total Strains E1  
min: 6.78e-06 max: 4.04e-01



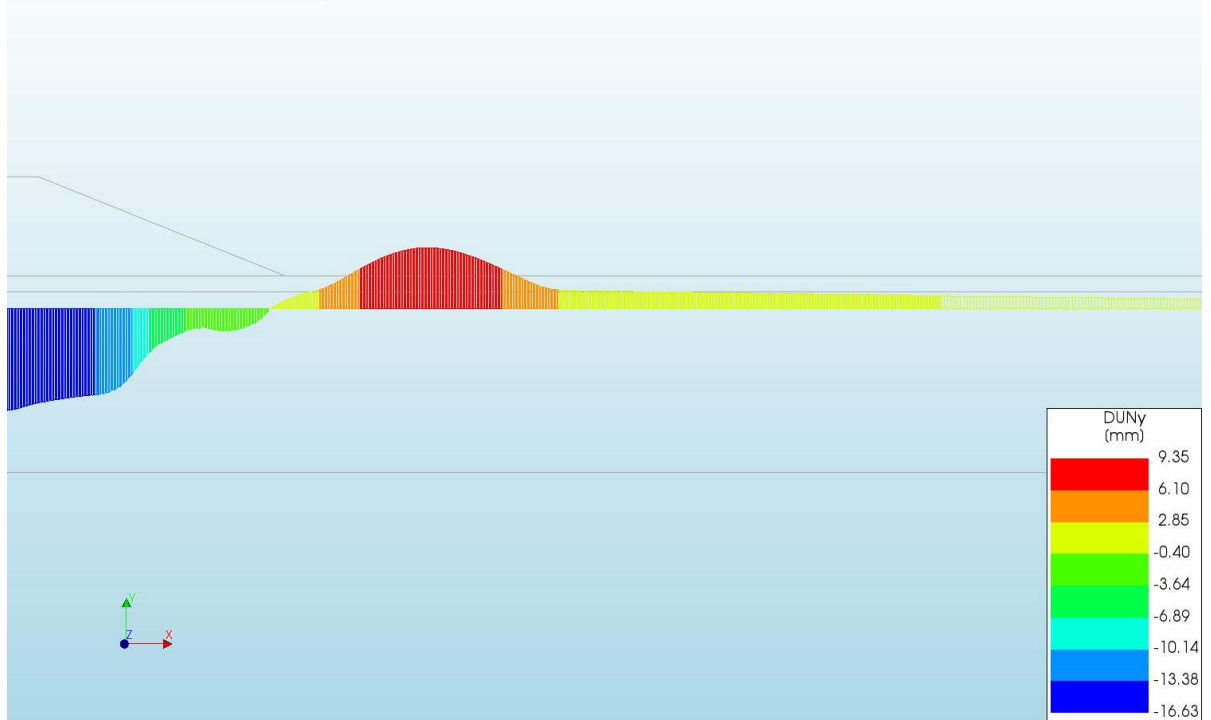
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.50e-01



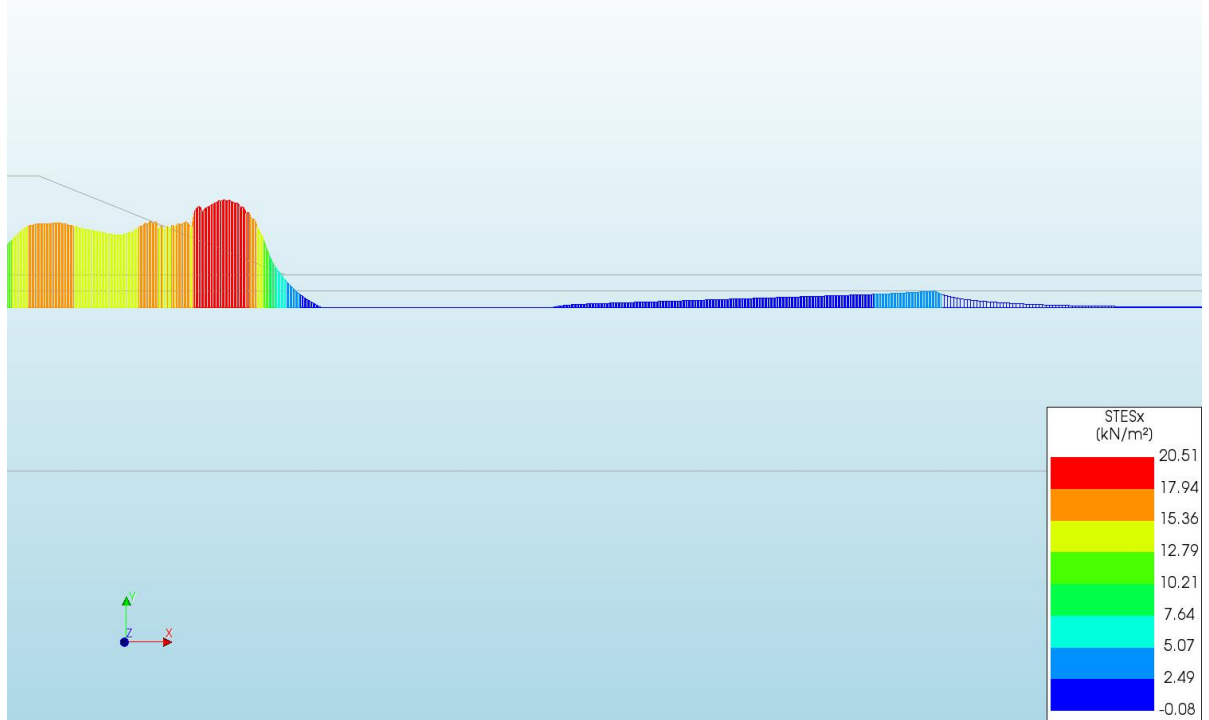
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.02mm max: 171.82mm



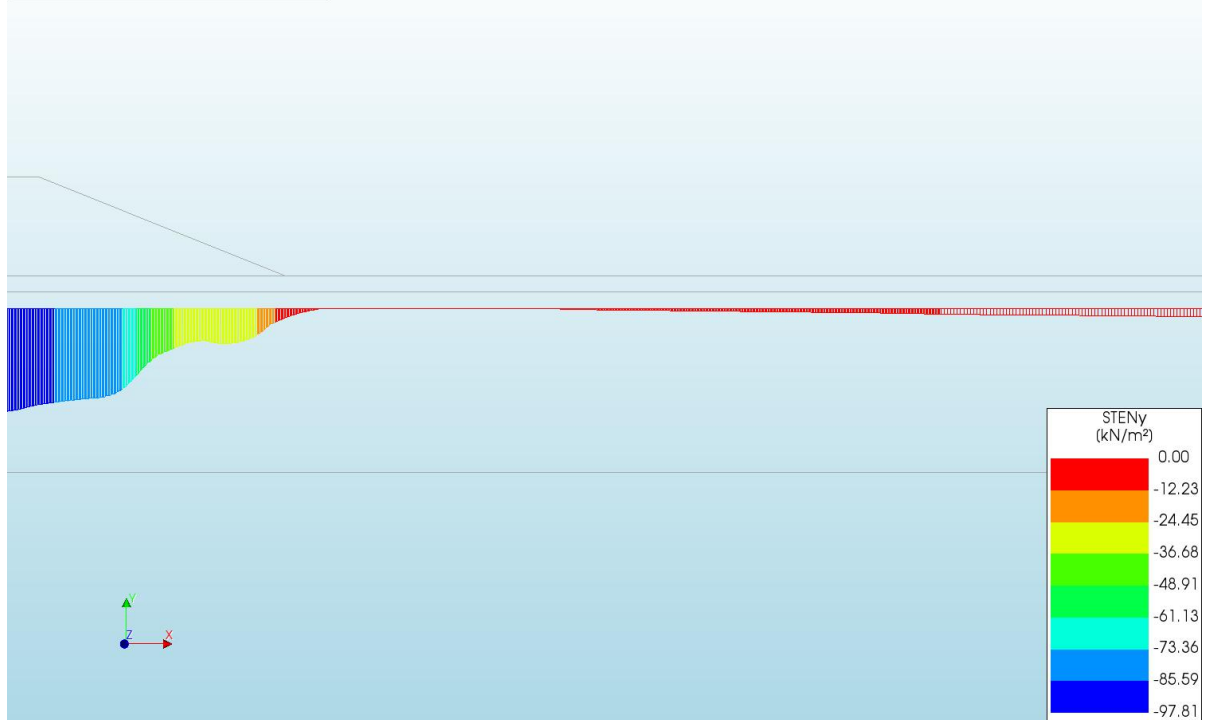
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -16.63mm max: 9.35mm

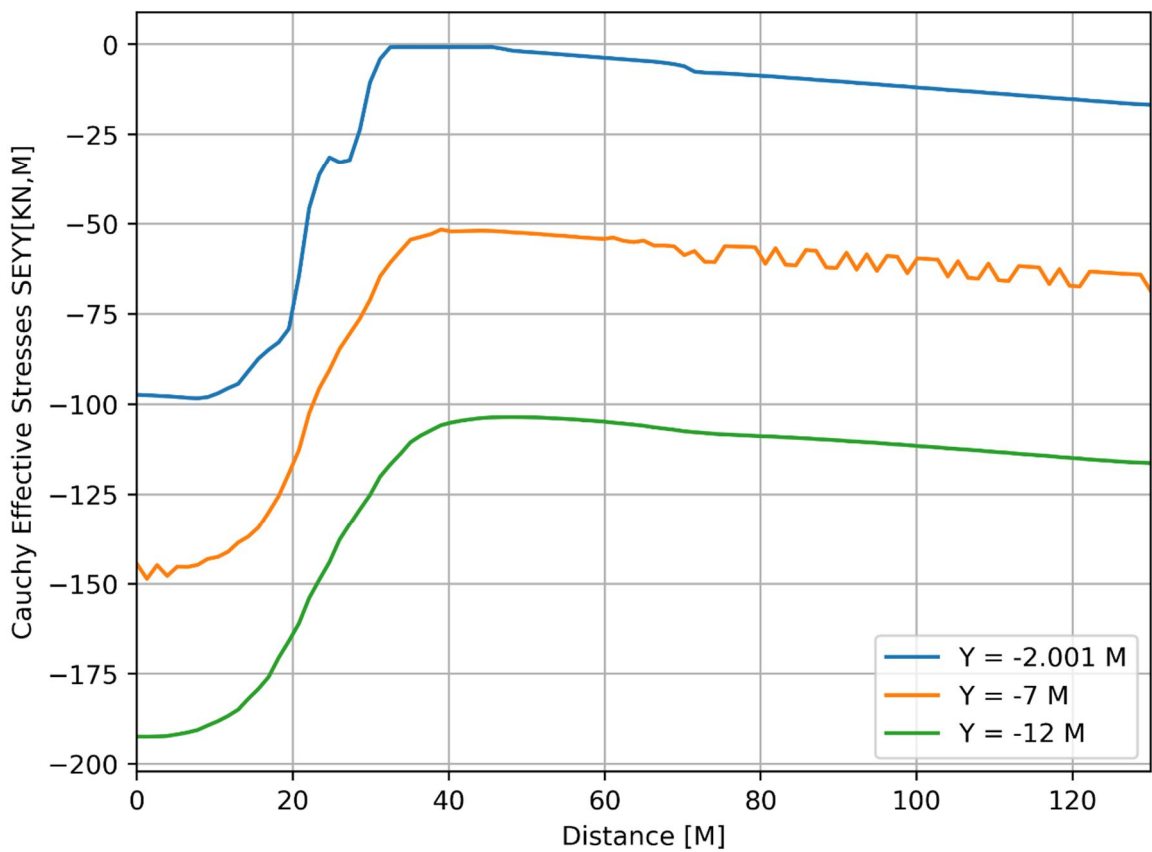
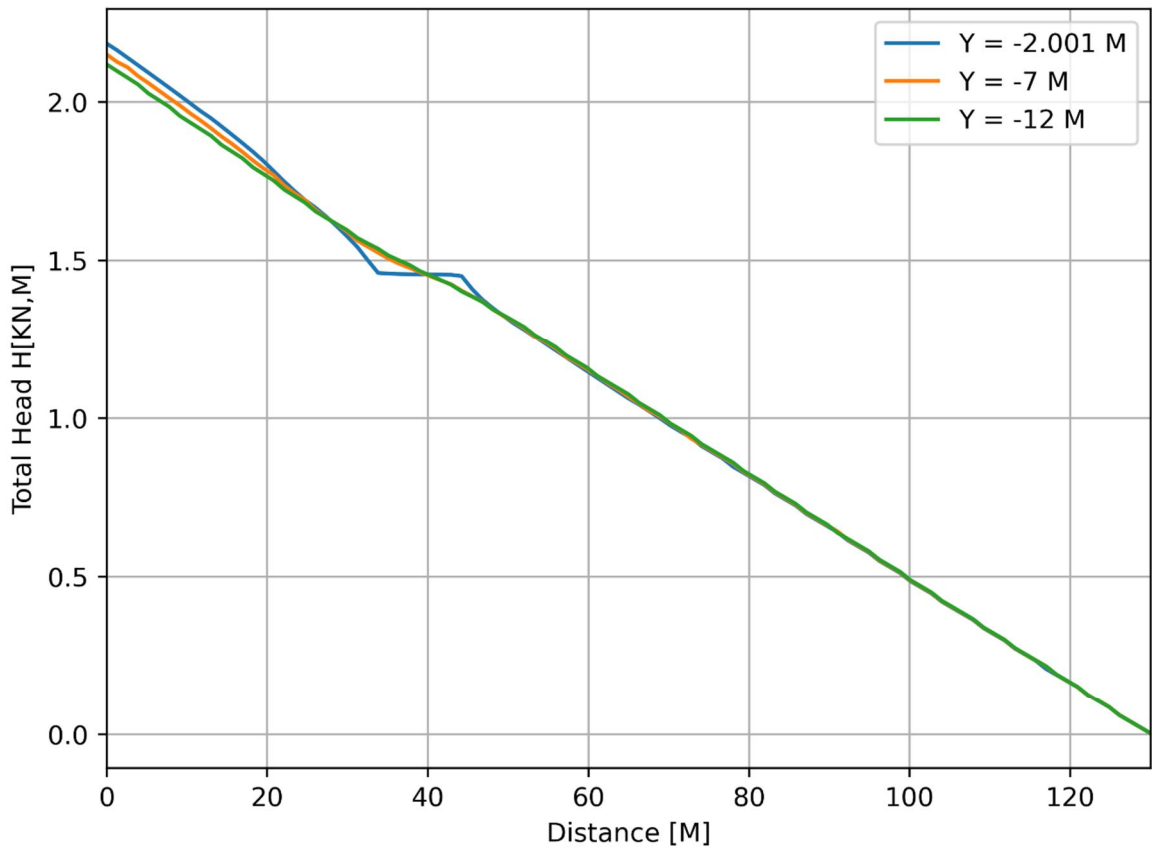


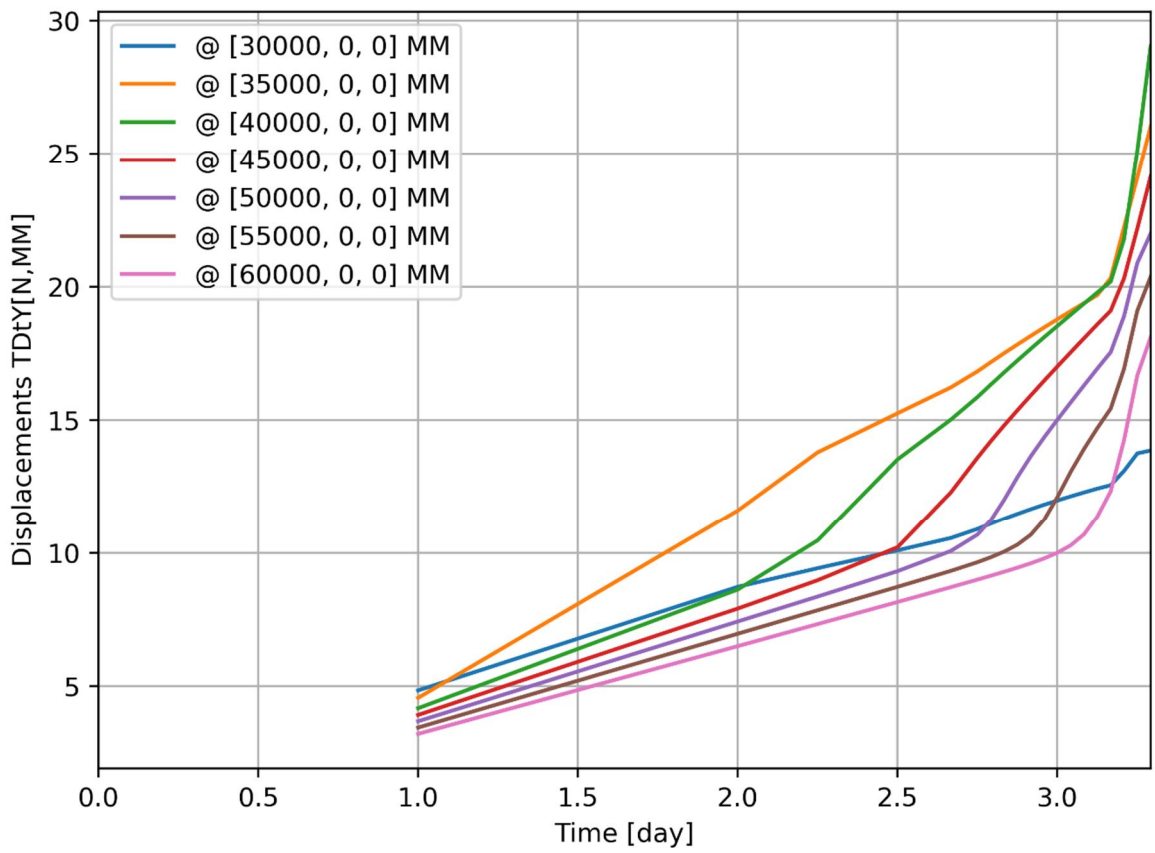
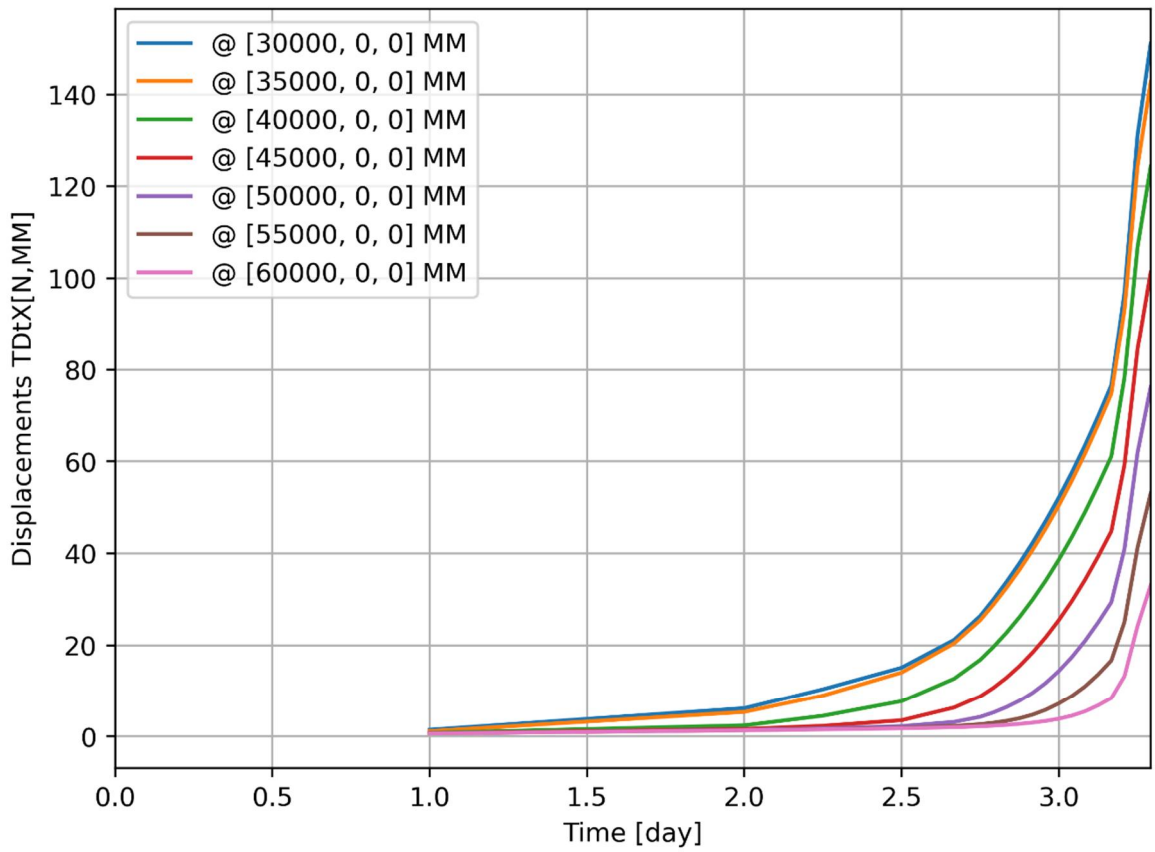
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
 Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
 Interface Effective Traction STESx  
 min: -0.08kN/m<sup>2</sup> max: 20.51kN/m<sup>2</sup>

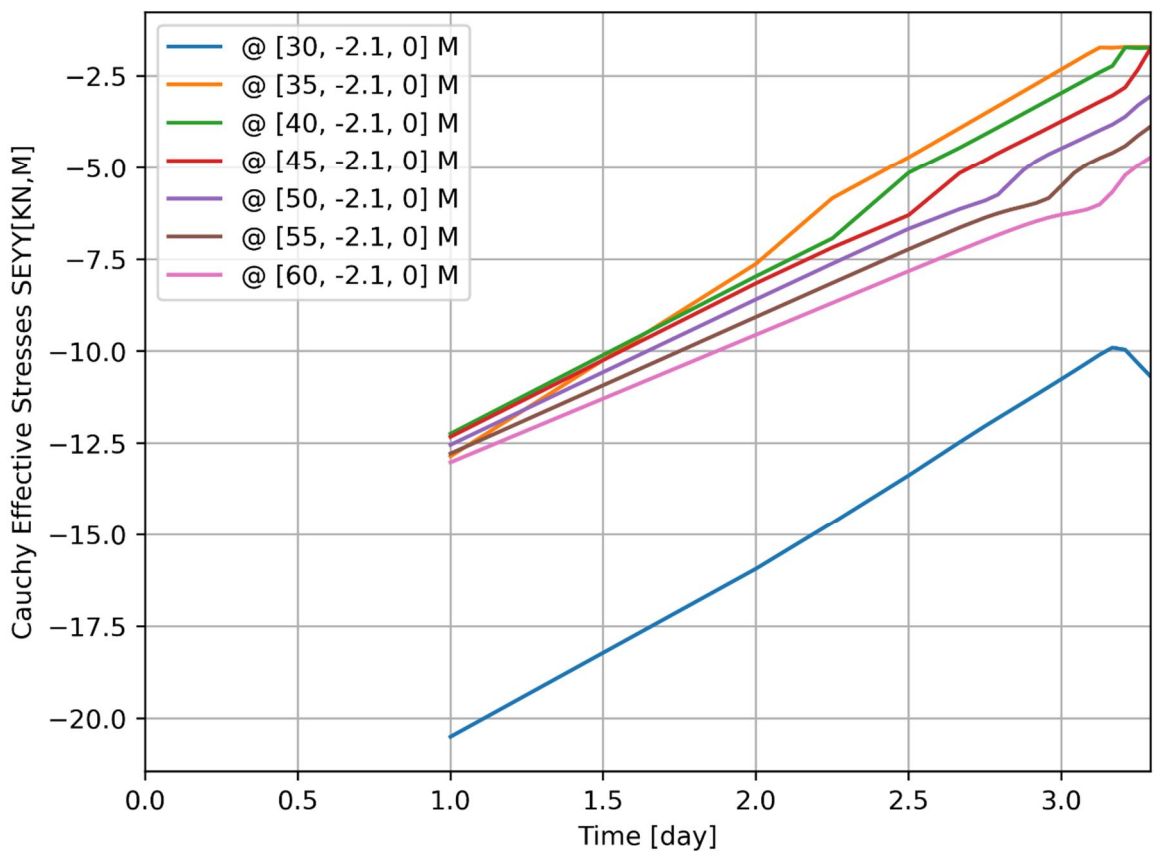
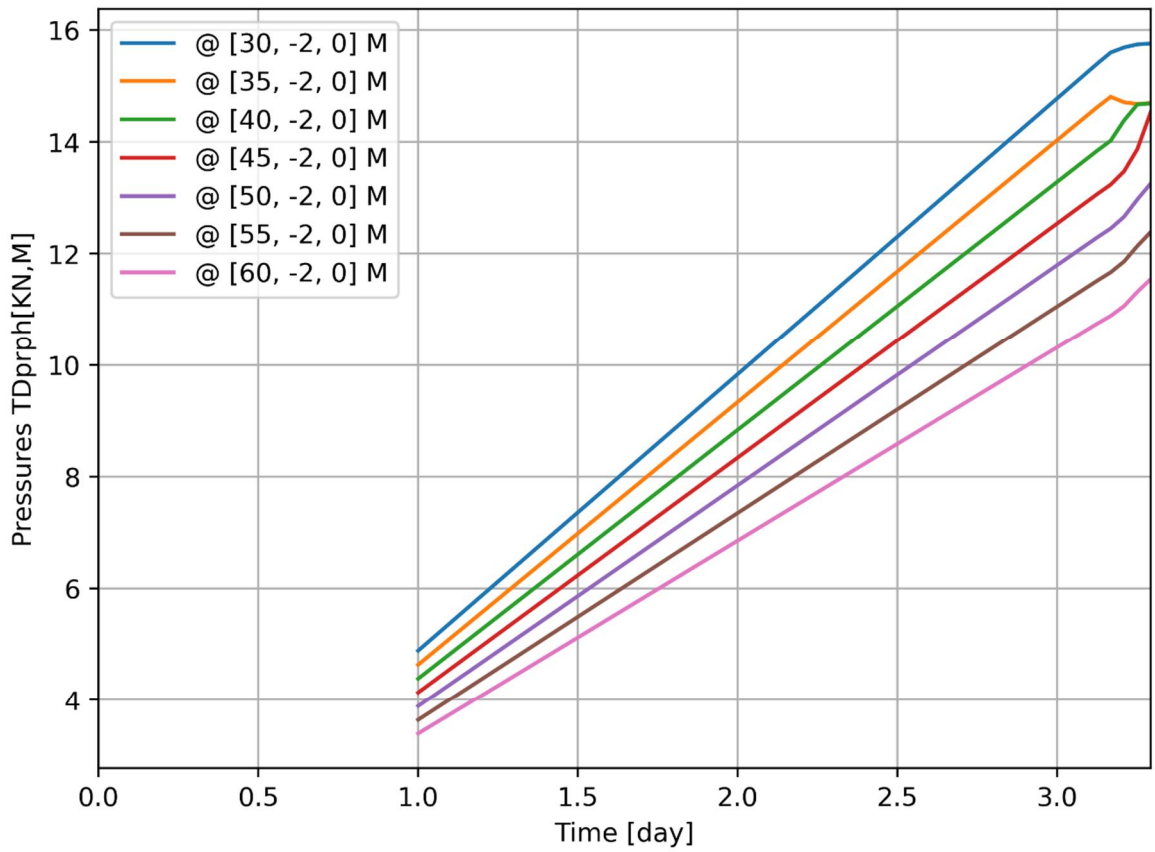


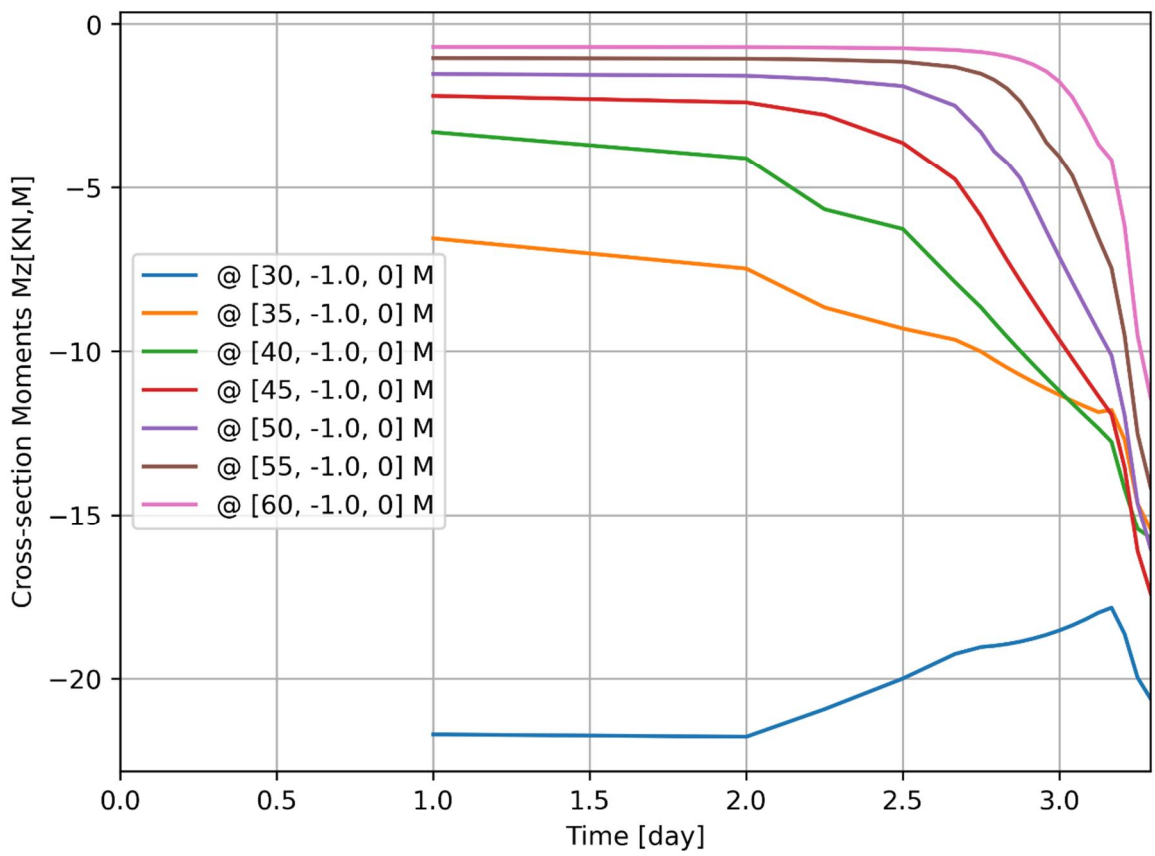
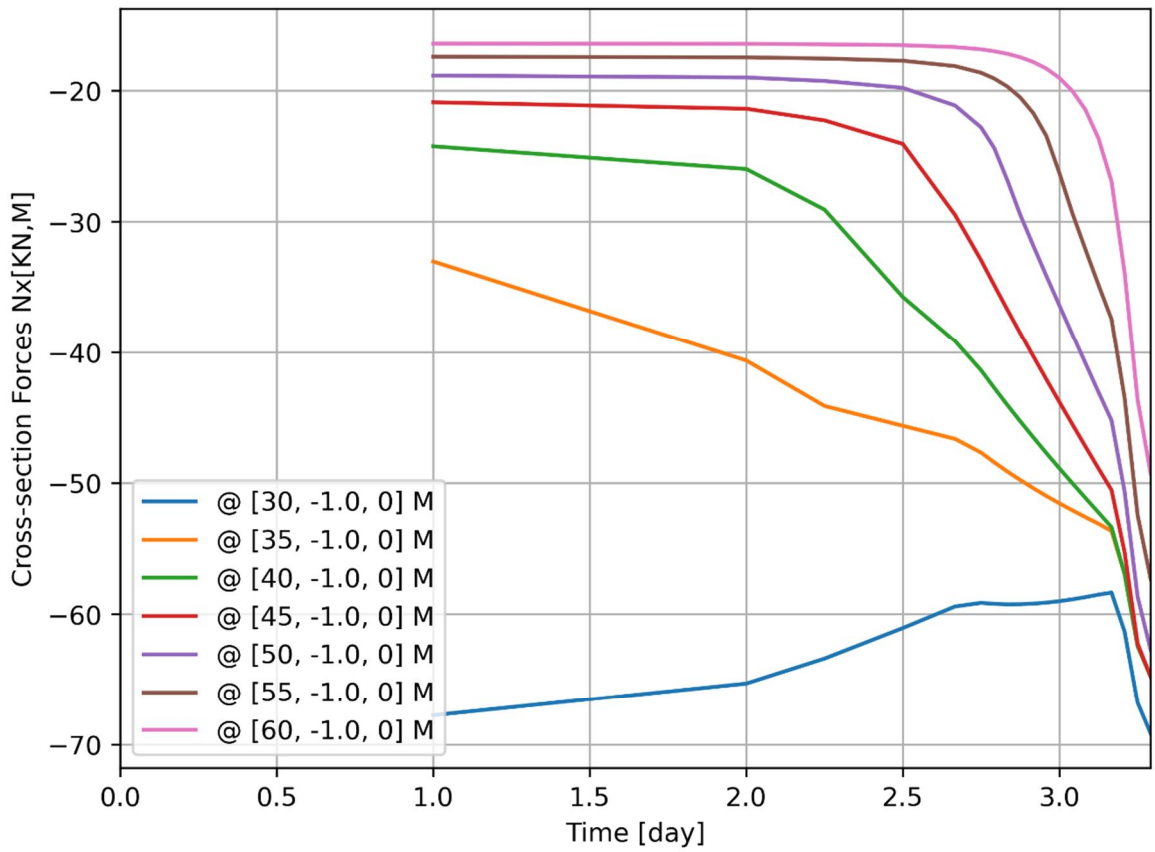
d=2\_c=15\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
 Phase 2, Time-step 25, Time 3 day 7 hour  
 Interface Effective Traction STENy  
 min: -97.81kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>









