

Vergelijkend onderzoek voor
enkele grondwaterstromings-
modellen
S-78.047

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
D. Pereboom, juni 1979

Herzien en bijgewerkt, december 1981
ir. A. Penning, COW
ing. J.C. van den Burg, Deltadienst.

<u>Inhoud</u>	<u>Blz.</u>
Voorwoord	
1. Inleiding	2
2. SEEP en ELNAG	4
2.1. Beschrijvingen	4
2.1.1. SEEP	4
2.1.2. ELNAG	4
2.2. Tijdsduur van de berekeningen	6
2.2.1. SEEP	6
2.2.2. ELNAG	6
2.2.3. Konklusie	7
2.3. Kosten van de berekeningen	7
2.3.1. SEEP	7
2.3.2. ELNAG	7
2.3.3. Konklusie	8
2.4. Gebruikersvriendelijkheid van SEEP en ELNAG	8
2.4.1. SEEP	8
2.4.2. ELNAG	8
2.4.3. Konklusie	9
3. TOETSPROBLEEM 1	10
3.1. Het Toetsprobleem	10
3.2. De analytische oplossing	10
3.2.1. Oplossing van het stationaire gedeelte volgens van Dam	11
3.2.2. Oplossing van het niet-stationaire gedeelte volgens Bosch	11
3.2.3. Analytische totaaloplossing	11
3.3. Berekening met ELNAG	11
3.4. Vergelijking van beide oplossingen	12
3.5. Konklusie	13
4. TOETSPROBLEEM 2	14
4.1. Het toetsprobleem	14
4.2. Berekeningen met ELNAG	14
4.2.1. Berekening van de potentialen in het zandpakket	15
4.2.2. Berekeningen van de potentialen in het kleipakket	15
4.3. Konklusie	16

<u>Inhoud</u>	<u>Blz.</u>
5. TOETSPROBLEEM 3	17
5.1. Het toetsprobleem	17
5.2. Berekeningen	18
5.2.1. Berekening met ELNAG	18
5.2.2. Berekening met SEEP	18
5.2.3. Berekening met de methode van der Weide	19
5.3. TOETSPROBLEEM 3a	20
5.3.1. Resultaten	20
5.3.2. Konklusie	21
5.4. Toetsprobleem 3b	21
6. TOETSPROBLEEM 4	22
6.1. Het toetsprobleem	22
6.2. Berekeningen	22
6.2.1. Berekening met ELNAG	22
6.2.2. Berekening met SEEP	22
6.3. Resultaten	22
6.4. Konklusie	23
7. SAMENVATTENDE KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN	24
7.1. Konklusies	24
7.2. Aanbevelingen	26
Literatuur	28

Bijlagenlijst behorende bij S-78.047

<u>Bijlage</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>form./tek.nr.</u>
1 blad 1	toetsprobleem 1	A4/79.155
1 blad 2	toetsprobleem 1 (vervolg)	A4/79.156a
1 blad 3	toetsprobleem 1 (vervolg)	A4/79.156b
2 blad 1	oplossing toetsprobleem 1 stationair gedeelte	A4/79.157
2 blad 2	" " " " (vervolg)	A4/79.158
2 blad 3	" " " " "	A4/79.159
2 blad 4	" " " " "	A4/79.160
2 blad 5	" " " " "	A4/79.161
2 blad 6	" " " " "	A4/79.162
3 blad 1	oplossing toetsprobleem 1 niet-station. gedeelte	A4/79.163
3 blad 2	" " " (vervolg)	A4/79.164
3 blad 3	" " " "	A4/79.165
4	oplossing toetsprobleem 1	A4/79.166
5	toetsprobleem 1, verloop van de potentiaal ϕ in de tijd	A3/79.167
6	toetsprobleem 1, verloop van de potentiaal ϕ in de lengte van het model	A3/79.168
7	toetsprobleem 1, tabel voor demping, faseverschuiving etc.	A4/79.169
8 blad 1	toetsprobleem 2	A4-79.170
8 blad 2	" (vervolg)	A4/79.171
8 blad 3	" "	A4/79.172
8 blad 4	" "	A4/79.173
8 blad 5	" "	A4/79.174
8 blad 6	" "	A4/79.175
8 blad 7	" "	A4/79.176
8 blad 8	" "	A4/79.177
9	toetsprobleem 2, ELNAG-indeling	A4/79.178
10	toetsprobleem 2, ELNAG-schematisatie buitenwaterstand H_0	A4/79.179
11	toetsprobleem 2, buitenwaterstand H_0	A4/79.180
12	toetsprobleem 2, meetresultaat ELNAG	A4/79.181
13	toetsprobleem 2, peilbuis II	A4/79.182
14	toetsprobleem 2, peilbuis IV	A4/79.183
15	toetsprobleem 2, peilbuis V	A4/79.184
16	toetsprobleem 2, randvoorwaarde onderzijde kleipakket etc.	A4/79.185
17	toetsprobleem 2, potentiaal kleipakket, diepte NAP -5,50m etc.	A4/79.186

vervolg bijlagenlijst S-78.047

<u>Bijlage</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>form./tek.nr.</u>
18	toetsprobleem 2, potentiaal kleipakket diepte NAP -4,75m etc.	A4/79.187
19	toetsprobleem 2, potentiaal kleipakket diepte NAP -2,75m etc.	A4/79.188
20	toetsprobleem 3	A4/79.189
21	toetsprobleem 3a, verloop freatisch vlak in de tijd, vergelijking SEEP-ELNAG	A3/79.190
22	toetsprobleem 3a, verloop freatisch vlak in de tijd, vergelijking SEEP- v.d. Weide	A3/79.191
23	toetsprobleem 3a, verloop freatisch vlak in de tijd, vergelijking ELNAG- v.d. Weide	A3/79.192
24	toetsprobleem 3b, verloop freatisch vlak in de tijd, vergelijking SEEP-ELNAG- v.d. Weide	A4/79.193
25 blad 1	toetsprobleem 4	A4/79.194
25 blad 2	toetsprobleem 4 (vervolg)	A4/79.195
25 blad 3	toetsprobleem 4 (vervolg)	A4/79.196
26	toetsprobleem 4, opbouw netwerk ELNAG	4Z/79.197
27	toetsprobleem 4, opbouw MESH-SEEP	4Z/79.198
28.1	toetsprobleem 4, vergelijking ELNAG-SEEP zonder getij-inslingering	A3/79.199
28.2	toetsprobleem 4, vergelijking ELNAG-SEEP	A2/79.200
29	toetsprobleem 4, elementenmesh SEEP in beginstand	4Z/79.201
30.1	toetsprobleem 4, meetresultaten SEEP	A4/79.202
30.2	toetsprob. 4, stromingsbeeld SEEP, tijdstip I	4Z/79.203
30.3	" " " " II	4Z/79.204
30.4	" " " " III	4Z/79.205
30.5	" " " " IV	4Z/79.206
30.6	" " " " V	4Z/79.207
30.7	" " " " VI	4Z/79.208
30.8	" " " " VII	4Z/79.209
30.9	" " " " VIII	4Z/79.210
30.10	" " " " IX	4Z/79.211
30.11	" " " " X	4Z/79.212
30.12	" " " " XI	4Z/79.213
30.13	" " " " XII	4Z/79.214
30.14	" " " " XIII	4Z/79.215
30.15	" " " " XIV	4Z/79.216
30.16	" " " " XV	4Z/79.217
30.17	" " " " XVI	4Z/79.218
31	(bijlage 31 heeft aparte bijlagenlijst)	

VOORWOORD

In het kader van de werkzaamheden van werkgroep 2 "Waterbeweging in dijken" van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) is een onderzoek gestart naar de toepasbaarheid van beschikbare grondwaterstromingsmodellen (analytisch, analoog of digitaal) op de Nederlandse waterkeringen.

In 1978 is door ad-hoc groep grondwatermodellen en computerprogramma-tuur van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO een verslag uitgebracht (Den Haag 1978) * dat een inventarisatie beoogt te geven van de behoefte aan en beschikbaarheid van grondwatermodellen en computerprogrammatuur in Nederland (analoge modellen zijn hierbij bewust buiten beschouwing gebleven). Uit de enquêtes bleek dat de behoeften weinig exact konden worden gedefinieerd, als gevolg van het feit dat de potentiële gebruikers en bouwers van grondwatermodellen weinig bekend zijn met elkaars problemen en mogelijkheden. Aanbevelingen worden gedaan voor de modelbouwer en voor de gebruikers. De modelbouwer dient te zorgen voor een goede, gebruikersgerichte dokumentatie, die de gebruiker inzicht verschaft omtrent de te leveren gegevens, alsmede omtrent de mogelijkheden van de diverse modellen. Anderzijds dienen de gebruikers de probleemstelling duidelijk te formuleren. Van gebruikerszijde zouden duidelijker omschreven eisen aan de grondwaterstromingsmodellen gesteld moeten worden.

Dit rapport gaat in op de aanbeveling om modellen te evalueren door met verschillende modellen een aantal specifieke problemen door te rekenen. Voorafgaand is in het tussentijds COW-rapport S-78.047 ^a "Grondwaterstromingsmodellen" aandacht geschonken aan de achtergronden die bij het opstellen van toetsproblemen een rol spelen (nu bijlage 31 bij dit rapport). In dat rapport werden een 3-tal op rivierdijken afgestemde toetsproblemen opgesteld, waarbij een rangorde in moeilijkheidsgraad werd toegepast.

De opzet was een 4-tal verschillende grondwaterstromingsmodellen met deze drie toetsproblemen in een onderzoek met elkaar te vergelijken, namelijk:

SEEP, een computerprogramma gebaseerd op de eindige elementenmethode, in beheer bij het Laboratorium voor Grondmechanica (dr.ir. F.B.J. Barends).

ELNAG, een electrisch netwerkanalogon voor grondwaterproblemen, een analoge methode in beheer bij Rijkswaterstaat Deltadienst (ing. J.C. van der Burg).

MOTGRO, een computerprogramma gebaseerd op een semi-analytische functiemethode, in beheer bij Rijkswaterstaat, Dienst Informatieverwerking (dr. ir. P. van der Veer) en
WASTROB, een computerprogramma gebaseerd op de eindige differentiemethode, in beheer bij Adviesbureau Arnhem (ir. H.J. Vinkers).

