

Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding

Fase 2B Predictie Boonweg

Ons kenmerk
CO-423891/57

Versie
01 Definitief

Datum
december 2008

Projectgroep SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding: proeven Boonweg



Opgesteld in opdracht van
Rijkswaterstaat Waterdienst

Postbus 177
2600 MH
Stieltjesweg 2
2628 CK Delft

Telefoon (015) 26 93 500
Telefax (015) 26 10 821
www.deltares.nl

Rapportnummer
CO-423891/57 v01

Datum
december 2008

Samenvatting rapport

Versie
01 Definitief

Aantal pagina's
93

Titel / subtitel

Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding / Fase
2B Predictie Boonweg

Projectleider(s)

ir. A. van Hoven

Projectbegeleider(s)

dr. ir. G.J.C.M. Hoffmans

Overige leden projectteam

dr. ir. J.W. van der Meer (Van der Meer
Consulting)

G. van der Meer

ing. J.Y. Frissel (Alterra)

ir. G.J. Akkerman (Royal Haskoning)

ir. G.J. Steendam (Infram)

ir. H.J. Verheij (Deltares)

Opgesteld in opdracht van

Rijkswaterstaat Waterdienst

Verspreiding

Rijkswaterstaat Waterdienst

Het project Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding is een onderdeel van het project Sterkte en Belastingen Waterkeren (SBW). Het doel van dit project is het in kaart brengen van het bezwijkmechanisme van een grasbekleding bij golfoverslag en het afleiden van praktische toetsformules.

Het project wordt aangepakt via een cyclus, waarbij modellering (A), predicties (B), proefneming (C) en proefevaluatie (D) per proeflokatie worden afgewerkt. Onderhavig rapport betreft de Predictie (B) voor de proeflokatie Boonweg.

Het gaat om twee soorten proeven: golfoverslag en afschuiven. Voor de golfoverslagproeven is een predictie uitgevoerd van graserosie. Er wordt geen falen door erosie verwacht. De berekende erosiediepte blijft beperkt tot circa 10 mm bij het maximale gemiddelde overslagdebiet van 75 l/s per m.

Volgens de predictie voor afschuiven zal 10 tot 12 uur na aanvang van de proef afschuiven optreden van het onderste 1/3 van het talud.

Om het verloop van de waterdruk tijdens de afschuifproef goed te kunnen volgen moeten niet alleen in de kleibekleding opnemers worden geplaatst, maar ook net onder de bekleding en dieper in de zandkern. Voor het bepalen van de sterkte van klei met bodemstructuur wordt aanbevolen om aan te haken bij het SBW project Werkelijke Sterkte. In het kader van dit project wordt een grote diameter simple shear proefopstelling gemaakt die hiervoor geschikt is.

<u>Versie</u>	<u>Datum</u>	<u>Opgesteld door</u>	<u>Paraaf</u>	<u>Gecontroleerd door</u>	<u>Paraaf</u>
01	december 2008	ir. A. van Hoven ir. H. Verheij		ing. J.E.J. Blande (H3- H6) dr. ir. G.J.C.M Hoffmans (H1 en H2)	

Rapportnummer
CO-423891/57 v01

Datum
december 2008

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.2	Werkwijze	2
1.3	Leeswijzer	3
2	Predictie graserosie	4
2.1	Uitgangspunten	4
2.2	Predictie graserosie	6
2.3	Predictie headcut erosie	9
3	Grondonderzoek voor predictie infiltratie en afschuiven	10
3.1	Dijkopbouw	10
3.2	Dikte kleibekleding	11
3.3	Erosiebestendigheidscategorie kleibekleding	14
3.4	Volumieke massa kleibekleding	15
3.5	Schuifsterkte kleibekledinglaag	17
3.5.1	CU single stage triaxiaalproeven	18
3.5.2	Vane-proef: schuifsterkte bij veld-watergehalte en na 1, 2 en 6 uur onderdompeling	19
3.5.3	Handsonderingen	22
3.5.4	Samenvatting en analyse schuifsterkte kleilaag	23
3.6	Stromingsparameters	24
3.6.1	Zandkern	24
3.6.2	Kleibekleding	25
4	Predictie infiltratie	29
4.1	1D PlaxFlow berekening infiltratie kleilaag	29
4.1.1	Resume 1D SWAP berekening	29
4.1.2	Randvoorwaarde en initiële waterdruk	30
4.1.3	Stromingsparameters	31
4.1.4	Resultaten 1D PlaxFlow berekening	33
4.1.5	Schematisatie bekledingslaag	33
4.1.6	Effect waterlaagdikte op infiltratiesnelheid	34
4.2	2D PlaxFlow berekening golfoverslag	35
4.2.1	Parameters en initiële situatie	35
4.2.2	Randvoorwaarden golfoverslagproeven	37
4.2.3	Rekenresultaten golfoverslagproeven	38
4.3	2D PlaxFlow berekening afschuifproef	58
4.3.1	Afschatting effect zijdelingse afstroming	58
4.3.2	Rekenresultaten 2D PlaxFlow afschuifproef	62
4.4	Analyse berekende waterspanningen	68
5	Predictie afschuiven	72
5.1	Analytisch model Edelman Joustra	72
5.2	PLAXIS	74
6	Conclusies en aanbevelingen	84
6.1	Conclusie graserosie	84
6.2	Conclusie infiltratie	84
6.3	Conclusie afschuiven	84
6.4	Aanbevelingen	84

Bijlage(n)

Bijlage 1	Alterra – Inverse modellering van verticale infiltratieproeven op de Waddenzeedijk
-----------	--

Tabellen

Tabel 2.1	Gemiddelde score per proefvak	4
Tabel 2.2	Indicatieve waarden voor de sterkte van Nederlandse klei en gras	5
Tabel 2.3	Eigenschappen van Nederlands gras	6
Tabel 2.4	Predictie erosie van gras bij de Boonweg	8
Tabel 3.1	Grondopbouw kruin	11
Tabel 3.2	Kleilaagdikte (m) uit Begemannboringen	12
Tabel 3.3	Kleilaagdikte (m) uit gutsboringen	13
Tabel 3.4	Kleilaagdikte (m) profielkuilen	13
Tabel 3.5	Kleilaagdikte uit handboringen (GeoDelft 2007)	14
Tabel 3.6	Kleikeuringen	15
Tabel 3.7	Volumieke massa, vochtgehalte en porositeit	16
Tabel 3.8	Watergehalte w (%) en verzadiging (=vol. water/ vol. poriën) voor en na onder water zetten gedurende 0, 1, 2 en 6 uur.	19
Tabel 3.9	Resultaten handsonderingen	22
Tabel 3.10	Verzadigde doorlatendheid (k) zandkern (cm/dag en m/s)	24
Tabel 3.11	Stromingsparameters zandkern	25
Tabel 3.12	Doorlatendheidskarakteristieken bodemmatrix kleibekleding	25
Tabel 3.13	Doorlatendheid kleibekleding inclusief macroporiën	26
Tabel 4.1	Van genuchten parameters locatie IW	29
Tabel 4.2	Van Genuchten parameters locatie IM	29
Tabel 4.3	Van Genuchten parameters locatie IM tbv PlaxFlow	32
Tabel 4.4	Van Genuchten parameters kleibekleding	34
Tabel 4.5	Van Genuchten parameters 2D PlaxFlow modellering	35
Tabel 5.1	Sterkte en stijfheidsparameters PLAXIS	74

Figuren

Figuur 1.1	KOLB-principe	2
Figuur 2.1	Wortelverloop van proefvak 1 (regulier beheer) en proefvak 2 (2 maal weiden)	4
Figuur 2.2	wortelverloop van proefvak 3 (2 maal hooien) en proefvak 4 (hooien en weiden)	5
Figuur 3.1	Dwarsdoorsnede dijkontwerp nabij Boonweg	10
Figuur 3.2	Begemannboringen B01 tot en met B07	11
Figuur 3.3	Gutsboringen G01 tot en met G16	12
Figuur 3.4	Profielkuilen IW (west), IM (midden) en IO (oost)	13
Figuur 3.5	Porositeit n (-) afhankelijk van diepte onder het taludoppervlak (m)	16
Figuur 3.6	Droge en berekende verzadigde volumieke massa (kg/m^3) tegen de diepte onder het taludoppervlak (m)	17
Figuur 3.7	p' (kPa) tegen q (kPa) bij verschillende verticale rekken (2%, 5%, 10% en piek)	18
Figuur 3.8	p' - q punten gedifferentieerd naar diepte onder het taludoppervlak	18
Figuur 3.9	Verzadiging (-) tegen tijdsduur van onderdompeling (uur) van de proefstukken	20
Figuur 3.10	Piek schuifsterkte (kPa) tegen tijdsduur van	

onderdempeling (uur)	20
Figuur 3.11 Piek schuifsterkte (kPa) tegen watergehalte (-) en verzadiging (-)	21
Figuur 3.12 Locaties infiltratieproeven (DL1 tot en met DL 6), waar tevens handsonderingen zijn uitgevoerd.	22
Figuur 3.13 Buis infiltratieproef DL5 waterstand tov maaiveld vs tijd (s)	27
Figuur 3.14 Buisinfiltratieproeven afname daalsnelheid waterspiegel (m/s) vs tijd (s)	28
Figuur 4.1 Verzadiging grondkolom initiële situatie (bovenzijde maaiveld)	31
Figuur 4.2 PlaxFlow resultaat bij k_{sat} (m/s) voor macroporiën en voor bodemmatrix uitgezet tegen de meting van buisinfiltratieproef 5	32
Figuur 4.3 Waterspanning (kPa) en verzadiging in grondkolom na 1, 3, 7, 17 en 107 min na aanvang infiltratie	33
Figuur 4.4 Modellerings buisinfiltratietest 5 met PlaxFlow – effect schematisatie tot één bekledingslaag	34
Figuur 4.5 Effect waterlaagdikte (1, 10 en 20 cm) op infiltratiesnelheid (m/s)	35
Figuur 4.6 Initiële situatie	37
Figuur 4.7 Situatie aan het einde van 0,1 l/s per m proef	40
Figuur 4.8 Waterdruk in snede A-A'	40
Figuur 4.9 Situatie 24 uur na 0,1 l/s per m proef	41
Figuur 4.10 Situatie na 1 l/s per m proef	43
Figuur 4.11 Waterspanning in vertikaal bij teen (A-A') en berm (B-B')	44
Figuur 4.12 Situatie 22.6 uur na 1 l/s per m proef	45
Figuur 4.13 Situatie na 10 l/s per m proef	46
Figuur 4.14 Waterspanning in vertikaal bij teen (A-A') en berm (B-B')	47
Figuur 4.15 Situatie 21.1 uur na 10 l/s per m proef	48
Figuur 4.16 Situatie na 30 l/s per m proef	50
Figuur 4.17 Drukverloop in snede A-A' ter plaatse van de teen (Figuur 4.16)	51
Figuur 4.18 Situatie 20.4 uur na 30 l/s per m proef	52
Figuur 4.19 Waterspanning ter plaatse van de teen (snede A-A') direct na de 30 l/s per m proef en na een wachtperiode van 20.4 uur.	52
Figuur 4.20 Waterspanningen, verzadiging en het stromingspatroon direct na de 50 l/s per m proef	54
Figuur 4.21 Waterspanning en verzadiging 20.1 uur na beëindiging 50 l/s per m proef	55
Figuur 4.22 Waterspanningen, verzadiging en het stroombeeld direct na afloop van de 75 l/s per m proef	57
Figuur 4.23 Waterspanningen en stroombeeld ter plaatse van de teen na afloop van de 75 l/s per m proef	58
Figuur 4.24 Locatie snede evenwijdig aan dijk voor simulatie zijdelings afstromen grondwater	59
Figuur 4.25 Modelschematisatie	59
Figuur 4.26 Waterspanning in snede evenwijdig aan de dijk bij 30 m brede infiltratiestrook	60
Figuur 4.27 Waterdruk in vertikaal ter plaatse van midden	

infiltratiegebied, 5 m uit de rand en op de rand	62
Figuur 4.28 Waterspanningen afschuifproef	65
Figuur 4.29 Stroombeeld afschuifproef	67
Figuur 4.30 Waterspanningsverloop in de diepte voor 5 vertikalen vanaf de teen tot circa 1/3 van het talud.	70
Figuur 5.1 Schematische weergave stroming onder een hoek β met de taludhelling en de hierop aangepaste formule van Edelman - Joustra.	72
Figuur 5.2 Stroombeeld 24 uur na aanvang infiltratie	73
Figuur 5.3 Stabiliteit (-) tegen dikte afschuivende laag (m) voor verschillende hoeken van grondwaterstroming	73
Figuur 5.4 Mesh PLAXIS	74
Figuur 5.5 Initiële situatie: verzadiging, waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.	76
Figuur 5.6 Na 6 uur infiltratie: verzadiging waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.	78
Figuur 5.7 Na 8 uur infiltratie: verzadiging waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.	80
Figuur 5.8 Na 10 uur infiltratie: verzadiging waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.	82

1 Inleiding

1.1 Kader

Het project Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding is een onderdeel van het Rijkswaterstaatproject Sterkte en Belastingen Waterkeren (SBW). Het doel van dit project is het in kaart brengen van het bezwijkmechanisme van een grasbekleding bij golfoverslag en het afleiden van praktische toets- en ontwerpformules. Het project is beschreven in het Projectplan - Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding d.d. 10 augustus 2007. De resultaten van het onderzoek moeten uiteindelijk worden verwerkt in drie eindproducten: een Technische Rapport, Toetsregels voor het VTV 2011 en een doorkijk naar 2012 – 2016.

Het onderzoek dat in het kader van dit project wordt uitgevoerd bestaat uit drie onderdelen:

- Erosie van de grasmat op het binnentalud
- Afschuiven van de grasbekleding (gras + klei) van het binnentalud
- Golfoverslag.

Golfoverslag wordt onderzocht met behulp van de golfoverslagbak die op het buitentalud van de zeedijk bij Petten is aangelegd. De meetdata wordt per stormseizoen geëvalueerd en indien mogelijk wordt op basis van deze evaluatie een modelaanpassing gedaan voor het volgende stormseizoen.

Afschuiven en erosie van de grasmat worden onderzocht met behulp van grootschalige proeven op bestaande dijken. Voor erosieproeven wordt de golfoverslagsimulator ingezet, waarmee volumes tot maximaal 22.000 liter over een 4 m brede strook kunnen worden losgelaten. De afschuifproeven vinden plaats op een bredere strook van circa 30 m met behulp van een buis waaruit een gelijkmatig debiet stroomt.

Het project is ingedeeld in fasen met een nummering bestaande uit een cijfer (1-7) en een letter (A-D). Het cijfer staat voor de proeflocatie, de letter voor de fase binnen de Kolb-cyclus (zie Paragraaf 1.2).

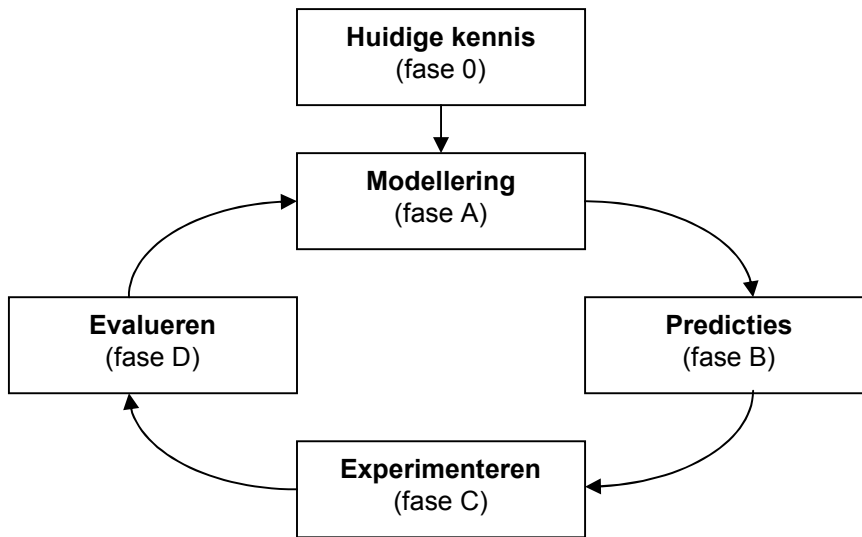
Fase 1	Delfzijl
Fase 2	Boonweg
Fase 3	Afsluitdijk
Fase 4	Rivierdijk
Fase 5	Zeeland
Fase 6	Petten
Fase 7	Golfoverslagbak Petten

De volgorde is gewijzigd ten opzichte van het eerder genoemde projectplan uit 2007. De IJkdijk, voormalig 6-1 en 6-2 zijn uit het programma verwijderd. De huidige Fase 6 Petten is onzeker in verband met mogelijke beperkingen die worden opgelegd bij de proefuitvoering. Hier zal mogelijk een alternatieve locatie voor worden gezocht. De rivierdijk, Fase 4, is toegevoegd. Fase 7 betreft een jaarlijks terugkerende fase waarbij de stormgegevens en metingen van golfoverslag van het voorgaande winterseizoen worden geanalyseerd.

Onderhavig rapport betreft Fase 2B Predictie Boonweg.

1.2 Werkwijze

Het eindproduct, de bouwsteen ten behoeve van het VTV 2011, wordt vervaardigd middels een cyclisch proces. De grondgedachte hiervan is het KOLB-principe (zie Figuur 1.1 en <http://www.thesis.nl/kolb>).



Figuur 1.1 KOLB-principe

Per proeflocatie wordt deze cyclus doorlopen. Na evaluatie van proeven (fase D) worden aanbevelingen gedaan voor modellering of modelaanpassingen (fase A) ten behoeve van de volgende proeflocatie. Hiermee wordt direct de ontwikkelde kennis c.q. inzichten ten behoeve van de volgende proeflocatie ingebracht. Iedere fase wordt afgesloten met een rapportage (tussenproduct).

De modellering (Fase 1A) en de predicties van de proeven bij Delfzijl (Fase 1B) zijn gerapporteerd in (Infram 2006). De experimenten te Delfzijl (Fase 1C) zijn uitgevoerd in de periode van eind februari tot en met de tweede week van maart 2007. De experimenten zijn uitgevoerd in het kader van het Europese project ComCoast, WP3 "Smart Grass Reinforcement". Het SBW project is ingehaakt op de experimenten door aanvullend grondonderzoek en metingen uit te laten voeren. De experimenten worden beschreven in het ComCoast rapport "Phase 3: Wave Overtopping Erosion Tests at Groningen Sea Dyke" (Akkerman 2007). De evaluatie van de proeven bij Delfzijl (Fase 1D) zijn gerapporteerd in (Deltares, 2007).

De evaluatie van de proeven 1D heeft geresulteerd in Fase 2A: Modelaanpassing Boonweg. Met behulp van de aangepaste modellen is de navolgende Predictie Boonweg gemaakt (Fase 2B). Het doel van de predictie is om te kijken of met behulp van de state of the art kennis op dat moment een goede voorspelling is te maken van de overslag gerelateerde mechanismen. Tevens wordt de predictie gebruikt om het meetprogramma tijdens de proef in te richten.

Door tijdgebrek is de Kolb cyclus voor de proeflocatie Boonweg niet strikt gevolgd. De proeven zijn reeds uitgevoerd, voor gereedkomen van de rapportage van de predictie. Hierbij wordt opgemerkt dat de predictieberekeningen wel al waren gemaakt en als input hebben gediend voor de inrichting van de proef en het meetprogramma.

1.3 Leeswijzer

De predictie Boonweg is verdeeld in 5 hoofdstukken. Hoofdstuk 2 bevat de predictie van graserosie voor de golfverslagproeven die begin 2008 zijn uitgevoerd. In hoofdstuk 3 staat een samenvatting van het uitgevoerde grondonderzoek voor de predictie van infiltratie en afschuiven. Hoofdstuk 4 gaat over de predictie van infiltratie voor zowel de golfverslagproeven als de afschuifproef die aan het einde van de zomer van 2008 is uitgevoerd. Hoofdstuk 5 geeft de predictie van afschuiven. In hoofdstuk 6 staan de conclusies en aanbevelingen.

2 Predictie graserosie

2.1 Uitgangspunten

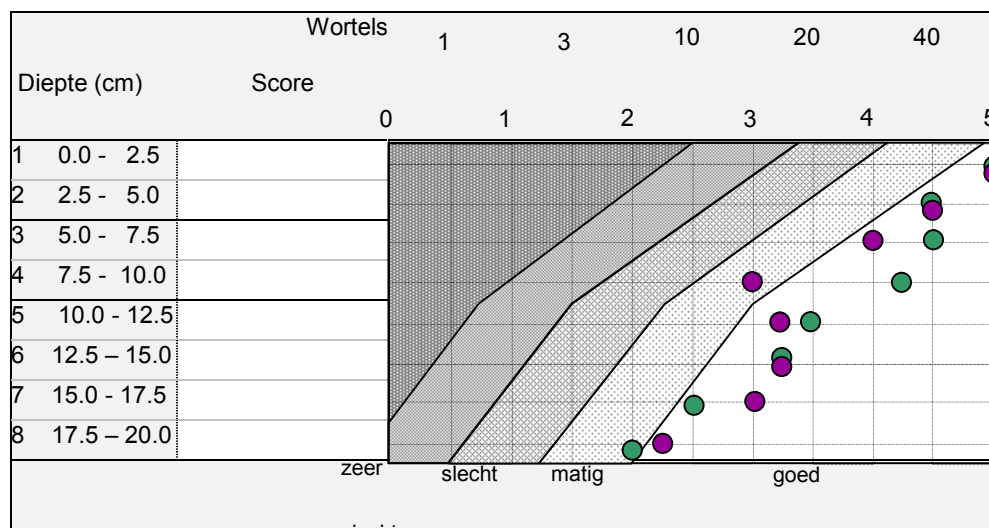
Bij de Boonweg zullen in totaal 4 proefvakken worden onderzocht op de sterkte tegen golfoverslag:

- 1 Normaal regulier beheer (nb)
- 2 2 maal weiden beheer (ww)
- 3 2 maal hooien beheer (hh)
- 4 Beheer met hooien en naweiden (hw).

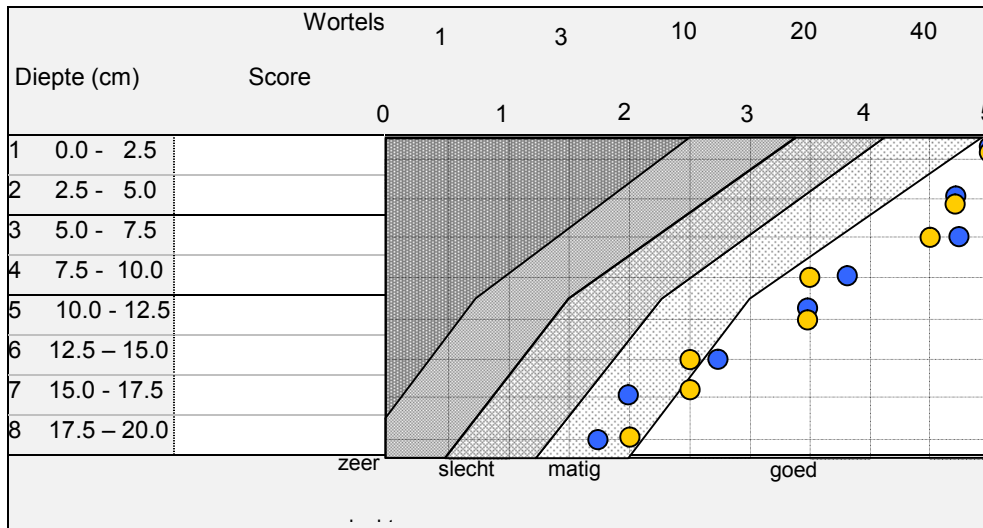
Per proefvak zijn er 4 boringen uitgevoerd om de hoeveelheid wortels te bepalen. De resultaten staan in onderstaande Tabel 2.1 en Figuur 2.1 en Figuur 2.2. Opvallend is dat vrijwel alle metingen in de score "goed" vallen, behalve bij de proefvakken 2 en 3 waar dat het geval is tot 12,5 cm diep. Dit betekent dat er in de bovenste laag van de zode meer dan 40 wortels per $0,707 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ (grondboor met diameter van 3 cm) of 60.000 wortels per m^2 aanwezig zijn en er sprake is van een goede kwaliteit gras.

Diepte (cm)	1 nb	2 ww	3 hh	4 hw
1 0,0 - 2,5	5.00	5.00	5.00	5.00
2 2,5 - 5,0	4.50	4.50	4.75	4.75
3 5,0 - 7,5	4.00	4.50	4.50	4.75
4 7,5 - 10,0	3.00	4.25	3.50	3.75
5 10,0 - 12,5	3.25	3.50	3.50	3.50
6 12,5 - 15,0	3.25	3.25	2.50	2.75
7 15,0 - 17,5	3.00	2.50	2.50	2.00
8 17,5 - 20,0	2.25	2.00	2.00	1.75

Tabel 2.1 Gemiddelde score per proefvak



Figuur 2.1 Wortelverloop van proefvak 1 (regulier beheer) en proefvak 2 (2 maal weiden)



Figuur 2.2 wortelverloop van proefvak 3 (2 maal hooien) en proefvak 4 (hooien en weiden)

Behalve het aantal wortels zijn ook andere gegevens van de graszode verzameld, zoals bedekkingsgraad. Informatie hierover is op dit moment niet beschikbaar. Ook is geen informatie beschikbaar over de eigenschappen van de klei en voorlopig is daarom uitgegaan van goede klei met een waarde voor de cohesie van $c_s = 0,25 \text{ kN/m}^2$ (zie Tabel 2.2).

Klei	C_E -methode		Kubus model	
	C_E [$\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$]	$U_c^{(1)}$ [m/s]	$c_s^{(2)}$ [kN/m^2]	$U_c^{(3)}$ [m/s]
Zand	$17,1 \cdot 10^{-4}$	0,15		
Slecht	$4,3 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,00	0,3
Gestructureerd	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,6	0,11	0,6
Goed	$0,60 \cdot 10^{-4}$	0,8	0,25	0,8
Zeer goed	$0,32 \cdot 10^{-4}$	1,1	0,50	1,1

$$^{(1)} U_c = \frac{1}{r_0} \sqrt{\frac{\alpha_{CE} g^2 d_a}{C_{EV}}} \text{ waarin } d_a = 0,004 \text{ m, } g = 9,81 \text{ m/s}^2, r_0 = 0,2, \alpha_{CE} = 0,04 \cdot 10^{-10} \text{ en } \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$^{(2)} c_s = 0,021c \text{ (of } c \approx 50c_s)$$

$$^{(3)} U_c = \frac{0,29}{r_0} \sqrt{\Delta g d_a + \frac{c_s}{\rho} + \frac{\sigma_g}{\rho}} \text{ waarin } d_a = 0,004 \text{ m, } r_0 = 0,2 \text{ en } \Delta = 1,65, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ en } \sigma_g = 0$$

Gras	C_E -methode		Kubus model	
	C_E [$\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$]	$U_c^{(1)}$ [m/s]	σ_g [kN/m^2]	$U_c^{(4)}$ [m/s]
Zeer slecht	$0,062 \cdot 10^{-4}$	2,5	2,8	2,5
Slecht	$0,033 \cdot 10^{-4}$	3,4	5,6	3,4
Matig	$0,022 \cdot 10^{-4}$	4,2	8,4	4,2
Goed	$0,016 \cdot 10^{-4}$	4,9	11,2	4,9

$$^{(4)} U_c = \frac{0,29}{r_0} \sqrt{\Delta g d_a + \frac{c_s}{\rho} + \frac{\sigma_g}{\rho}} \text{ waarin } c_s = 0, d_a = 0,004 \text{ m, } r_0 = 0,2 \text{ en } \Delta = 1,65$$

Tabel 2.2 Indicatieve waarden voor de sterkte van Nederlandse klei en gras

De hydraulische condities zijn verschillend per overslaande golf. Voor de predictie is uitgegaan van de volgende aantallen overslaande golven als functie van het overslagdebiet:

$q = 0,1$ l/s/m:	9 golven per 6 uur
$q = 1$ l/s/m:	126 golven per 6 uur
$q = 10$ l/s/m:	749 golven per 6 uur
$q = 30$ l/s/m:	1275 golven per 6 uur
$q = 50$ l/s/m:	1524 golven per 6 uur
$q = 75$ l/s/m:	1686 golven per 6 uur

De golven bij een bepaald overslagdebiet kennen een verschillend volume met bijbehorende verschillende maximale stroomsnelheden en tijdsduren. Voor iedere afzonderlijke golf wordt de erosie berekend en gesommeerd. Karakteristieke waarden zijn:

Maximale stroomsnelheid $U_{\max} = 4$ m/s (range 1 à 8 m/s)
 Laagdikte $h = 0,20$ m (range 0,05 à 0,70 m)
 Belastingduur $t = 4$ s (range (1 à 8 s))

2.2 Predictie graserosie

Het aantal wortels in de bovenste 2,5 cm van de zode resulteert in een waarde van de wortelsterkte van $\sigma_g = 11,2$ kN/m² (zie Tabel 2.3). Hieruit volgt dat $C_E \approx 0,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (zie tabel 2.2) of met $E_{\text{soil}} = 15(C_E)^{-1} \approx 1,5 \cdot 10^7$ m/s.

A_r/A (%)	A_r/A (mm ² /m ²)	Aantal wortels No./m ²	Gras kwaliteit volgens VTV	Zode opper- vlak per wor- tel (mm ²)	Ruimte tus- sen wortels (mm)	σ_g (kN/m ²)
0.02	200	15100	zeer slecht	66	8	2.8
0.04	400	30150	slecht	33	6	5.6
0.06	600	45200	matig	22	5	8.4
0.08	800	60300	goed	17	4	11.2

No. = $A_r/A_{1 \text{ root}}$ met $A_{1 \text{ root}} = \frac{1}{4}\pi d_r^2$ en $d_r = 0,13$ mm, Ruimte tussen wortels = $(A/\text{No.})^{1/2}$
 Zode oppervlak per wortel = $A/\text{No.}$ met $A = 1$ m², $\sigma_g = 0,7t_r(A_r/A)$ ($t_r = 20 \cdot 10^6$ N/m²)

Tabel 2.3 Eigenschappen van Nederlands gras

De erosie in 6 uur kan nu voor de verschillende overslagdebieten worden voorspeld (zie voor details ook Tabel 2.4):

$$y_m = \sum_{i=1}^n \frac{(0.7\alpha U_m - U_c)^2}{E_{\text{soil}}} t_m \quad (2.1)$$

waarin:

E_{soil}	(= $\alpha_{\text{soil}} (C_E)^{-1}$) erosieparameter (m/s)
n	aantal golven (-)
r_0	dieptegemiddelde relatieve turbulentie intensiteit (-)
t_m	karakteristieke duur van de golf (s)
U_m	karakteristieke dieptegemiddelde snelheid (m/s)
U_c	kritieke dieptegemiddelde snelheid (m/s)
y_m	erosie (m)
α	(= $1,5 + 5r_0$) turbulentie coefficient (-)
α_{soil}	(15 m^2) constante (met dimensie) (m ²)

$q = 0,1$ l/s/m:	$y_m = 0$ m (in 6 uur)
$q = 1$ l/s/m:	$y_m = 0$ m (in 6 uur)
$q = 10$ l/s/m:	$y_m = 0$ m (in 6 uur)
$q = 30$ l/s/m:	$y_m = 0 - 0,004$ m (in 6 uur)
$q = 50$ l/s/m:	$y_m = 0 - 0,007$ m (in 6 uur)
$q = 75$ l/s/m:	$y_m = 0 - 0,012$ m (in 6 uur)

Geconcludeerd kan worden dat bij een goede, gesloten grasmat bij alle overslagdebieten geen falen zal optreden, want de erosie blijft kleiner dan 0,10 m. Bij overslagdebieten tot 10 l/s/m zal geen erosie optreden; bij grotere overslagdebieten zal de erosie beperkt blijven tot circa 10 mm.

q = 0.1 l/s/m							
Volume per golf per eenheid van breedte (l/m)	Aantal golven	duur per golf (s)	h (m)	U_m (m/s)	r_0 (-)	U_c (m/s)	y_m (m)
50	3	1,8	0,02	2,5	0,13	4,5	$2,02 \cdot 10^{-7}$
150	3	2,7	0,04	3,5	0,14	4,5	$3,85 \cdot 10^{-7}$
400	2	3,6	0,09	4,5	0,15	4,5	$3,28 \cdot 10^{-6}$
700	1	4,7	0,13	5,0	0,17	4,5	$3,76 \cdot 10^{-6}$
							$\Sigma 7,62 \cdot 10^{-6}$

q = 1 l/s/m							
Volume per golf per eenheid van breedte (l/m)	Aantal golven	duur per golf (s)	h (m)	U_m (m/s)	r_0 (-)	U_c (m/s)	y_m (m)
50	54	1,8	0,02	2,5	0,13	4,5	$3,64 \cdot 10^{-6}$
150	54	2,7	0,04	3,5	0,14	4,5	$6,93 \cdot 10^{-6}$
400	9	3,6	0,09	4,5	0,15	4,5	$1,47 \cdot 10^{-5}$
700	6	4,2	0,13	5,0	0,17	4,5	$2,26 \cdot 10^{-5}$
1000	3	4,7	0,19	5,5	0,18	4,5	$2,08 \cdot 10^{-5}$
							$\Sigma 6,87 \cdot 10^{-5}$

q = 10 l/s/m							
Volume per golf per eenheid van breedte (l/m)	Aantal golven	duur per golf (s)	h (m)	U_m (m/s)	r_0 (-)	U_c (m/s)	y_m (m)
50	384	1,8	0,02	2,5	0,13	4,5	$2,59 \cdot 10^{-5}$
150	252	2,7	0,04	3,5	0,14	4,5	$3,24 \cdot 10^{-5}$
400	147	3,6	0,09	4,5	0,15	4,5	$2,41 \cdot 10^{-4}$
700	57	4,2	0,13	5,0	0,17	4,5	$2,14 \cdot 10^{-4}$
1000	33	4,7	0,19	5,5	0,18	4,5	$2,29 \cdot 10^{-4}$
1500	9	5,3	0,26	6,0	0,19	4,5	$1,09 \cdot 10^{-4}$
2500	6	6,0	0,38	6,5	0,22	4,5	$1,26 \cdot 10^{-4}$
							$\Sigma 9,77 \cdot 10^{-4}$

$q = 30 \text{ l/s/m}$							
Volume per golf per eenheid van breedte (l/m)	Aantal golven	duur per golf (s)	h (m/s)	U_m (m/s)	r_0 (-)	U_c (m/s)	y_m (m)
150	687	2,7	0,04	3,5	0,14	4,5	$8,82 \cdot 10^{-5}$
400	325	3,6	0,09	4,5	0,15	4,5	$5,33 \cdot 10^{-4}$
1000	206	4,7	0,19	5,5	0,18	4,5	$1,43 \cdot 10^{-3}$
1500	73	5,3	0,26	6,0	0,19	4,5	$8,86 \cdot 10^{-4}$
2500	25	6,0	0,38	6,5	0,22	4,5	$5,23 \cdot 10^{-4}$
3500	8	6,5	0,50	7,0	0,23	4,5	$2,49 \cdot 10^{-4}$
							$\Sigma 3,71 \cdot 10^{-3}$
$q = 50 \text{ l/s/m}$							
Volume per golf per eenheid van breedte (l/m)	Aantal golven	duur per golf (s)	h (m)	U_m (m/s)	r_0 (-)	U_c (m/s)	y_m (m)
400	684	3,6	0,09	4,5	0,15	4,5	$1,12 \cdot 10^{-3}$
700	234	4,2	0,13	5,0	0,17	4,5	$8,80 \cdot 10^{-4}$
1000	174	4,7	0,19	5,5	0,18	4,5	$1,21 \cdot 10^{-3}$
1500	138	5,3	0,26	6,0	0,19	4,5	$1,67 \cdot 10^{-3}$
2500	42	6,0	0,38	6,5	0,22	4,5	$8,79 \cdot 10^{-4}$
3500	42	6,5	0,50	7,0	0,23	4,5	$1,31 \cdot 10^{-3}$
							$\Sigma 7,07 \cdot 10^{-3}$
$q = 75 \text{ l/s/m}$							
Volume per golf per eenheid van breedte (l/m)	Aantal golven	duur per golf (s)	h (m)	U_m (m/s)	r_0 (-)	U_c (m/s)	y_m (m)
400	699	3,6	0,09	4,5	0,152	4,5	0,001145
700	474	4,2	0,13	5,0	0,166	4,5	0,001781
1500	342	5,3	0,26	6,0	0,193	4,5	0,004147
2500	108	6,0	0,38	6,5	0,216	4,5	0,002259
3500	39	6,5	0,50	7,0	0,230	4,5	0,001215
4500	6	7,0	0,60	7,5	0,235	4,5	0,000255
5250	18	7,5	0,70	7,7	0,247	4,5	0,000944
							$\Sigma 0,011746$

Tabel 2.4 Predictie erosie van gras bij de Boonweg

Er is ook een toetsing mogelijk volgens het VTV. In dat geval moet voor overslaggebieten groter dan 0,1 l/s/m volgens de gedetailleerde methode worden getoetst. Een overslaggebiet van 0,1 l/s/m hoeft aan geen enkele voorwaarde te voldoen. Voor de grotere overslaggebieten zijn de relevante parameters de rekensnelheid v_r en de belastingduur t_{sr} .

Voor overslaggebieten van 1 l/s/m en 75 l/s/m worden waarden berekend voor v_r die kleiner zijn dan 2 m/s. Uit het grasonderzoek uitgevoerd door Alterra in november 2007 blijkt dat de zodekwaliteit als goed moet worden gekarakteriseerd. Uit het VTV blijkt dan dat voor de optredende snelheid en bijbehorende tijdsduur in relatie tot de score "goed" voor de zodekwaliteit de uiteindelijke score "goed" is.

2.3 Predictie headcut erosie

Een voorspelling van de headcut erosie is niet gemaakt, omdat er geen erosie van de graszode wordt verwacht.

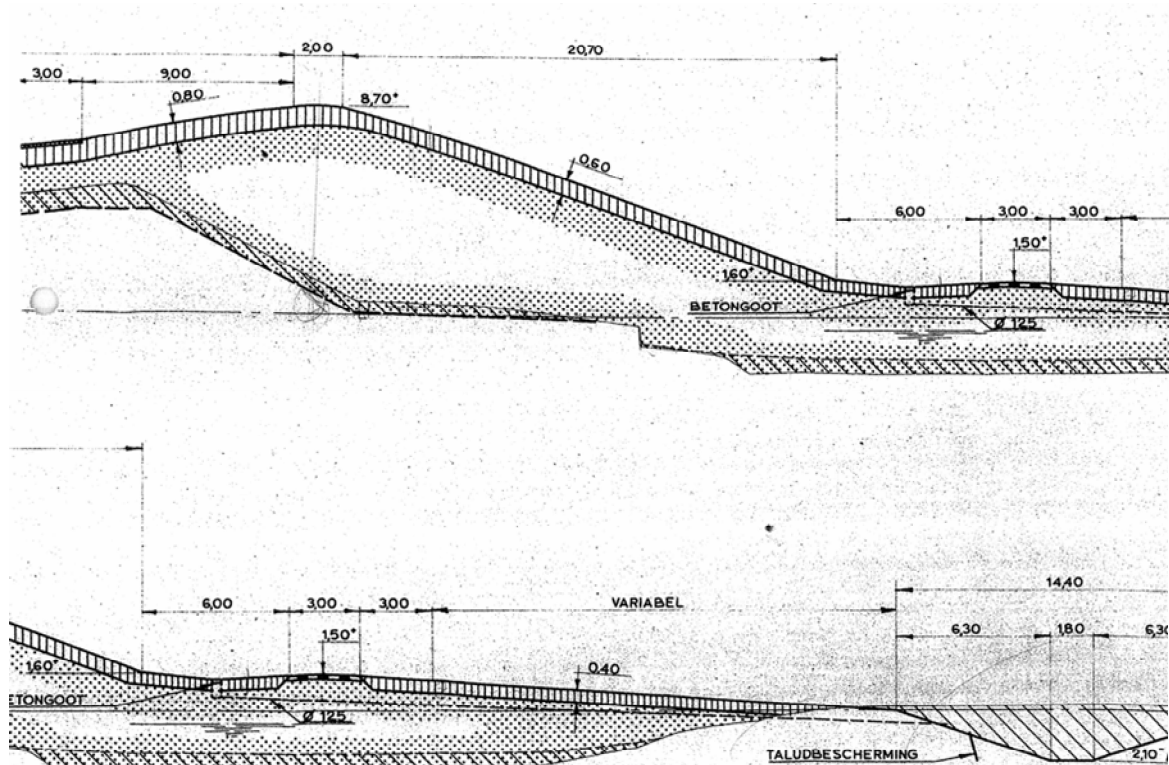
3 Grondonderzoek voor predictie infiltratie en afschuiven

Er is een apart rapport gemaakt van het uitgevoerde grondonderzoek dat in het kader van de predictie is uitgevoerd (Deltares 2008).

Eerder was een beperkt grondonderzoek uitgevoerd (GeoDelft 2007). Deze rapportages bevatten alleen de metingen en uitdrukkelijk geen analyse. In dit hoofdstuk zullen de metingen worden uitgewerkt tot voor de predictie bruikbare parameters.

3.1 Dijkopbouw

De dijk bij de Boonweg is net als bijna alle Friese Waddenzeedijken in de jaren 70 aangelegd. Uit deze tijd is de volgende doorsnede beschikbaar die geldig is voor de omgeving Boonweg (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Dwarsdoorsnede dijkontwerp nabij Boonweg

Aan de binnenzijde van de voormalige dijk is een zandlichaam opgespoten en voorzien van een kleibekleding met een dikte van 0,6 m op het talud en 0,4 m op de berm. De huidige berm, eveneens bestaande uit zand, ligt op de plek waar vroeger de dijkvaart/ binnenteensloot lag. Polderwaarts is een nieuwe sloot gegraven.

In de tekening is een grondwaterstand aangegeven op NAP -0,5 m. Het polderpeil is circa NAP -0,9 m (GeoDelft 2000).

In de kruin van de dijk is een sondering uitgevoerd (GeoDelft 2007), waaruit de volgende laagopbouw blijkt (Tabel 3.1).

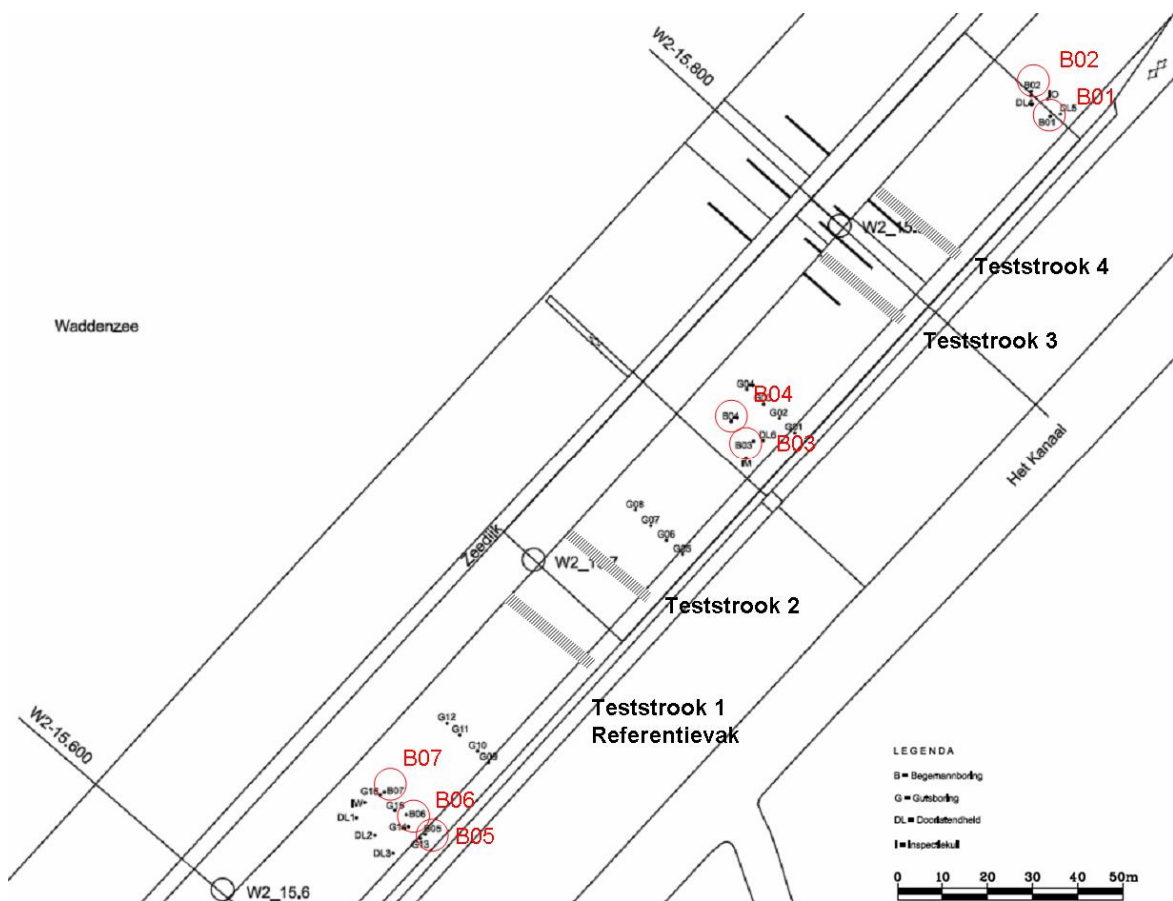
van	tot	grond
NAP +8,82 m		Maaiveld
NAP +8,82 m	NAP +8,0 m	Klei (bekleding)
NAP +8,0 m	NAP +1,0 m	Zand
NAP +1,0 m	NAP +0,7 m	Kleilaagje
NAP +0,7 m	NAP -0,8 m	Zand
NAP -0,9 m	NAP -1,4 m	Kleilaagje
NAP -1,4 m	NAP -6 m	Zand met kleilaagjes
NAP -6 m		einde sondering

Tabel 3.1 Grondopbouw kruin

De resultaten van de sondering zijn in lijn met de ontwerp dwarsdoorsnede van de dijk.

3.2 Dikte kleibekleding

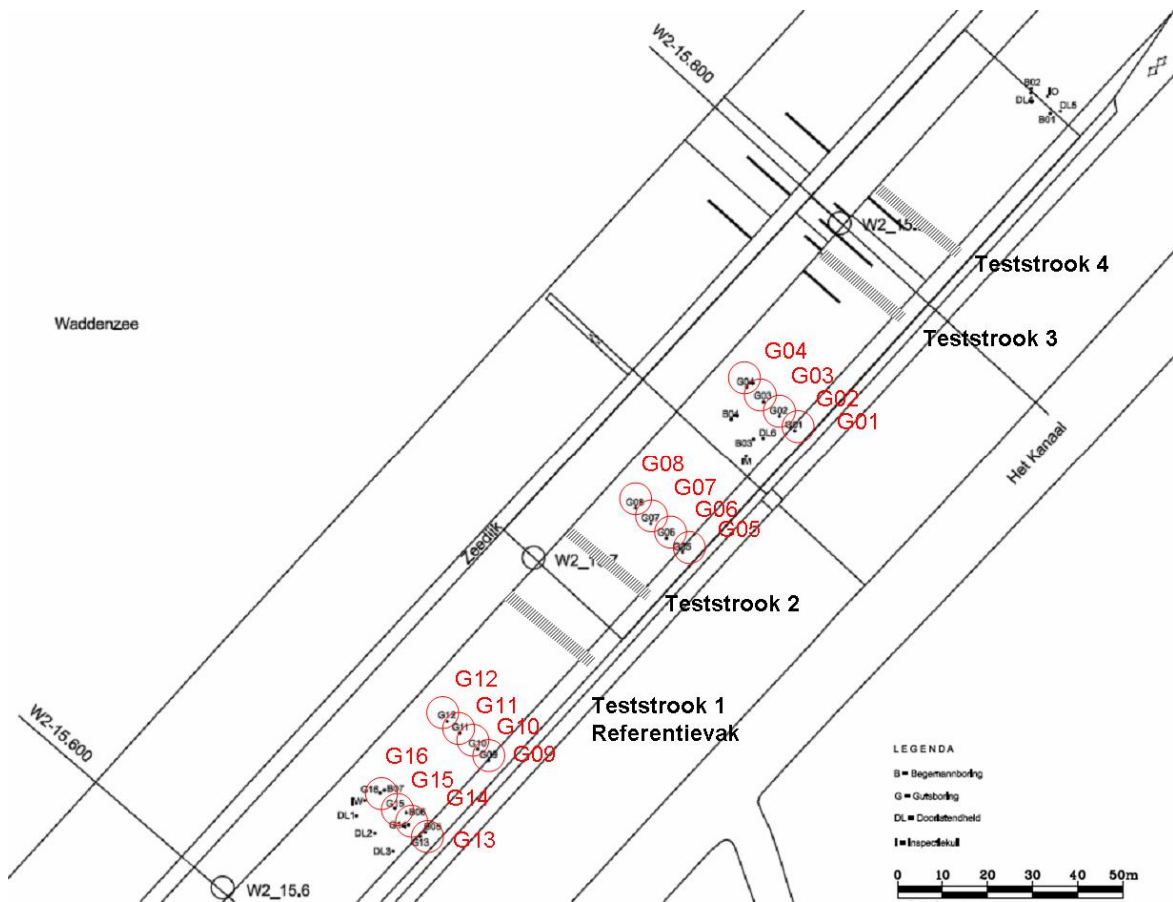
In het kader van de predictie zijn 7 Begemannboringen, 16 gutsboringen (handboringen) uitgevoerd en er zijn 3 profielkuilen gegraven, waaruit de kleilaagdikte kan worden bepaald (Deltares 2008). De boringen zijn loodrecht op het talud uitgevoerd. De lokaties van de onderzoekspunten en de ligging ten opzicht van de teststroken staan in Figuur 3.2 tot en met Figuur 3.4.