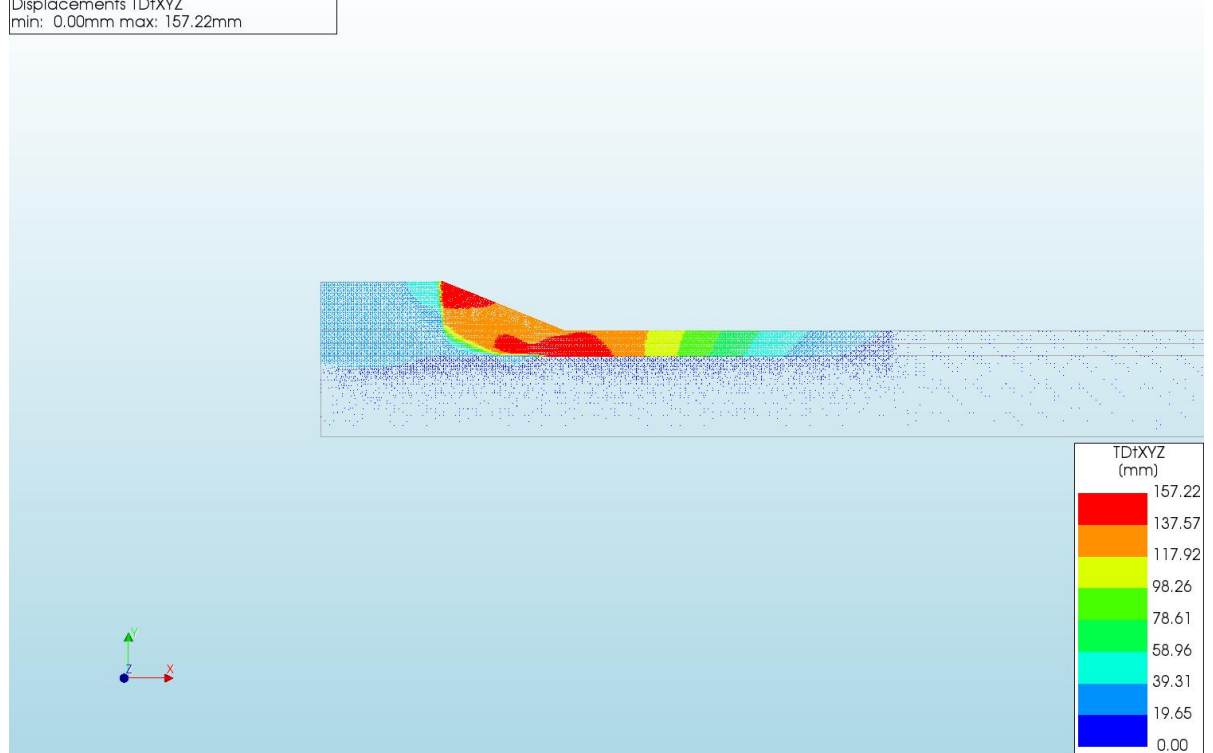




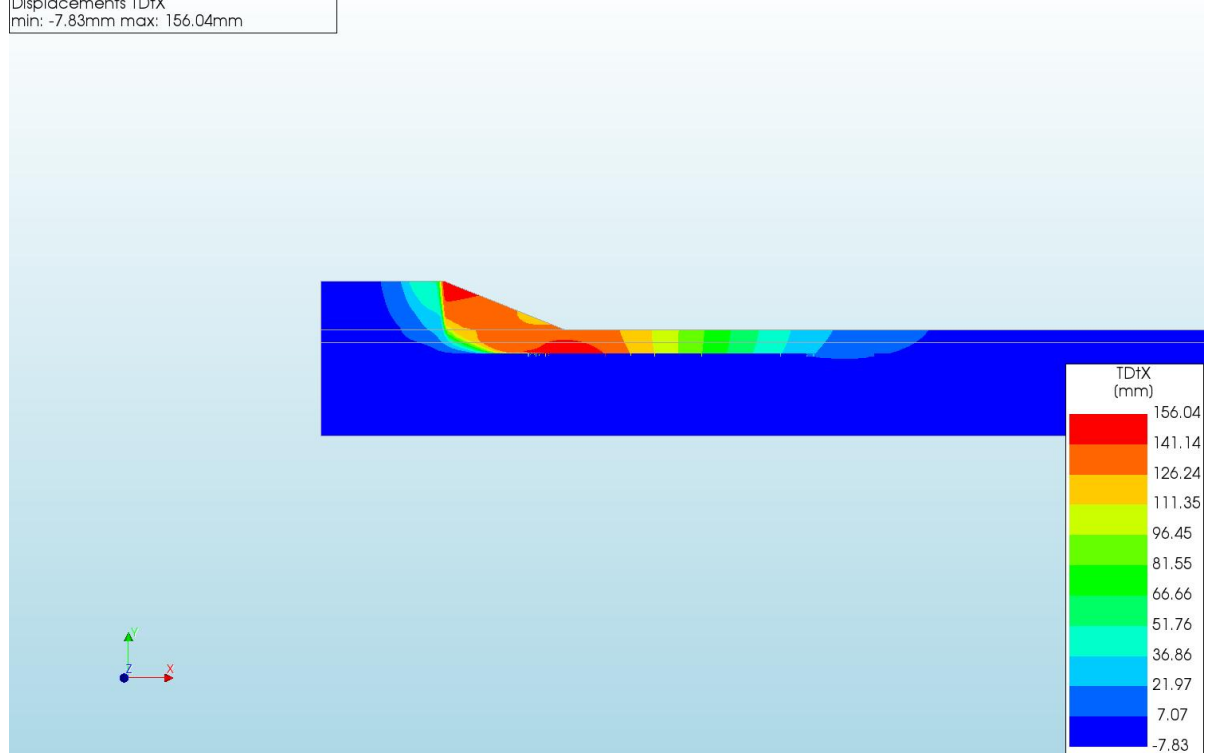
A.3.6

Output d=3 c=18 E=3 k=1e-07 tc=1\_20200927

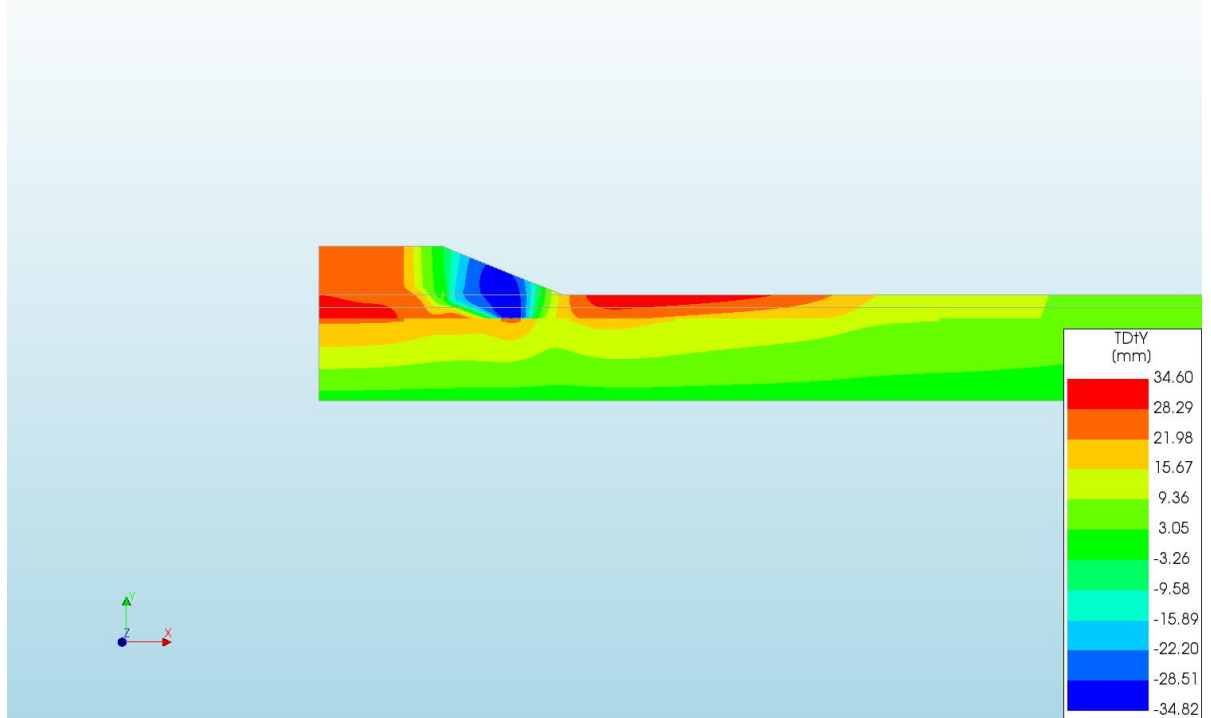
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Displacements TdXYZ  
min: 0.00mm max: 157.22mm



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Displacements TdX  
min: -7.83mm max: 156.04mm



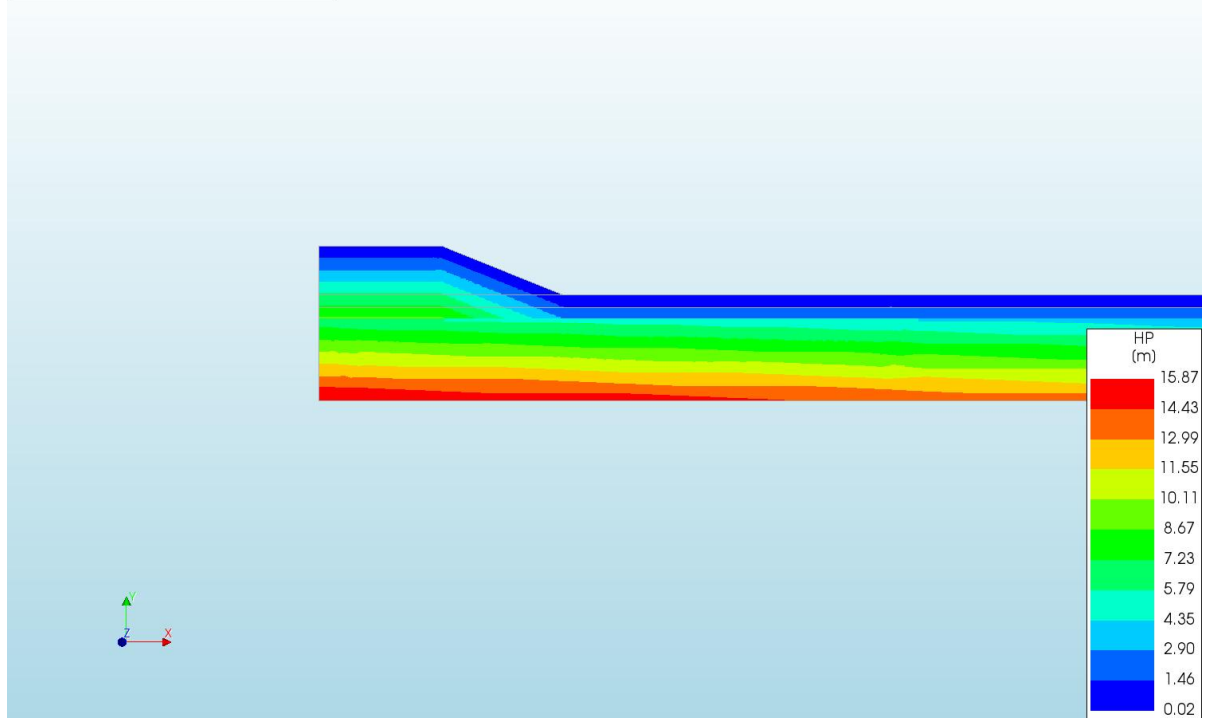
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Displacements TDfY  
min: -34.82mm max: 34.60mm



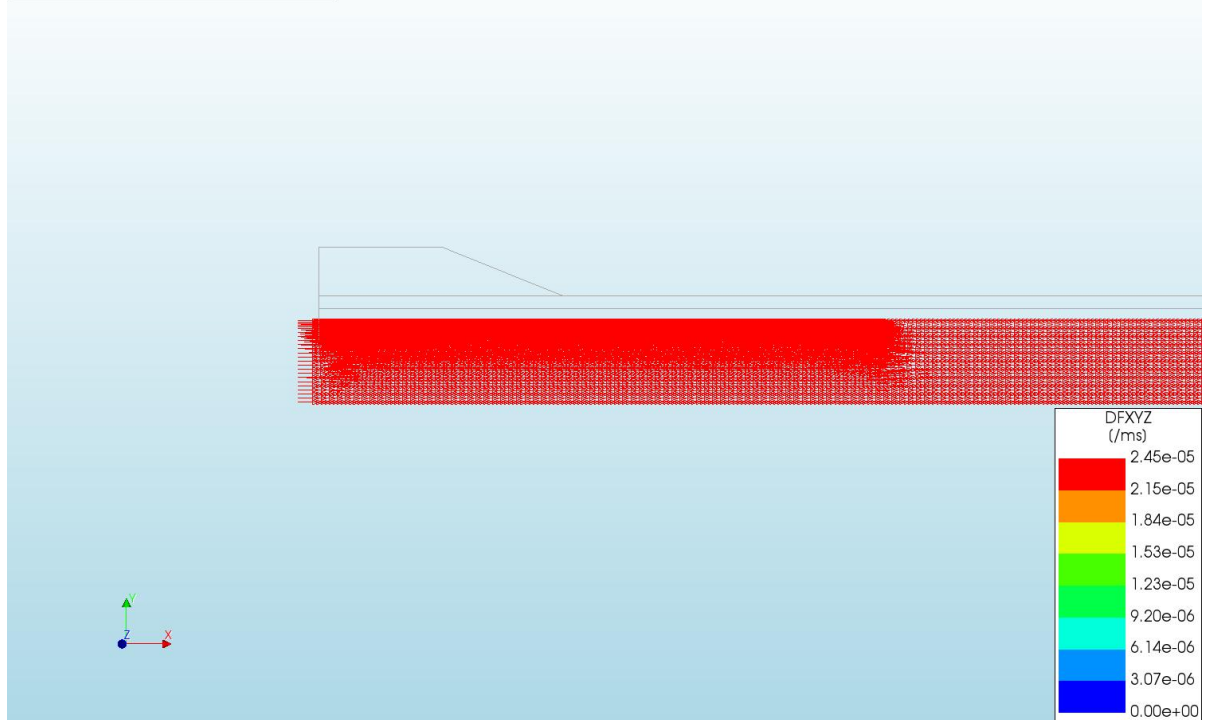
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 30.88kN/m<sup>2</sup>



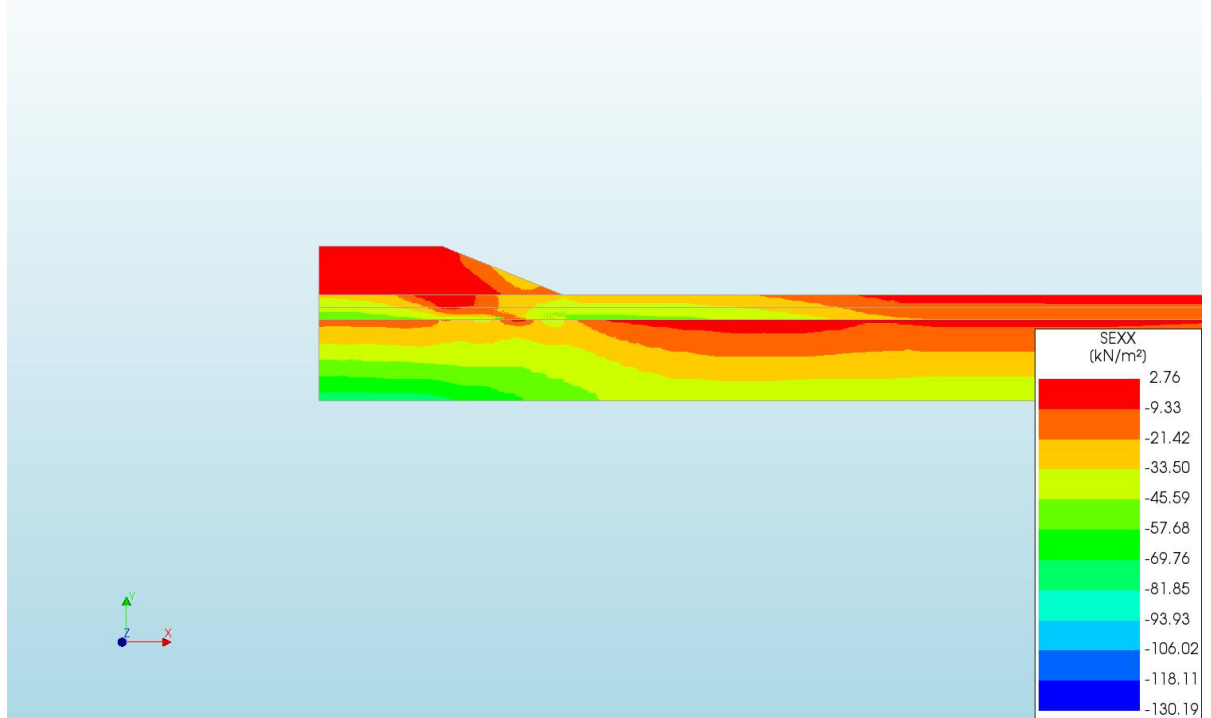
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.87m



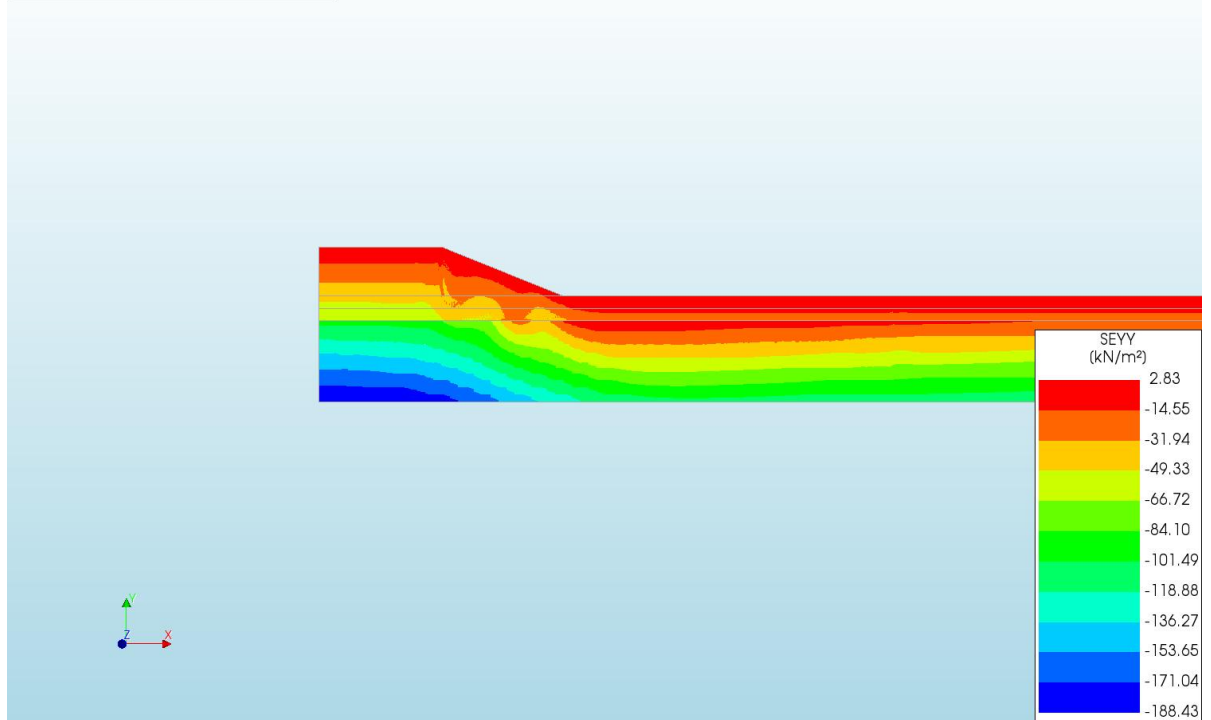
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 2.45e-05/ms



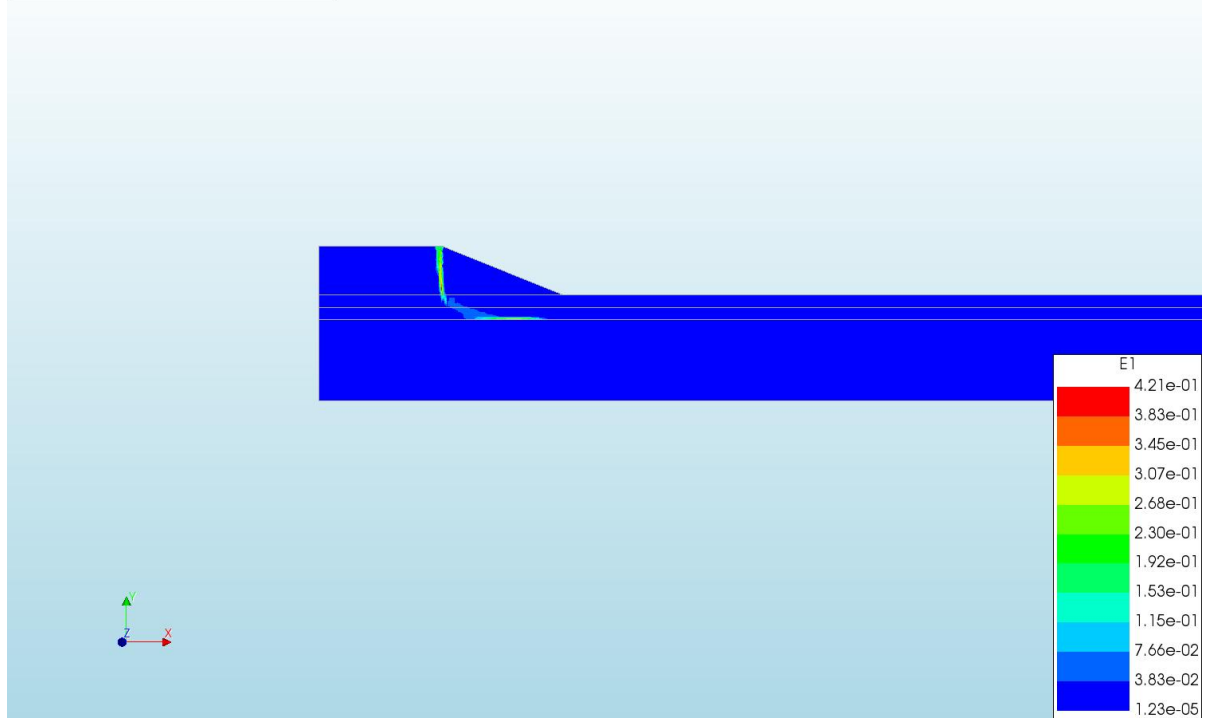
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Cauchy Effective Stresses S<sub>EXX</sub>  
min: -130.19kN/m<sup>2</sup> max: 2.76kN/m<sup>2</sup>



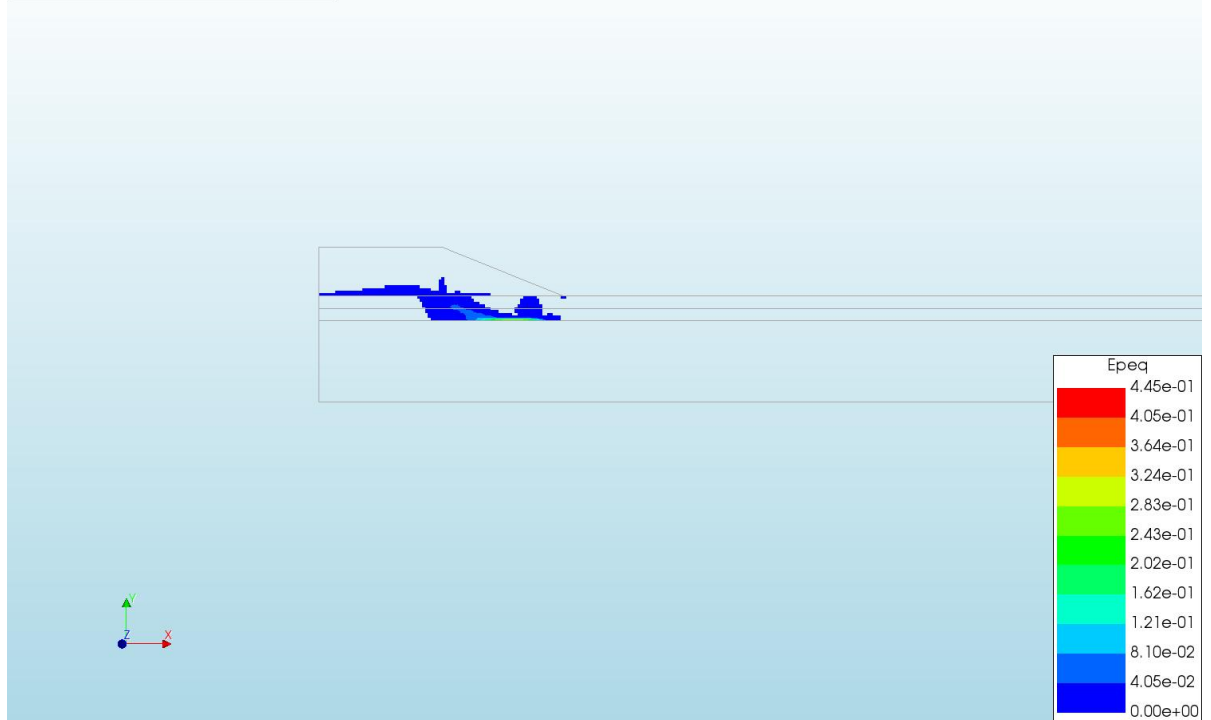
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Cauchy Effective Stresses S<sub>EYY</sub>  
min: -188.43kN/m<sup>2</sup> max: 2.83kN/m<sup>2</sup>



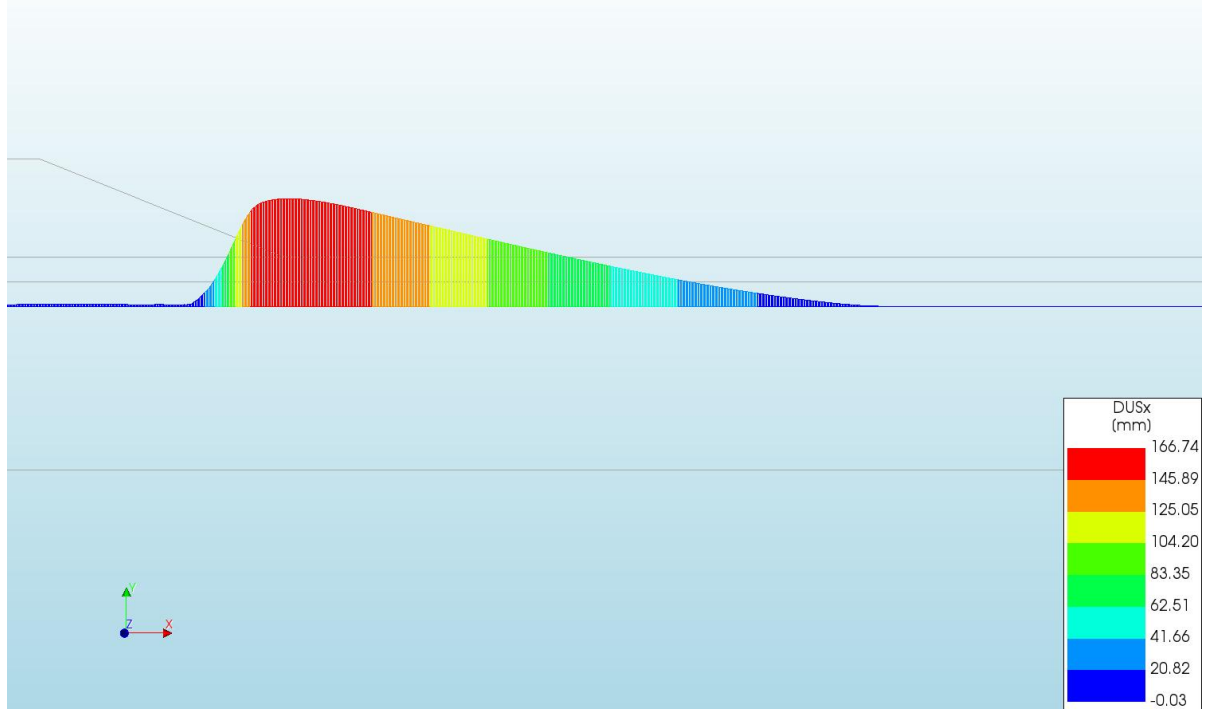
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Total Strains E1  
min: 1.23e-05 max: 4.21e-01



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 4.45e-01



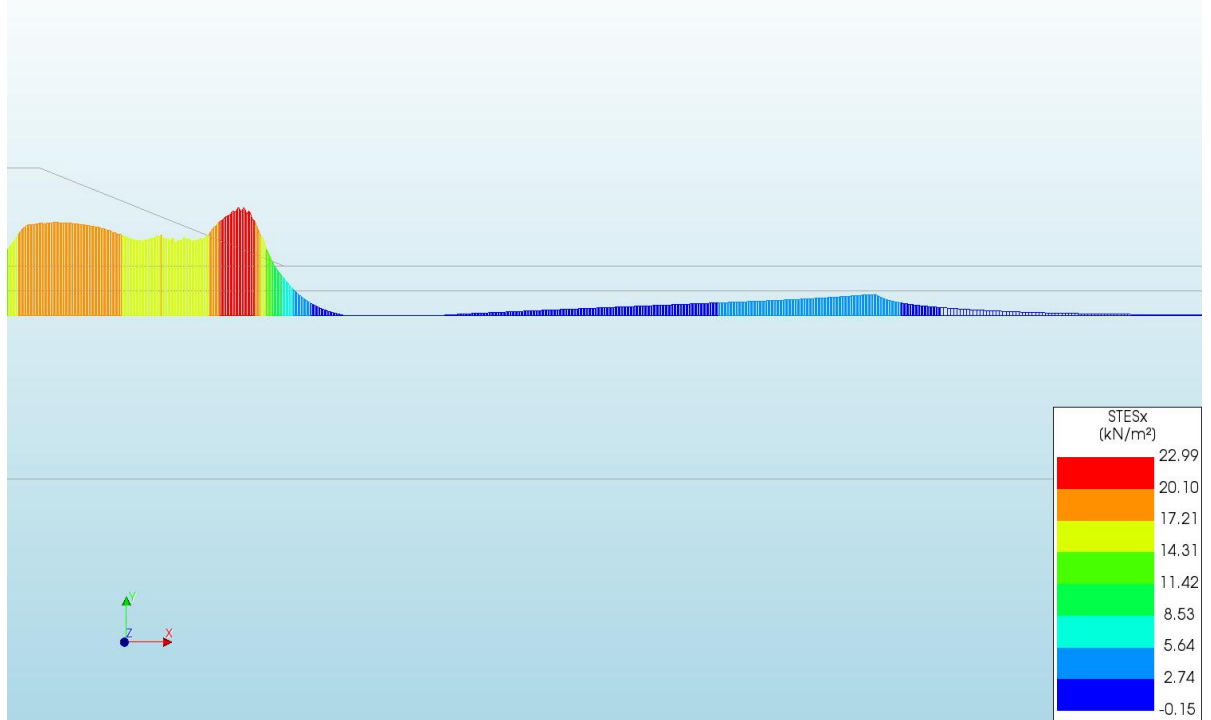
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 166.74mm



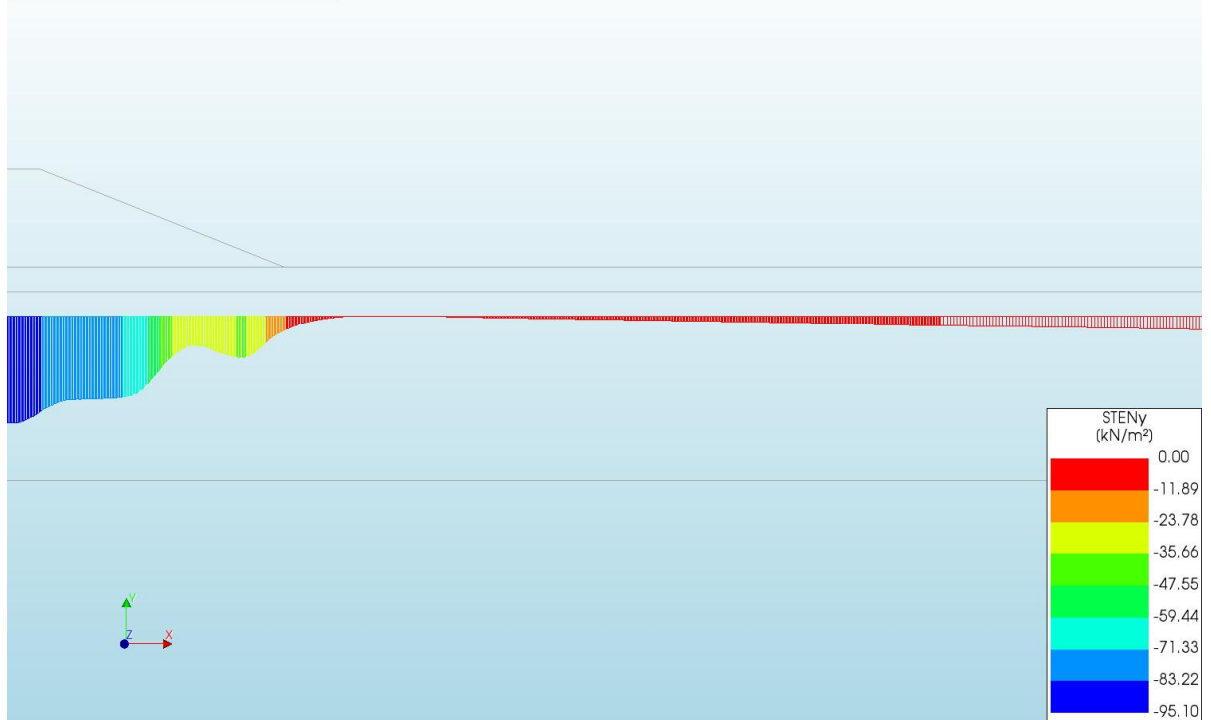
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.62mm max: 5.06mm