Omdat alleen het model ELNAG in staat bleek de in alle drie genoemde toetsproblemen voorkomende elastische bergingsfactor in de berekening op te nemen, werd besloten de eerste twee toetsproblemen hiervan alleen met ELNAG te berekenen en een tweetal nieuwe toetsproblemen 3 en 4 met freatische berging en tijdsafhankelijke potentiaal-randvoorwaarden met de modellen ELNAG en SEEP te berekenen en te vergelijken. Omdat MOTGRO en WASTROB ten tijde van het schrijven van dit rapport nog niet geschikt waren om tijdsafhankelijke problemen op te lossen zijn die verder buiten beschouwing gebleven. In dit rapport S-78.047 worden vier specifieke toetsproblemen doorge-rekend. In hoofdzaak zal aandacht worden besteed aan de onderlinge vergelijking van ELNAG en SEEP bij het oplossen van toetsprobleem 3 (het "zandblok") en toetsprobleem 4 (een "standaard dijkprofiel" met een stormvloedkromme als potentiaal-randvoorwaarde).

Naast vergelijking van SEEP en ELNAG op numerieke resultaten is in het kort ook aandacht geschonken aan de toegankelijkheid voor de gebruiker van deze rekenmodellen en aan de kosten en tijd die met een berekening gemoeid zijn.

Konklusies en aanbevelingen zijn samengevat in hoofdstuk 7.

De auteur wenst prof.dr.ir. A. Verruijt (TH Delft), ir. A. Penning (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen) en ir. P.A. Vermeer (TH Delft) dank te zeggen voor hun steun en begeleiding tijdens het onderzoek. Dank gaat tevens uit naar ir. F.B.J. Barends (Laboratorium voor Grondmechica), ing. J.C. van der Burg en G.J. Wubben (Deltadienst Rijkswaterstaat) voor de door hun verrichte werkzaamheden ten behoeve van de SEEP-ELNAG evaluatie.

Dirk Pereboom, 15 juni 1979

(herzien en bewerkt
ing. J.C. van der Burg,
Deltadienst, 1981)

1. INLEIDING

In hoofdstuk 2 wordt allereerst een korte beschrijving van SEEP en ELNAG gegeven, terwijl in aparte paragrafen aandacht wordt geschonken aan de tijd en de kosten die met de berekeningen met deze twee modelmethoden zijn gemoeid.

Voorts is aandacht geschonken aan de gebruikersvriendelijkheid van deze twee modelmethoden. Elke paragraaf wordt met een korte konklusie afgesloten.

Hoofdstuk 3 behandelt de oplossing van toetsprobleem 1; dit betreft een schematisch dijkprofiel, waarbij voor de grondwaterstroming een analytische oplossing beschikbaar is. Toetsprobleem 1 wordt alleen met ELNAG berekend; de uitkomsten worden met de analytische oplossing vergeleken.

Hoofdstuk 4 behandelt toetsprobleem 2; het betreft een schematisatie van de Waaldijk bij Vuren. Na verregerende schematisatie in ELNAG-berekeningen worden uitkomsten met praktijkwaarnemingen vergeleken.

In de hoofdstukken 5 en 6 volgt de onderlinge vergelijking op numerieke resultaten van ELNAG en SEEP aan de hand van de twee nieuw geïntroduceerde toetsproblemen 3 en 4 (respektievelijk hoofdstuk 5 en 6). In het kader van de ontwikkeling en bouw van ELNAG werden, in overleg met ir. C. Verspuy van TH Delft, deze twee toetsproblemen al eerder opgesteld door ing. J.C. van der Burg om daarmee het grondwaterstromingsmodel ELNAG te beproeven en de uitkomsten te vergelijken met de uitkomsten bij toepassing van andere rekenmethodieken (zie lit. 7).

Toetsprobleem 3 is een zandblok, lang 11 m, hoog 4 m, begrensd door de ondoorlatende basis, dat aan één zijde door een periodiek variërende waterstand (toetsprobleem 3a) of door een lineair stijgende waterstand (toetsprobleem 3b) wordt belast, terwijl aan de andere zijde een stationaire waterstand wordt gehandhaafd. Gevraagd wordt om ter plaatse van het freatische vlak, bij deze variërende randvoorwaarden het potentiaalverloop in de tijd over de lengte van het blok te berekenen.

Toetsprobleem 4 betreft een zanddijk met gesloten taludbekleding die wordt blootgesteld aan het gecombineerde effect van een stormvloed en het getij. Ook hier wordt gevraagd het potentiaalverloop in de tijd over de lengte van het model te berekenen.

Als afsluiting van het rapport zijn in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen samengevat.

De lezer die zich niet uitgebreid wenst te verdiepen in de specifieke numerieke resultaten van de berekeningen wordt verwezen naar hoofdstuk 2 (SEEP en ELNAG) en hoofdstuk 7 (Samenvattende konklusies en aanbevelingen).

2. SEEP en ELNAG

2.1. Beschrijvingen

2.1.1. SEEP

SEEP is een rekenprogramma dat dient om algemene grondwaterstromingsproblemen op te lossen. Als randvoorwaarden zijn mogelijk:

- a. voorgeschreven (tijdsafhankelijke) stijghoogten op een vaste rand;
- b. voorgeschreven (tijdsafhankelijke) debieten (randdebieten, bronnen/putten);
- c. (bewegende) scheidingsoppervlakken (freatische lijn, zoet-zoutgrens).

Er wordt gerekend met de eindige elementenmethode. Hierbij wordt het stromingsgebied onderverdeeld in een groot aantal elementen. In SEEP worden driehoeken gebruikt. Voor elk element wordt verondersteld dat de potentiaalverdeling over dat element lineair verloopt. In de hoekpunten van de driehoeken (de knooppunten van het elementenmesh) is de potentiaal bekend, berekend dan wel opgegeven. Het oplossen van de stroming is zo teruggebracht tot het bepalen van alle potentialen in de knooppunten van alle elementen. De oplossing geschiedt iteratief. Allereerst wordt de tijd gediscretiseerd. Per tijdstap wordt de nieuwe ligging van de freatische lijn onder invloed van veranderende randvoorwaarden minimaal driemaal achtereenvolgens berekend, totdat de aanpassing van het stromingsveld aan de nieuwe situatie voldoende is. Deze berekening bevat iedere keer zelf ook nog twee iteratieprocessen. Inspeelverschijnselen dempen in het tijdsiteratieproces uit.

Invoer geschiedt met behulp van ponskaarten, waarop volgens de programmahandleiding van SEEP de symbolen op daartoe voorgeschreven plaatsen worden ingevoerd: de invoer is "geformatteerd".

De programmataal is FORTRAN. Uitvoer vindt plaats in print- of plotvorm. De gebruikte computer is de IBM 370/158 van de TH Delft.

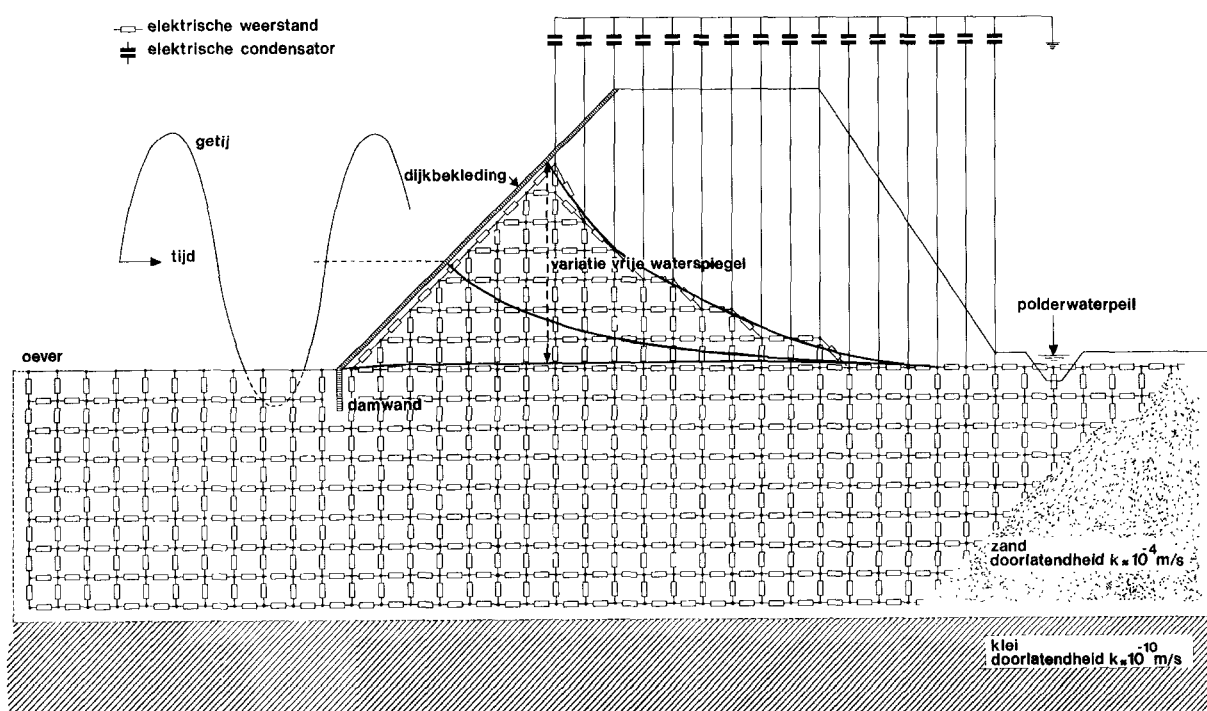
Tijdens het onderzoek is men begonnen het programma SEEP over te brengen naar de eigen Harris-computer van het LGM.

2.1.2. ELNAG *

ELNAG is een electrisch netwerkanalogon waarmee twee-dimensionale grondwaterstroming wordt gesimuleerd. Er kunnen problemen met zowel freatische als elastische berging mee worden opgelost.

Ontworpen om grondwaterstanden, -spanningen en -stromen in dijken te bepalen, waarbij zowel stationaire als tijdsafhankelijke randvoorwaarden kunnen worden ingevoerd, kunnen ook andere twee-dimensionale grondwaterstromingsproblemen met de ELNAG worden onderzocht. Het model bestaat uit een netwerk van weerstanden, condensatoren en elektrische schakelingen. Het netwerk kan maximaal 5000 knooppunten omvatten.

elektrische simulatie van de grondwaterstroming in een dijklichaam



Door het netwerk uit verschillende weerstandswaarden op te bouwen kunnen gelaagdheid en anisotropie van het doorstroomde grondpakket worden gesimuleerd. Door middel van schakeleenheden past het netwerk zich automatisch aan aan de veranderingen van de hoogte van de vrije waterspiegel.

Besturing van het model vindt plaats met behulp van een minicomputer met programmatuur in Fortran en Assembler.

Als invoer kunnen twee tijdsafhankelijke randvoorwaarden zoals getijden, stormvloedkrommen of golven worden opgegeven.

Daarbuiten kunnen 94 stationaire randvoorwaarden worden ingesteld.

Uitvoer is mogelijk in digitale of plotvorm, het laatste via een hard copy unit die beelden van een beeldscherm afleest.