Figuur 3.2 Begemannboringen B01 tot en met B07

Boring	Kleilaagdikte (m)	Opmerking
B01	0.17	zand sterk siltig tot 0.53 m
B02	0.22	zand uiterst siltig tot 0.6 m
B03	0.17	zand uiterst siltig tot 0.5 m
B04	0.4	zand uiterst siltig tot 0.6 m
B05	0.2	zand uiterst siltig tot 0.5 m
B06	0.15	zand sterk siltig tot 0.5 m
B07	0.2	zand sterk siltig tot 0.65 m

Tabel 3.2 Kleilaagdikte (m) uit Begemannboringen

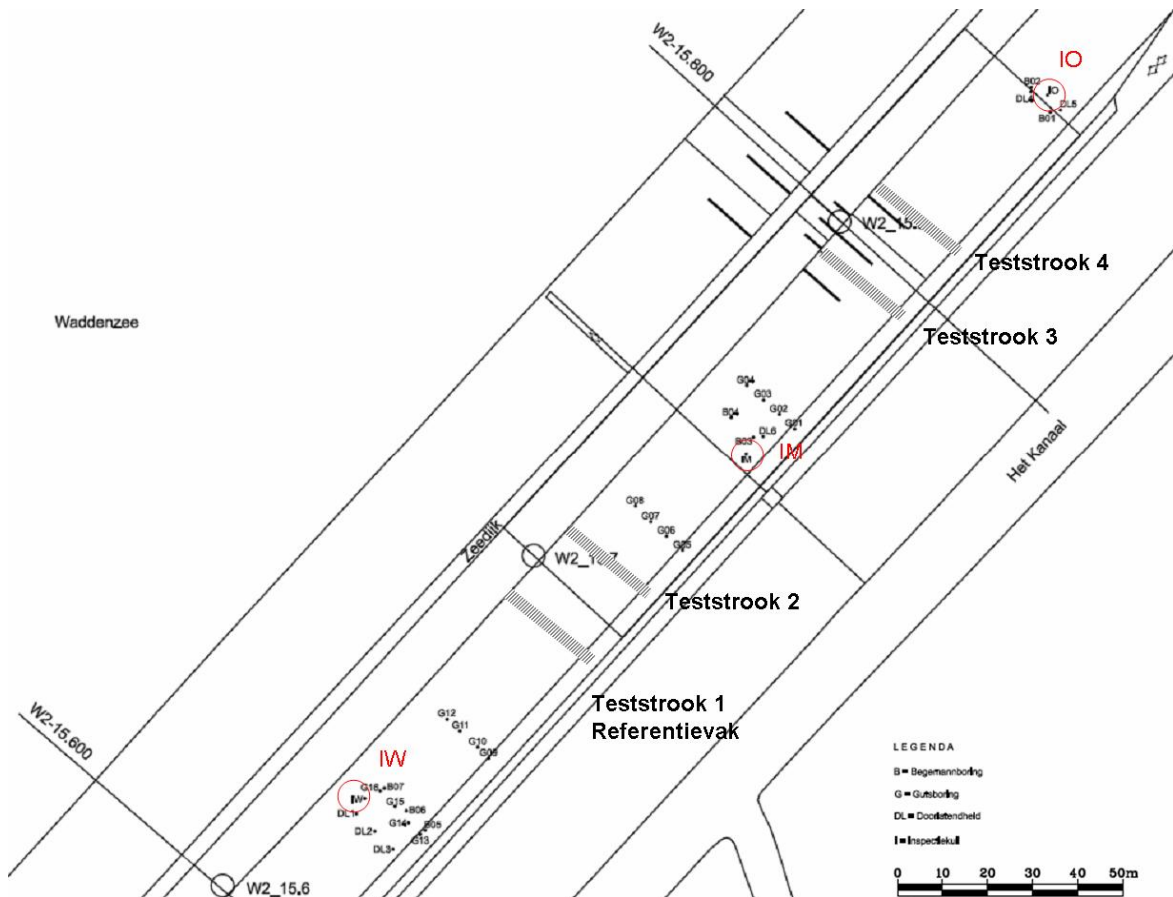


Figuur 3.3 Gutsboringen G01 tot en met G16

Boring	Kleilaagdikte (m)	Opmerking
G01	0.9	-
G02	0.6	-
G03	0.6	-
G04	0.65	-
G05	0.75	-
G06	0.7	-
G07	0.65	-
G08	0.7	-
G09	0.8	-
G10	0.4	0,4 – 0,7 zand, kleiig sterk grindig
G11	0.6	-
G12	0.8	-

Boring	Kleilaagdikte (m)	Opmerking
G13	0.8	-
G14	0.5	-
G15	0.6	-
G16	0.7	-

Tabel 3.3 Kleilaagdikte (m) uit gutsboringen



Figuur 3.4 Profielkuilen IW (west), IM (midden) en IO (oost)

Put	Kleilaagdikte (m)	Opmerking
IW (West)	0.38	-
IM (Midden)	0.5	-
IO (Oost)	0.45	-

Tabel 3.4 Kleilaagdikte (m) profielkuilen

De laagdikte uit de Begemannboringen wijkt af van de overige metingen. Uit de laboratoriumbeschrijving blijkt dat alleen het boverste laagje van 0,15 à 0,20 m uit klei bestaat. De laag hieronder tot 0,5 à 0,6 m krijgt de beschrijving zand sterk of uiterst siltig, af en toe met kleistukken. Bij de veldbeschrijvingen is de hele laag omschreven als klei. Deze grond zit net op de grens tussen zandige klei en kleilig zand. Het lutumpercentage is gemiddeld 13% (8 monsters variatiecoëfficiënt 0,13) en het zandgehalte is gemiddeld 61% (8 monsters variatiecoëfficiënt 0,02). Voor predictie is de hele laag tot kleilaag gerekend.

Er is geen correlatie gevonden tussen de hoogte op het talud en de kleilaagdikte.

De kleilaagdikte varieert over zeer korte afstand. De kleilaagdikte in onderzoekslocaties die vlak bij elkaar liggen (5 à 10 m afstand) zijn niet gecorreleerd. Zo liggen IW (0,38 m) en G16 (0,7 m) slechts 5 m uit elkaar. B05 (0,5 m) en G13 (0,8 m) liggen slechts 1 m uit elkaar.

In het kader van een eerder onderzoek (GeoDelft 2007) zijn in 1 raai nog 6 handboringen uitgevoerd (Tabel 3.5). De exacte locatie is niet bekend. De grondbeschrijving is in het laboratorium uitgevoerd volgens de NEN 5104 op mengmonsters van de aangetroffen bekleedingslaag.

Boring	Kleilaagdikte (m)	Opmerking
H07	0.75	binnenkruinlijn; grondbeschrijving 'zand, sterk siltig'
H08	0.65	klei sterk zandig
H09	0.60	klei sterk zandig
H10	0.60	zand, sterk siltig
H11	0.65	klei sterk zandig
H12	0.75	teen, grondbeschrijving klei, sterksiltig

Tabel 3.5 Kleilaagdikte uit handboringen (GeoDelft 2007)

De kleilaagdikte wordt als volgt gekarakteriseerd:

Gemiddelde kleilaagdikte	0,63 m
Standaardafwijking	0,12 m
Aantal metingen	32 (-)
$t_{N-1}^{0.95}$	1.7
lage karakteristieke puntschatting (normale verdeling)	0,42 m
hoge karakteristieke puntschatting (normale verdeling)	0,83 m
minimaal aangetroffen dikte	0,38 m
maximaal aangetroffen dikte	0,90 m

3.3 Erosiebestendigheidscategorie kleibekleding

In het kader van de predictie (Deltares 2008) zijn 8 kleikeuringen uitgevoerd op grondmonsters die zijn genomen in de drie profielkuilen (Figuur 3.4). Het zandgehalte in de monsters was echter te hoog om de consistentiegrenzen te bepalen. De overige bepalingen staan in Tabel 3.6.

In het kader van het eerdere onderzoek (GeoDelft 2007) zijn 6 kleikeuringen uitgevoerd. De resultaten staan in Tabel 3.6.

lok.	diepte (m)	beschrijving NEN 5104	wl (%)	wp (%)	lp (%)	zand (%)	Lutum (%)	kalk (%)	humus (%)	cat.
IO	0.2	klei, sterk zandig	*	*	*	62.92	9.75	16.13	3.22	c3
IO	0.4	klei, sterk zandig	*	*	*	62.67	11.41	16.43	2.01	c3
IM	0.2	klei, sterk zandig	*	*	*	60.35	13.72	14.91	2.3	c3
IM	0.3	klei, sterk zandig	*	*	*	60.48	13.24	14.12	1.88	c3
IM	0.4	klei, sterk zandig	*	*	*	62.66	12.65	14	1.87	c3
IW	0.2	klei, sterk zandig	*	*	*	59.56	12.96	15.68	2.33	c3
IW	0.4	klei, sterk zandig	*	*	*	59.46	14.75	16	1.73	c3
IW	0.7	klei, sterk zandig	*	*	*	59.76	14.68	16.37	1.73	c3
H07	0-0.75	zand, sterk siltig	28.7	22.5	6.1	69.6	10.8	-	-	c3
H08	0-0.65	klei, sterk zandig	28.3	23.3	5.1	66	11.3	-	-	c3

lok.	diepte (m)	beschrijving NEN 5104	wl (%)	wp (%)	lp (%)	zand (%)	Lutum (%)	kalk (%)	humus (%)	cat.
H09	0-0.60	klei, sterk zandig	28.7	21.6	7.1	68	10.1	-	-	c3
H10	0-0.60	zand, sterk siltig	28.7	24.5	4.2	66.2	8.8	-	-	c3
H11	0-0.65	klei, sterk zandig	30.8	24.2	6.6	64.4	10.5	-	-	c3
H12	0-0.75	klei, sterk zandig	28.7	23.3	5.4	63.6	12.1	-	-	c3

* monsters te zandig voor bepaling consistentiegrenzen

Tabel 3.6 Kleikeuringen

Er is een gering verschil tussen de zand- en lutumgehalten van klei uit de profielkuilen en van klei uit de handboringen die in het kader van een eerder onderzoek zijn uitgevoerd. Een mogelijke verklaring is dat de handboringen uit het eerdere onderzoek niet helemaal ter plekke van de proefvakken is uitgevoerd. De verschillen zijn zodanig gering dat ze niet leiden tot een andere beoordeling van de erosiebestendigheidscategorie.

De klei valt in erosiebestendigheidscategorie 3 'weinig erosiebestendig'. Het gemiddelde zandgehalte is 63% en het gemiddelde lutumgehalte is 12%. Twee van de grondmonsters zijn in het laboratorium zelfs beschreven als zand. De plasticiteitsindex is, voor zover deze kon worden bepaald, zeer laag.

3.4 Volumieke massa kleibekleding

Uit de 7 Begemannboringen zijn twaalf monsters geselecteerd voor beproeving in een triaxiaalapparaat. Van deze ongeroerde monsters is de volumieke massa bepaald bij het natuurlijke vochtgehalte (ρ_{nv} kg/m³). Door het monster te drogen is de droge volumieke massa bepaald (ρ_{dr} kg/m³). Hiermee kan het vochtgehalte bij monsternamen worden bepaald (w: massa water/ massa droge stof) en, uitgaande van $\rho_{korrel} = 2650$ kg/m³, kan de porositeit worden berekend. Bij de massa van de korrels wordt het humusgehalte verwaarloosd. Uit de kleikeuringen blijkt dat dit 1,5 à 3% is wat betekent dat de porositeit enkele procenten wordt onderschat.

Verder zijn door Alterra (Bijlage 1) grondmonsters gestoken in de profielkuilen en ook hiervan is de volumieke massa en het vochtgehalte bepaald (Tabel 3.7).

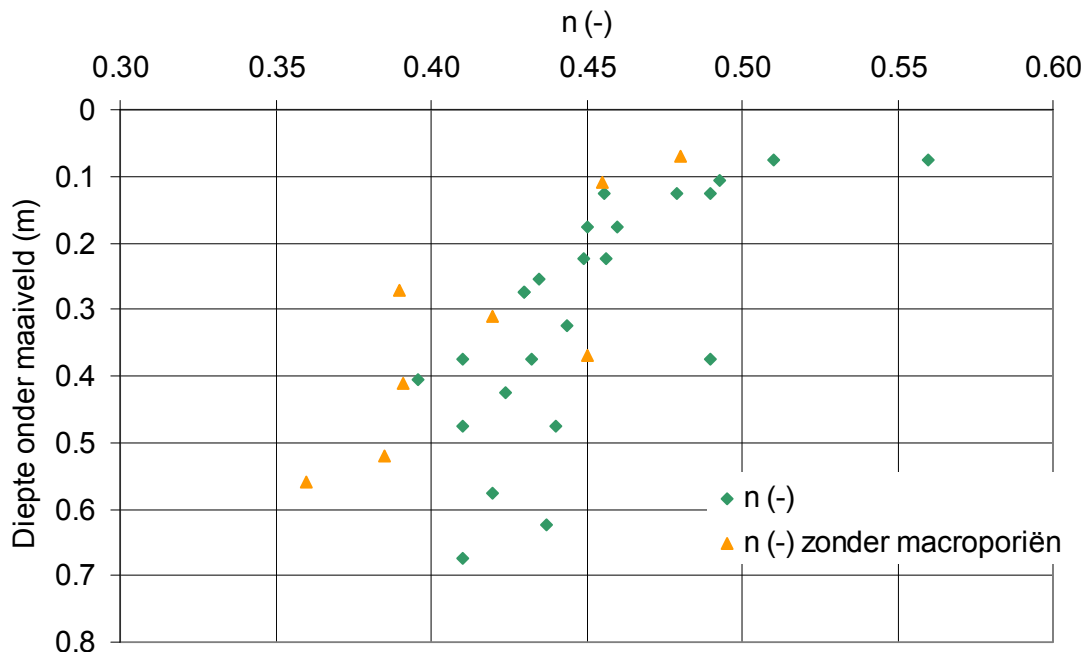
Boring	diepte (m)	ρ_{nv} (kg/m ³)	ρ_{dr} (kg/m ³)	w (%)	n (-)
B01	0.05-0.2	1816	1415	28.29	0.46
B01	0.25-0.4	1741	1446	20.41	0.44
B02	0.15-0.3	1787	1432	24.78	0.45
B03	0.05-0.2	1790	1327	34.81	0.49
B03	0.3-0.45	1755	1476	18.91	0.43
B04	0.33-0.48	1940	1571	23.53	0.40
B05	0.03-0.18	1716	1319	30.11	0.49
B05	0.18-0.33	1770	1469	20.54	0.44
B06	0.05-0.2	1772	1354	30.81	0.48
B07	0.15-0.3	1698	1414	20.07	0.46
B07	0.35-0.5	1771	1497	18.27	0.42
B07	0.55-0.7	1734	1464	18.42	0.44
IW	0.05-0.1	1470	1170	25.64	0.56
IW	0.15-0.2	1690	1420	19.01	0.46
IW	0.25-0.3	1800	1510	19.21	0.43
IW	0.35-0.4	1850	1570	17.83	0.41
IW	0.45-0.5	1840	1560	17.95	0.41

Boring	diepte (m)	ρ_{nv} (kg/m ³)	ρ_{dr} (kg/m ³)	w (%)	n (-)
IW	0.55-0.6	1810	1530	18.30	0.42
IW	0.65-0.7	1820	1560	16.67	0.41
IW	0.9-0.95 (zand)	1610	1540	4.55	0.42
IM	0.05-0.1	1680	1300	29.23	0.51
IM	0.15-0.2	1750	1450	20.69	0.45
IM	0.25-0.3	1790	1520	17.76	0.43
IM	0.35-0.4	1680	1340	25.37	0.49
IM	0.45-0.5	1730	1480	16.89	0.44
IM	0.65-0.7 (zand)	1590	1500	6.00	0.43

Tabel 3.7 Volumieke massa, vochtgehalte en porositeit

De gemiddelde volumieke massa van de kleilaag bij het natuurlijke vochtgehalte is $\rho_{nv} = 1750 \text{ kg/m}^3$. Voor het droge materiaal is het gemiddelde $\rho_{dr} = 1450 \text{ kg/m}^3$ en de gemiddelde porositeit is 0,45 (-). Bij volledige verzadiging van zowel de macroporiën als het matrixmateriaal/ de aggregaten is de gemiddelde volumieke massa 1900 kg/m^3 .

De volumieke massa en de porositeit zijn afhankelijk van de diepte onder het oppervlak. De porositeit van monsters net onder het oppervlak is groter dan die van de diepere monsters. Door Alterra (Bijlage 1) zijn de Van Genuchtenparameters bepaald van de aggregaten. Hieruit blijkt een lagere porositeit, omdat de macroporiën niet worden meegenomen. In Figuur 3.5 is de porositeit van de kleilaag n (-) inclusief en exclusief macroporiën afhankelijk van de diepte onder het taludoppervlak weergegeven.

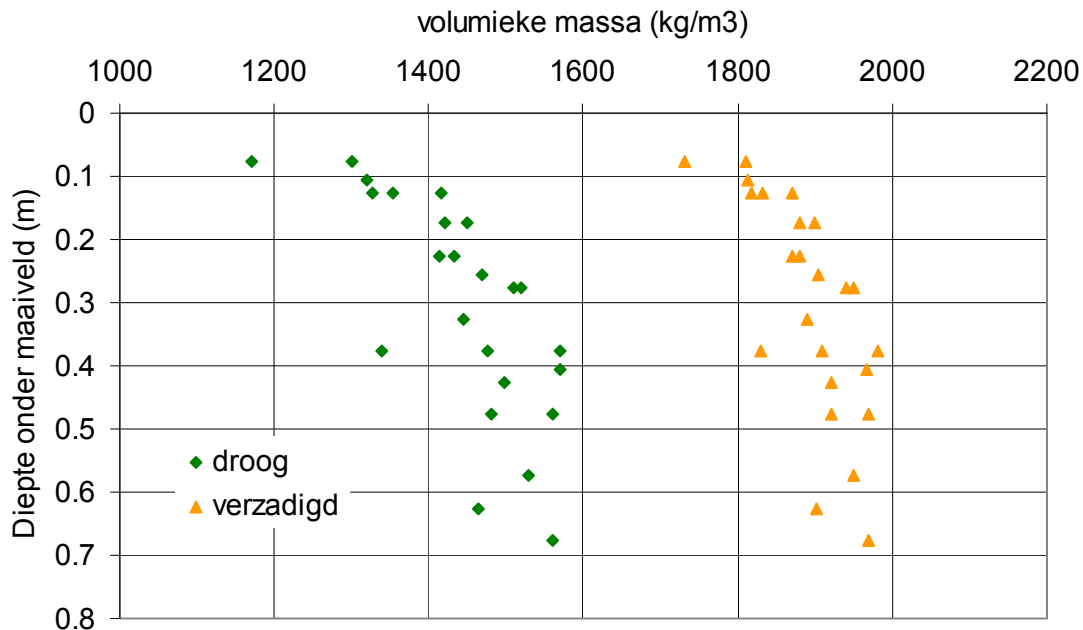


Figuur 3.5 Porositeit n (-) afhankelijk van diepte onder het taludoppervlak (m)

De porositeit vlak bij het taludoppervlak is groter dan 0,5 (-). Van 0,1 m tot 0,3 m onder het taludoppervlak neemt de porositeit af van 0,5 (-) tot circa 0,43 (-). Tot aan de onderzijde van de kleilaag op circa 0,6 m blijft de porositeit gemiddeld gelijk, maar er wordt een grote variatie aangetroffen. Dit kan liggen aan de verhouding tussen de grondmonster- en

aggregaatafmetingen. De aggregaten worden op diepte groter, waardoor een grondmonster met beperkte omvang geen representatief stelsel van macroporiën kan bevatten. Het net wel of niet bevatten van een paar grote poriën maakt dan veel uit op de porositeit van het monster als geheel.

De droge en (berekende) verzadigde volumieke massa (kg/m^3), tegen de van de diepte onder het taludoppervlak (m) staat in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Droge en berekende verzadigde volumieke massa (kg/m^3) tegen de diepte onder het taludoppervlak (m)

De droge volumieke massa vlak bij het taludoppervlak is ongeveer 1250 kg/m^3 , de verzadigde ongeveer 1750 kg/m^3 . Van 0,1 m tot 0,3 m onder het taludoppervlak neemt dit toe tot 1550 kg/m^3 , respectievelijk 1900 kg/m^3 . Tot aan de onderzijde van de kleilaag op circa 0,6 m blijft de volumieke massa gemiddeld gelijk.

Het verloop van deze parameters is in lijn met de beschrijving van de profielkuilen (bijlage P1 van Deltares 2008).

3.5 Schuifsterkte kleibekledinglaag

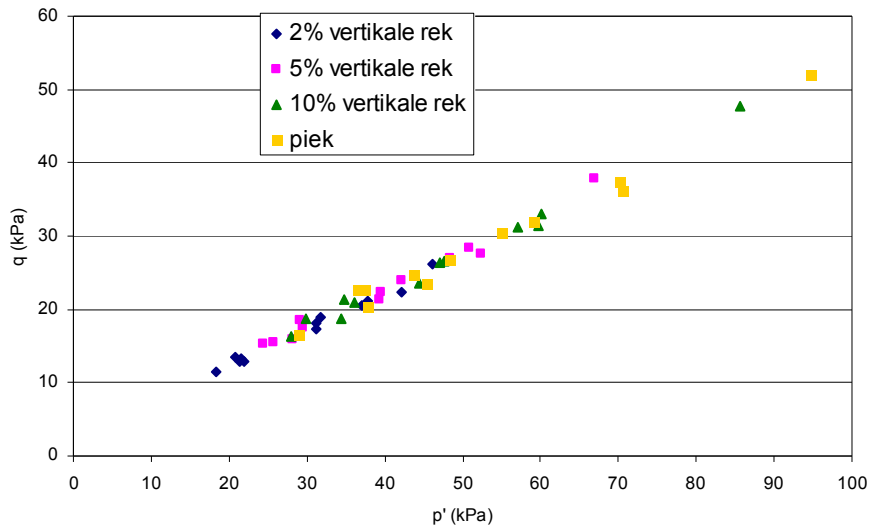
De schuifsterkte van de kleilaag is op drie manieren onderzocht (Deltares 2008).

1. CU single stage triaxiaalproeven op 12 grondmonsters
2. 16 lab vane proeven
3. 12 handsonderingen met een 1 cm^2 conus.

De lab vane proeven (2) en handsonderingen (3) zijn tevens uitgevoerd om de invloed van verzadiging op de sterkte te onderzoeken. De proeven zijn uitgevoerd op grond bij het natuurlijk vochtgehalte (zie Tabel 3.7) en na verzadiging.

3.5.1 CU single stage triaxiaalproeven

De pieksterkte van de grondmonsters wordt al bij een relatief kleine rek bereikt. De p' - q punten bij 2%, 5%, 10% verticale rek en de pieksterkte liggen vrijwel op 1 lijn (Figuur 3.7).

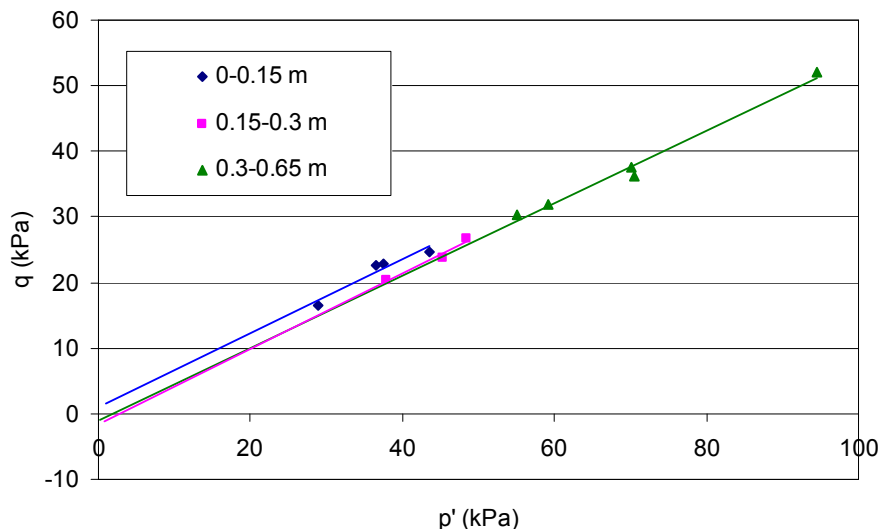


Figuur 3.7 p' (kPa) tegen q (kPa) bij verschillende verticale rekken (2%, 5%, 10% en piek)

Bij de verschillende rekpercentages worden de volgende cohesie c (kPa) en hoek van inwendige wrijving ϕ ($^\circ$) berekend:

2%	$c=2.9$ kPa	$\phi=29.6^\circ$
5%	$c=2.5$ kPa	$\phi=31.0^\circ$
10%	$c=2.1$ kPa	$\phi=31.4^\circ$
piek	$c=2.4$ kPa	$\phi=30.7^\circ$

Er wordt weinig verschil gevonden voor grondmonsters van verschillende dieptes (Figuur 3.8).



Figuur 3.8 p' - q punten gedifferentieerd naar diepte onder het taludoppervlak

De meest ondiepe monsters (tot een diepte van 0.15 m onder het talud) geven een iets hogere sterkte. Omdat de stapeling van aggregaten hier juist los is (zie beschrijving profielkuilen bijlage

P1 van Deltares 2008 en Figuur 3.5) zou voor deze monsters eerder een wat lagere sterkte worden verwacht. Een mogelijke oorzaak voor deze wat hogere sterkte is de aanwezigheid van wortels in deze zone. Dieper dan 0,15 à 0,20 m neemt het aantal wortels snel af.

3.5.2 Vane-proef: schuifsterkte bij veld-watergehalte en na 1, 2 en 6 uur onderdompeling

De vane-proeven zijn uitgevoerd op proefstukken uit Begemannboringen. De vane wordt met een constante hoeksnelheid van 1°/s rondgedraaid, waarbij het benodigde moment wordt gemeten. Voor de vane proeven zijn in vierboringen steeds vier aansluitende proefstukken gekozen. Per boring zijn lab-vane bepalingen gedaan van proefstukken met:

1. natuurlijk watergehalte w ($w = \text{massa water} / \text{massa korrels} \times 100\%$)
2. na 1 uur onderdompeling in water
3. na 2 uur onderdompeling in water
4. na 6 uur onderdompeling in water.

Van elk proefstuk is op voorhand de volumieke massa en het watergehalte ($w = \text{massa water} / \text{massa korrels}$) bepaald. Na onderdompeling in water zijn deze opnieuw bepaald (Tabel 3.8).

Boring	diepte (m-mv)	toestand beproeven	ρ_{nv} (kg/m ³)	ρ_{dr} (kg/m ³)	n (-)	voor verzadiging		na verzadiging	
						w (%)	vol. water/ vol. poriën (-)	w (%)	vol. water/ vol. poriën (-)
B02	0.35-0.4	veld	1794	1508	0.43	19.00	0.66	-	-
B02	0.4-0.45	1 uur	1740	1458	0.45	19.31	0.63	24.97	0.81
B02	0.45-0.5	2 uur	1778	1488	0.44	19.51	0.66	23.92	0.81
B02	0.5-0.55	6 uur	1710	1431	0.46	19.53	0.61	25.71	0.80
B04	0.08-0.13	veld	1759	1450	0.45	21.32	0.68	-	-
B04	0.13-0.18	1 uur	1782	1458	0.45	22.26	0.72	26.95	0.87
B04	0.18-0.23	2 uur	1802	1430	0.46	26.05	0.81	27.69	0.86
B04	0.23-0.28	6 uur	1729	1311	0.51	31.87	0.83	37.91	0.98
B05	0.33-0.38	veld	1621	1389	0.48	16.71	0.49	-	-
B05	0.38-0.43	1 uur	1667	1378	0.48	20.96	0.60	29.83	0.86
B05	0.48-0.53	2 uur	1677	1431	0.46	17.18	0.53	25.58	0.80
B05	0.53-0.58	6 uur	1619	1368	0.48	18.37	0.52	31.58	0.89
B06	0.2-0.25	veld	1768	1377	0.48	28.42	0.81	-	-
B06	0.25-0.3	1 uur	1873	1452	0.45	28.98	0.93	29.13	0.94
B06	0.3-0.35	2 uur	1788	1370	0.48	30.55	0.87	36.57	1.04*
B06	0.35-0.4	6 uur	1875	1484	0.44	26.35	0.89	25.81	0.87

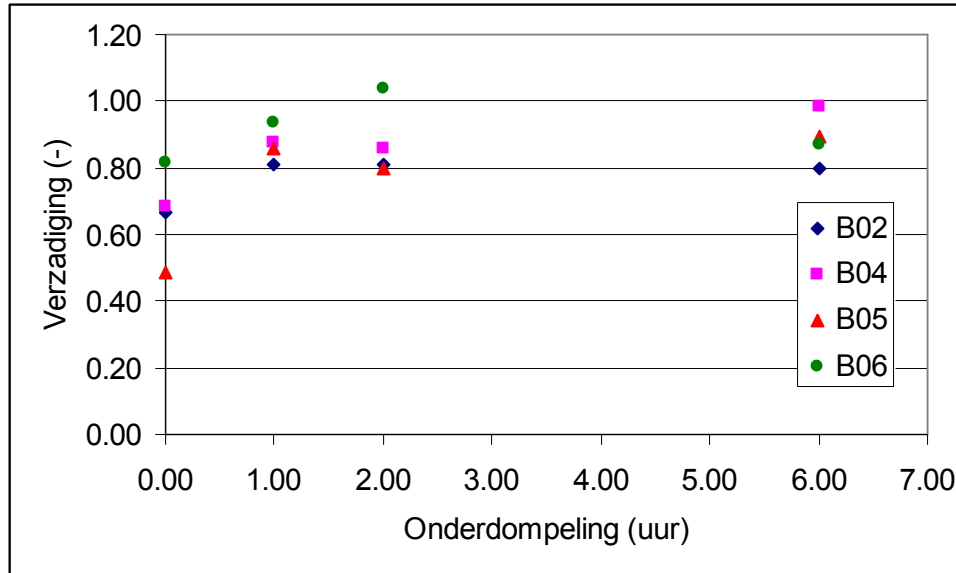
* onbetrouwbaar

Tabel 3.8 Watergehalte w (%) en verzadiging (=vol. water/ vol. poriën) voor en na onder water zetten gedurende 0, 1, 2 en 6 uur.

Het onderdompelen van de proefstukken in water gedurende 1, 2 en 6 uur zorgt voor een verhoging van de verzadiging (verzadiging = volume water/ volume poriën). Gemiddeld ging de verzadiging van 70% naar 85% à 90%. De verzadiging nam na 1 uur niet of nauwelijks meer

toe (Figuur 3.9). Het volume water dat gedurende een uur in de grond stroomt is ongeveer 15% à 20% van het poriën volume, wat bij een gemiddelde porositeit van 0.45 (-) gelijk is aan circa 7% van het grondvolume (70 liter water per m³ grond).

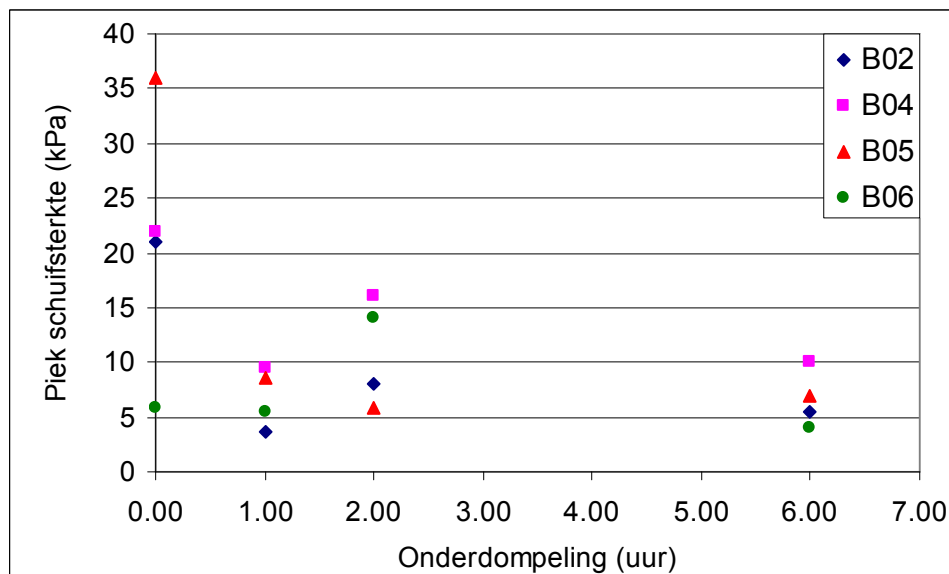
De proefstukken uit B06 hadden voor aanvang van de proeven al een hoge verzadiging van 80% à 90%.



Figuur 3.9 Verzadiging (-) tegen tijdsduur van onderdamping (uur) van de proefstukken

De monsters zijn beproeft door de vane met 1°/s te verdraaien. Na 5 à 30 s wordt een piekweerstand gemeten (=pieksterkte), waarna de weerstand weer afneemt. Zie Deltares 2008 voor de belasting – verplaatsing curves.

Het onder water zetten van de monsters geduren een aantal uren heeft een negatief effect op de schuifsterkte (Figuur 3.10).



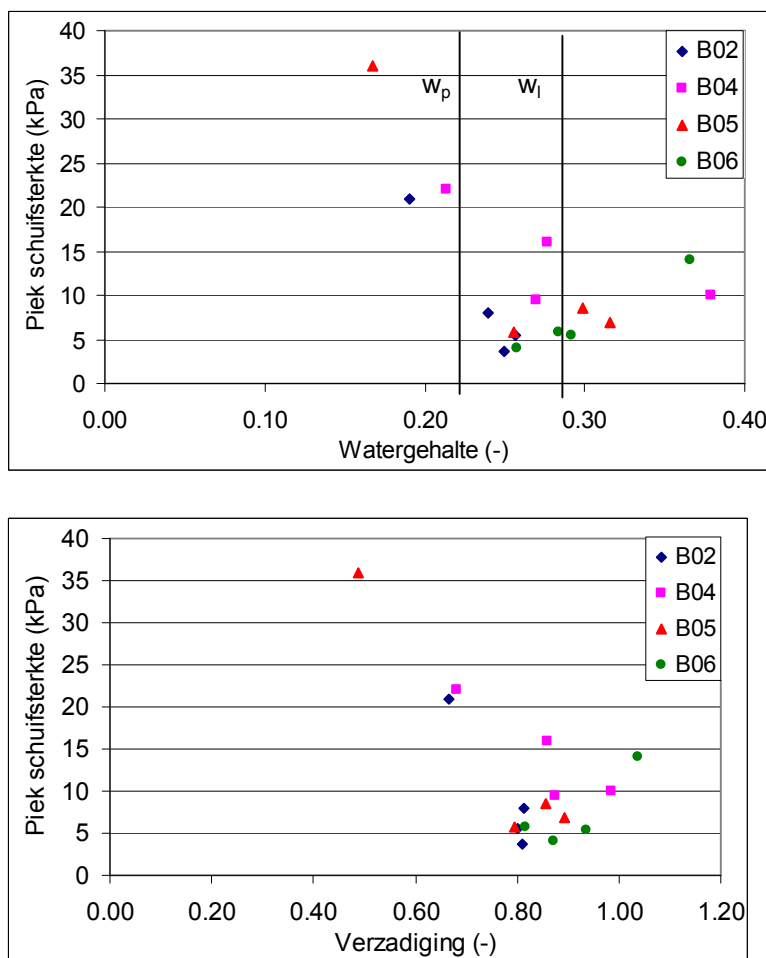
Figuur 3.10 Piek schuifsterkte (kPa) tegen tijdsduur van onderdamping (uur)

Gemiddeld neemt de piek schuifsterkte af van circa 21 kPa naar 8 kPa. Dit is een afname tot 40% van de aanvankelijke sterkte. De verdere afname van de sterkte na 1 uur is niet groot.

De proefstukken uit boring 6 vallen uit de toon. Hier wordt bij de veldvochtigheid al een lage piek schuifsterkte gemeten. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door de al hoge verzadiging voor aanvang van de proefneming (80% à 90%). Een tweede mogelijkheid is dat er in de proefstukken een versturende factor aanwezig was, zoals wat zand en grind of wortels. Dit zou het grillige verloop van de proefneming kunnen verklaren (Deltares 2008). Als deze proefstukken buiten beschouwing worden gelaten dan wordt een gemiddelde daling gemeten van 26 kPa naar 8 kPa (afname tot 30% van de sterkte onder veldvochtige omstandigheden).

De verzadiging van het monster is onvoldoende (80%-90%), waardoor het monster niet volledig ongedraineerd reageert op de spanningsveranderingen in het proefstuk. De korrelspanningen kunnen toenemen, waardoor de 'ongedraineerde' schuifsterkte wordt overschat.

In de grafieken in Figuur 3.11 is de piek schuifsterkte uitgezet tegen het watergehalte (massa water/ massa droge stof) en tegen de verzadiging (volume water/ volume poriën).

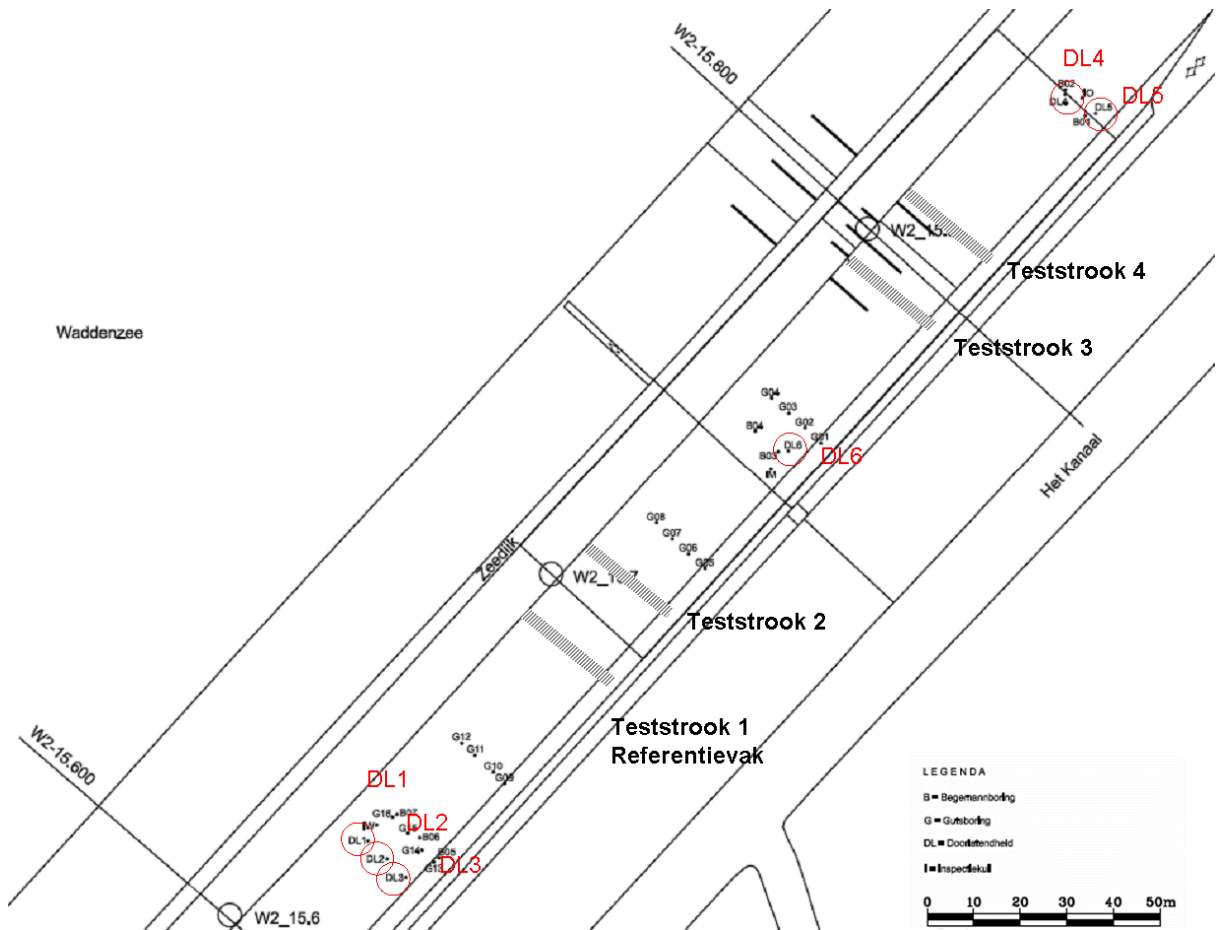


Figuur 3.11 Piek schuifsterkte (kPa) tegen watergehalte (-) en verzadiging (-)

In de bovenste grafiek zijn de gemiddelde vloeigrens ($w_l=0.29$) en de plasticiteitsgrens ($w_p=0.23$) aangegeven. De piek schuifsterkte bij een watergehalte onder w_p is meer dan 20 kPa. In het gebied tussen w_p en w_l is de schuifsterkte afgenomen. Er is een zwakke correlatie aanwezig tussen het watergehalte en de piek schuifsterkte. De correlatie tussen de verzadiging en de piek schuifsterkte is net iets beter.

3.5.3 Handsonderingen

Met een penetrologger zijn 12 handsonderingen uitgevoerd in de bekledingsklei. De conus heeft een oppervlak van 1 cm². De handsonderingen zijn vertikaal uitgevoerd op de locaties waar ook infiltratieproeven zijn uitgevoerd (zie locaties DL1 tot en met DL6 in Figuur 3.12). Op elke locatie is een handsondering naast de infiltratieproef uitgevoerd, bij veld-vochtige grond, en is een sondering uitgevoerd op de plek van de infiltratieproef na het uitvoeren van de proef. Gedurende de infiltratie proef is gedurende 2,5 à 3 uur water geïnfilteerd.



Figuur 3.12 Locaties infiltratieproeven (DL1 tot en met DL 6), waar tevens handsonderingen zijn uitgevoerd.

De sondeergrafieken staan in Deltares 2008. De geschatte gemiddelde conusweerstand q_c (MPa) staat in Tabel 3.9.

Locatie	sondering naast infiltratie / na infiltratie	veld vochtige grond q_c (MPa)	na infiltratieproef q_c (MPa)
DL4	CS2 / CS1	2.0	onbetrouwbaar
DL5	CS4 / CS3	1.5	0.8
DL3	CS6 / CS5	1.9	1.0
DL2	CS8 / CS7	1.7	0.7
DL1	CS10 / CS9	1.8	1.2
DL6	CS12 / CS11	1.4	0.8

Tabel 3.9 Resultaten handsonderingen

Met behulp van correlaties kan uit de conusweerstand een schuifsterkte worden verkregen. De meest bekende en de best gecontroleerde correlaties zijn opgesteld voor normale sonderingen in natuurlijke afzettingen. De resultaten van de handsonderingen geven daarom afwijkende waarden.

De meeste correlaties zijn van de vorm $f_{\text{undr}} = q_c/A$. Hierin is A afhankelijk van diverse randvoorwaarden. Voor harde overgeconsolideerde kleien kan A maximaal 20 tot 30 zijn. In dit geval levert dit f_{undr} gemiddeld 60 à 85 kPa in veld-vochtige omstandigheden en 30 à 45 kPa na infiltratie. Deze waarden zijn een factor 4 tot 6 hoger dan volgt uit de vane-proeven. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het onverzadigd zijn van de aggregaten, waardoor het materiaal niet ongedraineerd reageert. Het in de grond drukken van de conus zorgt dan voor een toename van de korrelspanningen en daarmee ook een toename van de gemeten schuifsterkte. Omdat het proefstuk bij een vane test minder is opgesloten zal de korrelspanning en daarmee de sterkte minder toenemen.

De afname van de sterkte door infiltratie is duidelijk gemeten. De afname van de conusweerstand is in de orde van 50%. Uitgaande van het lineaire verband met de schuifsterkte, reduceert ook deze met circa 50%. Dit is in dezelfde orde van grote als volgt uit de vane-proeven (reductie tot 30% van de sterkte bij veld-vochtige omstandigheden).

De handsonderingen zijn vooral uitgevoerd om eventueel aanwezige zwakke laagjes in de bekleding op te sporen, maar deze zijn niet gevonden.

3.5.4 Samenvatting en analyse schuifsterkte kleilaag

De schuifsterkte van de kleilaag is onderzocht met behulp van triaxiaalproeven, vane-proeven en handsonderingen.

Voor het maken van een predictie van het mechanisme afschuiven wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde piek schuifsterkte. In deze waarden zitten geen veiligheids- / factoren.

De gedraineerde wrijvingsparameters zijn $c'=2.4$ kPa en $\phi'=30.7^\circ$. Deze zijn gebaseerd op CU-single stage triaxiaalproeven op proefstukken uit loodrecht op het talud gestoken monsters met een diameter van 66 mm. Vanwege de geringe afmeting wordt hierin het effect van de bodemstructuur niet goed meegenomen. De bodemstructuur bestaat (onder andere) uit droogte scheuren en glijvlakken die ontstaan bij zwellen door neerslag en of vorst. Hierdoor worden aggregaten gevormd die groter kunnen zijn dan de proefmonsters voor het triaxiaalapparaat. Het verzwakkende effect van de voorkeursvlakken komt niet tot uiting in de kleine monsters en zou een overschatting van de sterkte kunnen betekenen. Anderzijds is de verzadiging van het monster bij een triaxiaalproef bijna volledig door CO₂ doorstroming en het aanbrengen van backpressure, terwijl bij een overslagsituatie de verzadiging niet volledig zal zijn. In de aggregaten is dan nog een zuigspanning aanwezig waardoor de aggregaten sterker zijn dan wanneer helemaal verzadigd. Dit zou juist een onderschatting van de sterkte geven. Het is niet in te schatten welke van beide effecten de doorslag geeft.

De gemiddelde ongedraineerde piek schuifsterkte op basis van vane proeven is gelijk aan 8,1 kPa. Deze waarde is gebaseerd op proeven waarbij de monsters gedurende 1, 2 en 6 uur zijn ondergedompeld in water. Hierbij is de verzadiging toegenomen tot 80 à 90%. Bij de veld-vochtigheid van de grond, tijdens het steken van de monsters, is de piek schuifsterkte gelijk aan 26 kPa. Omdat het onderdompelen van de monsters niet leidt tot volledige verzadiging, is de gemeten 'ongedraineerde' schuifsterkte niet helemaal de ongedraineerde schuifsterkte. Deze wordt door de proeven overschat.

3.6 Stromingsparameters

3.6.1 Zandkern

Uit de boringen blijkt dat de kern van de dijk bestaat uit zand, zwak tot matig siltig. De doorlatendheid van het zand wordt bepaald door de korrelverdeling en met name de fijne fractie en de pakking.

Uit eerder onderzoek naar de waterhuishouding in de dijk nabij gemaal Zwarte Haan is gebleken dat het zand in de kern van de dijk zeer hoge conusweerstand geeft. Dit wordt deels veroorzaakt door een vaste pakking en deels door verkitting. Verkitting treedt op in de zone met een variërende grondwaterstand. Ook uit sonderingen ter plaatse van de proefvakken blijken zeer hoge conusweerstand voor te komen op een diepte van ongeveer 4 meter onder de kruin. Vlak onder het talud is in de boringen en profielkuilen geen verkitting van het zand aangetroffen.

De doorlatendheid van het zandpakket is op drie manieren bepaald: laboratoriumproeven door Alterra (bijlage 1), berekening uit correlatie met de korrelverdeling en berekening door inversemodellering van buisinfiltatieproeven.

Er zijn twee doorlatendheidproeven op het kernzand uitgevoerd voor de locaties IM en IW. De resultaten staan in Tabel 3.10.

Locatie	Diepte	k (cm/dag)	k (m/s)
IW	0.95-1.03	0.43	0.5×10^{-7}
IM	0.75-0.83	0.31	0.4×10^{-7}

Tabel 3.10 Verzadigde doorlatendheid (k) zandkern (cm/dag en m/s)

Een doorlatendheid in de orde van 10^{-7} m/s is zeer laag voor zand, hetgeen ook door Alterra wordt opgemerkt. In Bijlage 1 wordt hierover verwezen naar doorlatendheidproeven waaruit eveneens een zeer lage doorlatendheid komt (Deltares 2008). Hoewel het hier ook gaat om grond met de beschrijving 'zand', komen deze grondmonsters uit de kleilaag en zijn daarom niet vergelijkbaar (zie paragraaf 3.2 over de problematiek ten aanzien van de beschrijving van de bekledingslaag). Door de geoloog zijn in het zand in de inspectiesleuven geen bijzonderheden aangetroffen die de zeer lage doorlatendheid van het zand kunnen verklaren.

De doorlatendheid is tevens bepaald op basis van de correlatie met de korrelverdeling en pakking van het zand volgens Den Rooijen (1992). Uit de Begemann boringen B01, B03 en B06 (Figuur 3.2) zijn elk drie monsters genomen waarvan de korrelverdelingen zijn bepaald. Uit de correlatie volgt een gemiddelde doorlatendheid van 0.9×10^{-5} m/s (0.75 m/dag).

Tenslotte is de doorlatendheid van het zand berekend uit een inversemodellering van een buisinfiltatieproef (Bijlage 1). Voor de twee proeven, DL1 en DL5, blijkt dat een doorlatendheid van het zand van 3×10^{-5} m/s respectievelijk 2×10^{-5} m/s de beste fit geven. Deze waarden zijn van gelijke orde van grootte als de correlatie met de korreldiameter.

De onverzadigde parameters voor het zand zijn gebaseerd op laboratoriumonderzoek (Bijlage 1).

	diepte (cm)	S_{res} (-)	S_{sat} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_l (-)	k (m/s)	e (-)	C_{sat} (1/m)	Ψ_{unsat} (m)
IW	95-103	0.032	1	4.821	1.83	-1.1	5E-06	0.47	1E-04	1E+04
IM	75-83	0.032	1	4.645	1.33	-1	5E-06	0.46	1E-04	1E+04
gem.	-	0.032	1	4.733	1.58	-1	5E-06	0.46	1E-04	1E+04

Tabel 3.11 Stromingsparameters zandkern

3.6.2 Kleibekleding

De verzadigde en onverzadigde stromingsparameters van de kleibekleding zijn bepaald door Alterra (Bijlage 1).

Het onderzoek van Alterra heeft bestaan uit het bepalen van doorlatendheidsparameters door laboratoriumproeven en uit een inversemodellering van de uitgevoerde infiltratieproeven met het model SWAP.

Voor de laboratoriumproeven zijn monsters gestoken in de profielkuilen "Midden" (IM) en West" (IW) (zie Figuur 3.4). Van deze grondmonsters zijn bepalingen uitgevoerd van het veldvocht- en poriëngehalte, van de verzadigde doorlatendheid en van de waterretentie en doorlatendheidskarakteristieken. Met deze parameters als uitgangspunt zijn modelsimulaties uitgevoerd met het model SWAP. Hiermee is geprobeerd de infiltratieproeven na te rekenen. Het onderzoek is als bijlage opgenomen (Bijlage 1). Een samenvatting van de parameters staat in Tabel 3.12.

	diepte (cm)	S_{res} (-)	S_{sat} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_l (-)	k (m/s)	e (-)	C_{sat} (1/m)	Ψ_{unsat} (m)
IW	25-33	0.150	1	2.087	1.45	-0.73	8.4E-8	0.64	1E-04	1E+04
		0.100	1	1.819	1.73	-0.04	3.1E-7	0.72	1E-04	1E+04
gem.		0.125	1	1.953	1.59	-0.38	2.0E-7	0.68	1E-04	1E+04
IW	50-58	0.130	1	2.197	1.57	-1.47	2.4E-8	0.63	1E-04	1E+04
		0.150	1	2.553	1.35	-1.59	1.0E-8	0.56	1E-04	1E+04
gem.		0.140	1	2.375	1.46	-1.53	1.7E-8	0.59	1E-04	1E+04
IM	5-13	0.000	1	1.389	1.34	1.00	6.3E-7	0.92	1E-04	1E+04
		0.000	1	1.377	0.77	0.00	1.3E-7	0.83	1E-04	1E+04
gem.		0.000	1	1.383	1.06	0.50	3.8E-7	0.88	1E-04	1E+04
IM	35-43	0.125	1	2.156	1.74	-1.5	4.6E-8	0.82	1E-04	1E+04
		0.150	1	2.250	1.35	-1.1	4.1E-8	0.64	1E-04	1E+04
gem.		0.138	1	2.203	1.55	-1.3	4.4E-8	0.73	1E-04	1E+04

Tabel 3.12 Doorlatendheidskarakteristieken bodemmatrix kleibekleding

De verzadigde doorlatendheid k (m/s) en het poriëngetal e (vol. poriën/ vol. korrels) betreffen de eigenschappen van de bodemmatrix. De doorlatendheid van het materiaal inclusief macroporiën is vele malen groter en staat in Tabel 3.13. Voor de porositeit van het materiaal inclusief macroporiën wordt verwezen naar paragraaf 3.4.

	diepte (cm)	k_{vert} verzadigd (m/s)	k_{vert} verdroogd (m/s)	k_{hor} verzadigd (m/s)	k_{hor} verdroogd (m/s)
IW	25-33	5.6E-04	5.9E-04		
		2.7E-05	3.3E-05		
gem.		3.0E-04	3.1E-04		
IW	50-60	2.6E-05	2.5E-05		
		8.1E-06	1.0E-05		
gem.		1.7E-05	1.8E-05		
IW	45-65			3.7E-06	4.1E-06
IM	5-15	1.7E-04	9.8E-05		
		1.0E-04	1.0E-04		
gem.		1.4E-04	1.0E-04		
IM	35-45	1.6E-05	1.2E-05		
		1.6E-05	1.7E-05		
gem.		1.6E-05	1.4E-05		
IM	25-45			8.8E-06	2.1E-05

Tabel 3.13 Doorlatendheid kleibekleding inclusief macroporiën

De doorlatendheid van de grond met macroporiën is een factor 100 à 1000 groter dan van de bodemmatrix. De macroporiën domineren de doorlatendheid van de kleibekleding.