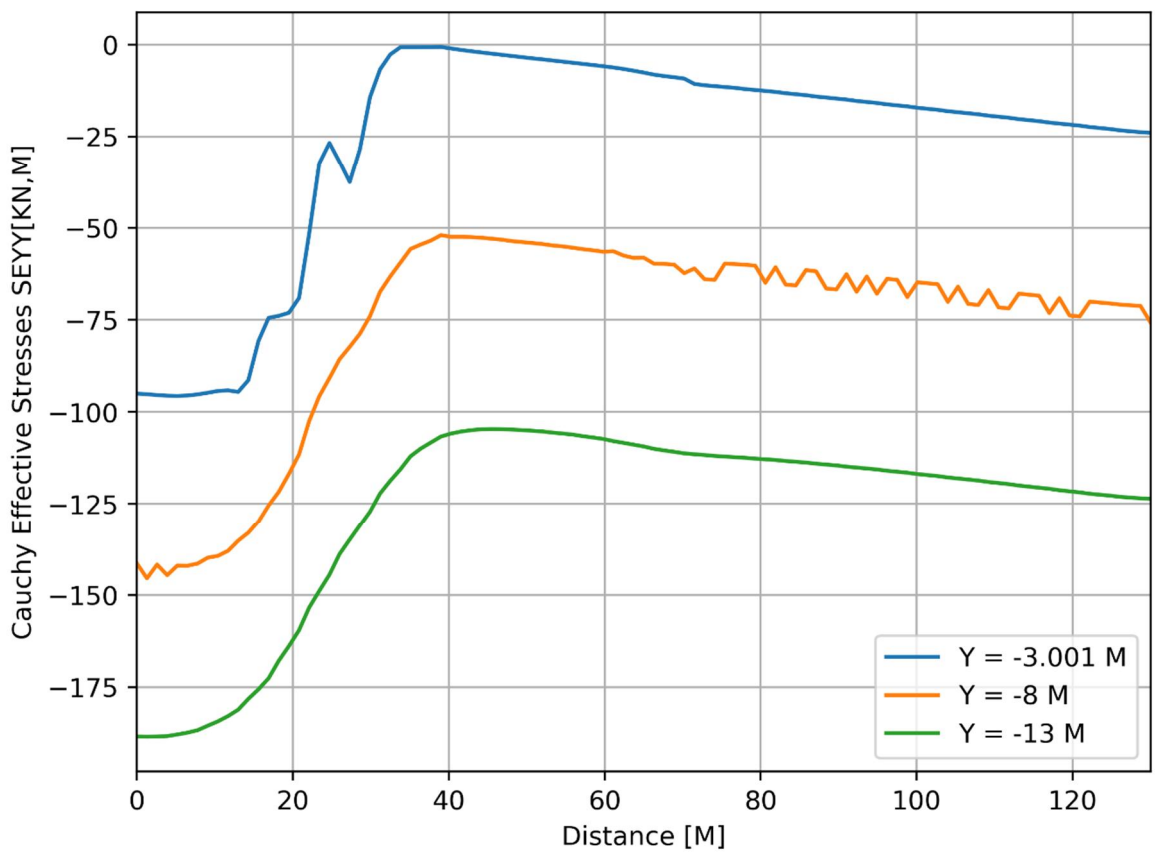
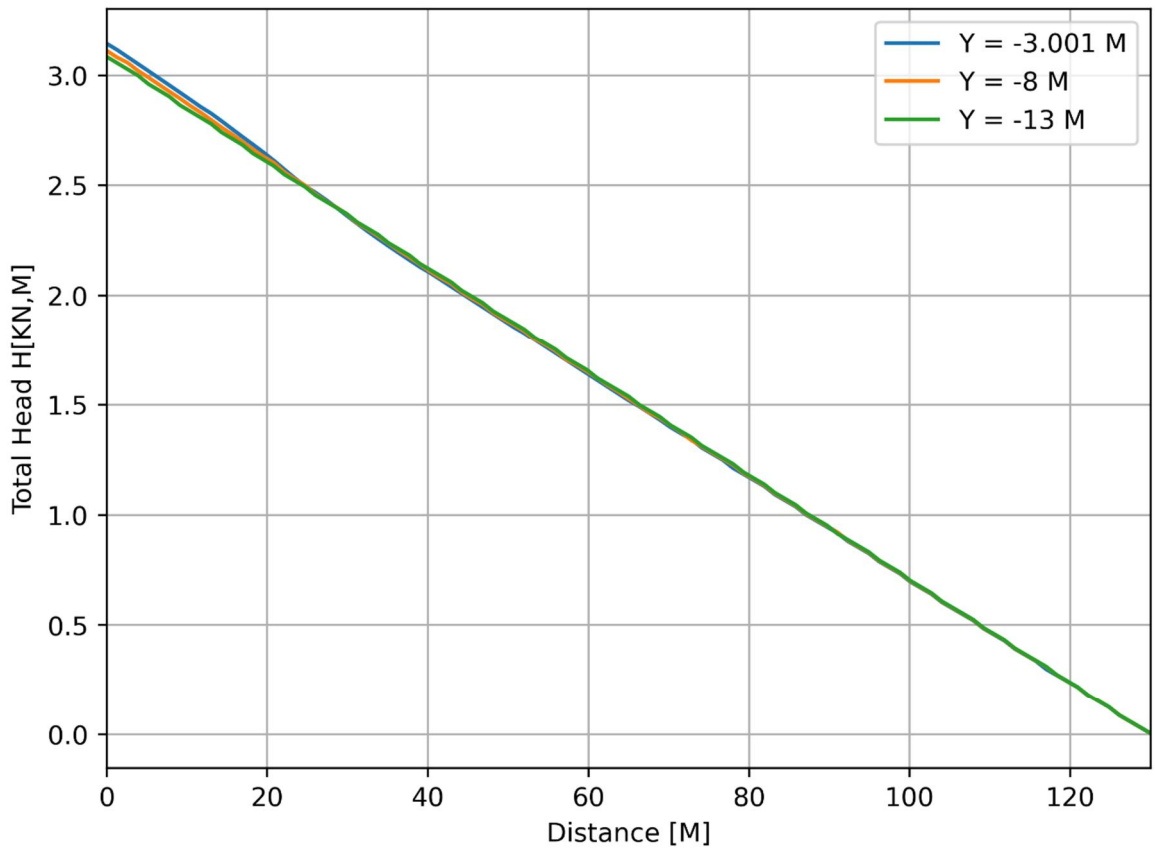


d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.15kN/m<sup>2</sup> max: 22.99kN/m<sup>2</sup>

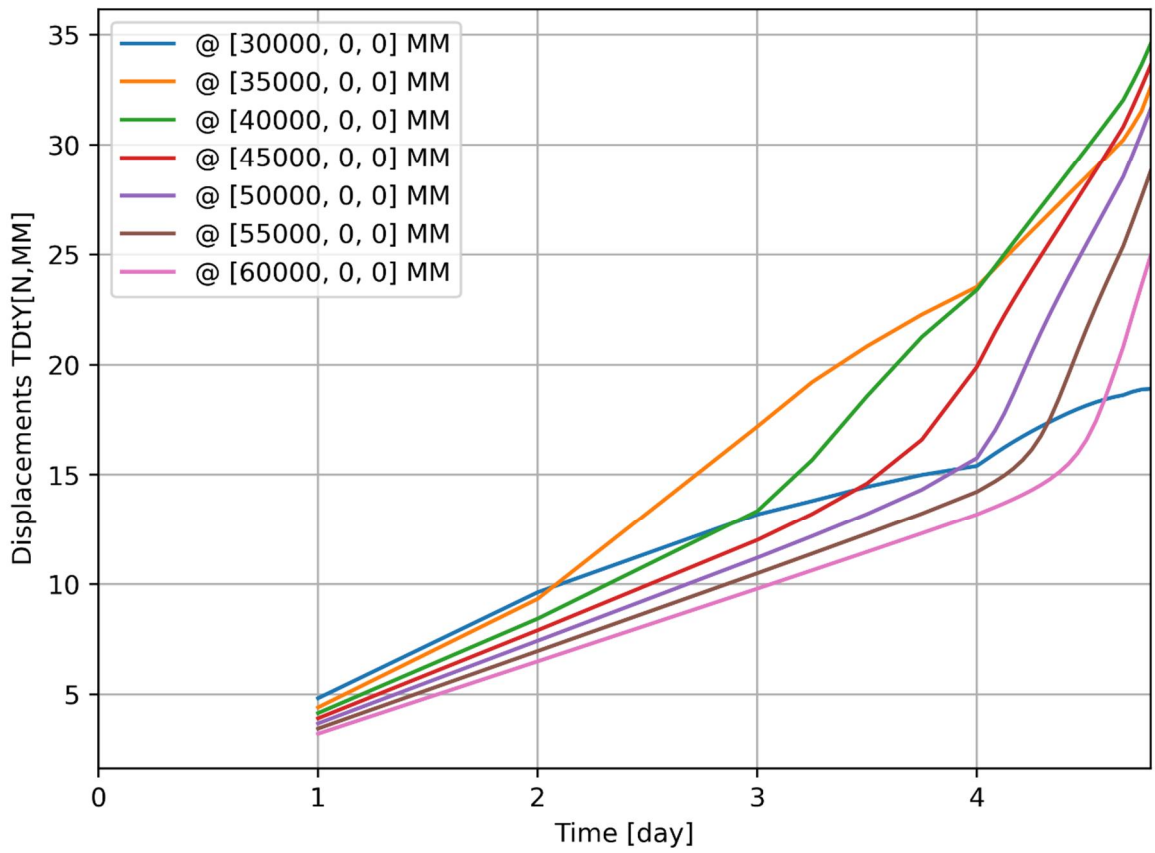
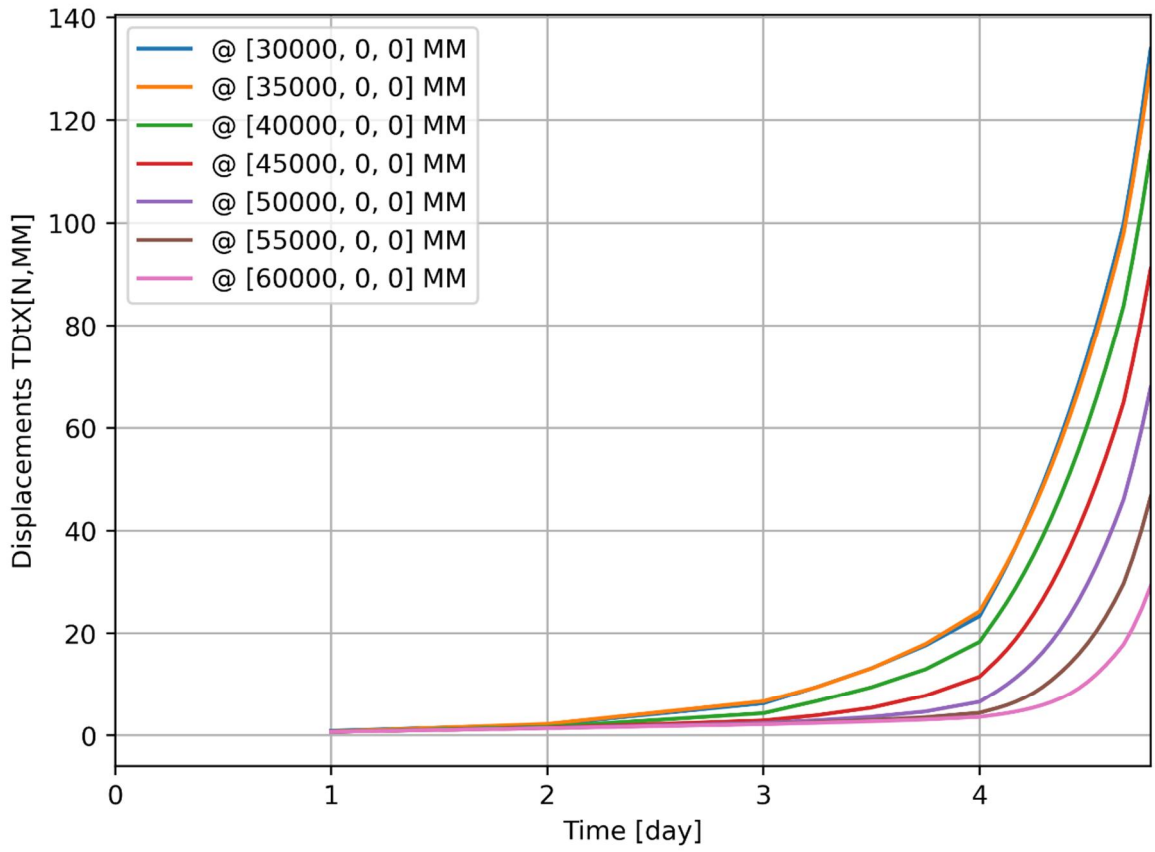


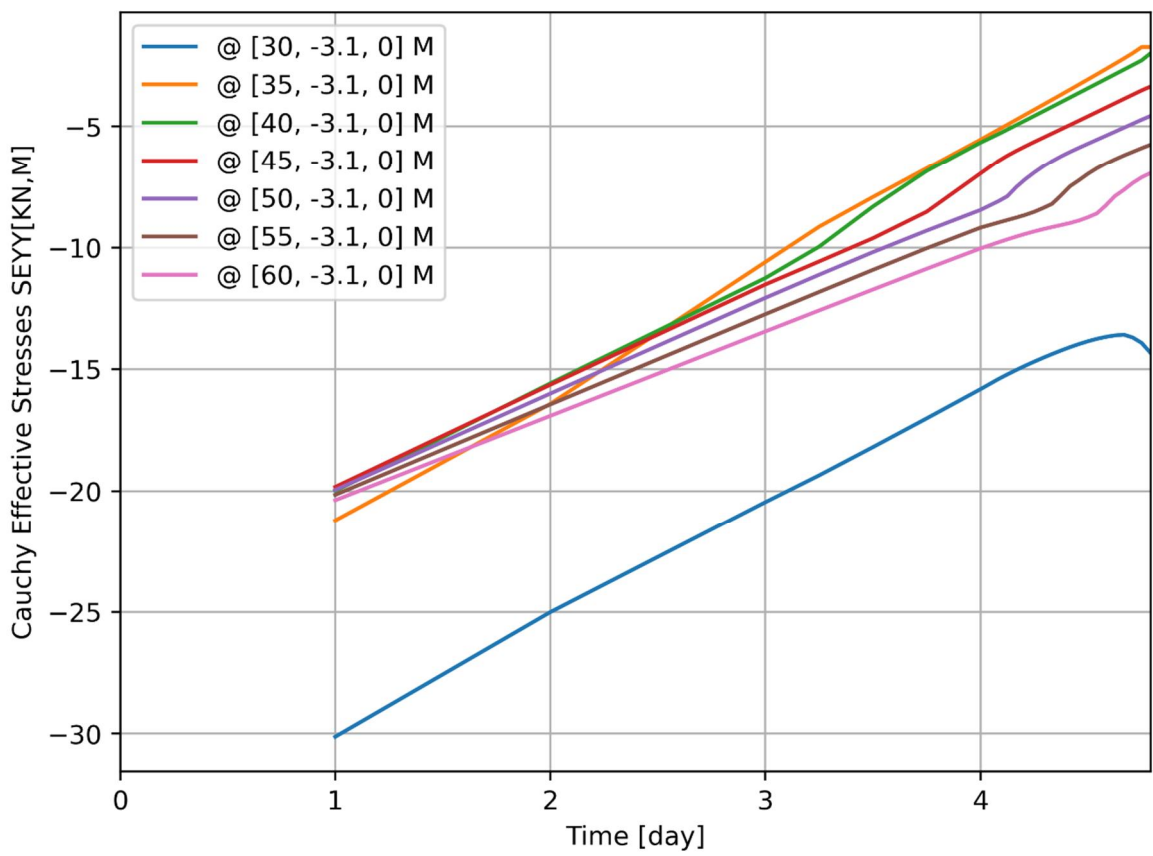
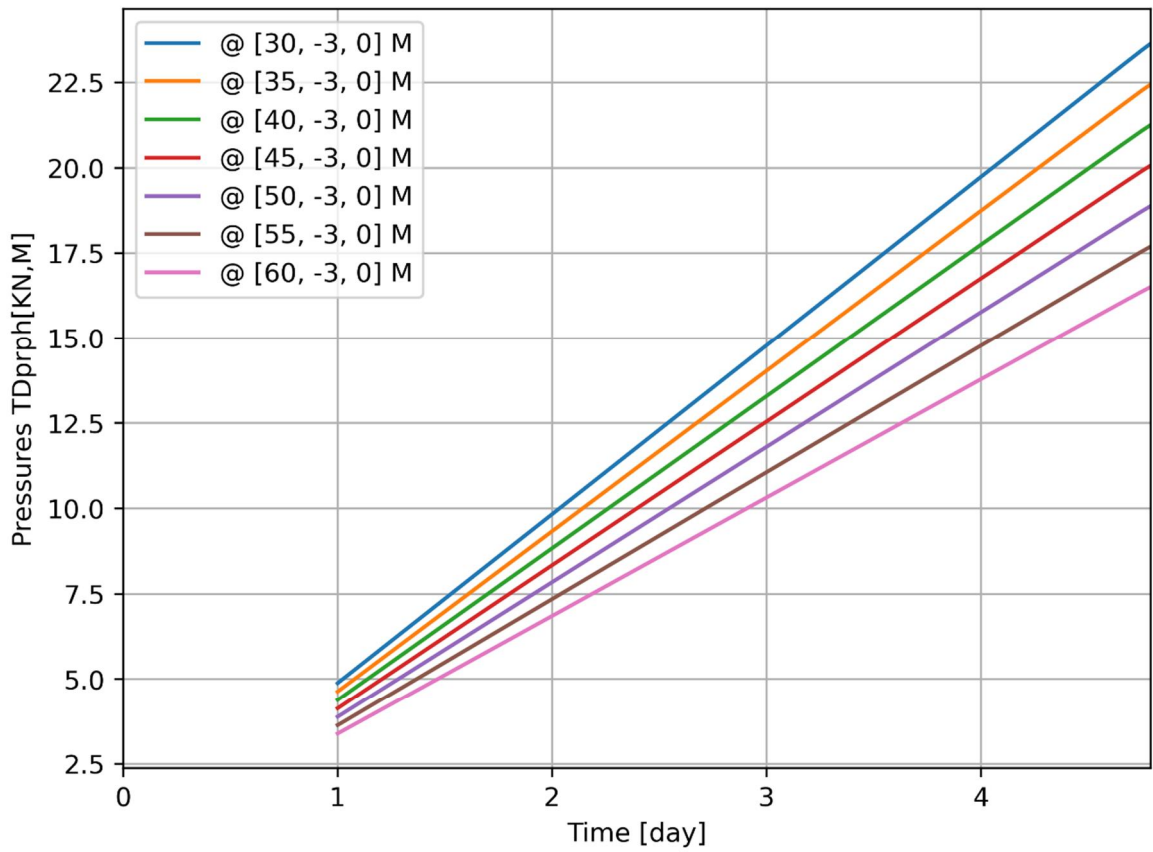
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=1\_20200927  
Phase 2, Time-step 31, Time 4 day 19 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -95.10kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>

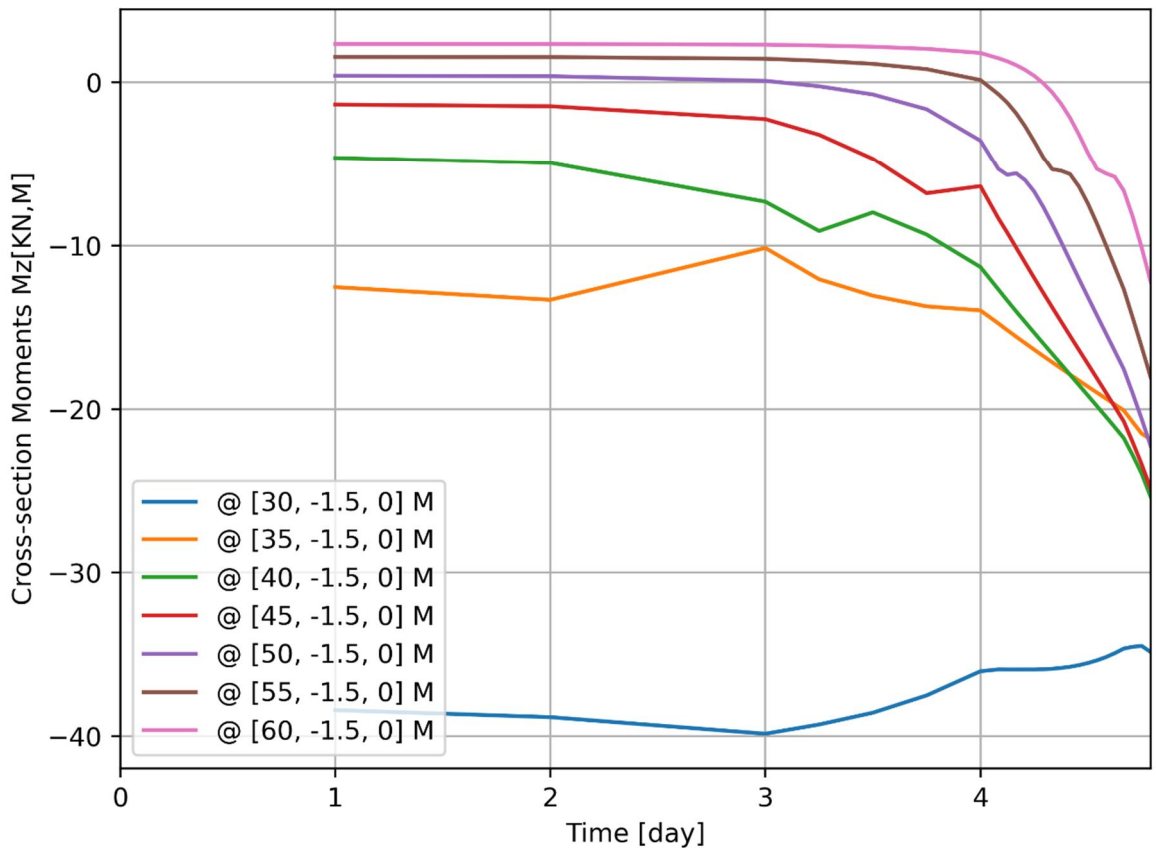
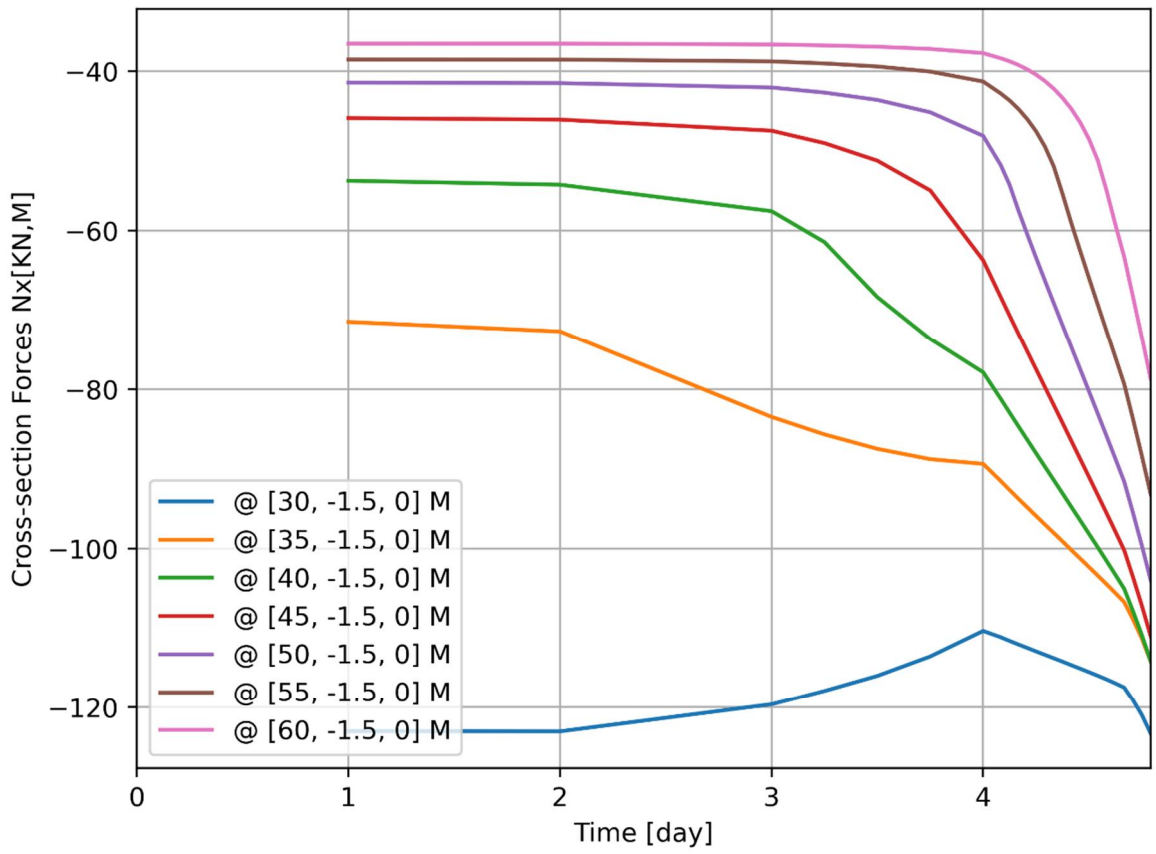








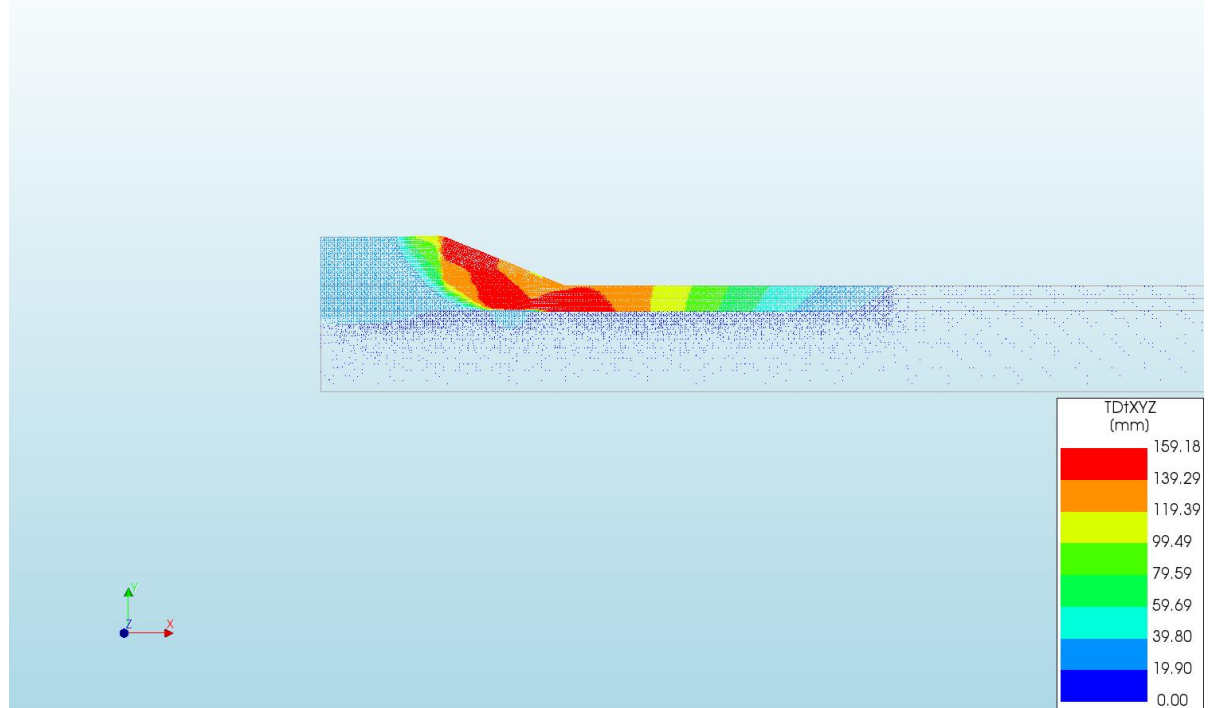




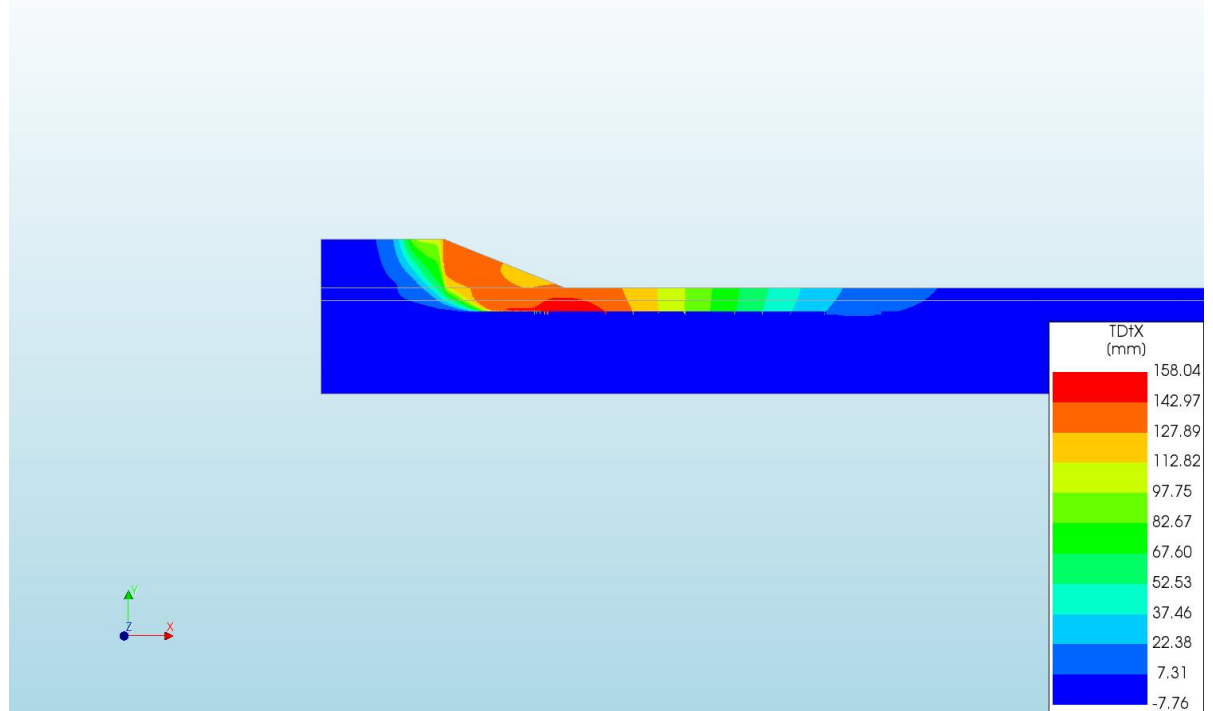
A.3.7

Output d=3 c=18 E=3 k=1e-07 tc=5\_20200927

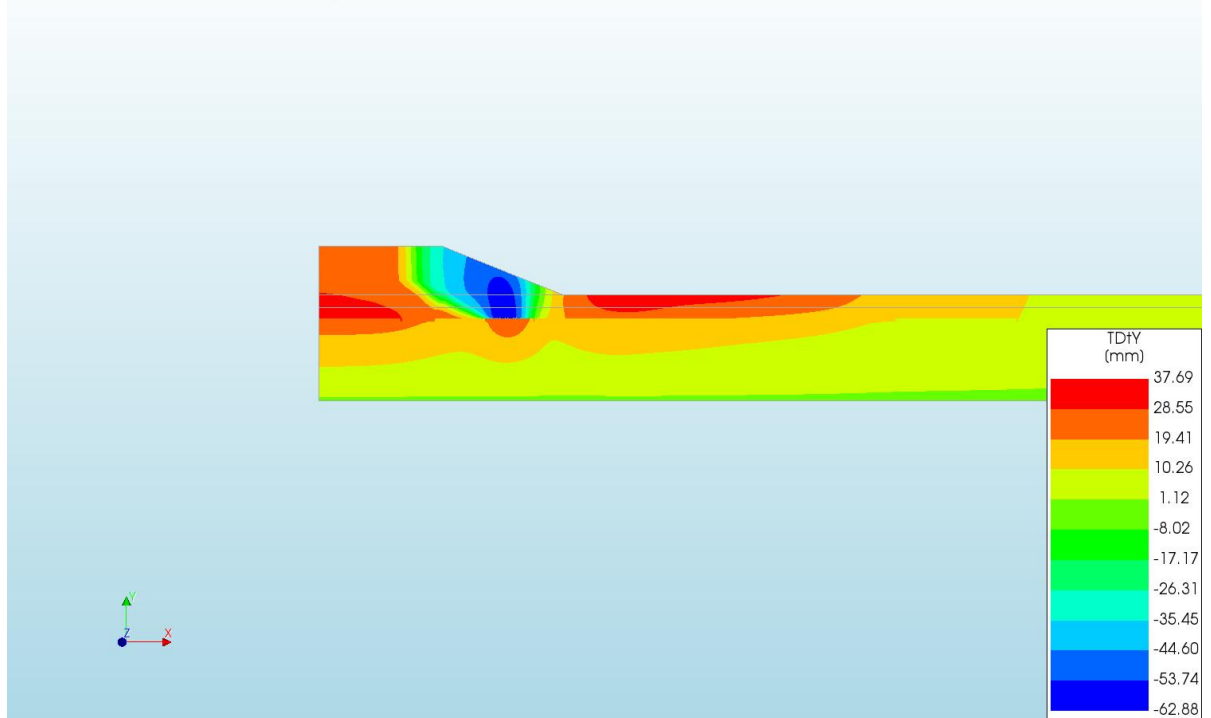
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Displacements TDtXYZ  
 min: 0.00mm max: 159.18mm



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_tc=5\_20200927  
 Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
 Displacements TDtX  
 min: -7.76mm max: 158.04mm