De (electrische) stroom in het analogon kan continu worden afgelezen. De gehanteerde oplossingsmethode, het simuleren van grondwaterstroming door een electrisch analogon betekent dat de getalwaarden continu gemeten kunnen worden en er in geen enkele zin sprake is van een iteratieproces. Wel kunnen bij de aanvang van een simulatie inspeelverschijnselen een rol spelen, maar deze dempen snel uit en kunnen door middel van de minicomputer buiten de meetserie worden gesteld (aantal "getij-voorinslingeringen" variabel instelbaar).

2.2. Tijdsduur van de berekeningen

2.2.1. SEEP

Berekeningen vergen veel rekentijd en daaruit volgend veel wachttijd. Voor gecompliceerde problemen kan slechts één run per dag of moet soms 's nachts worden gedraaid.

Allereerst moet het voor het probleem ontworpen elementen-mesh worden gecheckt op juistheid.

Daarna wordt een (stationaire) startfase berekend; vervolgens wordt ook de niet-stationaire fase doorgerekend. Met het berekenen van een gecompliceerd probleem als toetsprobleem 4 zijn zeker twee weken gemeoid, niet volledig aan het programma besteed, maar puur als gevolg van de wachttijd. In de toekomst zal hier verbetering in ontstaan als het programma SEEP op de eigen Harris-computer van het LGM is overgebracht.

2.2.2. ELNAG

Berekeningen bij ELNAG geschieden snel: één getijde wordt in ca. 1 seconde doorgerekend. Maximaal kan de berekening veel (b.v. 50) getijden omvatten.

Uitvoer is in grafisch of getalvorm direkt beschikbaar.

Het ontwerpen en opbouwen van het weerstandsnetwerk is eenvoudig en snel te doen. Men moet voor gecompliceerde problemen als toetsprobleem 4 denken aan 3 à 4 dagen. Storingen die vertragend kunnen werken zijn doorgaans van fijn-mechanische aard; slecht functionerende kontakten etc. Zij zijn doorgaans à 1a minute verholpen.

2.2.3. Konklusie

Ofschoon na lezing van het bovenstaande de indruk kan ontstaan dat berekeningen met ELNAG sneller verlopen dan met SEEP kan dit niet als keiharde conclusie worden gesteld. Immers, zowel bij ELNAG als bij SEEP speelt de bezettingsgraad van het systeem een belangrijke rol. Berekeningen met SEEP worden daarenboven nog vertraagd als gevolg van de bezettingsgraad van de TH computer, die erg kan variëren. Overbrenging van het programma SEEP naar de eigen Harris computer van het LGM zal hierin voor verbetering zorgen. Deze invloeden overwegende kan niet duidelijk worden gesteld of voor de beschouwde klasse van toetsproblemen sneller kan worden gewerkt met ELNAG of met SEEP. Eén en ander kan volkomen afhankelijk zijn van externe omstandigheden, zoals bezettingsgraad van het systeem of het aantal uit te voeren (variant) berekeningen per op te lossen grondwaterprobleem.

2.3. Kosten van de berekeningen

2.3.1. SEEP

De gemaakte kosten bedragen per toetsprobleem, bij normale voortgang van de werkzaamheden:

Toetsprobleem 3

sinusvorming variërende randvoorwaarde	f	760,00
lineair toenemende randvoorwaarde	f	390,00

Toetsprobleem 4

eenmalig doorrekenen van stormvloedkromme	f	9600,00
---	---	---------

Deze in rekening gebrachte kosten zijn de kosten van de computerberekening, vermenigvuldigd met de factor 3,8 voor overhead etc.

Daarnaast moeten per toetsprobleem de advieskosten in rekening worden gebracht. Deze bedragen geschat 2 mandagen à f 1000,00.

2.3.2. ELNAG

Rijkswaterstaat doet geen kostenopgave van de op ELNAG uitgevoerde berekeningen zolang dit gedaan wordt voor andere Rijkswaterstaatsdiensten. Wel kan getracht worden een schatting te maken van te verrekenen kosten van het gebruik van de ELNAG-apparatuur en te besteden manuren. De geschatte kostenraming voor gebruik van ELNAG bedraagt

f 500,00 per dag. Stelt men dat voor toetsprobleem 4 één man b.v. 5 dagen daar aan werkt, dan zullen de kosten b.v. bedragen:

te verrekenen ELNAG-gebruik	f 2500,00
te verrekenen mandagen	f 5000,00
	f 7500,00

2.3.3. Konklusies

Voor berekeningen voor Rijkswaterstaat is ELNAG zonder meer goedkoper, aangezien afschrijving, beheer, onderhoud en uurloon voor rekening van de Deltadienst komen en binnen Rijkswaterstaat niet worden doorberekend. Wil men toch de kosten in beschouwing nemen, dan blijkt dat bij het éénmalig doorrekenen van een geval zoals hier voor toetsprobleem 4 is gebeurd, de mankosten vaak bepalend te zijn; SEEP en ELNAG zijn dan vergelijkbaar en verschillen niet zoveel in totaalkosten.

Wanneer parametrisch onderzoek noodzakelijk is en het netwerk niet gewijzigd hoeft te worden (b.v. veelvuldig randvoorwaarde en k-waardevarianten doorrekenen) dan is bij tijdsafhankelijke potentiaal-randvoorwaarde-berekeningen de ELNAG veelvuldig goedkoper, omdat daarbij de "runkosten" praktisch wegvallen (1 getijduur = 1 seconde) en voor SEEP, bij meerdere berekeningen, de runkosten vanwege de "stapsgewijze berekeningsmethode" gaan overheersen en aanzienlijk zullen zijn.

2.4. Gebruikersvriendelijkheid van SEEP en ELNAG

Hieronder wordt verstaan in hoeverre de gebruiker zelf snel vertrouwd is met de berekeningsmethode.

2.4.1. SEEP

SEEP vraagt om een grondige studie voordat men zich als gebruiker vertrouwd kan voelen met het programma; de afhankelijkheid van een met het programma vertrouwde programmeur is zeer groot.

2.4.2. ELNAG

Voor ELNAG geldt dat men zich vrij snel vertrouwd kan maken met het werken met een electrisch analogon. Met enige hulp is het opbouwen van een weerstandsnetwerk in ELNAG voor de gebruiker zonder problemen te doen; dit geldt ook voor berekeningen: bediening van de apparatuur is eenvoudig.

2.4.3. Konklusie

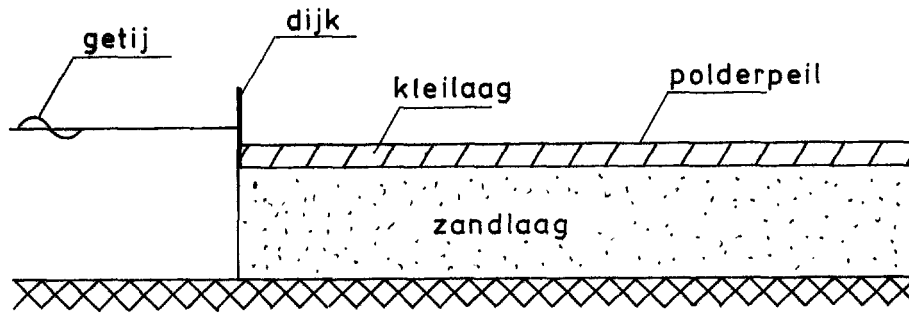
Het werken met ELNAG is meer begrijpelijk en overzichtelijk dan het werken met SEEP, waarvoor meer tijd vereist is als men zich met het programma eigen wil maken. Is men echter met SEEP en de eindige elementenmethode vertrouwd geraakt, dan vallen deze verschillen weg en kunnen de beide berekeningsmethoden als gelijkwaardig worden gezien. Opgemerkt moet worden dat het plotten bij SEEP momenteel meer mogelijkheden in zich heeft dan het plotten bij ELNAG. Zijn bij de eerste tekeningen op vrijwel iedere gewenste schaal mogelijk, bij ELNAG heeft men een wat andere opzet. Bij het apparaat heeft men direct de beschikking over een terminal en een beeldscherm. Zo is het mogelijk de uitvoer in tijd-hoogte grafieken direct op een beeldscherm af te beelden. Van deze beelden kan ter plaatse een hard-copy worden gemaakt. Deze hard-copy's zijn gebonden aan één formaat papier en vaak wat onhandig voor direct gebruik vanwege de wisselvallige schaal van tekening. Tevens bestaat bij ELNAG de mogelijkheid de uitvoer digitaal op te vragen. X-Y-plots kunnen daaruit slechts (met de hand) op gewenst formaat millimeter papier worden geformeerd. Momenteel wordt er bij de Deltadienst gepoogd een aansluiting te krijgen op de computer van de Dienst Informatie Verwerking, waar plotprocedures beschikbaar zijn. Het laat zich aanzien dat deze aansluiting in 1981 gereed zal zijn, waardoor het mogelijk wordt:

- a) X-Y-plots direct op het beeldscherm bij ELNAG te formeren;
- b) zowel stijghoogte-tijdgrafieken als X-Y-plots op elke gewenste schaal met de DIV-Calcomp-tekenapparatuur beschikbaar te krijgen.

3. TOETSPROBLEEM 1

3.1. Het Toetsprobleem

Toetsprobleem 1 betreft een geschematiseerd dijkprofiel, waarvoor een analytische oplossing beschikbaar is, die als vergelijkingsbasis dient voor de resultaten van de berekening met ELNAG.



toetsprobleem 1

De gegevens zijn samengevat in bijlage 1.

3.2. De analytische oplossing

De analytische oplossing voor de grondwaterstroming is de superpositie van de oplossing voor stationaire stroming ten gevolge van een verschil tussen buitenwaterstand en polderpeil en de oplossing voor de niet-stationaire stroming ten gevolge van een sinusvormig variërende buitenwaterstand waarbij het gemiddeld peil samenvalt met het polderpeil.

De combinatie van deze twee geeft de oplossing voor de niet-stationaire stroming bij een sinusvormig variërende buitenwaterstand waarbij het gemiddeld peil niet samenvalt met het polderpeil.

De hierbij gedane aannamen zijn:

1. de stroming door de zandlaag is horizontaal;
2. de stroming door de weinig doorlatende kleilaag is vertikaal;
3. het kwelwater wordt direct afgevoerd;
4. er wordt uitgegaan van een oneindig lang model, waarbij de dijkbreedte $\rightarrow 0$ wordt gesteld, de kleilaag en de zandlaag over de gehele lengte homogeen zijn en geen sloten, waarin polderpeil heerst, de kleilaag doorsnijden.