Het verschil tussen de verzadigde en veldvochtige doorlatendheid geeft een indicatie van het effect van zwellen van de klei en het daardoor dichtdrukken van macroporiën. Voor de locatie IW liggen de doorlatendheden heel dicht bij elkaar wat erop duidt dat zwellen en dichtdrukken van macroporiën niet optreedt. Bij locatie IM gebeurt zelfs het omgekeerde, wat niet goed kan worden verklaard, maar in elk geval niet duidt op het dichtdrukken van macroporiën.

De horizontale doorlatendheid bij locatie IW (diepte 45-65 cm) is aanmerkelijk kleiner dan de verticale doorlatendheid. Dit kan worden verklaard door voornamelijk vertikaal georiënteerde macroporiën op deze diepte. Op een geringere diepte van 25-45 cm is de horizontale doorlatendheid vergelijkbaar met de verticale doorlatendheid.

De porositeit n (-), of het poriëngetal e (-) met $e=n/(1-n)$, is een belangrijke parameter voor de onverzadigde stroming in de grond. Deze parameter bepaalt het volume water dat moet toestromen voordat de grond is verzadigd. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten poriën:

1. poriën in de bodemmatrix,
 - poriën binnen de kleiaggregaten,
 - *circa 35 à 40 % van het aggregaatvolume,*
 - in en uitstromen van water gaat relatief **langzaam**,
2. macroporiën,
 - poriën tussen de kleiaggregaten, scheuren, wormgangen,
 - volume sterk afhankelijk van de diepte,
 - *van 10-30% van het grondvolume voor de bovenste 5 cm, afnemend tot 1 à 2% op 80 cm diepte.*
 - in en uitstromen van water gaat **snel**.

Het verschil tussen 1 en 2 is niet zuiver gedefinieerd. Aggregaten die op het eerste gezicht een geheel zijn, bevatten vaak een heel fijne structuur van soms nauwelijks zichtbare scheurtjes.

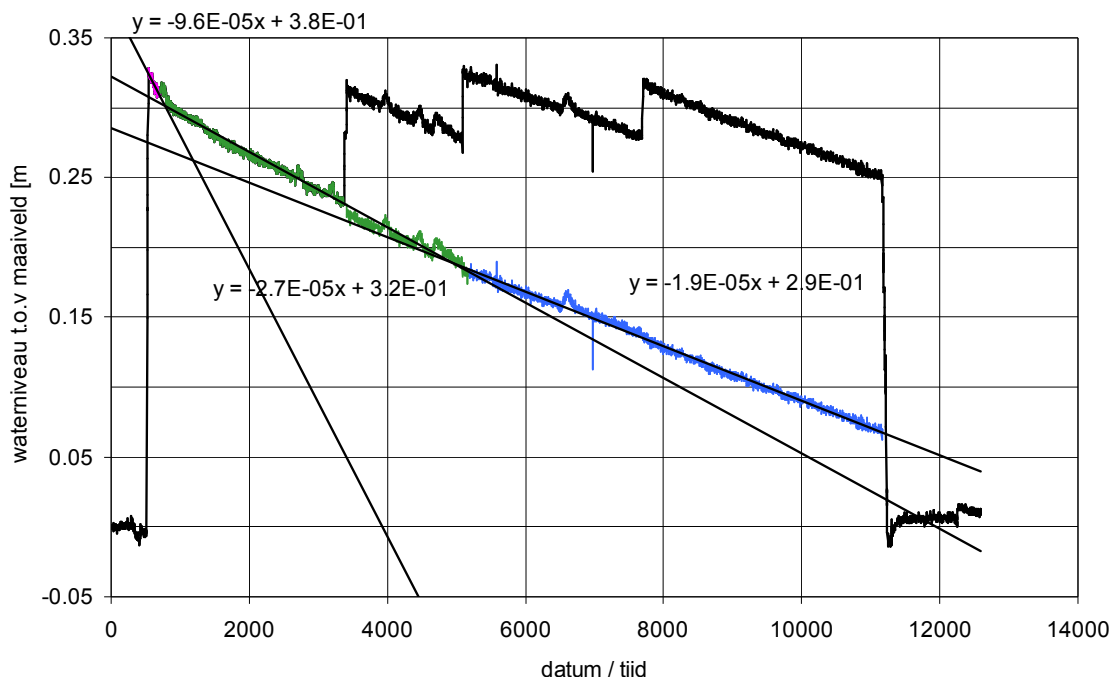
De waarden voor e (-) in tabel 3.12 ($e_{\text{gem}} = 0.72$; $n_{\text{gem}} = 0.42$) betreffen alleen de poriën in de bodemmatrix, dus zonder de macroporiën. Bij de omstandigheden tijdens het uitvoeren van het veldwerk is bepaald dat deze poriën gemiddeld al voor 70% zijn gevuld met water. Potentieel

kan dus nog 30% van de poriën worden gevuld met water. Dat is 12.6% van het grondvolume, ofwel 126 liter/m³. Het verzadigen van deze poriën is een langzaam proces dat gedurende een overslagsituatie niet volledig zal plaatsvinden.

De hoeveelheid macroporiën kan worden bepaald met behulp van Figuur 3.5. De porositeit (macro + bodemmatrix) neemt af met de diepte. Gemiddeld is het verschil circa 0.05. Dit betekent dat de hoeveelheid macroporiën gemiddeld 5% is van het grondvolume.

Het effect van deze verdeling van macroporiën en bodemmatrixporiën is zichtbaar bij de infiltratie van kleine grondmonsters voor de vane-proeven (Paragraaf 3.5). Hierbij zijn grondschildjes met een dikte van circa 5 cm en een diameter van 6,6 cm gedurende een aantal uur onder water gedompeld en is, naast de schuifsterkte, de verzadiging voor en na onderdompeling gemeten. De verzadiging (volume water/ volume alle poriën) tegen de onderdompeltijd staat in Figuur 3.9. Na 1 uur neemt de verzadiging toe van circa 70% naar circa 85%. Daarna neemt de verzadiging nauwelijks toe. De toename van de verzadiging van 15% betekent de instroming van water van ongeveer $0,15 \cdot 0,45 = 7\%$ van het grondvolume. Dit komt ongeveer overeen met het percentage macroporiën (gemiddeld 5%). De verdere toestroming van water naar de poriën in de bodemmatrix gaat vervolgens langzaam ten opzicht van de proefduur van 6 uur.

Naast het laboratoriumonderzoek zijn buis-infiltratieproeven uitgevoerd (Deltares 2008). Er zijn 6 proeven uitgevoerd (DL1-DL6) met een buis met een diameter van circa 40 cm die verticaal in het talud is gedrukt tot net op of onder de grens zand/klei. In de buis is water gegoten en de daling van de waterspiegel is gemeten. De snelheid waarmee de waterspiegel in de buis daalt is de maat voor de infiltratiecapaciteit van het talud. Er kan worden beredeneerd dat deze daalsnelheid bij benadering gelijk is aan de verzadigde doorlatendheid van de grond (communicatie met Prof. Frans Barends, bijlage 3). Een voorbeeld van een meting staat in Figuur 3.13.

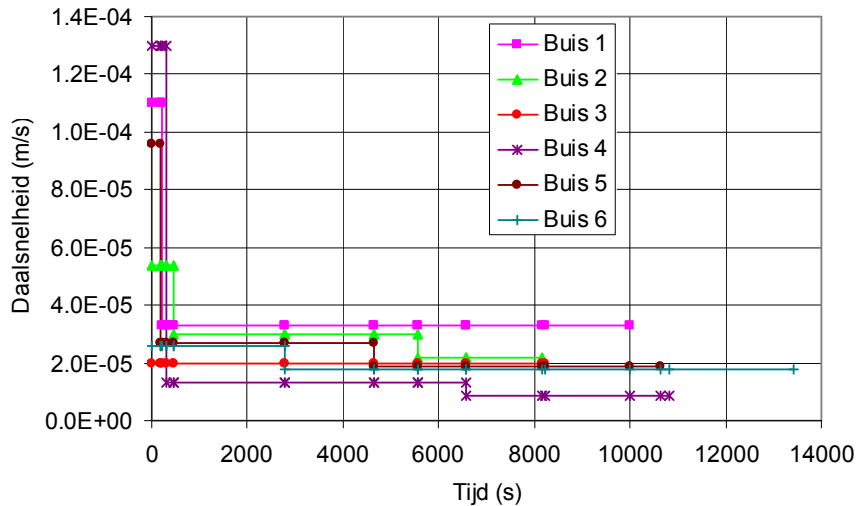


Figuur 3.13 Buis infiltratieproef DL5 waterstand tov maaiveld vs tijd (s)

Voor de analyse van de proefresultaten zijn de momenten waarop de buis is bijgevuld (vertikale sprongen in de meting) verwijderd, wat resulteert in de dalende lijn in bovenstaande figuur.

Bij aanvang van de proef daalt de waterspiegel snel waarna de daalsnelheid met verloop van de proef iets afneemt. De afname van de daalsnelheid kan, in het algemeen, worden veroorzaakt door zwelling van de klei en het daarmee dichtdrukken van macroporiën. Voor de klei op de Boonweg is dit echter niet het geval (zie Bijlage 1). In dit geval kan de afname van de infiltratiesnelheid wordt verklaard doordat het infiltratiefont diepere en minder doorlatende lagen bereikt.

De zes proeven zijn op het oog ingedeeld in tijdperiodes met gelijke daalsnelheid (zie bovenstaand voorbeeld, waarbij drie takken zijn onderscheiden). De resultaten van de 6 proeven zijn samengevat in onderstaande figuur, waarbij de daalsnelheid (m/s) is uitgezet tegen de tijd (s).



Figuur 3.14 Buisinfiltratieproeven afname daalsnelheid waterspiegel (m/s) vs tijd (s)

Gemiddeld neemt de daalsnelheid in ongeveer 5 minuten af van $0,7 \times 10^{-4}$ m/s naar $2,0 \times 10^{-5}$ m/s. Deze snelheid is bij benadering gelijk aan de middeling van de verzadigde doorlatendheid van de grondlaag die op dat moment achter het infiltratiefont is gekomen.

Opgemerkt wordt dat de frontnelheid een factor $1/n$ (-) sneller is dan de daalsnelheid. De frontnelheid in de macroporiën ($n = 0.07$) wordt daarmee gelijk aan 1×10^{-3} m/s tot 4×10^{-4} m/s. Het front zou dus na 10 minuten tot een half uur de onderkant van de 60 cm dikke kleibekleding bereiken.

4 Predictie infiltratie

De predictie van infiltratie is uitgevoerd met het eindige elementen methode programma PlaxFlow, waarbij gebruik is gemaakt van het Van Genuchten stromingsmodel. De berekeningen zijn voor een twee dimensionaal vlak, waarin geen stroming is in de richting loodrecht op dit vlak. Voor het uitvoeren van deze predictie zijn de volgende stappen gemaakt:

- Laboratoriumproeven voor bepaling parameters (Hoofdstuk 3 en Bijlage 1).
- 1D SWAP berekening van buisinfiltratieproeven voor de validatie van de laboratoriumbepalingen (Bijlage 1).
- 1D PlaxFlow berekeningen voor bepalen laaggemiddelde parameters op basis van de 1D SWAP analyse en bepaling invloed waterlaagdikte op infiltratiesnelheid (Paragraaf 4.1).
- Predictie met 2D PlaxFlow berekening (Paragraaf 4.2).

4.1 1D PlaxFlow berekening infiltratie kleilaag

4.1.1 Resume 1D SWAP berekening

Een onderdeel van het onderzoek van Alterra (Bijlage 1) was het uitvoeren van een inversemodellering van twee buis-infiltratieproeven met het 1D model SWAP. Ook dit model maakt gebruik van het Van Genuchten materiaalmodel. Anders dan in PlaxFlow kan de invloed van macroporen worden meegenomen in de berekening, wat voor de inverse modellering van de buis infiltratieproeven ook gebeurt. Hierdoor is het niet mogelijk om de parametersets direct te gebruiken voor PlaxFlow.

De bekledingslaag is voor de 1D SWAP berekeningen als volgt geschematiseerd:

naam	diepte (cm)	parameters (zie H3)	k_{sat} - macro (m/s)	k_{sat} matrix (m/s)	e (-)	S_{res} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_i (-)
wortelzone	0-8	IM M1 gemiddeld	1.4E-4	3.8E-7	0.88	0	1.383	1.06	0.5
wortelzone	8-25	IM M1 gemiddeld	1.4E-4	3.8E-7	0.88	0	1.383	1.06	0.5
kleilaag 1	25-38	IW B1 gemiddeld	3.0E-4	2.0E-7	0.68	0.125	1.953	1.59	-0.384
kleilaag 2	38-65	IW B2 gemiddeld	1.7E-4	4.4E-8	0.73	0.140	2.375	1.46	-1.531
kalibratielaag	65-80	IW B2 gemiddeld; k_{sat} gekalibreerd	3.0E-5	3.0E-5	0.73	0.140	2.375	1.46	-1.531

Tabel 4.1 Van genuchten parameters locatie IW

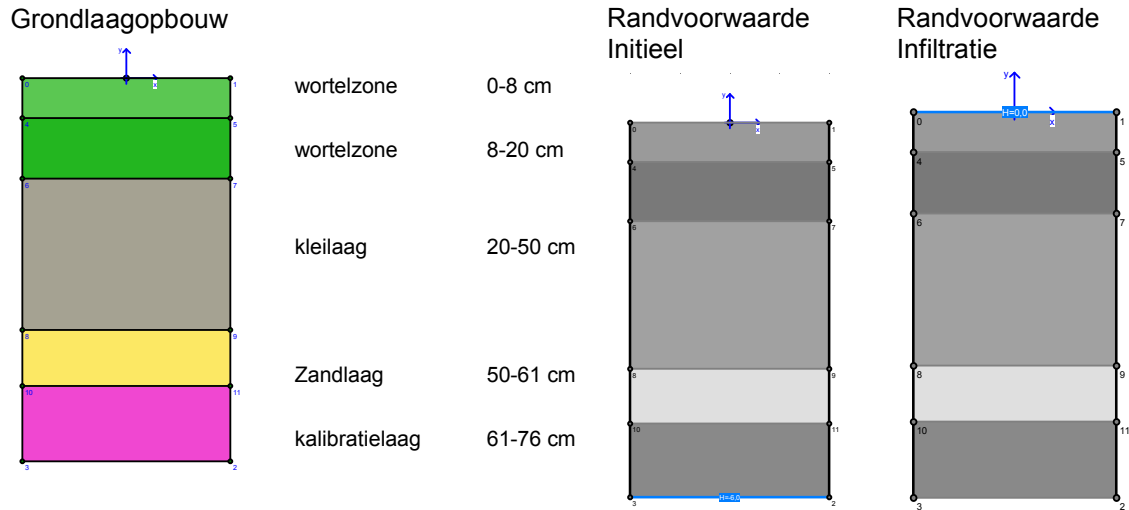
naam	diepte (cm)	parameters (zie H3)	k_{sat} macro (m/s)	k_{sat} matrix (m/s)	e (-)	S_{res} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_i (-)
wortelzone	0-8	IM M1 gemiddeld	1.4E-4	3.8E-7	0.88	0	1.383	1.06	0.5
wortelzone	8-20	IM M1 gemiddeld	1.4E-4	3.8E-7	0.88	0	1.383	1.06	0.5
kleilaag	20-50	IM M2 gemiddeld	1.6E-5	4.4E-8	0.73	0.138	2.203	1.55	-1.3
Zandlaag	50-61	IM Mz	1.9E-5	3.6E-8	0.46	0.032	4.645	1.33	-1.0
kalibratielaag	61-76	IM Mz; k_{sat} gekalibreerd	1.9E-5	1.9E-5	0.46	0.032	4.645	1.33	-1.0

Tabel 4.2 Van Genuchten parameters locatie IM

Aan de onderzijde van de modelschematisaties is een kalibratielaag aangebracht die de afstroming in de zandkern modelleert. De verzadigde doorlatendheid k_{sat} is hierbij zodanig aangepast dat de berekeningen zo goed mogelijk overeen kwamen met de metingen (zie ook paragraaf 3.6.1). Met behulp van de kalibratielaag was het zeer goed mogelijk om de buisinfiltrometingen na te rekenen (zie Bijlage 1). De afwijking van de berekende waterstanddaling ten opzichte van de meting was in de orde van een paar mm over de volledige proefperiode van enkele uren.

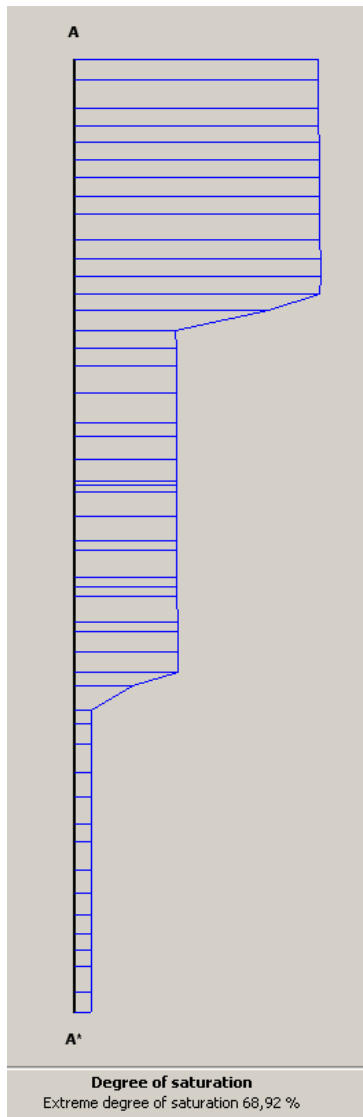
4.1.2 Randvoorwaarde en initiële waterdruk

Er is een grondkolom gemodelleerd met de laagopbouw uit Tabel 4.2.



Er is geen zijdelingse, horizontale, stroming. De verticale randen zijn ondoorlatend.

Voor het berekenen van de initiële waterspanningstoestand is aan de bovenzijde een vrij sijnoppervlak aangehouden en aan de onderzijde een druk overeenkomend met een freatisch vlak op 6 m onder het taludoppervlak. In de initiële situatie is er dan een zuigspanning aanwezig van 60 kPa aan het taludoppervlak en 52,4 kPa aan de onderrand. Bij deze zuigspanning hoort een verzadiging zoals aangegeven in Figuur 4.1. De maximale initiële verzadiging in de kolom is 68% voor de wortelzone. Deze waarde komt ongeveer overeen met het vochtgehalte dat voor een aantal kleimonsters in het laboratorium is bepaald. De zand- en kalibratielaag hebben bij deze hoge zuigspanning een heel lage verzadiging, zoals ook is te verwachten.



Figuur 4.1 Verzadiging grondkolom initiële situatie (bovenzijde maaiveld)

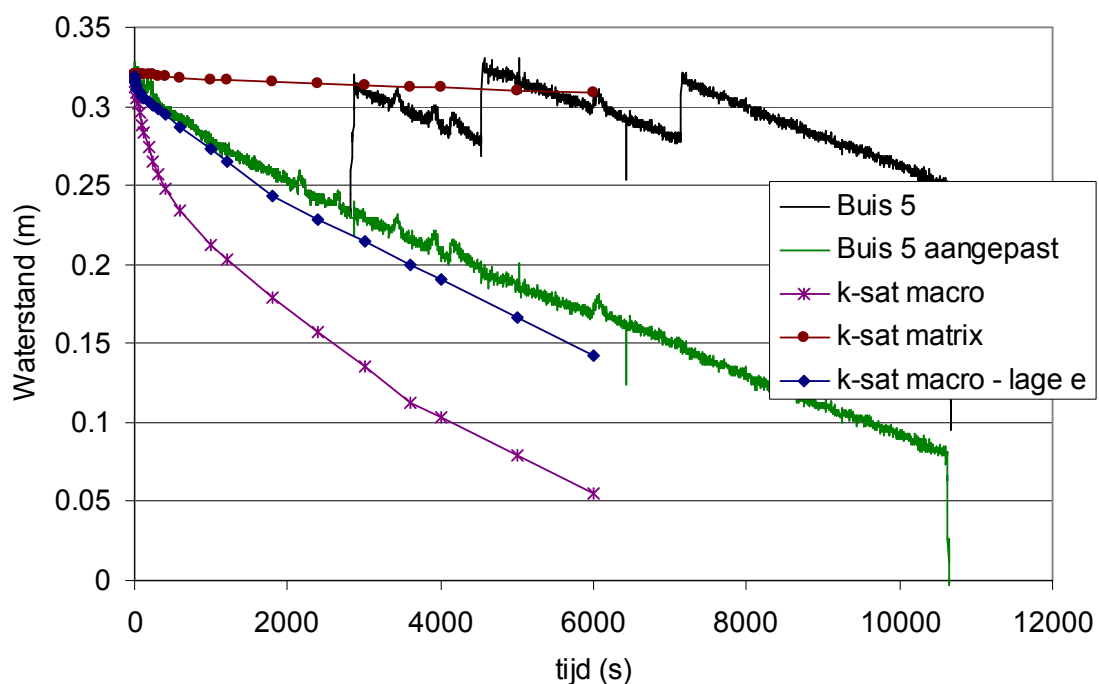
Tijdens de verzadigingsfase is aan de onderzijde een vrij sijpelooppervlak gemodelleerd. Dit betekent dat water dat de onderzijde van de kolom bereikt zonder verdere weerstand het model verlaat. Vanaf het moment dat het infiltratiefront de onderkant van de buis bereikt klopt de berekening niet meer met de buis-infiltratieproef, omdat in werkelijkheid onder de onderrand van de buis een 3D afstroming plaatsvindt.

Aan de bovenrand is een constante druk opgelegd van 0; 0.01; 0.1 en 0.2 m waterkolom.

4.1.3 Stromingsparameters

Omdat het model SWAP de mogelijkheid biedt voor een gecombineerde stroming door macroporiën en door de bodemmatrix, kunnen de parameters uit Tabel 4.2 niet één op één worden overgenomen in PlaxFlow. Een berekening met een k_{sat} (m/s) voor de bodemmatrix leidt na 107 min tot verzadiging van alleen de bovenste centimeters van de grondkolom. De infiltratiesnelheid is dan slechts in de orde van $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, wat veel lager is dan gemeten in de buisinfiltratieproeven. Invulling van de k_{sat} (m/s) voor de macroporiën geeft een daalsnelheid in de orde van $2.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, wat van gelijke orde is als de meting bij de buisinfiltratieproef (Figuur 4.2).

De orde van grote van de infiltratie is goed indien voor de verzadigde doorlatendheid de door Alterra gevonden waarden voor de macroporiën wordt ingevuld. De aanvangssnelheid is echter vrij groot, wat wordt veroorzaakt door de relatief grote hoeveelheid poriën die in het model wordt meegenomen, namelijk de macroporiën en ook de poriën in de bodemmatrix. De poriën van de bodemmatrix doen echter slechts in zeer beperkte mate mee als het gaat om de stroming door de macroporiën. In Figuur 3.5 is te zien dat het aandeel macroporiën gemiddeld slechts 3% is van het grondvolume, tegenover 42% voor de poriën in de bodemmatrix. Uit de onderdompeling van grondmonsters voor vane proeven (Paragraaf 3.5) blijkt dat in één à zes uur gemiddeld slechts 7% van het grondvolume wordt gevuld met water bij een poriënvolume van 45% van het grondvolume. Op basis hiervan zijn de waarden voor e (-) naar beneden bijgesteld. De samenvatting van de parameters voor 1D PlaxFlow staan in Tabel 4.3. Voor zand bestaat geen onderscheid tussen macroporiën en poriën in de bodemmatrix. Hier zijn de door Alterra gevonden waarden gebruikt. Dit heeft geresulteerd in de lijn 'k-sat macro – lage e' in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 PlaxFlow resultaat bij k_{sat} (m/s) voor macroporiën en voor bodemmatrix uitgezet tegen de meting van buisinfiltatieproef 5

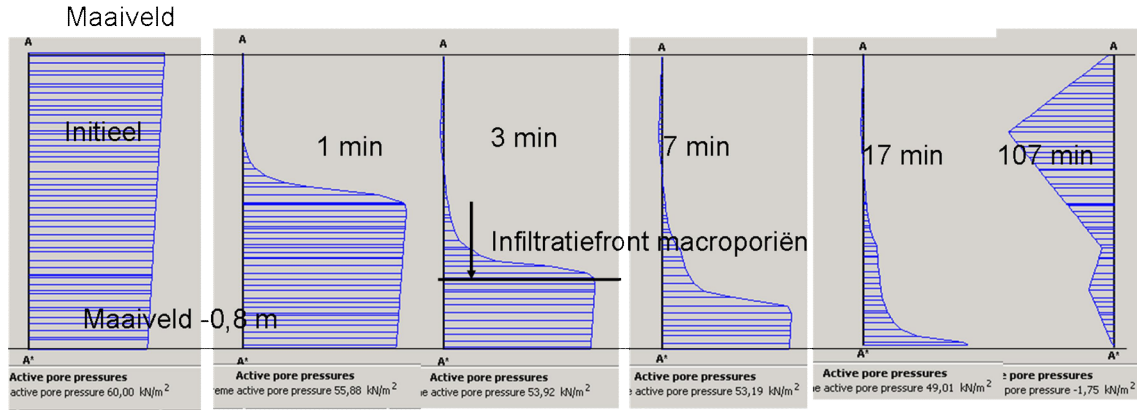
naam	diepte (cm)	k_{sat} (m/s)	e (-)	S_{res} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_i (-)
wortelzone	0-8	1.4E-4	0.176 (15% macroporiën)	0	1.383	1.06	0.5
wortelzone	8-20	1.4E-4	0.075 (7% macroporiën)	0	1.383	1.06	0.5
kleilaag	20-50	1.6E-5	0.03 (3% macroporiën)	0.138	2.203	1.55	-1.3
Zandlaag	50-61	1.9E-5	0.46 (31% poriën)	0.032	4.645	1.33	-1.0
kalibratielaag	61-76	1.9E-5	0.46 (31% poriën)	0.032	4.645	1.33	-1.0

Tabel 4.3 Van Genuchten parameters locatie IM tbv PlaxFlow

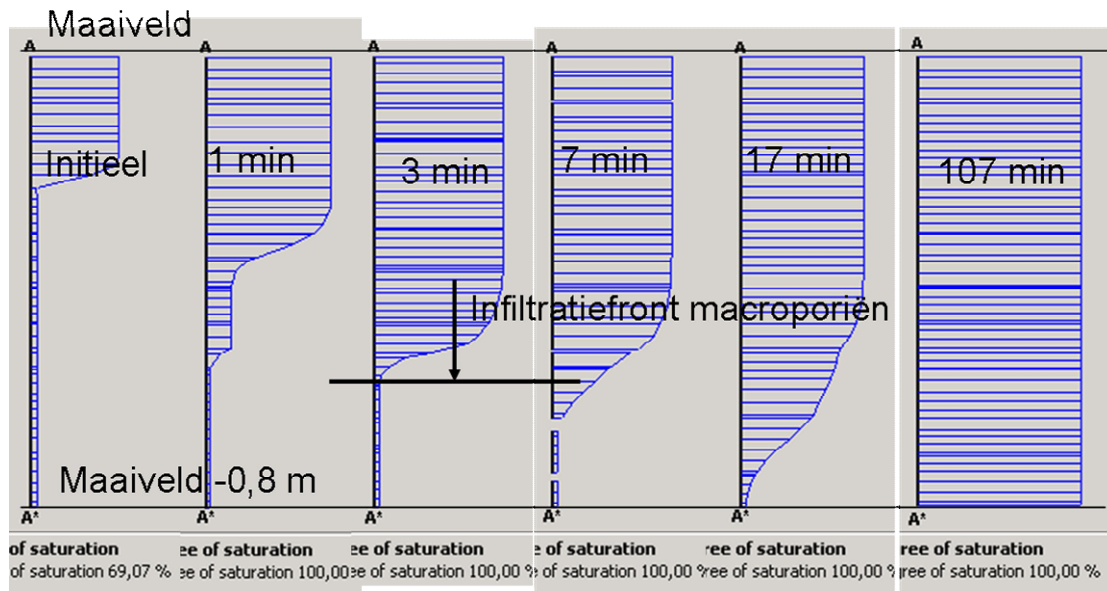
4.1.4 Resultaten 1D PlaxFlow berekening

De rekenresultaten ten aanzien van het narekenen van de buisinfiltatieproef 5 staat in Figuur 4.2 (lijn lijn 'k-sat macro – lage e'). In de onderstaande figuren zijn de waterdruk en de verzadiging op enkele tijdstippen gegeven voor de parameterset uit Tabel 4.3.

Waterspanning (kPa) (LET OP SCHAAL VARIEERT)



Verzadiging (vol. water/ vol. poriën in %)



Figuur 4.3 Waterspanning (kPa) en verzadiging in grondkolom na 1, 3, 7, 17 en 107 min na aanvang infiltratie

De figuur toont de voortgang van het infiltratiefront in de macroporiën in de grondkolom. Na circa 25 minuten bereikt het front de onderzijde van de grondkolom, waarna een stationaire grondwaterstroming ontstaat. Deze situatie is niet meer in overeenstemming met de buisinfiltatieproef.

4.1.5 Schematisatie bekledingslaag

Voor de 2D modellering met PlaxFlow is de kleilaag geschematiseerd als één grondlaag. De verzadigde doorlatendheid van de hele kleilaag (K) is berekend met de formule:

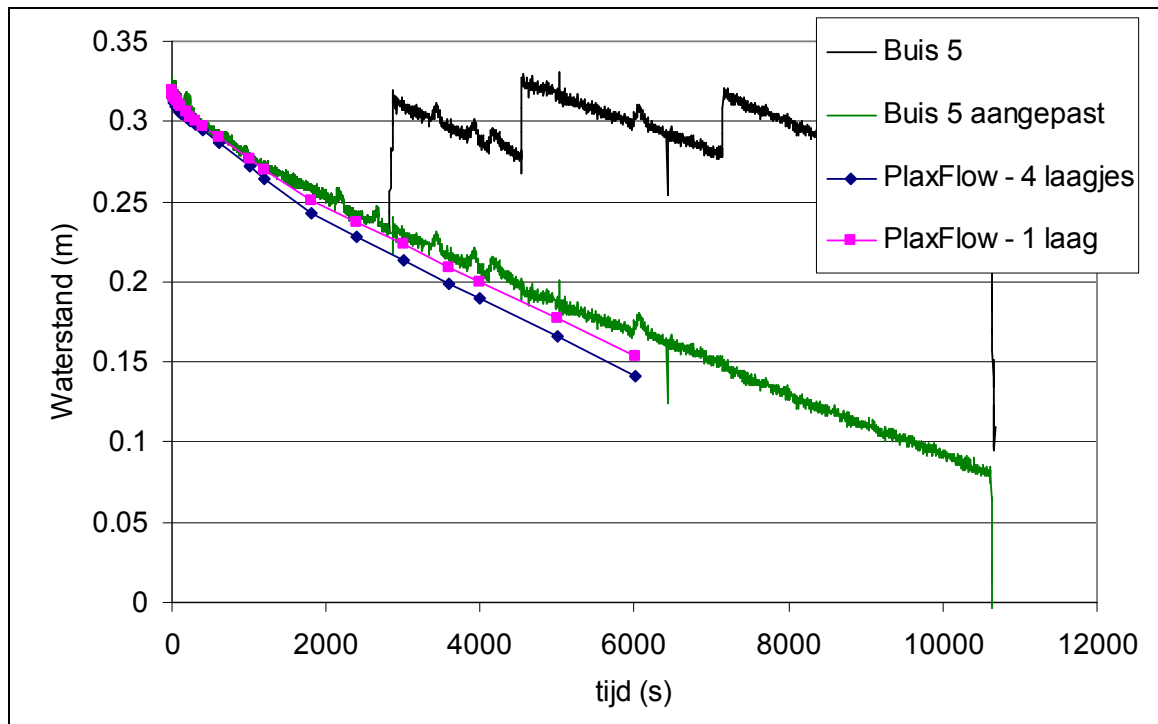
$$K = \frac{dK_1 K_2 K_3}{d_1 K_2 K_3 + d_2 K_1 K_3 + d_3 K_1 K_2},$$

waarin de subscripten staan voor de verschillende laagjes. Het resultaat van deze berekening komt tevens overeen met wat gemiddeld uit de buisinfiltatieproeven is gekomen als langdurige infiltratiesnelheid. De overige parameters zijn evenredig naar laagdikte gemiddeld. De resultaten staan in Tabel 4.4.

naam	diepte (cm)	k_{sat} (m/s)	e (-)	S_{res} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_i (-)
kleibekleding	0-60	2.4e-5	0.064 (6% poriën)	0.0736	2.37	1.35	-0.65

Tabel 4.4 Van Genuchten parameters kleibekleding

Het effect van de middeling van de kleilaagjes tot één laag is gecontroleerd door de infiltratieproef buis-5 na te rekenen. Het resultaat staat in Figuur 4.4. De schematisatie tot één laag leidt, in dit geval, zelfs tot een iets beter resultaat dan indien onderscheid wordt gemaakt tussen sublaagjes. De oorzaak van dit kleine verschil kan zijn dat de parameters van het niet-lineaire infiltratieproces wel lineair zijn gemiddeld.



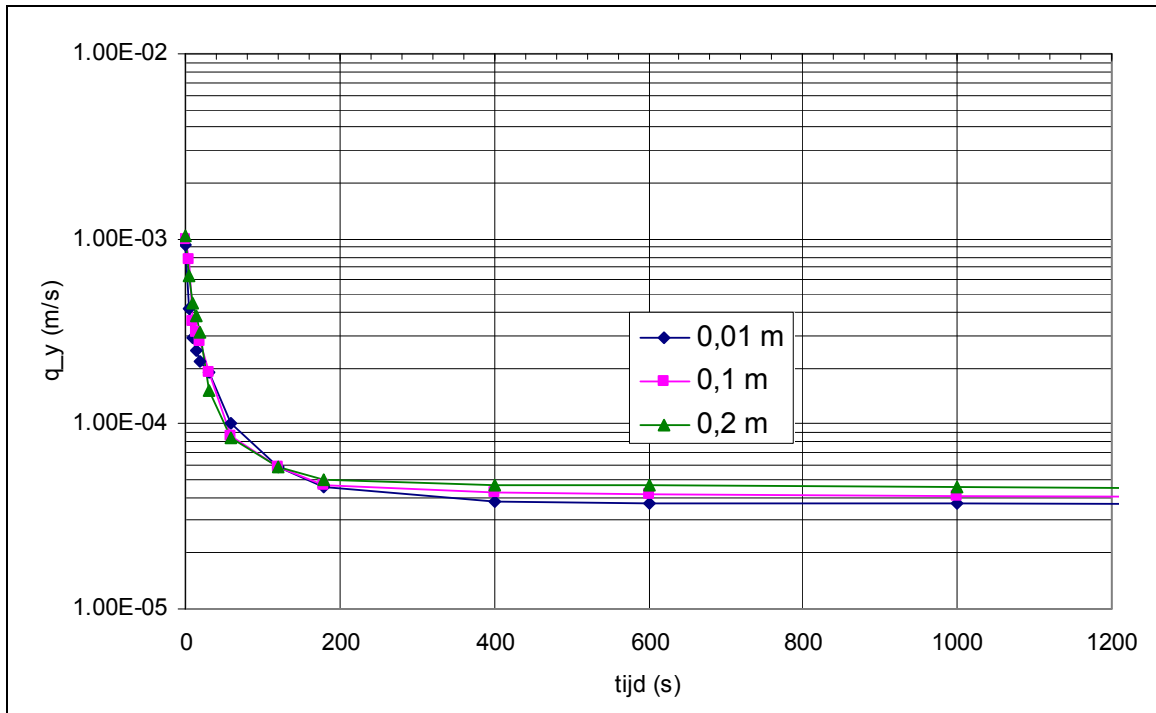
Figuur 4.4 Modelleringsbuisinfiltatietest 5 met PlaxFlow – effect schematisatie tot één bekledingslaag

4.1.6 Effect waterlaagdikte op infiltratiesnelheid

De waterlaag op het talud als gevolg van golfoverslag varieert sterk. Op de kruin van de dijk heeft de waterlaagdikte een zaagtandvorm: de waterlaag neemt bij een overslaggebeurtenis relatief snel toe en relatief langzaam af. De waterlaagdikte op het talud zorgt voor een waterdruk op het taludoppervlak en heeft daarmee invloed op de infiltratiesnelheid.

Uit de buisinfiltatieproeven blijkt geen correlatie tussen de waterlaagdikte en de infiltratiesnelheid. In de infiltratiebuis is echter de waterlaag constant op 15 à 20 cm gehouden

door de infiltratiebuis telkens bij te vullen. Met behulp van een 1D PlaxFlow berekening is gekeken naar de invloed van de waterlaagdikte op de hoeveelheid infiltrerend water. Er zijn berekeningen gemaakt met een waterlaag van 1 cm, 10 cm en 20 cm. De resultaten staan in Figuur 4.5.



Figuur 4.5 Effect waterlaagdikte (1, 10 en 20 cm) op infiltratiesnelheid (m/s)

De invloed van de waterlaagdikte op de infiltratiesnelheid is gering voor de bandbreedte van waterlaagdiktes die wordt verwacht. Bij verdere berekeningen is geen rekening gehouden met de variatie van de waterlaagdikte als gevolg van golfoverslag. Er is uitgegaan van een zogenaamde $p=0$ (kPa) randvoorwaarde, wat inhoudt dat er geen druk op het talud aanwezig is, maar dat er wel ongelimiteerd wateraanbod aanwezig is.

4.2 2D PlaxFlow berekening golfoverslag

4.2.1 Parameters en initiële situatie

Voor de bepaling van de parameters en dijkopbouw wordt verwezen naar Hoofdstuk 3 en paragraaf 4.1. Onderstaande tabel geeft de waarden waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd.

naam	k_{sat} (m/s)	e (-)	S_{res} (-)	g_n (-)	g_a (1/m)	g_i (-)
kleibekleding	2.4e-5	0.064 (6% poriën)	0.0736	2.37	1.35	-0.65
zandkern	1.9e-5	0.46 (32% poriën)	0.032	4.65	1.33	-1.0
oude dijk/ oude toplaag	0.7e-6	0.68 (40% poriën)	PlaxFlow standard data set – 'coarse' 10% lutum			

Tabel 4.5 Van Genuchten parameters 2D PlaxFlow modellering

De initiële situatie is berekend door de volgende randvoorwaarden aan te houden:

- geen neerslag,

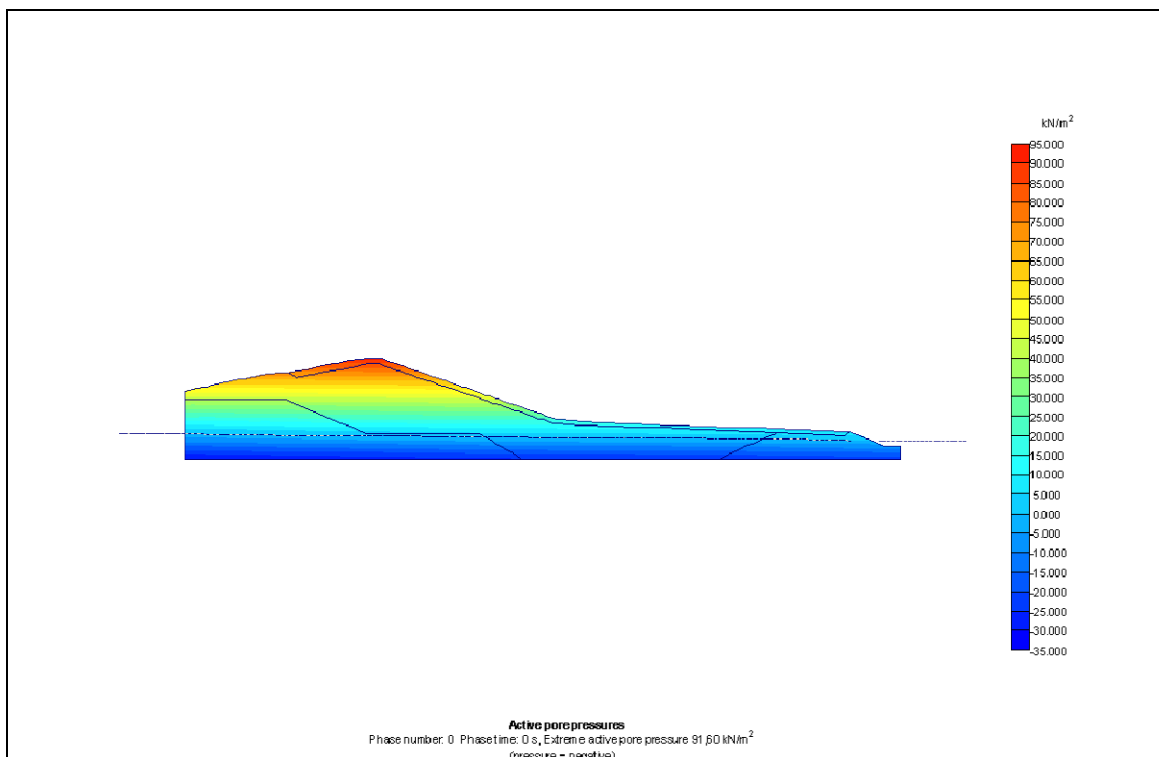
- geen verdamping,
- buitenwaterstand Waddenzee NAP +0 m,
- polderpeil NAP -0,85 m
- gesloten onderzijde van het model op de diepte van de eerste kleilaag.

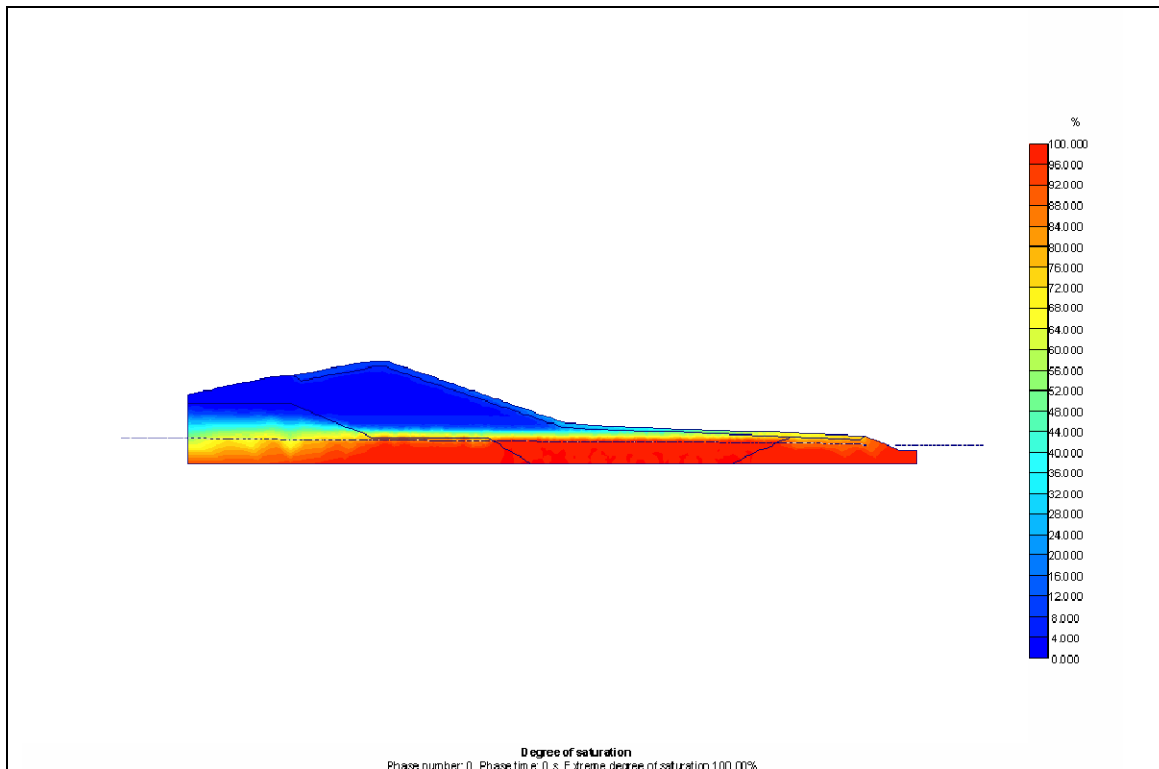
De buitenwaterstand op de Waddenzee is constant op NAP +0,0 m aangehouden. Dit is de gemiddelde waterstand. De invoed van het getij op de waterspanning in de zandkern onder het binnentalud is verwaarloosbaar. De indringingslengte L (m) bij indringing met freatische berging

kan worden geschat met de formule $L = \sqrt{\frac{2TkD}{n}}$, waarin T de periode van het getij (44700 s),

k de doorlatendheid van het zand (2×10^{-5} m/s), D de dikte van het zandpakket plus de amplitude van de waterstandverhoging (3 m) en n de porositeit (0.2). Dit resulteert in een indringingslengte van circa 5 m. Het getij is daarom niet meegenomen bij de randvoorwaarden aan de buitenzijde van de dijk.

Deze randvoorwaarde geven de volgende drukverdeling en initiële verzadiging.





Figuur 4.6 Initiële situatie

4.2.2 Randvoorwaarden golfoverslagproeven

De volgende proevenserie met wachttijden is gemodelleerd:

- 0,1 l/s per m gedurende 6 uur (10x versneld uitgevoerd = 36 min)
- Wachten tot volgende dag
- 1 l/s per m gedurende 6 uur
- Wachten tot volgende dag
- 10 l/s per m gedurende 6 uur
- Wachten tot volgende dag
- 30 l/s per m gedurende 6 uur
- Wachten tot volgende dag
- 50 l/s per m gedurende 6 uur
- Wachten tot volgende dag
- 75 l/s per m gedurende 6 uur
- 2 dagen wachten

Gedurende de wachttijden wordt op het talud een free seepage rand gemodelleerd. Dit betekent dat er geen infiltratie of verdamping is, maar dat er eventueel wel vrij water kan uitstromen.

De infiltratie op het talud is gemodelleerd door een zogenaamde druk = 0 rand op te leggen. Dit betekent dat er een (onbeperkt) wateraanbod op het talud aanwezig is, met een druk gelijk aan 0 kPa. Deze randvoorwaarde is opgelegd op de kruin, het binnentalud en de berm tot aan de teensloot. Zoals eerder beredeneerd in paragraaf 4.1.6 heeft de waterlaagdikte op het talud weinig invloed op de infiltratiesnelheid. De variatie hierin zal daarom niet verder worden meegenomen.

Voor de berekening van infiltratie is het vooral belangrijk gedurende hoeveel tijd er wateraanbod op het talud aanwezig is. De aanbodtijd is bepaald met de formule uit het VTV:

$$t_{sr} = \left(1 - \frac{z}{z_q}\right) t_s, \text{ waarin } t_{sr} \text{ (s) de tijd is dat het talud nat is, } t_s \text{ (s) de stormduur, in dit geval 6}$$

uur, z (m) de kruinhoogte boven de waterstand en z_q (m) de fictieve kruinhoogte boven de waterstand, waarbij overslagdebiet van 0,1 l/s per m zou gelden. Bij een overslagdebiet van 0,1 l/s per m blijft het talud droog en bij een kruinhoogte gelijk aan de waterstand is het talud 100% van de tijd nat.

De formule is, in elk geval, bij de ondergrens (0,1 l/s per m) en bij de bovengrens (z nadert 0 m) onnauwkeurig. Bij de ondergrens van 0,1 l/s per m slaan er toch enkele, in dit geval 9, golven over de dijk. Het wateraanbod is aldus niet helemaal gelijk aan nul. Omdat de proef van 0,1 l/s per m 10x versneld wordt uitgevoerd zou kunnen worden uitgegaan van een stormduur van 36 min bij 1 l/s per m. Dit resulteert in een wateraanbod gedurende 518 s. Dit zou betekenen dat elke golf ongeveer 60 s voor wateraanbod zorgt, hetgeen onrealistisch lang is. Voor de proef van 0,1 l/s per m is ervan uitgegaan dat de 9 golven een wateraanbod geven dat equivalent is aan 60 s continu aanbod. Volgens de formules van Bosman (2007) zouden de 9 golven een overslagtijd op de kruin hebben van 27 s. Omdat zelfs een heel dun waterlaagje, tussen de graspollen in, niet wordt meegenomen door deze formule is gekozen voor 60 s.

Bij hoge gemiddelde overslagdebieten geeft de formule een onderschatting van het wateraanbod. Eerder is waargenomen dat bij een gemiddeld overslagdebiet van 50 l/s per m nagenoeg 100% van de tijd een waterlaagje aanwezig is, terwijl de formule 65% geeft. De formule van Bosman voor de overslagtijd op de kruin leidt eveneens tot een onderschatting van de tijd dat het talud nat is. Voor 50 l/s per m wordt op basis van de stuurlijst voor de Boonweg bijvoorbeeld een overstrooftijd van 8% berekend. Voor dit doel zijn de formules van Bosman op deze manier niet bruikbaar. Overigens is dit niet verrassend, omdat de formules niet voor dit doel zijn bedacht.

De formule uit het VTV en de aanname over het wateraanbod bij 0,1 l/s per m heeft geleid tot de volgende randvoorwaarde op de kruin, het binnentalud en de berm van de dijk.

