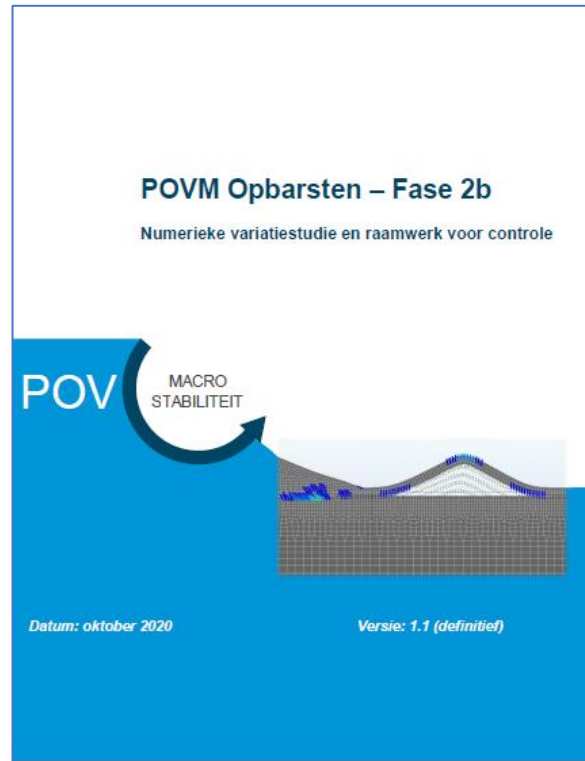


Workshop Opbarsten – Resultaten POVVM onderzoek



Rapport: <https://publicwiki.deltares.nl/display/POVM/Achtergronddocumenten+en+Software>

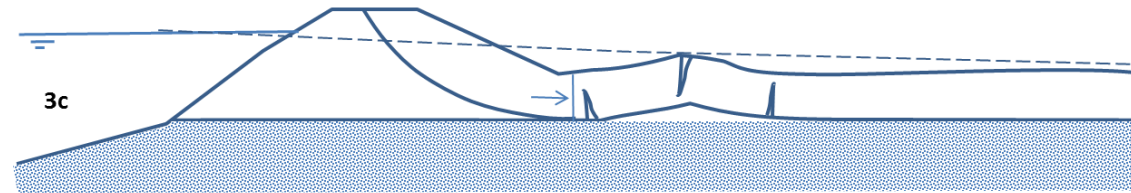
Numerieke variatiestudie, tbv een beter onderbouwd raamwerk voor de beoordeling van Macrostabiliteit bij geringe opdrijfveiligheid

“Eindconclusie is dat de huidige beslisregel voor het uitsluiten van opbarsten op grond van de numerieke resultaten significant aangescherpt lijkt te kunnen worden, maar dat een eerst nog uit te voeren validatie aan proefresultaten nodig is om op deze numerieke resultaten te mogen vertrouwen.”

Marcel Visschedijk - Deltares

Definitie 'Opbarsten'

Voor Binnenwaartse Macrostabieleit (STBI):



Het volledig verloren gaan van de horizontale steundruk die een dunnere deklaag biedt aan het talud, omdat de deklaag eerst opdrijft en daarna uitknikt, onder invloed van buigscheuren.

Noot: de definitie is breder voor 'Piping'

POV

MACRO
STABILITEIT

Waarom is 'Opbarsten' belangrijk



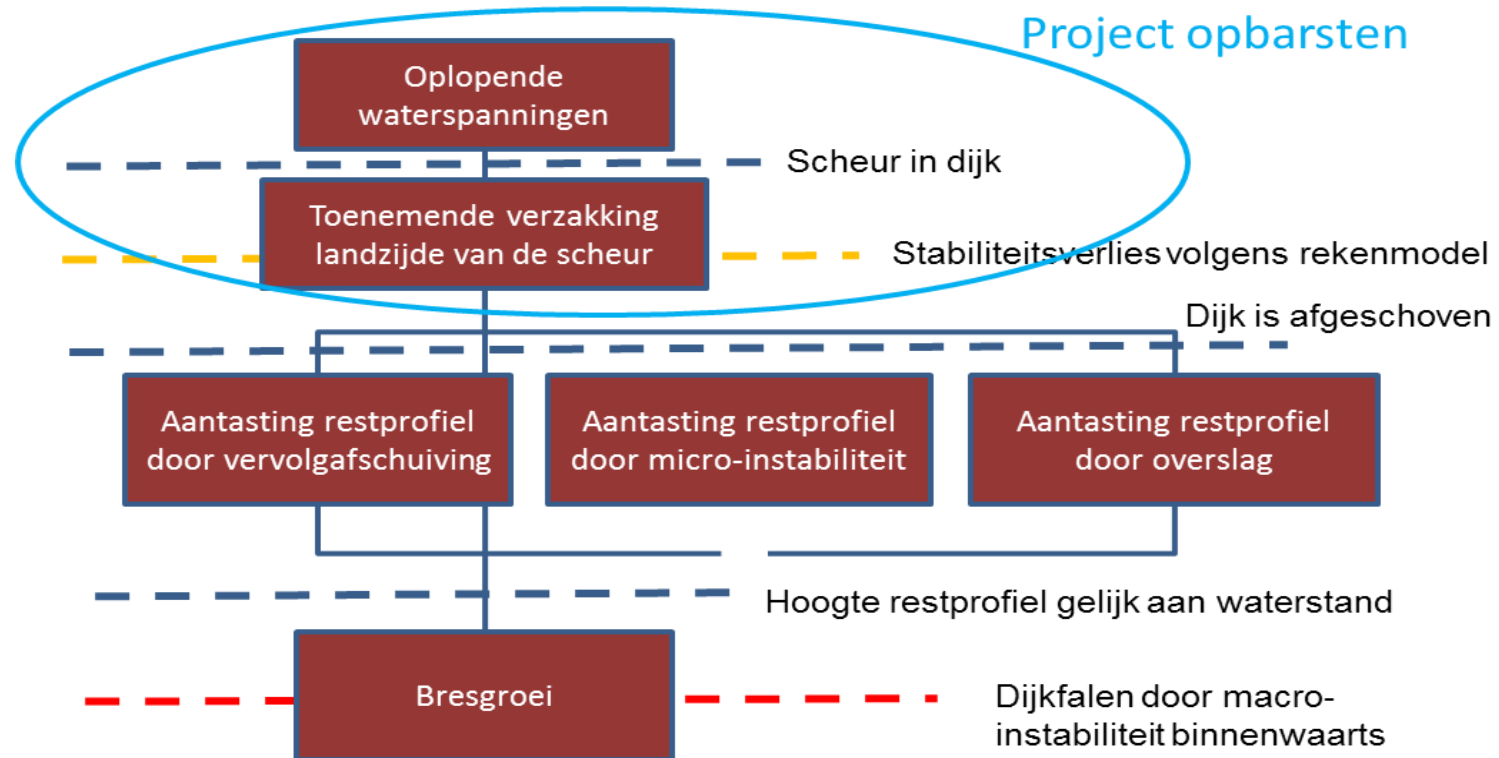
Bij een stabiliteitsbeoordeling en -ontwerp wordt vanwege de vrees voor opbarsten momenteel geen enkele schuifsterkte aan de deklaag toegekend bij een opdrijfveiligheid van 1,2 of lager en een deklaagdikte van 4 m of minder.