3.2.1. Oplossing van het stationaire gedeelte volgens van Dam (zie bijlage 2)*

De oplossing voor het potentiaalverloop ϕ voor stationaire stroming bij een verschil tussen buitenwaterstand en polderpeil is:

$$\phi = \phi_0 e^{-x/\lambda} \quad (1)$$

waarin:

ϕ_0 = peilverschil tussen buitenwaterstand en polderpeil en

$$\lambda = \sqrt{kDc}.$$

3.2.2. Oplossing van het niet-stationaire gedeelte volgens Bosch (zie bijlage 3)**

De oplossing voor het potentiaalverloop ϕ voor niet-stationaire stroming bij een sinusvormig variërende buitenwaterstand is:

$$\phi = \phi_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x) \quad (2)$$

waarin:

ϕ_1 = amplitude sinusgolf,

ω = omloopsnelheid = $\frac{2\pi}{T}$ rad

en α en β bepaald zijn door

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{kDc} \quad \text{en} \quad (3)$$

$$2\alpha\beta = \frac{S\omega}{kD} \quad (4)$$

waarin:

S = elastische berging

3.2.3. Analytische totaaloplossing

De oplossing voor de niet-stationaire stroming bij een sinusvormig variërende buitenwaterstand waarbij het gemiddeld peil niet samenvalt met het polderpeil is:

$$\phi = \phi_0 e^{-x/\lambda} + \phi_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x) \quad (5)$$

Invulling van de gegeven getalwaarden geeft (zie bijlage 4):

$$\alpha = 1,18 * 10^{-2} \text{ m}^{-1} \quad \text{en}$$

$$\beta = 0,62 * 10^{-2} \text{ radm}^{-1}.$$

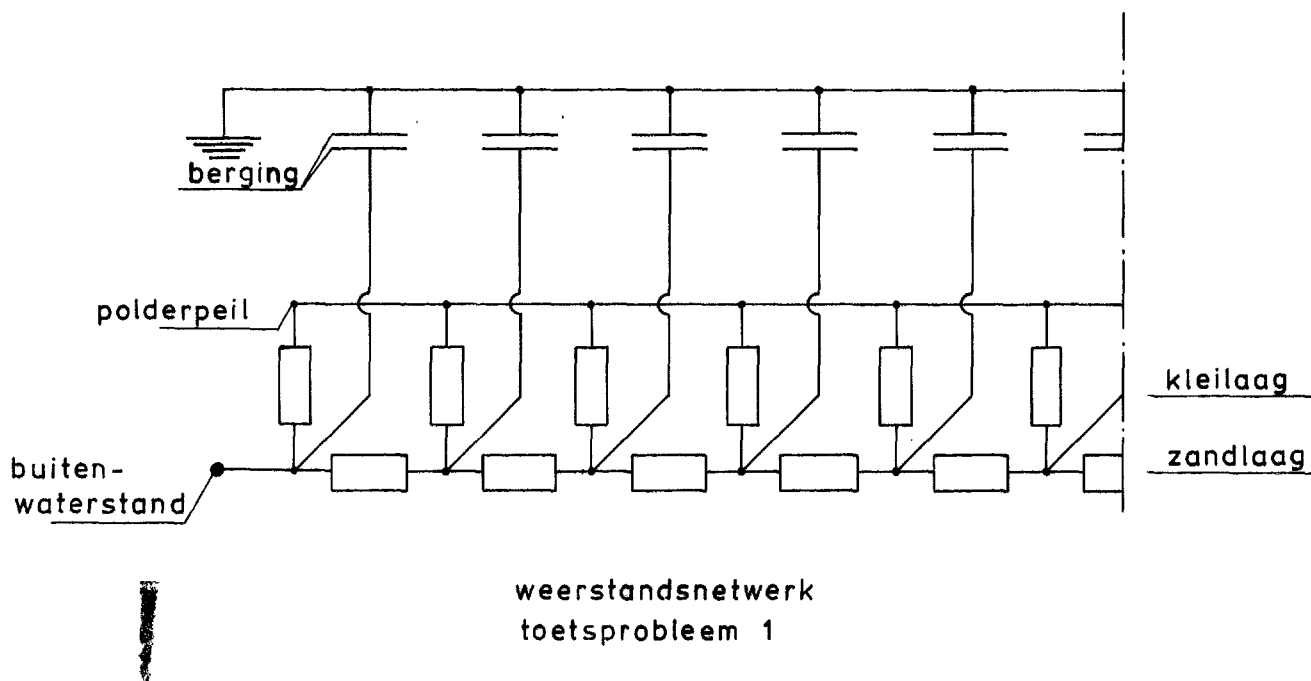
3.3. Berekening met ELNAG

In ELNAG wordt de grondwaterstroming in een electrisch analogon gesimuleerd. Berging wordt weergegeven met behulp van condensatoren; de doorlatendheid wordt in het electrisch analogon gebracht met behulp van weerstanden.

* lit. 2

** lit. 3

De lengte van het model (300 m) is in 27 vakken verdeeld. In de zandlaag is alleen horizontale stroming verondersteld, de stroming door de weinig doorlatende kleilaag is vertikaal. Voor de schematisatie heeft dit als consequentie dat de zandlaag in het model slechts wordt weergegeven door één rij weerstanden, zie de onderstaande figuur. De kleilaag wordt gesimuleerd door de verticale weerstanden.



3.4. Vergelijking van beide oplossingen

Het verloop van de potentiaal ϕ voor $x = 0$ m, $x = 10$ m, $x = 25$ m, $x = 50$ m, $x = 100$ m, $x = 200$, en $x = 300$ m is zowel voor de analytische oplossing als voor de berekening met ELNAG opgegeven in bijlage 5.

Bijlage 6 geeft zowel voor ELNAG als voor de analytische oplossing het verloop van de potentiaal ϕ in de lengte van het model voor de tijdstippen $t = 1/4 T$ en $t = 3/4 T$.

Damping, faseverschuiving en middenstandsverlaging zijn voor beide oplossingen in tabelvorm opgenomen in bijlage 7. De waarden voor ELNAG zijn uit bijlage 5 afgelezen.

Pas bij grote x ($x > 100$ m) doet het verschil in berekeningswijze zijn invloed gelden: wordt bij de analytische oplossing uitgegaan van een oneindig lang model, bij ELNAG is het model op een lengte $L = 300$ m ($= 3\lambda$) beëindigd. Bij een aanvullende ELNAG-meting met $L = 400$ m kwamen de resultaten ook bij de verder weg gelegen meetpunten dichter bij de analytische oplossing te liggen. Dit blijkt o.a. uit de getalwaarden voor de middenstandsverhoging op bijlage 7.

3.5. Konklusie

Uit de bijlagen 5, 6 en 7 is af te leiden dat de verschillen tussen de analytische oplossing en de berekening met ELNAG gering zijn.

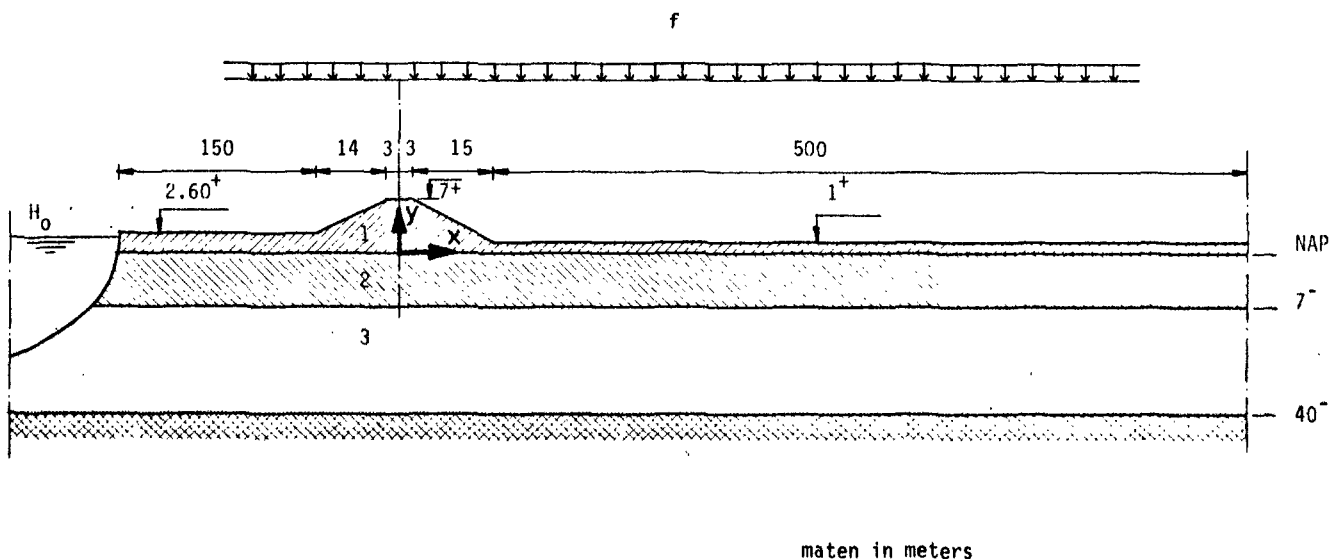
Voorzover aanwezig, treden ze vooral op voor $x > 100$ m.

Deze verschillen zijn logisch verklaarbaar: bij de bepaling van de analytische oplossing wordt uitgegaan van een oneindig lang model, bij de berekening met ELNAG is de lengte beperkt tot 300 m. Vergroting van deze lengte heeft als gevolg dat de analytische oplossing beter benaderd wordt.

4. TOETSPROBLEEM 2

4.1. Het toetsprobleem

Toetsprobleem 2 betreft een schematisering van de Waaldijk bij Vuren. Tijdens de hoogwaterperiode van voorjaar 1977 zijn zowel de potentialen in het onderliggend zandpakket als de potentialen in het afsluitend kleipakket gemeten op diverse afstanden van de rivier. Doel van de ELNAG-metingen is om deze waarnemingen na te rekenen. Gegevens over het toetsprobleem zijn te vinden in bijlage 8.



4.2. Berekeningen met ELNAG

Zoals in de inleiding al gesteld is, was voor toetsprobleem 2 een verdergaande schematisatie noodzakelijk. Deze bestaat hieruit dat:

1. voor het narekenen van de potentialen in het zandpakket, die door middel van peilbuizen zijn waargenomen, de bovenliggende kleilagen als ondoorlatend worden beschouwd en
2. voor het narekenen van de potentialen in het kleipakket de berekende potentialen in het zandpakket als (onder) randvoorwaarde onder het kleipakket zal worden aangehouden terwijl als bovenrandvoorwaarde een vast (polder-)peil zal worden gehanteerd.

4.2.1. Berekening van de potentialen in het zandpakket

De lengte van het dijkprofiel is onderverdeeld in een aantal vakken, zie bijlage 9. Voor elk der vakken is de representatieve weerstand ingevoerd; in de knooppunten is de berging opgenomen. De buitenwaterstand is geschematiseerd tot een opeenvolging van een twintigtal lijnstukken, zie bijlage 10 en 11. Deze wordt op het punt 0 ingevoerd.