Activiteit	Randvoorwaarde op kruin, binnentalud en berm
0,1 l/s per m gedurende 6 uur (10x versneld uitgevoerd = 36 min)	60 s druk is 0 kPa
Wachten tot volgende dag	24 uur free seepage
1 l/s per m gedurende 6 uur	5200 s (1.4 uur) druk is 0 kPa
Wachten tot volgende dag	24-1.4 = 22.6 uur free seepage
10 l/s per m gedurende 6 uur	10460 s (2.9 uur) druk is 0 kPa
Wachten tot volgende dag	24-2.9 = 21.1 uur free seepage
30 l/s per m gedurende 6 uur	12900 s (3.6 uur) druk is 0 kPa
Wachten tot volgende dag	24-3.6 = 20.4 uur free seepage
50 l/s per m gedurende 6 uur	14000 s (3.9 uur) druk is 0 kPa
Wachten tot volgende dag	24-3.9 = 20.1 uur free seepage
75 l/s per m gedurende 6 uur	15000 s (4.2 uur) druk is 0 kPa
2 dagen wachten	48 uur free seepage

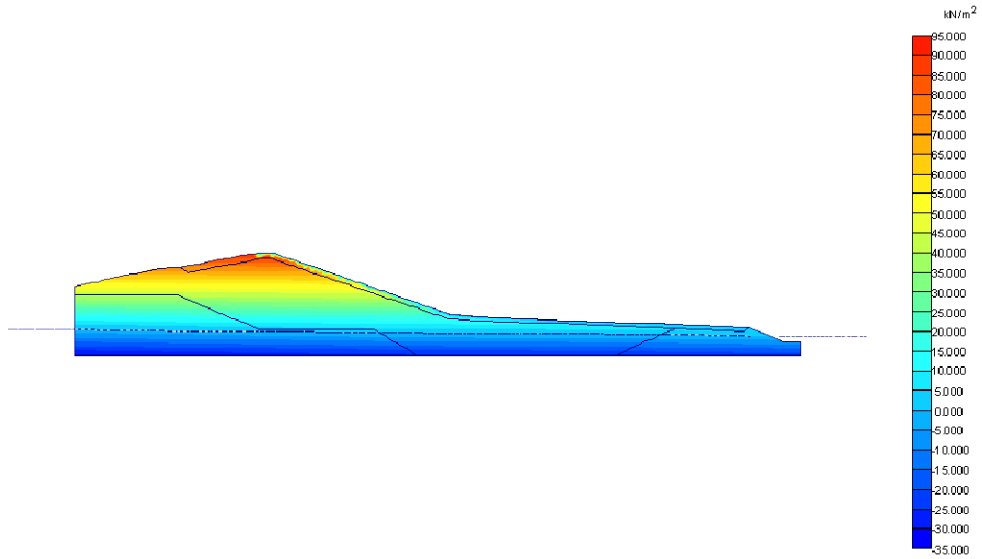
Aan het einde van de reeks is gedurende 48 uur een free seepage rand opgelegd om te kijken hoe snel de opgebouwde waterspanning aan het einde van de proef weer afneemt.

4.2.3 Rekenresultaten golfoverslagproeven

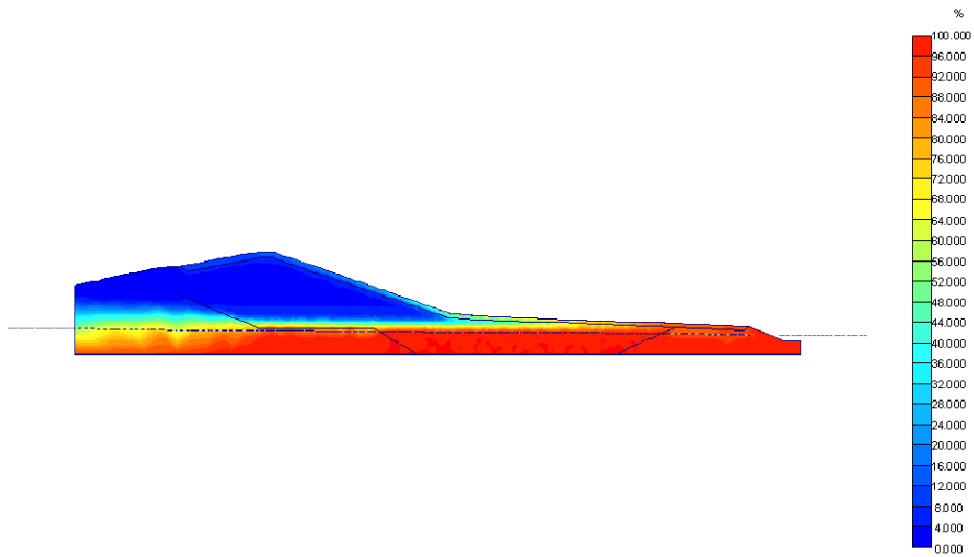
De berekeningen zijn gemaakt met een 2D model. Door de beperkte breedte van de teststrook zijn de berekeningen onnauwkeurig voor de voorspelling van de waterspanningen in de zandkern, omdat water dan zijdelings kan afstromen. Voor de voorspelling van waterspanningen in de kleilaag wordt weinig effect van de rand verwacht (zie paragraaf 4.3.1).

Per fase zijn de waterspanning, de mate van verzadiging en de stroomrichting gegeven.

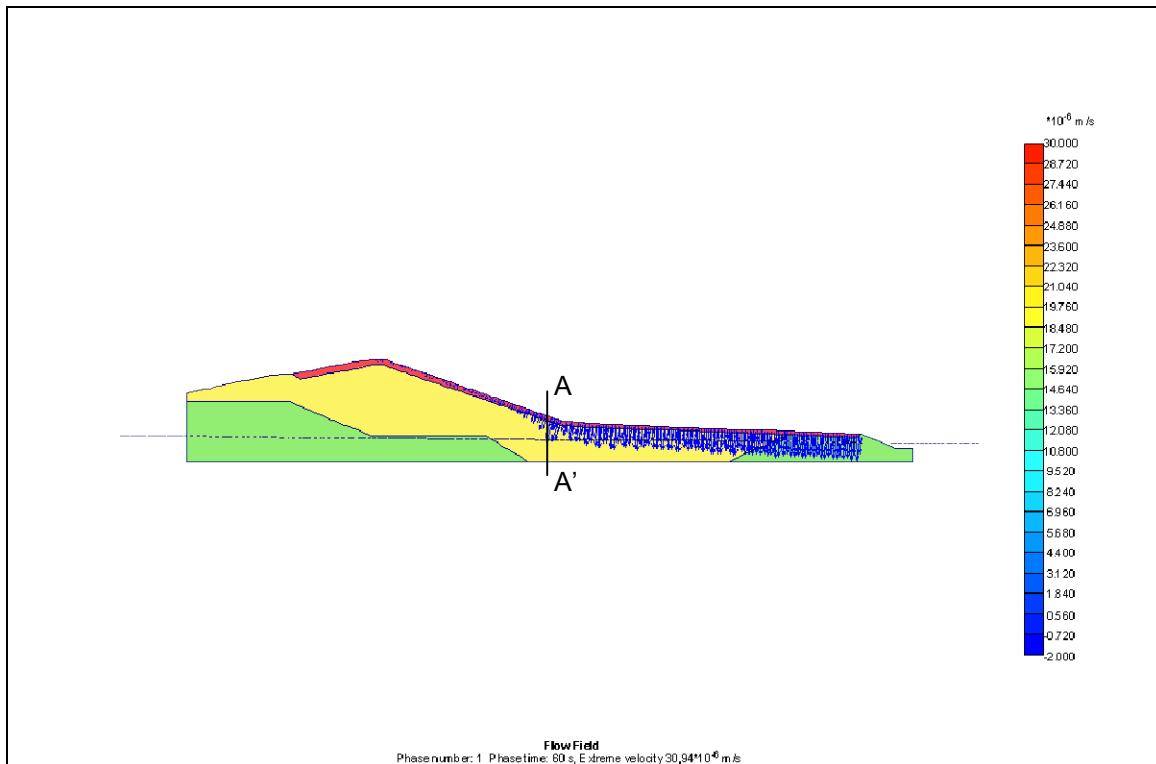
0,1 l/s per m



Active pore pressures
Phase number: 1 Phase time: 60 s, Extreme active pore pressure 90,83 kN/m²
(pressure = negative)

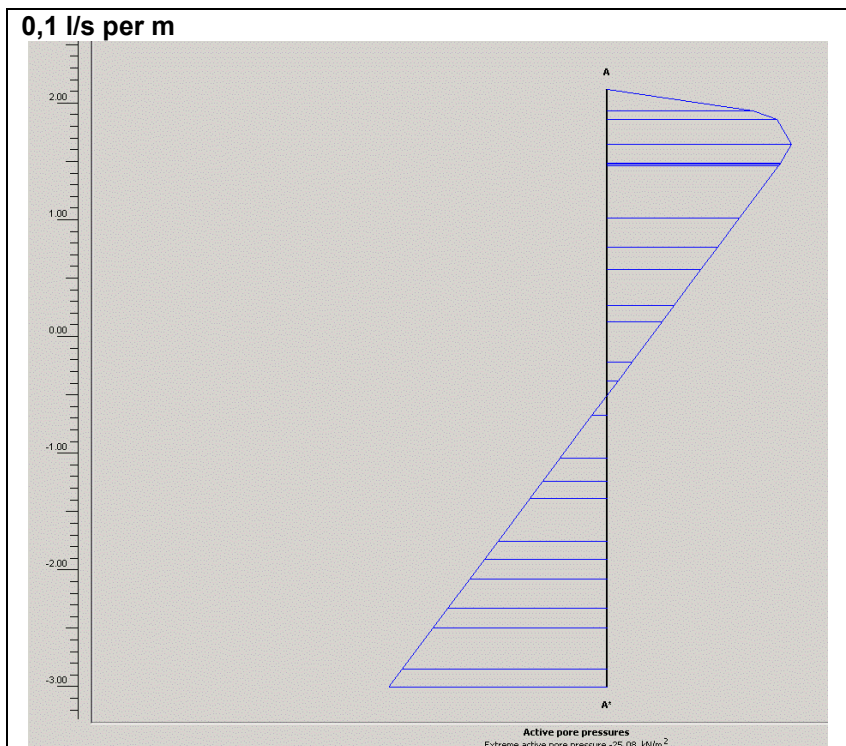


Degree of saturation
Phase number: 1 Phase time: 60 s, Extreme degree of saturation 100,00%



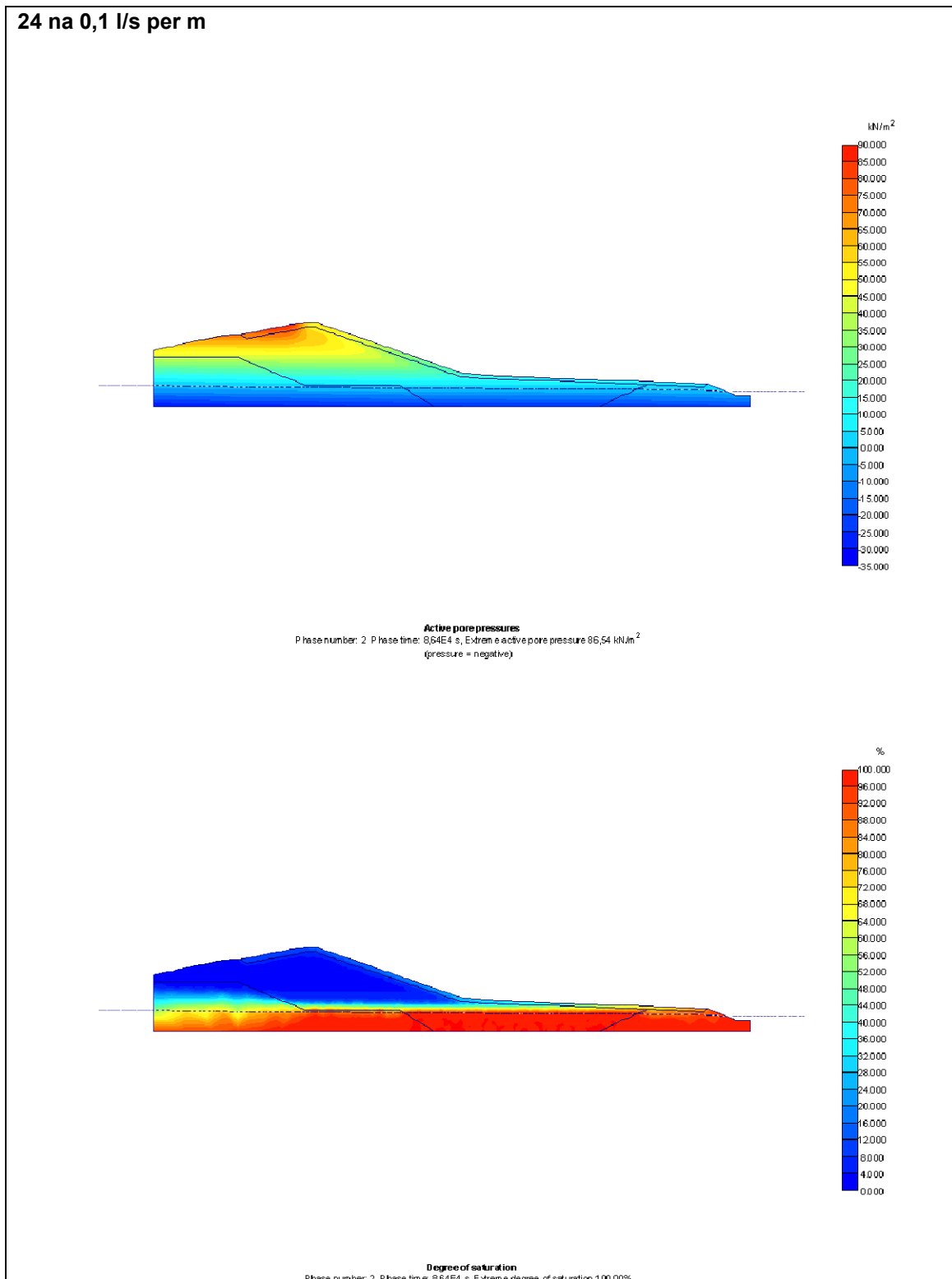
Figuur 4.7 Situatie aan het einde van 0,1 l/s per m proef

Aan het einde van de proefsimulatie is de kleilaag nog niet verzadigd. Door de hogere initiële verzadiging ter plaatse van de berm is hier de relatieve doorlatendheid het grootst en daarmee de infiltratiesnelheid. De waterdruk ter plaatse van de teen (snede A-A' in Figuur 4.7) staat in Figuur 4.8. De waterdruk aan het taludoppervlak is ten opzichte van de initiële situatie afgenomen tot 0 kPa (de randvoorwaarde). Vlak onder het talud is echter nog een aanzienlijke zuigspanning aanwezig.



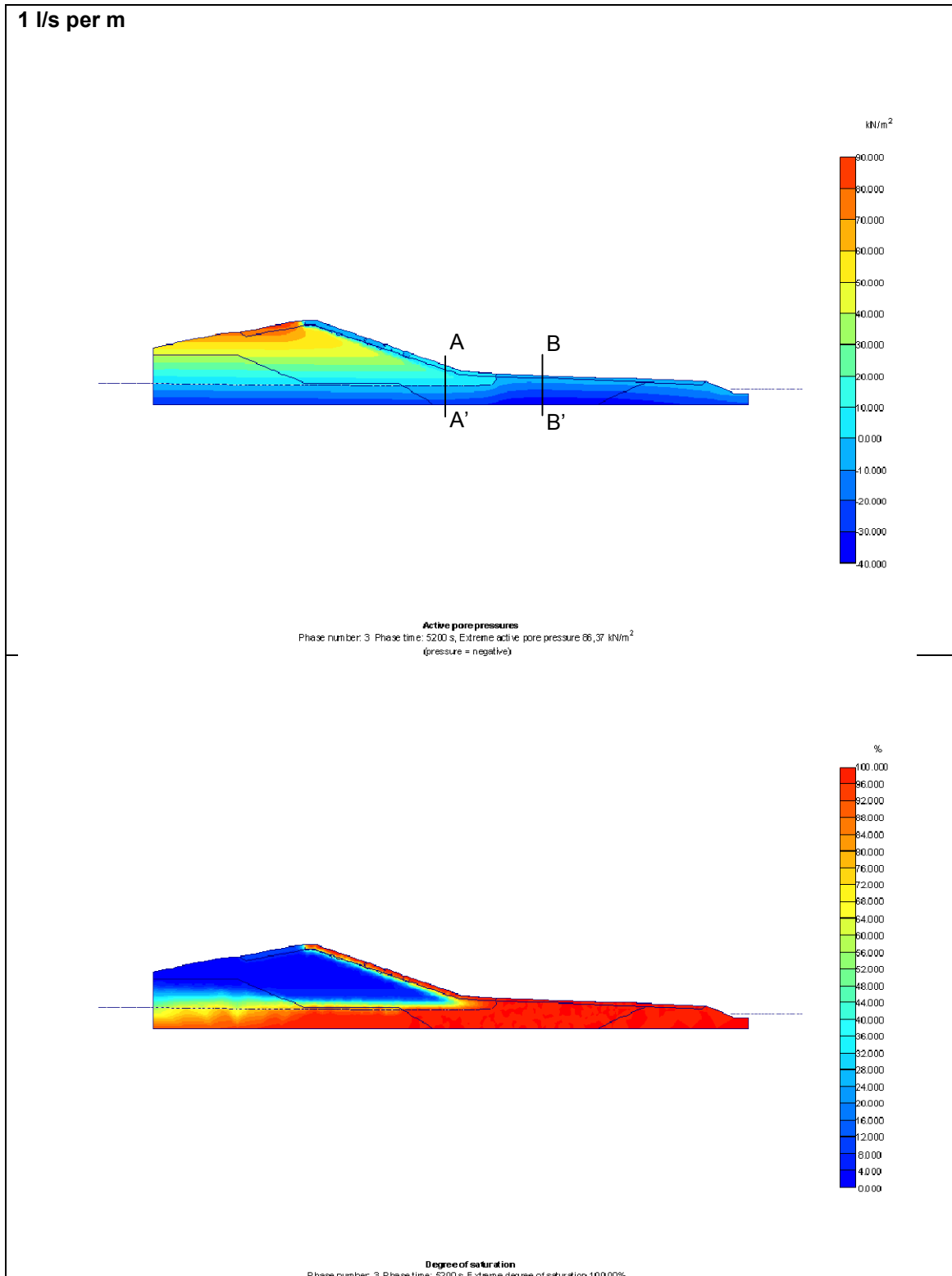
Figuur 4.8 Waterdruk in snede A-A'

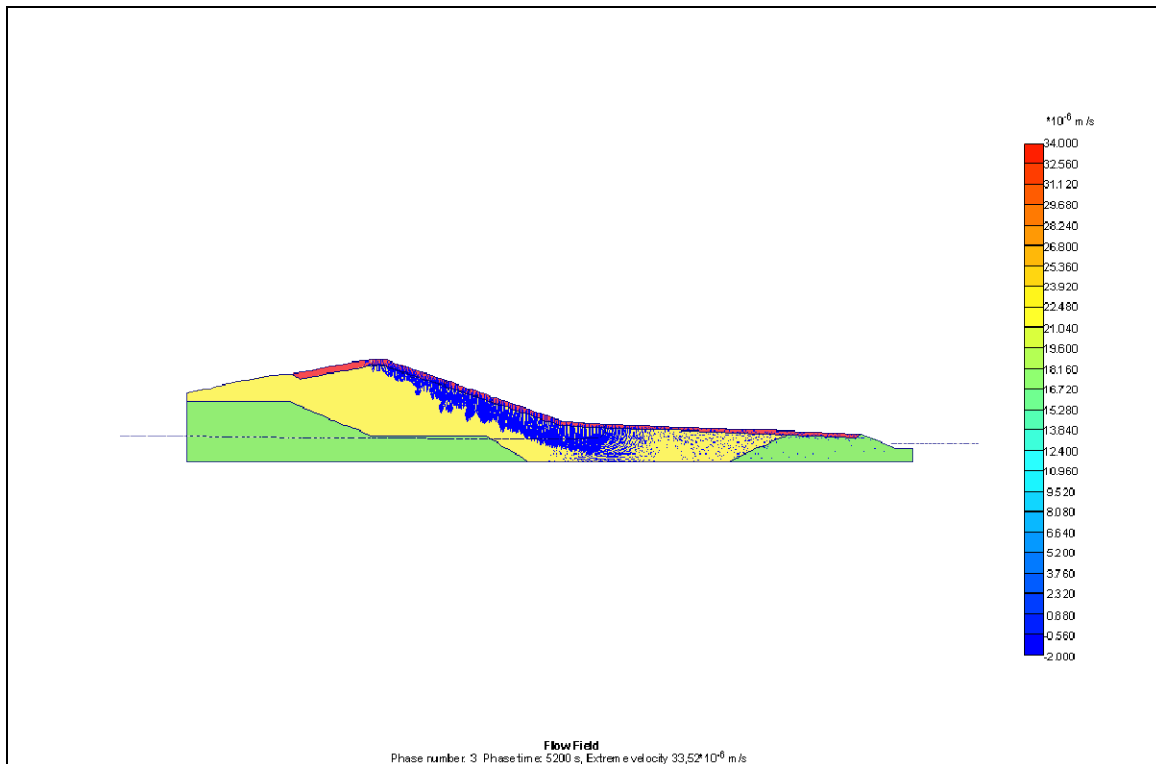
Na een wachtperiode van 24 uur zijn de waterspanningen en de verzadiging afgenomen. Het effect van de voorgaande proef is nog wel zichtbaar. De zuigspanningen zijn kleiner dan in de initiële situatie.



Figuur 4.9 Situatie 24 uur na 0,1 l/s per m proef

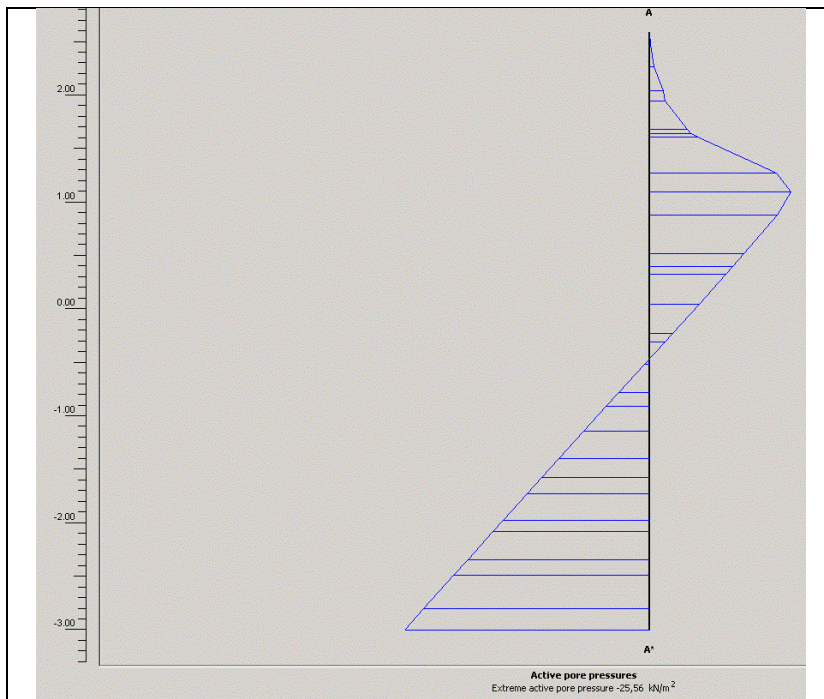
Na de wachtperiode is de 1 l/s per m proef gesimuleerd door de kruin, het binnentalud en de berm gedurende 5200 s een druk = 0 kPa rand te geven. De resultaten staan in Figuur 4.10.

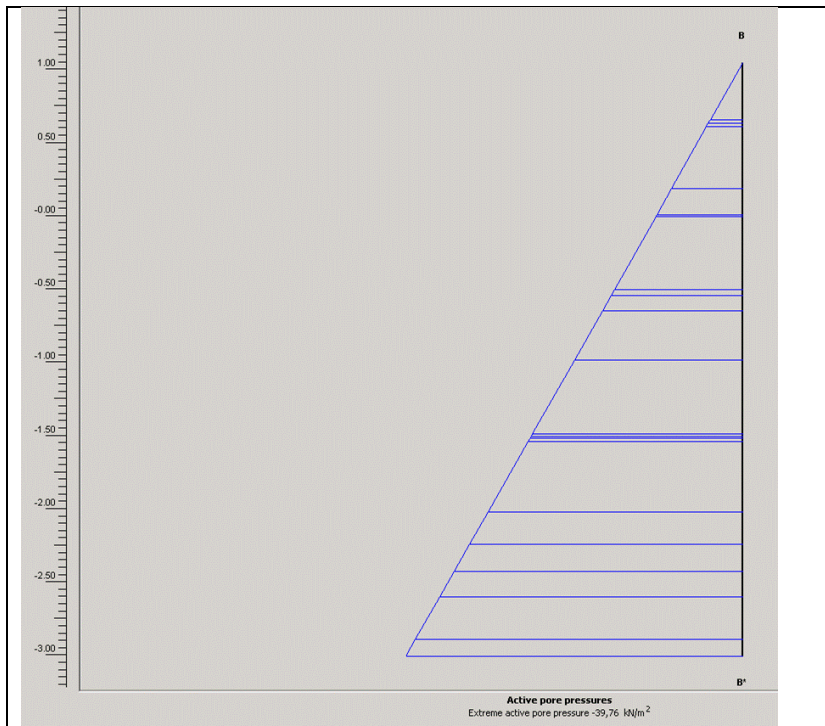




Figuur 4.10 Situatie na 1 l/s per m proef

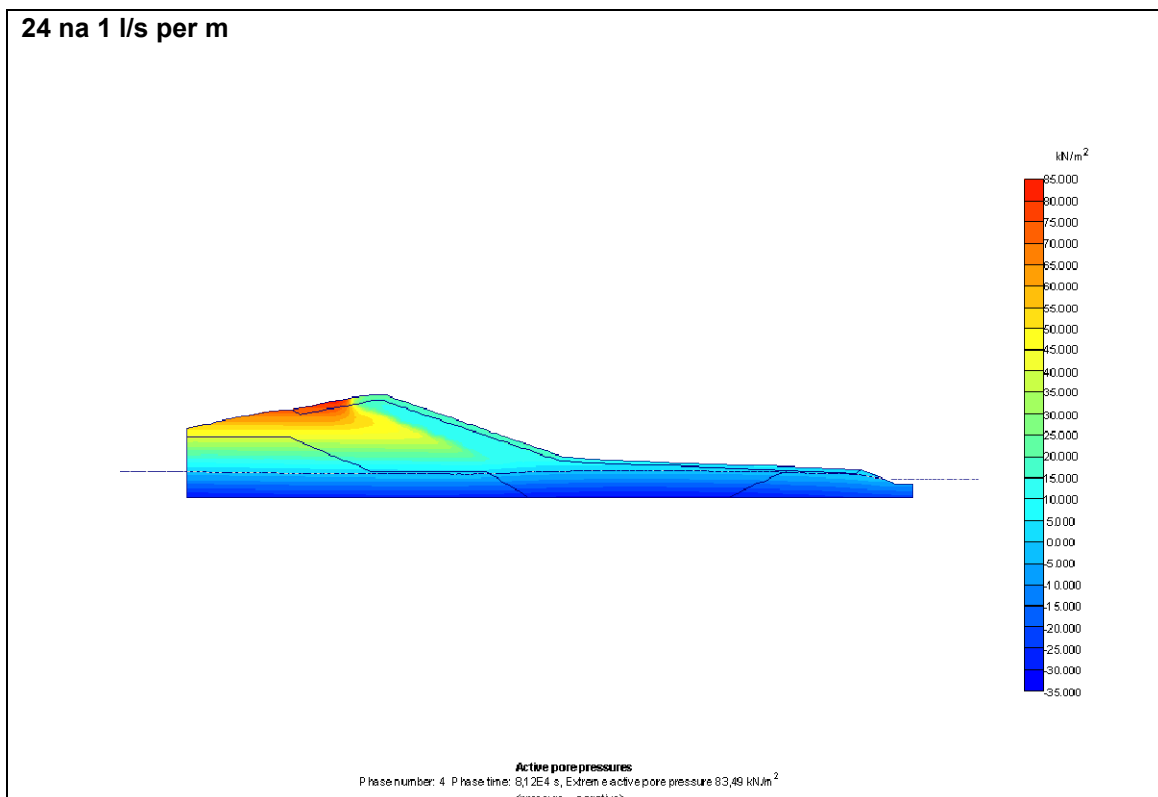
De berm is volledig verzadigd en verdere infiltratie treedt hier nauwelijks meer op. De drukverdeling in de berm is hydrostatisch geworden (snede B-B'). De kleibekleding op het binnentalud is slechts gedeeltelijk verzadigd en infiltratie treedt hier nog wel op. De zuigspanning is afgenomen, maar nog steeds aanwezig (snede A-A') (zie Figuur 4.11).

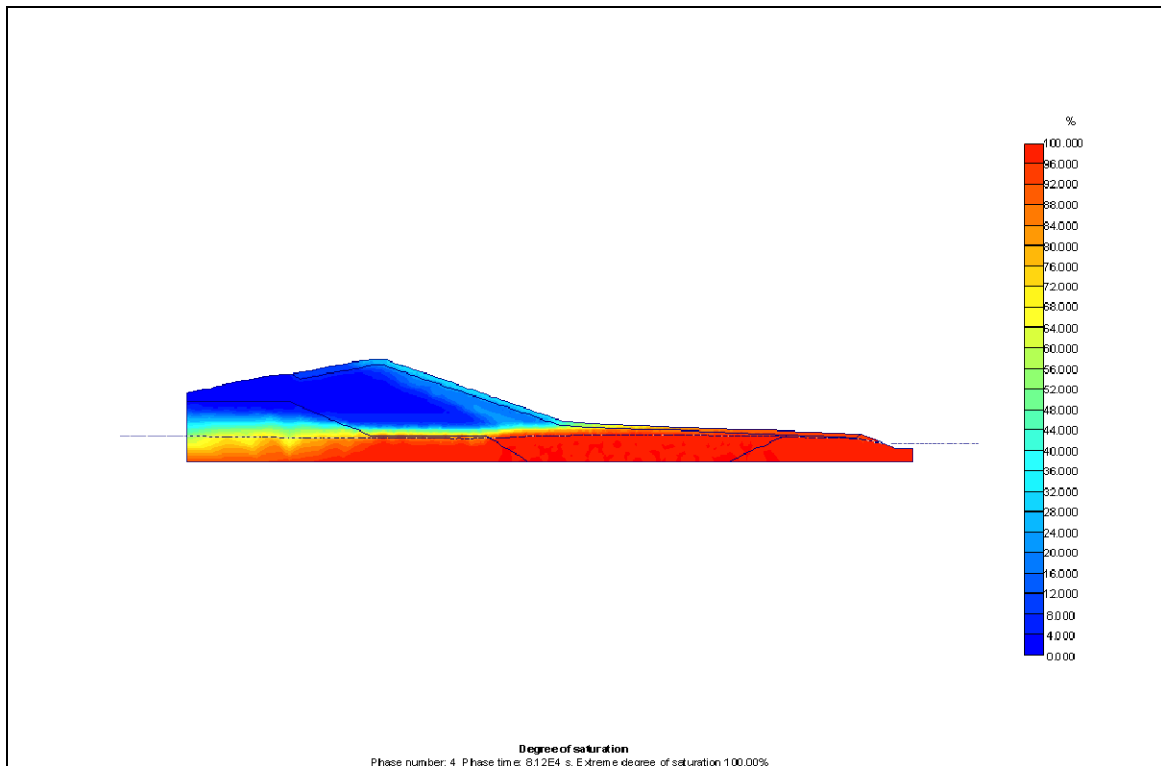




Figuur 4.11 Waterspanning in vertikaal bij teen (A-A') en berm (B-B')

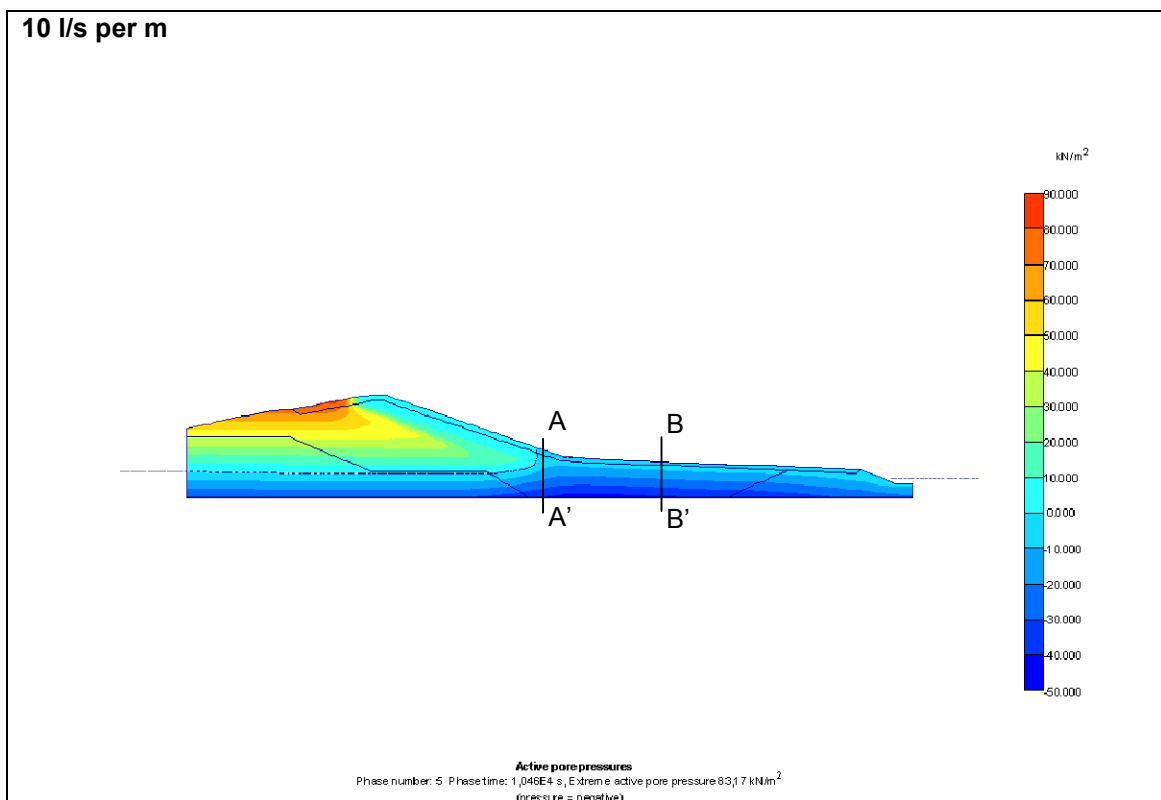
Na een wachtperiode van $24 - 1.4 = 22.6$ uur zijn de waterspanningen en de verzadiging afgenomen. Het effect van de voorgaande proef is nog goed zichtbaar. De zuigspanningen onder het binnentalud zijn beduidend lager. Het freatisch vlak in de berm is ten opzichte van de initiële situatie 0.5 m hoger.

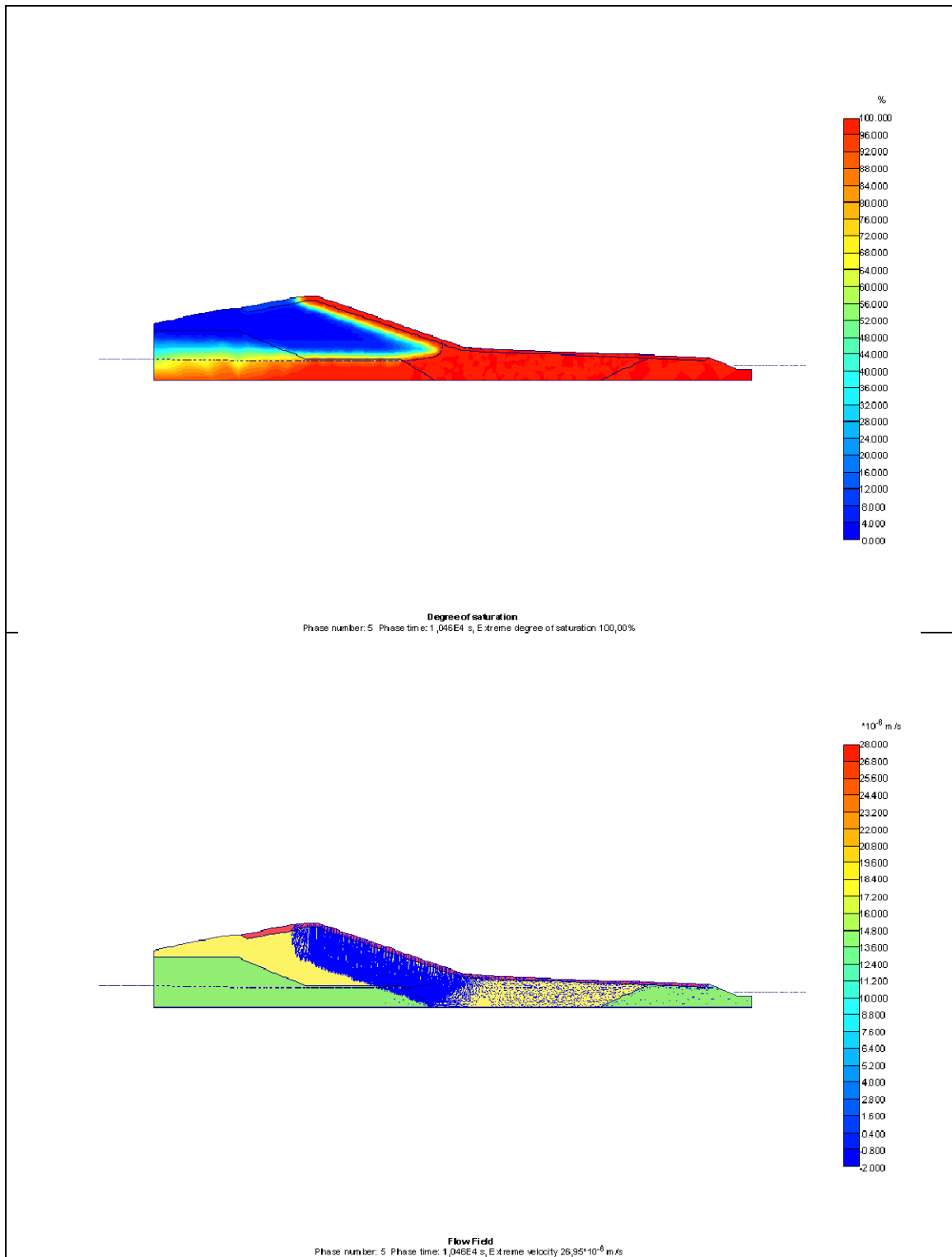




Figuur 4.12 Situatie 22.6 uur na 1 l/s per m proef

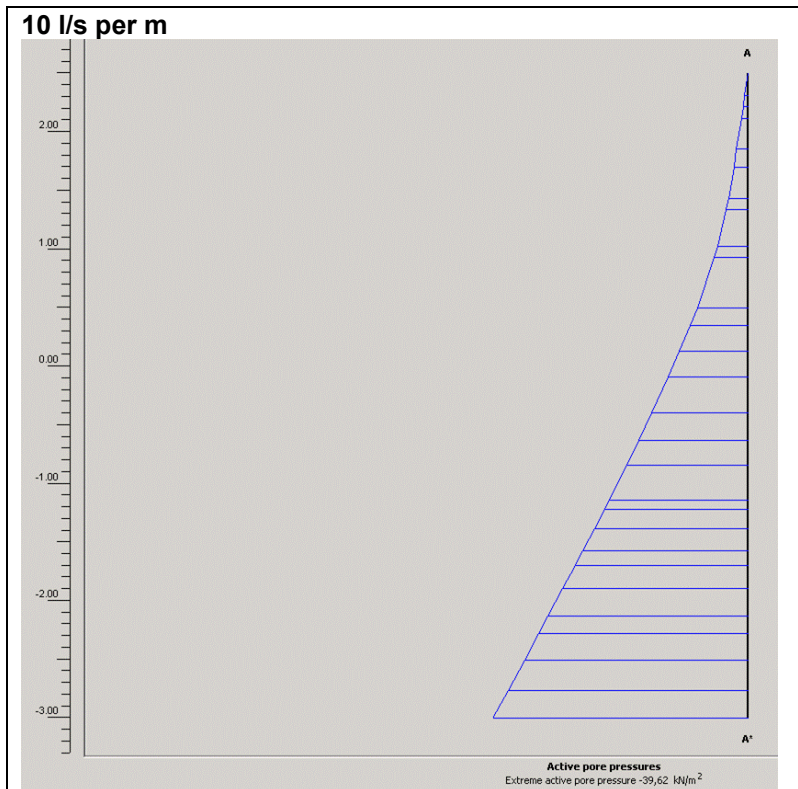
Na de wachtperiode van 22.6 uur is de 10 l/s per m proef gesimuleerd door de kruin, het binnentalud en de berm gedurende 10460 s een druk = 0 kPa rand te geven. De resultaten staan in Figuur 4.13.



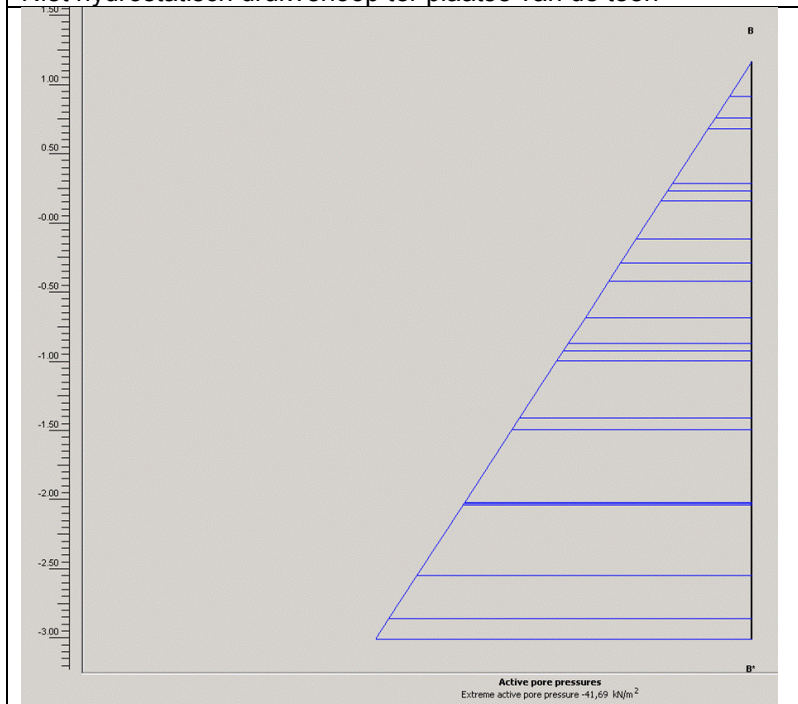


Figuur 4.13 Situatie na 10 l/s per m proef

De berm is volledig verzadigd en verdere infiltratie treedt hier nauwelijks meer op. De drukverdeling in de berm is hydrostatisch (B-B'). Ook de kleibekleding op het binnentalud is geheel verzadigd, maar hier is de drukverdeling nog niet hydrostatisch in verband met de binnenwaarts gerichte grondwaterstroming. De zuigspanning in snede A-A' is volledig verdwenen (zie Figuur 4.14).



Niet hydrostatisch drukverloop ter plaatse van de teen

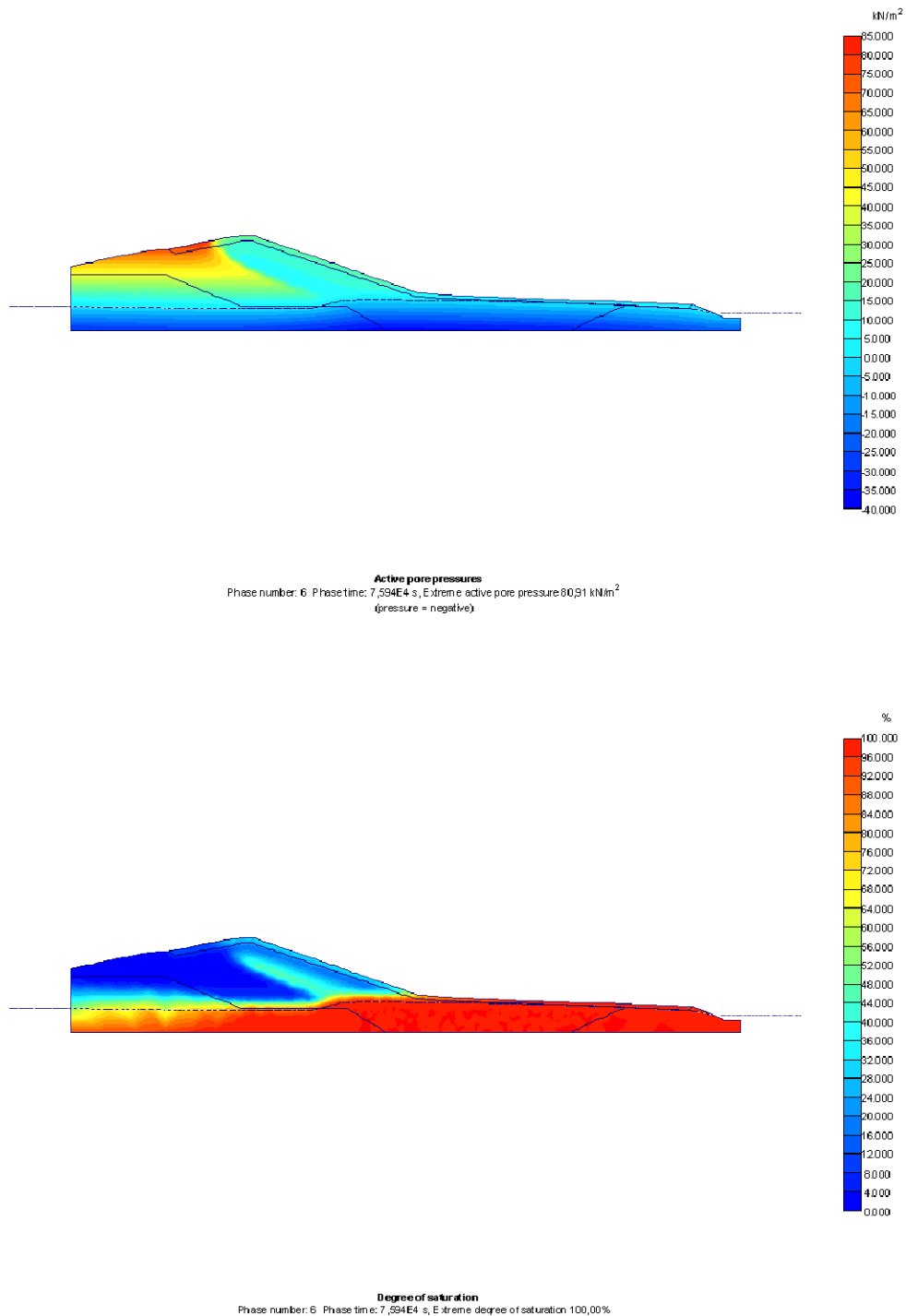


Hydrostatisch drukverloop ter plaatse van de berm

Figuur 4.14 Waterspanning in vertikaal bij teen (A-A') en berm (B-B')

Na een wachtperiode van $24 - 2.9 = 21.1$ uur zijn de waterspanningen en de verzadiging afgenomen. Het freatisch vlak in de berm is ten opzichte van de initiële situatie circ 0.8 m hoger (Figuur 4.15).

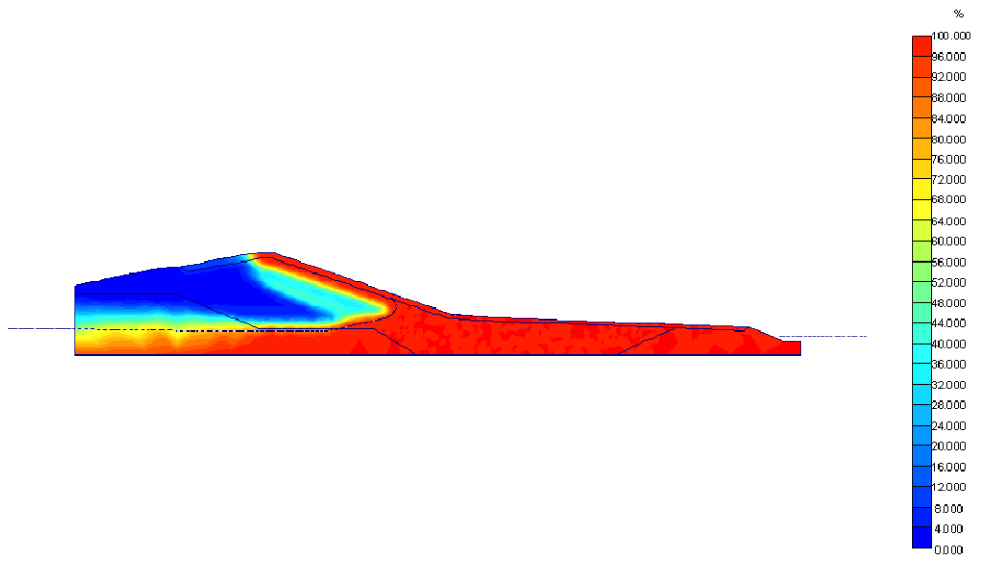
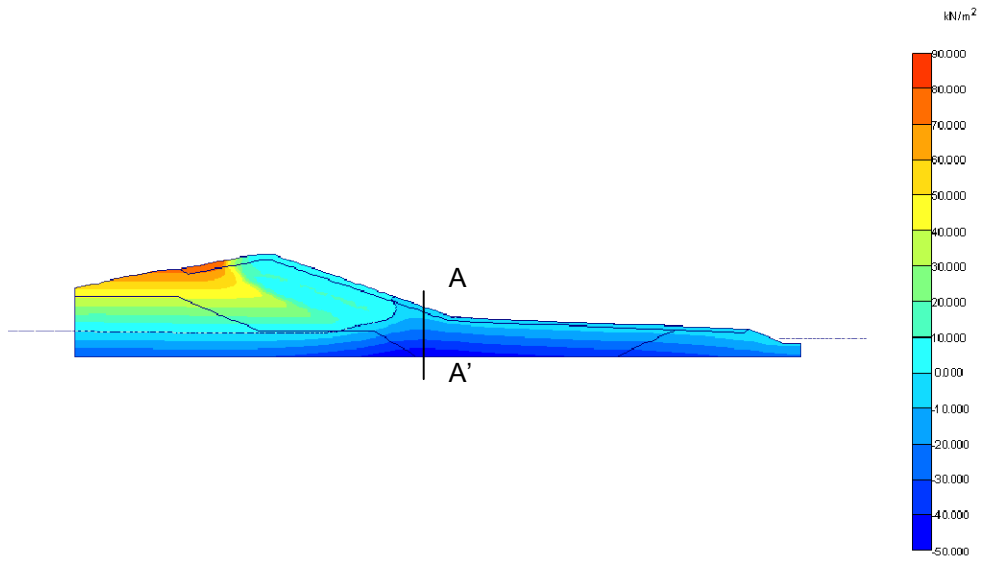
21.1 uur na 10 l/s per m

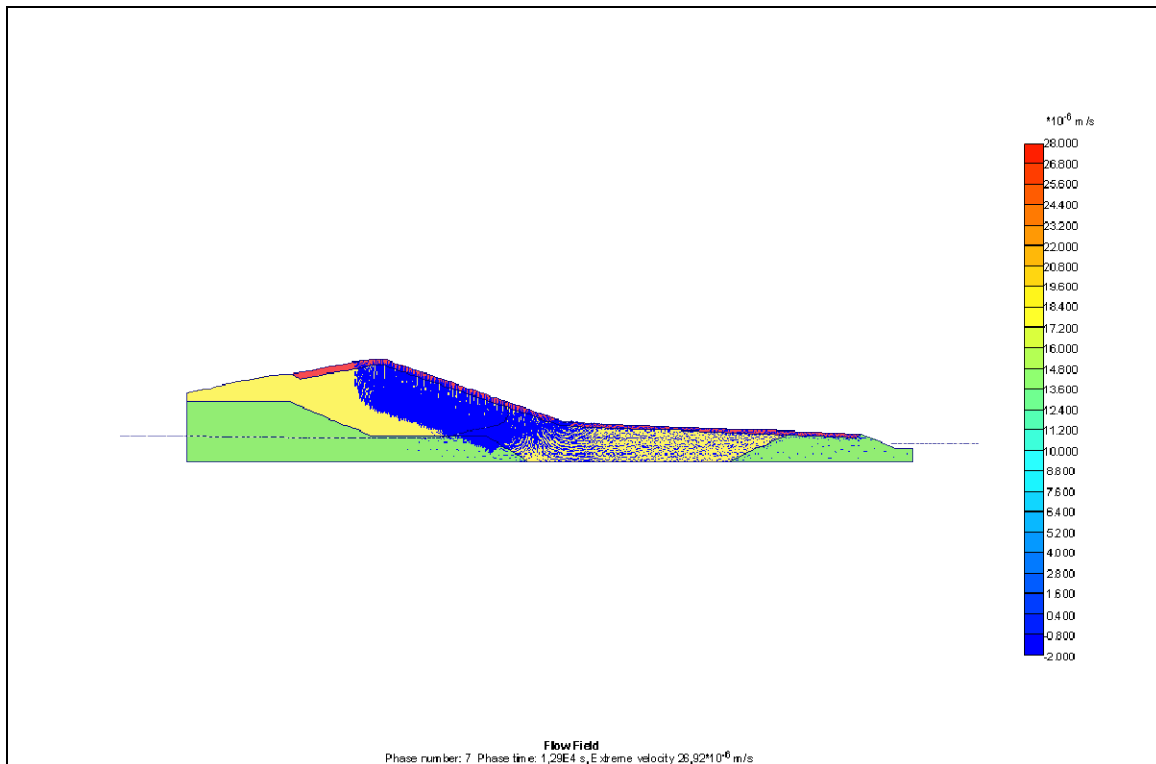


Figuur 4.15 Situatie 21.1 uur na 10 l/s per m proef

Na de wachtperiode wordt de proef van 30 l/s per m gemodelleerd. Hierbij wordt gedurende 12900 s (ca. 3.6 uur) een druk is 0 kPa rand opgelegd op kruin, binnentalud en berm. De dijk is nog gedeeltelijk verzadigd door de proef van de vorige dag. Met name de berm is vrijwel volledig verzadigd aan het begin van de proef. De situatie na de 30 l/s per m proef staat in Figuur 4.16.