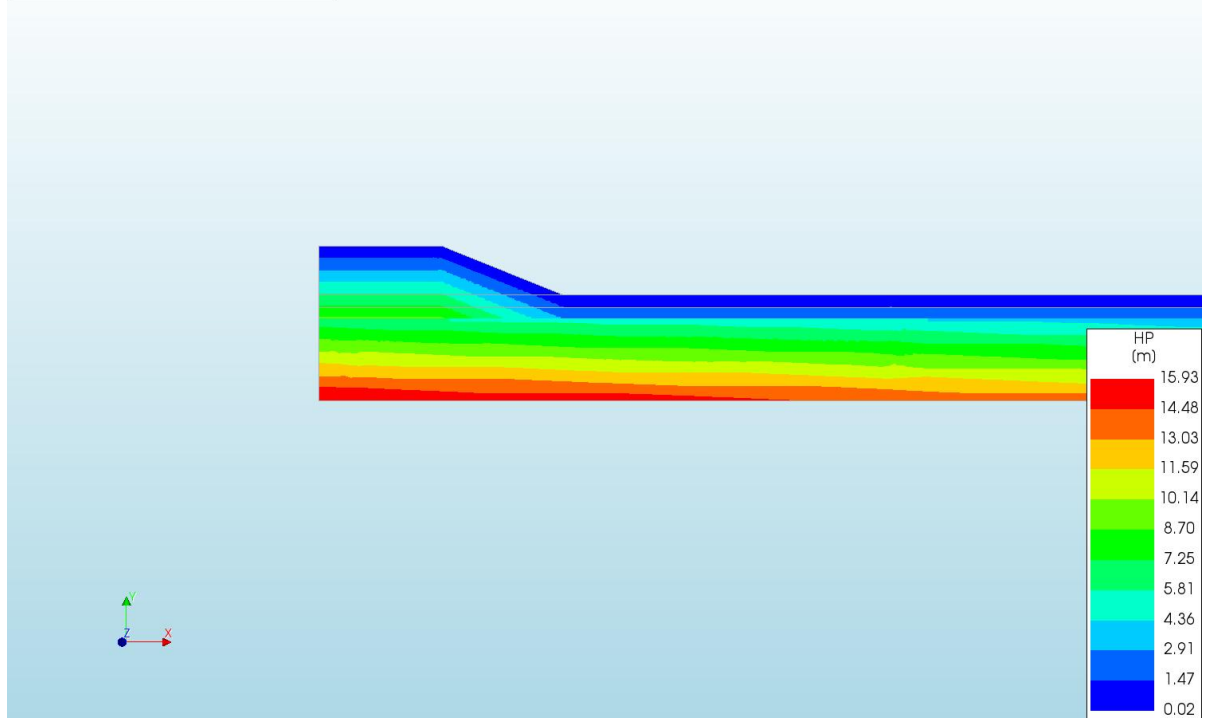
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Displacements TDfY  
min: -62.88mm max: 37.69mm



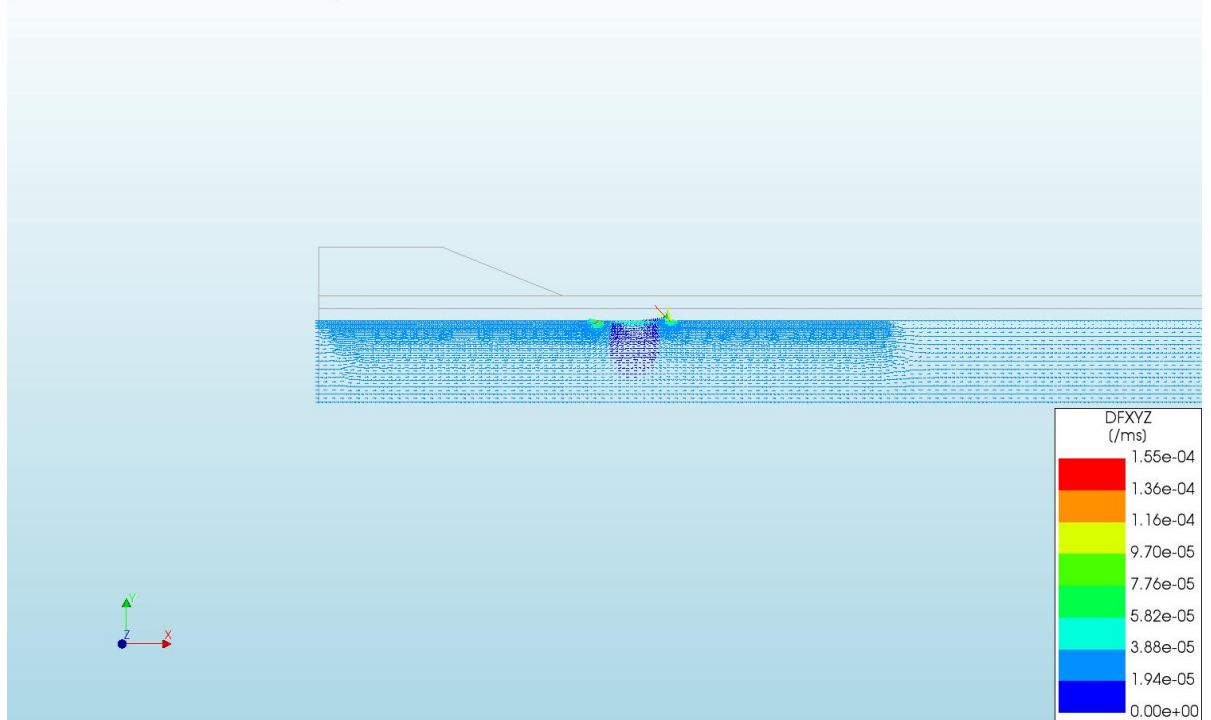
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Pressures TDprph  
min: 0.00kN/m<sup>2</sup> max: 31.42kN/m<sup>2</sup>



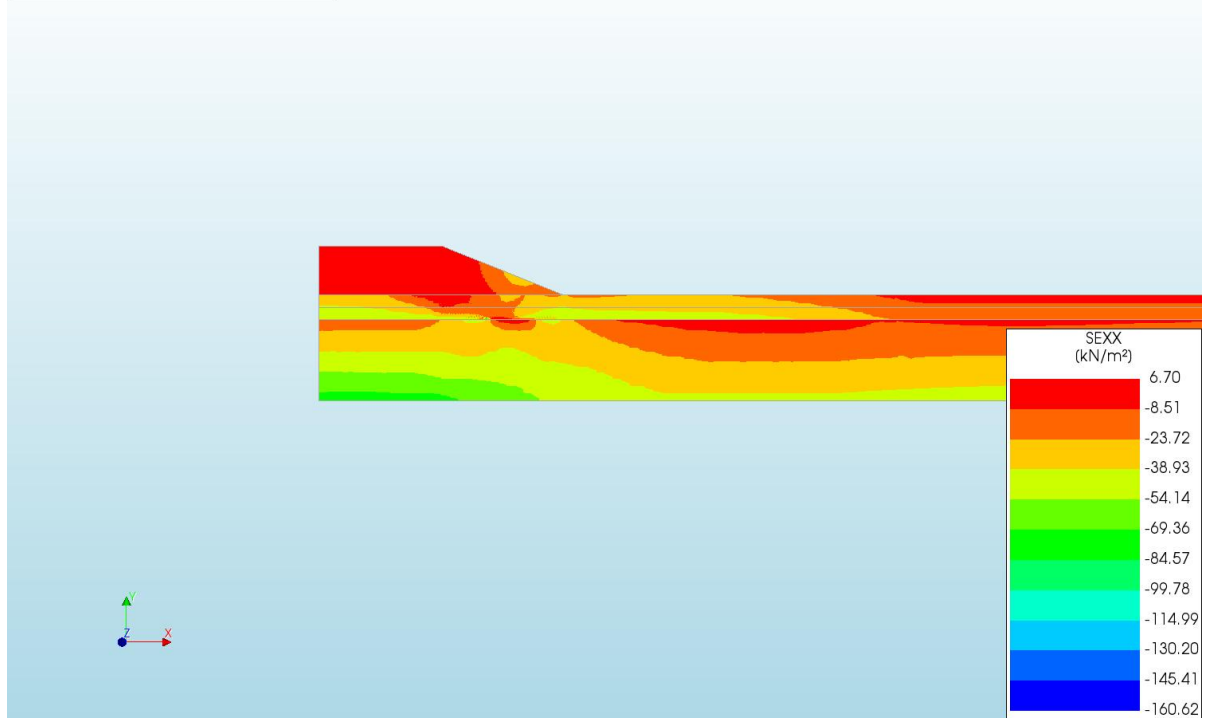
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Pressure Head HP  
min: 0.02m max: 15.93m



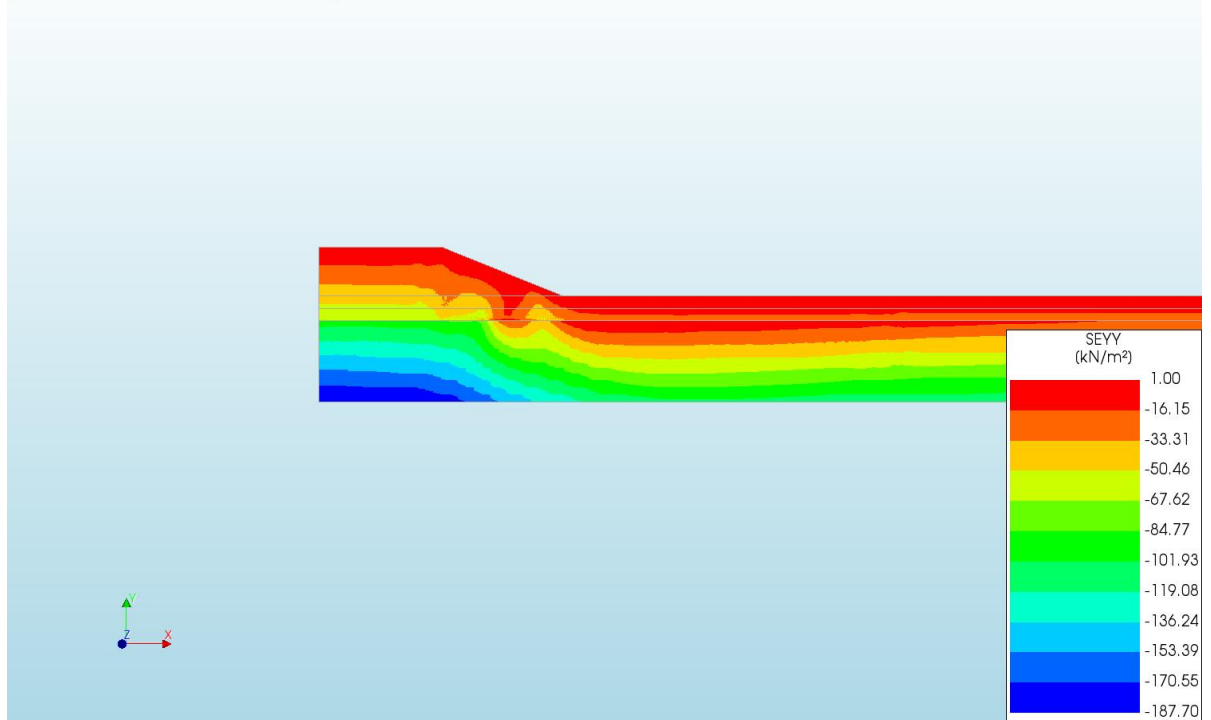
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Darcy Flux DFXYZ  
min: 0.00e+00/ms max: 1.55e-04/ms



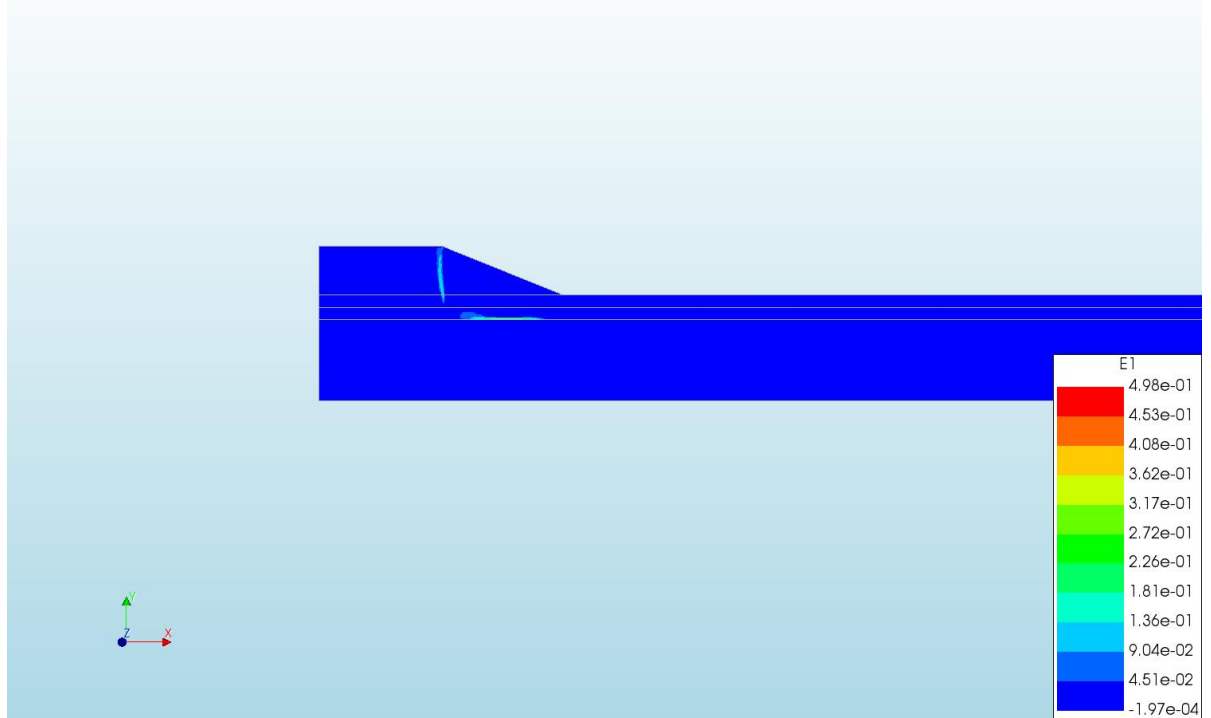
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Cauchy Effective Stresses SEXX  
min: -160.62kN/m<sup>2</sup> max: 6.70kN/m<sup>2</sup>



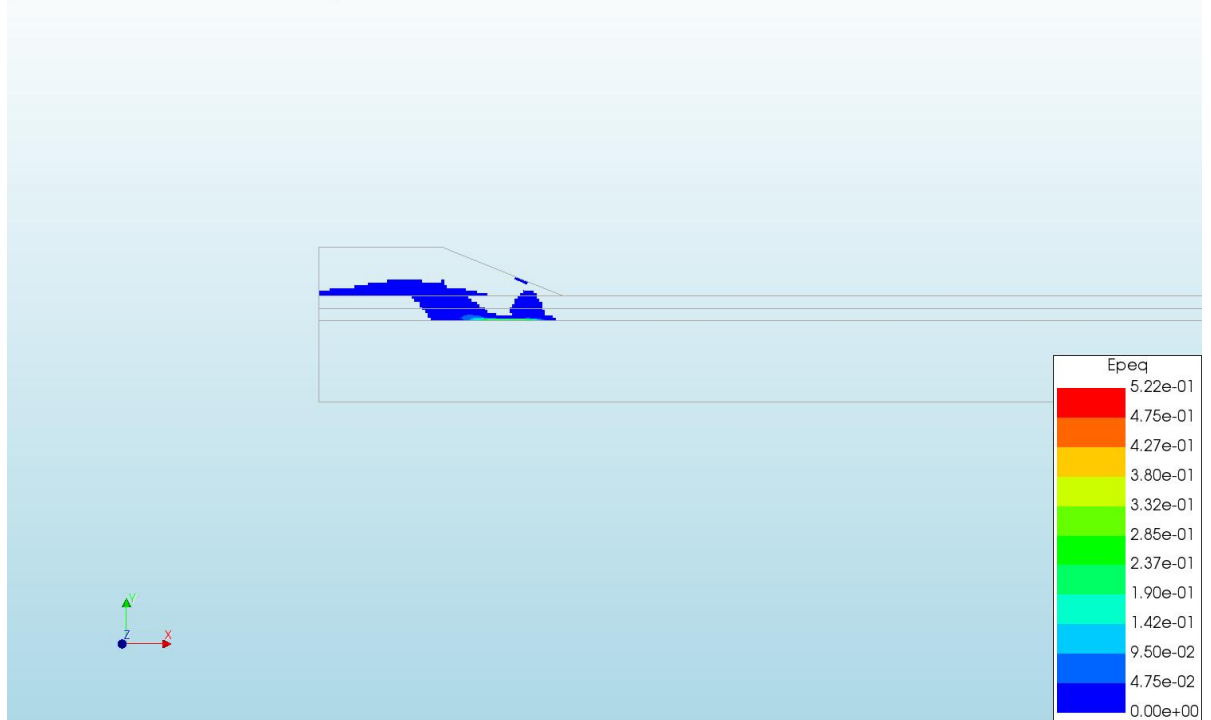
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Cauchy Effective Stresses SEYY  
min: -187.70kN/m<sup>2</sup> max: 1.00kN/m<sup>2</sup>



d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Total Strains E1  
min: -1.97e-04 max: 4.98e-01

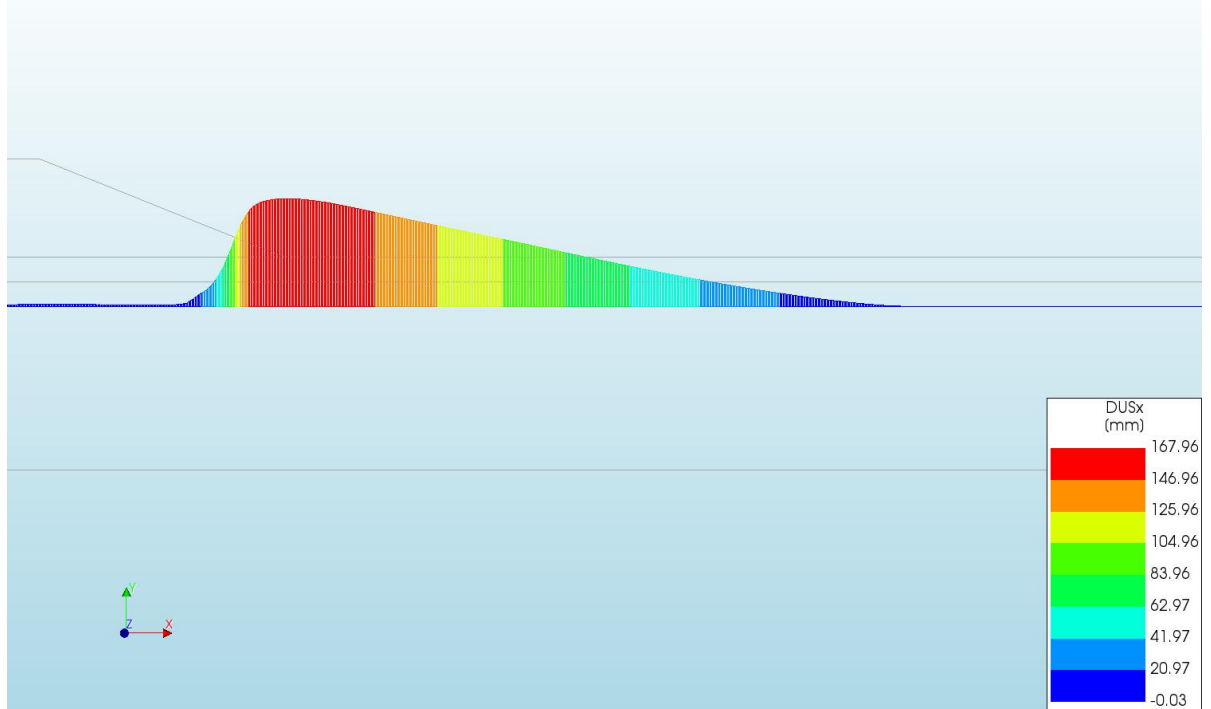


d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Plastic Strains Epeq  
min: 0.00e+00 max: 5.22e-01





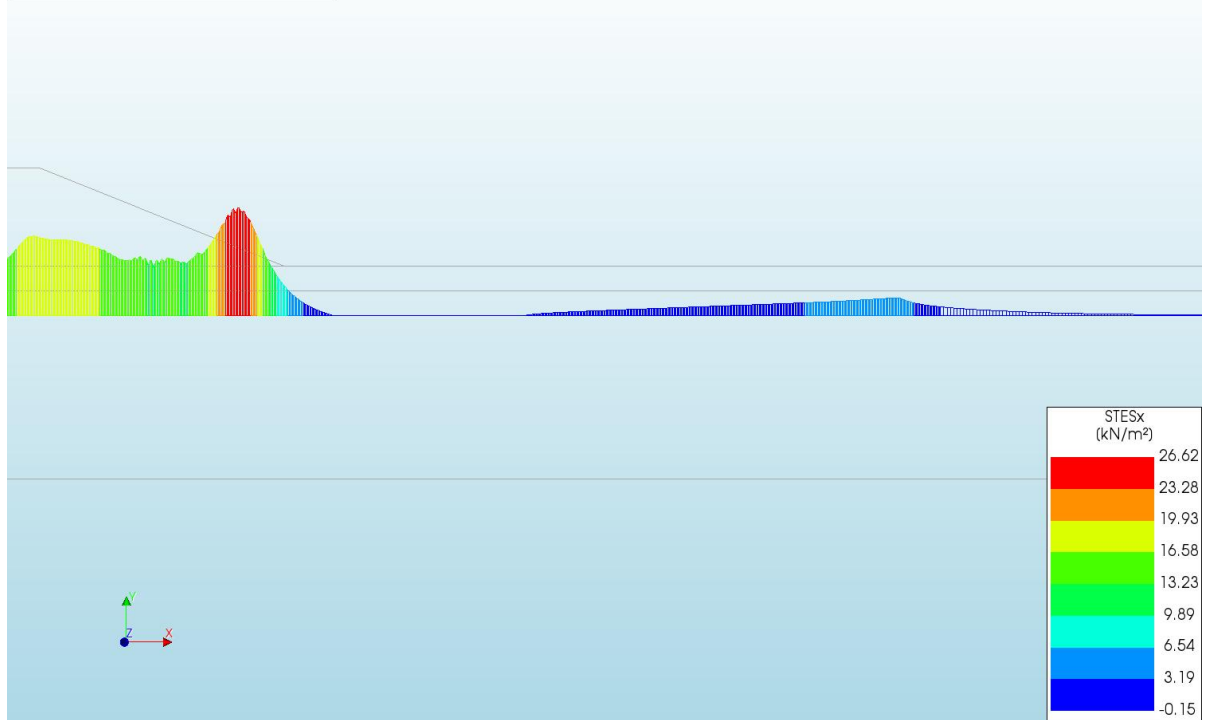
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Relative Displacements DUSx  
min: -0.03mm max: 167.96mm



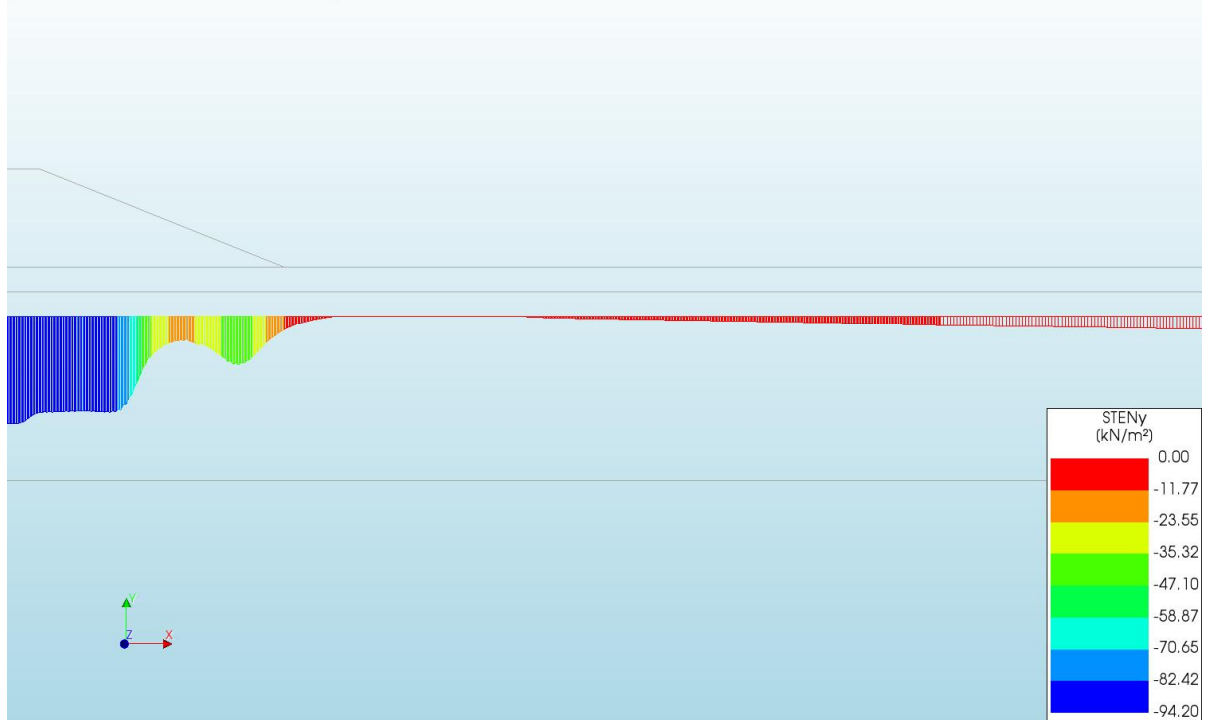
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Relative Displacements DUNy  
min: -14.44mm max: 7.09mm

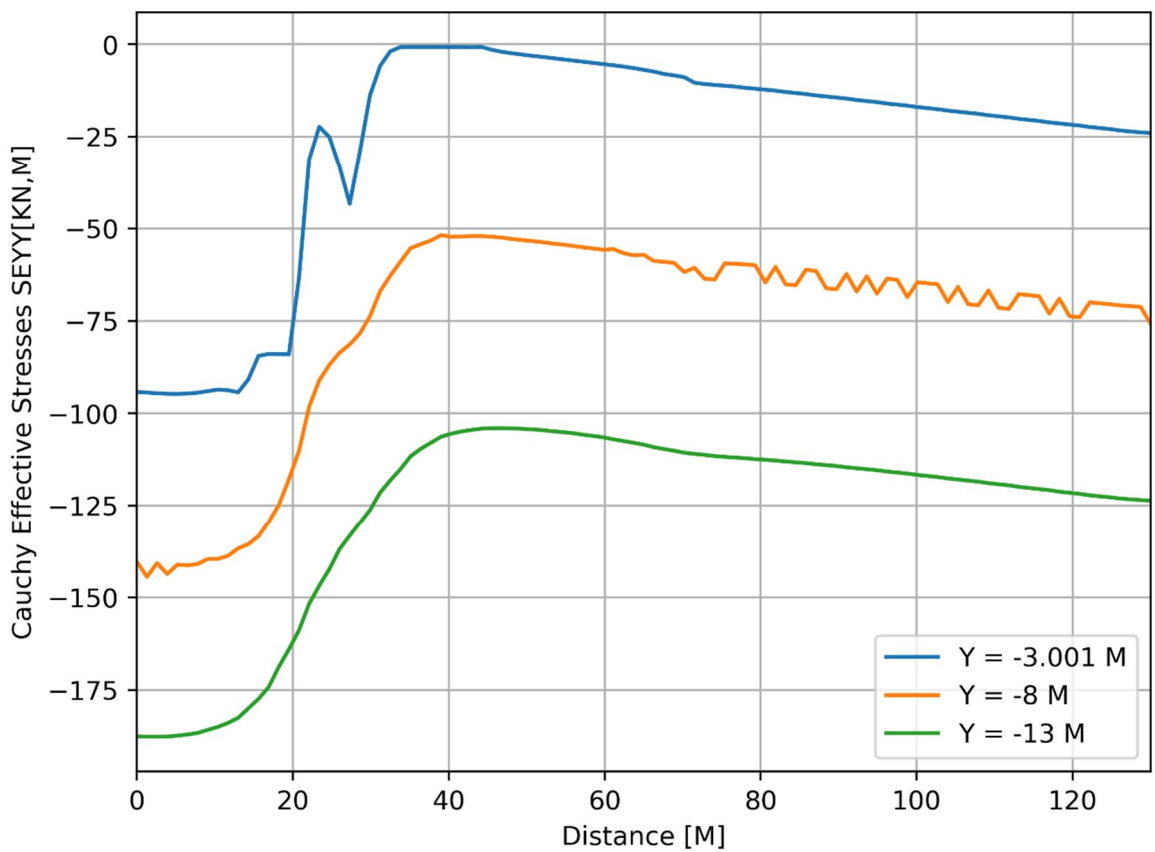
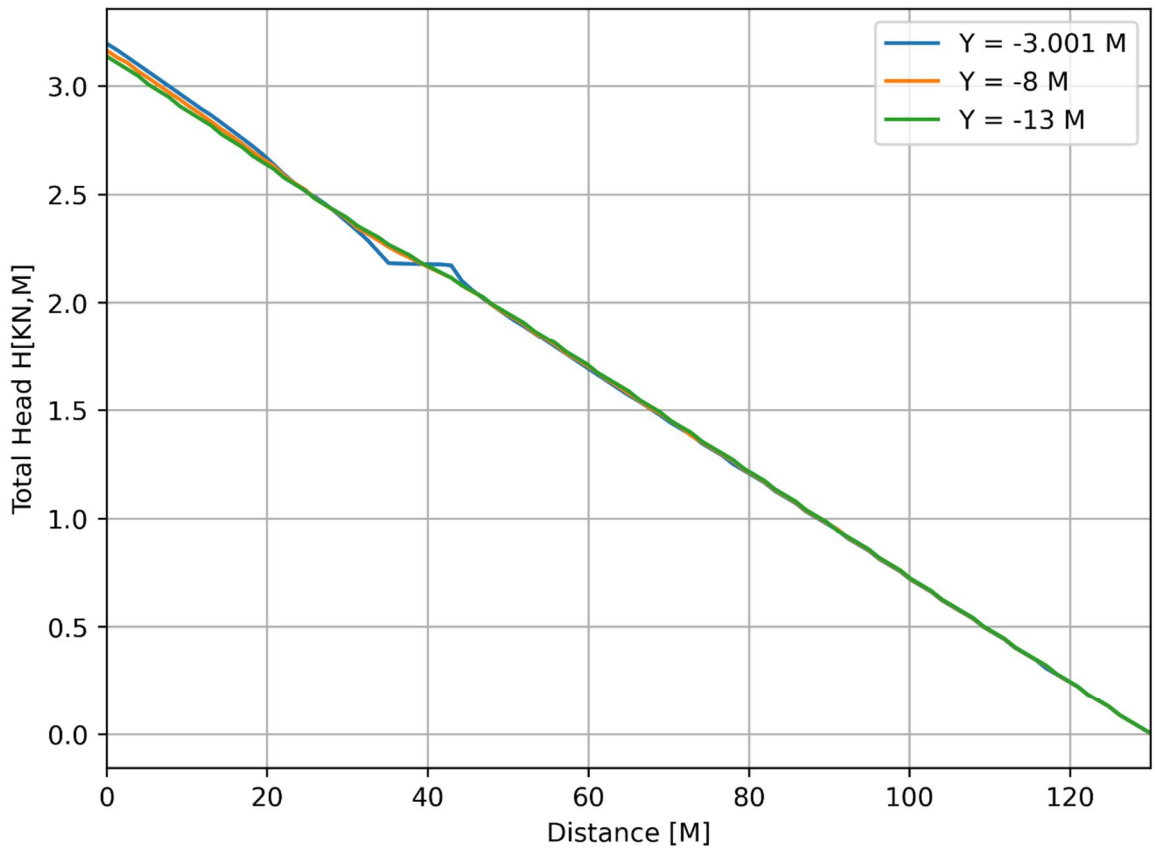


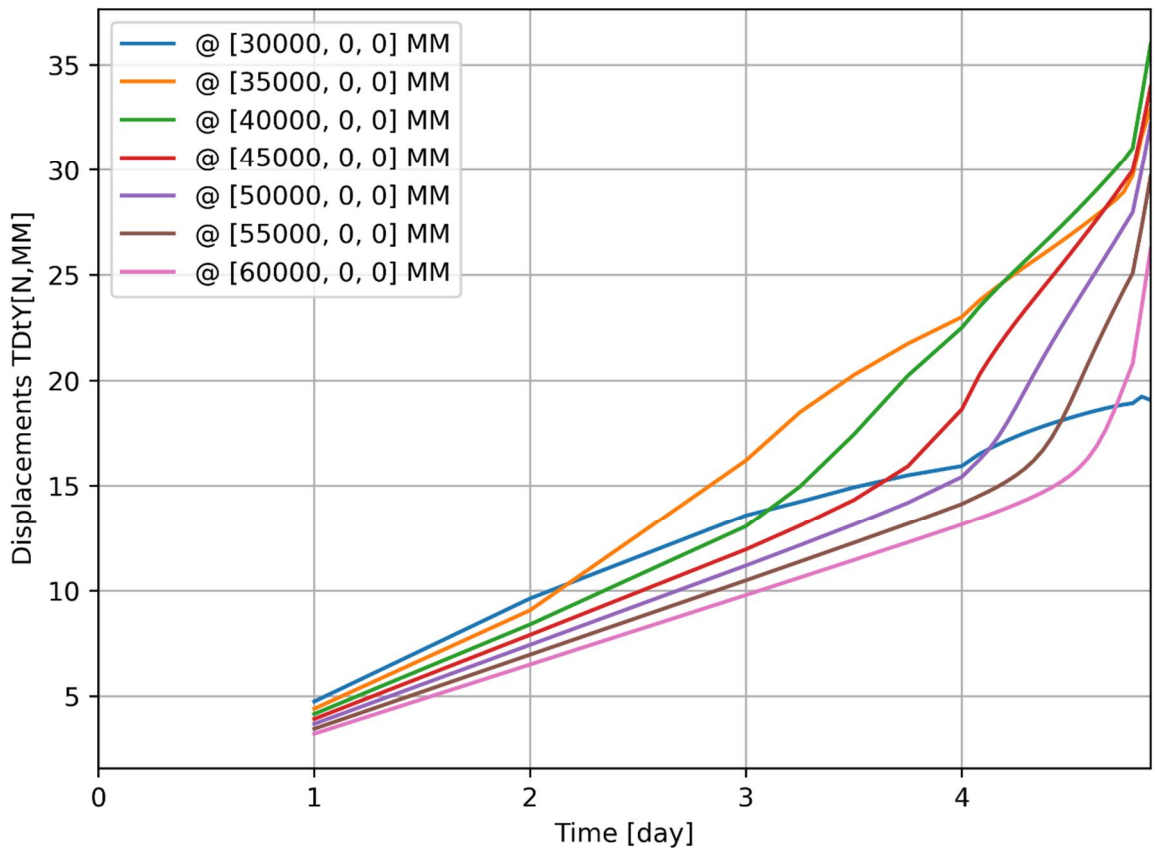
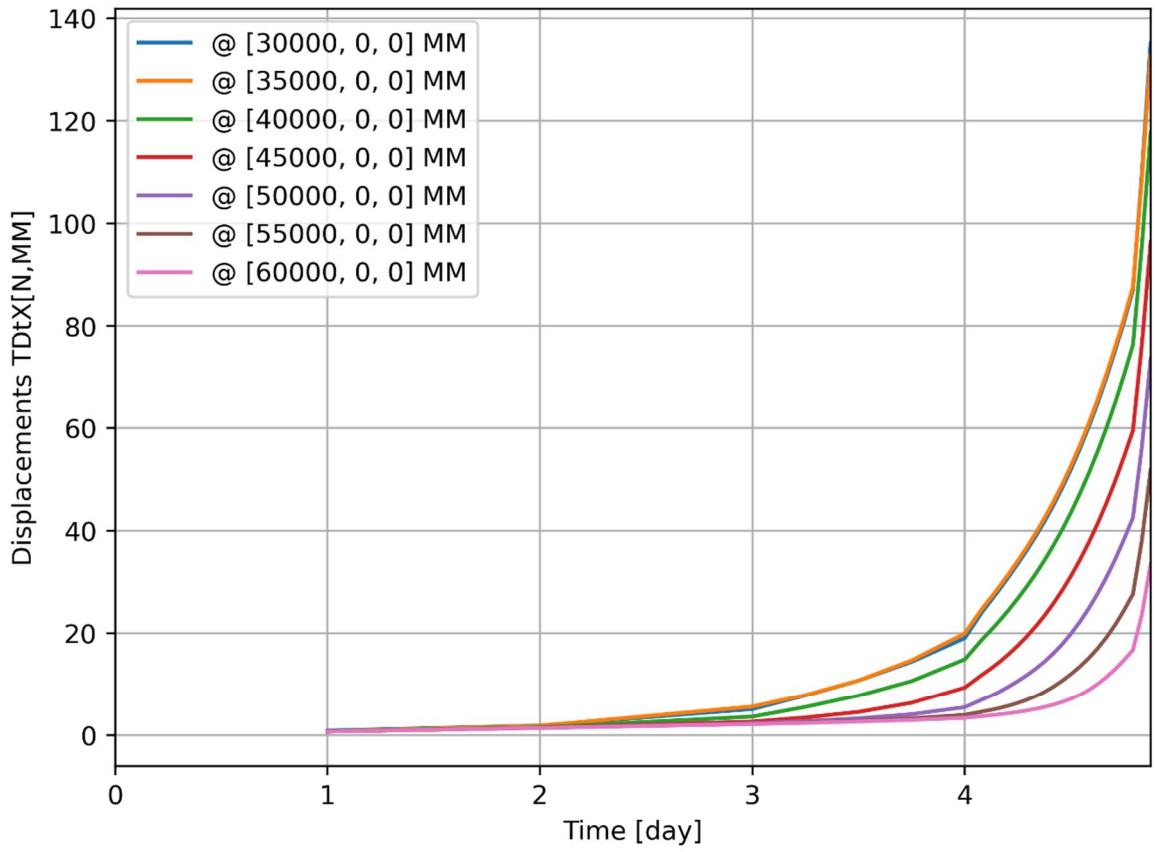
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Effective Traction STESx  
min: -0.15kN/m<sup>2</sup> max: 26.62kN/m<sup>2</sup>