De indruk bestaat dat deze beslisregel te conservatief is. Een minder conservatieve beslisregel levert alleen al in het bovenrivierengebied een besparing aan versterkingskosten op tot maximaal 150 M€.

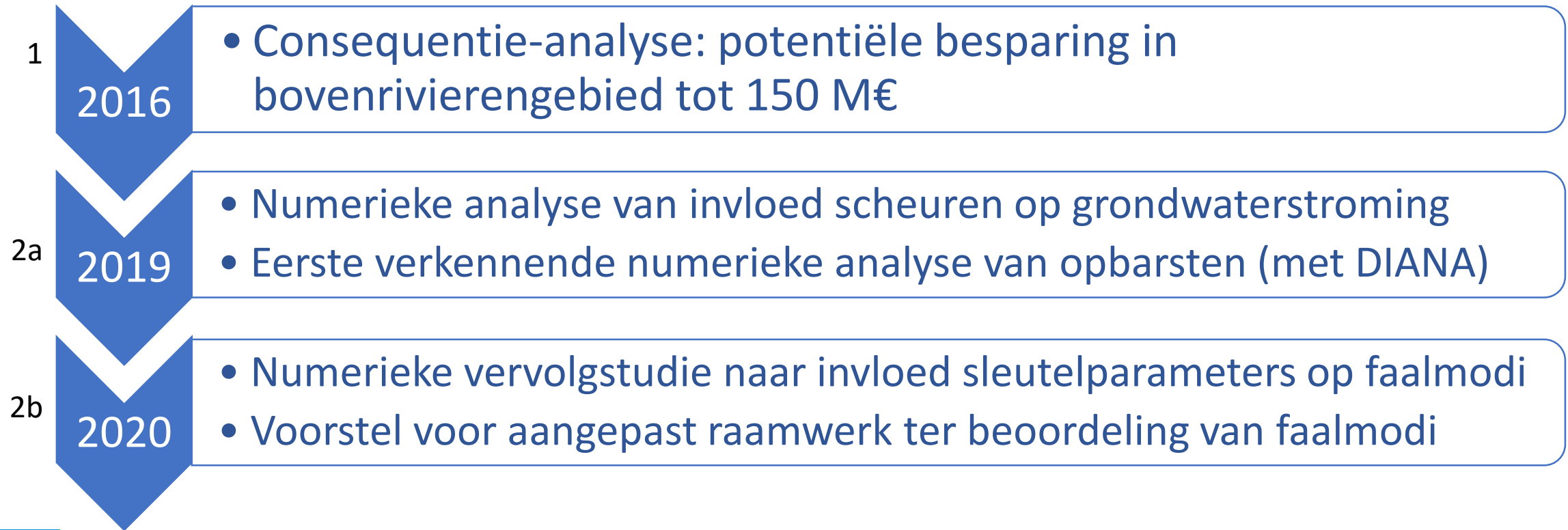
POV MACRO STABILITEIT

Scope POVM onderzoek

WEL: afschuiving. NIET: vervolgebepurtenissen.



POVM onderzoek in vogelvlucht

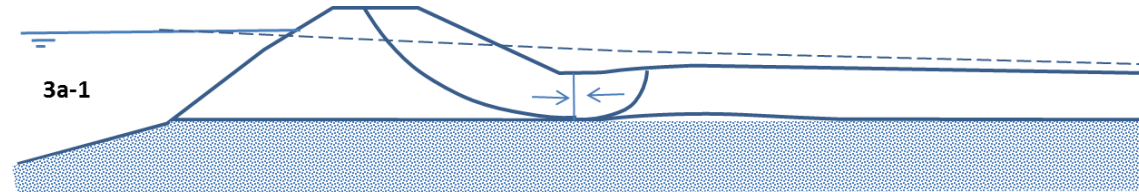


POV

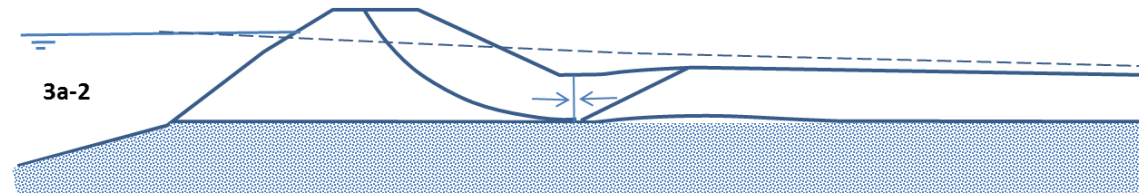
MACRO
STABILITEIT

Initiële verwachting van mogelijke faalmodi

(a) Passief afschuiven tpv teen

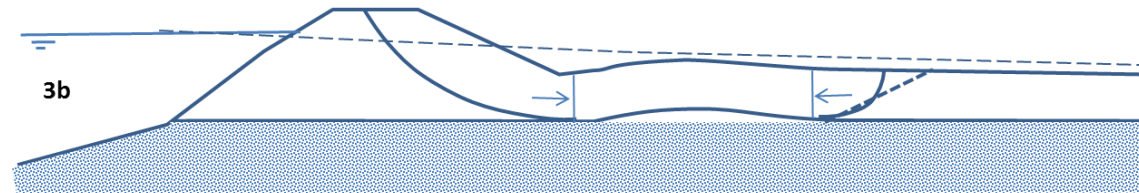


3a-2



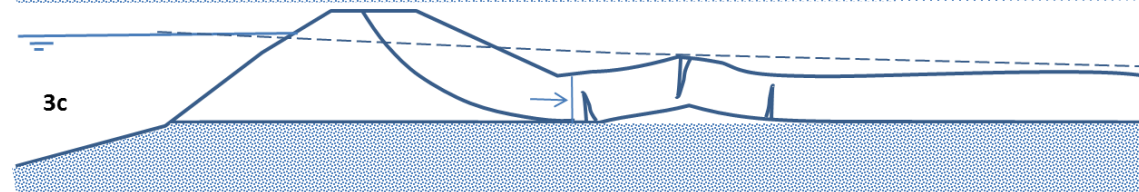
(b) Passief afschuiven tpv einde opdrijfzone