Op de punten $x = 0$ m, $x = 4$ m, $x = 12$ m, $x = 33$ m en $x = 167$ m worden de metingen verricht; op het punt 685 m moet een eindvoorwaarde worden ingevoerd.

Na een viertal oriënterende metingen is het gelukt de peilbuiswaarnemingen goed te simuleren. Daartoe was het noodzakelijk de lengte van het model met 200 m te verlengen. Op het nieuwe eindpunt 885 m gemeten vanaf het intreepunt wordt als eindvoorwaarde een polderpeil van NAP - 0,60 m gehandhaafd. Bijlage 12 geeft het resultaat van de ELNAG-meting. Achtereenvolgens zijn de randvoorwaarde en meetwaarden voor de verschillende meetpunten getekend. De bijlagen 13, 14 en 15 tonen de peilbuiswaarnemingen en de ELNAG-metingen achtereenvolgens voor

$x = 4$ m (peilbuis II), $x = 33$ m (peilbuis IV) en $x = 167$ m (peilbuis V). De overeenkomst is goed, met uitzondering van de metingen voor $x = 167$ m, waar de metingen ten opzichte van de peilbuiswaarnemingen te laag liggen.

Er is niet verder gerekend. In nader onderzoek kan worden beschouwd:

1. invloed van de lengte van het voorland;
2. invloed van de lengte van het achterland;
3. invloed van de waarden voor de dikte van het zandpakket, de doorlatendheid en de bergingscoëfficiënt.

4.2.2. Berekeningen van de potentialen in het kleipakket

Ter plaatse van $x = 33$ m, peilbuis IV wordt getracht de gemeten potentialen in het kleipakket na te rekenen uitgaande van de gemeten ELNAG-waarden voor de potentialen in het zandpakket.

De kleilaag, 7 m dik (gerekend tot NAP - 0,00 m) wordt opgedeeld in 14 vakken van 0,5 m lengte. Als randvoorwaarde wordt aan de onderzijde op NAP - 7.00 m de ELNAG-meting, geschematiseerd in een twintigtal lijnstukken ingevoerd, zie bijlage 16. Aan de bovenzijde wordt als randvoorwaarde een peil van NAP - 1,00 m gehandhaafd.

Na een aantal metingen kunnen met deze randvoorwaarden de waarnemingen vrij goed benaderd worden met een c_v -waarde van $0,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, dat is een faktor 150 groter dan de c_v -waarde zoals deze oorspronkelijk was vastgesteld uit onderzoek van ter plaatse gestoken monsters. De bijlagen 17, 18 en 19 geven de potentialen en de ELNAG-metingen achtereenvolgens voor de diepten NAP - 5,50 m, - 4,75 m en - 2,75 m.

Er is niet verder gemeten; uit de metingen blijkt dat er een 100 tot 150 maal grotere c_v -waarde moet worden ingevoerd (de faktor 100 was al in eerder onderzoek bepaald) dan de c_v -waarden die uit onderzoek aan grondmonsters zijn bepaald. Duidelijk zal zijn dat zowel invloeden in de ELNAG-schematisatie als in de bepaling van de c_v -waarden hun rol spelen in deze grote faktor. Daarbij komt dat het kleimassief als één pakket wordt benaderd in de schematisatie; uit boringen is echter een sterke gelaagdheid van het kleimassief af te leiden waaraan schematisatie tot één pakket met één c_v -waarde tekort aan doet; in verder onderzoek verdient het dan ook aanbeveling de gelaagdheid meer in de schematisatie te betrekken.

4.3. Konklusie

Uitgaande van de gedane schematisatie laat toetsprobleem 2 zich met ELNAG nauwkeurig berekenen. Dit geldt met name voor het narekenen van de peilbuiswaarnemingen: de dicht bij de dijk gedane waarnemingen zijn in de ELNAG-simulatie goed te benaderen.

Het narekenen van de potentialen in het kleipakket blijkt slechts dan voldoende nauwkeurig mogelijk te zijn als we de c_v -waarde bepaald door onderzoek aan grondmonsters met een faktor 100 tot 150 vergroten; bij verder onderzoek verdient het aanbeveling de gelaagdheid van het kleipakket nauwkeurig in de schematisatie te betrekken al is zoiets vanwege de gekompliceerdheid van het pakket bijna onmogelijk.

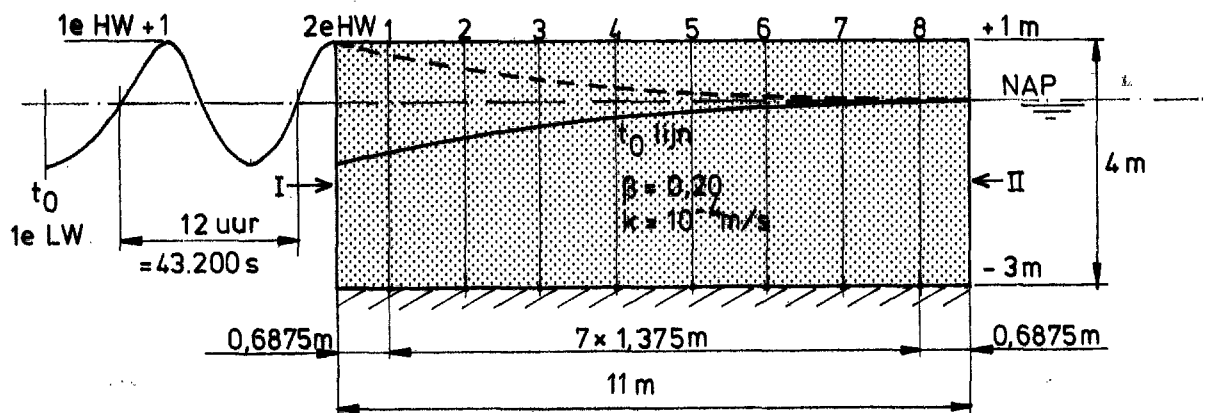
5. TOETSPROBLEEM 3

5.1. Het toetsprobleem

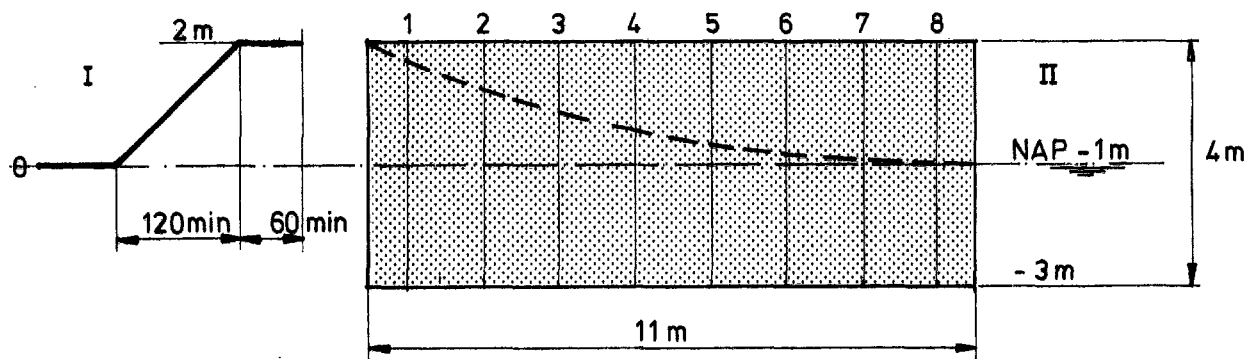
Toetsprobleem 3 is het probleem zandblok, zoals dat al eerder opgesteld is om ELNAG te testen en om de resultaten te vergelijken met de resultaten behaald met andere rekenmethoden. Het rechthoekige zandblok wordt aan de linkerzijkant onderworpen aan een variërende buitenwaterstand; aan de rechterzijkant wordt een vaste waterstand gehandhaafd.

Twee variërende buitenwaterstanden worden verwerkt:

- een periodiek variërende waterstand, toetsprobleem 3a;
- een lineair stijgende waterstand, toetsprobleem 3b.



Toetsprobleem 3a



Toetsprobleem 3b

Verdere gegevens zijn opgenomen in bijlage 20.

Dit toetsprobleem is al eerder door van der Weide in zijn afstudeerwerk (1969)* berekend met behulp van een eindige differentiemethode. De resultaten van de berekeningen met SEEP en ELNAG zullen hiermee worden vergeleken.

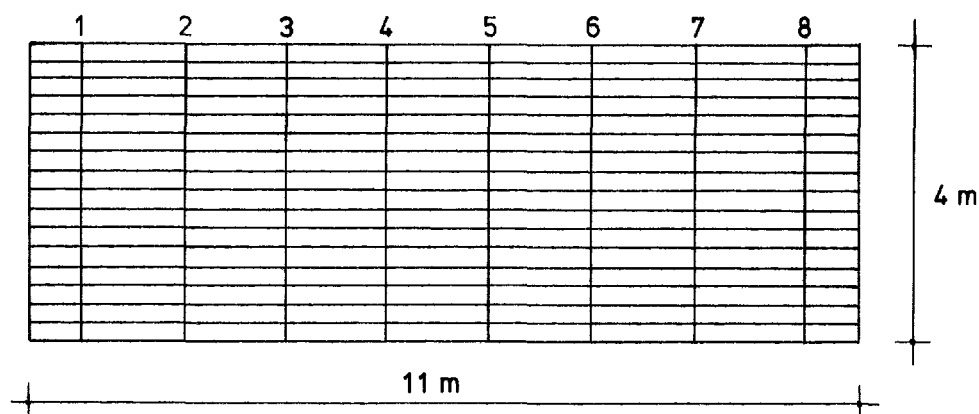
5.2. Berekeningen

5.2.1. Berekening met ELNAG

Het grondmassief wordt onderverdeeld in gelijke rechthoeken; als lengte-eenheid wordt gekozen 1,375 m, als hoogte-eenheid 0,25 m. Het totale weerstandsnetwerk is dan opgebouwd uit 8 kolommen en 17 rijen.

Het weerstandsnetwerk schakelt weerstanden in of uit op het tijdstip dat de freatische lijn het midden van het lijnstuk tussen twee knooppunten van het netwerk passeert.

Daarmee reageert het dus stapsgewijs op de veranderingen in de ligging van de freatische lijn en de vorm van het stromingsveld.