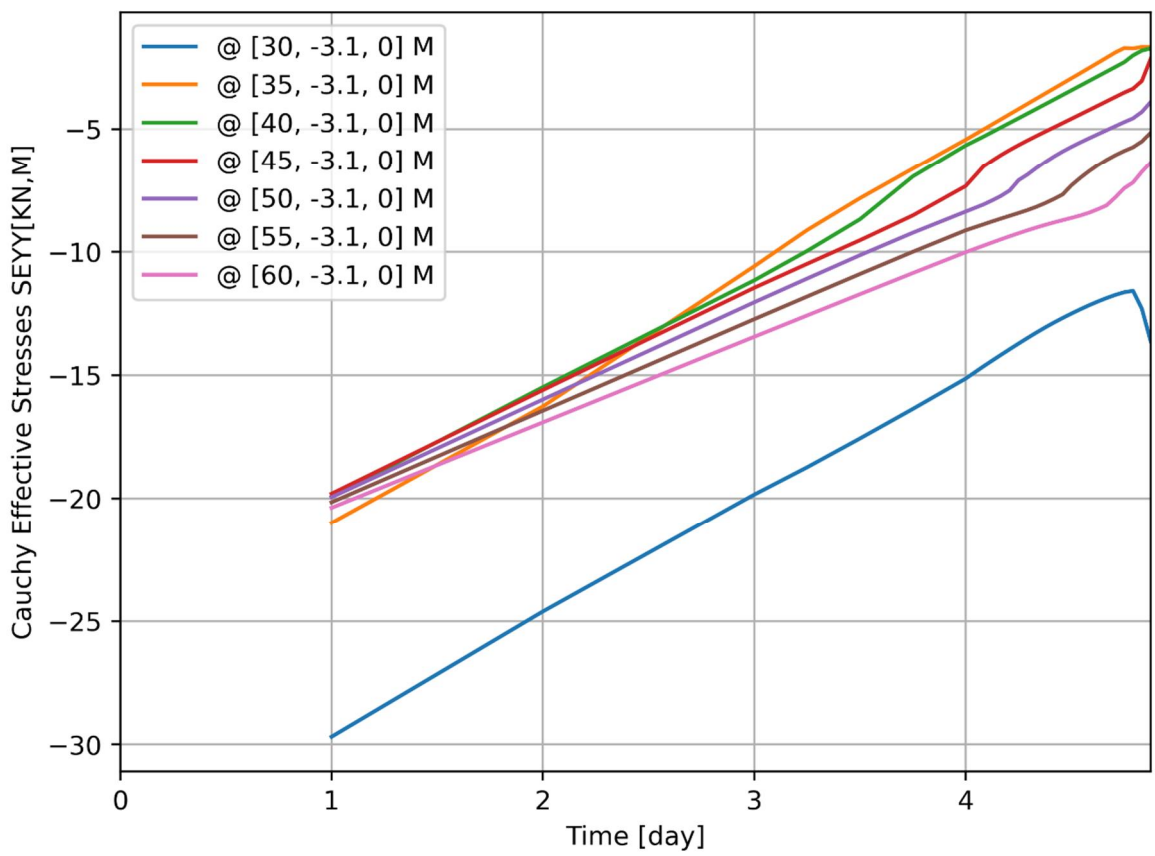
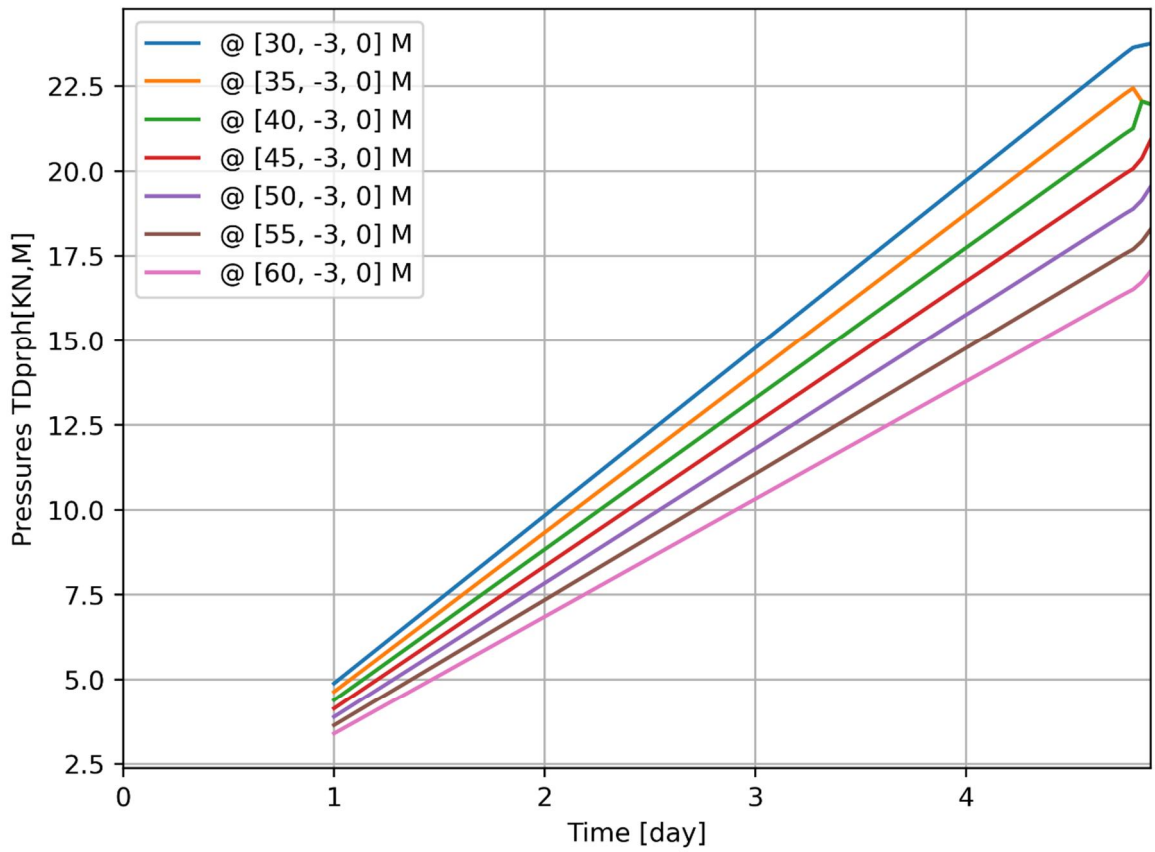


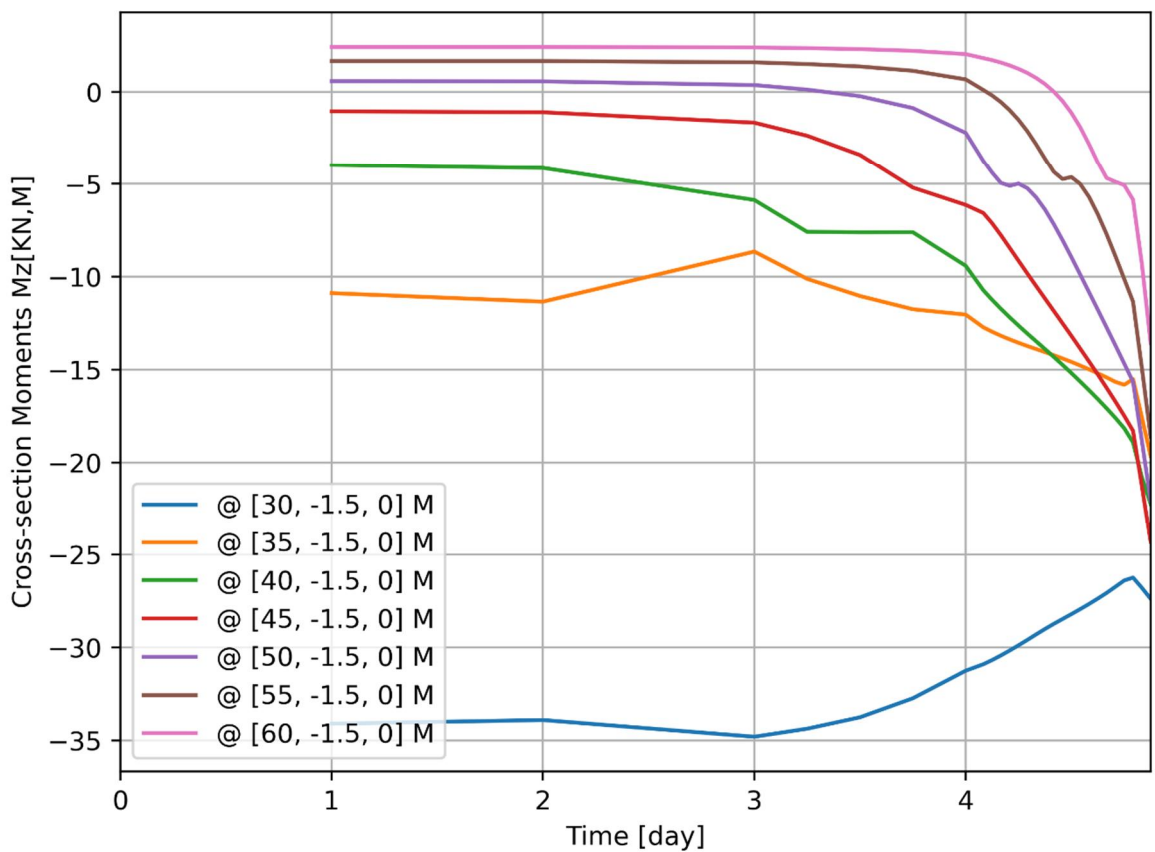
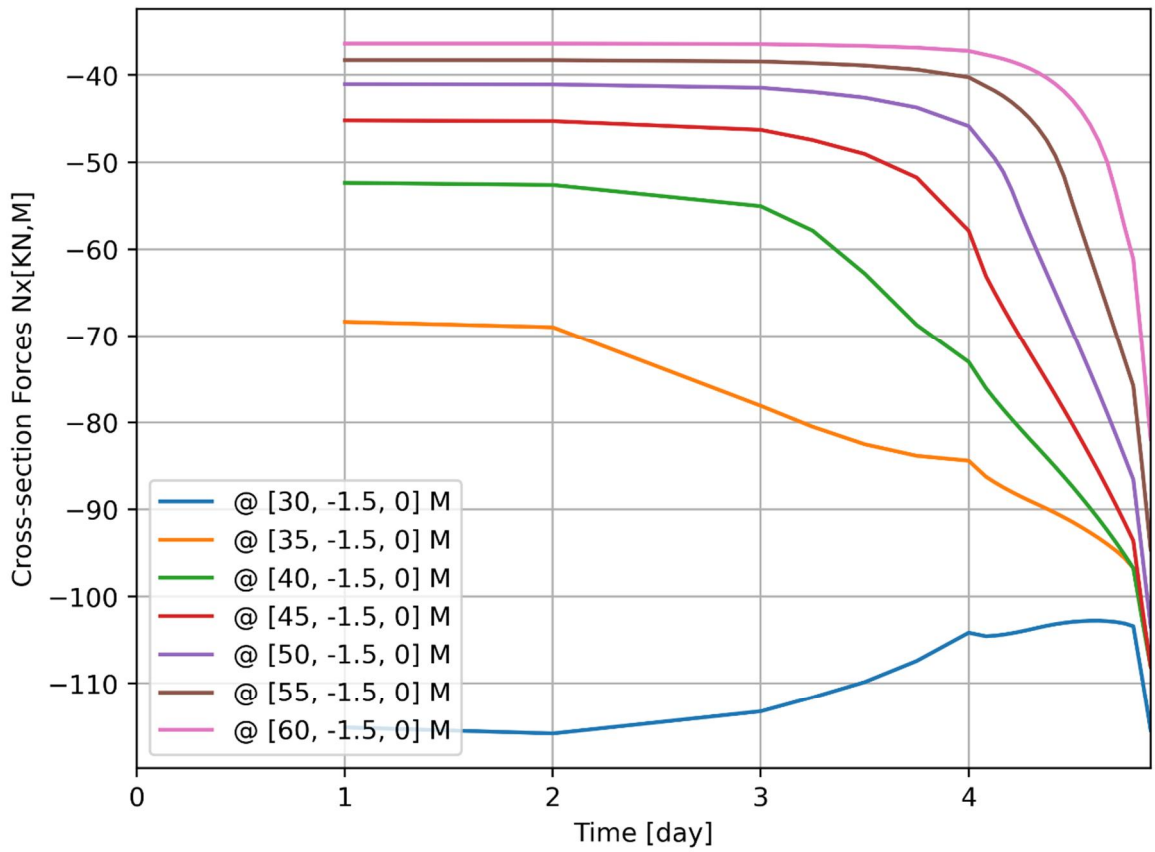
d=3\_c=18\_E=3\_k=1e-07\_fc=5\_20200927  
Phase 2, Time-step 33, Time 4 day 21 hour  
Interface Effective Traction STENy  
min: -94.20kN/m<sup>2</sup> max: 0.00kN/m<sup>2</sup>











## B Methode berekening vervormingen bij opdrijven door middel van lamellen

Sinds de jaren 90 wordt in de Nederlandse richtlijnen voor het controleren van de stabiliteit van dijken erkend dat vervorming van het achterland, zonder een passief afschuivende grondmoot, kan leiden tot grote vervormingen en afschuiven van de actieve grondmoot. Het achterland wordt daarbij ingedrukt zonder te bezwijken, waardoor de dijk echter wel afschuift en zakt. Het zakken van de actieve grondmoot kan worden geschat door middel van de lamellenmethode, zoals grofstoffelijk beschreven in de Leidraad 2 Appendix D (paragraaf B.1) en in meer detail in document LGM rapport SE-701120, Februari 1990 (paragraaf B.2). Omdat het genoemde LGM rapport geen openbaar toegankelijk document is, is de hierin beschreven methode grotendeels overgenomen in deze bijlage (LGM= Laboratorium voor Grondmechanica, voorganger van Grondmechanica Delft, GeoDelft en Deltares).

De door het achterland mobiliseerbare reactiekracht kan liggen tussen de neutrale gronddruk, waarbij geen aanvullende vervormingen optreden en de passieve gronddruk, waarbij passief bezwijken van de grond optreedt met doorgaande vervorming. Tussen deze uitersten kan een schatting worden gedaan van het meegeven van het achterland onder de aandrijvende kracht van de actieve grondmoot. Deze methode is nader uitgewerkt en verschenen in de bovengenoemde referenties. Een samenvatting hiervan, veelal met letterlijk overgenomen tekstdelen, staat in deze bijlage.

### B.1 Grotendeels overgenomen uit Leidraad 2 Appendix D

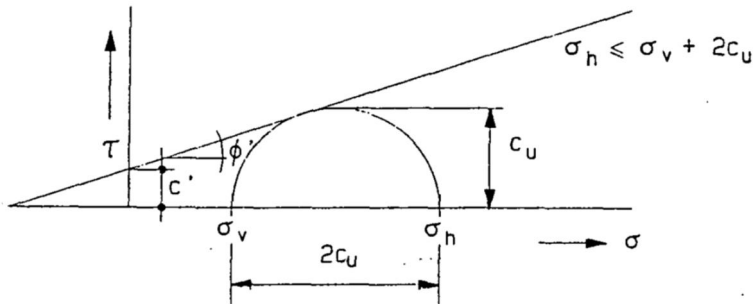
Met behulp van een eenvoudige berekening kan op basis van de gevonden geohydrologische randvoorwaarden een veilige schatting gemaakt worden van de stabiliteit. Afhankelijk van de te mobiliseren grondspanning aan de passieve zijde dient ook een vervormingsberekening te worden uitgevoerd. Te grote vervorming van het dijklichaam kan immers ook als "falen" worden beschouwd. Wanneer een gedetailleerder beeld van de te verwachten vervormingen gewenst is, of wanneer de geometrie niet met de eenvoudige berekening geschematiseerd kan worden, wordt aangeraden een eindige-elementenberekening uit te voeren.

Tijdens opdrijven kan in de drukstaaf een aanzienlijke toename van de horizontale belasting optreden. Hoewel aan het evenwicht voldaan is, kan door samendrukking van de relatief slappe drukstaaf een dusdanige vervorming optreden, dat functie verlies van de waterkering optreedt. Om deze reden is het van belang, dat naast een stabiliteitsanalyse ook controle van de vervormingen plaats vindt.

De grootte van de horizontale belasting voor opdrijven en daardoor de grootte van de toename van de belasting door opdrijven hangt sterk af van de voorgeschiedenis van de waterkering. In de uitvoeringsfase kan de schuifweerstand in de actieve zone door gegenereerde wateroverspanning lager zijn, waardoor de maximale actieve kracht op de passieve zijde en daarmee het gehele normaalkrachtenverloop gedurende de consolidatieperiode belangrijk groter is. Ook kan door eerdere hoge waterstanden de schuifspanningsafdracht naar het Pleistoceen tijdelijk lager geweest zijn, waardoor hogere normaalkrachten in de drukstaaf gegenereerd zijn. De voorgeschiedenis kan dus een gunstig effect op de vervormingen ten gevolge van opdrijven hebben. Dit effect kan in de berekening worden verwerkt, door de toename van de normaalkracht tijdens de ontwerpwaterstand (waarbij mogelijk opdrijven optreedt) en een rivierwaterstand die eens per jaar voorkomt te beschouwen.

### B.1.1 Passieve weerstandskracht

Gezien de snelheid waarmee opdrijven optreedt kan voor de berekening van de passieve weerstand worden uitgegaan van de ongedraineerde sterkte van de grond. Indien verondersteld wordt dat aan de passieve zijde een spanningssituatie heerst met een horizontale en verticale hoofdspanningsoriëntatie, kan de horizontale korrelspanning maximaal gelijk zijn aan de verticale korrelspanning +  $2 \cdot c_u$  (Zie figuur D.3).



figuur D.3

Dit geeft de volgende uitdrukking voor de passieve weerstand:

$$F_p = (\gamma_n - \gamma_w) \frac{d^2}{2} + 2c_u d + \frac{\gamma_w d^2}{2} \quad (2)$$

De ongedraineerde schuifweerstand  $c_u$  kan worden bepaald uit  $\phi'$  en  $c'$  van de cel- of de triaxiaalproef.

Indien voor het evenwicht van krachten meer dan de neutrale weerstand van de grond aangesproken wordt, dient naast een stabiliteitsanalyse ook een controleberekening ten aanzien van de vervorming te worden uitgevoerd. Indien voor het evenwicht een neutrale grondkracht toereikend is, is deze vervormingsberekening niet noodzakelijk. De neutrale weerstand kan berekend worden met de volgende uitdrukking:

$$F_n = \frac{1}{2} K_0 (\gamma_n - \gamma_w) d^2 + \frac{1}{2} \gamma_w d^2 \quad (3)$$

### B.1.2 Vervormingsberekening

Voor de berekening van de vervorming wordt alleen de passieve zone in beschouwing genomen. In de actieve zone zal tijdens opdrijven weinig of geen toename van schuifweerstand ontstaan, omdat de schuifsterkte maximaal gemobiliseerd is. De vervorming van de passieve zone wordt veroorzaakt doordat tijdens opdrijven een toename van de horizontale belasting optreedt. De grootte van de vervorming wordt bepaald door de passieve zone in lamellen te verdelen, en per lamel de toename van de horizontale belasting te bepalen. De toename van de horizontale belasting op de lamellen in de passieve zone volgt uit het verschil van de normaalkrachten voor en na opdrijven.

$$\Delta F_{h,i} = F_{h,i} - F_{h,i,0} \quad (4)$$

Waarin:

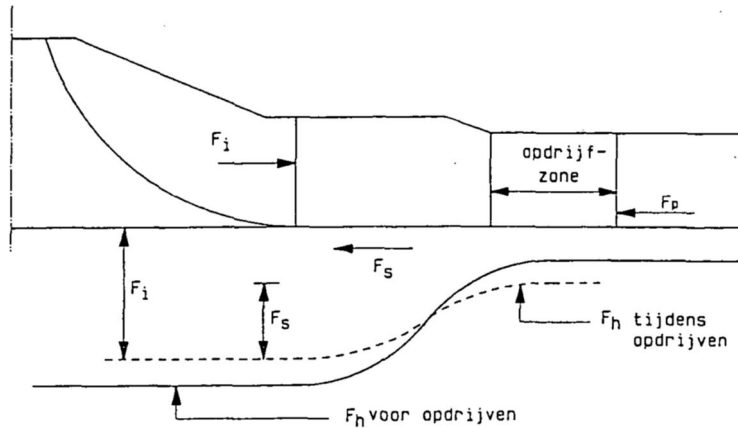
$F_{h,i}$  = horizontale normaalkracht in lamel  $i$  tijdens opdrijven (kN/m)

$F_{h,i,0}$  = horizontale normaalkracht in lamel  $i$  voor opdrijven (kN/m)

De beide normaalkrachten kunnen worden bepaald door uit te gaan van de maximale interlamelkracht  $F$  in de situatie voor en na opdrijven en die, afhankelijk van de plaats van de



lamel, te reduceren met de schuifspanningsafdracht naar het Pleistoceen. Door deze exercitie voor alle lamellen uit te voeren kan het normaalkrachtenverloop voor en na opdrijven bepaald worden (zie figuur D.4). Hierbij wordt opgemerkt, dat de normaalkracht voor opdrijven wordt bepaald bij een rivierwaterstand, die eens per jaar optreedt.



figuur D.4

De samendrukking van lamel i kan, uitgaande van een vlakke vervormingssituatie, berekend worden met de volgende formulering:

$$\Delta L_i = \frac{(1-\nu)\Delta F_{h,i}L_i}{2G_i d} \quad (5)$$

Waarin:

$\Delta F_{h,i}$  = toename horizontale normaalkracht in lamel i tijdens opdrijven (kN/m)

$\Delta L_i$  = samendrukking lamel i (m)

$L_i$  = oorspronkelijke lengte lamel i (m)

$G_i$  = glijdingsmodulus ter plaatse van lamel i (kN/m<sup>2</sup>)

$\nu$  = dwarscontractiecoëfficiënt (0,5 voor ongedraineerde situatie) (-)

De totale verkorting van de passieve zone wordt verkregen door sommatie van alle  $\Delta L_i$ .

Opgemerkt wordt dat, wanneer de waterkering van een steunberm voorzien is, onder deze berm ook bij opdrijven nog een zekere belastingafdracht naar het Pleistoceen mogelijk is: Afhankelijk van de afmetingen van de berm zal de belastingtoename in de drukstaaf afnemen en bij grote bennen zelfs tot nul reduceren. In dat geval zal de te verwachten vervorming van de drukstaaf ook nihil zijn.

B.2 Grotendeels overgenomen uit SE-701120, Februari 1990

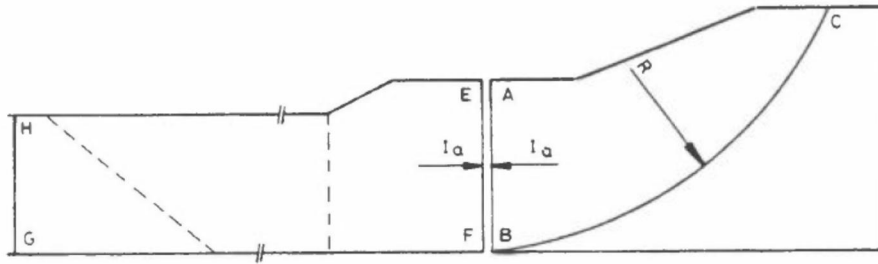


Fig. II-3.1.: Ontkoppeling van de actieve en passieve zone

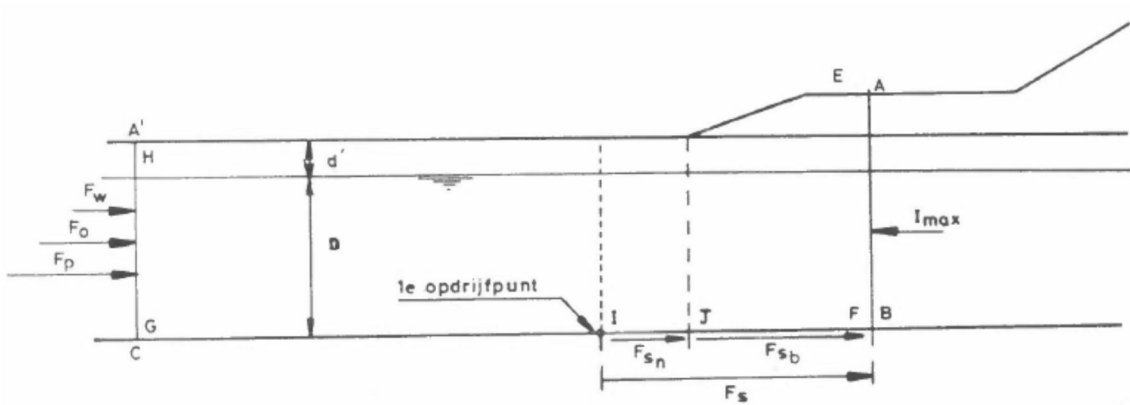


Fig. II-3.2.: Locaties van de krachten

grootte van $I_a$	aard van de vervorming	berekeningswijze in
$0 < I_{max} < F_o + F_{sb}$	zeer geringe stuik onder de teen	3.1.4.1.c. (eventueel achterwege laten)
$0 < I_{max} < F_o + F_s$	stuik tussen teen en eerste opdrijfpunt	3.1.4.1.c.
$F_s + F_o < I_{max} < F_p + F_s$	stuik vanaf teen, drukstaaf ingedrukt, passieve mobilisatie	3.1.4.1.c. en 3.1.4.1.d.
$I_{max} > F_p + F_s$	geen horizontaal evenwicht	profiel aanpassen en nieuw stabiliteitsevenwicht

**Berekening grootste interlamelkracht  $I_{max}$**

Uit elementenberekeningen is gebleken dat de vorm van het actieve deel van het glijvlak bij benadering een cirkel is welke raakt aan het Pleistoceen en dat dit deel van de glijcirkel als eerste volledig bezwijkt. Gaan we uit van het feit dat bestaande glijvlakanalyses (methode Bishop/Spencer) een beschrijving geven van het statisch evenwicht en dus alleen geldig zijn voor het bezwijkstadium ( $F = 1,0$ ) c.q. een min of meer correcte krachtenverdeling geven, dan kan de grootste interlamelkracht  $I_{max}$  (of te wel het grootste tekort in het krachteenwicht van de actieve

zijde) berekend worden met behulp van die bestaande glijcirkelanalyses (methode Bishop/Spencer).

Voor het actieve deel van de te controleren glijcirkels (de moot ABC) worden de werkelijke geometrie, waterspanningen en grondparameters gebruikt zoals die uit het grondonderzoek worden afgeleid. Voor het passieve deel van deze cirkels (de moot links van AB) (zie fig. II-3.1.) wordt gewerkt met een fictieve, homogene laag zonder gewicht ( $\gamma = 0$ ), zonder waterdrukken en zonder inwendige wrijvingshoek  $\phi$ , doch met een nog onbekende cohesie  $c$ .

De cohesie wordt gevarieerd zodat voor elke gecontroleerde cirkel de interlamelkracht  $I$  in de verticaal door het cirkelmiddelpunt voor een evenwichtsfactor  $F = 1$  (bijvoorbeeld Bishop of Spencer) bekend is. De grootste van alle interlamelkrachten (voor verschillende stralen en doorsneden AB) is de "maatgevende interlamelkracht" of "sluitkracht"  $I_{max}$ , uitgeoefend door ABC of EFGH.

De cirkels bij de op deze wijze gevonden grootste interlamelkracht  $I_{max}$  correspondeert niet met die cirkel(s) welke bij een gegeven gewicht, waterspanning, inwendige wrijving en cohesie aan de passieve zijde de laagste evenwichtsfactor hebben. Grotere cirkels met relatief hoge stabiliteitsfactoren kunnen grotere tekorten op het krachterevenwicht hebben dan kleinere cirkels met relatief lage stabiliteitsfactoren.

### **Berekening van de weerstandskrachten aan de passieve zijde $F_s$ en $F_p$**

Na het evenwicht van de moot ABC te hebben beschouwd, dient het evenwicht van de moot EFGH te worden onderzocht. De weerstand aan de passieve zijde wordt geleverd door:

- de neutrale druk;
- de schuifkrachten in het scheidingsvlak met het Pleistoceen tussen de verticaal AB en het begin van de opdrijfzone;
- passieve gronddruk in en op het einde van de drukstaaf of een gedeeltelijke mobilisatie daarvan (de minimale gronddruk is de neutrale);
- de waterdruk.

Voor de formules en de wijze waarop deze weerstandskrachten berekend kunnen worden, wordt verwezen naar het rapport CO-281560/6 (10).

[Bauduin & Moes, 1987] Bauduin, C.M. & C.J.M. Moes, 1987, 'Studie van het vervormings- en bezwijkgedrag van dijken bij lage effectieve spanningen langs de bovenrand van het pleistocene zand ("stabiliteit bij opdrijven")', CO-281560/6, 1987, Grondmechanica Delft

In deze subparagraaf zal de aanpak van het berekenen van de weerstandskrachten worden behandeld voor een dijk met berm.

- Bepaal de spanningsverhoging op het schuifvlak ten gevolge van belastingspreiding dijklichaam met behulp van de methode Jürgenson ( $\sigma_v$ -Jürgenson).
- Sommeer deze spanningsverhoging en de oorspronkelijke grondspanning ( $\sigma_g + \sigma_v$ -Jürgenson) en zet deze totale grondspanningslijn uit ten opzichte van het gekozen referentievlak.
- Bepaal de maatgevende hoogwaterpotentialen in het Pleistoceen en zet deze uit ten opzichte van hetzelfde referentievlak.

Aan de hand van de totale grondspanningslijn en de lijn van maatgevende hoogwaterpotentialen in het Pleistoceen wordt die verticaal gezocht waar of opdrijven begint ( $n = 1,0$ ) 1ste opdrijfpunt en waar de veiligheid tegen opdrijven = 1,2 is. Gebied tussen de verticalen  $n = 1,0$  en  $n = 1,2$  wordt de opdrijfzone genoemd. Een en ander is in onderstaand figuur weergegeven.

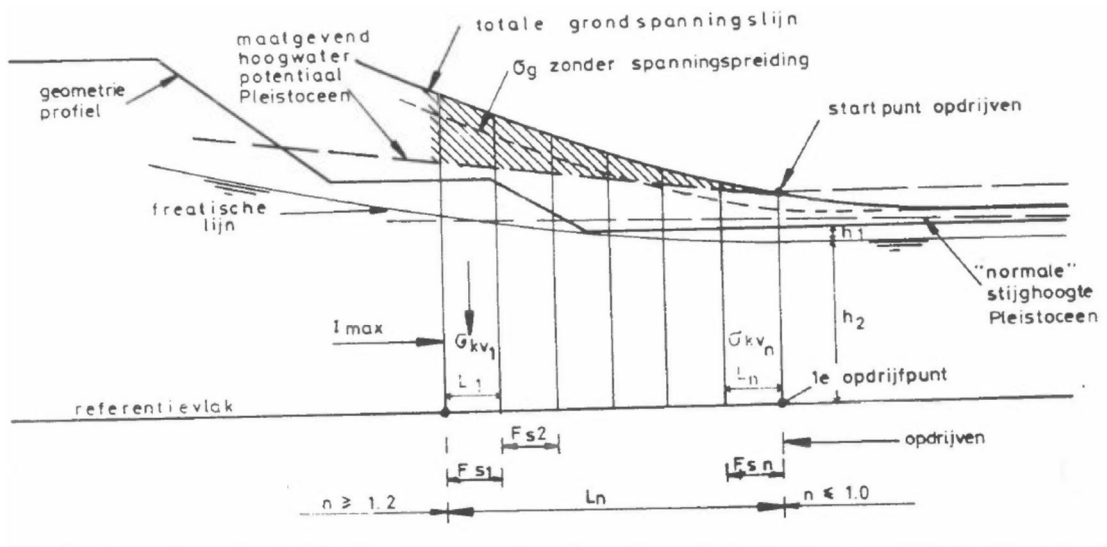


Fig. II-3.4.: Bepaling opdrijfzone

- Bereken de maximaal opneembare schuifkracht langs de onderrand  $F_s$  (kN/m) met de formules:

$$F_{s,i} = (\sigma_{k,v,i} \tan \phi + c) L_i \quad (6)$$

$$F_s = \sum_{i=1}^{i=n} F_{s,i}$$

Het berekenen van de schuifkracht  $F_s$  geschiedt met zowel de wrijvingseigenschappen van het zandpakket ( $c = 0, \phi = 30^\circ$ ) als met die van de slappe lagen. De kleinste schuifkracht is maatgevend. Voor het berekenen van de korrelspanning en in de slappe laag dient rekening te worden gehouden met de waterspanning ten gevolge van drukstaaffunctie (zie § 3.1.3.4.).