3b



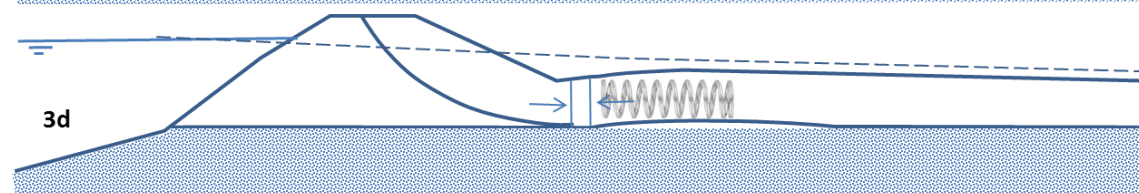
(c) Opbarsten

3c

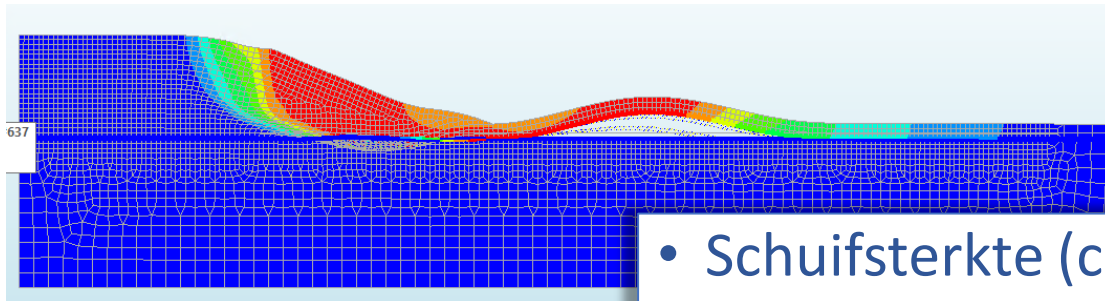


(d) Indrukken

3d



Beschouwde sleutelparameters

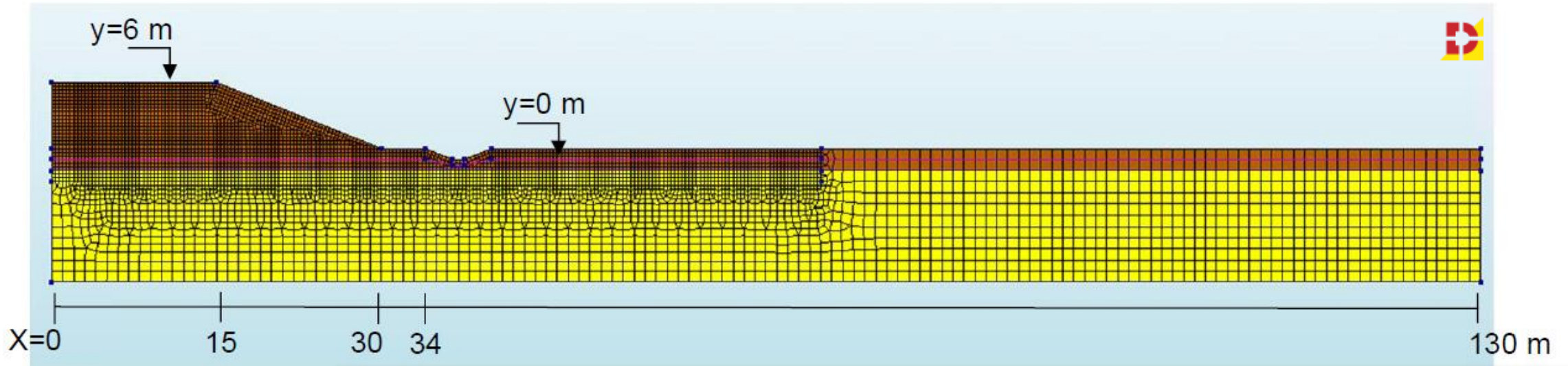


- Schuifsterkte (cohesie) in dijk en deklaag
- Deklaagdikte
- Deklaagstijfheid
- Treksterkte in deklaag
- Doorlatendheid zandlaag
- Aanwezigheid en ligging van sloot

POV

MACRO
STABILITEIT

Geometrie en elementennet



- Zandlaagdikte: 10 m.
- Taludhelling en sloothelling: 1:2,5
- Speciale interface-elementen tussen zand en deklaag
 - Grote horizontale doorlatendheid na openstand leidt in opdrijfzone tot gelijke waterdruk
 - Toestroom van water is nodig om openstand te vergroten (berging)