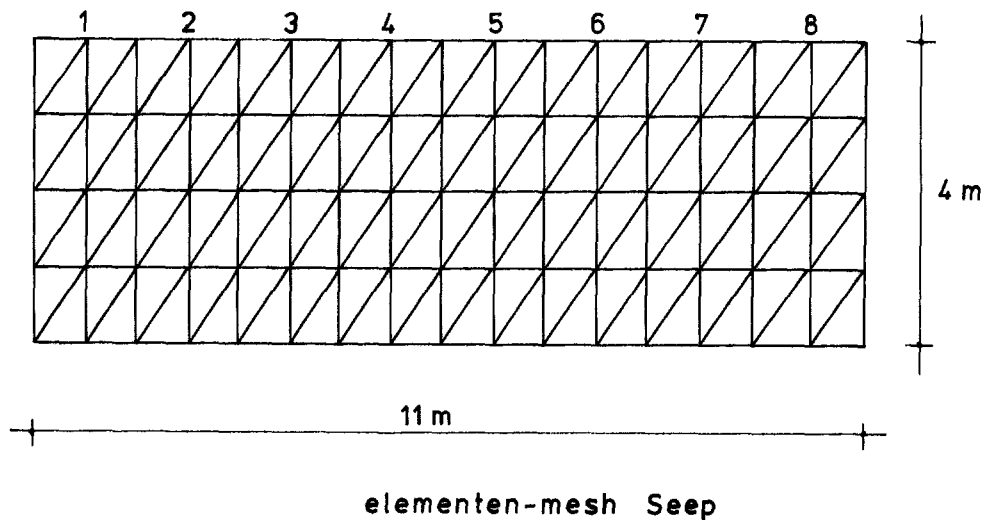
weerstandnetwerk Elnag

5.2.2. Berekening met SEEP

Het grondmassief wordt verdeeld in driehoekige elementen; het aantal knoepkolommen bedraagt 17, het aantal knooppunten 5.

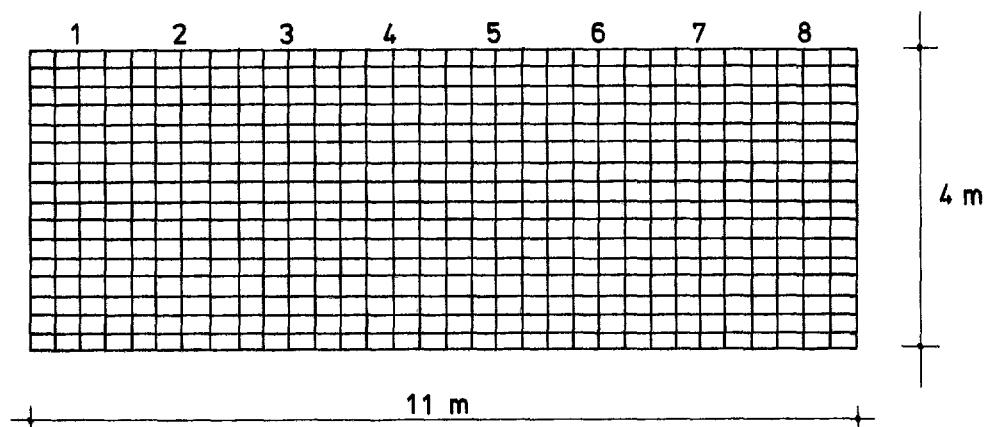
Het elementen-mesh ademt, d.w.z. bij stijgende of dalende freatische lijn wordt het mesh in de hoogte uitgerekt of teruggedrongen; het wordt in de tijd aangepast.

* lit. 4



5.2.3. Berekening met de methode van der Weide

Het voert te ver in dit rapport diep op de door van der Weide gehanteerde eindige differentiemethode in te gaan. De lezer zij hiervoor verwezen naar de literatuur*. Zijn berekeningen zijn uitgevoerd met een zeer fijn netwerk en een kleine tijdstap. Van der Weide verdeelt het zandblok in rechthoekjes met breedte 0,34375 m en hoogte 0,25 m. Dan zijn er inclusief de randen 33 knoepkolommen en zijn er 17 knooprijen. Gerekend wordt met een tijdstap die op grond van stabiliteitskriteria kleiner moet zijn dan 480 s. Ofschoon van der Weide hier niet expliciet op in gaat kan op grond van zijn rapport worden aangenomen dat met een tijdstap van 150 s is gerekend.



* lit. 4

netwerk van der Weide

5.3. TOETSPROBLEEM 3a

5.3.1. Resultaten

Voor de sinusvormig variërende randvoorwaarde zijn op bijlage 21 de resultaten van de berekening met SEEP en ELNAG met elkaar vergeleken, op bijlage 22 die van de berekeningen met SEEP en de methode van der Weide en op bijlage 23 die van de berekeningen met Elnag en de methode van der Weide. De berekeningen met SEEP zijn uitgevoerd met tijdstap 450 s; de resultaten verschillen nauwelijks van later uitgevoerde berekeningen met tijdstap 900 s. In het algemeen is de demping bij SEEP kleiner dan bij ELNAG, resulterend in grotere amplitudes; tevens speelt bij de verschillen in resultaten het inschakelverschijnsel in de beginfase en de verschillen in schematisatie een rol. De resultaten van de berekeningsmethode van der Weide houden het midden tussen die van SEEP en ELNAG. De faseverschuiving vertoont hetzelfde beeld.

Het verschil tussen SEEP en ELNAG duidt zich al bij de beginwaarde op $t = 0$ h. Beide methoden gaan evenals van der Weide voor het bepalen van de begintoestand uit van permanente stroming waarbij de linker randvoorwaarde overeenkomt met de laagste waarde van de sinusvormig variërende buitenwaterstand. Deze permanente stromingstoestand wordt bij SEEP berekend in de vorm van een aanpassing van de freatische lijn, uitgaande van de als recht tussen linker en rechter randvoorwaarde aangenomen eerste schatting. De berekening geschiedt met een nauwkeurigheid van 0,02 m, dat wil zeggen dat de berekening wordt gestopt als de aanpassing ten opzichte van de vorige aanpassing voor alle knooppunten van de freatische lijn minder dan 0,02 m bedraagt. Daarmee wordt getuige de resultaten, ook binnen een bandwijdte van tenminste 0,02 m, voor een aantal punten de permanente ligging van de freatische lijn zoals ELNAG en van der Weide die geven en die overeenkomt met de ligging berekend met behulp van een analytische oplossing die voor de permanente stroming beschikbaar is, niet bereikt.

De nauwkeurigheid van de aanpassing kan worden opgegeven. Dit bepaalt voor een groot deel in hoeverre de mede op grond van de resultaten behaald bij toetsprobleem 1 en 2 betrouwbaar te noemen oplossing van ELNAG benaderd zal worden, afgezien van invloeden die de vorm van het elementenmesh en de gekozen tijdstap met zich mee brengen. Deze invloeden zijn overigens wel van belang en niet alleen voor de resultaten maar ook voor de kosten; een fijnere elementenverdeling c.q. een

kleinere tijdstap brengt nauwkeuriger rekenen met zich mee, naar te verwachten zodanig dat de ELNAG-oplossing beter benaderd zal worden maar ook hogere kosten veroorzaakt door de langere rekentijd.

Dit aspect is in een eerder rapport(Barends (1978))* al aan de orde geweest. In dit rapport wordt getoond dat tijdstapvergroting in eerste instantie aanleiding geeft tot minder faseverschuiving en minder demping; een fijnere elementenverdeling veroorzaakt een grotere demping.

Ten aanzien van de nauwkeurigheid stelt Barends dat zeker bij periodiek variërende randvoorwaarden in de SEEP-berekening sprake is van een cumulatieve fout die faseverschuiving en demping veroorzaakt; tevens speelt in de resultaten het inschakelverschijnsel in de beginfase een rol.

5.3.2. Konklusie

Het geheel overziende kan worden gekonkludeerd dat de drie genoemde berekeningsmethoden ELNAG, SEEP en van der Weide goed met elkaar vergelijkbaar zijn. Kleine verschillen zijn waarschijnlijk het gevolg van een afwijkende elementenindeling, het verschil in beginfase op $t = 0$ en de keuze van de tijdstapgrootte.

5.4. Toetsprobleem 3b

Resultaten en Konklusie

Op bijlage 24 zijn de resultaten van de berekeningen met SEEP, ELNAG en de methode van der Weide vastgelegd.

De resultaten geven hetzelfde beeld als bij toetsprobleem 3a.

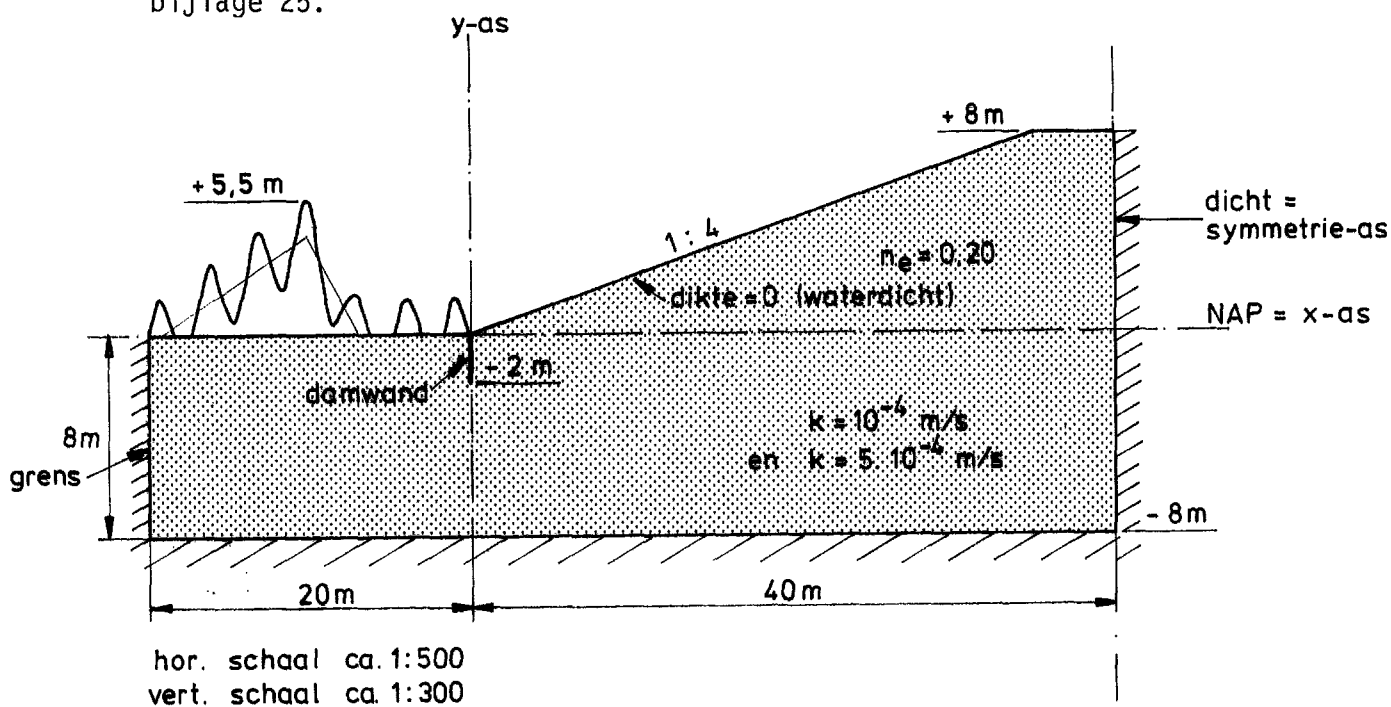
Op grond van deze resultaten behoeft de konklusie genoemd onder toetsprobleem 3a geen verdere aanvulling.