30 l/s per m

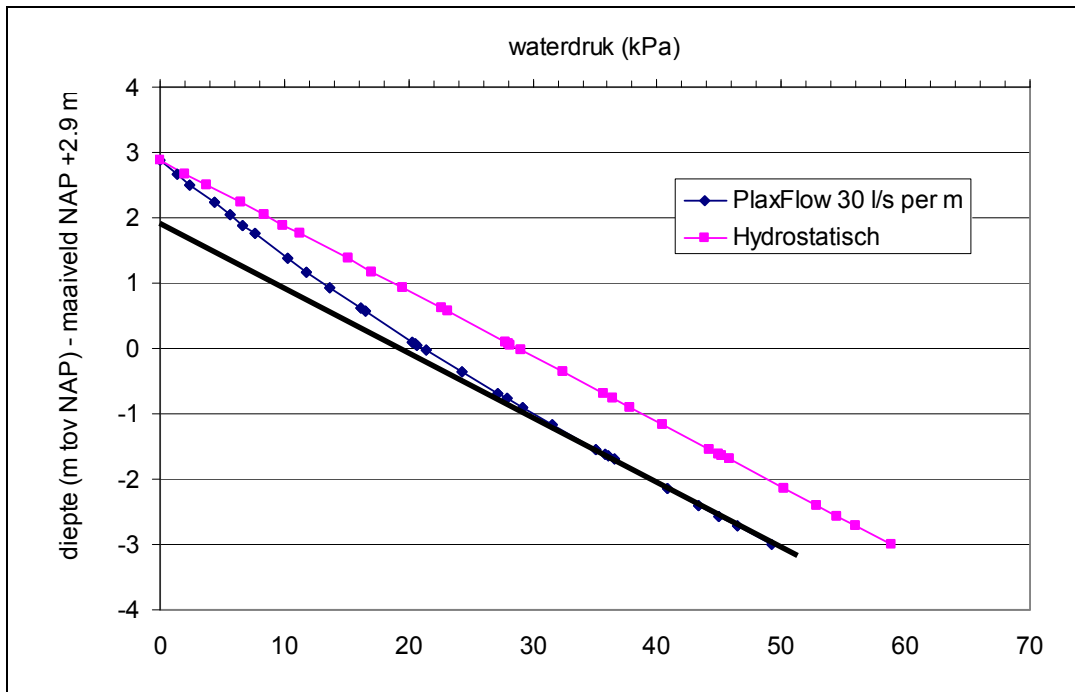




Figuur 4.16 Situatie na 30 l/s per m proef

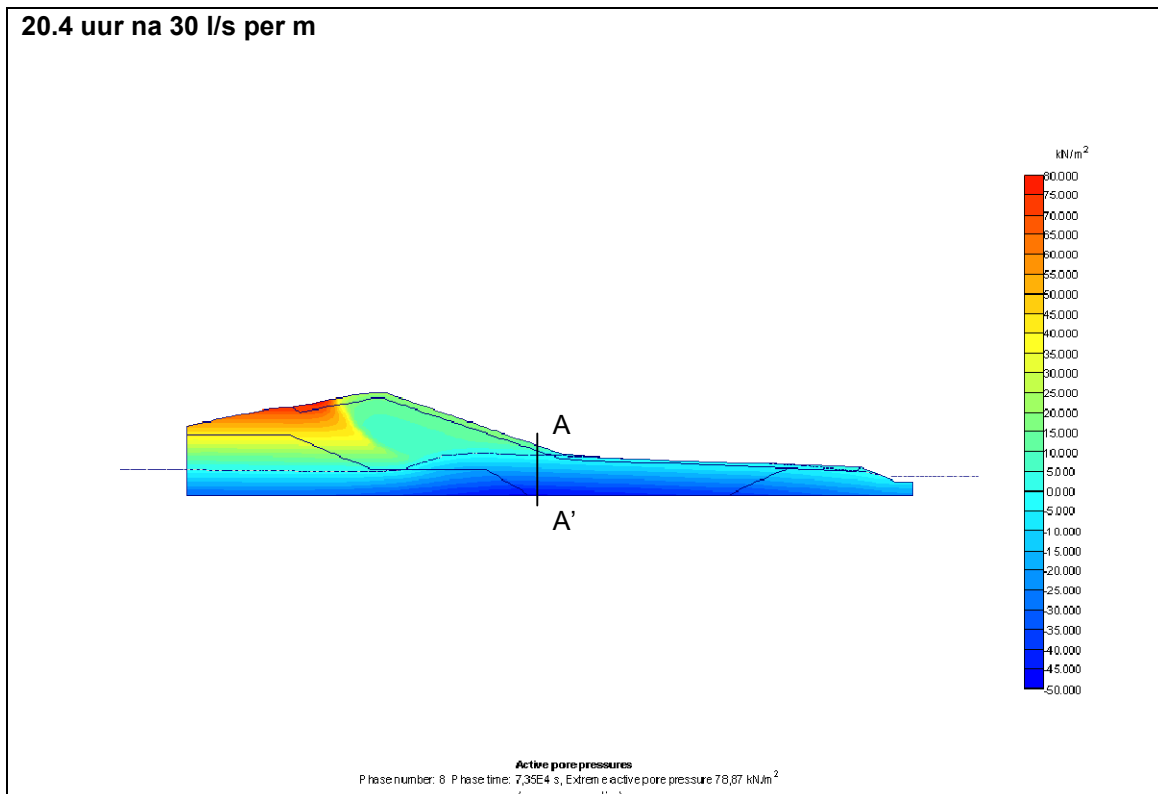
De berm is volledig verzadigd en net als na de 10 l/s per m proef, heeft zich een hydrostatisch drukverloop ontwikkeld. De kleibekleding en tot circa 0.5 m van de zandkern, onder de bekleding, zijn volledig verzadigd. Hier vindt echter nog steeds infiltratie plaats en daarmee een neerwaarts of binnenwaarts gerichte grondwaterstroming. De drukopbouw onder het talud is daarom lager dan hydrostatisch. In snede A-A' ter plaatse van de teen lijkt de volledige verzadiging te leiden tot het oplopen van de waterdruk tot hydrostatisch (zie Figuur 4.16). Dit is echter nog niet het geval, zoals te zien is in het 'Flow Field' in Figuur 4.16. De grondwaterstroming heeft ter plaatse van de teen nog een grote vertikaal neerwaartse component, waardoor de waterdruk hier lager is dan hydrostatisch. De berekende druk en het hydrostatisch drukverloop staan in Figuur 4.17.

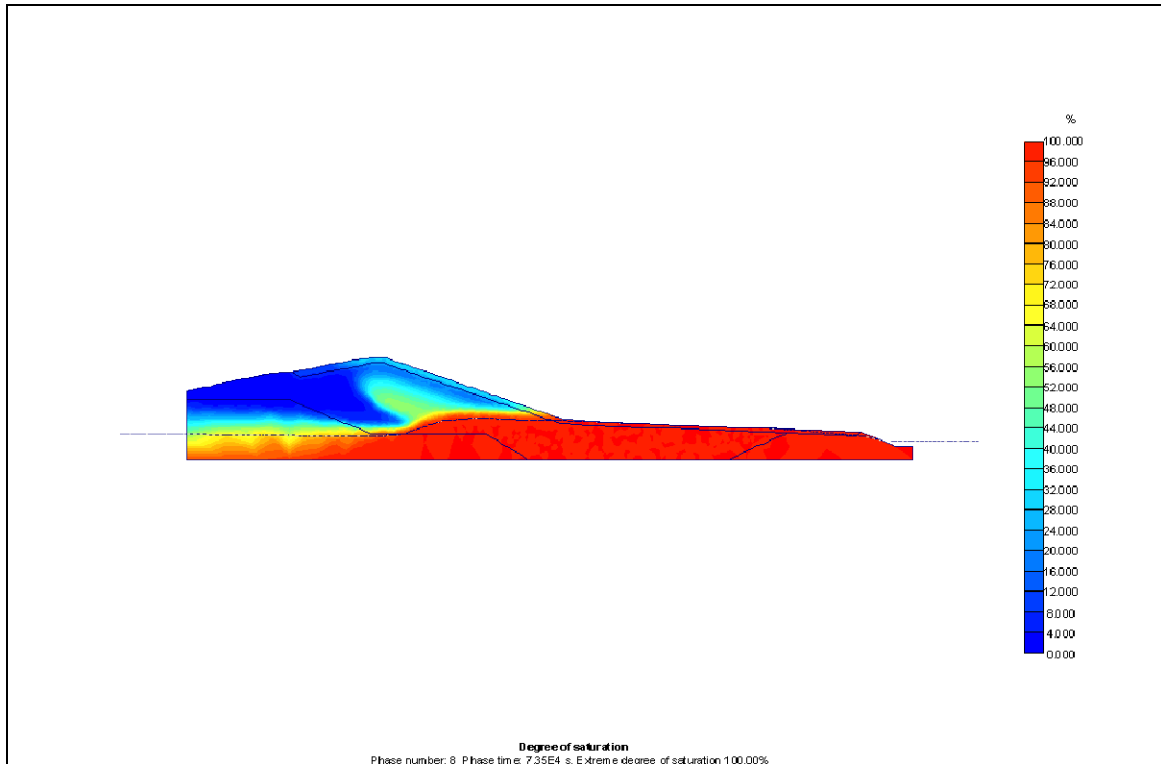
Vanaf een diepte van circa NAP -1 m tot aan de onderrand van het model is het drukverloop wel hydrostatisch (zie dikke lijn in Figuur 4.17). Onder NAP -1 m is de stijghoogte gelijk aan NAP +1.9 m, wat circa 2 m boven de initiële situatie is.



Figuur 4.17 Drukverloop in snede A-A' ter plaatse van de teen (Figuur 4.16)

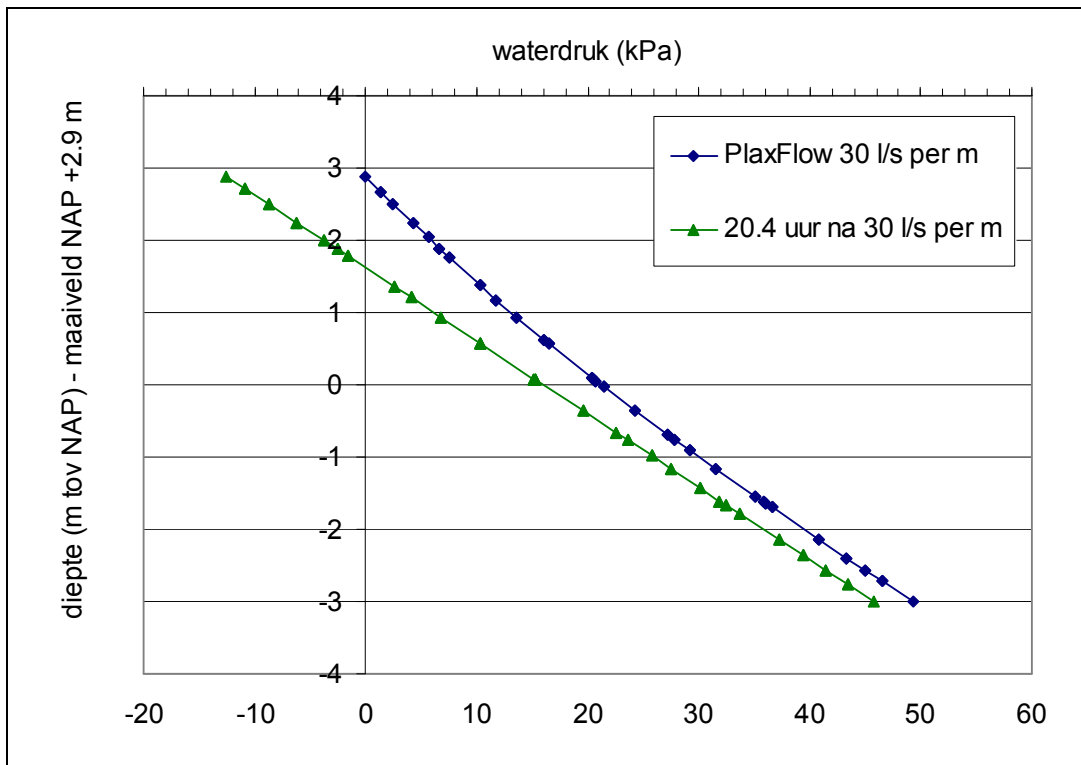
Na de proef is een wachtperiode gemodelleerd van $24 - 3.6 = 20.4$ uur. Hierin zijn de waterspanningen en de verzadiging weer afgenomen tot de situatie zoals aangegeven in Figuur 4.18.





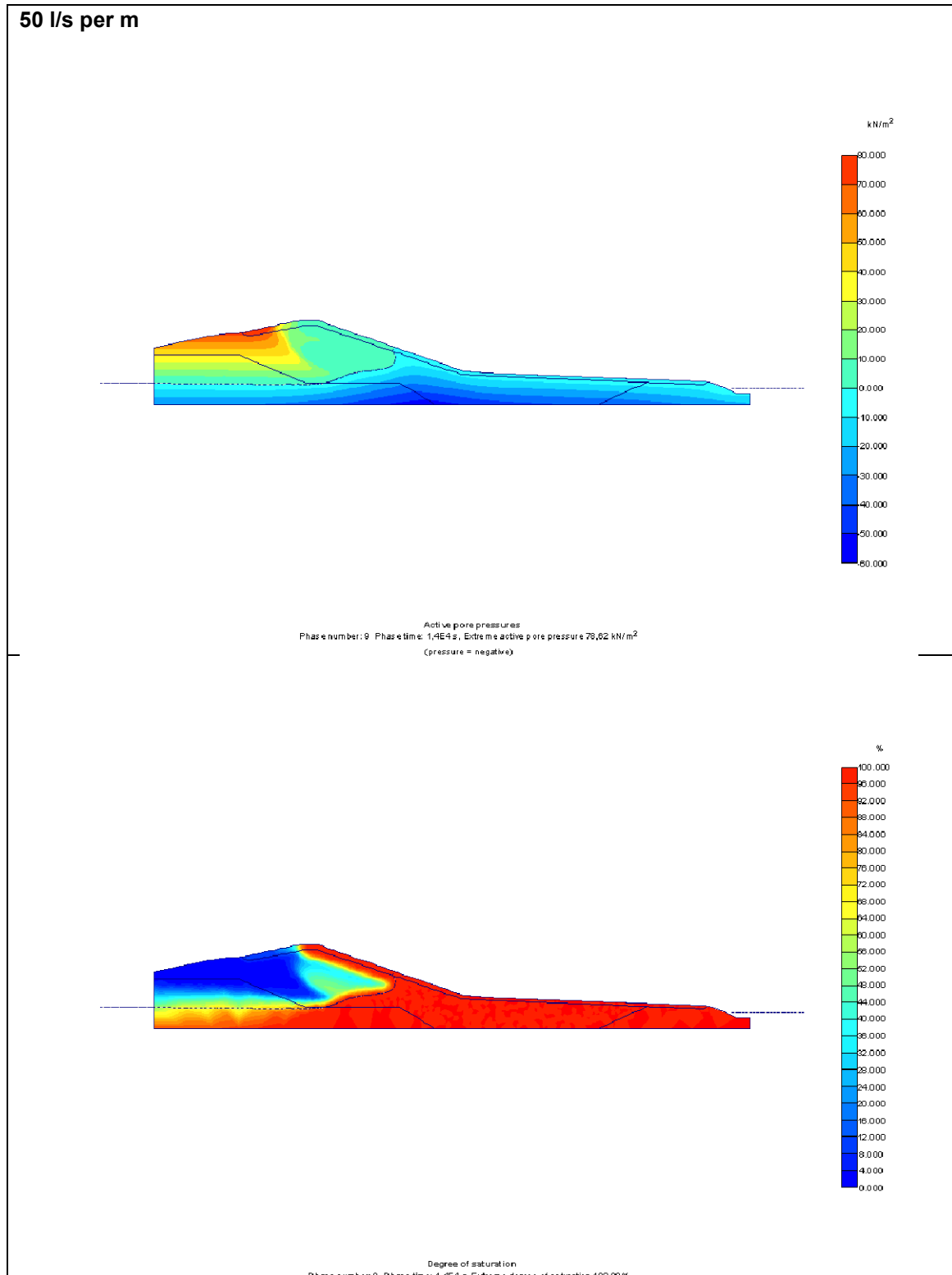
Figuur 4.18 Situatie 20.4 uur na 30 l/s per m proef

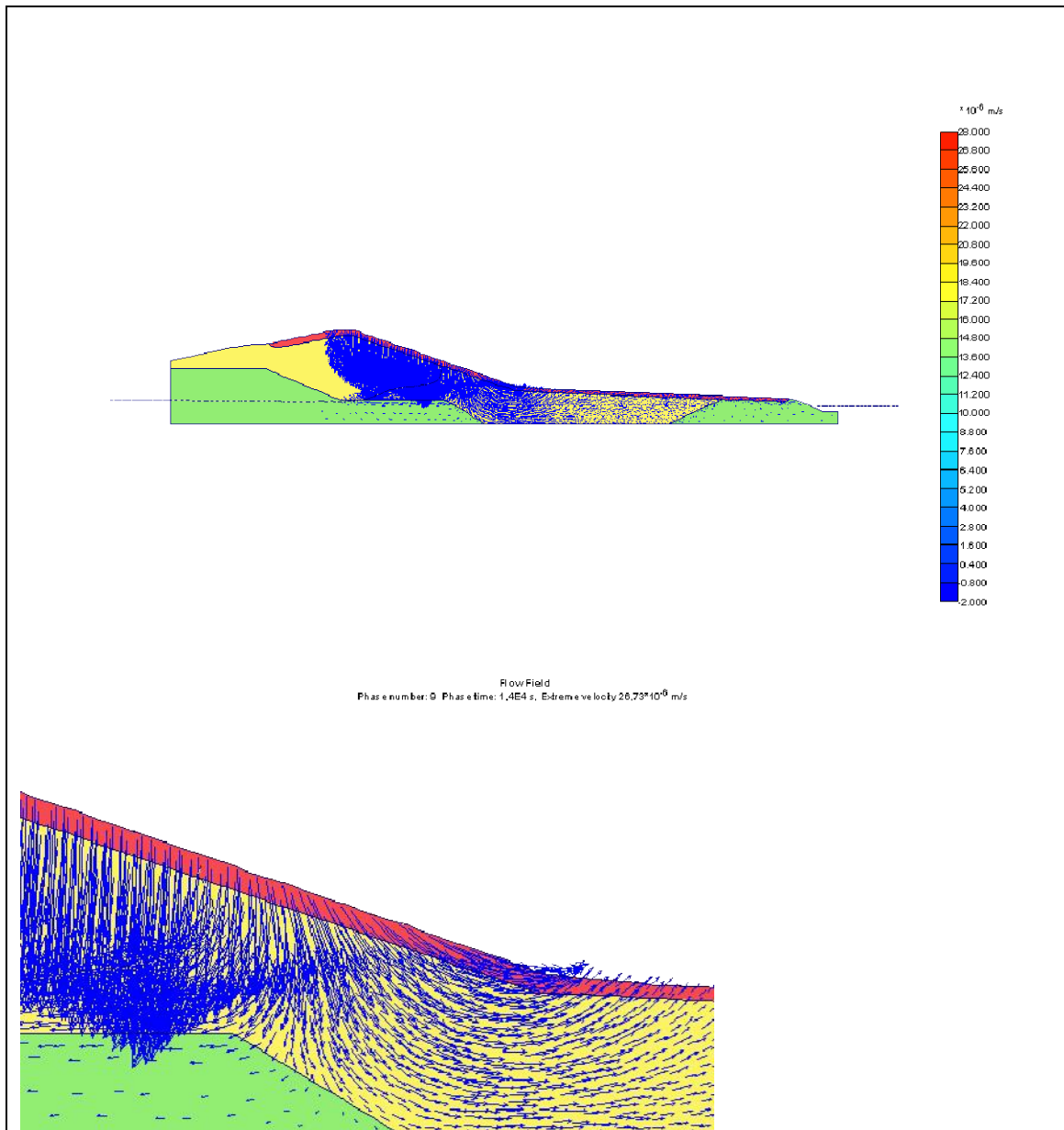
De berm en het onderste deel van de zandkern blijven ook na de wachtperiode volledig verzadigd en de drukopbouw in het gedeelte onder het freatisch vlak is nagenoeg hydrostatisch. Boven het freatisch vlak dat na de wachtperiode, ter plaatse van de teen, op circa NAP +1.6 m ligt hebben zich weer zuigspanningen ontwikkeld.



Figuur 4.19 Waterspanning ter plaatse van de teen (snede A-A') direct na de 30 l/s per m proef en na een wachtperiode van 20.4 uur.

Na de wachtperiode wordt de proef van 50 l/s per m gemodelleerd. Hierbij wordt gedurende 14000 s (ca. 3.9 uur) een druk is 0 kPa rand opgelegd op kruin, binnentalud en berm. De dijk is nog gedeeltelijk verzadigd door de 30 l/s per m proef van de vorige dag. De waterspanningen, verzadiging en het stromingspatroon direct na de 50 l/s per m proef staat in Figuur 4.20.



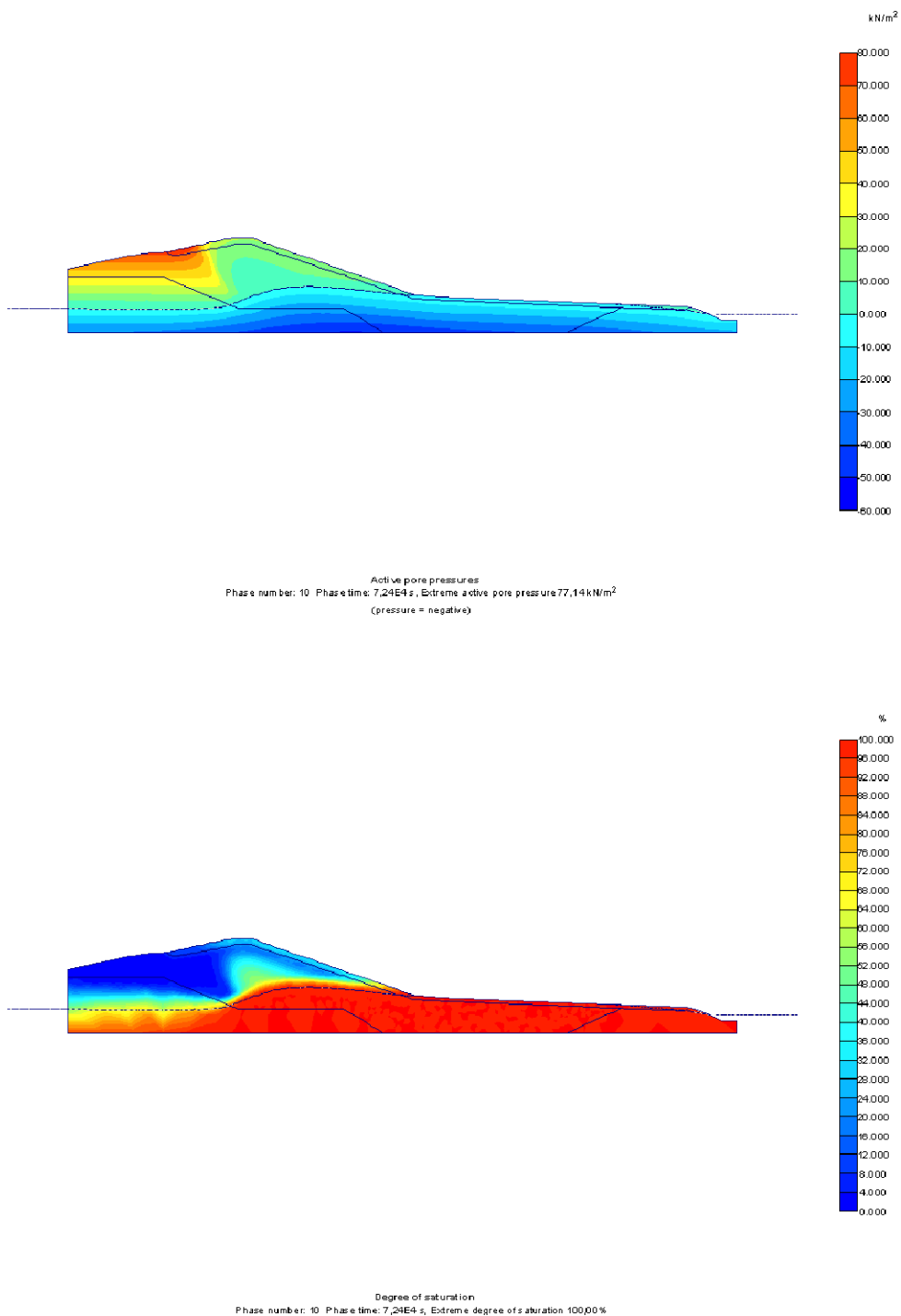


Figuur 4.20 Waterspanningen, verzadiging en het stromingspatroon direct na de 50 l/s per m proef

De waterspanningen zijn toegenomen ten opzichte van de 30 l/s per m proef. De kern van de dijk is tot ongeveer 1/3 van de taludhoogte helemaal verzadigd. Ook de kleibekleding en ongeveer 0.5 m van de zandkern onder de kleibekleding zijn volledig verzadigd. De grondwaterstroming onder het bovenste deel van het talud is nagenoeg verticaal naar beneden gericht, terwijl vanaf ongeveer 1/3 van de taludhoogte de stroming meer in de taludrichting draait en helemaal onderaan zelfs het talud uit. In de teen infiltreert dus geen water meer, maar treedt water uit. Dit is voor de stabiliteit van de bekledingslaag en voor het uitspoelen van zand een zeer ongunstige situatie.

Na afloop van de proef is weer een wachtperiode gesimuleerd van $24 - 3.9 = 20.1$ uur, tot aan de start van de 75 l/s per m proef. De waterspanningen en verzadiging vlak voor aanvang van deze proef staan in Figuur 4.21.

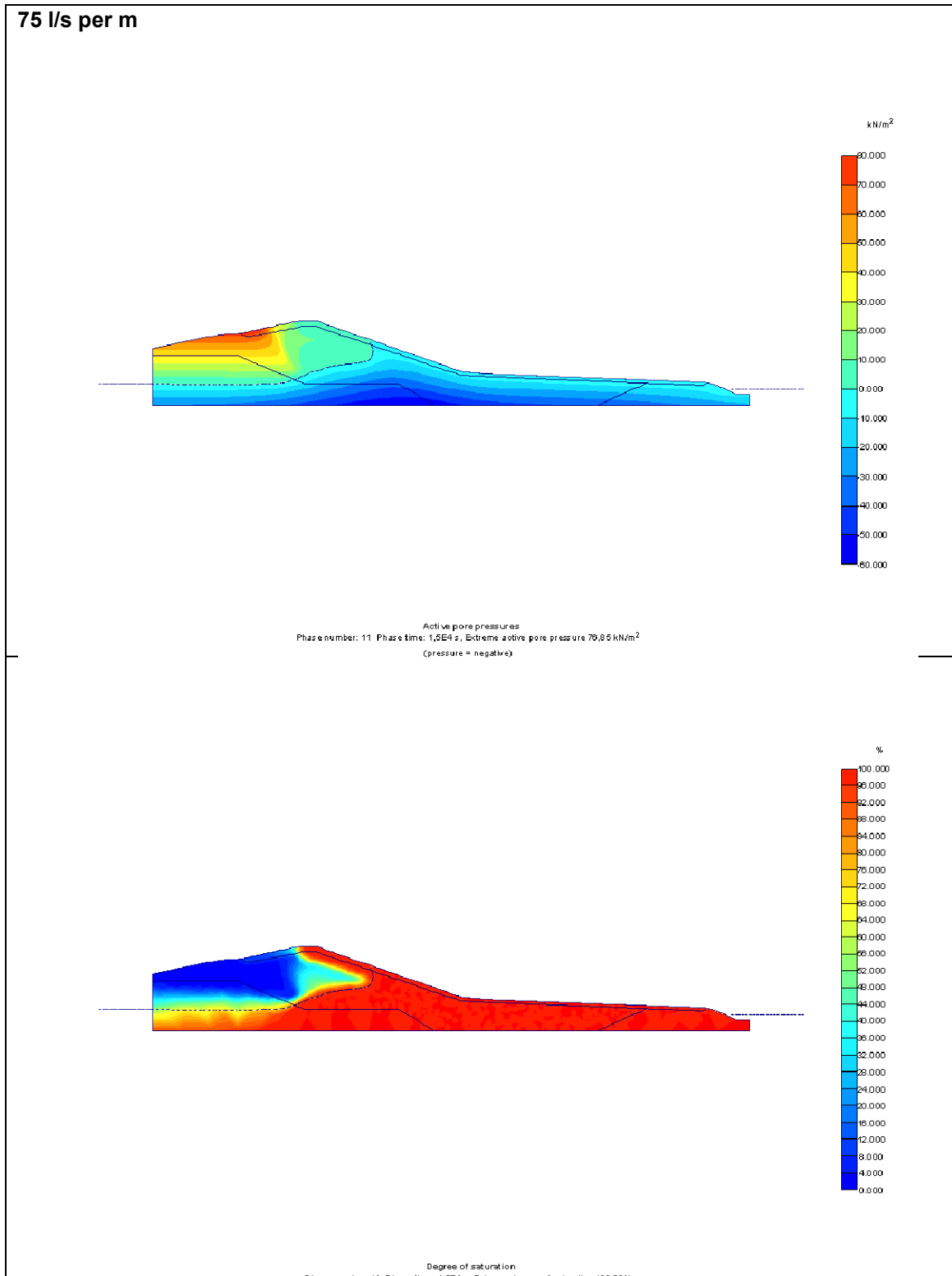
20.1 uur na 50 l/s per m proef

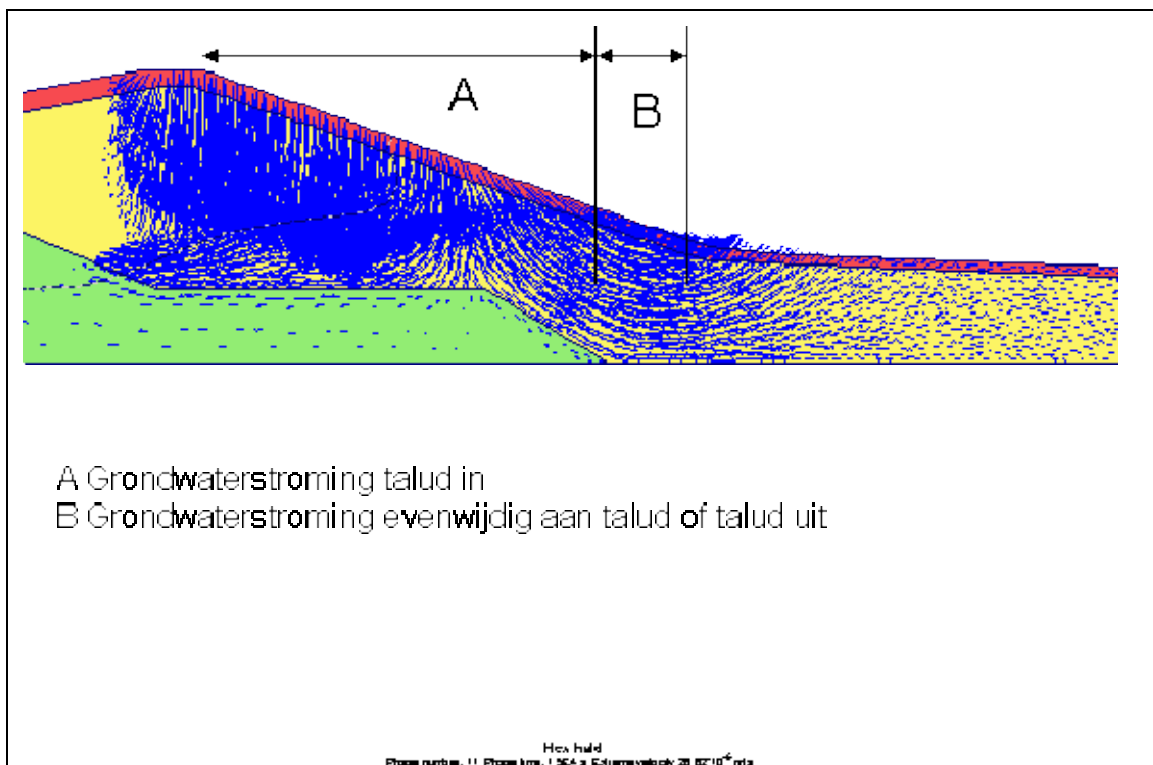


Figuur 4.21 Waterspanning en verzadiging 20.1 uur na beëindiging 50 l/s per m proef

De kern van de dijk blijft voor een aanzienlijk deel verzadigd. De waterspanningsopbouw onder het freatisch vlak is nagenoeg hydrostatisch en boven het freatisch niveau hebben zich weer zuigspanningen ontwikkeld.

Met deze situatie als startpunt is de 75 l/s per m proeff gesimuleerd door het opleggen van een druk = 0 kPa rand gedurende 15000 s (ca. 4.2 uur). De waterspanningen, verzadiging en het stroombeeld staan in Figuur 4.22.



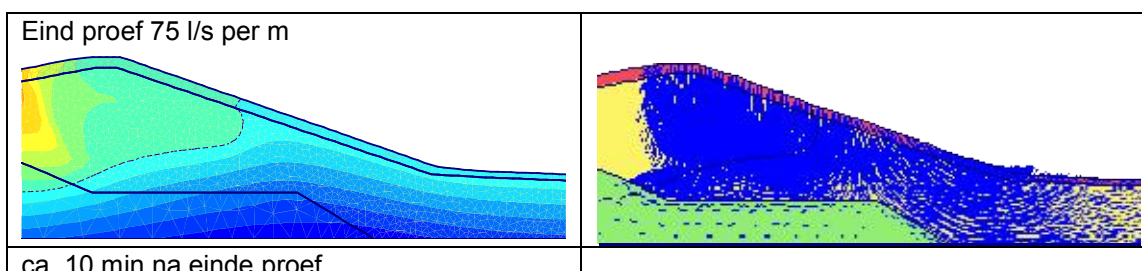


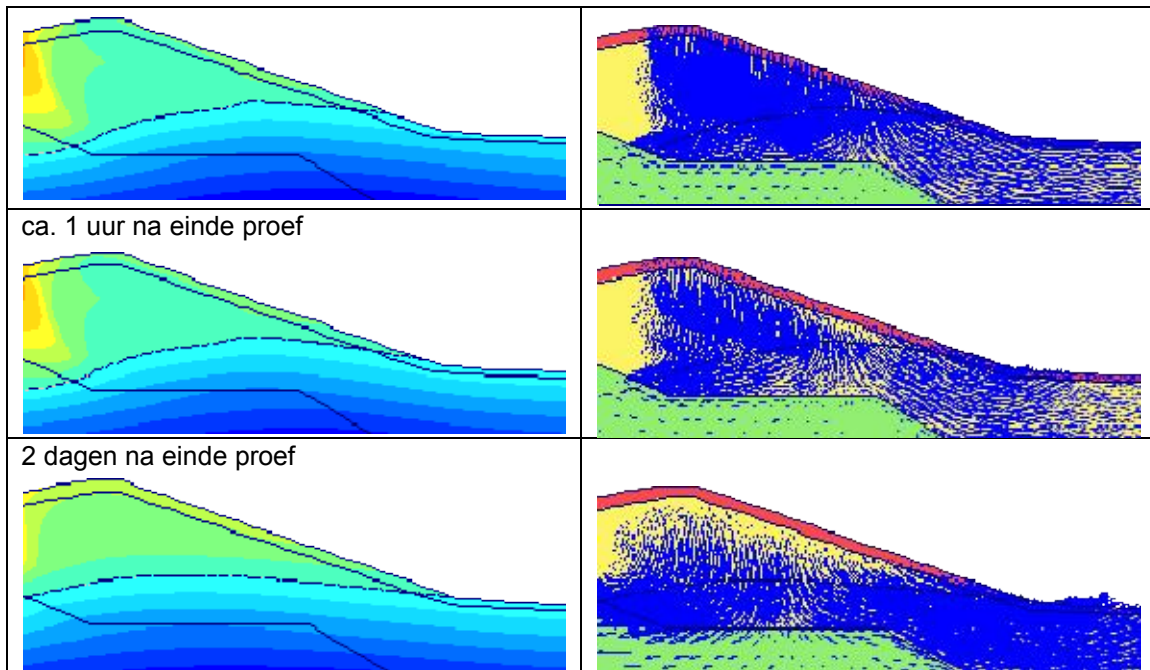
Figuur 4.22 Waterspanningen, verzadiging en het stroombeeld direct na afloop van de 75 l/s per m proef

Aan het einde van de proef is de zandkern tot bijna de helft van de taludhoogte volledig verzadigd. De grondwaterstroming is echter slechts in het onderste deel, circa $\frac{1}{4}$ van het talud evenwijdig aan het talud gericht of zelfs het talud uit. Een stroming evenwijdig aan het talud hoort bij de waterspanningsverdeling die uitgangspunt is bij het Edelman – Joustra stabiliteitscriterium. Een buitenwaarts gerichte grondwaterstroming leidt tot een situatie die ongunstiger is dan aangenomen bij bij het Edelman-Joustra criterium. Naast de ongunstige invloed op de stabiliteit van de bekledingslaag, kan de buitenwaarts gerichte grondwaterstroming zand meevoeren vanuit de kern.

Een overdruk onder de bekledingslaag wordt niet berekend. Dit was ook niet te verwachten, omdat de doorlatendheid van de kleibekleding met zijn bodemstructuur van gelijke orde van grote is als die van de zandkern.

Na afloop van de 75 l/s per m proef is een wachtperiode van 2 dagen gesimuleerd. In Figuur 4.23 zijn op verschillende tijdstappen na beëindigen van de proef de waterspanning (links) en het stroombeeld (rechts) gegeven. De legenda bij de waterspanningen ontbreekt, het gaat namelijk met name om de dikke lijn die de ligging van het freatisch vlak aangeeft.





Figuur 4.23 Waterspanningen en stroombeeld ter plaatse van de teen na afloop van de 75 l/s per m proef

Uit de berekeningen blijkt dat de afname van de waterspanningen ter plaatse van de teen snel gaat. Na circa 1 uur ligt het sijpeloppervlak nog net boven de teen. De afname van de waterspanningen in de zandkern gaan echter relatief langzaam. Het freatisch vlak in de kern van de dijk is na twee dagen nog steeds behoorlijk hoog, NAP +3.1 m, wat bijna 3.5 m boven de initiële situatie is.

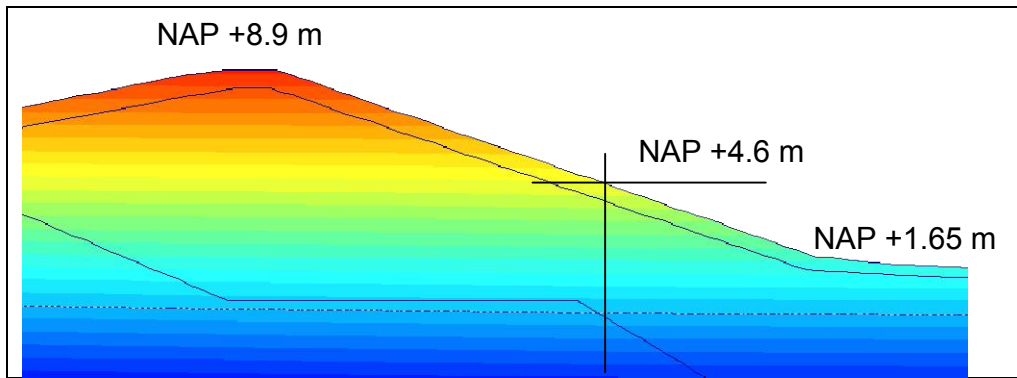
4.3 2D PlaxFlow berekening afschuifproef

4.3.1 Afschatting effect zijdelingse afstroming

De PlaxFlow berekeningen zijn 2-dimensionaal. De opbouw van waterspanningen in het dwarsprofiel worden belemmerd door het zijdelings afstromen van water. Het effect hiervan is berekend door de simulatie van infiltratie in een snede evenwijdig aan de dijk.

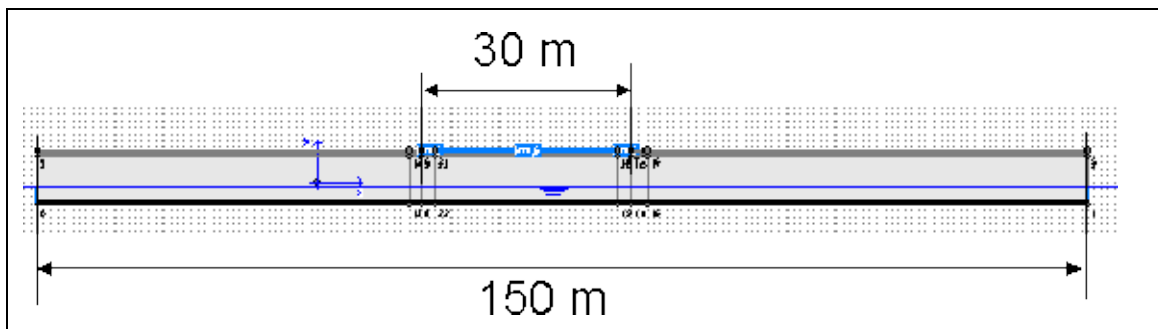
De minimale breedte, in dijkrichting, waarover de waterspanningsopbouw zoveel mogelijk uniform dient te zijn is afhankelijk van de invloed van de randeffecten bij het beoogde mechanisme: afschuiven van de kleibekleding. Uitgaande van een afschuifvlak met breedte B en dikte d ($=0.6$ m), is het percentage rand $d/(B/2+d) \times 100\%$. Bij een glijvlakbreedte van 20 m is het percentage rand 5.7%, wat in relatie tot variaties in sterkte als klein wordt gezien.

De simulatie is uitgevoerd voor een snede evenwijdig aan de dijk op een taludhoogte van NAP +4.6 m (zie Figuur 4.24).



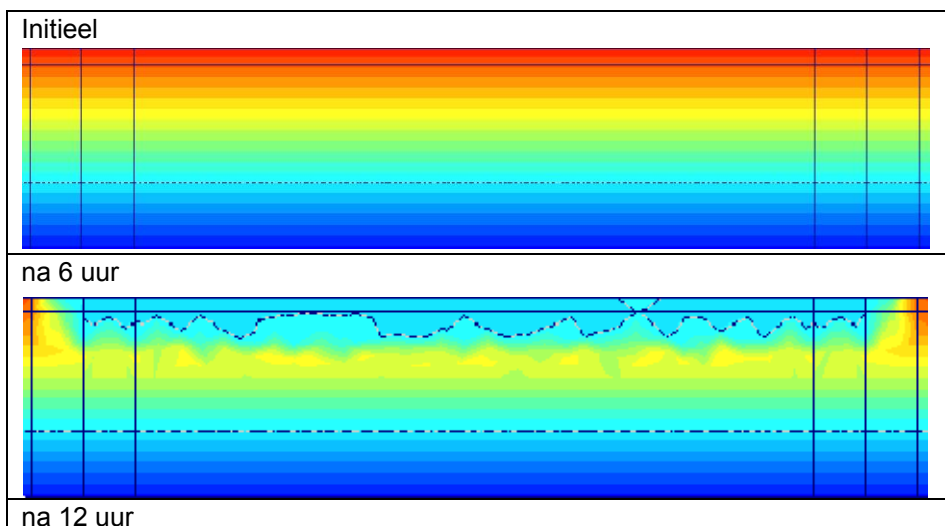
Figuur 4.24 Locatie snede evenwijdig aan dijk voor simulatie zijdelings afstromen grondwater

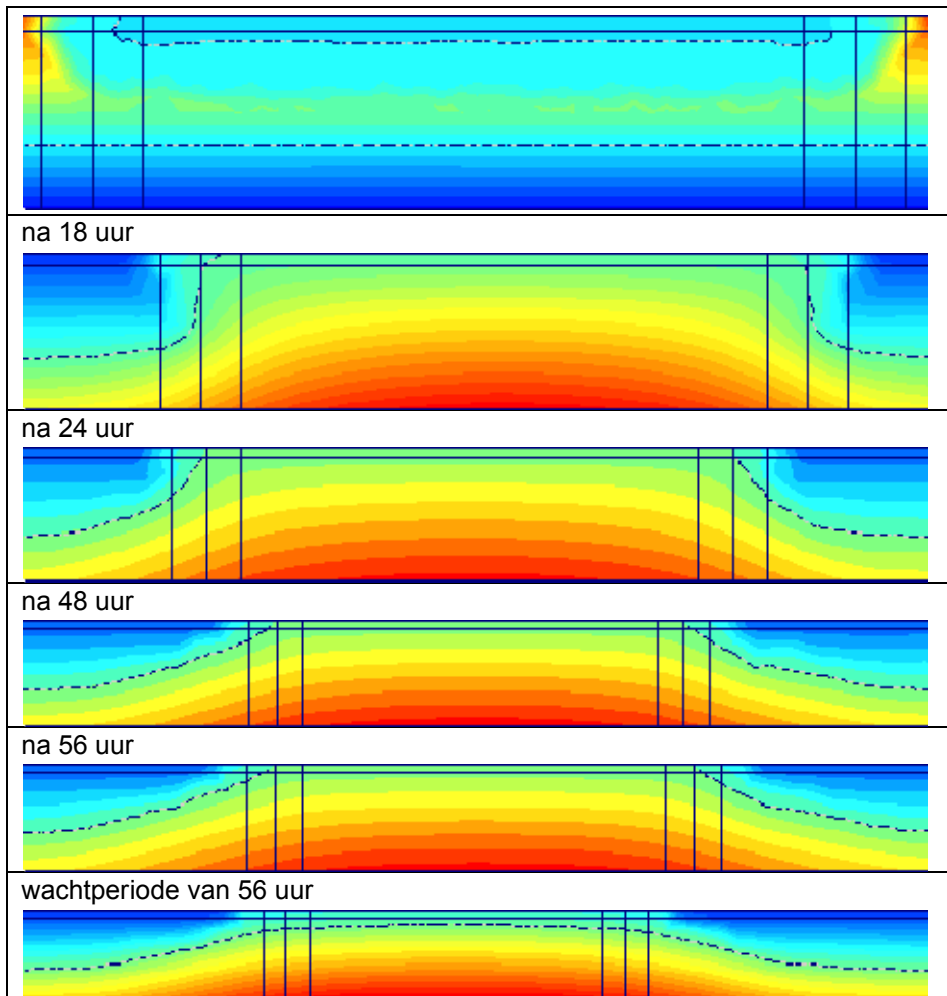
Er is een sectie van 150 m dijk gemodelleerd, waarop over een breedte van 30 m infiltratie is gesimuleerd Figuur 4.25.



Figuur 4.25 Modelschematisatie

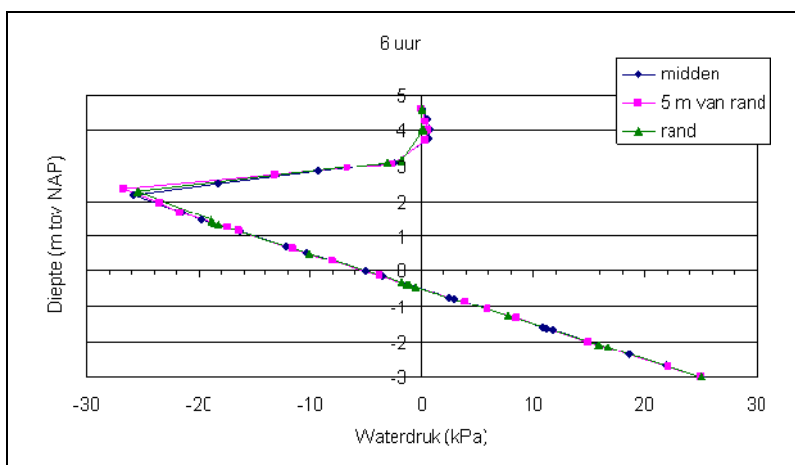
De grafische uitvoer van de waterspanningen na verschillende tijden van infiltratie staan in Figuur 4.26. Het gebied waarover infiltratie is gesimuleerd bevindt zich tussen de één na linker en één na rechter verticale lijn. De vertikalen 2 m links en rechts van de infiltratierand zijn aangebracht vanwege de fijnere mesh in dit gebied. De grafische uitvoer is bedoeld voor de analyse van de randeffecten. Omdat de randeffecten goed zichtbaar zijn door de kleurverschillen, is de legenda in weggelaten.