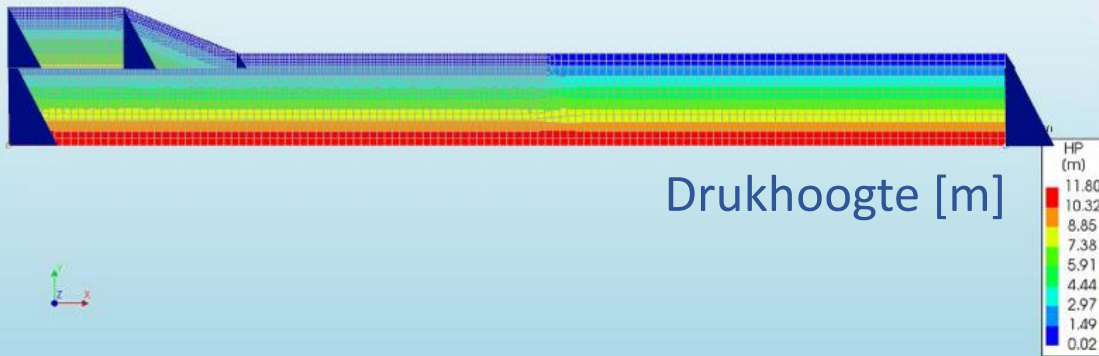
POV

MACRO
STABILITEIT

Waterspanning

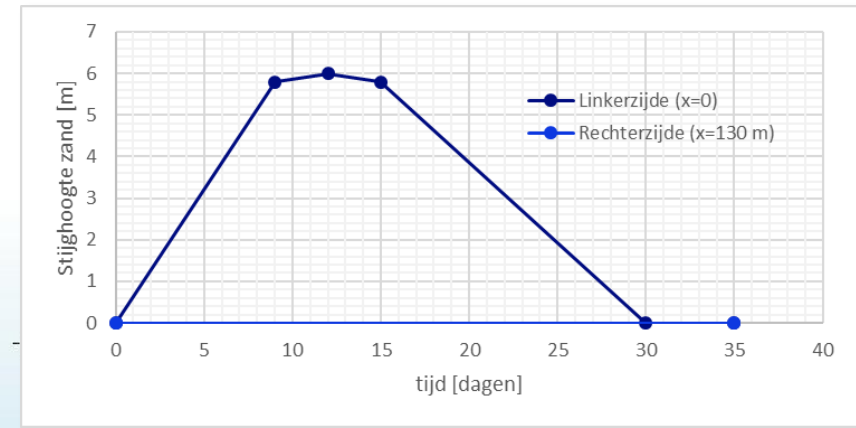
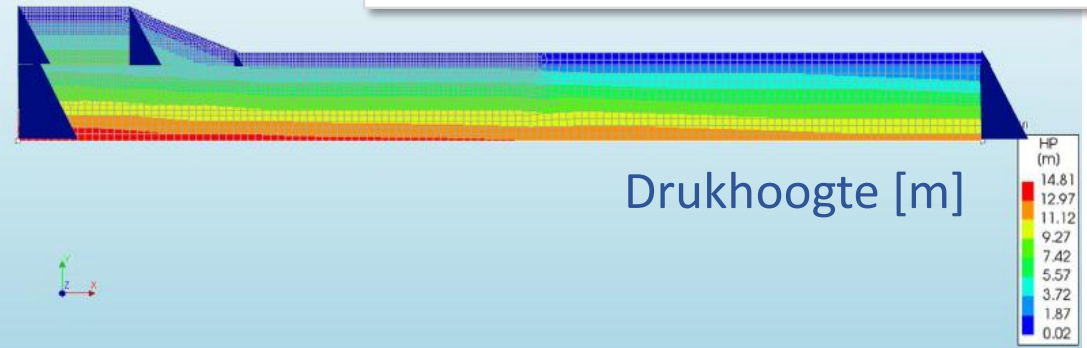
Uplift analysis
Phase 2, Start-step 6, Load-factor 1.0000
Pressure Head HP
min: 0.02m max: 11.80m

t = 0



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

t = 4,7 dag

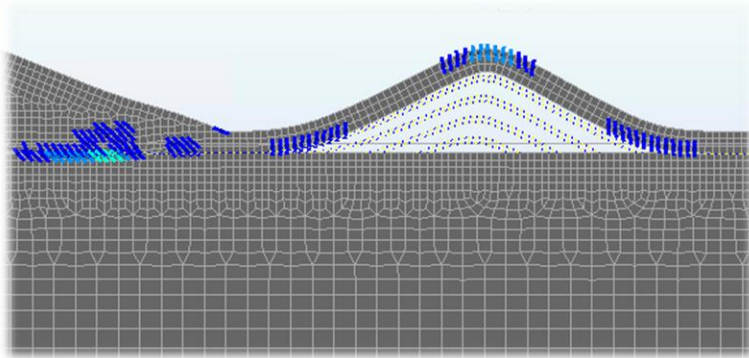


- Opgegeven in dijk en deklaag:
 - freatische lijn op maaiveld
 - hydrostatisch verloop
- Berekend in zandlaag, onder invloed van opdrijven, bij een in de tijd oplopende waterstand aan linkerzijde

POV

MACRO
STABILITEIT

Opbarsten



- Geometrisch niet-lineair (tbv mogelijk uitknikken door drukkracht)
- Scheurvormingsmodel in deklaag, met 'softening' na bereiken treksterkte

POV

MACRO
STABILITEIT

Basisgevallen en Varianten

Parameter		Basisgeval		
Deklaagdikte	[m]	1	2	3
Zandlaagdikte	[m]	10	10	10
Dijkhoogte	[m]	6	6	6
Taludhelling γ	[-]	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
		1	1	
		1	1	
		15	18	
		3	3	
		3	3	
		17	17	
		3	3	
		0,3	0,3	
		0,495	0,495	
		ja	ja	
		20	20	
		32	32	
		20	20	
Zandlaag: Gedraineerde elasticiteitsmodulus E	[MPa]	10	10	10
Zandlaag: Verzadigd soortelijke gewicht γ_{nat}	[kN/m ³]	20	20	20
Zandlaag: Gedraineerde dwarscontractiecoëfficiënt $\nu_{drained}$	[-]	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

Basisgevallen (zonder sloot)

- Deklaagdikte 1m, cohesie 14 kPa
- Deklaagdikte 2m, cohesie 15 kPa
- Deklaagdikte 3m, cohesie 18 kPa

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
3	20	36	3	1,00E-03	3
2	15	40	3	1,00E-03	3
3	18	45	3	1,00E-03	3
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

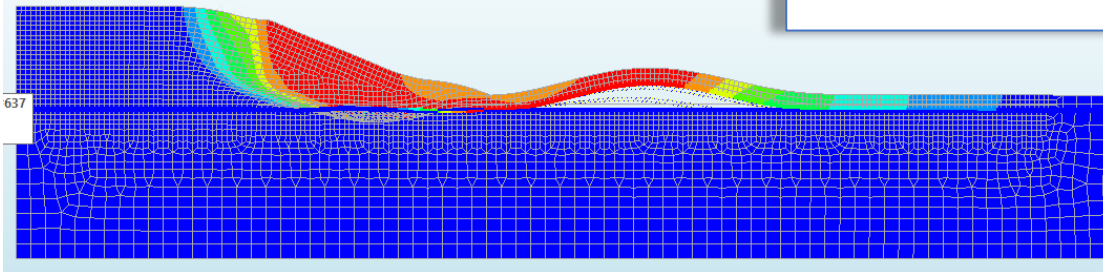
In totaal 42 variaties van sleutelparameters