- Bereken de kracht behorend bij de passieve gronddruk door uit te gaan van een ongedraineerde toestand. Het berekenen van de kracht behorend bij de passieve gronddruk ( $F_p$ ) gebeurt ter plaatse van een verticaal door de teen van de dijk en ter plaatse van een verticaal ver achter de dijk (polder), daar waar geen invloed meer is van het opdrijven. Dit gebeurt met de volgende formules:

$$F_p \text{ boven freatisch vlak} = 2h_1 c \sqrt{K_p} + \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_p \quad (7)$$

$$F_p \text{ onder freatisch vlak} = \frac{1}{2} \gamma h_2^2 K_{pu} - \frac{1}{2} \gamma_w h_2^2 K_{wu} + 2h_2 c \cos \phi' \quad (8)$$

Waarin:

$K_p$  = passieve gronddrukcoëfficiënt bij gedraineerd gedrag

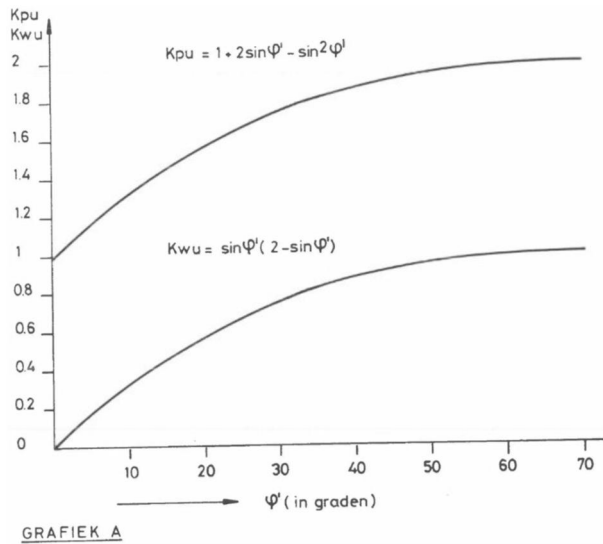
$K_{pu}$  = passieve gronddrukcoëfficiënt bij ongedraineerd gedrag

$K_{wu}$  = drukcoëfficiënt voor water bij ongedraineerd gedrag

$h_1$  = dikte van het slappe lagenpakket boven freatisch vlak

$h_2$  = dikte van het slappe lagenpakket onder freatisch vlak.

Voor  $K_{wu}$  en  $K_{pu}$  wordt verwezen naar grafiek A.



- $F_p$  totaal =  $F_p$  boven freatisch vlak +  $F_p$  onder freatisch vlak

Van de uitkomsten, bepaald bij beide verticalen, is de kleinste waarde maatgevend.

### Evenwichtsbeschouwing

Nadat zowel de aandrijvende kracht  $I_a$  als de weerstandskrachten  $F_s$  en  $F_p$  bepaald zijn, kan (in een aantal verticalen) de veiligheid  $n$  tegen evenwichtsverlies als volgt worden berekend.

$$n = \frac{F_s + F_p}{I_a} \quad (9)$$

Indien de veiligheid tegen evenwichtsverlies  $n > 1,3$  is, dan is de stabiliteit in voldoende mate verzekerd. In dat geval echter wel vervormingscontrole. Is de veiligheid tegen evenwichtsverlies  $< 1,3$  dan dient de geometrie in elk geval aangepast te worden. Dit kan zijn door het uitbreiden van de berm. Daarna dient opnieuw de stabiliteitscontrole uitgevoerd te worden.

### Wateroverspanning ten gevolge van drukstaaffunctie

Door de drukstaaffunctie ontstaan extra waterspanningen, waardoor voor de berekening van de passieve weerstand van eerdergenoemde ongedraineerde analyse gebruik moet worden gemaakt. De toename van de waterspanning onder de freatische lijn is:

$$\Delta u = \frac{1}{2} \Delta \sigma_h \quad (10)$$

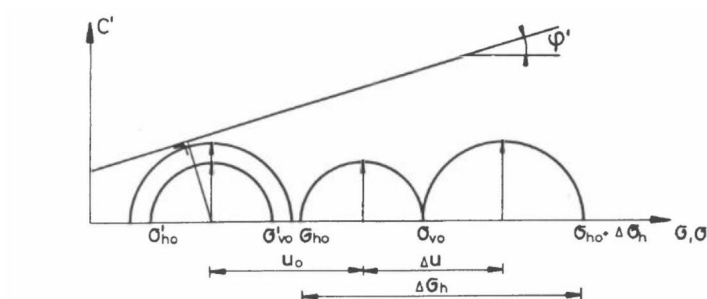


Fig. II-3.5.: Waterspanningstoename door horizontale spanningstoename in het elastisch gebied

In niet of slechts licht overgeconsolideerde grondsoorten zal door de schuifspanningstoename eveneens een extra waterspanningstoename ontstaan. De verdeling van de waterspanningen kan worden gecorrigeerd voor stijfheidsverschillen tussen de grondlagen. Omdat tijdens opdrijven de spanningstoestand overgaat van neutraal in passief kan, voor een globale berekening van de spanningen en vervormingen, worden uitgegaan van een driehoekige verdeling van de spanningstoename. De bijbehorende spanningsverdeling is:

$$\Delta\sigma_h \text{ onderin} = 2 \frac{\Delta F_s}{d'} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma \text{ bovenin} = 0$$

Opgemerkt wordt dat de waterspanningstoename als gevolg van opdrijven in een gemiddelde situatie betrekkelijk gering blijkt te zijn (enkele kN/m<sup>2</sup>).

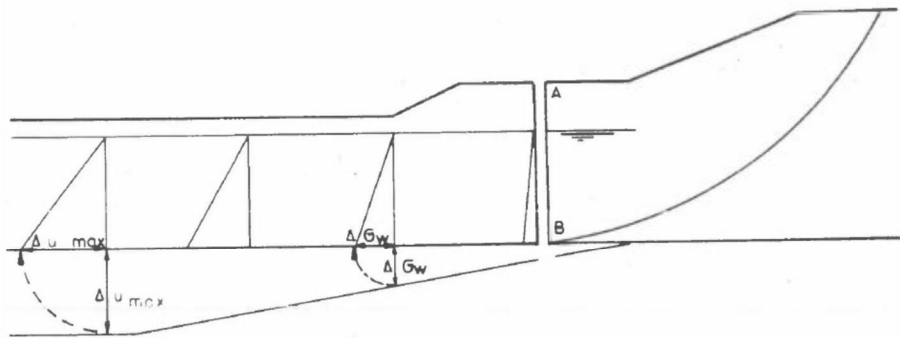


Fig. II-3.6.: Verdeling van de waterspanningstoename in het slappe lagenpakket bij opdrijven

### Vervormingscontrole - gebiedsindeling

Bij de berekening van de vervormingen bij gedeeltelijke mobilisatie van de passieve weerstand worden vijf gebieden onderscheiden waarin deformaties optreden (zie fig. II-3.7.).

- de actieve zone (gebied 1);
- de zone onder de berm (gebied 2);
- de zone direct naast de berm (gebied 3);
- de opdrijfzone (drukstaaf) (gebied 4);
- de passieve zone (gebied 5).

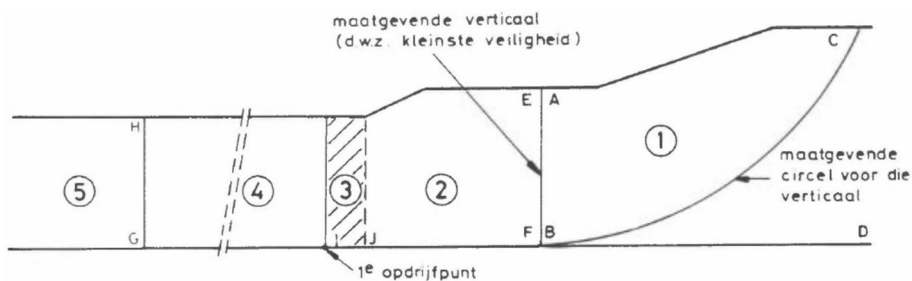


Fig. II-3.7.: Gebiedsindeling voor de vervormingsberekening

Achtereenvolgens worden de vervormingen in elk van deze zones berekend:

#### a) Actieve zone (gebied 1)

In de actieve zone zullen tijdens opdrijven weinig bijkomende vervormingen ontstaan, de verplaatsingen in (1) zijn daarom hoofdzakelijk bepaald door die in (2) t/m (5).

Deze aanname is bij benadering correct omdat:

- het materiaal in dit gebied veel stijver is dan in de andere zones;
- vóór opdrijven is langs het glijvlak in dit gebied reeds veel schuifweerstand gemobiliseerd, waardoor de volledige mobilisatie van de schuifweerstand met minimale vervormingen gepaard gaat;
- het gebied geen extra uitwendige belasting ondergaat.

#### b) Zone onder de berm (gebied 2)

Zone (2) wordt belast door een horizontale normaalkracht (de sluitkracht  $I_a$ ) die ergens onder de berm maximaal wordt en daarna in de richting van de polder afneemt, zolang wrijving in het contactvlak met het Pleistoceen aanwezig is en daarna langs de hele opdrijfzone (gebied 4) constant blijft. Waterspanningstoename in het Pleistoceen veroorzaakt schuifspanningsverlies in het contactvlak. De horizontale samendrukking in deze zone wordt veroorzaakt door de toename van de normaalkracht als gevolg van verlies van deze schuifspanningen tijdens opdrijven. Doordat de verliezen in dit gebied nog relatief gering en de stijfheidseigenschappen hoog zijn, zijn de vervormingen relatief klein. Zij kan daarom eventueel worden verwaarloosd.

#### c) Zone direct naast de berm (gebied 3)

In dit gebied zijn de grondlagen slapper, terwijl de horizontale kracht is opgelopen door schuifspanningsverliezen onder de berm. De horizontale samendrukking is aanmerkelijk groter dan onder de berm, mede omdat door het ontbreken van de berm meer verticale volumeverplaatsing mogelijk is (dat wil zeggen het maaiveld komt gemakkelijker omhoog door het ontbreken van bovenbelasting). Doordat deze zone relatief kort is kan zij in de berekening eventueel worden samengetrokken met gebied 4. Dit compenseert de verwaarlozing van de vervormingen in gebied 2.

In gebied 3 bestaat nog contact met het Pleistoceen, waardoor de totale horizontale spanning in de richting van de polder ondanks het opdrijven toch nog afneemt door schuifspanningsafdracht.

#### d) De opdrijfzone (gebied 4)

Deze zone is niet altijd aanwezig. Bij lage contactdrukken valt hij samen met de gebieden 3 en 5. De totale horizontale spanning is constant omdat geen schuifspanningsafdracht naar het Pleistoceen plaatsvindt. De toename van de horizontale spanning vanuit de oorspronkelijke situatie tot vlak vóór opdrijven is echter niet constant maar afhankelijk van de vóór het opdrijven gemobiliseerde verdeling van de schuifweerstand.

#### e) De passieve zone achter de opdrijfzone (gebied 5)

De zone achter de opdrijfzone is gekenmerkt door een langzame opbouw van de schuifweerstand tussen het pleistocene zand en de slappe laag. Over die lengte welke nodig is om de drukstaafkracht te doen afnemen tot de neutrale gronddruk zullen vervormingen optreden.

### **Berekening van het horizontaal krachtverloop vóór opdrijven**

Om de horizontale verplaatsingen te kunnen bepalen, is het nodig om de variaties van de horizontaalkrachten, veroorzaakt door opdrijven te bepalen. De variatie veroorzaakt immers de samendrukking tijdens het opdrijven. Hij wordt bepaald uit het verschil tussen het horizontaalkrachtenverloop bij en vóór opdrijven.

Het verloop van  $I$  in de actieve zone ABC volgt uit de glijcirkelberekening (interlamelkrachten). bepaal hieruit de sluitkracht  $I_{max}$   
bepaal de kracht behorende bij de neutrale gronddruk  $F_{0,0}$  met de formule:

$$F_{0,0} = \frac{1}{2} K_0 (\gamma_n - \gamma_w) h^2 + \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \quad (12)$$

Bereken  $F_{rest,0} = I_{max,0} - F_{0,0}$

$F_{rest,0}$  is het deel van de sluitkracht dat door wrijving en passieve gronddruk geleverd moet worden.  $F_{rest,0}$  wordt door de schuifspanningen aan het Pleistoceen ( $F_s$ ) overgedragen. Zoals gezegd hebben elementenberekeningen aangetoond dat eerst alle schuifweerstand in zone 1 t/m 3 wordt gemobiliseerd voordat passieve weerstand in zone 5 wordt gemobiliseerd. Vóór opdrijven bestaan zone 4 en 5 echter niet en wordt alle weerstand aan de neutrale gronddruk en de schuifspanningsafdracht aan het Pleistoceen in zone 2 en 3 ontleend. Men maakt een veilige benadering door te stellen dat dit zo dicht mogelijk bij de actieve zone en maximaal gebeurt, dat wil zeggen tot aan de bezwijkingschuifspanning.

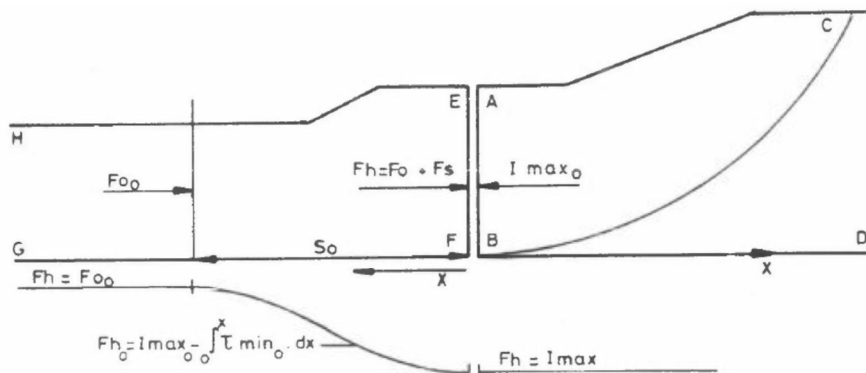


Fig. II-3.8.: Verdeling van de gemobiliseerde weerstandkrachten vóór opdrijven

Om de schuifkracht af te dragen aan het zand is een gebied met een lengte  $S_0$  nodig. Dit gebied kan worden gevonden door te zoeken naar de  $x$ -waarde die beantwoordt aan:

$$F_{rest,0} - \int_0^x \tau_{min,0} dx = 0 \quad (13)$$

Waarin  $\tau_{min,0}$  bepaald is als in (Fig. 3.4; berekening  $F_s$ ) aangegeven, echter met de potentiaal en de waterspanningen bij gemiddeld hoog water. De horizontale kracht  $F_{h,0}(x)$  op een afstand  $x$  van AB is gelijk aan:

$$F_{h,0}(x) = I_{max,0} - \int_0^x \tau_{min,0} dx \quad (\text{met een minimum van } F_{0,0}) \quad (14)$$

Deze kracht is een "voorspankracht" in de opdrijfzone, of te wel in de drukstaaf. In de richting van de polder sterft deze uit tot  $F_{0,0}$  door schuifspanningsafdracht aan het Pleistoceen. Het is duidelijk dat de grootte van de voorspankracht sterk afhangt van de geschiedenis die de dijk al eerder heeft meegemaakt. Zowel de doorstane hoogwaterstanden als de bouwmethode hebben invloed op de voorspankracht gehad.



ad 1: De bouwperiode

Gedurende de bouwperiode was de schuifweerstand in de actieve zone kleiner als gevolg van de daar heersende wateroverspanningen, waardoor de sluitkracht en dus de voorspanning groter was dan bij volledige consolidatie. Deze voorspanning blijft, althans voor een deel, ook na consolidatie aanwezig.

ad 2: De reeds doorstane hoogwaterstanden

Hoge waterstanden, waarbij de contactdruk sterk is verminderd of tot nul is gereduceerd, hebben een herverdeling van de voorspanning als gevolg. Daarbij daalt de voorspanning onder en kort naast de berm terwijl zij in een zone daarbuiten toeneemt.

De voorspankracht  $F_h(x)$  moet worden berekend met inachtnaam van de bovengenoemde effecten. Voor de bouwperiode kan dit gebeuren door voor het aanpassingspercentage aan het einde de bouwperiode bij gemiddeld buitenwater  $R_{res,t0}$  te berekenen.

Voor reeds doorstane hoge waterstanden kan de herverdeling van  $F_h(x)$  bij volledige consolidatie van de actieve zone en verhoogde potentiaal in het zand worden berekend.

**Bepaling van de toename van de normaalkracht en de vervormingen in de drukstaaf wanneer opdrijven ontstaat**

Op dezelfde wijze als  $F_{h,0}(x)$  kan  $F_h(x)$  bij opdrijven worden bepaald.

0

$I_a, F_w, F_0, F_s, \tau_{min}, F_{rest}$  en  $F_h$ , worden nu bepaald bij de waterspanningen en potentialen welke optreden bij opdrijven (zie daarvoor hoofdstuk I-6, waterspanningen. Meestal zal:

situatie bij opdrijven	situatie voor opdrijven	opmerkingen
$I_{max}$	$I_{max_0}$	bij opdrijven kan eventueel $I_{max} > I_{max_0}$ worden
$F_w$	$F_{w_0}$	<p>geldt op grotere afstand van de dijk</p> <p>geldt nabij de dijk, indien sprake is van voorspanning</p>
$F_0$	$F_{0_0}$	
$F_s$	$< F_{s_0}$	
$\tau_{min}$	$< \tau_{min_0}$	
$F_{rest}$	$F_{rest_0}$	
$F_h(x)$	$> F_{h_0}(x)$	
$F_h(x)$	$< F_{h_0}(x)$	

Omdat polderwaarts van de dijk vrij snel  $\tau_{min} = 0$  wordt (opdrijven), kan meestal niet de volledige  $I_a$  door wrijving op het Pleistoceen worden opgevangen.

Tot aan het eerste opdrijfpunt (zie hoofdstuk I-6, waterspanningen) neemt  $F_h$ , af door schuifspanningsafdracht aan het Pleistoceen. Vanaf het punt waar  $\tau_{min} = 0$  is  $F_h$  constant tot aan het tweede min opdrijfpunt (zie hoofdstuk I-6, waterspanningen). Daarna neemt  $F_h$  weer af tot  $F_0$ .

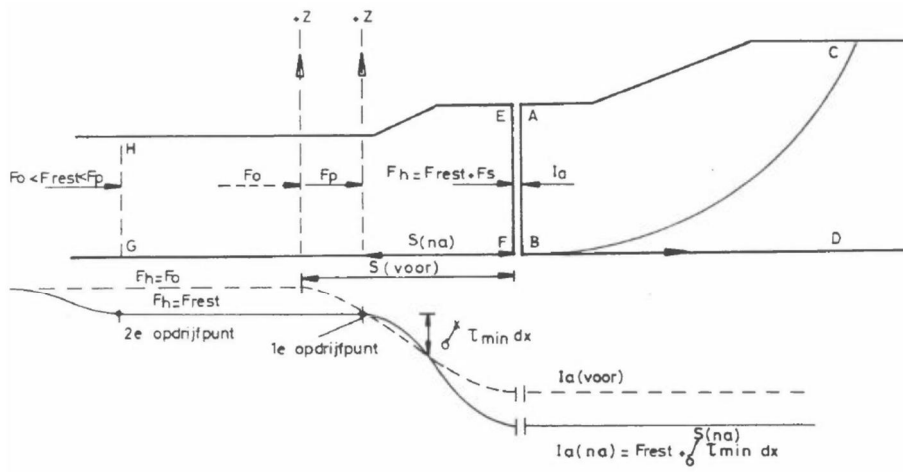


Fig. II-3.9.: Verdeling van de gemobiliseerde weerstandkrachten voor en na opdrijven

De toename van de normaalkracht op de staaf in iedere doorsnede volgt uit het verschil van de normaalkrachten tijdens en voor opdrijven:

$$\Delta F_h(x) = F_h(x) - F_{h,0}(x) \quad (15)$$

Voor het berekenen van de vervorming van de drukstaaf (gebied 4) wordt het gebied verdeeld in een aantal lamellen. De samendrukking van een lamel  $i$  ter lengte  $L_i$ , waarop  $\Delta F_{h,i}$  een gemiddelde waarde  $\Delta F_{h,i}$  heeft, wordt berekend met de formule:

$$\Delta L_i = (1 - \nu^2) \frac{\Delta F_{h,i}}{d \cdot E_{u,i}} L_i \quad (16)$$

$E_u$  = de elasticiteitsmodulus bij ongedraineerde belasting

$\nu$  = de dwarscontractiecoëfficiënt bij ongedraineerde belasting:  $\nu = 0,5$

$d$  = hoogte lamel (= dikte slappe lagen).

De totale bijkomende verkorting in de zone (4) is dan de som van alle  $\Delta L_i$ :

$$\Delta L \text{ totaal gebied 4} = \sum \Delta L_i \quad (17)$$

### Bepaling krachttoename en vervormingen in de passieve zone achter de opdrijfzone (gebied 5)

De zone achter de drukstaaf (gebied 5) is gekenmerkt door een geleidelijke opbouw van de schuifweerstand tussen het pleistocene zand en het slappe lagenpakket verder van de dijk afgaande. Men krijgt daar hetzelfde verschijnsel als in gebied 2. Over die lengte welke nodig is om de drukstaafkracht ( $F_{rest}$ ) te doen afnemen tot de neutrale gronddruk kunnen de vervormingen als volgt berekend worden.

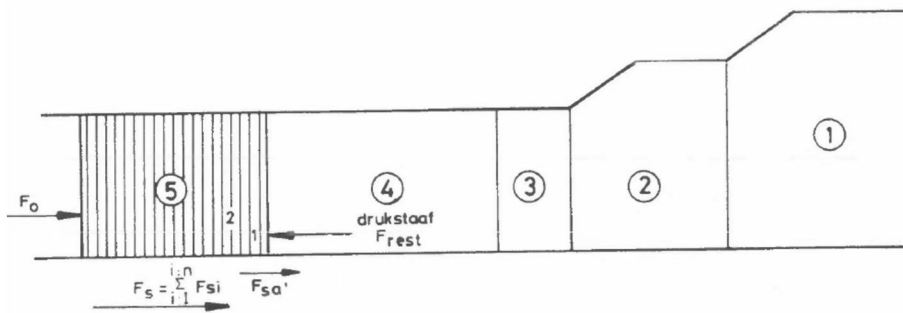


Fig. II-3.10: krachterspel gebied 5

De totale krachttoename in het gebied 5 is:  $F_{rest} - F_0$ .

Deze krachtstoename dient opgenomen te worden door schuifkracht  $F_s$ . Om de vervorming te berekenen wordt het gebied verdeeld in lamellen. Per lamel, met lengte  $L_i$ , wordt de schuifkracht  $F_{s,i}$  berekend

$$F_{s,i} = (\sigma'_{kv} \tan \phi' + c') L_i \quad (18)$$

De krachtstoename in de eerste lamel (1) is  $F_{rest} - F_0 = F_{s,1}$ . De krachtstoename in de tweede lamel (2) is  $(F_{rest} - F_0) - F_{s,1} = F_{s,2}$ . Deze werkwijze wordt vervolgd totdat geen krachtstoename meer optreedt:

$$(F_{rest} - F_0) - \sum F_{s,i} = 0 \quad (19)$$

Hiermee is dan ook de plaats waar gebied 5 eindigt vastgelegd.

Met de op bovengenoemde wijze berekende krachten  $F_{s,1}$ ,  $F_{s,2}$  enz.) wordt nu de vervorming per lamel  $\Delta L_i$  berekend.

1

Hiervoor wordt dezelfde formule gebruikt als bij de berekening van de vervormingen in gebied 4, namelijk:

$$\Delta L_i = (1 - \nu^2) \frac{\Delta F_{h,i}}{d \cdot E_{u,i}} L_i \quad (20)$$

De totale vervorming van gebied 5 is de som van alle vervormingen per lamel.

De totale vervormingen in het beschouwde profiel is de sommatie van de vervormingen in de gebieden 4 en 5.

De aangegeven methode voor gebied 5 kan ook worden gebruikt om de vervormingen bij lage contactdrukken te berekenen. Het enige verschil is dat gebied 4 niet bestaat. De totale gesommeerde berekende horizontale vervormingen in de gehele passieve zone bepalen de verplaatsingen welke in de actieve zone langs de glijcirkel optreden. Hiermede ligt dus de verplaatsing nabij het intredepunt van de cirkel (gebied 1) vast. De kruindaling kan nu grafisch bepaald worden in een dwarsprofiel (zie figuur II-3.11).

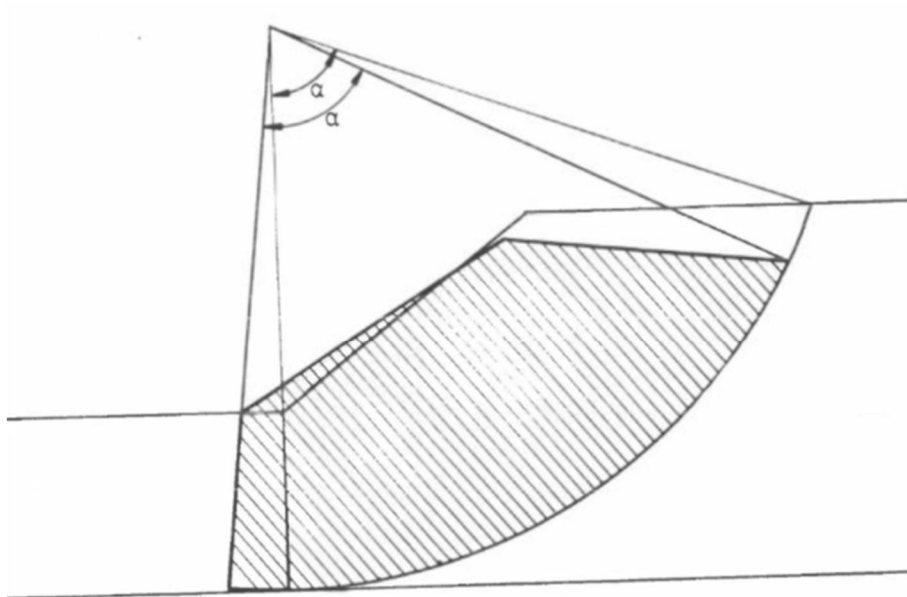


Fig. II-3.11: grafische bepaling kruindaling

# C Plan voor vervolgonderzoek

## C.1 Waarom vervolgonderzoek?

Het voorliggende rapport beschrijft de state of the art van het numeriek modelleren van de stabiliteit van dijken bij opdrijven of opbarsten van een dunne deklaag. Uit de berekeningsresultaten volgen een aantal opvallende conclusies. Zo treedt het uitknikken van een dunne toplaag, faalmechanisme 4d uit Figuur 3-6, alleen onder specifieke condities op, bij relatief dunne en stijve deklagen waarbij geen teensloot in het dwarsprofiel aanwezig is. Daarentegen speelt het horizontaal indrukken, faalmechanisme 4e uit Figuur 3-6 vaker een rol. Dit is opvallend omdat in de huidige beoordelingsystematiek geen aandacht is voor het afschuiven van het dijktaalud als gevolg van horizontale vervormingen van de deklaag.

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 en 3 geven de onderzoeksresultaat aan dat er duidelijk mogelijkheden zijn voor het optimaliseren van de rekenregels. Paragraaf C.5 geeft een toelichting op de potentiële opbrengst indien de rekenregels inderdaad kunnen worden geoptimaliseerd. Om deze potentiële opbrengst te kunnen verzilveren is een plan voor vervolgonderzoek uitgewerkt. Deze bijlage geeft een beknopte beschrijving van het voorgestelde onderzoek.

## C.2 Doel van het onderzoek

Aan de hand van berekeningsresultaten is in hoofdstuk 3 een raamwerk voor controle van dijkstabiliteit bij geringe opdrijfveiligheid geschetst. Dit raamwerk kan worden uitgewerkt tot een werkwijze voor de beoordeling van waterkeringen en ontwerp van dijkverbetering voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij opdrijven van een relatief dunne deklaag. Dit zijn de situaties waar in de huidige systematiek geen sterkte aan de deklaag in het achterland wordt toegekend.

Het doel van het voorgestelde onderzoek is het onderbouwen, invullen en praktisch toepasbaar maken van het voorgestelde raamwerk. Belangrijk hierin is het valideren van de numerieke resultaten aan de hand van experimentele data. De validatie betreft niet alleen een vergelijking van de numerieke voorspellingen met de experimentele data, maar ook het eventueel verbeteren van de numerieke methoden waar nodig. Voor een praktische werkwijze, geschikt voor de dagelijkse ingenieurspraktijk, kan het nodig zijn enkele onderbouwde vereenvoudigingen door te voeren. De onderbouwing hiervoor dient te volgen uit de experimentele data. Benadrukt wordt dat de numerieke ontwikkeling en experimenteel onderzoek hand in hand gaat.

De volgende paragraaf geeft een verdere invulling van het onderzoeksdoel aan de hand van enkele onderzoeksvragen.

## C.3 De onderzoeksvragen

Het doel van het onderzoek, zoals in de vorige paragraaf beschreven is nader uitgewerkt in een aantal onderzoeksvragen. De onderzoeksvragen kunnen worden gegroepeerd in twee hoofdonderwerpen. Het eerste hoofdonderwerp heeft betrekking op de sterkte en bezwijkmodus. Het tweede hoofdonderwerp heeft betrekking op hydraulische aspecten. Benadrukt wordt dat niet alle onderzoeksvragen beantwoord hoeven te worden om het doel te bereiken. Voor de validatie van de numerieke simulaties, de basis voor de onderbouwing van het raamwerk, zijn de eerste twee punten onder sterkte en bezwijkmodus onmisbaar. De overige punten maken een steeds verdere detaillering van de invulling van het eerder beschreven raamwerk, hoofdstuk 3, mogelijk.

- De **sterkte** en **bezwijkmodus**. Hierbij komen vragen aan de orde als:
  - o Welke bezwijkmodus wordt gevonden, zie Figuur 3-6. En welke invloed hebben de laageigenschappen zoals dikte, sterkte en stijfheid op de optredende bezwijkmodus? Hieronder valt ook de vraag tot welke laagdikte in combinatie met sterkte- en stijfheidseigenschappen uitknikken niet kan worden uitgesloten bij geringe opdrijfveiligheid.
  - o Komen de experimenteel gevonden bezwijkmechanismen en bijbehorende bezwijkbelastingen overeen met de numeriek voorspelde bezwijkmechanismen en bezwijkbelasting; en indien dit niet het geval is kunnen met relatief geringe aanpassingen in uitgangspunten en modellering de numerieke voorspellingen in overeenstemming worden gebracht met de experimentele data?
  - o In hoeverre is scheurvorming in de deklaag relevant voor de stabiliteit van het dijktaalud?
  - o Hoe verhouden de sterkte- en stijfheidseigenschappen uit conventionele laboratoriumproeven zich tot het waargenomen bezwijkgedrag? In conventionele laboratoriumproeven wordt een belastingsverhoging aangebracht, zoals bij triaxiaalproeven, of een schuifvorming opgelegd, zoals bij Direct Simple Shear proeven, terwijl bij opbarsten buiging zal optreden, met invloed van de treksterkte.
  - o In hoeverre spelen heterogeniteit in de ondergrond en dijkopbouw een rol?
  - o In hoeverre speelt de verzadiging en verandering in verzadiging van de deklaag een rol?
  - o Hoe komt de beoordeling -, en ontwerpprocedure, waarin de resultaten van het onderzoek wordt meegenomen er uit te zien? Bij het ontwikkelen van een dergelijke beoordelings-, en ontwerpprocedure dient ook aandacht te zijn voor de afleiding van de relevante partiële veiligheidsfactoren, zoals modelfactor en schematiseringsfactor.
- De **hydraulische** aspecten. Het faalmechanisme wordt aangedreven door verhoogde stijghoogte in onderliggende zandlagen en vormt daarmee een belangrijk aspect. Als gevolg van het opdrijven ontstaat er de mogelijkheid van berging van het grondwater met een dempende invloed op het opdrijven. Scheuren of reeds bestaande gaten in de toplaag kunnen zich ontwikkelen tot wellen waarlangs het grondwater kan afstromen. Een dergelijke wel kan fungeren als een ventiel waardoor de stijghoogte in de directe omgeving van de wel niet te hoog kan oplopen. Onderzoeksvragen die hierbij gesteld kunnen worden zijn:
  - o Kunnen de scheuren zich ontwikkelen tot een ventiel waardoor de hoogte van de waterspanning begrensd is? En zo ja tot welke hoogte kunnen deze wellen de stijghoogte in de ondergelegen zandlaag begrenzen?
  - o Wat is de invloed op de stijghoogte in de omgeving van de wel als gevolg van de ventiel werking?
  - o Kan als gevolg van de ventielwerking de stabiliteit van het dijklichaam weer toenemen? Immers, afhankelijk van de geometrie kan een gereduceerde stijghoogte weer onder de opdrijfpotentiaal vallen wat leidt tot reductie van de maatgevende belastingcondities.
  - o Kan opdrijven of opbarsten ook optreden bij zeer zandige of siltige kleilagen die mogelijk gedeeltelijk niet verzadigd zijn? Door de relatief hoge doorlatendheid kan het water de kleilaag infiltreren in plaats van opdrukken en mogelijk over het maaiveld afstromen. Wat betreft het sterktegedrag van de toplaag voor deze condities, zou deze laag mogelijk kunnen verweken indien voor beperkt verzadigde condities het infiltrerende water de aanwezig zuigspanning zou elimineren waardoor de laag zijn sterkte verliest.