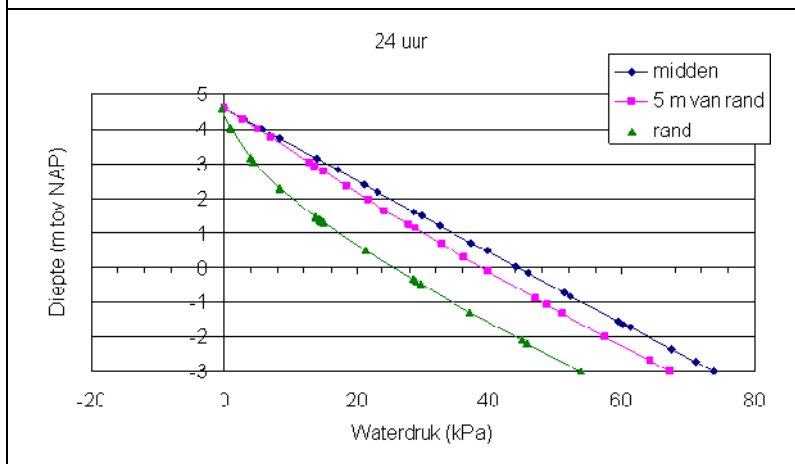
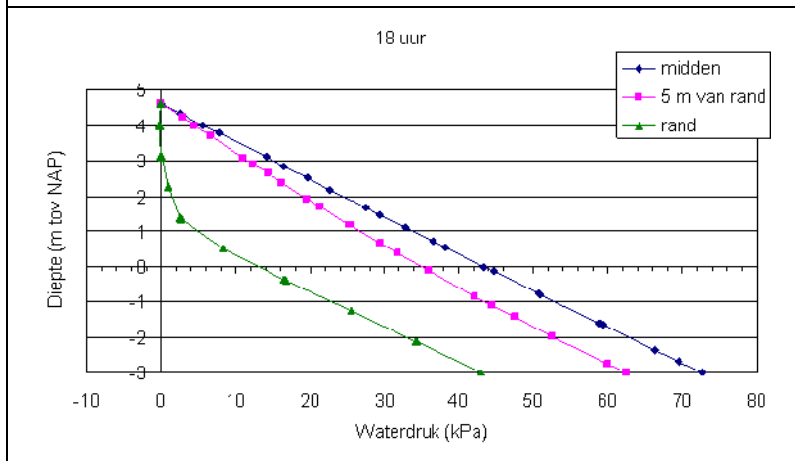
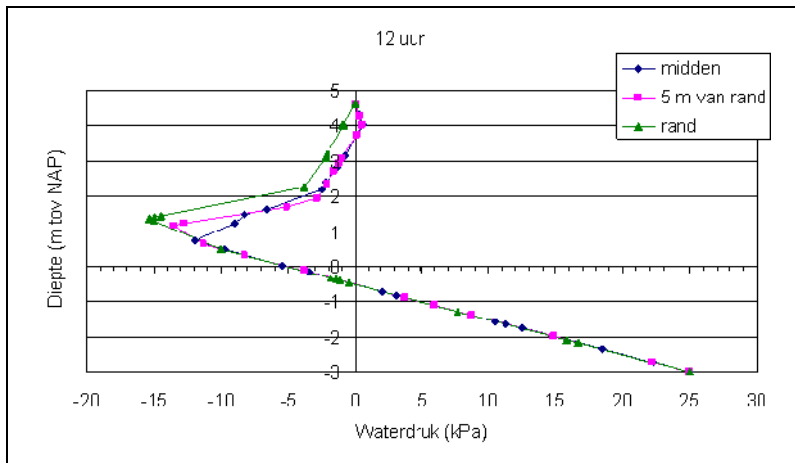


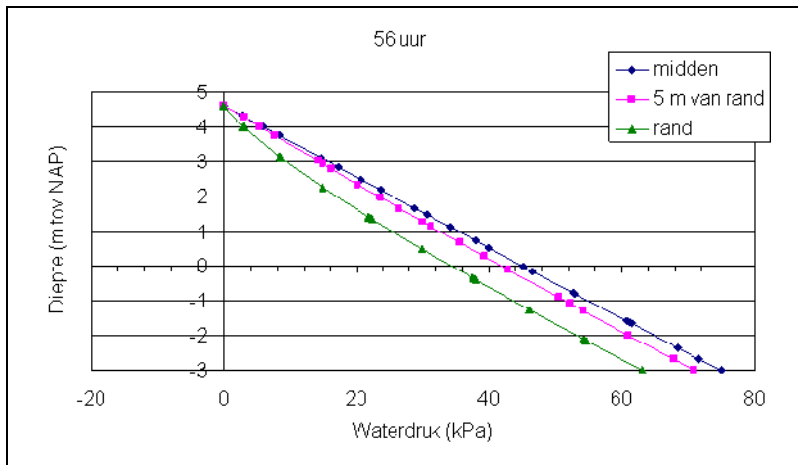


Figuur 4.26 Waterspanning in snede evenwijdig aan de dijk bij 30 m brede infiltratiestrook

De berekening laat zien dat binnen de infiltratiegrenzen, de zone waarbinnen de verzadiging volledig is als een zuil naar beneden zakt (t/m 18 uur). Nadat het infiltratiefront het initiële freatische vlak raakt, komt de zijdelingse afstroming op gang. Tussen de infiltratiegrenzen lopen de lijnen van gelijke waterspanning enigszins gekromd, hetgeen het randeffect aangeeft. Het verschil in waterdruk tussen het midden van het infiltratiegebied, 5 m uit de rand en op de rand op verschillende tijdstippen na de aanvang van infiltratie zijn gegeven in Figuur 4.27.







Figuur 4.27 Waterdruk in vertikaal ter plaatse van midden infiltratiegebied, 5 m uit de rand en op de rand

Het verschil tussen de waterspanning in het midden van het infiltratiegebied en op 5 m uit de rand is gering ter plaatse van de bekledingslaag (bovenste 0.6 m). Diep in de zandkern is een verschil aanwezig dat maximaal (circa 15%) is, net nadat het infiltratiefront het initiële freatische vlak bereikt. Daarna neemt het verschil weer af tot circa 5% na 56 uur. Op de rand is de waterspanning in de bekledingslaag aanzienlijk lager.

Geconcludeerd wordt dat voor het mechanisme afschuiven van de bekledingslaag, waarbij de waterspanningen rondom de bekledingslaag van belang zijn, een breedte van de infiltratiestrook van 30 m voldoende is om het effect van zijdelingse afstroming te beperken tot in de orde van 5-10%.

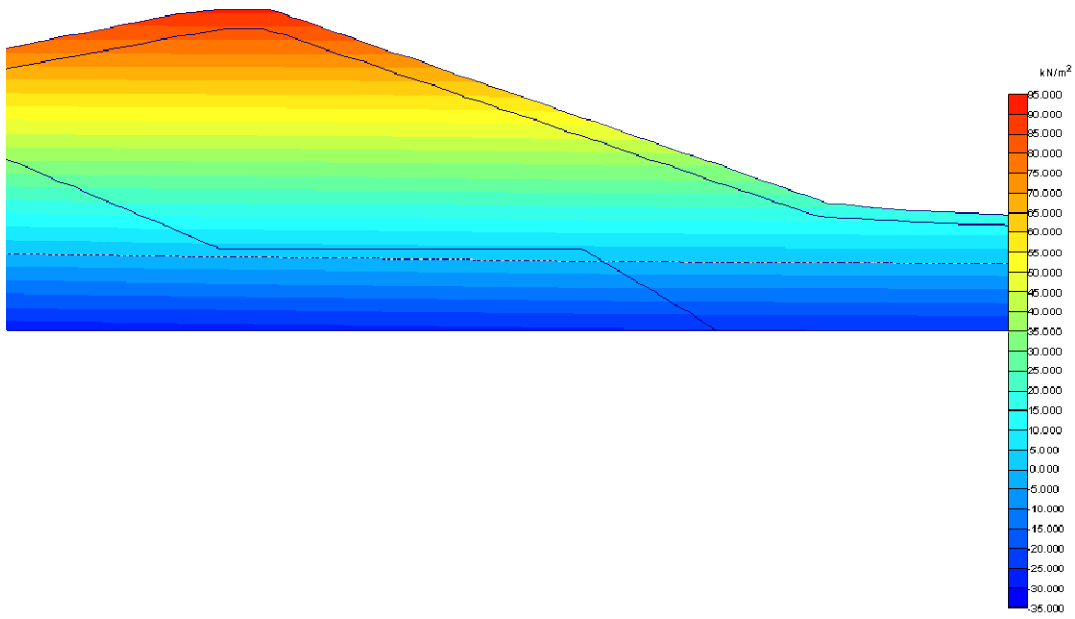
4.3.2 Rekenresultaten 2D PlaxFlow afschuifproef

De afschuifproef is gemodelleerd door continu een druk = 0 kPa rand op te leggen op de kruin, het binnentalud en de berm gedurende 56 uur. De initiële situatie en de parameters zijn gelijk aan die van de overslagproeven (zie 4.2.1).

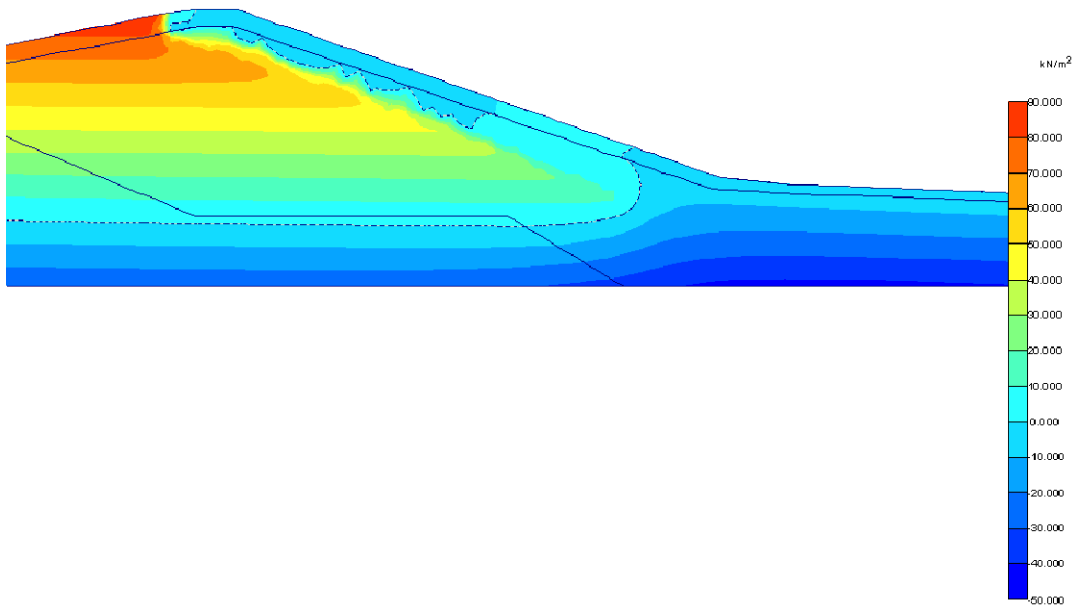
In de onderstaande figuren is alleen de situatie ter plaatse van het talud weergegeven. De modelranden zijn echter gelijk aan die voor de simulatie van de overslagproeven.

De resultaten van de berekeningen in de vorm van waterspanningen zijn voor verschillende tijdstippen na de aanvang van de proef weergegeven in Figuur 4.28.

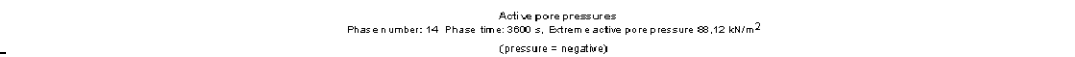
Initieel

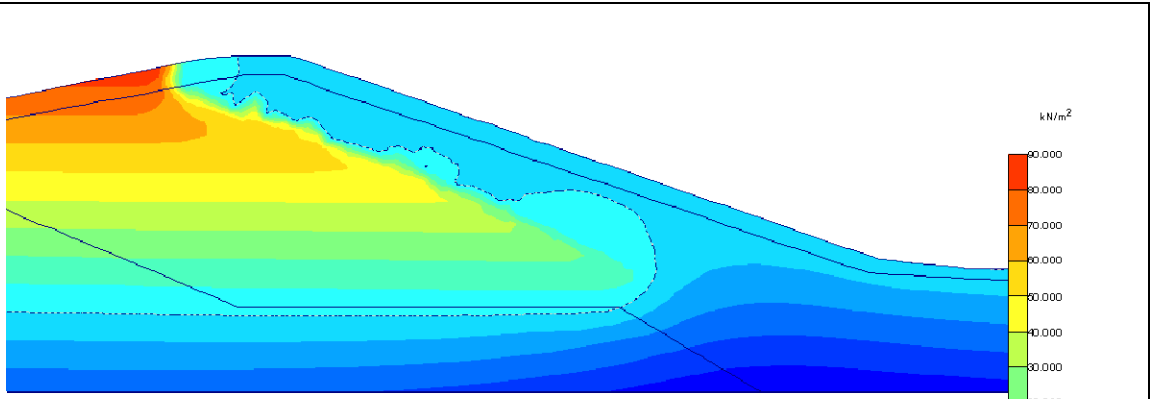


6 uur



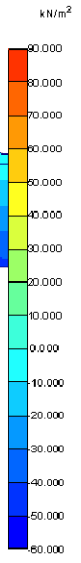
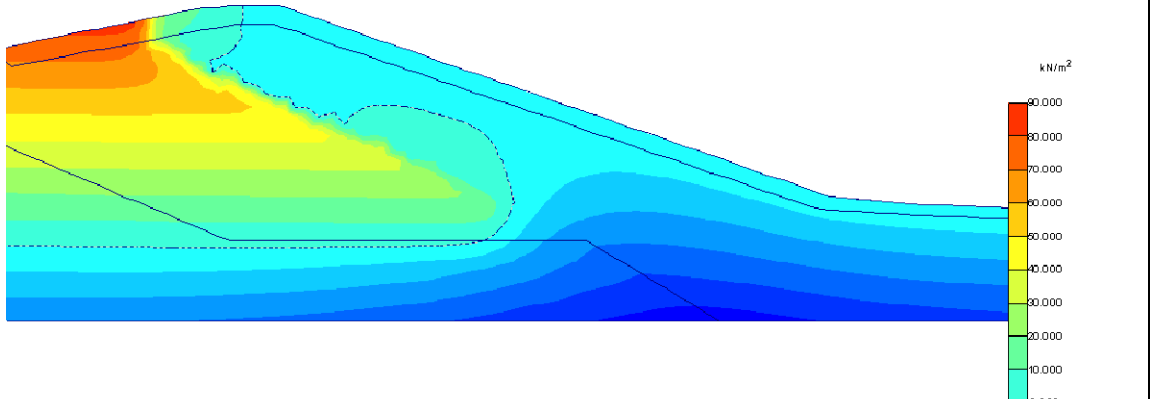
12 uur





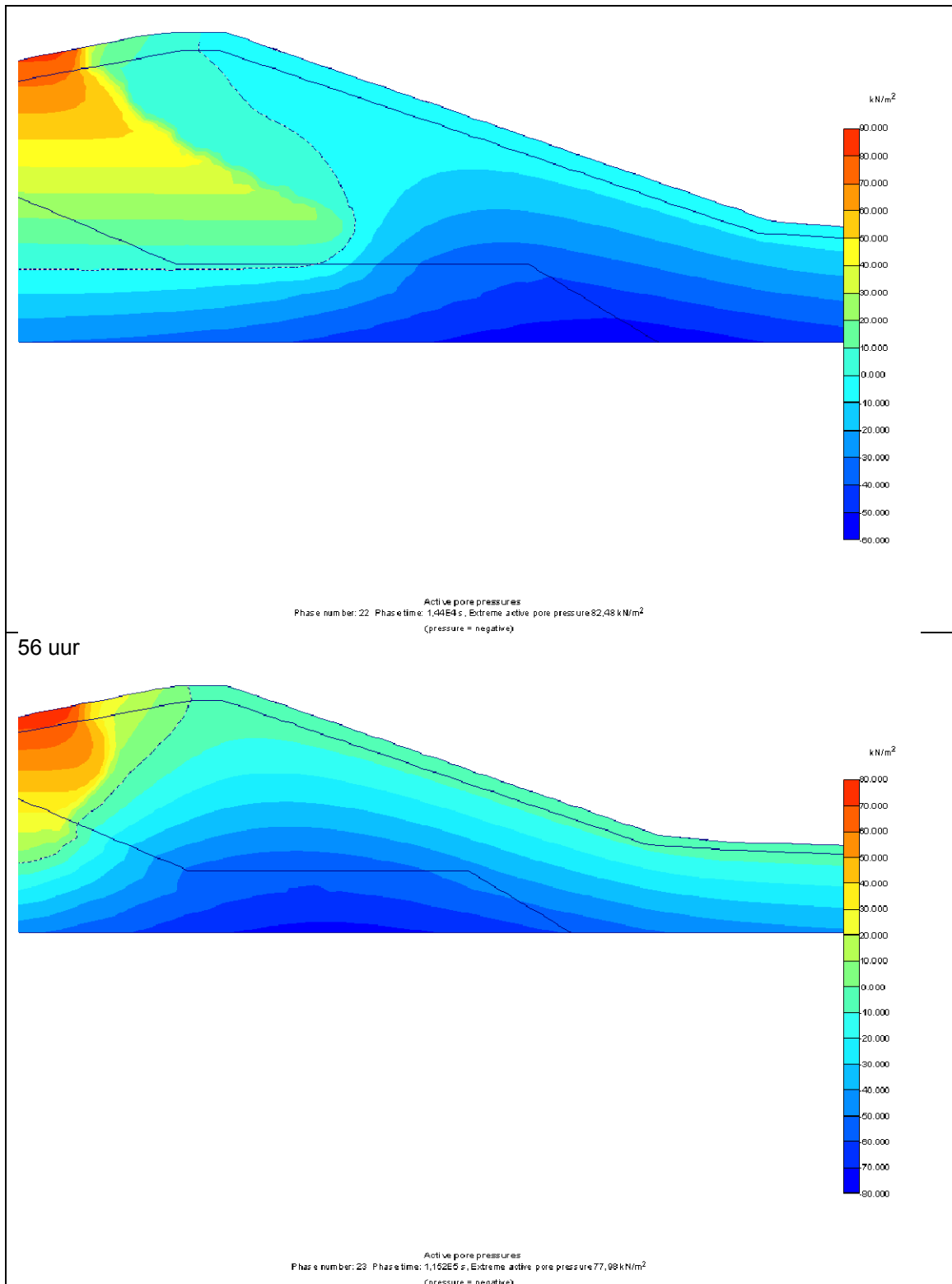
Active pore pressures
 Phase number: 17 Phase time: 7200 s, Extreme active pore pressure 85,81 kN/m²
 (pressure = negative)

18 uur



Active pore pressures
 Phase number: 20 Phase time: 7200 s, Extreme active pore pressure 83,86 kN/m²
 (pressure = negative)

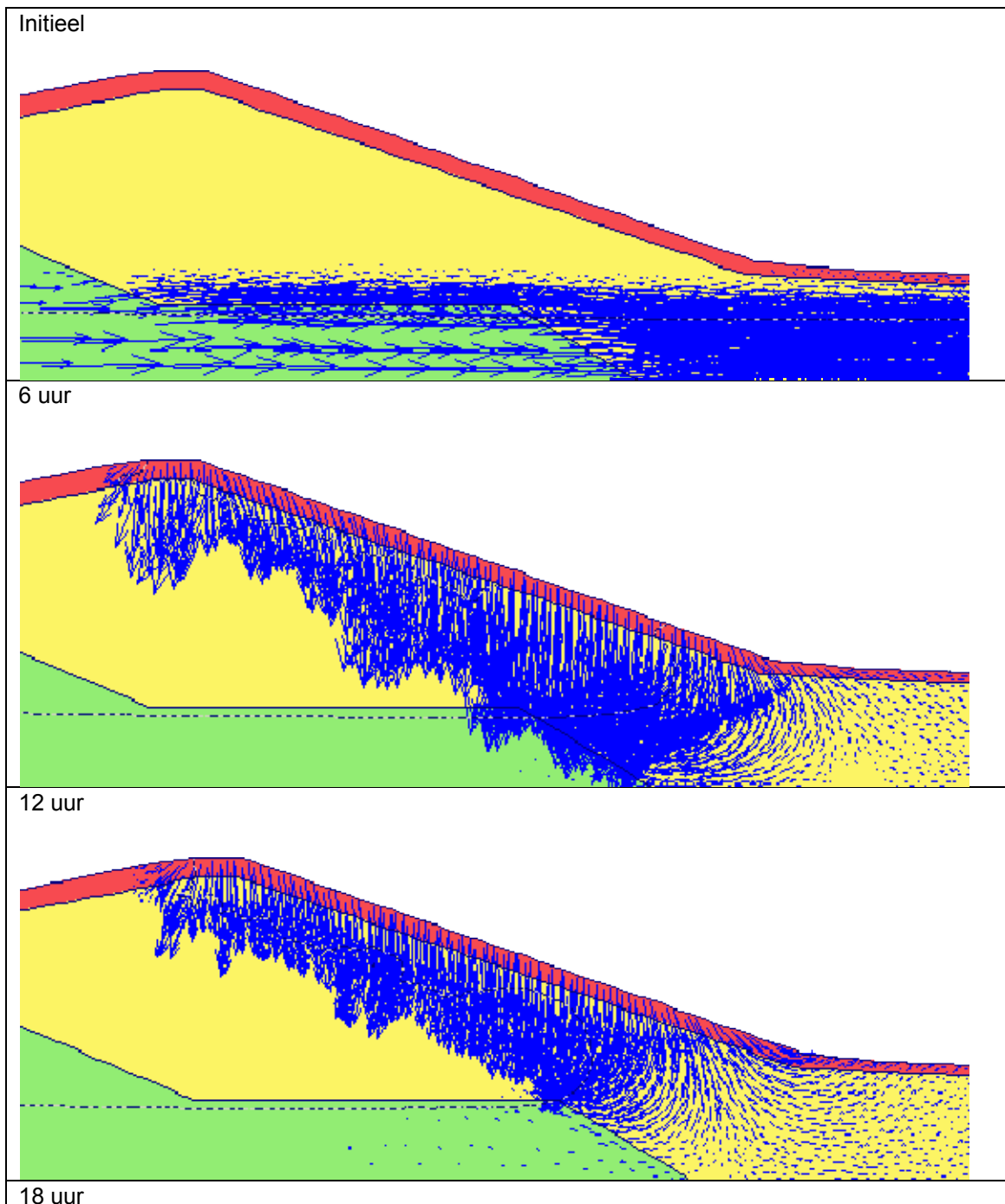
24 uur

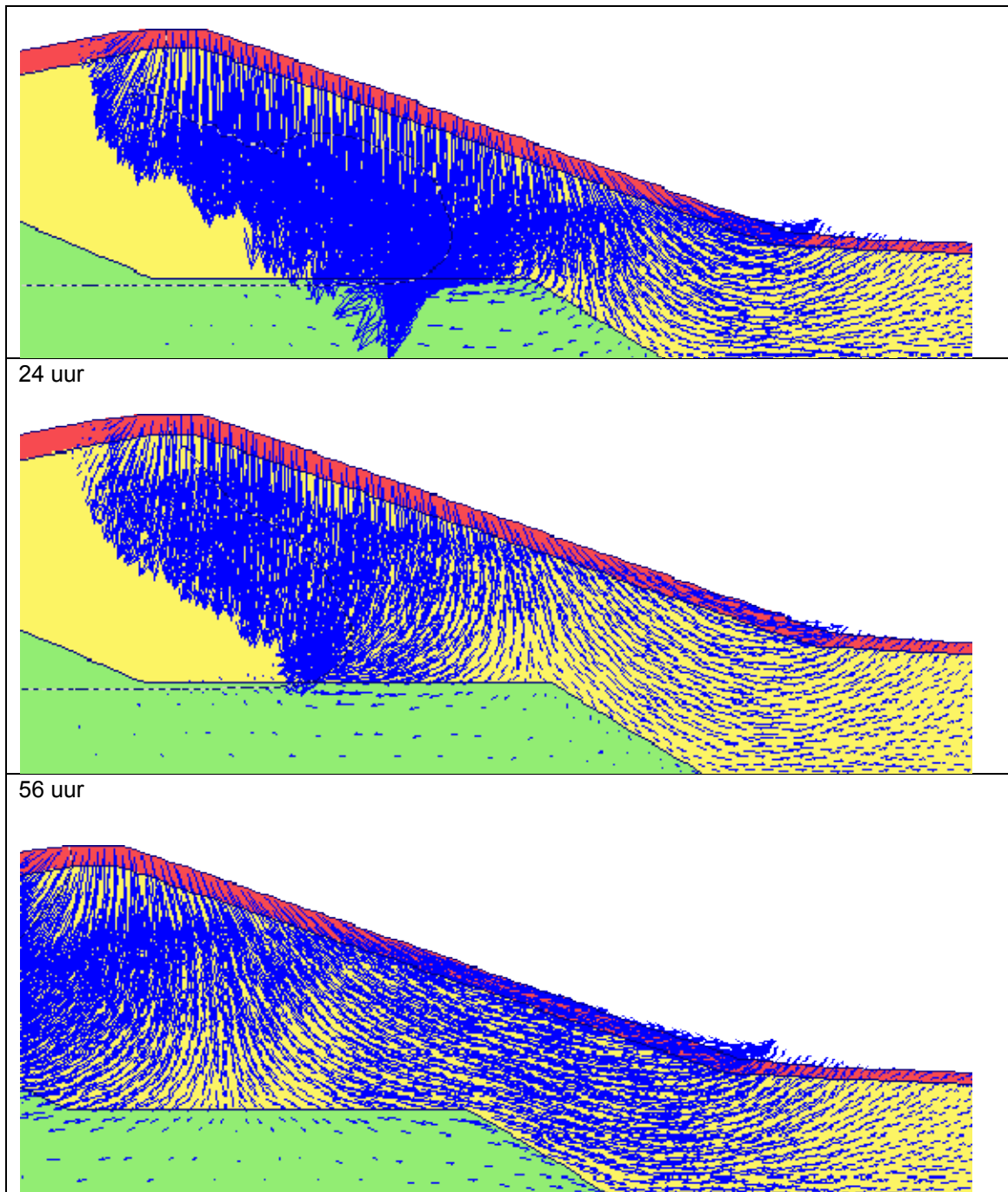


Figuur 4.28 Waterspanningen afschuifproef

Uit de resultaten blijkt dat tijdens de eerste 12 uur de zandkern tot ongeveer één derde van de taludhoogte verzadigd raakt. In 24 uur raakt de kern tot en met de helft van de taludhoogte verzadigd en 56 uur na aanvang van de proef is nagenoeg de hele zandkern verzadigd. De waterspanningen zijn echter nog niet zodanig dat over de hele hoogte van het talud een stroming evenwijdig aan het talud is ontstaan. Deze evenwijdige stroming is het uitgangspunt bij het Edelman- Joustra stabiliteitscriterium.

Het taludgedeelte waar een aan het talud evenwijdige stroming is ontstaan, in de verzadigde zone, kan worden gehaald uit het stroombeeld. De rekenresultaten ten aanzien van het stroombeeld staan in Figuur 4.29.





Figuur 4.29 Stroombeeld afschuifproef

In de initiële situatie is alleen de stationaire stroming aanwezig van de Waddenzee (gemiddeld NAP) naar de polder (gemiddeld NAP -0,85 m). De stroomsnelheid is in de orde van 1×10^{-7} m/s, namelijk de schatting van de doorlatendheid van de oude dijk. Deze stroomsnelheid is gering in vergelijking met de snelheden bij het optreden van infiltratie.

Na 6 uur is de stroomrichting langs het hele talud nog verticaal neerwaarts gericht. Dit heeft een gunstige invloed op de stabiliteit van de bekledingslaag als geheel en op de stabiliteit van individuele gronddeeltjes. De stroomsnelheid is in de orde van grote van 3×10^{-5} m/s.

Na 12 uur is de stroomrichting langs ca. 95% van het hele talud nog neerwaarts gericht, hetgeen een gunstige invloed heeft op de stabiliteit van de bekledingslaag als geheel en op de stabiliteit van individuele gronddeeltjes. Nabij de teen van de dijk is een klein gedeelte waar de

stromingsrichting evenwijdig is aan het talud. Hiermee wordt voor dit stukje talud voldaan aan de waterspanningsvoorwaarde van het Edelman – Joustra stabiliteitscriterium.

Na 18 uur is het taludgedeelte waar de stroomrichting evenwijdig aan het talud is, toegenomen tot circa 15% van de taludlengte. Helemaal onderaan het talud is de stroomrichting buitenwaarts gericht hier treedt geen infiltratie meer op, maar sijpelt het water naar buiten.

Na 24 uur is het taludgedeelte met evenwijdige stroming toegenomen tot circa 25%.

Na 56 uur is het taludgedeelte met een evenwijdig aan het talud lopende grondwaterstroming toegenomen tot circa 50%. Onderaan het talud is een zone van enkele meters waar het water uittreedt.

4.4 Analyse berekende waterspanningen

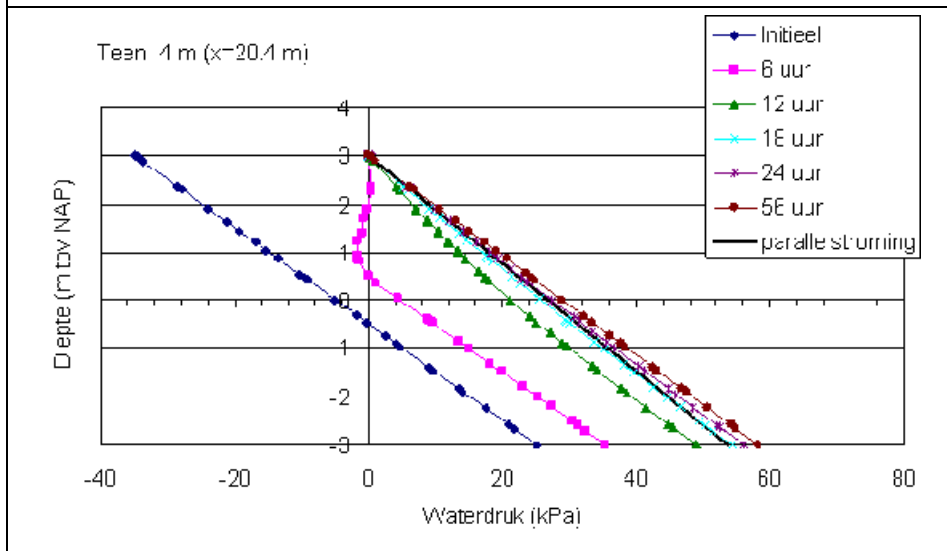
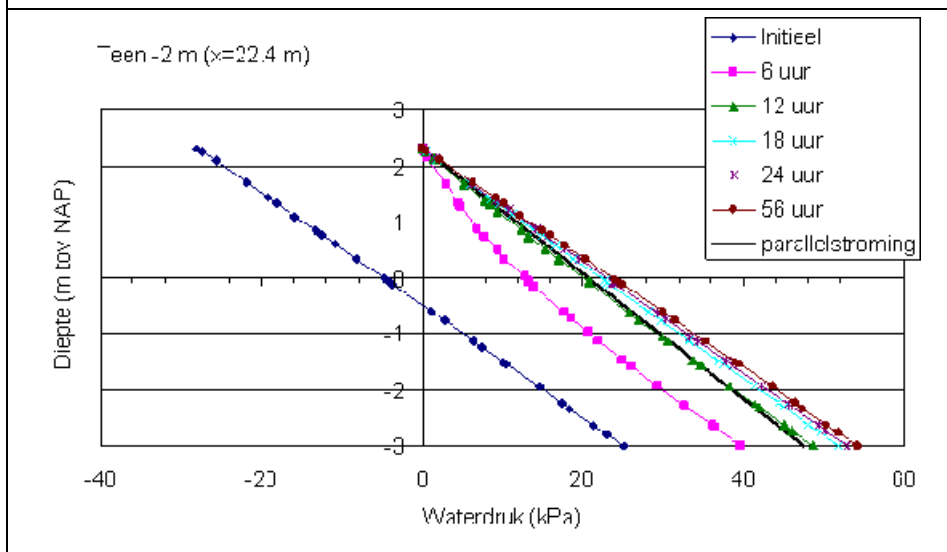
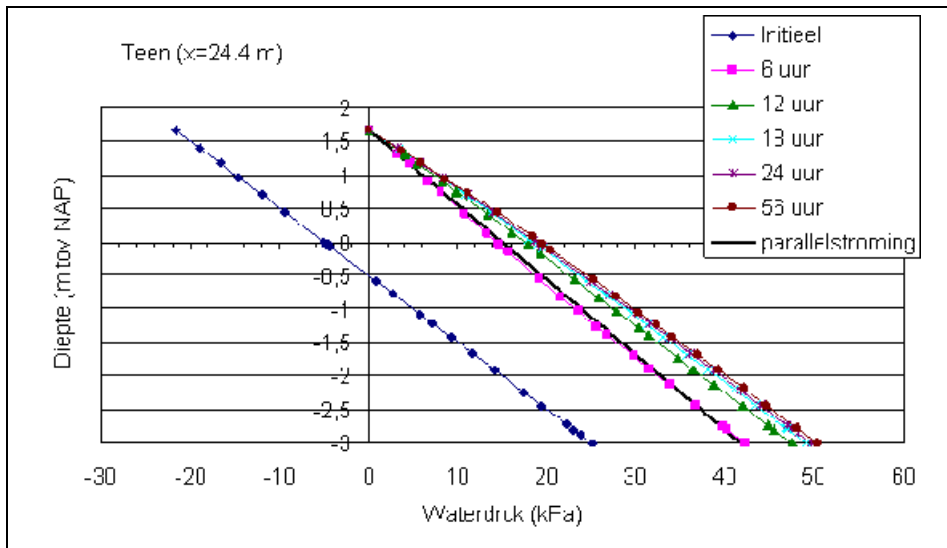
Een belangrijke constatering voor de stabiliteit van de bekledingslaag bij de Boonweg is dat er onder de bekledingslaag geen wateroverspanning wordt berekend. Voor een wateroverspanning onder de kleibekleding is de verzadigde doorlatendheid van de bekledingslaag met bodemstructuur te groot in verhouding tot de verzadigde doorlatendheid van de zandkern. Door de afwezigheid van een wateroverspanning kan de kleilaag niet worden opgedrukt.

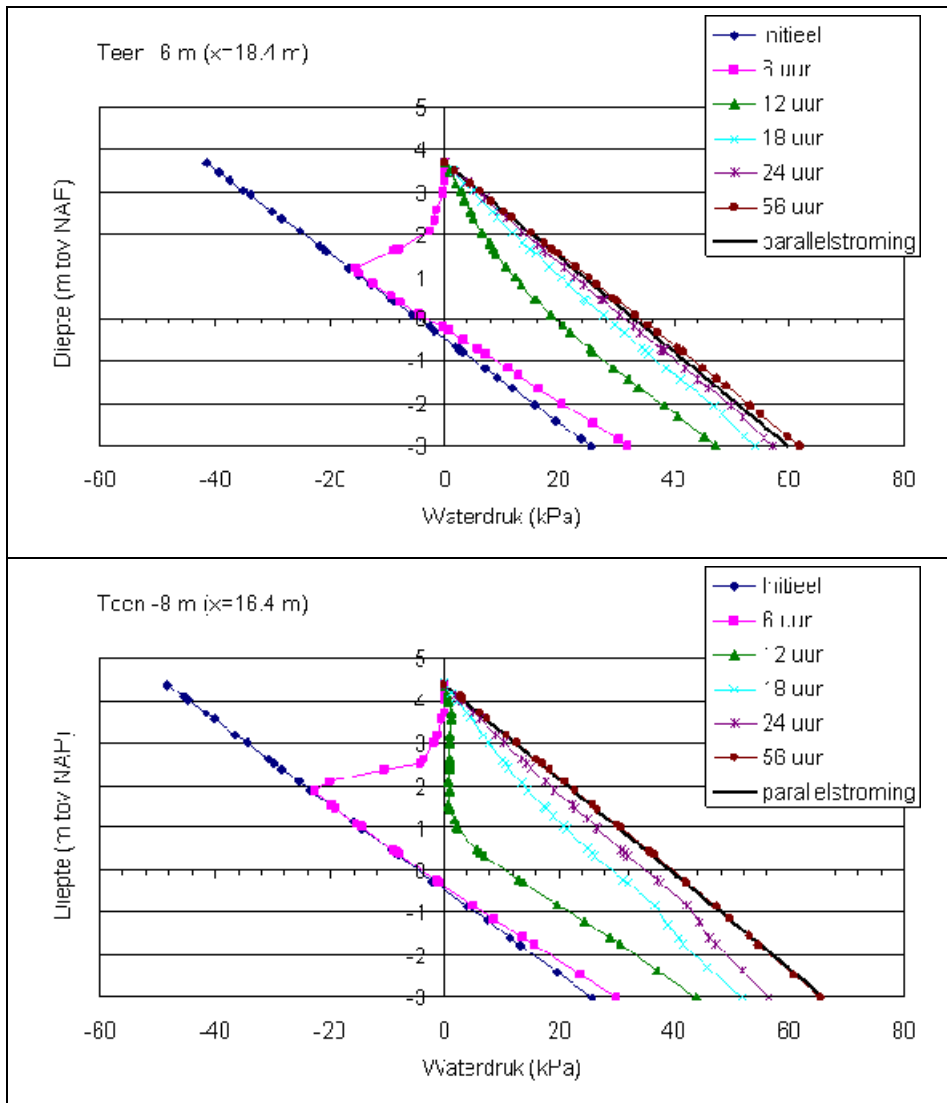
Een tweede belangrijk constatering is dat de bekledingslaag binnen afzienbare tijd, minder dan 2 uur, volledig is verzadigd. Het waterspanningsverloop in de laag is dan echter nog niet zodanig dat een evenwijdig aan het talud lopende grondwaterstroming optreedt. Dit gebeurt veel later en begint onderaan het talud. Pas met verloop van tijd neemt het taludgedeelte met evenwijdige stroming toe. Na 56 uur continu aanbod van water is dit voor de Boonweg ongeveer de helft van het talud.

Op het taludgedeelte waar de stroming evenwijdig is aan het talud en waar het water zelfs uittreedt, is er geen infiltratie meer. Infiltratie treedt alleen nog op bovenaan het talud. De totale opnamecapaciteit van het talud neemt door dit proces af.

Vanaf een bepaald moment, voor de Boonweg tussen de 18 en 24 uur, begint ter plaatse van de teen water uit het talud te treden. Deze situatie is zeer ongunstig voor de stabiliteit van de bekledingslaag, zelfs ongunstiger dan de stroming evenwijdig aan het talud waarvan bij het Edelman – Joustra criterium wordt uitgegaan. Deze situatie is eveneens ongunstig voor de stabiliteit van de individuele korrels. Bij de aanwezigheid van doorgaande scheuren in de bekleding, of bij mol- of konijnenholen tot in de zandkern, kan bij een voldoende geconcentreerde stroming zand worden meegevoerd.

De ongunstige situatie van een grondwaterstroming in de bekledingslaag evenwijdig aan het talud, of zelfs buitenwaarts gericht, treedt nog niet direct op als de verzadiging 100% is geworden. Het optreden van deze ongunstige situatie start onderaan het talud en breidt zich met verloop van tijd uit naar boven. Dit proces is zichtbaar gemaakt in de navolgende grafieken. Het waterspanningsverloop tussen het maaiveld en NAP -3 m is voor 5 vertikalen op een onderlinge afstand van 2 m weergegeven in Figuur 4.30. In elke grafiek staat voor verschillende tijden (initieel, 6 uur, 12 uur, 18 uur, 24 uur en 56 uur) het waterspanningsverloop gegeven. Daarnaast staat het drukverloop gegeven voor het geval dat er een stroming parallel aan het taludoppervlak zou zijn. De eerste vertikaal is ter plaatse van de teen ($x=24.4$ m), de laatste op een horizontale afstand van 8 m van de teen ($x=16.4$ m). Het taludhoogteverschil tussen de vertikalen is telkens circa 0.65 m.





Figuur 4.30 Waterspanningsverloop in de diepte voor 5 vertikalen vanaf de teen tot circa 1/3 van het talud.

In de grafieken is met een dikke zwarte lijn aangegeven wat de drukverdeling zou zijn bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. In de eerste grafiek wordt deze drukverdeling binnen 6 uur bereikt. Na 6 uur wordt de druk hoger, wat duidt op een verhang het talud uit. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de eerste vertikaal ($X=24.4$ m) net 0.2 m in de berm is genomen, hetgeen de vergelijking vertroebelt.

In de tweede vertikaal ($x=22.4$ m) op een taludhoogte van 0.65 m boven teenniveau wordt de parallelstroomdrukverdeling bereikt binnen 12 uur. Daarna neemt de druk verder toe wat duidt op een uittredend verhang.

In de derde vertikaal ($x=20.4$ m) op een taludhoogte van 1.35 m boven teenniveau wordt de parallelstroomdrukverdeling bereikt binnen 18 uur, waarna de druk nog slechts gering toeneemt.

In de vierde vertikaal ($x=18.4$ m) op een taludhoogte van 2.03 m boven teenniveau wordt de parallelstroomdrukverdeling bereikt binnen 24 uur. De druk neemt daarna tot 56 uur nauwelijks meer toe.

In de vijfde vertikaal ($x=16.4$ m) op een taludhoogte van 2.71 m boven teenniveau wordt de parallelstroomdrukverdeling bereikt binnen 56 uur.

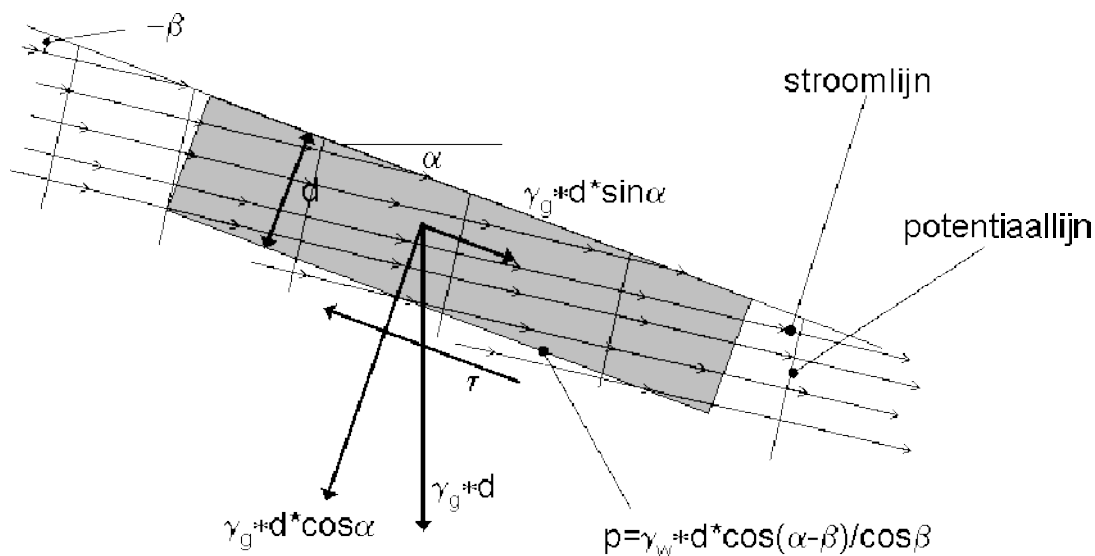
Uit de analyse van de drukverdelingen blijkt dat voor het bereiken van de aanname van de waterspanningen bij het Edelman Joustra criterium in dit geval relatief veel tijd nodig is. Zelfs na 48 uur wordt nog niet langs het hele talud voldaan aan deze aanname van parallelle stroming. Hier tegenover staat dat nabij de teen de waterspanningssituatie ongunstiger is.

5 Predictie afschuiven

5.1 Analytisch model Edelman Joustra

Vanwege de complexiteit van het stroombeeld en het daarmee samenhangende waterdrukverloop in en onder de kleibekleding is de analytische methode voor het bepalen van de stabiliteit volgens Edelman – Joustra minder goed bruikbaar (Figuur 4.29). Welliswaar is de methode analytisch geschikt gemaakt voor het bepalen van de stabiliteit bij een stromingsrichting onder een hoek met het talud, het is echter nog niet mogelijk om een verloop van deze stromingsrichting over het talud op een goede manier mee te nemen.

Voor de predictie Delfzijl is de formule van Edelman- Joustr uitgebreid met een stromingshoek β . Deze hoek is gedefinieerd als de hoek tussen de stroomrichting en de taludhelling, positief als de stroming het talud in is gericht (Figuur 5.1).

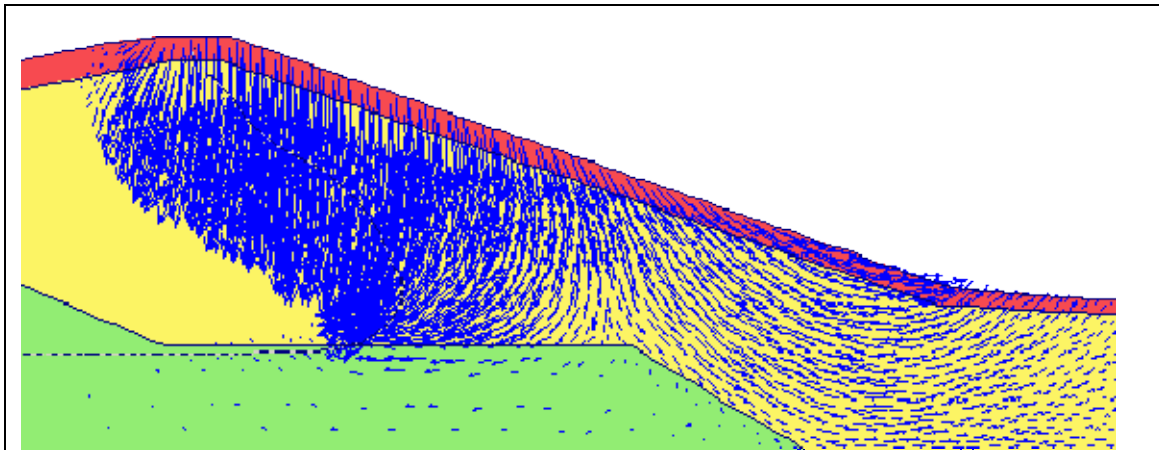


$$\frac{\tan \phi \cdot d \left(\gamma_{\text{grond}} \cos \alpha - \gamma_{\text{water}} \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \right) + c}{d \gamma_{\text{grond}} \sin \alpha} \geq 1$$

Figuur 5.1 Schematische weergave stroming onder een hoek β met de taludhelling en de hierop aangepaste formule van Edelman - Joustra.

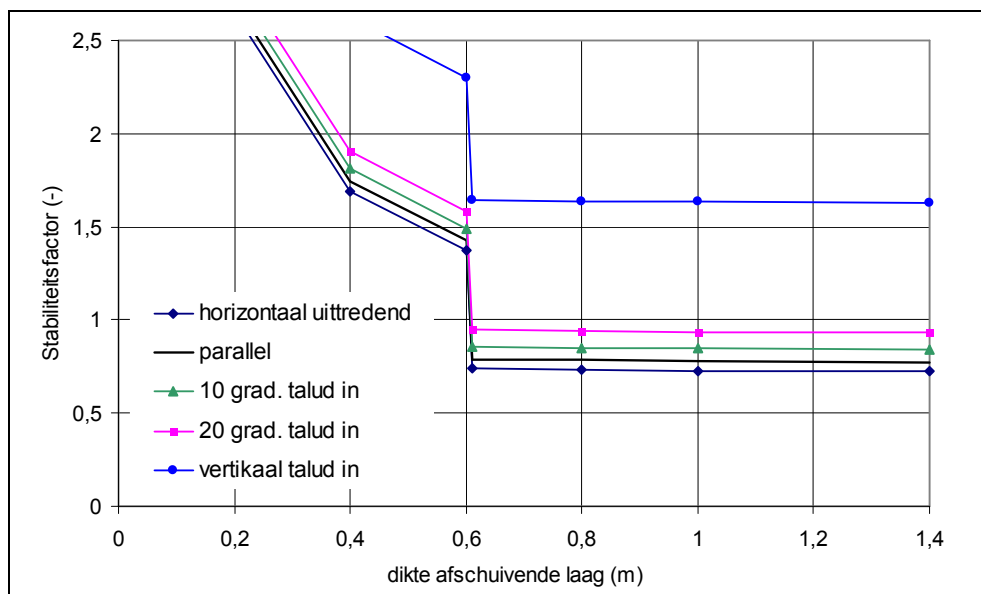
De formule geldt voor een hoek β tussen $-\alpha$ (horizontale uitstroming) en $90^\circ - \alpha$ (vertikale instroming).

In het stroombeeld 24 uur na aanvang van de infiltratie is te zien dat de hoek β varieert van $90^\circ - \alpha$ (loodrecht naar beneden) bovenaan het talud naar 0° (parallel) op een hoogte van circa 15% van het talud en naar 10° (uittredend) onderaan het talud (Figuur 5.2).



Figuur 5.2 Stroombeeld 24 uur na aanvang infiltratie

Voor het theoretische geval van een oneindig lang talud met overal een gelijke hoek β is de voor stroomrichting aangepaste formule uit Figuur 5.1 toegepast. Voor de sterkte parameters van de kleibekleding is het gemiddelde pieksterkte aangenomen ($c'=2.4$ kPa en $\phi=30.7^\circ$) en voor de zandkern $c'=0.1$ kPa en $\phi=30^\circ$. De parameters voor de kleibekleding gelden voor de bovenste 0.6 m, daaronder gelden de parameters voor de zandkern. Het resultaat van de formule staat in onderstaande figuur.



Figuur 5.3 Stabieleitsfactor (-) tegen dikte afschuivende laag (m) voor verschillende hoeken van grondwaterstroming

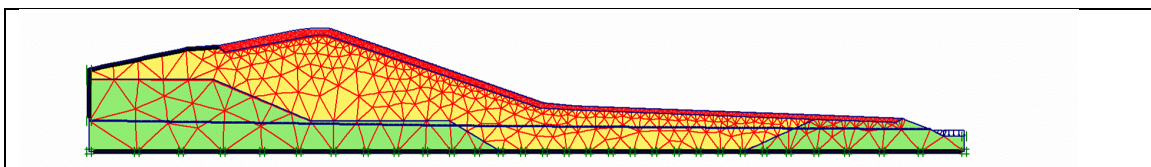
De knik bij 0.6 m geeft de grens aan tussen de kleibekleding (met enige cohesie) en de zandkern (zonder cohesie).

Voor de bovenste circa 50% van het talud is de stromingsrichting zodanig steil het talud in dat de bekleding stabiel is, ondanks de volledige verzadiging van bekleding en een deel van de zandkern. Onderaan het talud daalt de stabieleitsfactor onder de 1, waarbij afschuiven net onder de kleibekleding kritisch is. Omdat de gebruikte formule voor een oneindig lang talud is met constante parameters (sterkte en stroming/ waterduk) is het resultaat uit bovenstaande figuur niet nauwkeurig.

5.2 PLAXIS

De stabiliteit van de bekleding is bepaald met het eindige elementen methode programma PLAXIS, waarbij de waterspanningen zijn berekend met de PlaxFlow module die binnen PLAXIS werkt. Het is hierdoor niet meer nodig om de uitvoer van PlaxFlow te schematiseren in PLAXIS, zoals bij de predictie van Delfzijl is gedaan. De berekening is uitgevoerd met PLAXIS versie 8.6. build 608.

De berekening is uitgevoerd met het 15-knoops element. De mesh (Figuur 5.4) is in de bekledingslaag zodanig verfijnd dat hier een dubbele laag elementen aanwezig is.