POV

MACRO
STABILITEIT

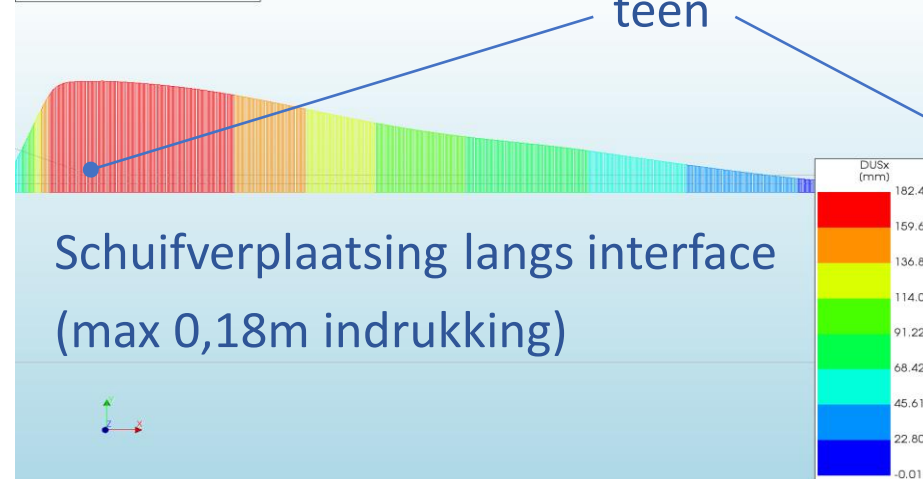
Resultaten voor basisgeval deklaagdikte 1m

Uplift analysis
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour
Displacements TDtXYZ
min: 0.00m max: 0.20m

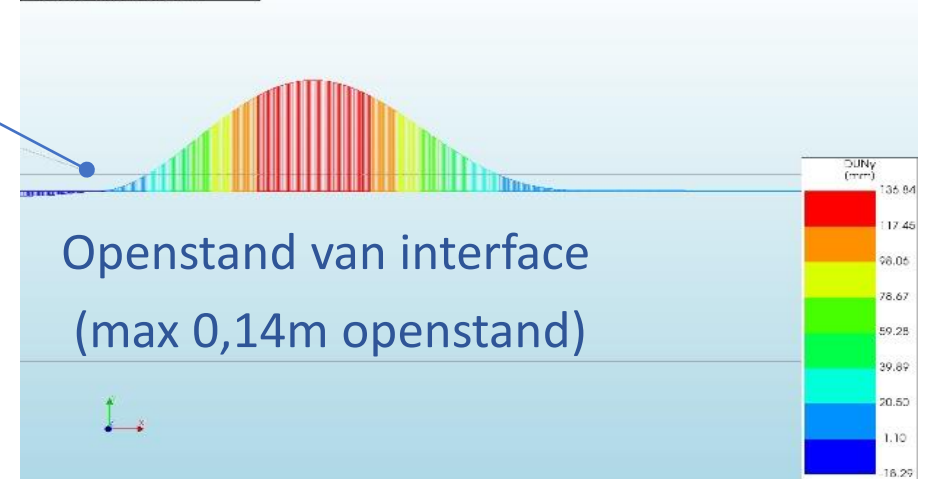


Faalmodus: (begin van) 'Opbarsten', na 'Indrukken'

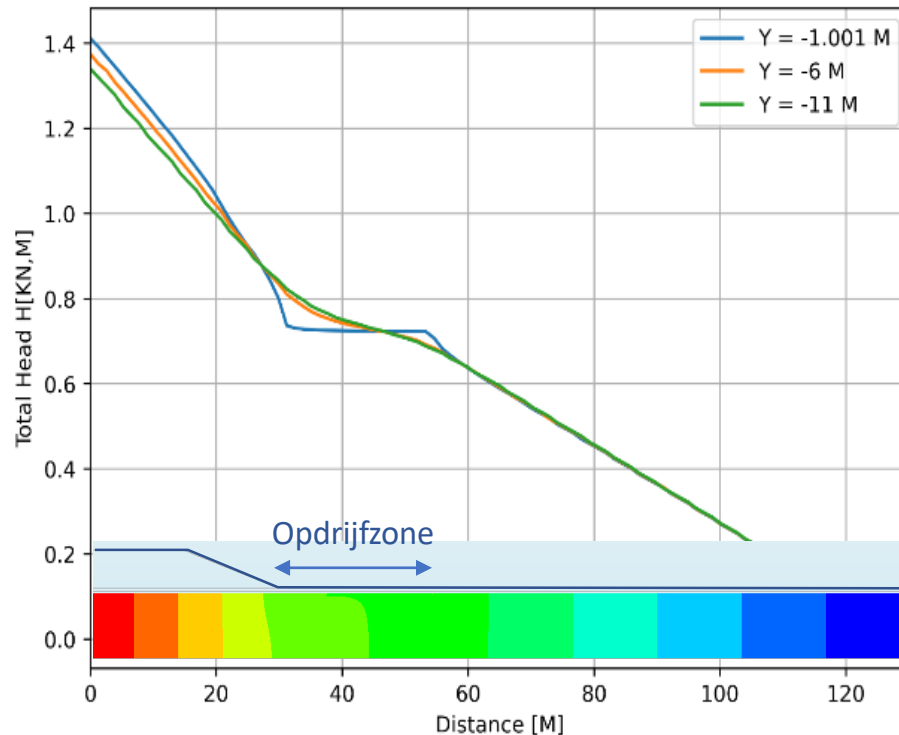
$\sigma=1, c=14, E=3, k=1e-07, 20200818$
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour
Interface Relative Displacements DUSx
min: -0.01mm max: 182.45mm



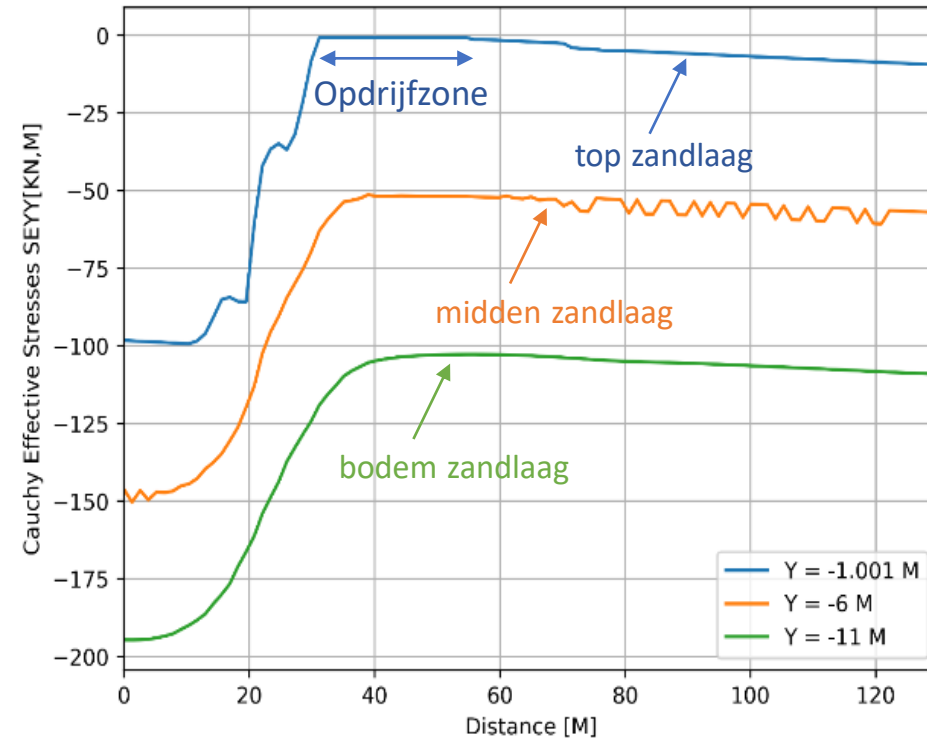
$\sigma=1, c=14, E=3, k=1e-07, 20200818$
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour
Interface Relative Displacements DUNy
min: -18.29mm max: 136.84mm