* lit. 5

6. TOETSPROBLEEM 4

6.1. Het toetsprobleem

Toetsprobleem 4 is een door ing. J.C. van der Burg opgesteld standaard dijkprofiel om de mogelijkheden van ELNAG uit te testen. Het betreft een gedeelte van een zanddijk of havendam met een waterdichte taludbekleding, die op de vooroever wordt onderworpen aan een stormvloedkromme, een combinatie van een sinusvormig getij en een éénmalige waterstandsverhoging als windeffect. De gegevens zijn opgenomen in bijlage 25.



6.2. Berekeningen

6.2.1. Berekening met ELNAG

Het grondmassief wordt opgedeeld in rechthoeken; bijlage 26 geeft de vorm van het weerstandsnetwerk en de indeling in weerstands- en condensatorwaarden.

6.2.2. Berekening met SEEP

Het elementennetwerk zoals bij de berekening met SEEP gehanteerd is weergegeven in bijlage 27.

6.3. Resultaten

De resultaten van de SEEP en ELNAG berekening zijn voor $k = 10^{-4} \text{ m/s}$ op bijlage 28 met elkaar vergeleken. Voor de berekening met SEEP is

als tijdstap $\Delta T = 36$ minuten aangehouden.

De resultaten liggen, zeker gezien deze grote tijdstap, dicht bij elkaar. Verschillen in de overdrukken liggen in de orde van 20 mm. Er is nauwelijks sprake van verschillen in faseverschuiving, alleen van verschillen in amplitudedemping en gemiddelde hoogteligging, vooral de meetpunten verder dijkinwaarts; dit is waarschijnlijk het gevolg van verschillen in begintoestand. SEEP begint met een stationaire toestand, waarbij de buitenwaterstand juist NAP en alle binnenwaterstanden ook NAP = 0 m zijn aangenomen; ELNAG heeft in bijlage 28.2 als begintoestand de situatie in het dijklichaam zoals deze na een groot aantal inslingeringen met de periodieke randvoorwaarde is. Na aanvullende berekeningen met ELNAG in bijlage 28.1, waarbij geen inslingergetijden aan de begintoestand vóór werden gegeven (dus ook vanuit de NAP = 0 m werd gestart), bleken de resultaten dan ook veel nauwkeuriger met die van SEEP overeen te komen; zie hiervoor bijlage 28.1. Bijlage 29 geeft voor SEEP, het elementenmesh in de begintoestand met een horizontale freatische lijn. De meetpunten 1 tot en met 6 zijn hier ingetekend.

Bijlage 30 blad 1 geeft nogmaals een verkleind beeld van de resultaten: de randvoorwaarde en de potentialen in de meetpunten zijn weergegeven. Dalen en pieken in de randvoorwaarde zijn achtereenvolgens genummerd. De daaropvolgende bladen geven voor elk van deze dalen of pieken een momentopname van het stromingsbeeld waarbij equipotentiaallijnen zijn ingetekend. Het verschijnsel dat de freatische lijn tegen het gesloten talud aanloopt is duidelijk waarneembaar.

6.4. Konklusie

De resultaten van de SEEP en ELNAG berekening liggen dicht bij elkaar; het inspeelverschijnsel speelt hier nog een rol. Wat eveneens een rol speelt zijn de fundamentele verschillen tussen een numeriek model en een analoog model.

Bij een analoog model is de tijd continu (analoog) in het model gebracht; de aanpassing van de freatische lijn met de parallel aangesloten berging (condensator) geschiedt discontinu. Bij een numeriek model is de tijd discontinu (gediskretiseerd) in het model gebracht; de aanpassing van de freatische lijn geschiedt echter vrijwel continu (wordt namelijk na iedere tijdstap aangepast).

De voor dit toetsprobleem geconstateerde verschillen in de resultaten zijn te klein om er deze modelverschillen uit af te kunnen lezen.

7. SAMENVATTENDE KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit rapport heeft men in een onderzoek tot een vergelijking tussen twee toepasbare en beschikbare grondwaterstromingsmodellen willen komen en heeft men de betrouwbaarheid van deze modellen willen bepalen. Het betreft een analoge methode; het electrisch netwerkanalogon ELNAG, in beheer bij Rijkswaterstaat Deltadienst en een numeriek computerprogramma SEEP, gebaseerd op de eindige elementenmethode, in beheer bij het Laboratorium voor Grondmechanica te Delft.

7.1. Konklusies

In de voorafgaande hoofdstukken zijn al een aantal konklusies op een rij gezet.

Samenvattend kan worden gezegd dat wat de numerieke resultaten betreft de verschillen tussen SEEP en ELNAG gering maar wel noemenswaard zijn. Omdat met SEEP geen problemen met elastische berging berekend kunnen worden, zijn de toetsproblemen 1 en 2 alleen met ELNAG berekend.

Berekening van grondwaterstroming in een schematisch geval waarvoor ook een analytische oplossing beschikbaar is (toetsprobleem 1) wijst uit dat de berekening met ELNAG voor dat geval betrouwbaar is.

Vanwege de elastische berging in dit toetsprobleem werd niet met SEEP gerekend. Bij het berekenen van niet-stationaire grondwaterproblemen met SEEP en ELNAG is de nauwkeurigheid van het resultaat afhankelijk van de startfase van de berekening (bij de toetsproblemen 3 en 4 wel of niet inslingeren van getijden vóór af) en van de toegepaste elementenmesh en de toegepaste tijdstap bij SEEP c.q. het toegepaste weerstandsnetwerk bij ELNAG. Naarmate men nauwkeuriger wil rekenen vereist dit fijnere meshes bij SEEP c.q. fijnere weerstandsnetwerken bij ELNAG en bij SEEP een kleinere tijdstap. Opgemerkt dient te worden dat verfijning in ELNAG niet onbeperkt mogelijk is. Verder worden de mogelijkheden beperkt door de beschikbare weerstands- en condensatorwaarden. Met afweging van de aan verfijning verbonden meerkosten moet een zekere optimalisatie bereikt kunnen worden. In de praktijk zal inzicht gekoppeld aan ervaring hier bepalend zijn.

De tijdsduur voor het uitvoeren van berekeningen is sterk afhankelijk van de bezettingsgraad van het systeem. Door geringe flexibiliteit van ELNAG zal het systeem wanneer het volledig bezet is niet voor andere problemen kunnen worden ingezet. Dit geldt niet voor een computerprogramma aangezien het computerprogramma direct beschikbaar is en het

probleem in afwachting van de berekening door de computer kan worden opgeslagen. De berekeningen kunnen daarna 's nachts of zelfs in het weekend worden uitgevoerd.

Bij ELNAG duurt de opbouw van het netwerk wat langer (2 à 3 dagen); bij SEEP kunnen "wachttijden" bij de computer een rol spelen, bij een berekening van grote omvang (als toetsprobleem 4) is slechts één run per dag (of 's nachts) mogelijk. Bij ELNAG is de rekentijd per run zeer gering (1 getij duurt $\approx$ 1 seconde). Per dag kunnen veel "runs" ten behoeve van één en hetzelfde probleem worden gedraaid.

Wanneer voor één bepaald grondwaterprobleem veelvuldig een groot aantal varianten (parametrisch onderzoek) met tijdsafhankelijke potentiaal-randvoorwaarden doorgerekend moeten worden zal men in een aantal gevallen met ELNAG sneller werken. Een nadeel is echter wel dat wanneer de capaciteit van ELNAG bereikt is er niet simultaan andere problemen mee opgelost kunnen worden. Dit is wel het geval bij een computer waarbij door het time-sharing systeem een aantal problemen simultaan kunnen worden opgelost. Daarentegen zal bij een éénmalige berekening en (of) stationaire randvoorwaarden met SEEP sneller gerekend worden.

Ten aanzien van het kostenaspect is het belangrijk of voor Rijkswaterstaat of voor een andere instantie wordt gewerkt. Ten aanzien van dit punt zal wel duidelijk zijn dat de "diensten" die de Deltadienst met ELNAG kosteloos aanbiedt aan de Rijkswaterstaatorganisatie niet ongebruikt gelaten mogen worden.

Voor een éénmalige berekening zoals bij toetsproblemen 3 en 4 is gebeurd zijn vaak de mankosten bepalend en zijn ELNAG en SEEP t.a.v. kosten vergelijkbaar.

Alleen bij tijdsafhankelijke randvoorwaardeproblemen waarbij veelvoudig berekeningen zullen moeten worden gedaan (parametrisch onderzoek) zal ELNAG in kosten veelvoudig goedkoper zijn omdat wanneer het netwerk eenmaal opgebouwd is onbeperkt veel metingen kunnen worden gedaan, waarbij de kosten per run praktisch wegvallen en juist bij SEEP deze "kosten" bepalend zijn.

Vergelijking van SEEP en ELNAG op andere aspecten geeft geen duidelijke voorkeur aan voor één van deze twee, voorzover het de onderhavige toetsproblemen betreft. Beide berekeningsmethoden hebben hun voor- en nadelen. Algemeen gesteld zal elke willekeurige gebruiker op grond van het soort grondwaterprobleem, de kosten en zijn ervaringen met analogons of numerieke modellen voor één van de twee kiezen.

7.2. Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling het toetsen van grondwaterstromingsmodellen niet beperkt te houden tot de vergelijking tussen ELNAG en SEEP, zoals in dit rapport is gebeurd, doch het onderzoek uit te breiden tot een vergelijking van alle beschikbare grondwaterstromingsmodellen. Daarbij is het nodig een reeks toetsproblemen op te stellen, waarbij een rangorde in moeilijkheidsgraad bestaat. Het uittesten van willekeurige grondwaterstromingsmodellen op deze reeks geeft dan aan voor wat voor problemen het grondwaterstromingsmodel niet meer geschikt is om tot een oplossing te komen. Bij het opstellen van de reeks toetsproblemen dient aan de differentiatie in moeilijkheidsgraad de nodige aandacht te worden besteed. Het rapport S-78.047a "Grondwaterstromingsmodellen" (januari 1979) kan hierbij tot steun zijn (bijl. 31). Daarbij, als tweede punt is tijdens dit onderzoek gebleken dat niet alleen de numerieke resultaten van belang zijn bij de beoordeling van een grondwaterstromingsmodel, maar dat daarnaast ook de snelheid van werken met het model, de kosten, de gebruikersvriendelijkheid enz. een belangrijke rol spelen. Immers, het te berekenen probleem laat zich in het algemeen wel schematiseren tot voor een groot aantal grondwaterstromingsmodellen berekenbaar geval; onder de aannamen die daarbij gedaan zijn, worden de snelheid waarmee de berekening dan kan worden uitgevoerd en de gebruikersvriendelijkheid van het betreffende grondwaterstromingsmodel en de aan de berekening verbonden kosten belangrijke criteria waarop het grondwaterstromingsmodel ook beoordeeld dient te worden.