Figuur 5.4 Mesh PLAXIS

Voor de keuzes omtrent grondparameters wordt verwezen naar hoofdstuk 3. Er is uitgegaan van gemiddelde parameters en voor de wrijvings eigenschappen c' en ϕ' is uitgegaan van de pieksterkte. Een samenvatting van de gebruikte parameters staat in onderstaande tabel.

Laag	Type	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{ref} [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]
Zandkern	Gedraineerd	18	21	8000	0,1	30
Oude dijk/ oude toplaag zandige klei	Gedraineerd	19	20	5000	5	30
Kleibekleding	Gedraineerd	17,5	18,6	1200	2,4	30,7

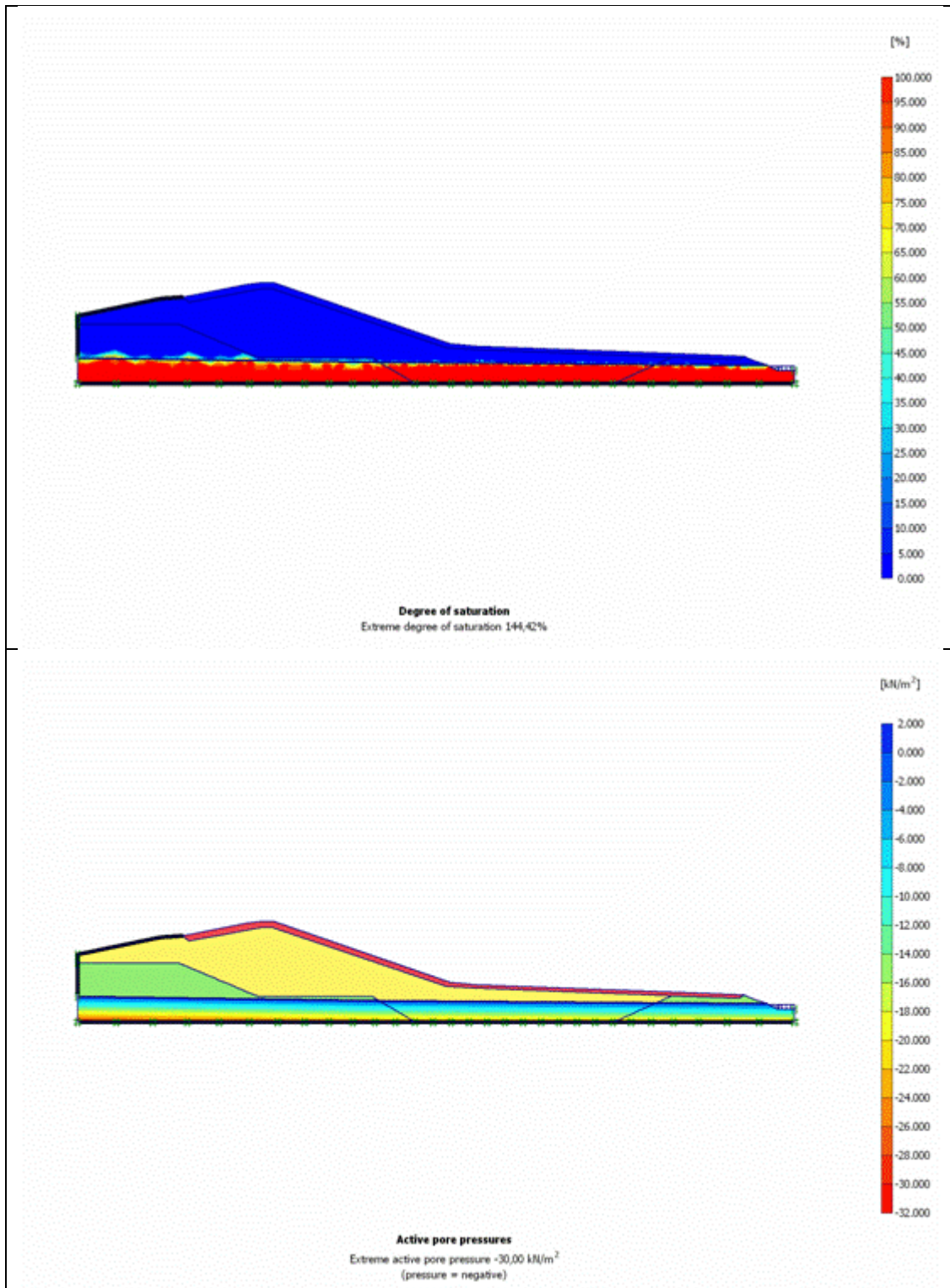
Tabel 5.1 Sterkte en stijfheidsparameters PLAXIS

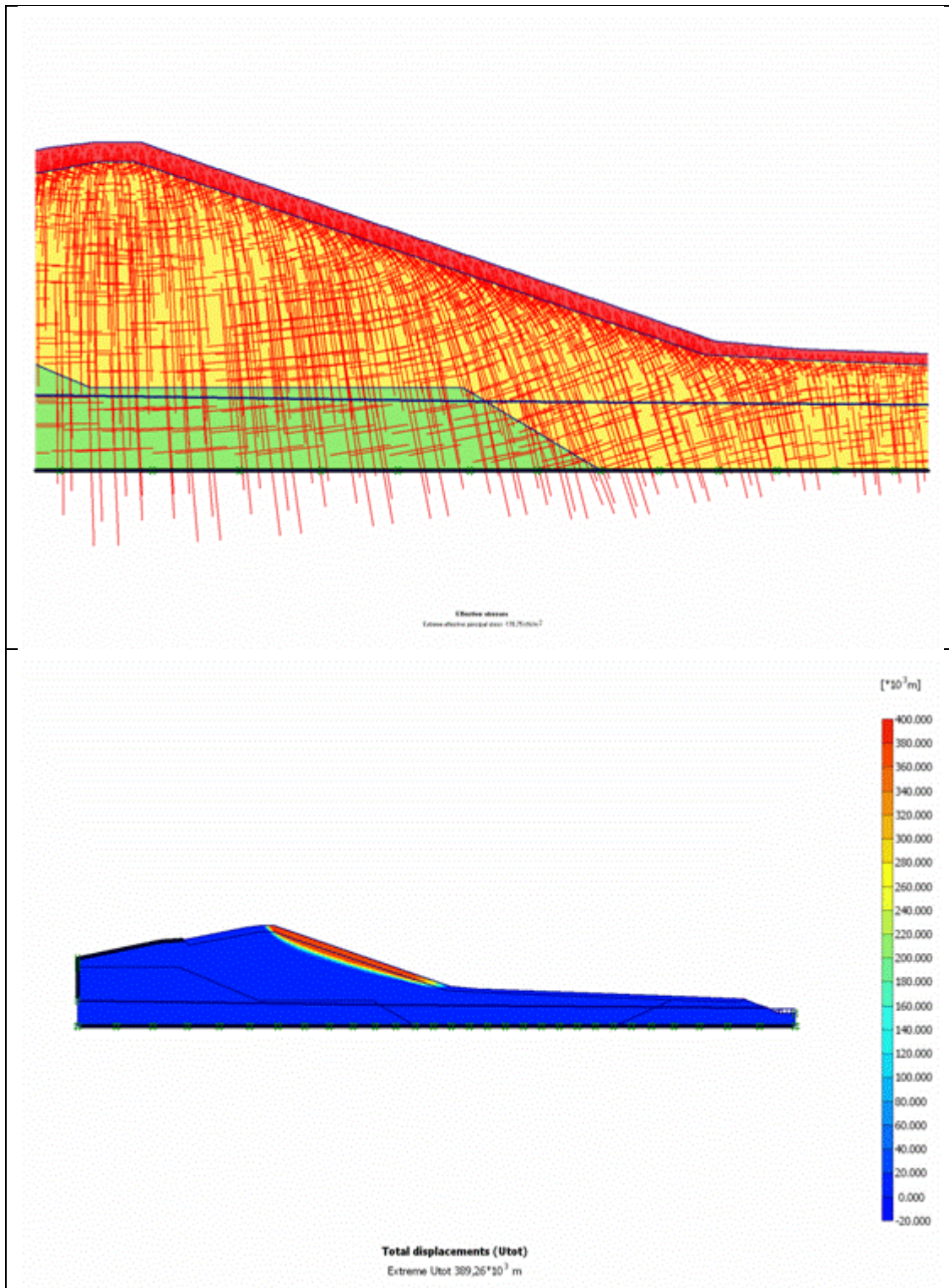
Bij de berekening zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Initiële spanningssituatie berekenen door aanbrengen van eigen gewicht ($\sum M_{\text{weight}} = 1$).
2. Infiltratie 1 min. Numeriek geeft het begin van infiltratie problemen, waardoor is gestart met een kleine tijdsinterval.
3. Infiltratie 6 uur
4. Infiltratie 8 uur
5. Infiltratie 10 uur
6. Infiltratie 12 uur
7. c/ϕ reductie (Msf) initieel
8. c/ϕ reductie (Msf) na 6 uur infiltratie
9. c/ϕ reductie (Msf) na 8 uur infiltratie
10. c/ϕ reductie (Msf) na 10 uur infiltratie

De berekening bij 10 uur infiltratie convergeert niet en leidt tot een zogenaamde 'soil body colapse'. Bij een toegestane globale fout van 2% in plaats van de default waarde van 1% convergeert de berekening wel. Bij dit resultaat geldt dus de kanttekening dat de nauwkeurigheid van het resultaat minder is dan bij de andere berekeningen. De berekening bij 12 uur infiltratie convergeert helemaal niet meer. Deze spanningssituatie leidt tot een mechanisme binnen de geometrie.

De resultaten van de berekening bij een oplopende infiltratietijd staan in de onderstaande figuren.



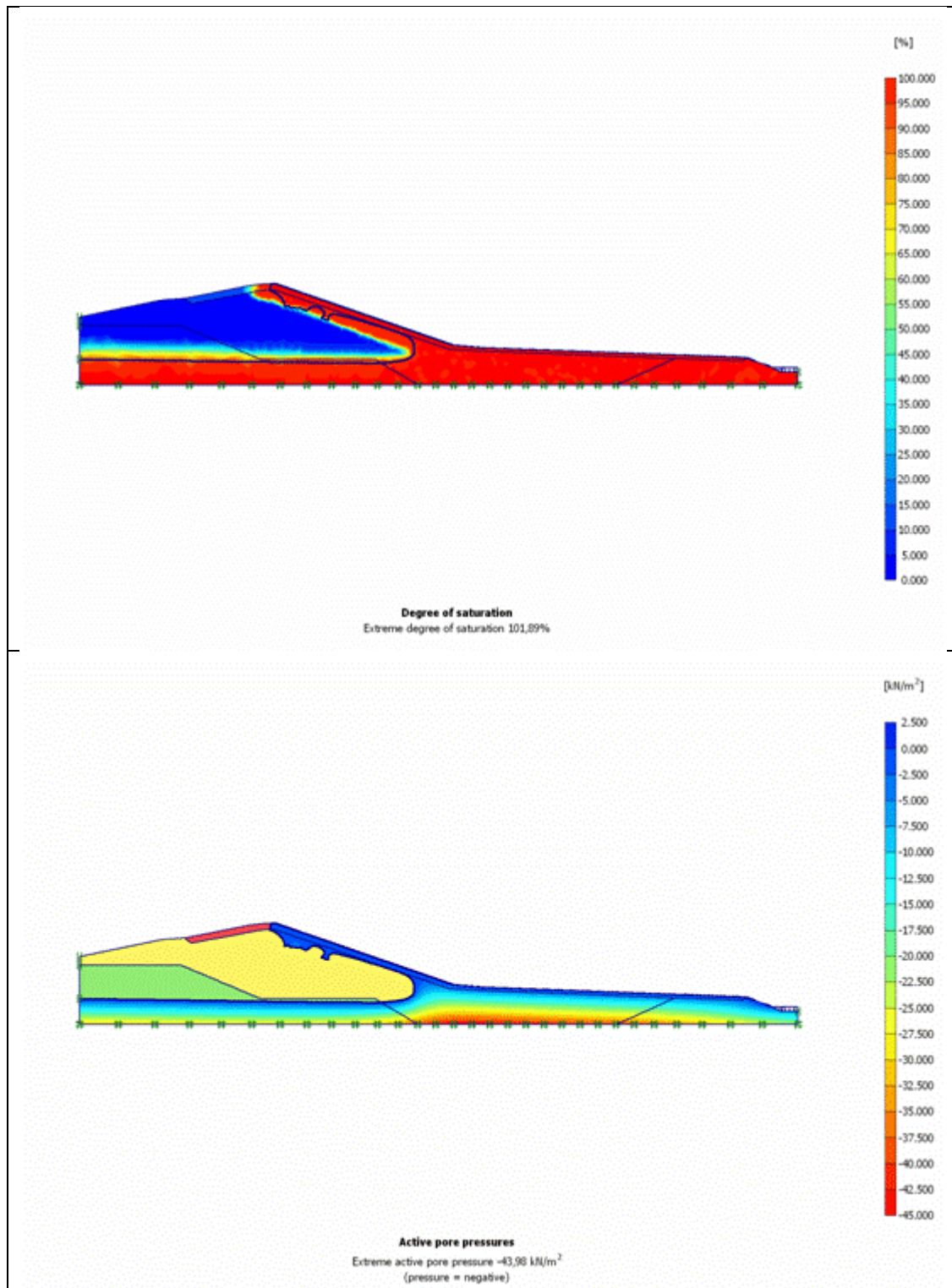


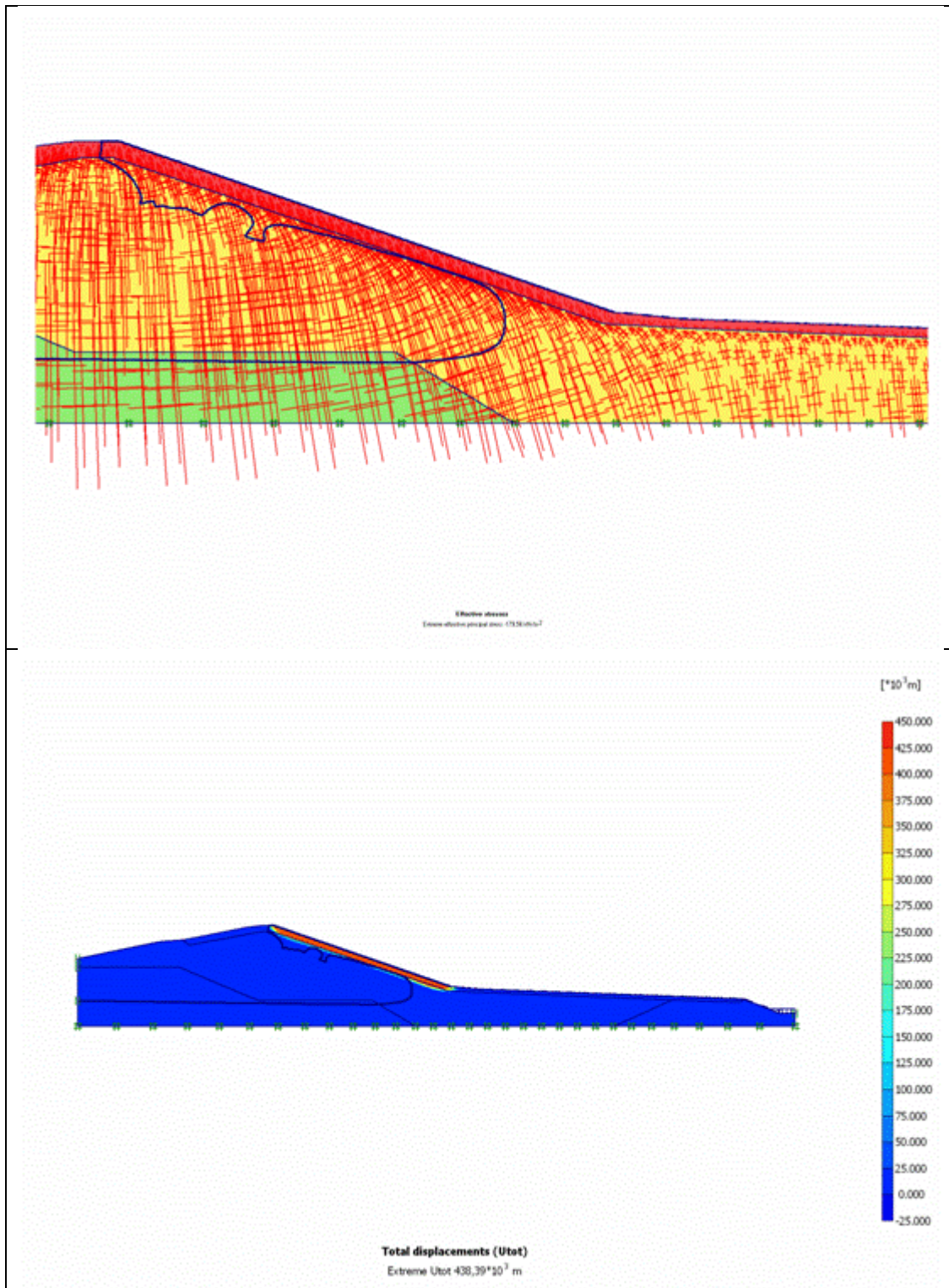
Figuur 5.5 Initiële situatie: verzadiging, waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.

Wat opvalt is dat in PLAXIS geen zuigspanningen worden meegenomen. Er wordt vanuit gegaan dat de grondeigenschappen onafhankelijk zijn van de zuigspanning en dus ook het watergehalte. Voor zand is dit een redelijke aanname, echter uit het grondonderzoek (Hoofdstuk 3) is gebleken dat de sterkte van de kleibekleding afneemt bij een toenemend watergehalte. De ingevoerde sterkte van de kleibekleding is die in verzadigde toestand.

De c/phi reductie procedure bij de initiële situatie leidt tot een mechanisme evenwijdig aan het talud, waarbij het afschuiven net onder de bekledingslaag plaatsvindt. Dit komt doordat de sterkte-eigenschappen van het zand net iets lager zijn dan van de bekledingslaag. De reductiefactor of stabiliteitsfactor is gelijk aan 1,74. De insteek van het mechanisme is ter plaatse van de kruin.

De situatie na 6 uur infiltratie staat in Figuur 5.6.



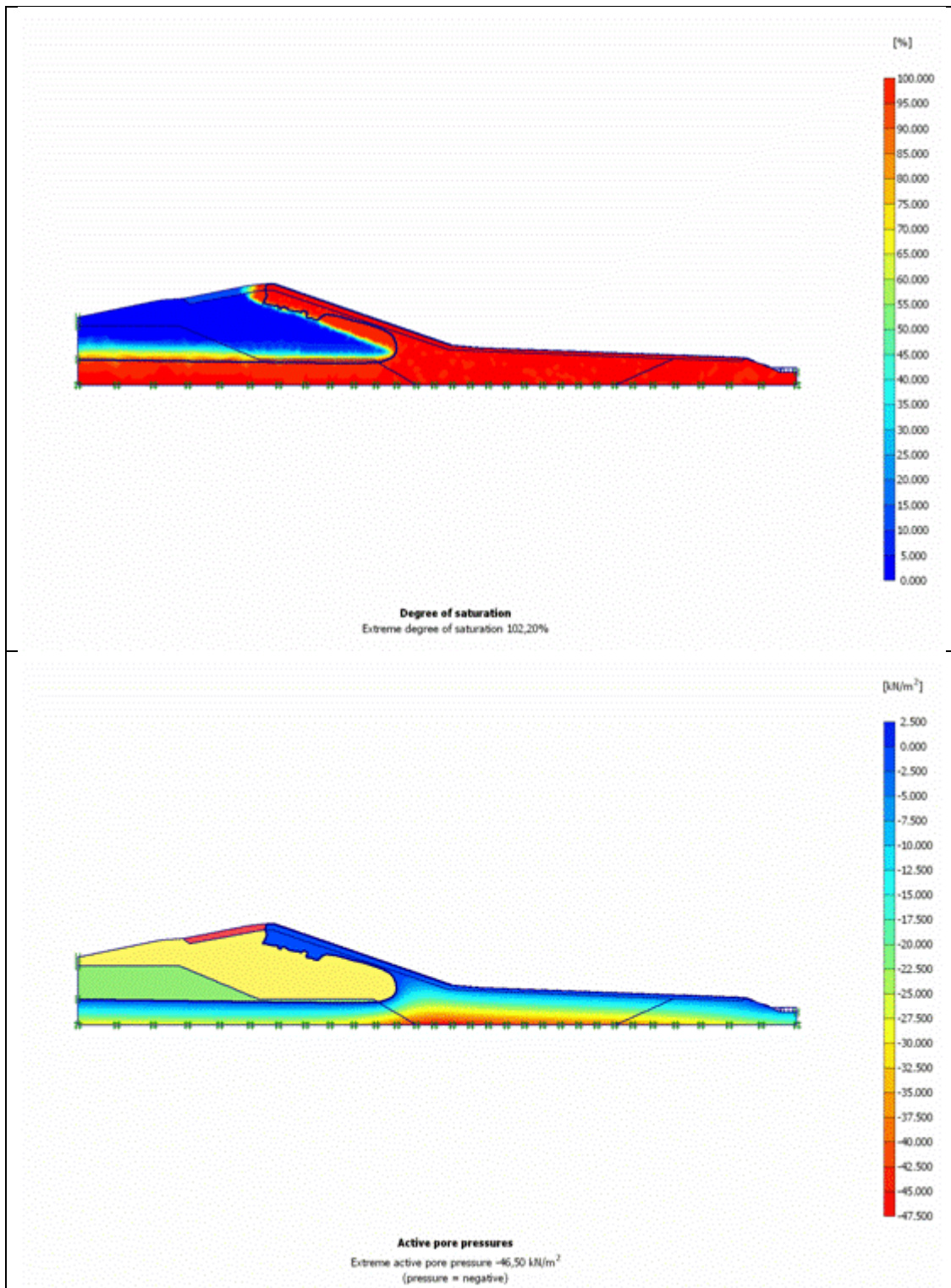


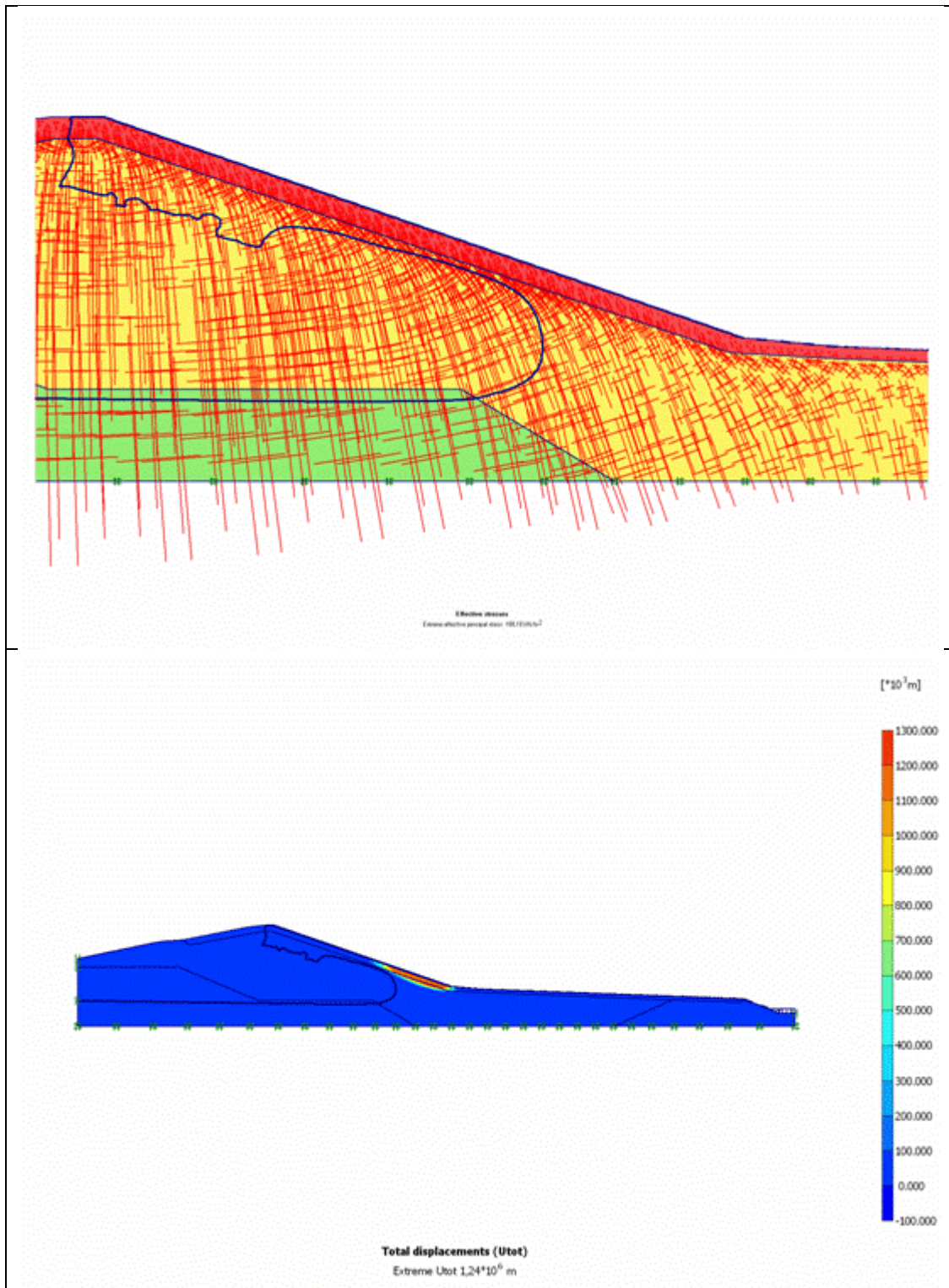
Figuur 5.6 Na 6 uur infiltratie: verzadiging waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.

Na 6 uur infiltratie is de bekleding en een deel van de zandkern volledig verzadigd. De waterspanningen zijn, met name bij de teen, toegenomen. Overigens wordt opgemerkt dat de waterspanningstoestand zonder de zuigspanningen, bijna, maar niet helemaal, overeenkomt met de uitkomst in Figuur 4.28. Het kleine verschil kan worden verklaard door het verschil in mesh en elementtype tussen de beide berekeningen. Het mechanisme bij de c/phi reductie is

wederom afschuiven net onder de kleibkleding langs het hele talud met een insteek nabij de kruin. De gevonden stabiliteitsfactor is met 10% afgenomen tot 1.58.

De situatie na 8 uur infiltratie staat in Figuur 5.7.

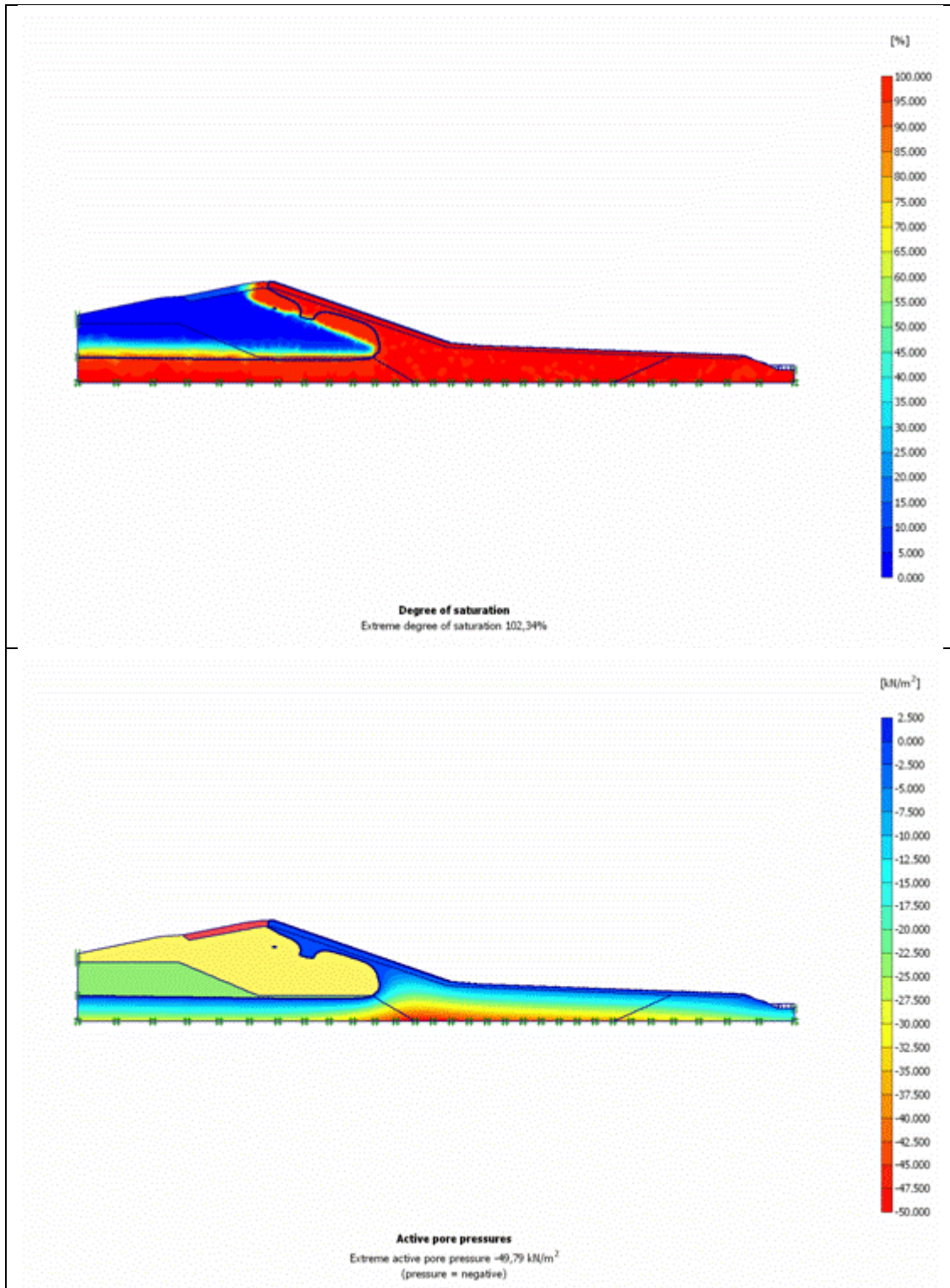


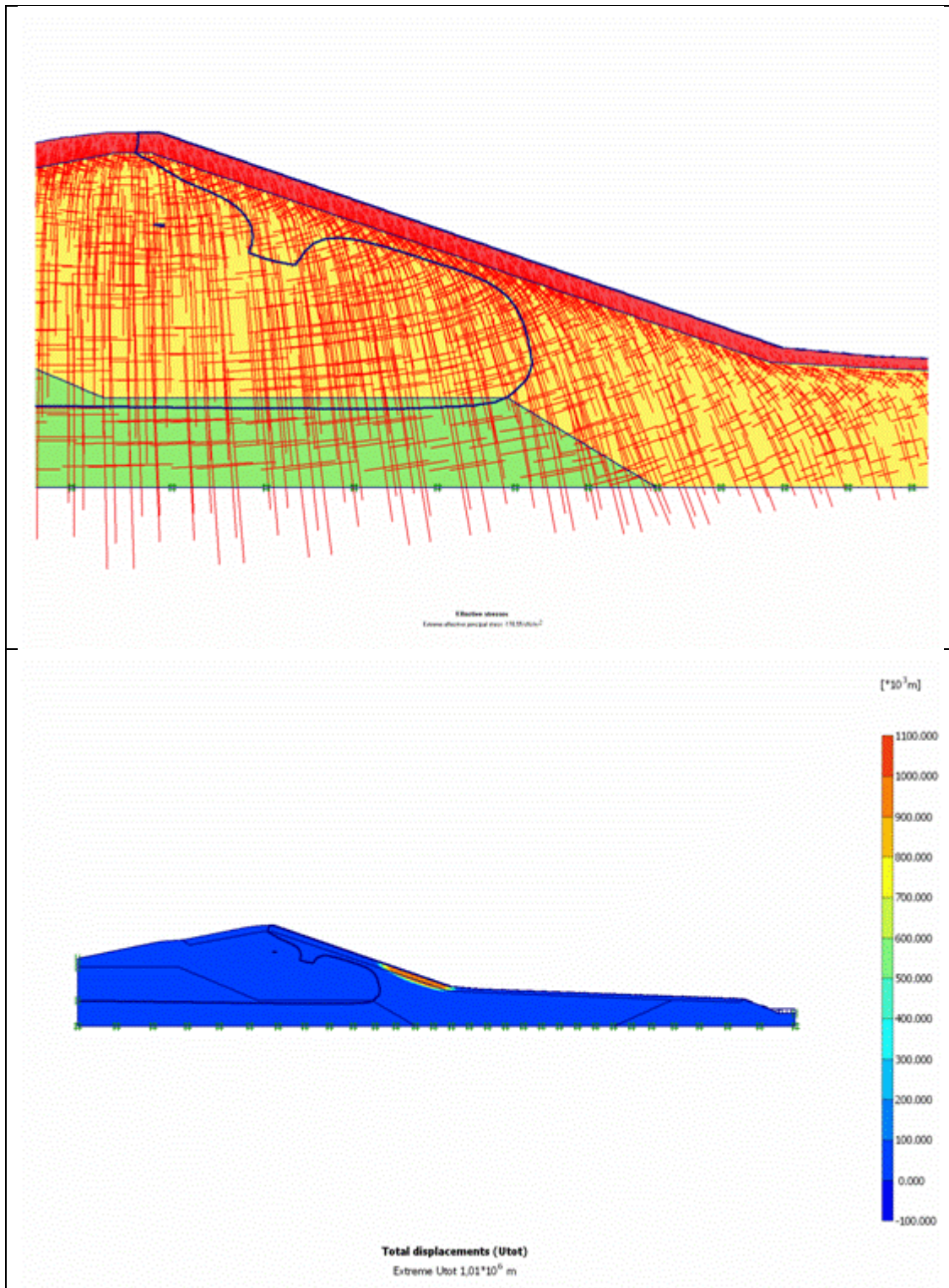


Figuur 5.7 Na 8 uur infiltratie: verzadiging waterspanningen, rotatie hoofdspanningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.

Na 8 uur infiltratie is wordt de spanningssituatie onderaan het talud relatief ongunstig, waardoor het mechanisme bij de c/phi-reductie zich hier concentreert. Het mechanisme beslaat alleen het afschuiven van het onderste 1/3 van het talud. De gevonden stabiliteitsfactor is ten opzichte van de initiële situatie met 16% gedaald tot 1.45.

De situatie na 10 uur infiltratie staat in Figuur 5.8.





Figuur 5.8 Na 10 uur infiltratie: verzadiging waterspanningen, rotatie hoofdsapningsrichting en mechanisme na c/phi-reductie.

Bij deze rekenresultaten wordt opgemerkt dat de globale toegestane fout is verhoogd naar 2% om de berekening te kunnen uitvoeren. Default staat deze toegestane fout op 1%. Na 10 uur infiltratie zijn de waterspanningen in de teen zodanig ongunstig geworden dat tijdens de c/phi reductie het mechanisme hier optreedt. De gevonden stabiliteitsfactor is ten opzichte van de initiele situatie met 26% gedaald tot 1.28.

De berekening voor 12 uur infiltratie convergeert niet meer. Nabij de teen wordt net onder de bekleding een aantal punten plastisch, waarna de berekening stopt. De stabiliteitsfactor na 12 uur infiltratie is kleiner dan 1. De verslechtering van de stabiliteit tussen de 10 en 12 uur gaat relatief snel.

Volgens de PLAXIS berekening zal tijdens de afschuifproef onderaan het talud ergens tussen 10 en 12 uur na aanvang van de infiltratie afschuiven optreden. De berekening is gemaakt met gemiddelde parameters (Hoofdstuk 3). Vanzelfsprekend geeft de onzekerheid over parameters, door de gevonden variatie hierin, ook onzekerheid over het tijdstip van bezwijken.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusie graserosie

- Ten aanzien van graserosie wordt geconcludeerd, dat gegeven een gesloten grasmat, bij alle overslagdebieten geen falen zal optreden, want de erosie blijft kleiner dan 0,10 m. Bij overslagdebieten tot 10 l/s/m zal geen erosie optreden; bij grotere overslagdebieten zal de erosie beperkt blijven tot orde 10 mm.

6.2 Conclusie infiltratie

- Volgens de berekeningen heeft een overslagsimulatie van 0.1 l/s per m een zeer beperkte invloed op de waterdruk in de dijk. De bekleding raakt niet verzadigd.
- Bij 1 l/s per m raakt de bekleding volledig verzadigd (geen zuigspanning meer). Doordat het water vertikaal het talud instroomt, blijft de waterdruk laag.
- Vanaf 10 l/s per m en meer wordt de bekleding volledig verzadigd en ontwikkelt zich vanaf de teen een zone langs het talud waar de stroming parallel langs het talud is gericht. Deze parallelle stroming is een aanname voor het stabiliteitscriterium van Edelman – Joustra. Bij 10 l/s per m is deze zone heel klein, bij 75 l/s per m is dit ongeveer een kwart van het talud.
- Bij 30 tot 50 l/s per m en meer infiltreert er geen water meer ter plaatse van de teen, maar sijpelt hier water naar buiten. Dit is een ongunstige situatie voor de stabiliteit van de bekleding en voor de stabiliteit van individuele korrels en aggregaten. De ontwikkeling van de waterdruk ter plaatse van de teen vermindert ook de infiltratiecapaciteit van het talud.
- De grondwaterstroming in de bovenste $\frac{3}{4}$ van het talud blijft tot en met 75 l/s per m een verticale component houden, wat een gunstige situatie is voor de stabiliteit van de bekleding.
- Bij een overslagdebiet tussen de 1 en 10 l/s per m en meer raakt de berm volledig verzadigd en ontwikkelt zich een hydrostatische drukverloop.
- Het afstromen van water gaat relatief langzaam. De waterspanningen als gevolg van de proef op de vorige dag zijn gedeeltelijk nog aanwezig. Bij de 75 l/s per m proef is het fretisch vlak in de dijk bij aanvang van de proef al een stuk hoger dan initieel is aangenomen.

6.3 Conclusie afschuiven

- Volgens de berekeningen zal bij de afschuifproef tussen 10 en 12 uur na aanvang van infiltratie afschuiven van de bekleding optreden. Het mechanisme wordt verwacht langs het onderste $\frac{1}{3}$ van het talud, met een uitredepunt ter plaatse van de teen.
- De waterspanning in de zandkern bouwt zich op vanuit de teen in de richting van de kruin.
- De zijdelingse afstroming van water tijdens de afschuifproef is aanzienlijk, maar kan worden ondervangen door het proefvak 30 m breed te maken. Dit is de breedte die eerder is toegepast bij de afschuifproef op de IJsselmeerdijk nabij de Ketelbrug.

6.4 Aanbevelingen

- De gedraineerde wrijvingsparameters zijn gebaseerd op CU-single stage triaxiaalproeven op proefstukken uit loodrecht op het talud gestoken monsters met een diameter van 66 mm. Vanwege de geringe afmeting wordt hierin het effect van de bodemstructuur niet goed meegenomen. De bodemstructuur bestaat (onder andere) uit droogte scheuren en glijvlakken die ontstaan bij swelling door neerslag en of vorst. Hierdoor worden aggregaten gevormd die groter zijn dan de proefmonsters voor het triaxiaalapparaat. Het verzwakkende effect van de voorkeursvlakken komt niet tot uiting in de kleine monsters en zou een

overschatting van de sterkte kunnen betekenen. Anderzijds is de verzadiging van het monster bij een triaxiaalproef bijna volledig door CO₂ doorstroming en het aanbrengen van backpressure, terwijl bij een overslagsituatie de verzadiging niet volledig zal zijn. In de aggregaten is dan nog een zuigspanning aanwezig waardoor de aggregaten sterker zijn dan wanneer helemaal verzadigd. Dit zou juist een onderschatting van de sterkte geven. Het is niet in te schatten welke van beide effecten de doorslag geeft. Het uitvoeren van simple shear testen met een grote diameter monsters zou hier uitsluitend over geven. Aanbevolen wordt om aan te haken bij de ontwikkelingen die op dit gebied worden ondernomen in het kader van SBW Werkelijke Sterkte.

- De drukopbouw in de bekleding is zeer belangrijk voor de stabiliteit van de bekleding. Deze kan op gelijke wijze als in Delfzijl (GeoDelft 2007-1) worden gemeten op twee plaatsen op het talud, op drie dieptes.
- Omdat de zandlaag onder de bekleding kritisch kan zijn met betrekking tot afschuiven van de bekleding wordt aanbevolen ook net onder de kleibekleding een tensiometer te plaatsen.
- Het afschuiven van de bekleding treedt op als de zandkern ter plaatse van de teen is verzadigd. Het verzadigen gebeurt in de richting van de teen naar de kruin, met een steil front. Door in de zandkern in een raai loodrecht op de dijk waterspanningsmeters te plaatsen kan de voortgang van dit front worden gemeten.
- Voor de controle van de randeffecten achteraf, wordt aanbevolen om ook precies op de rand van het proefvak een waterspanningsmeter in het zand te zetten.
- Het afschuiven zal volgens de predictie plaatsvinden langs de onderste 1/3 van het talud. Bij waarnemingen van afschuiven in het verleden is echter gezien dat de insteek van een mechanisme vaak aan de bovenkant van het talud optreedt. Het wordt daarom aanbevolen om de verplaatsingen van het hele talud te monitoren.
- Volgens de predictie zal afschuiven optreden op het grensvlak van de kleibekleding of net hieronder. Aanbevolen wordt om dit te controleren met behulp van het ingraven van kleikolommen. Door deze achteraf op te graven kan worden bepaald op welke diepte het glijvlak is opgetreden.
- Het is bij de afschuifproef belangrijk dat er een continu aanbod van water is op het talud. Onderaan het talud moet minimaal net nog wat water stromen. Op deze manier wordt voldaan aan de gehanteerde randvoorwaarde bij de berekeningen.

Referenties

Deltares 2008, SBW –Golfoverslagproeven Locatie Boonweg, Friesland, Rapportage van het grondonderzoek ten behoeve van de predictie Boonweg, CO-423891-0054 v01 definitief, mei 2008

GeoDelft 2007, SBW –Golfoverslagproeven Groningen en Friesland, Geotechnisch grondonderzoek, CO-423890-0014 v01 definitief, januari 2007

GeoDelft 2000, Toetsing Waddenzeedijken Hoofdonderzoek, CO-376710.109 v01 concept, augustus 2000

TAW 1999, Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, maart 1999

Den Rooijen 1992, Literatuuronderzoek doorlatendheid- korrelkarakteristieken. Gronmechnica Delft Rapport CO-317710/7

Bosman, G., 2007. Velocity and flow depth variations during wave overtopping. MSc-thesis Delft University of Technology.

GeoDelft 2007-1, SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 1D Evaluatie Delfzijl, Rapport CO-423891/35 december 2007

**Bijlage 1 Alterra – Inverse modellering van
verticale infiltratieproeven op de
Waddenzeedijk**

Inverse modellering van verticale-infiltratieproeven op de Waddenzeedijk

Modelsimulaties van veldmetingen aan de verticale doorlatendheid van de Waddenzeedijk en aanvullende laboratoriummetingen aan monsters van deze dijk, ter verkrijging van parameters voor modellering van overslagproeven op de dijk

R.F.A. Hendriks
J.J.H. van den Akker
E.W.J. Hummelink

Februari 2008

Inhoud

1	Inleiding	5
2	Laboratoriummetingen	7
2.1	Methoden	
2.1.1	Veldvocht- en poriëgehalten, volumieke massa	7
2.1.2	Verzadigde doorlatendheid	8
2.1.3	Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken	8
2.2	Resultaten	9
2.2.1	Veldvocht- en poriëgehalten, volumieke massa	9
2.2.2	Verzadigde doorlatendheid	10
2.2.3	Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken	11
3	Modelsimulaties	13
3.1	Methoden	13
3.2	Resultaten	17
4	Conclusies en aanbevelingen	19
4.1	Conclusies	19
4.2	Aanbevelingen	20
	Literatuur	23
	Bijlagen	25

1 Inleiding

Erosie van het binnentalud van dijken door overslaand water is één van de mogelijke oorzaken van het bezwijken van dijken. Infiltratiemetingen en PlaxFlow-berekeningen bij een overslagproef te Delfzijl hebben laten zien dat de modellering van infiltratie in de dijk niet klopt. Momenteel is het niet bekend op welk gebied de modellering mis gaat. Dit kan zijn bij de parameterbepaling, het onverzadigde stromingsmodel in PlaxFlow, de modellering van de grondlagen etc. Voor begin 2008 is een nieuwe golfoverslagproef gepland bij de Waddenzeedijk bij de Boonweg in Friesland. De Waddenzeedijk bij de Boonweg is in tegenstelling tot de dijk bij Delfzijl een zanddijk met een kleibekleding. De infiltratie door overslag kan hierbij wezenlijk anders verlopen, omdat er een sprong in doorlatendheid en stromingsgedrag kan zijn tussen de kleibekleding en de zandkern. Bij de kleidijk te Delfzijl is de kern zeer ondoorlatend ten opzichte van de gestructureerde bekledingslaag. Bij een zanddijk kan de doorlatendheid van de kern van gelijke orde zijn als de bekledingslaag of beter doorlatend zijn.

Ter voorbereiding van de golfoverslagproef bij de Boonweg zijn door GeoDelft in november 2007 in het binnentalud van de Waddendijk sleuven gegraven om de structuur van de kleibekleding en zandkern nader te beschouwen. Daarnaast zijn door GeoDelft grondmonsters gestoken (Begemannboringen) en infiltratieproeven uitgevoerd met buizen met een diameter van ca 40 en ca 50 cm tot op of in de zandkern. Door Alterra zijn monsters gestoken met een diameter van 19 cm voor de bepaling van verzadigde doorlatendheid en monsters voor de bepaling van de onverzadigde doorlatendheid en de waterretentiecurve. Met gebruikmaking van de meetresultaten zijn op twee van de infiltratieproeven door Alterra met SWAP modelsimulaties uitgevoerd.

De doelstelling van de modelsimulaties is het krijgen van meer inzicht in het infiltratieproces en het verkrijging van parameters voor modellering van overslagproeven op de dijk met behulp van PlaxFlow.

Dit verslag concentreert zich op het veld- en labonderzoek en de modelsimulaties die door Alterra zijn uitgevoerd.

2 Laboratoriummetingen

Alterra heeft een aantal laboratoriummetingen verricht aan ongestoorde monsters gestoken op twee locaties op de Waddenzeedijk nabij de Boonweg. De metingen betroffen:

- 1) bepaling van veldvocht- en poriëngehalte, en de volumieke massa;
- 2) bepaling van de verzadigde doorlatendheid;
- 3) bepaling van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek.

De twee locaties waren 'locatie West' en 'locatie Midden' zoals beschreven door dhr. G.A.M. Kruse in zijn verslag 'Overslagproef Boonweg: Beschrijving profielkuilen' (bijlage 1). Op beide locaties zijn profielkuilen gegraven en zijn verticale-doorlatendheidsproeven uitgevoerd door GeoDelft. De monsters voor het laboratoriumonderzoek zijn gestoken in de profielkuilen. Profielkuil 'locatie West' bevond zich op circa 4 m van de kruin en 16,5 m van de teen van de dijk. Profielkuil 'locatie Midden' was gesitueerd 5 m hellingopwaarts van de teen van de dijk. Er is gekozen voor deze twee locaties, omdat het een locatie nabij de kruin en een nabij de teen van de dijk betrof.

2.1 Methoden

Bij het steken van de verschillende monsters is uitgegaan van de profielopbouw op de twee plekken (zie bijlage 1). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen wortelzone, kleilagen onder de wortelzone en zandlaag onder de klei. De profielkuilen gingen niet dieper dan tot enige decimeters in de zandlaag. De diepste monsters zijn gestoken in de zandlaag. In profielkuil 'West' begon de zandlaag op 80 cm beneden bovenkant kuil. In profielkuil 'Midden' was dat op 50 cm beneden bovenkant kuil.

2.1.1 Veldvocht- en poriëngehalten, volumieke massa

In de wand van beide profielkuilen zijn horizontaal monsterringen van 100 cc inhoud en 5 cm diameter gestoken op verschillende diepten. Bij 'locatie West' betrof het acht diepten: 5-10, 15-20, 25-30, 35-40, 45-50, 55-60, 65-70 en 90-95 cm beneden bovenkant kuil. Bij 'locatie Midden' waren het zes diepten: 5-10, 15-20, 25-30, 35-40, 45-50 en 65-70 cm beneden bovenkant kuil.

Veldvochtgehalten en volumieke massa's zijn bepaald door weging van de monsters vóór en na drogen in een oven bij 105 °C. Vochtgehalten zijn bepaald door vergelijking van nat- en drooggewichten, volumieke massa's zijn bepaald uit de drooggewichten. Schattingen van de poriëngehalten zijn verkregen door de volumieke massa's te delen door de soortelijke massa van de vaste delen van de monsters. Voor de laatste is 2650 kg m⁻³ genomen, de standaardwaarde van de soortelijke massa van de minerale delen van een bodem. Hierbij is geen rekening gehouden met het organischestofgehalte en de samenstelling van de minerale delen van de monsters. De verkregen waarden zijn daarom slechts indicatief.

2.1.2 Verzadigde doorlatendheid

Er waren tien bepalingen van de verzadigde doorlatendheid begroot. Per profielkuil zijn vijf ongestoorde monsters genomen, waarvan vier monsters in verticale richting voor bepaling van de verticale verzadigde doorlatendheid (de belangrijkste doorlatendheid voor dit onderzoek) en één in horizontale richting. De vier verticale zijn gestoken als duplo's op twee diepten. De monsters zijn gestoken met PVC-ringen met een binnendiameter van 19 cm en hoogte van 10 cm. Bij 'locatie West' waren de twee diepten voor verticale doorlatendheid 25-35 en 50-60 cm beneden bovenkant kuil. De diepte van het horizontale monster bedroeg 45-65 cm beneden bovenkant kuil. Voor 'locatie Midden' bedroegen deze diepten respectievelijk 5-15, 35-45 en 25-45 cm beneden bovenkant kuil. Omdat de kleilaag van 'West' dikker was dan die van 'Midden' is in 'West' de kleilaag onder de wortelzone op twee diepten bemonsterd. Op grond van visuele waarnemingen is aangenomen dat de bepalingen voor de wortelzone van 'Midden' ook bruikbaar waren voor de wortelzone van 'West'. Er zijn geen monsters genomen van de zandlaag, omdat Geodelft verzadigde doorlatendheidsbepalingen van o.a. deze laag ging uitvoeren op monsters gestoken met de Begemann-methode.

In het lab is aan de monsters de verzadigde doorlatendheid bepaald met de 'constant head method' (Stolte et al., 1992). Dit is eerst gedaan aan de veldvochtige monsters. Daarna zijn de monsters 48 uur verzadigd in een bak met water waarna de doorlatendheidsbepaling is herhaald aan de verzadigde monsters. In één monster ('West' 25-35 cm) liep een gat van boven naar beneden door het monster. Aan dit monster is de doorlatendheid na verzadiging bepaald met open gat en met dichtgemaakte gat.