Resultaten voor basisgeval deklaagdikte 1m



Stijghoogte [m] in horizontale richting, op 3 hoogtes in de zandlaag



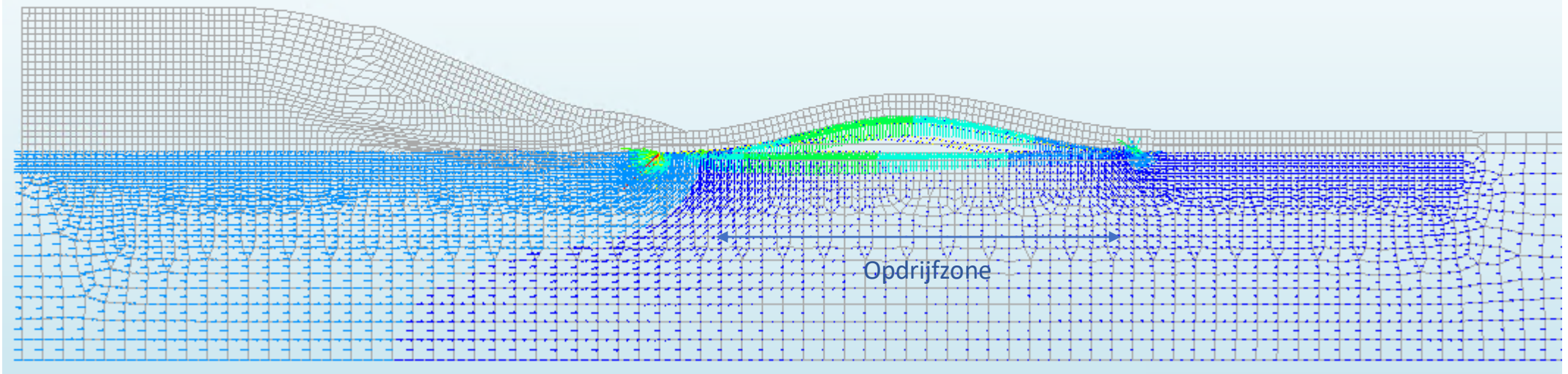
Verticale effectieve spanning [kPa] in horizontale richting, op 3 hoogtes in de zandlaag



Resultaten voor basisgeval deklaagdikte 1m

Uplift analysis
Phase 2, Time-step 27, Time 2 day 2 hour
Darcy Flux DFXYZ
min: 0.00/mday max: 11.86/mday

Stromingsbeeld



POV

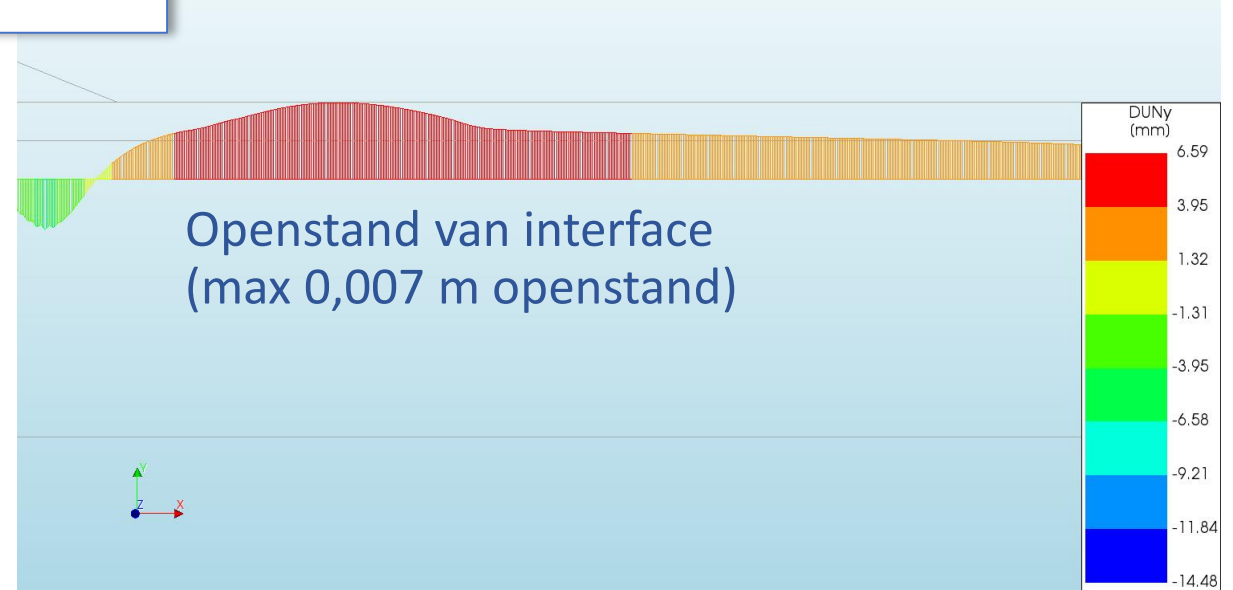
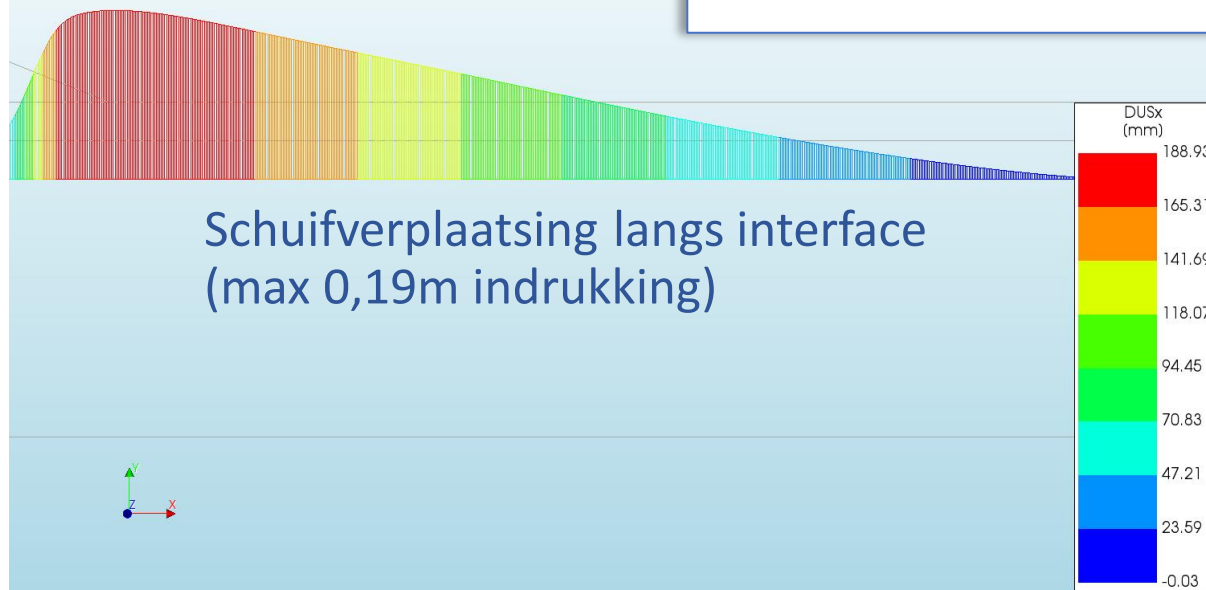
MACRO
STABILITEIT