## C.4 Uitwerking onderzoek

Om het onderzoek een heldere structuur te geven is het onderzoek opgedeeld in drie werkpakketten. Hierin zijn de volgende drie pakketten onderscheiden:

- Werkpakket 1, Experimenteel onderzoek; fenomeen beschrijving
- Werkpakket 2, Numeriek modeleren; vertaling experimentele data naar algemeen toepasbare rekenconcepten
- Werkpakket 3, Toepassing; ontwikkeling rekenregels

De drie werkpakketten hebben een onderlinge samenhang en kunnen niet zonder elkaar worden uitgevoerd. Met de nodige onderlinge verbanden kunnen de werkpakketten 1 en 2 parallel worden uitgevoerd. De onderlinge verbanden bestaan uit het maken van numeriek voorspellingen van de experimentele proeven, het aanpassen van de experimenten aan de hand van numerieke vragen en vervolgens de validatie van de numerieke methoden aan de experimentele data. Werkpakket 3 zal later dan werkpakket 1 en 2 starten.

### *Werkpakket 1, Experimenteel onderzoek; fenomeen beschrijving*

Werkpakket 1 richt zich op het experimentele onderzoek waarin het faalmechanisme en alle deelprocessen worden vastgelegd in meetdata die wordt gebruikt voor het valideren van numerieke methoden. In het experimenteel onderzoek komen de hoofdonderwerpen uit de vorige paragraaf terug.

Voor een optimaal experimenteel inzicht in de processen die een rol spelen en in hoeverre die processen elkaar onderling beïnvloeden, zal het experimenteel onderzoek bestaan uit een reeks kleine-schaalproeven, gevolgd door medium-schaalproeven en uiteindelijk een veldproef.

Voor het uitvoeren van kleine-schaalproeven is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid nodig. Echter, kleine-schaalproeven geven de mogelijkheid om grote series uit te voeren waarin eenvoudig kan worden gevarieerd met de belangrijkste parameters. Hierdoor ontstaat een goede indruk van de invloed van afzonderlijke parameters op de proefuitkomst en kunnen worden vergeleken met eenvoudige numerieke simulaties van de proeven. Aandachtspunt bij geotechnische kleine-schaalproeven is dat grondgedrag sterk spanningsafhankelijk is. In kleine-schaalmodellen zal in principe een lagere spanning heersen en daarom ander gedrag vertonen dan het prototype. Een geocentrifuge is een middel om schaalproeven onder de juiste condities te beproeven. In dit onderzoek zijn met betrekking tot de kleine-schaalproeven proeven in de centrifuge van TUDelft voorzien.

De medium-schaalproeven geven de mogelijkheid om inzicht te krijgen in de invloed van de versimpelingen die ten behoeve van de kleine schaalproeven nodig zijn. In een medium-schaalopstelling kunnen grotere en meer gecompliceerde modellen worden beproefd. Zo kan een model uit meer grondlagen bestaan, een langer deel van het achterland schematiseren of een meer gecompliceerde hydraulische situatie nabootsen. De medium-schaalproeven staan dicht bij de werkelijkheid maar worden wel onder volledig bekende en geconditioneerde omstandigheden uitgevoerd. De proeven geven daarmee inzicht in de vertaling van de resultaten van de kleine schaalproeven naar prototype omstandigheden. Vanwege de toegenomen complexiteit van de mediumschaal proeven, ten opzichte van de kleine-schaalproeven, zal het aantal uitgevoerd medium-schaalproeven geringer zijn. De medium-schaalproeven zijn gepland in de Deltares Geo-Centrifuge die mogelijkheid biedt om grotere modellen dan de TUDelft centrifuge. Daarnaast is het mogelijk om proeven, zonder verscaling van de zwaartekracht, bijvoorbeeld in de liquefaction tank van de TUDelft, zie figuur C-1 of een vergelijkbare opstelling bij Deltares.



*Figuur C-1, Liquefaction tank opstelling, TUDelft*

De veldproeven geven de mogelijkheid metingen te verrichten bij condities die alle complexiteit van de werkelijkheid in zich hebben. Hiermee geven de veldproeven het meest realistische beeld van de werkelijke situatie. Echter, door omvang en natuurlijke variatie in de ondergrond en dijklichaam zijn de condities niet volledig vastgelegd en is er in de analyse van de resultaten enige ruimte voor interpretatie. Bij voorkeur dient een veldproeven een bezwijkproef te omvatten. Van een dergelijke complexe proef zal er één worden uitgevoerd. Deze proef dient te worden gezien als sluitstuk van de reeks kleine schaalproeven en mediumschaalproeven. Waarin de ervaringen en verbanden die met de kleine en mediumschaalproeven zijn opgedaan worden geïkt aan één veldproef. Voorafgaand aan de bezwijkproef worden in het veld deelproeven uitgevoerd en / of metingen van waterstanden en vervormingen van een dijklichaam tijdens hoog water. Een mogelijke locatie voor het uitvoeren van veldproeven wordt gevormd door het project Reevediep in het beheergebied van waterschap Drentse en Overijsselse Delta, WDO. Het project Reevediep geeft de mogelijkheid praktijkproeven op een bestaande dijk uit te voeren.

Hoewel een praktijkproef wordt gezien als het sluitstuk van de reeks kleine-schaal- en medium-schaalproeven is het niet noodzakelijk om de praktijkproef als laatste uit te voeren. Afhankelijk van de beschikbare planning kan de veldproef ook parallel aan de laboratoriumproeven worden uitgevoerd. De meeste rendement van de veldproef wordt verwacht indien aan de hand van (een deel) van de schaalproeven accenten in de uitvoering of meetplan van de veldproef kan worden gelegd.

#### *Werkpakket 2 Numeriek modelleren; vertaling experimentele data naar algemeen toepasbare rekenconcepten*

Numerieke methoden vormen de 'linking pin' tussen de experimentele data en waargenomen fenomenen enerzijds en de toepassing in de ingenieurspraktijk bij het beoordelen van de stabiliteit van dijken en het ontwerp van dijkversterkingen anderzijds.

Het modelleren van opdrijven vormt een numerieke uitdaging. Hierbij is aandacht voor het type numerieke berekening en het type element dat in een eindige-elementenomgeving numerieke analyse een opening tussen de deklaag en de onderliggende zandlaag mogelijk maakt. Naast een horizontale opening kunnen verticale scheuren ook een rol spelen. Langs de opening en scheuren is er een reductie van wrijvingsweerstand en tevens een sterke afname in hydraulische weerstand. Beide effecten spelen, naar verwachting, op een verschillende schaal. De sterkteafname is lokaal, terwijl de afname in hydraulische weerstand een grote invloed heeft op de stijghoogte in de omgeving van de scheur. Het sterkte- en vervormingsgedrag en de ontwikkeling van de waterspanningen rondom de scheuren zijn gekoppeld. Door de veranderende doorlatendheid zal



de stijghoogte rondom de opbarstzone veranderen, terwijl de stijghoogte de drijvende kracht is achter het vervormen van de toplaag en de ontwikkeling van de bijbehorende scheuren.

Het is gebruikelijk om in numerieke berekeningen 'plane strain' (vlakke rek) condities aan te nemen. Dit wil zeggen dat de schematisering van het dijklichaam en ondergrond wordt teruggebracht tot een 2D situatie waarbij er geen veranderingen in geometrie loodrecht op het gekozen dwarsprofiel zich voordoen. In het geval van scheurvorming past deze benadering indien zich een lange scheur evenwijdig aan het dijklichaam ontwikkelt. Indien uit de experimenten blijkt dat de scheurvorming zich voordoet in de vorm van wellen, dat wil zeggen, een lokaal aanwezig opbarstkanaal, zou een 3D benadering meer van toepassing zijn. De 3D analyses zijn aanzienlijk complexer dan de conventionele 2D analyses.

Naast het correct modelleren van de hydraulische aspecten, de sterkte ontwikkeling van de toplaag en de daaropvolgende stabiliteit van het dijklichaam, dient ook oog te zijn voor de praktische toepasbaarheid. In de eerste fase van werkpakket 2 zal de nadruk liggen op het correct modelleren. In de tweede fase wordt een werkwijze en methode ontwikkeld die geschikt is voor de ingenieurspraktijk.

#### *Werkpakket 3, Toepassing; ontwikkeling rekenregels*

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is het realiseren van een verbeterde methode van het beoordelen van de stabiliteit van dijken dan wel het ontwerpen van dijken waar opdrijven of opbarsten van het achterland tijdens maatgevende omstandigheden optreedt. Een aanzet hiertoe is gegeven in hoofdstuk 3 van dit rapport.

In de werkpakketten 1 en 2 zijn de bouwstenen voor de validatie van het berekenen van macrostabiliteit binnenwaarts bij opdrijven of opbarsten van een dunne deklaag. Na de validatie van de numerieke methoden aan de hand van de experimentele resultaten en de eventuele verbeteringen van de numerieke methoden kan een praktische beoordelingsmethode verder worden ontwikkeld. Opgemerkt wordt dat een verbetering van de numerieke methoden ook kan liggen in het verbeteren van de parameterbepaling of schematiseringskeuzes. De praktische beoordelingsmethode dient geschikt te zijn voor de dagelijkse ingenieurspraktijk. De verdere invulling van een dergelijke methode bestaat uit het maken van schematiseringskeuzes en inpassing in de vigerende veiligheidsfilosofie.

Voor een goede implementatie van de ontwikkelde kennis en de daaruit voortvloeiende rekenregels is een goede connectie met het werkveld noodzakelijk. Specifiek wordt hier genoemd het Rijkswaterstaat programma Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium, BOI. Het BOI vormt een link tussen nieuwe technische ontwikkelingen en richtlijnen voor het beoordelen en ontwerpen van dijken.

## C.5 Kosten en baten van het onderzoek

De verwachte zeespiegelstijging en de bijhorende verwachting van stijgende maatgevende rivierwaterstanden leidt tot een continue aandacht voor dijkveiligheid. De nieuwste inzichten in klimaatverandering laten zien dat de levensduur van reguliere dijkversterkingen steeds korter wordt (Haasnoot et al, 2018). Tevens heeft Nederland de afgelopen decennia een periode van toenemende verstedelijking achter de rug, met als gevolg dat er minder ruimte beschikbaar is voor klassieke dijkversterkingen. Om in de komende jaren, rekening houdend met de hierboven geschetste trends, de huidige veiligheid tegen overstromen op peil te houden, is een verdere toename van inzicht in het gedrag van dijken en hun ondergrond noodzakelijk.

In een eerdere voorstudie is door middel van een consequentieanalyse onderzocht wat de potentiële opbrengst is van aanscherping van de huidige beslisregel voor opbarsten bij macrostabiliteit binnenwaarts (Van Hoven, 2016). Uit de consequentieanalyse bleek dat het

faalmechanisme macrostabiliteit bij opbarsten van het achterland relevant is voor 243 km dijk lengte in Nederland. Op basis van de huidige beslisregels voor opbarsten zou circa 90 km hiervan niet voldoen aan de veiligheidseisen. Het benodigde budget voor de bijbehorende dijkversterking wordt geschat op 585 M€. In de consequentieanalyse is ook een schatting gemaakt van de opbrengst van aanscherping van de huidige beslisregels. Afhankelijk van de mate van aanscherping kan de 90 km van de voor macrostabiliteit afgekeurde dijk lengte worden gereduceerd tot 65 km. Dit is een reductie van 25 km, met een geraamde besparing tot 150 M€

De verwachte zeespiegelstijging zal niet alleen een verhoging van maatgevende rivierwaterstanden tot gevolg hebben, maar ook toename van maatgevende stijghoogten in dieper gelegen zandlagen. Verwacht mag dan ook worden dat opdrijven en opbarsten van het achterland in de toekomst vaker en op meer locaties gaat voorkomen. De eventuele kostenbesparing van vermeden toekomstige dijkversterkingen als gevolg van veranderende belastingscondities is in het bovenstaande overzicht niet meegenomen.

Het hierboven geschetste onderzoek is in deze fase van planvorming nog niet volledig tot in detail uitgewerkt en begroot. De werkzaamheden zullen zowel bij Deltares als aan de TUDelft worden uitgevoerd. De verwachte doorlooptijd zal in de orde van vier jaar zijn.

Op basis van vergelijkbaar onderzoek is een orde-grootte raming opgesteld. Voor het gehele onderzoek, inclusief veldproef, wordt een bedrag geraamd van 3,5 à 4 M€.

De geraamde onderzoekskosten liggen in de orde van 2,5 % van de mogelijke besparing.

## C.6 Referenties

Bauduin C.M., Moes C.J.M. (1987) study of the deformation and failure behaviour of dikes at low effective stresses in the bottom of the top layer above the Pleistocene sand, Grondmechanica Delft, (in Dutch)

Haasnoot M., Bouwer L., Diermanse F., Kwadijk J., van der Spek A., Oude Essink G., Delsman J., Weiler O., Mens M., ter Maat J., Huismans Y., Sloff K., Mosselman E. (2018) Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning Deltares rapport 11202230-005-0002

Van Hoven, Koopmans R., van Zuijlen J. (2016) POVM opbarsten, consequentie-analyse POVM rapport 1220504

Van Hoven A., Noordam A., Wiersma A. (2018) POVM Opbarsten, POVM rapport 11201267-002

POVM, 2020a, POVM Eindige-elementenmethode, een publicatie van de POV Macrostabiliteit, <https://publicwiki.deltares.nl/display/POVM/Publicaties> (laatste bezocht 1 juni 2020)

POVM, 2020b, POVM Langsconstructies, Een publicatie van de POV Macrostabiliteit, <https://publicwiki.deltares.nl/display/POVM/Publicaties> (laatst bezocht 1 juni 2020)

Van M.A. (2001) New approach for uplift induced slope failure, XVth International Conference on Soil Mechanics and Geological Engineering, Istanbul, Turkey

## D Afstemming piping

Het projectonderdeel 'afstemming piping' bestond naast overleg met piping experts ook het uitvoeren van de volgende twee concrete acties:

- Het formuleren van nodige acties voor een harmonisatieslag tussen omgaan met opbarsten bij macrostabiliteit binnenwaarts en bij piping. Hierin wordt een taak voorzien voor het programma KPP BOI. Het resulterende memo in de vorm van een voorstel is tot stand gekomen met pipingexperts en intern Deltares ingediend als voorstel voor het KPP BOI programma. Het memo is integraal opgenomen in § D.1.
- Meekijken bij het nooddrainexperiment op 7 februari 2020 tijdens hoogwater op de Waal in de uiterwaard bij IJzendoorn. In het kader van onderzoek naar de effectiviteit van een nooddrain als noodmaatregel tegen piping is gekeken in hoeverre hier opbarsten zou kunnen optreden. Uiteindelijk is dat niet gebeurd en is kunstmatig een 'pipe' geboord. Een kort verslag is opgenomen in § D.2.

### D.1 Memo afstemming macrostabiliteit bij opbarsten en piping, d.d. 12 juni 2020

#### D.1.1 Inleiding

De mechanismen macrostabiliteit binnenwaarts en piping delen een gemeenschappelijk deelmechanisme, namelijk opdrijven gevolgd door opbarsten. Afstemming tussen onderzoekers die zich met piping of macrostabiliteit bezig houden is om verschillende redenen niet vanzelfsprekend. In het kader van de POV Macrostabiliteit Opbarst-studie is gevraagd om afstemming te zoeken met piping-onderzoekers.

Het doel van de afstemming is enerzijds het gebruiken van elkaars kennis, data, modellen en anderzijds het streven naar harmonisering in de dijk ontwerp- en beoordelingsgereedschappen. Zo is de ontwikkeling van de waterspanning in de zandlaag, het opdrijven en eventueel het opbarsten van de deklaag niet anders voor piping dan voor macrostabiliteit. Hoe vervolgens met de kans op, en de gevolgen van, opbarsten wordt omgegaan kan wel weer verschillen per mechanisme.

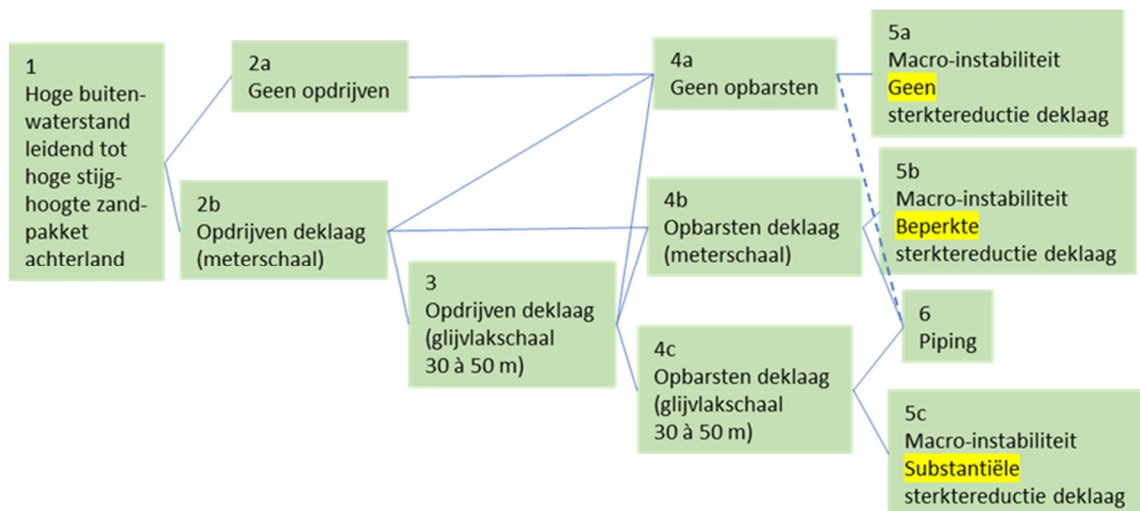
De doelstelling van dit memo is om aan te geven welke fysische processen in het mechanisme opdrijven en opbarsten gelijk zijn en daarmee consistent zouden kunnen worden gemaakt in het BOI. Daar waar tussen de mechanismen een verschil moet blijven bestaan na het initiële opbarsten, kan dit worden uitgelegd.

Dit memo dient als product binnen de POVM Opbarst opdracht, als onderdeel afstemming met piping, en als opzet voor een plan voor harmonisatie tussen de mechanismen piping en macrostabiliteit ten aanzien van het deelmechanisme opbarsten. Het memo is daarom ook gericht aan vertegenwoordigers van het BOI.

#### D.1.2 Opdrijven en opbarsten

Het proces van hoogwater tot en met opbarsten van de deklaag gevolgd door piping of macro-instabiliteit binnenwaarts is als eerste opzet weergegeven in het schema in Figuur Bijlage D-1. Het schema kan gezien worden als een deel van een faalpad. Voor een compleet faalpad tot een catastrofale overstroming van het achterland moeten na de laatste stappen (5 en 6) nog een aantal stappen worden doorlopen (geen succesvolle noodmaatregel, inzakken van de dijk tot onder de buitenwaterstand, bresvorming, overstroming). Het is de kans op een catastrofale overstroming waar de norm voor is bedoeld.

Bij de blauwe lijntjes in het schema horen kansen. Deze kansen zijn afhankelijk van locatiespecifieke eigenschappen van de dijk, de ondergrond inclusief het watervoerende zandpakket en de karakteristieken van het hoogwater.



Figuur D-1 Stappenschema van een hoogwater tot mechanismen piping of macrostabiliteit binnenwaarts

Toelichting bij de stappen:

- 1) Verhoging van de buitenwaterstand leidend tot verhoging stijghoogte in het zand onder de deklaag in het achterland. Bij piping wordt voor de relatie tussen de buitenwaterstand en de stijghoogte onder de deklaag gebruik gemaakt van een dempingsfactor. Bij macrostabiliteit binnenwaarts wordt gewerkt met de Waternet Creator. In beide gevallen zou het uitvoeren van een grondwaterstromingsberekening een nauwkeuriger resultaat geven. Over harmonisering van de berekening van de waterspanningen wordt momenteel een apart plan opgesteld.
- 2) De verhoging van de stijghoogte kan leiden tot:
  - a) Geen opdrijven, de grenspotential wordt niet bereikt of de deklaag is door bijvoorbeeld een ontwikkelde bodemstructuur (met name scheuren en wormgangen) over de hele laagdikte zodanig doorlatend geworden dat geen drukopbouw onder de deklaag optreedt. Dit kan gebeuren bij relatief dunne deklaagen die in de zomer volledig uitdrogen. Het water kwelt door de deklaag naar het maaiveld en stroomt daar af.
  - b) Lokaal opdrijven van de deklaag. Omdat een deklaag zelden volstrekt homogeen is, en ook het onderliggende zandpakket en stijghoogte hierin dat niet is, zal opdrijven eerst lokaal gebeuren bij bij een kopsloot of een andere lokale dunne plek in de deklaag. Er ontstaat een dun waterlaagje tussen de deklaag en het zandpakket.
- 3) Opdrijven op de schaal van een glijvlak. Indien na lokaal opdrijven de druk van het buitenwater aanhoudt of toeneemt, maar de deklaag barst niet lokaal op (4b) dan kan het oppervlak waarover de deklaag opdrijft uitbreiden tot glijvlakschaal, in de orde van 30 à 50 m in dijkrichting en orde meerdere meters tot tientallen meters haaks op de dijk. Over dit oppervlak bevindt zich een waterlaagje tussen het zand en de deklaag.
- 4) Voor het al dan niet opbarsten van de deklaag worden drie scenario's onderscheiden:
  - a) Geen opbarsten. Of er was geen opdrijven (2a), of er was opdrijven op meterschaal (2b) of zelf glijvlakschaal (3), maar de deklaag scheurt niet, houdt zijn samenhang. Met name voor dikkere deklaagen wordt verwacht dat deze niet snel barsten als gevolg van hoogwater. Bij de beoordeling op macrostabiliteit wordt hiervoor momenteel een kritische laagdikte van 4 m aangehouden, echter dit wordt momenteel nader onderzocht.
  - b) Opbarsten op meterschaal, bij een kopsloot of lokale zwakke of dunne plek in de deklaag na eerst lokaal opdrijven (2b) of ook na opdrijven op grote schaal (2c). Bij globaal opdrijven kan de deklaag lokaal opbarsten, waarna de druk mogelijk ontsnapt en er niet voldoende drukopbouw

- is om verder opbarsten te bewerkstelligen. Opbarsten betekent dat de deklaag scheurt en samenhang verliest.
- c) Opbarsten op glijvlakschaal. Dit kan enkel gebeuren als er ook al opdrijven op glijvlakschaal was (2c). Op glijvlakschaal scheurt de deklaag. De samenhang gaat verloren en de steun die de deklaag aan het talud kan verlenen neemt substantieel af. In welke gevallen dit kan optreden en hoeveel de sterkte van de deklaag afneemt wordt momenteel onderzocht.
- 5) Macro-instabiliteit kan in elk van de gevallen optreden, echter de mate van opdrijven en opbarsten is van invloed op de steun die de deklaag aan het talud kan leveren en daarmee aan de taludstabiliteit.
- a) Als er geen opbarsten (4a) is dan kan wel macro-instabiliteit optreden, maar hoeft geen rekening te worden gehouden met een gereduceerde deklaagsterkte. Uiteraard wordt wel rekening gehouden met een verhoogde stijghoogte in het zand en daarmee met een verminderde effectieve spanning rondom het grensvlak tussen de deklaag en het zand.
  - b) Indien opbarsten op beperkte schaal optreedt dan kan dit leiden tot een beperkte reducering van de steun die de deklaag kan leveren. Dit scenario wordt momenteel niet expliciet meegenomen, maar valt (rekenkundig) onder 4c) opbarsten op glijvlakschaal.
  - c) Indien opbarsten op glijvlakschaal optreedt (4c) dan moet rekening worden gehouden met een gereduceerde sterkte van de deklaag. Waar zonder opbarsten rekening mag worden gehouden met de weerstand van een uittredende passieve wig, of passief glijvlak, zal deze weerstand door opbarsten minder zijn. Ook dit wordt momenteel onderzocht.
- 6) Piping kan ook in elk van de gevallen optreden. De lijn tussen niet opbarsten (4a) en piping is echter gestippeld, met als reden dat er in dat geval al een bestaand opbarstkanaal aanwezig moet zijn. Dit is gezien het grote aantal bekende (zandmeevoerende) wellen een realistisch scenario. Bestaande opbarstkanalen kunnen in het verleden zijn ontstaan door opbarsten, door onzorgvuldig of niet afgedicht grondonderzoek of bodemstructuren bij dunne dekklagen die gedurende droogte boven het freatisch vlak liggen. Deze wellen zijn veelal bekend bij beheerders en er kunnen maatregelen worden getroffen bij hoogwater. Bij extreem hoogwater en opbarsten van tot dan toe intacte dekklagen (4b) en (4c) kunnen nieuwe zandmeevoerende wellen ontstaan.

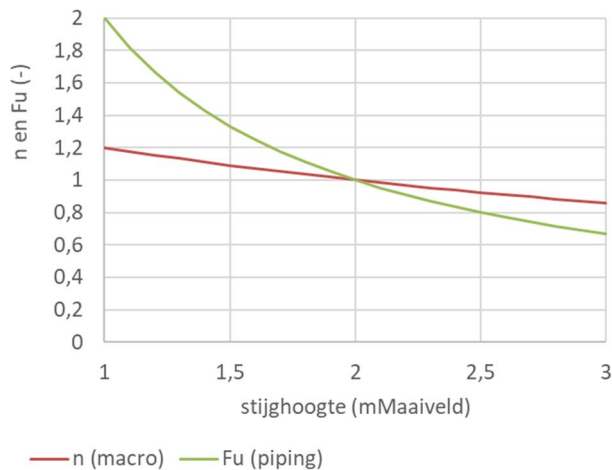
Het optreden van de stappen 1 tot en met 4 zijn onafhankelijk van welk mechanisme wordt beoordeeld (piping of macrostabiliteit). Stap 2 en 3 betreffende het verticale evenwicht van de deklaag, wordt momenteel gebruikt als de scherprechter voor de bepaling van relevantie van opbarsten (stap 4) voor het optreden van het vervolgmecanisme (stap 5 en 6). Dit gebeurt echter nog op verschillende manieren (zie hoofdstuk 3).

### D.1.3 Verschillen bij omgang met opbarsten bij piping en macrostabiliteit binnenwaarts

- D.1.3.1. Verschil in definities van de oprijfveiligheid / stabiliteitsfactor opbarsten  
De oprijfveiligheid  $n$  (-) bij macrostabiliteit en stabiliteitsfactor voor opbarsten  $F_u$  (-) bij piping beschrijven beide het 1D-verticaal evenwicht van de deklaag in het achterland bij een hoge waterdruk in het onderliggende zand. Bij macro stabiliteit en bij piping worden hiervoor verschillende definities gebruikt. Het verschil in definities is eerder aangekaart in ENW-Techniek. De Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit waarschuwt expliciet voor het verschil.

Op het moment van opdrijven zijn de factoren voor piping en macrostabiliteit binnenwaarts gelijk (1,0), echter bij afwijkende stijghoogtes in het zand, wijken de factoren van elkaar af. De grootte van de afwijking is situatieafhankelijk, maar vaak substantieel.

**Voorbeeld:** Beschouwen we een deklaag van 4 m dik met een gemiddeld gewicht van  $15 \text{ kN/m}^3$  en een freatisch vlak gelijk aan het maaiveld en met een toenemende stijghoogte in het onderliggende zandpakket. De kritische stijghoogte in het zand is gelijk aan 2 m boven het maaiveld. Op dat moment geldt dat  $n=F_u=1,0$ . Als de stijghoogte nog maar 1 m boven maaiveld is, dan geldt  $F_u=2$  en  $n=1,2$ . Als de stijghoogte gelijk is aan 1,65 m boven maaiveld, dan bereikt  $F_u$  de waarde van 1,2 en is  $n$  gelijk aan 1,06 (Figuur Bijlage D-2).



Figuur D-2  $n$  (oprijfveiligheid bij macrostabiliteit) en  $F_u$  (stabiliteitsfactor voor opbarsten bij piping) afgezet tegen de stijgheighte in het onderliggende zandpakket voor bovengenoemd voorbeeld (groen en rood zijn arbitrair gekozen kleuren, er schuilt hierin geen voorkeur van de auteur).

De factoren  $n$  en  $F_u$  zijn slechts indicatoren van de kans op opdrijven, waarbij wordt opgemerkt dat opdrijven of het overschrijden van het 1D-verticaal evenwicht niet automatisch wordt gevolgd door opbarsten. De kans op overschrijding van het 1D-verticaal evenwicht is afhankelijk van onzekerheden in de deklaagdikte, deklaaggewicht, de stijgheighte in het zandpakket en de ruimtelijke variabiliteit van deze parameters. De stijgheighte in het zand is weer afhankelijk allerlei andere onzekere parameters. Deze parameters en onzekerheden hierin trekken zich niets aan van het beschouwde mechanisme, piping of macrostabiliteit.

Bij beoordeling van opbarsten binnen het mechanisme piping wordt de vak-kans van optreden van opbarsten  $P_{f;u}$  geschat met de formule:

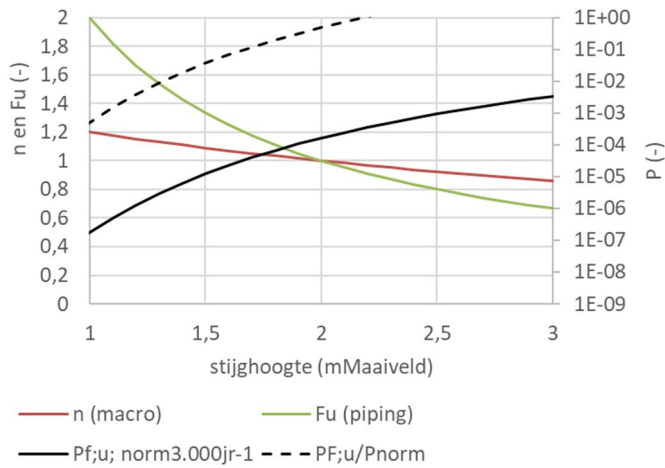
$$P_{f;u} = \Phi \left( - \frac{\ln \left( \frac{F_u}{0,48} \right) + 0,27 \beta_{norm}}{0,46} \right), \text{ waarin:} \quad \text{Vergelijking 1}$$

$$F_u = \frac{D_{deklaag} (\gamma_{sat} - \gamma_{water})}{\gamma_{water} (\phi_{exit} - h_{exit})}$$

Waarin:

- $F_u$  Stabiliteitsfactor voor 1D-verticaal evenwicht (-)
- $D_{deklaag}$  Laagdikte cohesieve deklaag (m)
- $\gamma_{water}$  Volumiek gewicht van water [kN/m<sup>3</sup>].
- $\gamma_{sat}$  Verzadigd volumiek gewicht van de cohesieve deklaag [kN/m<sup>3</sup>].
- $\phi_{exit}$  Stijgheighte in de watervoerende laag bij uittredepunt ten opzichte van NAP [m].
- $h_{exit}$  Freatisch niveau, of hoogte van het maaiveld, bij uittredepunt ten opzichte van NAP [m].

In deze formule moet de stijgheighte in de watervoerende laag bij het uittredepunt bepaald worden bij de buitenwaterstand bij de norm, dit is dezelfde buitenwaterstand als waarbij de oprijfveiligheid voor macrostabiliteit wordt bepaald. De kans op opbarsten volgens de bovenstaande formule is in het eerder genoemde voorbeeld geplot, uitgaande van een normkans van  $\beta_{norm}=1/3.000 \text{ jr}^{-1}$ . De kans staat op de secundaire as van Figuur Bijlage D-3. De kans op opbarsten bij een waterstand bij de norm van 2 m boven maaiveld is in de orde van  $0,5 \times 10^{-3}$ . Deze kans is zo klein, omdat hierin de kleine kans van optreden van de hoge waterstand is verwerkt.



Figuur D-3 Jaarlijkse kans van optreden van opbarsten  $P_{f;u}$  (-) gegeven dat de stijghoogte (mMaaiveld) is bepaald bij een waterstand met een overschrijdingskans gelijk aan de norm.

Anders dan bij piping wordt de oprijfveiligheid bij macrostabiliteit niet als een stochast beschouwd. Om een idee te krijgen met welke kans op opbarsten bij macrostabiliteit impliciet wordt rekening gehouden, wordt voor het eerder genoemde voorbeeld de werkwijze voor piping gevolgd. Stel dat in het voorbeeld de stijghoogte in het zand bepaald bij een buitenwaterstand met een overschrijdingskans gelijk aan de norm gelijk is aan 1 m boven Maaiveld. In dat geval is  $n$  gelijk aan 1,2 (rode lijn in Figuur Bijlage D-3) en  $F_u$  gelijk aan 2 (groene lijn in Figuur Bijlage D-3). De waarde van  $n=1,2$  is bij macrostabiliteit de kritische waarde waarbij rekening moet worden gehouden met opbarsten indien de deklaagdikte 4 m of dunner is. Volgens de methode piping is de kans op opbarsten  $P_{f;u} \approx 10^{-7} \text{ jr}^{-1}$ , gegeven  $n=1,2$ , ofwel  $F_u=2$  in het voorbeeld. In deze kans is verwerkt dat de kans op het overschrijden van de stijghoogte van 1 m boven maaiveld al heel klein is (namelijk de gehanteerde norm in het voorbeeld  $1/3.000$ ). De kans op opbarsten gegeven onderschrijden van de buitenwaterstand bij de norm is ongeveer gelijk aan  $P_{f;u}/\text{norm}$ . Dit is de stippellijn in Figuur Bijlage D-3. Met de methode piping wordt de kans op opbarsten bij onderschrijding van de stijghoogte van 1 m boven maaiveld aldus geschat op orde  $0,5 \times 10^{-3}$ , waarbij opgemerkt dat dit slechts een benadering is. Kort samengevat wordt er bij macrostabiliteit vanuit gegaan dat voor het voorbeeld een berekening moet worden gemaakt waarbij de sterkte van de deklaag tot 0 is gereduceerd, terwijl de kans op opdrijven (niet opbarsten) volgens de bij piping gehanteerde methode nog in de orde van  $10^{-3}$  ligt. Het is dus de vraag in hoeverre het meenemen van deze kans impact heeft op de ontwerp en beoordelingsregels voor macrostabiliteit binnenwaarts.