2.1.3 Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken

Er waren eveneens tien bepalingen van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken begroot. Per profielkuil zijn vijf ongestoorde monsters in verticale richting genomen, waarvan vier monsters in de kleilaag en één in de zandlaag. De vier in de kleilaag zijn gestoken als duplo's op twee diepten. Deze diepten kwamen overeen met de diepten van de monsters voor de bepaling van de verzadigde doorlatendheid. De monsters zijn gestoken met PVC-ringen met een diameter van 10,3 cm en hoogte van 8 cm. Bij 'locatie West' waren de twee diepten in de kleilaag 25-33 en 50-58 cm beneden bovenkant kuil. De diepte in de zandlaag bedroeg 95-103 cm beneden bovenkant kuil. Voor 'locatie Midden' bedroegen deze diepten respectievelijk 5-13, 35-43 en 75-83 cm beneden bovenkant kuil. Net als bij de verzadigde verticale doorlatendheid zijn voor 'West' twee diepten bemonsterd in de kleilaag onder de wortelzone. Ook bij deze bepalingen is aangenomen dat de waarden voor de wortelzone van 'Midden' bruikbaar waren voor de wortelzone van 'West'.

In het lab is aan de monsters de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek bepaald met de 'verdampingsmethode' (Stolte et al., 1992). Hiertoe zijn de monsters eerst verzadigd waarna ze op de meetopstelling zijn gezet. De meetresultaten van de verdampingsmethode moeten eerst worden bewerkt voordat ze de gewenste karakteristieken geven. Voor gebruik in het model SWAP moeten deze karakteristieken worden beschreven door een wiskundige vergelijking voor elk van de twee karakteristieken. Deze vergelijkingen zijn de VanGenuchten-functies waarvan de zes beschrijvende variabelen input zijn voor SWAP. De

zes variabelen zijn verkregen door fitten van de functies aan de meetresultaten. Bewerking van de ruwe meetresultaten en fitten van de VanGenuchten-parameters zijn uitgevoerd met de computercode Appia 2.02 (DLO Staring Centrum, 1998).

2.2 Resultaten

In deze paragraaf zijn de resultaten gegeven als waarden van de verschillende grootheden in tabelvorm. In de separate bijlage 'Labmeting_Alterra_Waddijk.xls' zijn alle meetresultaten in een spreadsheet opgenomen. Hieronder ook de grafische resultaten van de fitprocedere van de VanGenuchtenparameters voor de beschrijving van waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken.

2.2.1 Veldvocht- en poriëgehalten, volumieke massa

De resultaten van de bepalingen van veldvocht- en poriëgehalten, en volumieke massa zijn gegeven in tabellen 1a en 1b.

Tabel 1a Meetresultaten van volumieke massa en veldvocht- en poriëgehalten voor locatie 'West'

Laag	Diepte	Volumieke dichtheid	Volumefractie vocht	Volumefractie poriën
(cm)	(cm)	(g cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)
5-10	7,5	1,17	0,30	0,56
15-20	17,5	1,42	0,27	0,46
25-30	27,5	1,51	0,29	0,43
35-40	37,5	1,57	0,28	0,41
45-50	47,5	1,56	0,28	0,41
55-60	57,5	1,53	0,28	0,42
65-70	67,5	1,56	0,26	0,41
90-95	92,5	1,54	0,07	0,42

Tabel 1b Meetresultaten van volumieke massa en veldvocht- en poriëgehalten voor locatie 'Midden'

Laag	Diepte	Volumieke dichtheid	Volumefractie vocht	Volumefractie poriën
(cm)	(cm)	(g cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)
5-10	7,5	1,30	0,38	0,51
15-20	17,5	1,45	0,30	0,45
25-30	27,5	1,52	0,27	0,43
35-40	37,5	1,34	0,34	0,49
45-50	47,5	1,48	0,25	0,44
65-70	67,5	1,50	0,09	0,43

Door het niet meenemen van het organischestofgehalte bij de berekening van het poriëgehalte is dit gehalte eerder onderschat dan overschat.

2.2.2 Verzadigde doorlatendheid

De resultaten van de bepalingen van de verzadigde doorlatendheid aan veldvochtige en verzadigde monsters zijn gegeven in tabellen 2a en 2b.

Tabel 2a Meetresultaten van verzadigde doorlatendheid voor locatie 'West'

Laag (cm)	Monster	Verzadigde doorlatendheid (cm d ⁻¹)			
		veldvochtig	verzadigd	%-veldv./verz.	gemiddeld
25-35 verticaal	B1a	5065	4865	104	-
	B1a dichte gang	-	159	-	-
	B1b	281	234	121	-
	Gemiddeld	2673	2550	105	2612
50-60 verticaal	B2a	217	224	97	-
	B2b	88	70	125	-
	Gemiddeld	153	147	104	150
45-65 horizontaal	Bh	35	32	109	34

Tabel 2b Meetresultaten van verzadigde doorlatendheid voor locatie 'Midden'

Laag (cm)	Monster	Verzadigde doorlatendheid (cm d ⁻¹)			
		veldvochtig	verzadigd	%-veldv./verz.	gemiddeld
5-15 verticaal	M1a	845	1439	59	-
	M1b	875	905	97	-
	Gemiddeld	860	1172	74	1016
35-45 verticaal	M2a	100	141	141	-
	M2b	143	139	71	-
	Gemiddeld	122	140	87	131
25-45 horizontaal	Mh	179	76	233	128

Opvallend zijn de grote doorlatendheden in de orde van honderden tot zelfs duizenden cm.d⁻¹ wat erg hoog is voor kleigrond. Dit duidt op invloed van macroporiën op de doorlatendheid. Het verschil tussen veldvochtig en verzadigd is voor 'West' over het algemeen niet erg groot. Dit duidt op de invloed van macroporiën die niet dichtzwellen bij verzadiging van de monsters. Voor de meeste monsters is de doorlatendheid van veldvochtig iets groter. Bij 'Midden' is het omgekeerde het geval. Verzadigd is meestal groter dan veldvochtig. Ook zijn de verschillen hier groter dan bij 'West'. De bovenste lagen, tot 35 cm diepte, zijn beduidend beter doorlatend dan de wat diepere lagen. De opvallend lagere horizontale doorlatendheid op wat grotere diepte van monster Bh wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een voornamelijk verticale georiënteerdheid van de macroporiën op deze diepte.

2.2.3 Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken

De resultaten van de bepalingen van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken in termen van de VanGenuchten-parameters zijn gegeven in tabellen 3a en 3b.

Tabel 3a Gefitte VanGenuchtenparameters voor locatie 'West'

Laag (cm)	Monster	VanGenuchtenparameters					
		Θ_{res}	Θ_{sat}	α	n	K_{sat}	l
25-33	B1a	0,150	0,390	0,0145	2,087	0,73	-0,726
	B1b	0,100	0,420	0,0173	1,819	2,67	-0,041
	Gemiddeld	0,125	0,405	0,0159	1,953	1,70	-0,384
50-58	B2a	0,130	0,385	0,0157	2,197	0,21	-1,472
	B2b	0,150	0,360	0,0135	2,553	0,09	-1,589
	Gemiddeld	0,140	0,373	0,0146	2,375	0,15	-1,531
95-103	Bz	0,032	0,320	0,0183	4,821	0,43	-1,100

Tabel 3b Gefitte VanGenuchtenparameters voor locatie 'Midden'

Laag (cm)	Monster	VanGenuchtenparameters					
		Θ_{res}	Θ_{sat}	α	n	K_{sat}	l
5-13	M1a	0,000	0,480	0,0134	1,389	5,45	1,000
	M1b	0,000	0,455	0,0077	1,377	1,15	0,000
	Gemiddeld	0,000	0,468	0,0106	1,383	3,30	0,500
35-43	M2a	0,125	0,450	0,0174	2,156	0,40	-1,500
	M2b	0,150	0,391	0,0135	2,250	0,35	-1,100
	Gemiddeld	0,138	0,421	0,0155	2,203	0,38	-1,300
75-83	Mz	0,032	0,315	0,0133	4,645	0,31	-1,000

Θ_{sat} (verzadigd volumetrisch vochtgehalte) is een goede maat voor het poriënvolumegehalte van uitsluitend de bodemmatrix. Dat deze waarden altijd beduidend lager zijn dan de (onderschatte) poriënvolumegehalten van tabel 1 duidt op het voorkomen van macroporiënvolumen die in de bepalingen van tabel 1 wel zijn meegenomen, maar in de Θ_{sat} -waarden niet. De gefitte K_{sat} (verzadigde doorlatendheid) waarden zijn evenals Θ_{sat} uitsluitend representatief voor de bodemmatrix. Effecten van macroporiën zitten niet in deze bepaling besloten. Dat verklaart de enorme verschillen van een factor 300 tot ruim 6000 tussen waarden van de verzadigde doorlatendheid van tabel 2 en deze K_{sat} -waarden. Dit bevestigt het grote belang van de invloed van de macroporiën op de doorlatendheid van deze kleidekken. K_{sat} representeert de 'bodempysische' verzadigde doorlatendheid, terwijl de waarden van tabel 2 de 'hydrologische' verzadigde doorlatendheden representeren. De lage waarden van K_{sat} worden, vooral voor de zandlaag, ondersteund door de resultaten van de doorlatendheidsmetingen van GeoDelft (bijlage 3). Op grond van de lage verticale doorlatendheden van de zandlaag en de relatief hoge waarden van de verticale en horizontale doorlatendheden van de kleilaag mag worden aangenomen dat neerslag op het talud van de dijk verticaal door de kleilaag wordt afgevoerd tot op de zandlaag en vervolgens in de langsrichting van de helling door de kleilaag over de zandlaag naar de teen van de dijk.

3 Modellsimulaties

Er waren twee inverse modelleringen van verticale-infiltratieproeven begroot. De twee proeven nabij de twee profielkuilen die zijn bemonsterd zijn gemodelleerd. Dit betreft proef 'Buis 1' bij profielkuil 'West' en proef 'Buis 5' bij profielkuil 'Midden' (bijlage 2).

3.1 Methodes

Inverse modellering is uitgevoerd met het procesgeoriënteerde model SWAP (Kroes et al., 2008). SWAP is een dynamisch puntmodel voor de berekening van verticale waterstroming in de onverzadigde en verzadigde bodem, onder invloed van wateraan- en -afvoerprocessen aan boven-, onder- en zijrand (drainage). Doordat de verticale-infiltratieproeven zijn uitgevoerd voor bodemkolommen omgrensd door een stalen buis met geringe diameter (ca. 40-50 cm) is SWAP per definitie geschikt voor het simuleren van deze proeven. In het model is waterstroming via macroporiën opgenomen. Vanwege het duidelijk macroporeuze karakter van de profielen is deze optie gebruikt in de modellering.

Verticale discretisatie

Voor de simulaties zijn de profielen verticaal gediscetiseerd in modelcompartimenten met een discrete dikte. Dit is gedaan op basis van de profielbeschrijvingen, de diepte tot waarop de buizen in de bodem zijn gebracht en de uit de metingen verkregen kennis over modelparameters. De diepten van de onderkant in het midden van de buizen bedroeg voor 'West' en 'Midden' resp. 64 en 61 cm beneden 'maaiveld' (bijlage 2). De diepten van de onderkant van het modelprofiel zijn voor 'West' gelegd op de scheiding kleilaag-zandlaag, omdat de buis 16 cm boven deze scheiding eindigde. Buis 5 bij locatie 'Midden' eindigde in het zand. Daar is de onderkant modelprofiel op 15 cm onder de buis gelegd.

Om een realistische simulatie van de infiltratie aan 'maaiveld' in de bodemmatrix en in de macroporiën te verkrijgen, was de discretisatie in het bovenste deel van de profielen verfijnder dan onderin. De gebruikte discretisatie is opgenomen in tabellen 4a en 4b. Deze tabellen geven tevens aan welke VanGenuchtenparameters voor de modelcompartimenten zijn gebruikt. Dit geldt eveneens voor de verzadigde doorlatendheden in het geval van de modelexperimenten waarin deze 'hydrologische' doorlatendheden zijn gebruikt in plaats van macroporiën. Voor de VanGenuchtenparameters zijn de gemiddelden van de duplo's gebruikt. Ervaring heeft uitgewezen dat de gemiddelden van twee parametersets meestal waterretentie- en doorlatendheidscurven opleveren die tussen de twee curven van de individuele sets in liggen.

Tabel 4a Verticale discretisatie Buis 1, locatie 'West'

Horizont			Compartimenten		Code gebruikte bepalingen van VanGenuchtenparameters en Verzadigde doorlatendheid
nummer	omschrijving	diepte (cm)	aantal	dikte (cm)	
1	wortelzone	0-8	8	1	M1 gemiddeld
2	wortelzone	8-25	2	1	M1 gemiddeld
			5	2	
3	kleilaag 1	25-38	2	2,5	
			3	3	B1 gemiddeld
			1	4	
4	kleilaag 2	38-50	3	4	B2 gemiddeld
		50-65	3	5	
5	kalibratielaag	65-80	1	15	B2 gemiddeld; K_{sat} gekalibreerd

Tabel 4b Verticale discretisatie Buis 5, locatie 'Midden'

Horizont			Compartimenten		Code gebruikte bepalingen van VanGenuchtenparameters en Verzadigde doorlatendheid
nummer	omschrijving	diepte (cm)	aantal	dikte (cm)	
1	wortelzone	0-8	8	1	M1 gemiddeld
2	wortelzone	8-20	2	1	M1 gemiddeld
			5	2	
3	kleilaag	20-50	1	2	M2 gemiddeld
			7	4	
4	zandlaag	50-61	1	11	Mz
5	kalibratielaag	61-76	1	15	Mz; K_{sat} gekalibreerd

Modelbovenrand

Als modelbovenrand is gekozen de optie in SWAP om gedetailleerd neerslagintensiteiten per *event* op te geven. Op de momenten dat in de proeven water is toegediend in de buizen zijn in SWAP neerslag *events* gemodelleerd met een hoeveelheid en intensiteit die volgde uit de meetgegevens van de waterhoogten in de buizen. Hiertoe zijn gemiddelde waterhoogten op minuutbasis berekend uit de 2-sec-waarnemingen om zo de grote ruis in de metingen te verkleinen. Omdat zowel in de werkelijkheid als in het model onder de heersende redelijk droge toestand van de bodem van de dijk bij de eerste watergift een groot macroporievolume snel werd gevuld, was het niet mogelijk om uit het waterhoogteverloop tijdens deze watergift af te leiden hoeveel water is gegeven. Daarom is bij de eerste gift de drempelhoogte voor het ontstaan van *runoff* in SWAP op de gemeten maximale waterhoogte gezet en is een ruime neerslaghoeveelheid gegeven met de uit de metingen afgeleide intensiteit. Het neerslagexcess na vullen van de macroporiën en opbouwen van de waterlaag op maaiveld tot de drempelhoogte werd in de modelsimulaties afgevoerd als *runoff*. Voor de andere giften, toen de macroporiën voldoende waren gevuld, is een zeer hoge drempelwaarde opgelegd zodat *runoff* niet kon worden gegenereerd en zijn de hoeveelheden en intensiteiten gehanteerd die zijn afgeleid uit de waterhoogtereferenties.

In de simulaties zijn bodem- en gewasverdamping uitgeschakeld. Verdamping van de waterlaag is niet meegenomen, omdat gezien de weersomstandigheden en de relatief korte duur van de proeven deze verdamping verwaarloosbaar was.

Modelonderrand

Een onbekende bij zowel de infiltratieproeven als de modellering was de onderrand. Water dat aan de onderkant uit de buis stroomde onder druk van de bovenstaande waterkolom zal in alle richtingen weg zijn gestroomd. Daarbij zal het gebruik hebben gemaakt van preferentiële stroombanen in de vorm van macroporiën indien aanwezig. Dat zal vooral hebben gegolden voor Buis 1 omdat deze eindigde in de macroporeuze kleilaag. Buis 5 eindigde in de ongestructureerde zandlaag waarin nauwelijks tot geen macroporiën waren te verwachten en zijn waargenomen (bijlage 1 en eigen visuele waarnemingen). Wel kunnen de in de top van deze laag waargenomen wortel(resten) hebben geleid tot macroporiestroming.

In de infiltratieproeven zijn geen waarnemingen gedaan die duidelijkheid kunnen geven over dit complexe proces van driedimensionale stroming door een (gedeeltelijk) macroporeuze bodem. SWAP is per definitie als puntmodel ook niet geschikt voor het simuleren van deze driedimensionale stroming onder de buizen. Er is daarom gekozen voor de onderrandoptie 'vrije drainage' in SWAP. Deze drainage vindt plaats vanuit het onderste modelcompartiment met een fluxgrootte die gelijk is aan de heersende doorlatendheid die weer sterk wordt bepaald door de ingevoerde verzadigde doorlatendheid van dit compartiment. Vanwege de onzekerheden in dit proces is deze verzadigde doorlatendheid gekalibreerd. Daartoe is een extra modellaag, de 'kalibratielaag', van circa 15 cm onder aan het modelprofiel toegevoegd die begon waar de buis eindigde (zie tabel 4).

Inverse modellering, doelvariabele en gekalibreerde parameters

In de inverse modellering is het gemeten verloop van de waterhoogte in de buizen in de tijd als doelvariabele genomen. Doel was om deze metingen zo goed mogelijk te benaderen met het model. Daarvoor is de SWAP-variabele '*ponding*-hoogte', de hoogte van de waterlaag op maaiveld, met intervallen van, afhankelijk van de tijdstapgrootte, 0,1-1,0 minuut uitgevoerd en vervolgens grafisch uitgezet tegen de tijd. Deze grafiek is visueel vergeleken met dezelfde grafiek van de metingen. Door 'trial-en-error', herhaald aanpassen van de te kalibreren parameters, is een op het oog optimale overeenkomst tussen gemeten en gesimuleerde grafiek verkregen.

Hiervoor zijn de metingen gemiddeld op minuutbasis en gecorrigeerd voor de plek waar het meetinstrument (*diver*) lag (diepste punt) ten opzichte van het midden van de buizen. Deze correctie is gedaan op basis van de diameter van de buizen, de helling van het dijktaalud (1 : 2,75) en de waargenomen afstand van *diver* tot buiswand. De correctie bedroeg -6,5 cm voor Buis 1 en -8 cm voor Buis 5.

De gekalibreerde parameters betroffen:

- 1) de verzadigde doorlatendheid van de aan de onderkantbuis toegevoegde 'kalibratielaag';
- 2) de volumefractie van permanente (statische) macroporiën;
- 3) de effectieve diameter van de matrixpolygonen;
- 4) de *shape*-factor in de Darcy-vergelijking voor laterale infiltratie van macroporiewater in de bodemmatrix.

De *macropore-flow*-module in SWAP is gebaseerd op de beschrijving van de geometrie van de macroporiën. De parameterisatie van deze beschrijving is zo eenvoudig mogelijk gekozen zodat alleen het hoofdmacroporiedomein (*Main bypass flow domain*) was geactiveerd. Er is alleen statisch (permanent) macroporievolume gedefinieerd, geen dynamisch

(krimpscheuren). Modelexperimenten met krimpscheuren wezen uit dat deze niets toevoegden aan deze modellering. Dat komt overeen met de bevindingen uit de verzadigdedoorlatendheidsmetingen in veldvochtige vs. verzadigde monsters. Hieruit is geconcludeerd dat binnen 48 uur verzadiging geen krimpscheuren die grote invloed op de doorlatendheid hadden, zijn dichtgezwollen. De infiltratieproeven besloegen hooguit 3 uur.

Het statische macroporievolume liep in de parameterisatie van maaiveld tot 11 cm in de kalibratielaag, wat overeenkwam met 4 cm boven de onderkant modelprofiel. De gekalibreerde volumefractie was constant over de diepte. Voor de *sorptivity* S_p als functie van het vochtgehalte in de absorptievergelijking (Verg. 1) is de optie gekozen om deze te laten berekenen uit de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken met een correctiefactor 1 (= geen correctie). Voor de numerieke berekeningen is een maximale tijdstapgrootte van 1 minuut en een minimale van 1 seconde genomen. Als initiële vochtgehalten zijn de vochtgehalten van tabel 1 als functie van de diepte in het model ingevoerd.

De gekalibreerde parameters 'polygoondiameter' en 'shape factor' sturen de laterale infiltratie van macroporiewater in de bodemmatrix. In SWAP wordt deze infiltratie bij lage vochtgehalten bepaald door absorptie volgens de *sorptivity* van Philip (1957):

$$I_{ab} = A_{wall} S_p \sqrt{t - t_0} \quad (1)$$

met I_{ab} (cm) is de hoeveelheid geabsorbeerd water vanaf tijd t_0 , de begintijd van contact tussen macroporiewater en bodemmatrix, tot tijd t (d), A_{wall} (cm) is het verticale macroporie-wandoppervlak per eenheid van horizontaal oppervlak en S_p (cm d^{-1/2}) is Philip's *sorptivity* als functie van initieel vochtgehalte.

Bij hoge vochtgehalten vindt laterale infiltratie plaats volgens de Darcy-vergelijking:

$$q_D = -A_{wall} K_h f_{shp} \frac{(h_{mt} - h_{mp})}{x_{pol}} \quad (2)$$

met q_D (cm d⁻¹) is de Darcy-flux, K_h (cm d⁻¹) de onverzadigde doorlatendheid als functie van drukhoogte h (cm), f_{shp} (-) is de gekalibreerde *shape factor*, h_{mt} en h_{mp} (cm) zijn de drukhoogten in matrix en macroporie, en x_{pol} (cm) is de horizontale afstand. A_{wall} en x_{pol} worden berekend uit de gekalibreerde matrixpolygoondiameter x_{pol} (cm) volgens:

$$A_{wall} = \frac{4}{d_{pol}} \Delta z \quad (3)$$

waarin Δz (cm) is de compartimentdikte, en

$$x_{pol} = \frac{1}{2} d_{pol} \quad (4).$$

Modelexperimenten

Na verkrijgen van de optimale fit op basis van gekalibreerde parameters voor de macroporiestromingsoptie in SWAP, zijn enkele modelexperimenten gedaan met als doel om

na te gaan of vergelijkbare simulatieresultaten konden worden verkregen met SWAP zonder explicite macroporiën, maar met de gemeten 'hydrologische' verzadigde doorlatendheden in plaats van de gefitte 'bodempysische' verzadigde doorlatendheden van de matrix. In de hydrologische verzadigde doorlatendheden zit het effect van de macroporiën impliciet besloten. Bij deze experimenten zijn alle andere parameterwaarden niet veranderd. Dit geldt met nadruk ook voor de gekalibreerde verzadigde doorlatendheid van de 'kalibratielaag'.

3.2 Resultaten

De resultaten van de kalibratie als grafische vergelijking van het gemeten met het gesimuleerde verloop van de waterhoogten in de tijd is gegeven in figuur 1. In de figuur zijn tevens de resultaten van de modelexperimenten met gemeten 'hydrologische' verzadigde doorlatendheden gegeven. Een overzicht van de waarden van de gekalibreerde parameters geeft tabel 5.

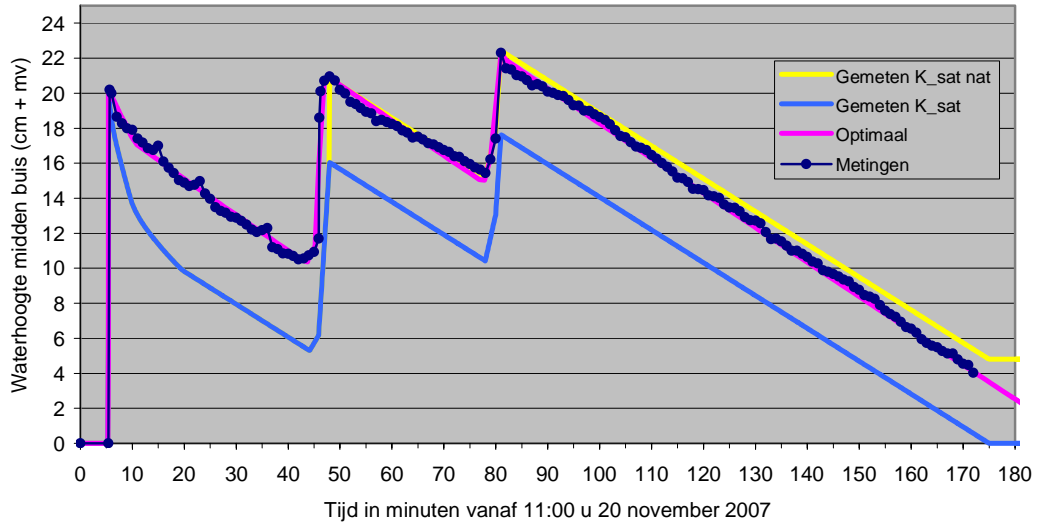
Tabel 5 Optimale waarden van de gekalibreerde parameters

Proef en locatie	K_{sat} kalibratielaag (cm d ⁻¹)	Volumefractie statische macroporiën (cm ³ cm ⁻³)	Effectieve polygoondiameter (cm)	Shape factor f_{shp} (-)
Buis 1 'West'	260	0,04	15	0,15
Buis 5 'Midden'	165	0,04	20	0,10

Het verloop in de tijd van de waterhoogten van de optimale simulatie met de macroporie-stromingsoptie en de parameterwaarden van tabel 5 valt voor beide locaties zeer goed samen met het verloop in de tijd van de gemeten waterhoogten. De door kalibratie verkregen parameterwaarden van de macroporie-optie liggen voor beide locaties dicht bij elkaar en binnen fysisch realistische grenzen. De gekalibreerde volumefractie statische macroporiën ligt in de orde van grootte die is af te leiden uit het verschil tussen de geschatte poriëgehalten van tabel 1 en de gefitte volumevochtfracties Θ_{sat} van tabel 3. De effectieve polygoondiameter is bij 'Midden' wat groter en de *shape factor* is hier wat kleiner dan bij 'West' wat impliceert dat de laterale infiltratie bij 'Midden' wat kleiner is.

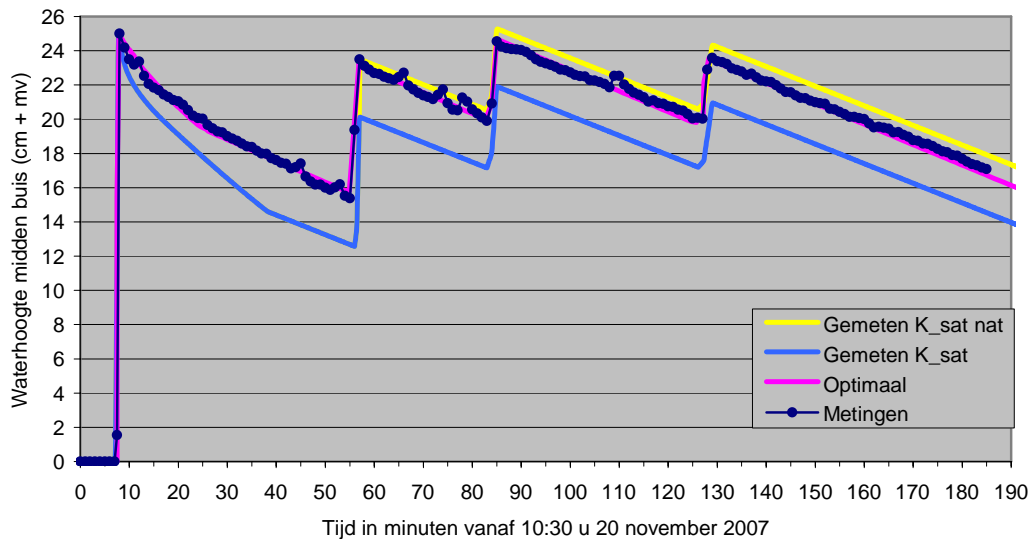
De gekalibreerde K_{sat} van de kalibratielaag is bij 'Midden' lager dan bij 'West' wat aanduidt dat het wegstromen van het water aan de onderkant van de buis door de omringende bodem bij 'Midden' langzamer ging dan bij 'West'. Dit is conform de bevindingen in het veld, waar is waargenomen dat de zandlaag ongestructureerd was met weinig zichtbare macroporiën. Dat de waarde van 'Midden' in absolute zin toch niet gering is met 165 cm d⁻¹ is waarschijnlijk het gevolg van de combinatie van de helling van het talud, de dikte van de kleilaag, de diameter van de buis en de diepte van de onderkant buis. Uitgaande van een kleidikte van 50 cm, een diepte van de onderkant van het midden van de buis van 61 cm beneden maaiveld, een buisdiameter van 50 cm en de taludhelling van 1 : 2,75 kan worden berekend dat het meest hellingafwaartse deel van de onderkant van de buis voor hooguit enkele centimeters in de slecht doorlatende ongestructureerde zandlaag heeft gestaan. Waarschijnlijk is het water aan die kant preferent weggestroomd naar de macroporeuze kleilaag. Hierbij speelt natuurlijk ook nog de exacte positie van de buis t.o.v. de verticaal.

Buis 1 (Profielkuil West)



Figuur 1a Verloop in de tijd van gemeten en gesimuleerde waterhoogten in de buis voor de optimale kalibratiewaarden en voor de modelexperimenten met de gemeten verzadigde doorlatenheden (Gemeten K_{sat}), voor Buis 1, locatie 'West'

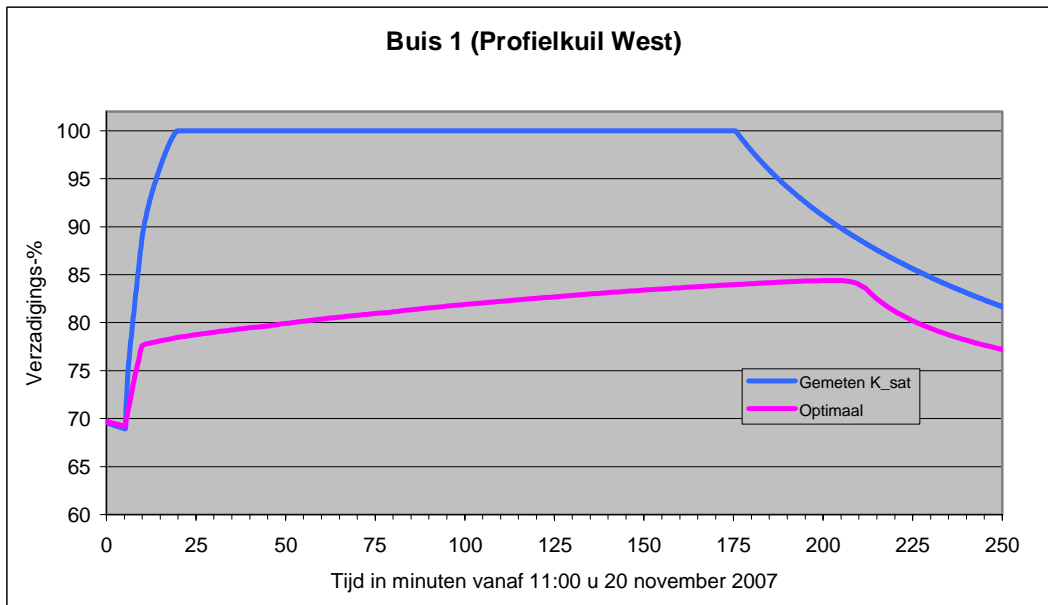
Buis 5 (Profielkuil Midden)



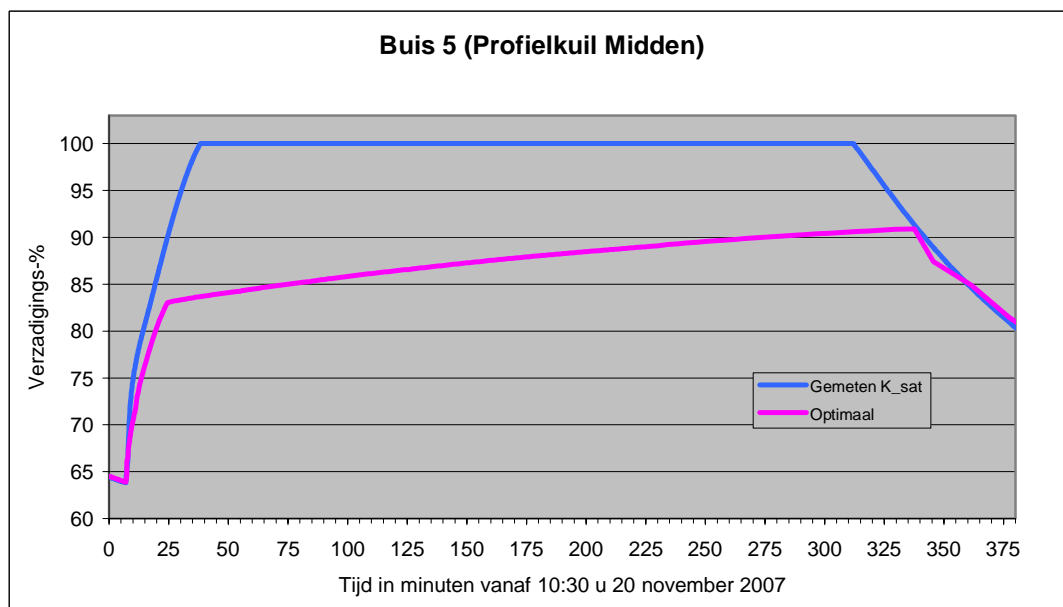
Figuur 1b Verloop in de tijd van gemeten en gesimuleerde waterhoogten in de buis voor de optimale kalibratiewaarden en voor de modelexperimenten met de gemeten verzadigde doorlatenheden (Gemeten K_{sat}), voor Buis 5, locatie 'Midden'

De resultaten van de modelexperimenten met gemeten verzadigde doorlatendheden en zonder macroporiën zijn eveneens weergegeven in figuur 1, aangeduid als 'Gemeten K_{sat} '. Daaruit blijkt dat de infiltratie in die simulaties veel sneller gaat dan in werkelijkheid gemeten of met macroporiën gesimuleerd. De verklaring hiervoor is dat bij vergroten van de K_{sat} in de VanGenuchtenvergelijkingen niet alleen de verzadigde maar ook de onverzadigde doorlatendheid wordt vergroot. Dit geschiedt met dezelfde factor voor beide doorlatendheden. In deze simulaties gaat het om vergroten met een factor in de orde 100-1000. Gevolg hiervan is dat de stroming in de onverzadigde bodem zeer groot is waardoor de bodem het toegediende water zeer snel kan opnemen en als gevolg daarvan snel verzadigd raakt. Dit is duidelijk zichtbaar in figuur 2 waar het verzadigings-percentages van de totale gesimuleerde bodemkolom is weergegeven in de tijd. Bij de simulaties met macroporiën raakt het profiel niet geheel verzadigd. Dat de gesimuleerde verzadigingsgraad bij 'Midden' aan het einde van de proef meer is gestegen dan bij 'West' komt door de geringere afvoer door de onderrand van het gemodelleerde profiel bij 'Midden' waardoor water langer en in grotere hoeveelheden in het profiel blijft.

De simulatie 'Gemeten K_{sat} nat' is een variant waarin bij de tweede watergift de waterhoogte weer is opgezet tot het gemeten niveau. Op dat moment is het profiel al totaal verzadigd en is de doorlatendheid gelijk aan de verzadigde doorlatendheid. Te zien is in figuur 1 dat de infiltratiesnelheden in deze simulaties met gemeten 'hydrologische' verzadigde doorlatendheden heel goed de gemeten infiltratiesnelheden benaderen. Het fysische-realistieitsgehalte van deze simulaties is voor een initieel onverzadigde bodem echter zeer gering. Alleen bij een initieel verzadigde bodem hebben deze simulaties enige waarde. Als de bodem in deze simulaties niet verzadigd is, dan wordt hij dat wel zeer snel met deze hoge onverzadigde doorlatendheden. Als een belangrijk doel van de simulaties het voorspellen van het vochtgehalte is, dan zijn deze simulaties zeer onrealistisch door de veel te hoge onverzadigde doorlatendheden.



Figuur 2a Verloop in de tijd van gesimuleerd verzadigingspercentage van het gehele gemodelleerde profiel voor de optimale kalibratiewaarden en voor de modelexperimenten met de gemeten verzadigde doorlatenheden (Gemeten K_{sat}) , voor Buis 1, locatie 'West'



Figuur 2b Verloop in de tijd van gesimuleerd verzadigingspercentage van het gehele gemodelleerde profiel voor de optimale kalibratiewaarden en voor de modelexperimenten met de gemeten verzadigde doorlatenheden (Gemeten K_{sat}) , voor Buis 5, locatie 'Midden'

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

De laboratoriummetingen hebben belangrijke gegevens opgeleverd voor de modellering van de uitgevoerde verticale-infiltratieproeven. Dit zijn veldvochtgehalten, poriëgehalten, verzadigde doorlatendheden, en waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van relevante profiellagen van de twee bestudeerde bodemprofielen van de dijk.

De gemeten verzadigde doorlatendheden van de kleilagen zijn groot tot zeer groot voor kleibodems. Ze zijn een factor 300-6000 groter dan de verzadigde doorlatendheden die volgen uit de metingen van de doorlatendheidskarakteristieken. Dit duidt op een grote invloed van macroporiën op de doorlatendheden van de kleilagen van de dijk. Dat het gaat om macroporiën die bij verzadiging nauwelijks dichtzwellen en die daardoor ook onder zeer natte omstandigheden hun effectiviteit behouden, blijkt uit vergelijking van metingen aan veldvochtige monsters en aan dezelfde monsters na 48 uur verzadigen.

De gemeten verzadigde doorlatendheden zijn representatief voor de bodemprofielen als totaal medium, bestaande uit bodemmatrix en macroporiën. Ze worden in dit verband aangeduid als 'hydrologische verzadigde doorlatendheden'. De gefitte verzadigde doorlatendheden uit de bepaling van doorlatendheidskarakteristieken gelden uitsluitend voor de bodemmatrix en worden aangeduid als 'bodempysische verzadigde doorlatendheden'. Hun lage waarden van enkele mm per dag tot enkele cm per dag worden bevestigd door de doorlatendheidsmetingen van GeoDelft. Deze lage waarden impliceren tevens dat de hoge waarden van de hydrologische doorlatendheden het gevolg zijn van de bijdragen van de macroporiën.

Uit de lage verticale doorlatendheden van de zandlaag en de relatief hoge waarden van de verticale en horizontale doorlatendheden van de kleilaag mag worden geconcludeerd dat neerslag op het talud van de dijk hoogstwaarschijnlijk verticaal door de kleilaag wordt afgevoerd tot op de zandlaag en vervolgens in de langsrichting van de helling door de kleilaag over de zandlaag naar de teen van de dijk.

Vergelijking van geschatte poriëgehalten uit bodemvochtmetingen met gefitte volumevochtfracties bij verzadiging die volgen uit de bepaling van de waterretentiekarakteristieken wijzen eveneens op de aanwezigheid van macroporievolume.

Het geregistreerde verloop in de tijd van de waterhoogten in de buizen van de infiltratieproeven Buis 1 en Buis 5 is zeer goed te simuleren met SWAP met de macroporie-optie ingeschakeld en op basis van de gemeten waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken en initiële vochtgehalten. Drie belangrijke macroporieparameters zijn hierbij gekalibreerd.

De drie gekalibreerde macroporieparameters in SWAP, volumefractie statische macroporiën, effectieve matrixpolygoondiameter en *shape factor* voor laterale infiltratie van macroporiewater in de matrix, liggen binnen fysischrealistische grenzen en verschillen niet onrealistisch veel tussen de twee doorgerekende locaties.

Als wordt uitgegaan van een initieel verzadigd profiel, dan is het geregistreerde verloop in de tijd van de waterhoogten in de buizen van de infiltratieproeven Buis 1 en Buis 5 als maat voor de infiltratiesnelheid goed te simuleren met SWAP met de macroporie-optie uitgeschakeld, maar met de gemeten hydrologische verzadigde doorlatendheden ingevoerd in plaats van de bodemfysische verzadigde doorlatendheden.

Voorgaande conclusie geldt absoluut niet als wordt uitgegaan van een initieel onverzadigd profiel, wat een meer realistische situatie is, en in ieder geval ook de situatie van de doorgerekende infiltratieproeven. In deze simulaties wordt het profiel binnen enkele tientallen minuten volledig verzadigd, waarna het model de metingen in termen van infiltratiesnelheid redelijk goed kan voorspellen. Fysisch gezien is het voortraject van volledig verzadigd raken zeer onrealistisch.

Voor een realistische simulatie met procesgeoriënteerde modellen als SWAP van infiltratiesnelheden en bodemvochtdynamiek in de dijkprofielen is het noodzakelijk om naast de processen in de bodemmatrix eveneens de processen in de macroporiën mee te nemen.

4.2 Aanbevelingen

Het dient aanbeveling om na afloop van de infiltratieproeven de buizen uit te graven om te onderzoeken hoe de waterstroming door bodem of dijklichaam heeft plaatsgevonden. Dit kan op basis van waarneming van vocht patronen in het profiel in het veld, liefst aangevuld met nemen van monsters voor vochtbepaling van relevante plekken en diepten vóór en na de infiltratieproef.

Het dient aanbeveling om waterstroming door macroporiën op te nemen in conceptuele modellen voor de beschrijving van de waterstroming in dijken, zoals PlaxFlow. Hierbij is gewenst dat macroporiestroming en uitwisseling van water tussen macroporievolume en bodemmatrix wordt gesimuleerd voor alle dimensies die het model beschrijft.

Literatuur

DLO Staring Centrum, 1998. *Appia 2.02. Graphical User Interface for Appia*. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands

Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and C.M.J. Jacobs, 2008 (in prep). *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Report ## Wageningen-UR, Alterra, Wageningen.

Philip J.R., 1957. *The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations*. Soil Science 84, 264-275.

Stolte, J., G.J. Veerman en M.C.S. Wopereis, 1992. *Manual soil physical measurements, version 2.0*. Technical Document 2. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.

Bijlage 1 Profielbeschrijvingen

Op 20 november 2007 zijn profielkuilen gemaakt in het binnentalud van de Waddenzeedijk nabij de Boonweg. De Waddenzeedijk ter plaatse is opgebouwd met zand waarop een kleilaag is aangebracht op het binnentalud. De kuilen zijn gemaakt om de grond van de kleilaag en de structuren daarin te beschrijven. De kuilen zijn gemaakt met een hydraulische kraan over een lengte van ongeveer 2 m en met een breedte van ongeveer 0.8 m en met een diepte voldoende om de gehele dikte van de kleilaag te kunnen bestuderen, te weten 0.6 - 0.9 m. Ten tijde van het beschrijven van de kuilen was er geen neerslag en de temperatuur bedroeg ongeveer 6°C.

Er zijn 3 kuilen beschreven. Binnen 6 m van de kuilen zijn infiltratiemetingen uitgevoerd en zijn handboringen gemaakt om de samenstelling en dikte van de kleilaag op het binnentalud te bepalen.

De locaties worden voorshands hier aangeduid met locatie West, locatie Midden en locatie Oost.

Datum 2007-12-03

Locatie Midden

Locatie: (167631.36 ; 589741.64), maaiveld +3.57 m NAP

Locatie boven de teen. Kleilaag ongeveer 0.45 – 0.55 m dik. De klei is in het algemeen zeer zandig. De grasmat op het talud bevat open plekken en met mos bedekte plekken van meer dan 8 dm², veel pollen van grove grassoorten en met door kruiden gedomineerde plekken.

De profielopbouw is globaal als volgt:

- 0-0.08 Klei, zeer zandig, bruingeel grijs, homogeen rul en zeer open, kruimelig aggregaten 0.5 – 2 mm zeer zwakke aggregaatjes, zeer veel wortels (graszode continue)
- 0.08-0.2 Klei, zeer zandig, bruingeel grijs, zwak fijnblokkig (5 – 15 mm) en zwak prismatisch open pakking bovenin vaak met parallele laminatie vaak met zand zeer weinig wormgangen, zeer zwakke aggregaten, veel wortels tot 0.12 m daarbeneden afnemend met de diepte
- 0.2-0.5 Klei, sterk zandig, weinig puin en schelpen, geel grijs, zwak prismatisch (30 – 100 mm de spleten van de structuur reiken soms vanaf het onderliggende zand tot in de toplaag, zand op wanden grotere spleten en blokkig (20 -30 mm) vaak parallele laminaties met zand lamina (10% van oppervlak) weinig wormgangen, zwakke aggregaten, plaatselijk minder zandig met duidelijke blokken structuur, tot 0.4 m diepte weinig wortels en daaronder zeer weinig.
- 0.5 - 0.7 Zand fijn en middel, weinig schelpen, bovenin nog enig wortels

Locatie West

Locatie: (167547.25 ; 589665.59), maaiveld +7.42 m NAP

Locatie onder de kruin. Kleilaag ongeveer 0.8 m dik. De klei is in het algemeen zandig en soms zeer zandig en bevat veel schelpmateriaal. De grasmat op het talud is gesloten met regelmatig paardebloempollen en zijn lokaal erg veel graafgangen van muizen.

De profielopbouw is globaal als volgt:

- 0-0.08 Klei, zandig, donker bruin grijs, homogeen rul en zeer open, kruimelig aggregaten 1 - 2 mm, zwakke aggregaatjes, zeer veel wortels (graszode continue)
- 0.08-0.25 Klei, zandig, veel schelpmateriaal, bruin grijs, fijnblokkig (5 - 20mm) open pakking weinig wormgangen matig stevige aggregaten, veel wortels tot 0.13 m en veel daaronder
- 0.25-0.38 Klei, zandig lokaal sterk zandig, weinig puin en veel schelpmateriaal, grijs, zwak blokkig (20 - 50 mm) zeer lokaal parallele laminaties met zand lamina matig wormgangen (2 - 5 / dm²), matig stevige aggregaten
- 0.38-0.8 Klei, zandig lokaal zeer zandig, grijs en gevlekt bruin vooral bij de basis, zwak prismatisch, weinig wortels enkele 4 mm dik
- 0.8- .. Zand middel, licht geelgrijs, veel schelpmateriaal, bovenin nog enig wortels

Bijlage 2 Verticale-infiltratieproeven

1 Methode

opdrachtnr CO423891
20-11-2007
waarnemer: Gmg

Proef 5 is uitgevoerd met een stalen buis 500x4 van 1.50 m lang.
Proef 1 t/m 4 en 6 zijn uitgevoerd met RVS buizen 406x3 van 1.20 m lang.

De buizen zijn met een rupskraan vertikaal weggedrukt in het talud.
In het midden van de buis gemeten is:
buis 1 weggedrukt tot 0.64 m - maaiveld (net west van inspectiesleuf 'west')
buis 2 weggedrukt tot 0.74 m - maaiveld
buis 3 weggedrukt tot 0.70 m - maaiveld
buis 4 weggedrukt tot 0.70 m - maaiveld (hoger op het talud en net west van inspectiesleuf 'midden')
buis 5 weggedrukt tot 0.61 m - maaiveld (lager op het talud en net west van inspectiesleuf 'midden')
buis 6 weggedrukt tot 0.69 m - maaiveld (net oost van inspectiesleuf 'midden')

In de buizen zijn op het laagste punt Divers geplaatst om de waterstand te registreren. Met een extra Diver is de luchtdruk gemeten.
De meetinterval is 2 seconden
De buizen zijn gevuld met water tot circa 0.25 m boven maaiveld. Bij dreigend droogvallen van het maaiveld is bijgevuld.

2 Resultaten

De resultaten van de verticale-infiltratieproeven zijn weergegeven in figuren 2.1 en 2.2.

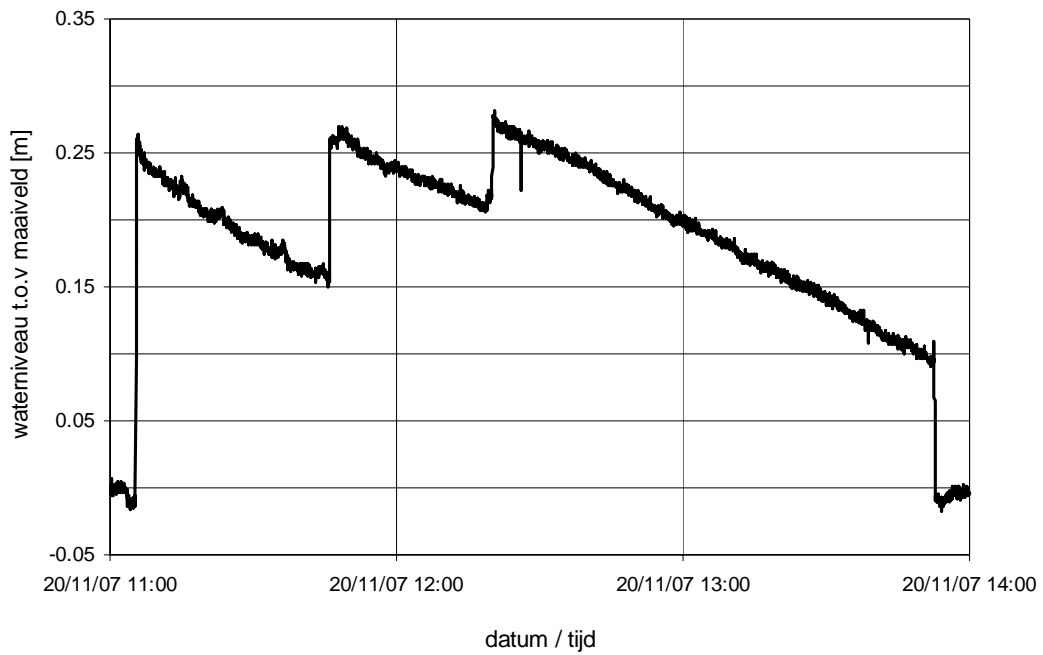


Fig. 2.1 Resultaten van infiltratieproef Buis 1, locatie West

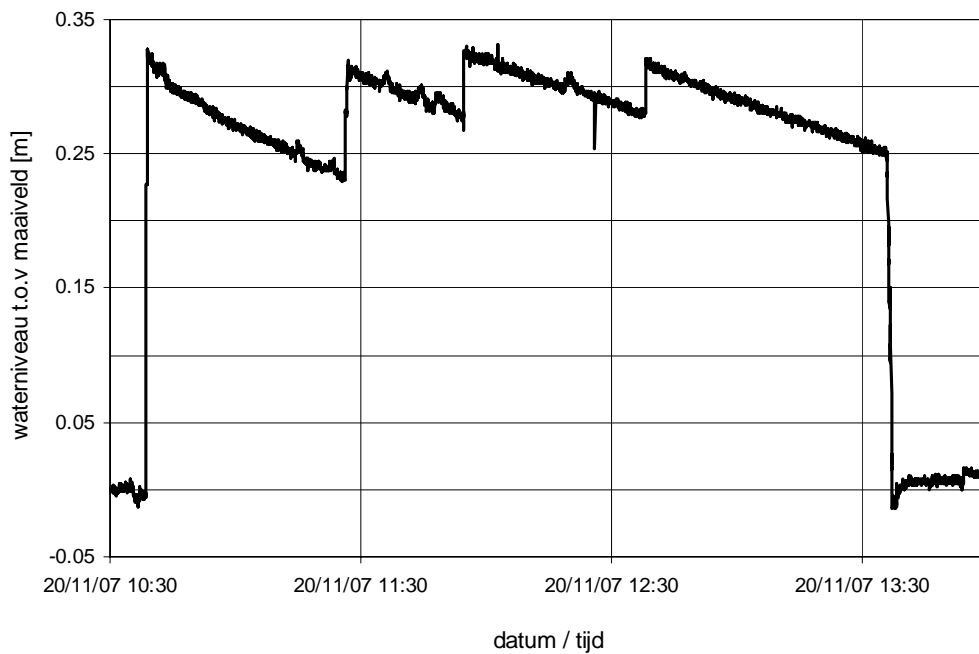


Fig. 2.2 Resultaten van infiltratieproef Buis 5, locatie Midden