Resultaten voor basisgeval deklaagdikte 3m

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

Faalmodus: 'Indrukken'



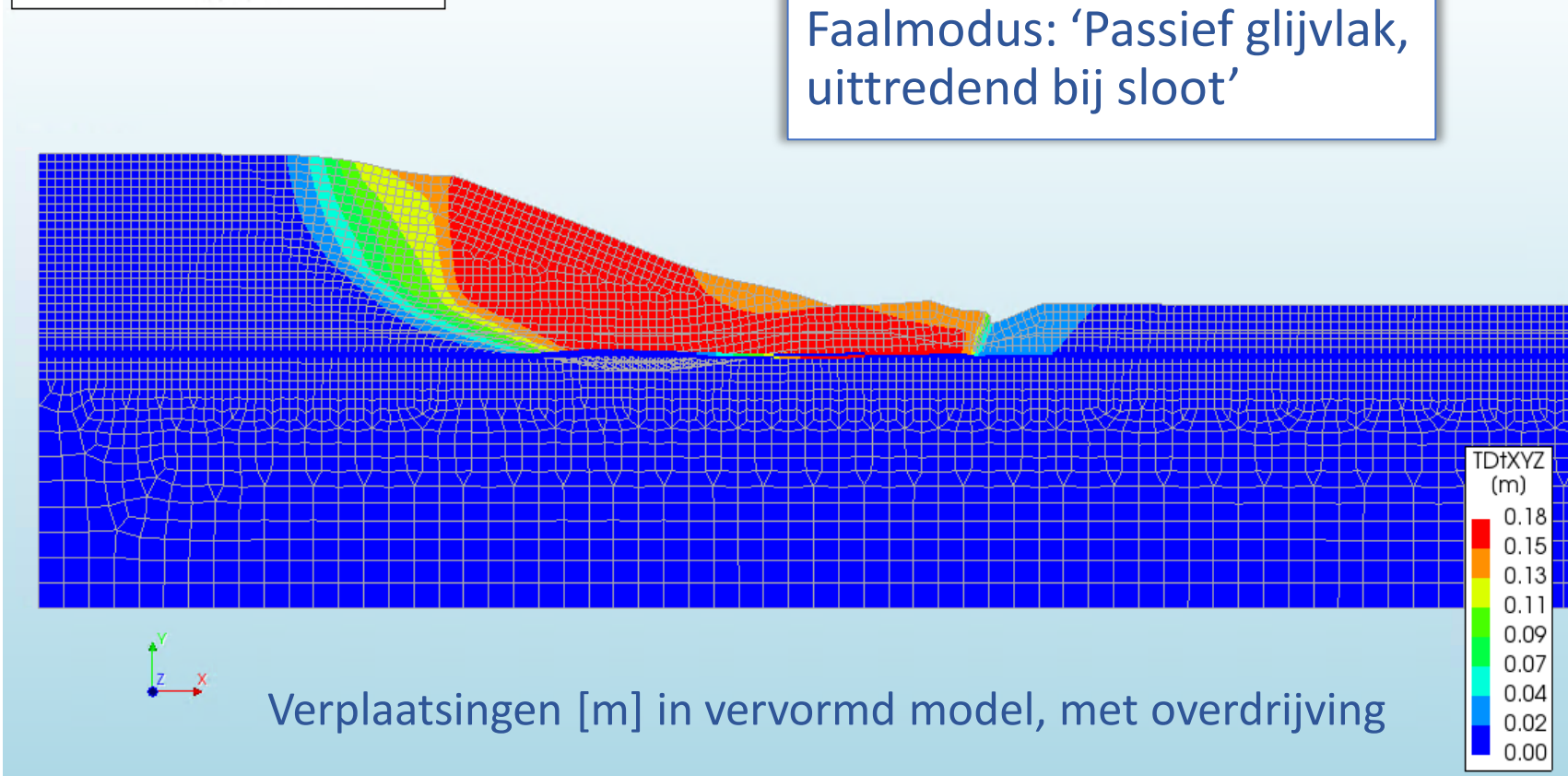
POV

MACRO
STABILITEIT

Resultaten voor deklaagdikte 2m + sloot

Uplift analysis
Phase 2, Time-step 30, Time 2 day 6 hour
Displacements TDtXYZ
min: 0.00m max: 0.18m

Faalmodus: 'Passief glijvlak,
uittredend bij sloot'