Het is mogelijk en verdedigbaar dat de eisen aan de kans op opdrijven, gevolgd door opbarsten, verschillend zijn voor het mechanisme piping en macrostabiliteit. Opbarsten kan ernstiger gevolgen hebben voor het een dan voor het andere mechanisme. Daarnaast is bij piping het lokaal ontstaan van een scheur of opening in de deklaag ernstig te noemen, terwijl bij macrostabiliteit bij opbarsten wordt uitgegaan van het volledig verloren gaan van de samenhang van de deklaag op een lengteschaal van minimaal een glijvlak (30 à 50 m). Hoewel de te stellen eis aan het 1D-verticaal evenwicht daarom anders kunnen zijn, is het echter onlogisch en niet noodzakelijk om hiervoor verschillend gedefinieerde indicatoren te gebruiken.

Harmonisering van de twee aparte oprijfveiligheden tot één oprijfveiligheid heeft voor- en nadelen.

- *Voordelen* zijn:
  - het samenvoegen van twee rekenstappen tot één, dezelfde factor is voor beide mechanismen te gebruiken.
  - Het scheppen van duidelijkheid en het daarmee voorkomen van verwarring en fouten over de factor. Dit geldt allicht vooral voor toekomstige beoordelaars en ontwerpers. De huidige werkwijze werkt echter in de hand dat de oprijfveiligheid voor macro per

- o ongeluk wordt gebruikt als  $F_u$ , leidend tot een flinke overschatting van de kans op opbarsten en andersom, het gebruik van de definitie van  $F_u$  voor  $n$ , leidend tot een mogelijke onderschatting van de kans op opbarsten bij macrostabiliteit.
- o Het expliciet tegen het licht houden van de kalibratie macrostabiliteit ten aanzien van de oprijfveiligheid in termen van een kans (ipv een factor) en eventueel het deels opnieuw uitvoeren van de kalibratie, mogelijk tot een optimalisatie en in elk geval tot nauwkeuriger beoordelings- en ontwerpregels.
- *Nadelen* zijn:
  - o de inspanning die het kost om de kalibraties opnieuw tegen het licht te houden en mogelijk deze één van de twee, beide, geheel of gedeeltelijk opnieuw uit te voeren,
  - o beperkte aanpassing van documentatie (schematiseringshandleiding),
  - o verwarring scheppen voor mensen die momenteel bezig zijn met het beoordelen en ontwerpen van dijken.
  - o Het opnieuw uitvoeren van één van de kalibraties kan ertoe leiden dat voor specifieke gevallen het beoordelingsresultaat of ontwerp anders uitpakt. Dit leidt tot een mogelijke verstoring van lopende werkprocessen.

De voor- en nadelen spelen met name voor de huidige veelal semi-probabilistische beoordeling van de mechanismen. In de toekomst wordt verwacht dat het mechanisme volledig probabilistisch gaat worden beoordeeld. In dat geval wordt niet de factor bepalend, maar de hieraan gekoppelde kans van optreden (zoals bij piping al het geval is). Deze overstap en de inbedding van de mechanismen als een knoop in faalpaden zou een goed moment kunnen zijn om de rekenmethoden van de factor glad te strijken. Onbekend is echter hoe lang dit nog gaat duren.

#### **Aanbevolen actie 1**

Aanbevolen wordt om een studie te verrichten naar de kalibraties van zowel piping als die van macrostabiliteit ten aanzien van de omgang met de kans op opbarsten. Inmiddels is gebleken dat de oprijfveiligheid  $n$  (-) niet als stochast is meegenomen in de kalibratie macrostabiliteit, maar dat dit wel wordt aanbevolen [1]. Gekeken kan worden of de aanpak zoals gebruikt bij piping hiervoor bruikbaar is. Hierbij kan eveneens worden gekeken welke factor  $n$  (-) dan wel  $F_u$  (-) beter geschikt is, ook met het oog op de probabilistiek.

Uit de studie moet blijken welke aanpassingen nodig zijn in de kalibraties van piping en/of macrostabiliteit en welk factor voor het beschrijven van de oprijfveiligheid hierin het meest geschikt is. Hierin moeten ook de benodigde actie worden benoemd die nodig zijn om rekening te houden met de overdrachtskans tussen opdrijven en opbarsten, op meterschaal en op glijvlaksschaal.

#### **D.1.3.2. Opdrijven, opbarsten en de kritische deklaagdikte**

Bij macrostabiliteit wordt momenteel gewerkt met een rekenwaarde van een kritische deklaagdikte van 4 m. Een dunnere deklaag kan (rekenkundig) wel opbarsten en een dikkere deklaag kan dat (rekenkundig) niet. Dikkere deklaagen kunnen rekenkundig wel opdrijven, maar niet opbarsten. Bij piping geldt geen kritische deklaagdikte. De kans op opbarsten wordt enkel bepaald door de kans op een hoge stijghoogte in het zand en het gewicht van de deklaag. Helaas weet de deklaag niet of deze wordt beoordeeld op macrostabiliteit of op piping ..

De redenering achter de kritische deklaagdikte bij macrostabiliteit is dat deklaagen steun verlenen aan het dijktafval. Bij hoogwater drukt het tafval landwaarts tegen de deklaag. Bij opdrijven kan er een verminderde tot geen schuifspanning door de deklaag worden afgedragen aan het onderliggende zand. De lengte waarover dit gebeurt is de opdrijflengte die zich tot enkele tientallen meter achter de dijk kan uitstrekken. De druk vanuit het tafval wordt dan door de deklaag horizontaal overgedragen naar de deklaag verder in het achterland, waar deze nog niet is opgedreven. Dit betekent echter dat de deklaag onder horizontale druk staat vanuit het tafval en van onderaf wordt opgedrukt door een in omvang toenemende waterlaag. Bij relatief dunne deklaagen bestaat hierbij de vrees voor uitknikken van de deklaag, of het anderszins verloren gaan van de samenhang van de deklaag. Naar verluid is vanuit de



karacteristieke dimensies van dijken, deklagen en veronderstelde opdrijf lengtes en diktes van de waterlaag geschat dat een kritische waarde aan de veilige kant 4 m zou zijn. Nader onderzoek was hiervoor niet uitgevoerd.

Op dit moment wordt er in het kader van de POVM wel onderzoek gedaan naar het al dan niet opbarsten van deklagen met variabele diktes en andere karakteristieken zoals de sterkte, stijfheid en ruimtelijke variabiliteit van het gewicht van de deklaag (2D). Het betreft onderzoek door middel van numerieke simulaties met het eindige elementen methode programma Diana. Het onderzoek kan leiden tot een kans op opbarsten, welke ook bruikbaar is in het beoordelingsspoor piping. Of en welke kritische deklaagdikte hierbij kan worden gehanteerd, of dat andere parameters bepalend zijn voor al dan niet opbarsten, is nu nog onzeker. Overigens wordt opgemerkt dat piping zonder opbarsten ook mogelijk is (zie Hoofdstuk 2, toelichting stap 6).

Het is logisch om bij het berekenen van de kans op opbarsten uit te gaan van dezelfde randvoorwaarden ten aanzien van het deklaagedrag, ongeacht of wordt gekeken naar piping of naar macrostabiliteit. Zoals gezegd kunnen de gestelde eisen aan de kans wel afwijken, maar het fysische proces tot opbarsten en de kans daarop is voor beide mechanisme grotendeels gelijk (zie hoofdstuk D.1.2).

### **Aanbevolen actie 2**

De kennisontwikkeling omtrent opbarsten die momenteel binnen de POVM plaatsvindt is relevant voor de beoordeling op piping. Er moet ruimte worden gecreëerd voor piping experts om zich op de hoogte te stellen van wat er gedaan wordt. In deze fase van het POVM onderzoek wordt met een geavanceerd model in Diana FEA gekeken naar de 2D fysica van het opbarsten. Er wordt daarnaast ook gedacht aan plannen voor validatie van dit modelleerwerk door proeven op element en systeemniveau, al zal dit niet meer door de POVM worden gefinancierd.

De piping experts kunnen een plan opstellen voor:

- Een studie of en hoe de in de POVM opgedane kennis over opbarsten kan worden geïmplementeerd in de beoordeling en het ontwerp van dijken op piping en
- hoe de plannen voor toekomstig onderzoek naar opbarsten eventueel kunnen worden uitgebreid of aangevuld, zodat deze ook van nut zijn voor de beoordeling op piping.

Het voordeel hiervan is de bijna logisch uit samenwerking volgende harmonisering van de beoordelingsspooren piping en macrostabiliteit ten aanzien van opbarsten. Daarnaast ligt het voor de hand dat combineren van de twee sporen ten aanzien van opbarsten leidt tot doelmatiger besteding van onderzoeksmiddelen.

### **D.1.4 Drukverlies na opbarsten**

Bij lokaal opbarsten van de deklaag (stap 4b in hoofdstuk D.1.2) kan de waterbel tussen de deklaag en het zand geconcentreerd door de ontstane scheur of opbarstkanaal ontsnappen. Voor piping is dit een aandrijvende waterstroming die zand kan meenemen naar het oppervlak, het begin van piping. Als het ontsnappen van het water leidt tot een significante drukval in het zandpakket, rondom het ontstane kanaal, dan is dat gunstig voor de macrostabiliteit. De deklaag en het zand maken weer contact en er kunnen weer schuifspanningen naar het zand worden overgedragen. De lekkage door opbarsten kan werken als een ontlastput/ waterontspanner.

In het kade van de POVM is hier eerder grofstoffelijk naar gekeken door het uitvoeren van DGeoflow berekeningen (2D en 3D) met een gescheurde en geperforeerde deklaag. De doorlatendheid van de perforatie was zeer bepalend voor het resultaat. Omdat de doorlatendheid van dit kanaal weer heel afhankelijk is van de zandconcentratie hierin, en hierover destijds onvoldoende bekend was is hier voornog niet verder naar gekeken. Binnen het piping-onderzoek is dit punt geagendeerd, maar dit heeft nog niet geleid tot opstarten van onderzoek hiernaar. Het gedeelde belang van piping en macrostabiliteit kan helpen bij de prioritering.

### Aanbevolen actie 3

Het (al dan niet in combinatie met actie 2) opstellen van een plan of deze kennisontwikkeling kan worden geïmplementeerd bij de beoordeling van het mechanisme macrostabiliteit. Als dit positief blijkt, moet worden gekeken wat hier dan voor nodig is.

## D.1.5

### Werkomschrijving

Actie 1 uit paragraaf D.1.3.1

- Studie naar de kalibraties voor piping en macro-stabiliteit binnenwaarts en [1]. Gekeken wordt naar de achtergrond van de kansberekening van op opdrijven/barsten bij piping. Hoe wordt rekening gehouden met variabiliteit in deklaagdikte en gewicht, met variabiliteit van de dempingsfactor. Enkel opdrijven of is er impliciet een overdrachtskans tussen opdrijven en opbarsten? Hoe is de inbedding is de veiligheidsfilosofie.
- Expert sessie met betrokkenen (o.a. Wim Kanning, Mark van der Krogt, Ana Teixeira en Ruben Jongejan). Hoe kunnen de stappen opdrijven en opbarsten worden geïmplementeerd in de beoordeling op macrostabiliteit binnenwaarts en piping. Hierin kan ook een voorkeur voortkomen ten aanzien van de te hanteren factor voor opdrijven:  $n$  of  $F_u$ .

Resultaat: op een rij hoe het nu zit en uitzetten van de lijn hoe kan worden geharmoniseerd.

Implementatie van harmonisatie in mogelijk te herziene kalibratie(s) opdrijven/ opbarsten, piping en macrostabiliteit en aanpassing van schematiseringshandleidingen (BOI) is hiervan afhankelijk. Gedacht wordt aan twee scenario's:

- Eenvoudig, het raamwerk veiligheidsfilosofie blijft gelijk, enkel factoren worden veranderd. Verwerking hiervan in schematiseringshandleiding (BOI).
- Raamwerk wijzigt, her-kalibratie(s) nodig. Verwerking hiervan in schematiseringshandleiding (BOI).

Voor zowel het mechanisme piping als het mechanisme macro-stabiliteit bij opbarsten zijn er nog diverse mogelijkheden tot verbetering van de ontwerp- en beoordelingsmethoden. Met uitzondering van onderhavig lopend onderzoek binnen de POVM – opbarststudie zitten deze verbetermogelijkheden in de plan-fase. Voor piping gaat het bijvoorbeeld om aanscherping of onderbouwing van het heave-criterium. Hierbij is het van belang wat de drukval over het opbarstkanaal is. Dit is ook bepalend voor drukverlies onder deklaag bij lokaal opbarsten of lekkage door bestaande openingen, wat weer bepalend kan zijn voor het voorkomen van opbarsten op glijvlakschaal en daarmee op de macrostabiliteit binnenwaarts. Voor opbarsten bij macrostabiliteit binnenwaarts wordt een plan opgesteld voor validatieproeven. Het is niet denkbeeldig dat hierbij (begin van) piping zal optreden. Proeven kunnen mogelijk worden gecombineerd. Aanbevolen wordt om bij raakvlak onderwerpen tussen piping en macrostabiliteit binnenwaarts expliciet rekening te houden met interactie en hiervoor bijvoorbeeld twee dagen te ramen, enkele uren voor overleg en een dag om gezamenlijk acties te formuleren.

### Referenties

- [1] Memo: Pore water pressure uncertainties for slope stability, Deltares kenmerk 1230090-034-GEO-0008, versie 1, April 2018

## D.2 Experiment waterontspanners/nooddrains als noodmaatregel vrijdag 7 februari 2020

In het kader van POVM Opbarsten wordt in deze paragraaf (in telegramstijl) verslag gedaan van een experiment met waterontspanners/nooddrains. De proef zelf is voorbereid, uitgevoerd en geanalyseerd in het kader van een ander project.



Hoge waterstand Waal tegen zomerkade



Uitgegraven kopsloot in uiterwaard achter zomerkade

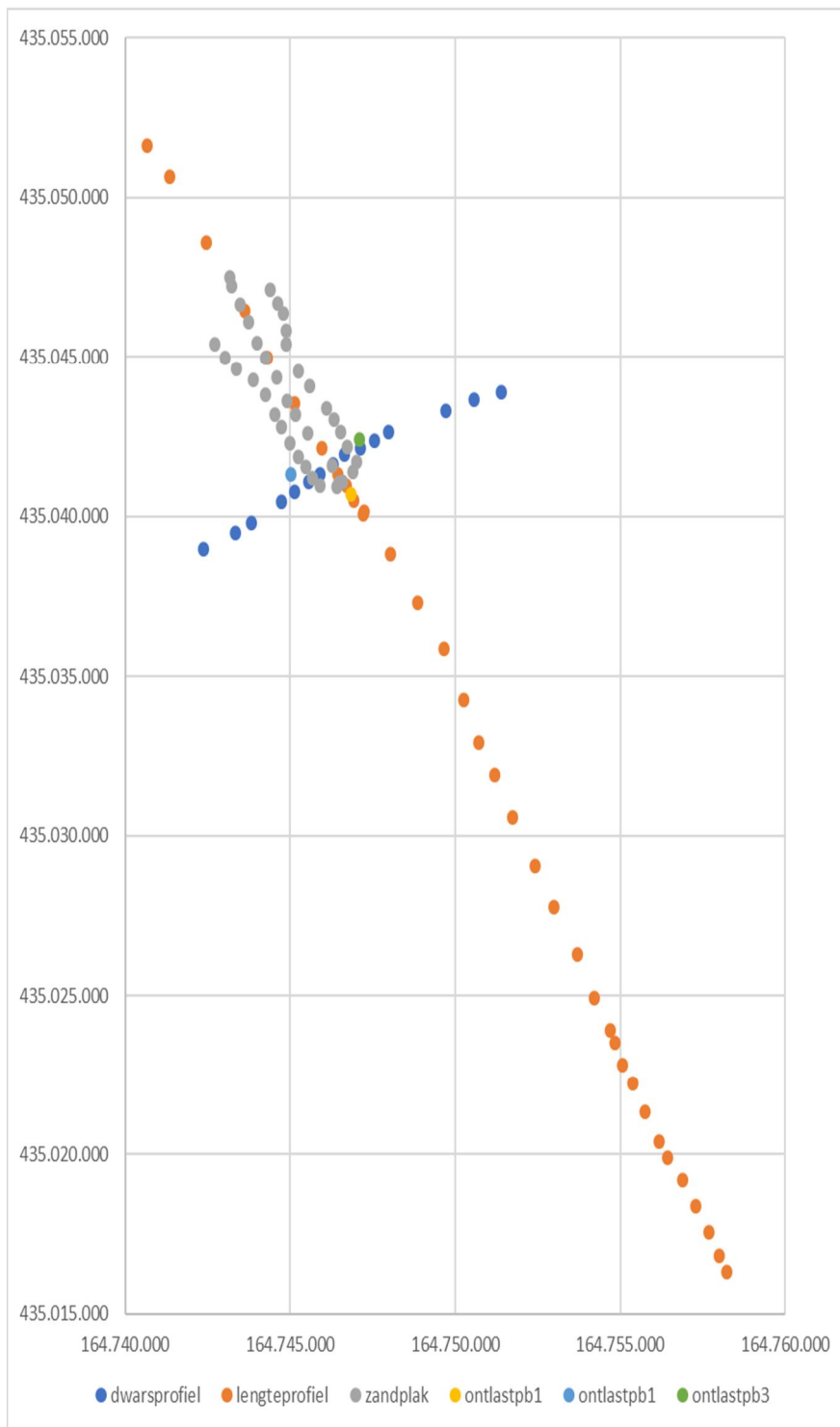


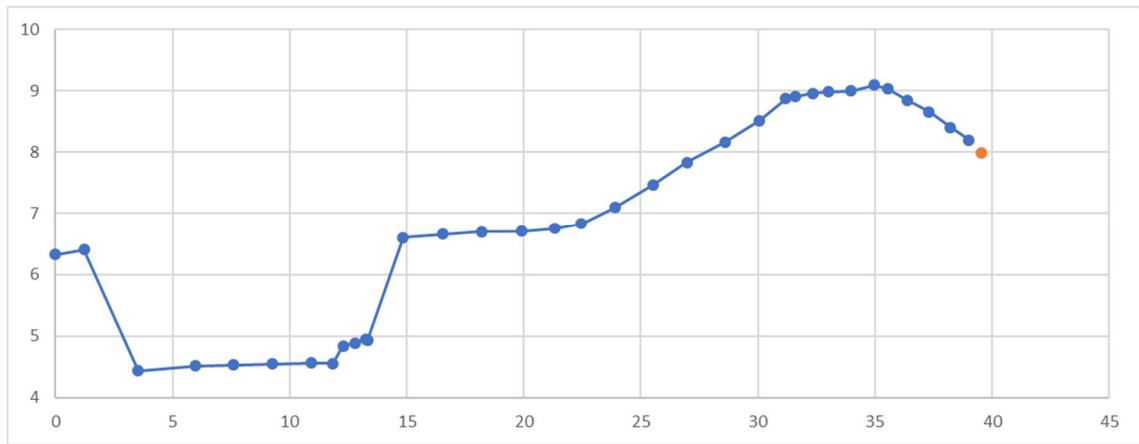
Geen opbarsten



Handmatig 'pipe' maken

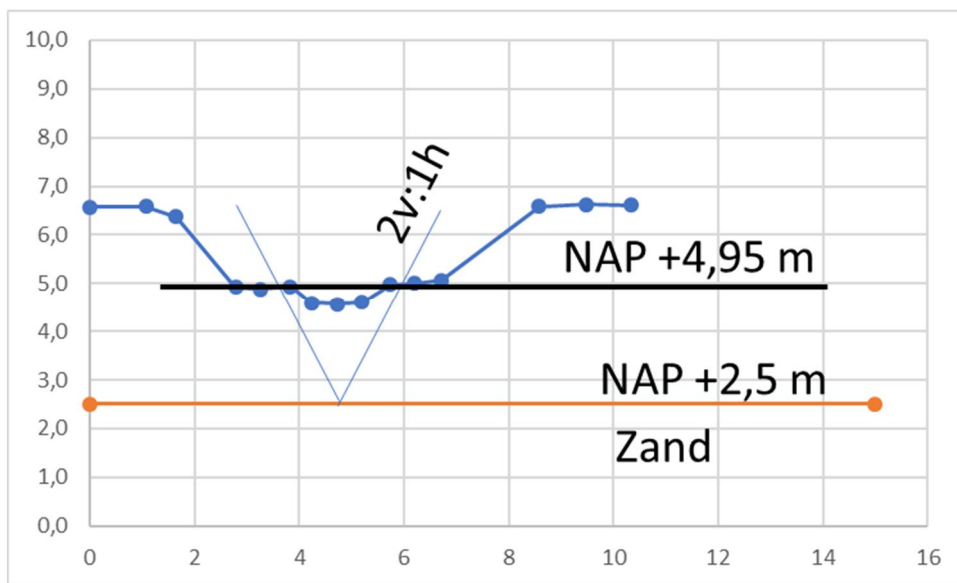
De geometrie van de kopsloot en zomerkade is ingemeten. Overzicht meetpunten, onderste punt is kruising wateroppervlak en zomerkade.





Lengteprofiel ca 9:00, rechts zomerkade.

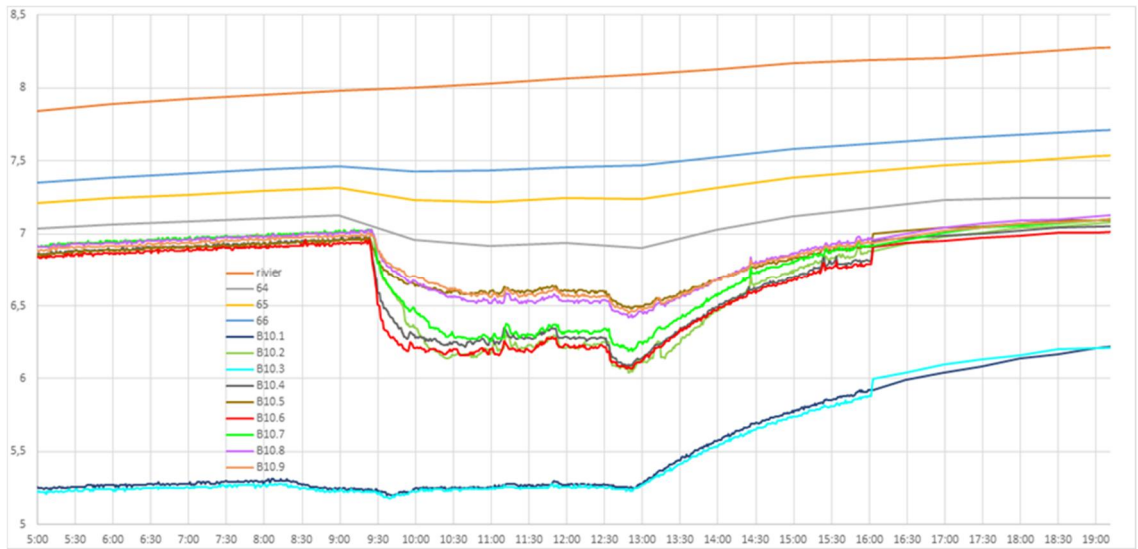
Opbarsten. Dwarsprofiel in onderstaande figuur. Effectieve laagdikte bij 2V:1H spreiding is 2,45 m. Grond betreft hoofdzakelijk zand, kleiig met kleilaagjes, geschat gewicht 18 à 19 kN/m<sup>3</sup>. Gronddruk op het zandpakket 44 à 46,5 kN/m<sup>2</sup>.



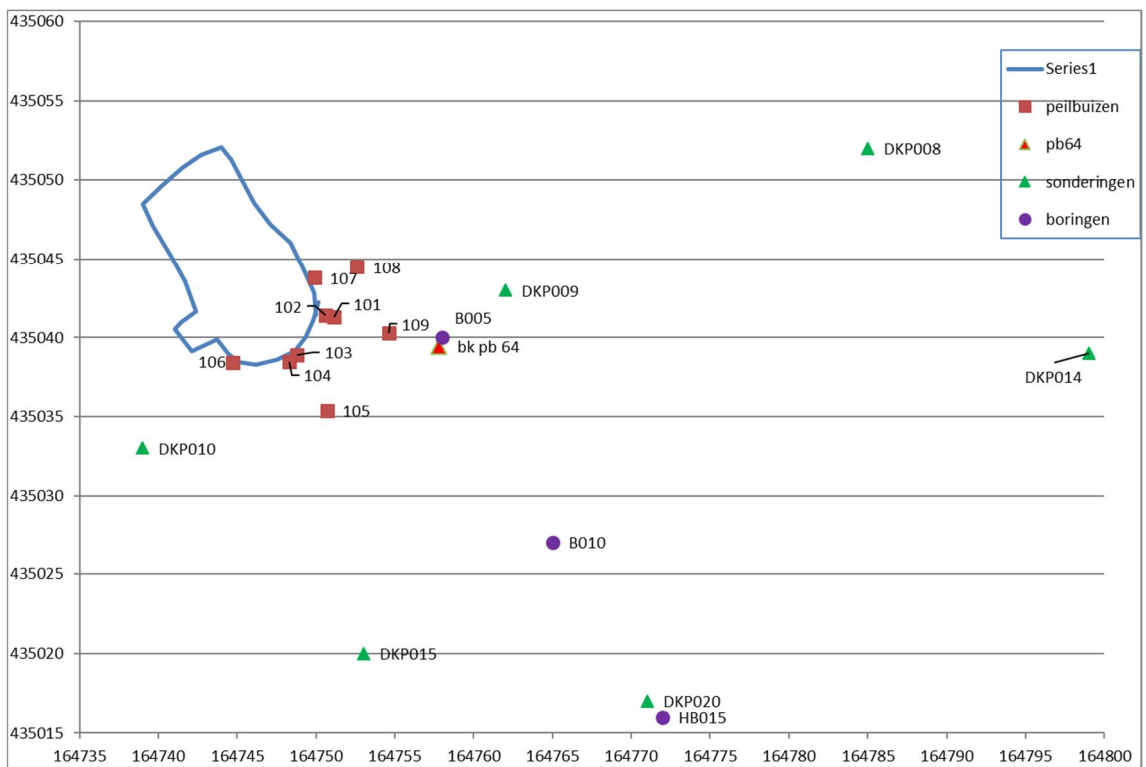
Kritische stijghoogte als de waterdruk gelijk is aan de gronddruk. De kritische stijghoogte in het zandpakket is dan gelijk aan  $\text{NAP } +2,5 \text{ m} + 44 \text{ à } 46,5 \text{ kN/m}^2 / 9,81 \text{ kN/m}^3 = \text{NAP } +7 \text{ m} \text{ à } \text{NAP } +7,25 \text{ m}$ .

De bereikte stijghoogte staat in onderstaande figuur. Stijghoogte in de peilbuizen het dichtst bij de zandmeevoerende wel bedroeg maximaal circa NAP +6,95 à +7,00 m. Pb64, 65 en 66 staan resp. in de binnneteen, kruin en buitenteen van de zomerkade. B10.1 en B10.3 staan in de tussenzandlaag. Overige peilbuizen staan in de zandlaag rondom de wel.

De berekende opdrukveiligheid  $n$  (macrostabiliteit) was daarmee tussen de 1 en 1,07 (-). De opdrukveiligheid  $F_u$  (piping) tussen 1 en 1,15 (-). Opbarsten is (net) niet opgetreden.



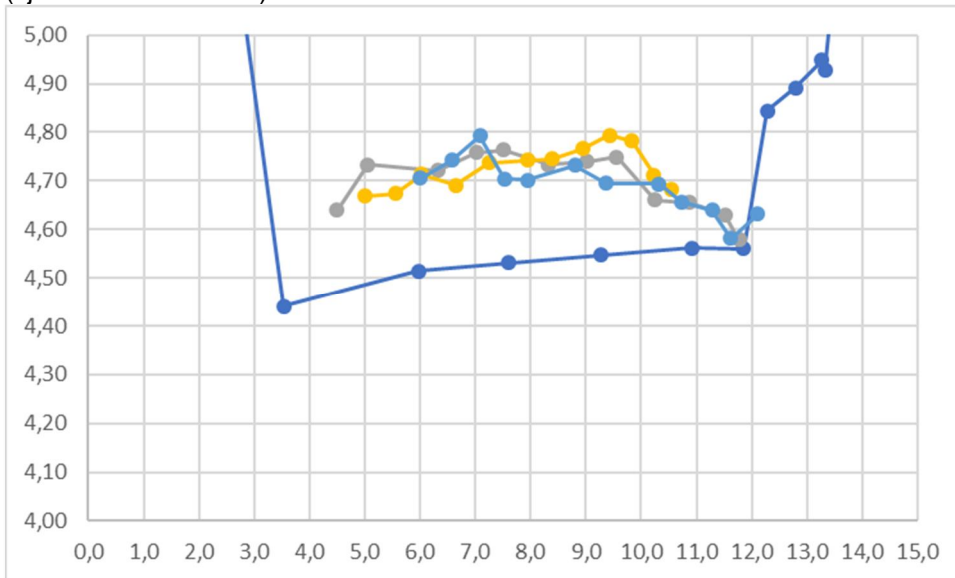
Peilbuismetingen



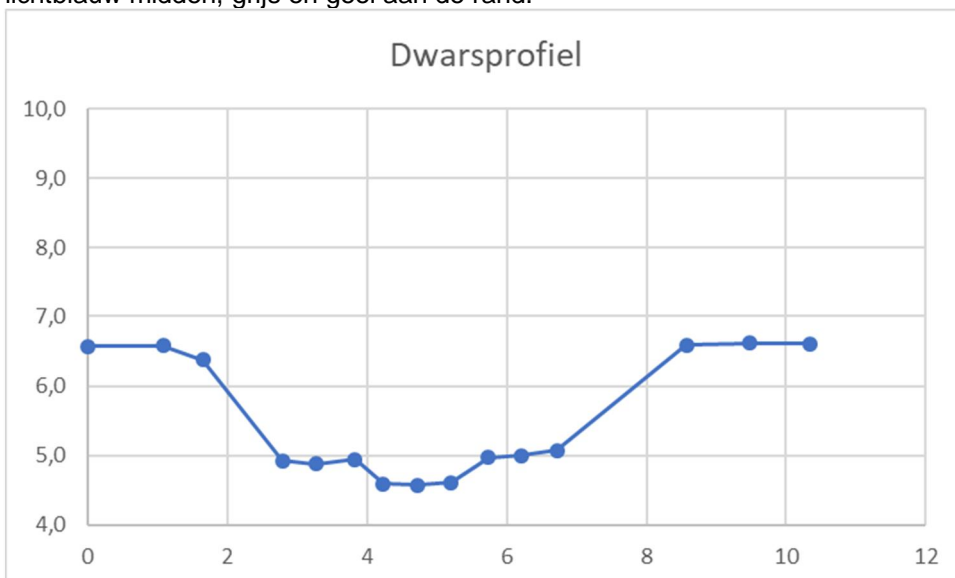
Locaties peilbuizen

De wel voerde behoorlijk wat zand omhoog. Op basis van profielmetingen is een schatting gemaakt van het volume.

Zandvolume op basis van dwars- en lengteprofielen voor de proef circa 9 uur en circa 12 uur (tijdsbestek van 3 uur).



Detail lengteprofiel in de kopsloot, blauw 9:00; andere lijntjes op de zandplakkaat ca. 12:00; lichtblauw midden, grijs en geel aan de rand.



Dwarsprofiel bij de wel ca. 9:00. Middelste geultje, drie punten op ca. NAP +4,55 m is waar het zand in kwam en bleef. Het zand kwam niet boven de eerste rand 'bordes' op ca NAP +4,95 m. Afstand tussen de geulpunten is 1 m.

Grove schatting zand in geul ca. 12:00

beginX	eindX	DeltaX	Dikte (m)	Opp m <sup>2</sup>
4,5	10	5,5	0,22	1,21
10	12	2	0,1	0,2
Totaal				1,41

Breedte 1 m      Volume 1,4 m<sup>3</sup>

1,4 m<sup>3</sup> is wat aantoonbaar is de geul lag. Het zandvolume zal waarschijnlijk groter zijn geweest, vanwege het niet meenemen van de randen van het geultje, het breder worden van de geul in binnenwaartse richting en het feit dat er een onbekend deel van het zand is weg gepompt. Schattenderwijs gaat het waarschijnlijk om orde 2 m<sup>3</sup> totaal in een tijdsbestek van 3 uur.



Voor proef.



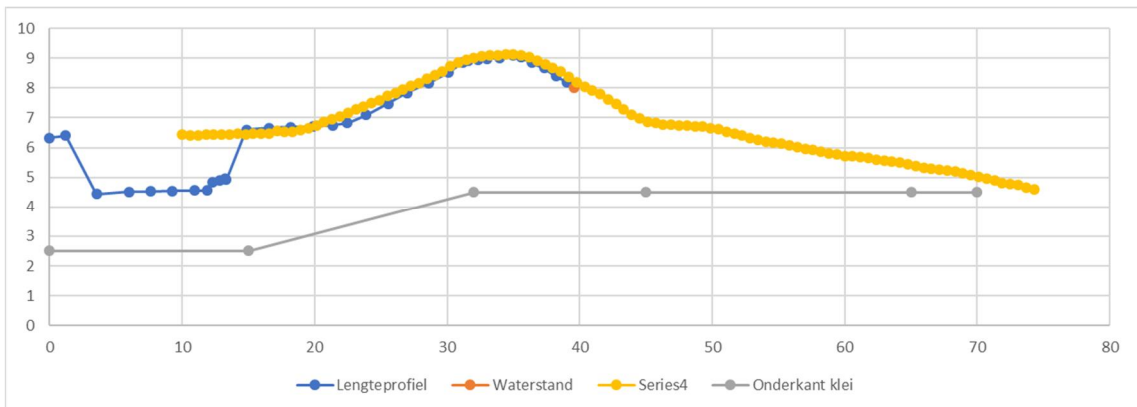
Tijdens proef. Onderkant peilbuis ter hoogte zandpakket



Geultje vult zich met zand.



Kwelweglengte. Uitgaande van kwelweg loodrecht op de zomerkade. Kleilaag dunner dan 1 m ongeveer doorlatendheid van zand. Intredepunt ca. X=65 m in onderstaande dwarsprofiel. Uittredepunt bij X=10 m in onderstaand dwarsprofiel. Kwelweg ca. 55 m.



Verval. Waterstand buitenzijde meting ca. 12 uur NAP +8,07 m. Binnenzijde op bordesniveau NAP +4,95 m. Verval circa 3,1 m.

Dikte cohesieve laag bij wel. Tussenzandlaag doet niet mee. Onderkant cohesieve laag NAP +2,5 m. Bodem greppel c.q. geultje NAP +4,55 m. Dikte circa 2,05 m.