POV
MACRO
STABILITEIT

Uitgebreide resultaten in POVM rapport

Tabel 2-6 Overzicht van resultaten voor alle berekende gevallen

deklaag- dikte [m]	λ cohesie [kPa]	locatie start sloot [m]	E-mod [Mpa]	k_zand m/s	trek- sterkte [kPa]	tijd begin oprijven d-h	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		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, ind. buigscheuren	61-30		56,7 76-25	8,6
2	15	nvt	10	1,00E-03	3	3d5h	4d19h	opbarsten, ind. buigscheuren	60-31		60,1 85-22	26,6
3	18	nvt	10	1,00E-03	3	4d21h	6d22h	opbarsten, ind. 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	opdrucken bij sloot	35-34		1,6 42-26	10
2	16	34	3	1,00E-03	3	2d9h	2d12h	opdrucken bij sloot	36-34		0,9 44-26	8,9
2	17	34	3	1,00E-03	3	2d13h	2d17h	opdrucken bij sloot	36-34		0,7 46-26	7,9
3	16	36	3	1,00E-03	3	3d15h	3d15h	opdrucken bij sloot	36-34	36-34	50-26	14,4
3	17	36	3	1,00E-03	3	niet	3d20h	opdrucken bij sloot/indrukken	nvt	nvt	52-26	12,8
3	18	36	3	1,00E-03	3	4d3h	4d3h	opdrucken bij sloot/indrukken	37-33		1,1 57-22	18,1
3	19	36	3	1,00E-03	3	4d6h	4d6h	opdrucken bij sloot/indrukken	37-34		0,6 56-25	13,5
3	20	36	3	1,00E-03	3	4d8h	4d9h	opdrucken bij sloot/indrukken	38-33		0,7 57-25	12,7
2	15	40	3	1,00E-03	3	2d1h	2d12h	opdrucken 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	Resultaten numerieke variatiestudie	55
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'	60
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'	188
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'	460
A.3.4	'Output_d=2_c=15_E=3_k=1e-07_tc=1_20200927'	461
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	Methode berekening vervormingen bij oprijven door middel van lamellen	535
B.1	Grotendeels overgenomen uit Leidraad 2 Appendix D	535
B.1.1	Passieve weerstandskracht	536



Resultaten in relatie tot het onderzoeksdoel

- Een (begin van) opbarsten treedt alleen op bij:
 - afwezigheid van een sloot én
 - een deklaag dunner dan 2m én
 - een elasticiteitsmodulus voor de deklaag groter dan 3 MPa én
 - een transmissiviteit kD voor de zandlaag groter dan $1E-3 \text{ m}^2/\text{s}$.

In alle overige gevallen treedt falen op door indrukking van de deklaag en/of door uittreden van een glijvlak bij de sloot of bij de teen.

Beperkingen van de toegepaste schematisering

- **Vereenvoudiging** van:
 - Randvoorwaarden en beginvoorwaarden;
 - Gedrag op de grenslaag tussen deklaag en zand bij opdrijven en bij horizontaal verschuiven.
- **Verwaarlozing** van:
 - Tijdsafhankelijkheid in de ontwikkeling van de waterspanning in dijk en deklaag tijdens een hoogwaterperiode;
 - De doorlatendheid van de deklaag, inclusief de invloed daarop van scheuren;
 - De invloed van (verandering van) effectieve spanning en van ruimtelijk variërende initiële overconsolidatie op de schuifsterkte van dijk en deklaag;
 - De invloed van (verandering van) effectieve spanning op de stijfheid van de deklaag;
 - Heterogeniteit.

Vanwege deze beperkingen is validatie aan experimenten nodig.

POV

MACRO
STABILITEIT

Voorgestelde controle bij geringe opdrijfveiligheid (1/2)

Voor het mogen **uitsluiten van opbarsten** en het mogen meenemen van de deklaagsterkte blijft de vorm van de beslisregel gelijk, maar worden minder conservatieve keuzes gemaakt door:

- de **kritieke deklaagdikte** voor het uitsluiten van opbarsten (indicatief 2m) **verder te onderbouwen met numerieke modellen en met daaraan gekoppelde experimenten** ter validatie;
- de **kritieke opdrijfveiligheid** voor opbarsten (bij onzekere stijghoogte en onzeker deklaaggewicht) **probabilistisch te kalibreren**.

Voorgestelde controle bij geringe opdrijfveiligheid (2/2)

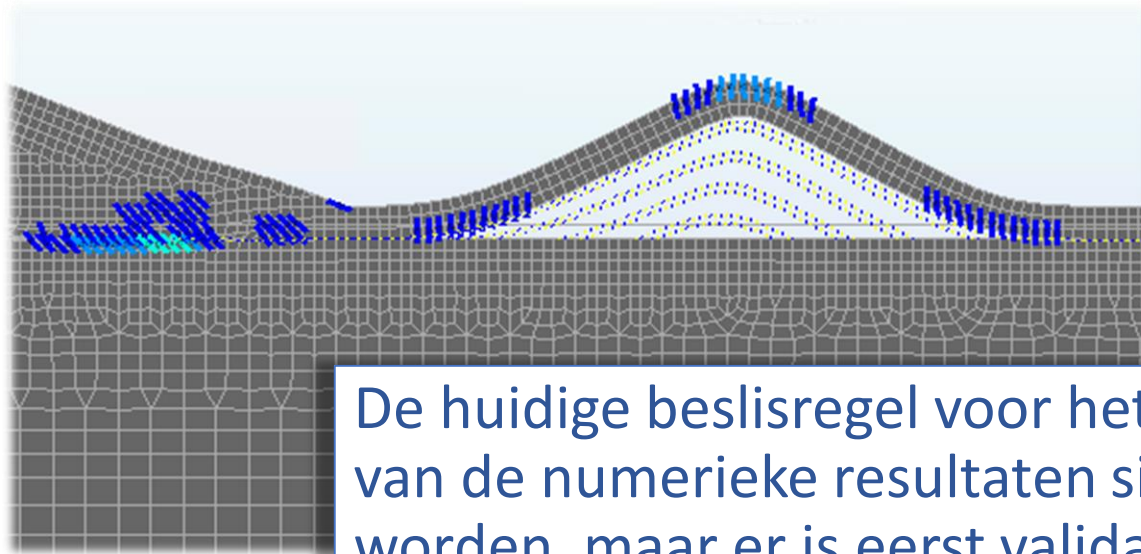
Naast opbarsten moet ook op **indrucken** gaan worden gecontroleerd.

Dat kan met eenzelfde type (PLAXIS) **eindige-elementenberekening** als ook al toegepast voor het ontwerp van stabiliteitswanden (zie de [POVM publicatie 'Eindige Elementoepassing' - PPE](#)).

POV

MACRO
STABILITEIT

Eindconclusie



De huidige beslisregel voor het uitsluiten van opbarsten lijkt op grond van de numerieke resultaten significant aangescherpt te kunnen worden, maar er is eerst validatie aan proefresultaten nodig om op deze numerieke resultaten te mogen vertrouwen

POV

MACRO
STABILITEIT