Zodat samenvattend kan worden gezegd:

1. stel een reeks in moeilijkheidsgraad verlopende toetsproblemen op waarop grondwaterstromingsmodellen kunnen worden uitgetest;
2. schenk bij de vergelijking van grondwaterstromingsmodellen niet alleen aandacht aan numerieke resultaten, maar beoordeel ook op wat ze voor de gebruiker waard zijn op aspecten als:
 1. is er snel inzicht te verkrijgen in de toegepaste berekeningsmethode of niet ?
 2. zijn ze gemakkelijk in gebruik, zijn ze gemakkelijk toegankelijk of niet ?
 3. is men bij gebruik sterk of minder sterk afhankelijk van de persoon die het model ontwikkelde of in beheer heeft ?
 4. hoeveel kosten en tijd zijn met berekeningen gemoeid ?

Belangrijk hierbij zijn vragen als: welk type probleem (stationair of niet stationair) en hoeveel en wat voor variante berekeningen moeten er per probleem worden gemaakt.

De bij de grondwaterstromingsmodellen beschikbare handleidingen kunnen bij de bovengenoemde vragen een leidraad zijn; zonder dat al teveel (kostbare) berekeningen worden gemaakt, moet een deskundige op grond van deze handleidingen vrij snel in staat worden geacht een oordeel over de geschiktheid van het betreffende model te geven.

LITERATUUR

1. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO
Rapporten en Nota's no. 2:
Verslag van de TNO-ad hoc groep
Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur
Den Haag, juli 1978.
2. van Dam, J.C.
Kwel in een polder door een weinig doorlatende laag,
waarin een meer doorlatend deel aanwezig is.
Kollegediktaat F 15B, TH Delft.
3. Bosch, H.
Geo-hydrologisch onderzoek Bergambacht
Hydrologisch Colloquium H.C. (S) no. 255A, 1951.
4. van der Weide, B.S.
Niet-Permanente Grondwaterproblemen met een z.g. vrije
grondwaterspiegel.
Rapport van het deelontwerp vloeistofmechanica in opdracht
van prof.ir. W.C. Bischoff van Heemskerck, augustus 1969.
5. Barends, F.B.J.
Toetsprobleem: Zandblok berekend met SEEP, cyclische
buitenwaterstand.
LGM rapport CO-416053/2.
6. Verruijt, A.
Theory of Groundwater Flow.
Mac Millan, London, 1970.
7. Rijkswaterstaat Deltadienst
Rapport ELNAG.
"Electrisch Netwerkanalogon voor Grondwaterproblemen"
Project G 7724B00, november 1979.

Bijlage 31
Grondwaterstromingsmodellen
S-78.047

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
D. Pereboom
januari 1979.

<u>Inhoud</u>	<u>Blz.</u>
Inleiding	
1. Grondwaterstromingsmodellen	1
1.1. Model	1
1.2. Grondwaterstroming	3
1.3. Berekening	4
2. Toetsproblemen	4
2.1. Toetsprobleem 1	4
2.2. Toetsprobleem 2	5
2.3. Toetsprobleem 3	5
3. Criteria voor beoordeling	6
Literatuur	7

Bijlagenlijst behorend bij bijlage 31 van S-78.047

<u>Bijlage</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>form./tek.nr.</u>
31.1	relatieschema niet-stationaire grond- waterstroming I	A4/79.408
31.2	relatieschema niet-stationaire grond- waterstroming II	A4/79.409
31.3	legenda	A4/79.410
31.4	randvoorwaarden buitendijks	A3/79.411
31.5	randvoorwaarden kruin	A4/79.412
31.6	randvoorwaarden binnendijks	A4/79.413
31.7	geometrie en samenstelling dijk	A3/79.414
31.8	geometrie en samenstelling ondergrond	A3/79.415
31.9	eisenpakket berekening	2x2Z/79.416
31.10	toetsprobleem 1	A4/79.417
31.11	toetsprobleem 2	A4/79.418
31.12	toetsprobleem 3	A4/79.419
31.13	samenvatting eisen/toetsprobleem	2x2Z/79.420
31.14	getalwaarden	A2/79.421
31.15	geometrie dijk	A4/79.422
31.16	buitenwaterstand toetsprobleem 2 en 3	A4/79.423
31.17	kriteria invoer	A3/79.424
31.18	kriteria uitvoer	A4/79.425

INLEIDING

Om een onderzoek te starten naar de evaluatie en de toepasbaarheid van beschikbare grondwaterstromingsmodellen (analytisch, analoog of digitaal) op de Nederlandse waterkeringen is in de periode november 1978 tot januari 1979 bij het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen een vóóronderzoek gestart, waarbij aandacht werd besteed aan de volgende drie punten:

1. Welke geschematiseerde grondwaterstromingsmodellen zijn van toepassing op de Nederlandse waterkingen;
2. Stel op grond van bovenstaande inventarisatie één of meer toetsproblemen op die kunnen worden gebruikt voor het vergelijken van de op dit moment bestaande rekenprogramma's of analogons;
3. Stel aan de hand van de toetsproblemen de criteria op waaraan de te gebruiken programma's of analogons moeten voldoen (randvoorwaarden, invoer, rekenprogramma, uitvoer).

De resultaten hiervan zijn vastgelegd in deze bijlage en dient als basis voor het bovengenoemd onderzoek.

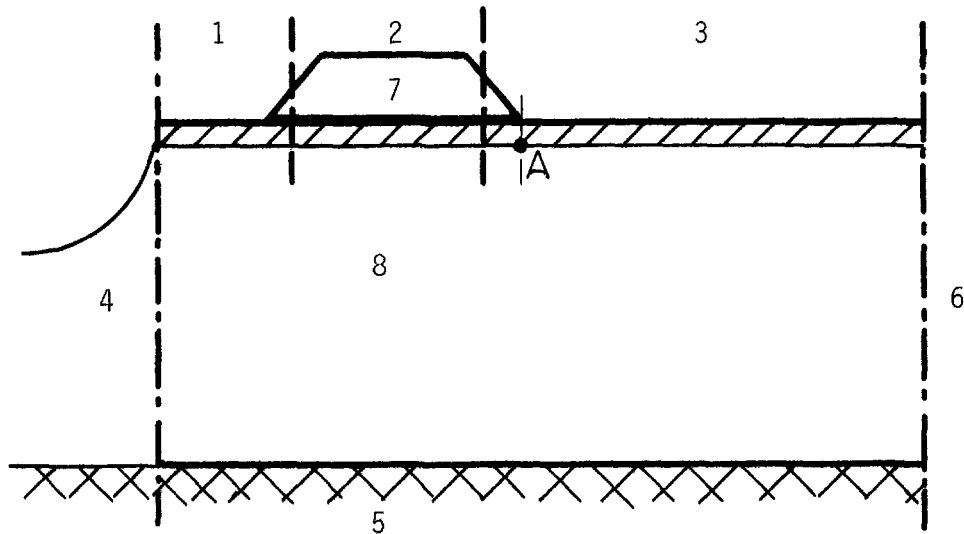
In dit rapport zijn een 3-tal op rivierdijken afgestemde toetsproblemen opgesteld, waarbij een rangorde in moeilijkheidsgraad werd toegepast.

Dirk Pereboom, januari 1979.

1. Grondwaterstromingsmodellen

1.1. Model

Bij het onderzoek naar de op de Nederlandse waterkeringen van toepassing zijnde grondwaterstromingsmodellen is ter vereenvoudiging een "standaard" dijkprofiel opgedeeld in een aantal deelgebieden (fig. 1).



- | | | |
|------------------------|---|--------------|
| 1. Buitenkant dijk | } | Randen |
| 2. Bovenkant dijk | | |
| 3. Binnenkant dijk | | |
| 4. Voorbegrenzing | | |
| 5. Ondoorlatende basis | } | Grondmassief |
| 6. Achterbegrenzing | | |
| 7. Dijk | | |
| 8. Ondergrond | | |

Fig. 1 Deelgebieden Dijkprofiel

De niet-stationaire grondwaterstroming is bepaald door de voorwaarden op de randen, deelgebieden 1 t/m 6 en door de eigenschappen van het grondmassief, deelgebieden 7 en 8; beginvoorwaarden bepalen de begin-toestand (bijlage 31.1).

Deze randvoorwaarden en eigenschappen van de deelgebieden dienen bij het opstellen van één of meer toetsproblemen te worden opgenomen als

"eisen" waaraan de te toetsen rekenprogramma's in meer of mindere mate moeten voldoen.

Randvoorwaarden en eigenschappen als b.v. stationaire waterstand of homogeniteit zijn vast te leggen in een aantal grootheden b.v. een constant waterpeil H of een constante doorlatendheid k .

Bij berekening dienen aan deze grootheden getalwaarden toe te worden gekend (bijlage 31.2).

Voor elk van de deelgebieden zijn de voor dit onderzoek van belang zijnde randvoorwaarden of eigenschappen en de hieraan verbonden grootheden bepaald. In bijlage 31.3 (legenda), 5 t/m 9 is hier een beeld van gegeven. Kort samengevat betreft dit per deelgebied:

1. Buitenkant dijk (bijlage 31.4).

Als randvoorwaarden moeten kunnen worden opgenomen een stationaire waterstand $H_0 = a$, een in de tijd lineair verlopende waterstand $H_0 = a + bt$ en een in de tijd sinusvormig variërende waterstand $H_0 = a + b \sin \omega t$. Iedere willekeurige waterstandsvariatie b.v. een hoogwatergolf of een springtij met opwaaiing kan nu worden beschreven door deze randvoorwaarden in de tijd te superponeren.

2. Bovenkant dijk (bijlage 31.5).

Eventueel dient neerslag f of verdamping ($-f$) te kunnen worden opgenomen.

3. Binnenkant dijk (bijlage 31.6).

Hier is (meestal een vaste) waterstand H_p (polderpeil) of regen, c.q. verdampingsintensiteit aanwezig.

4. Voorbegrenzing (fig.1).

Langs deze doorsnede gelden de voorwaarden zoals onder punt 1 genoemd. De doorsnede wordt genomen ter plaatse van het "intreepunt", d.w.z. daar waar het voorland (in de vorm van de semipermeabele laag) eindigt. De lengte van het voorland moet opgenomen kunnen worden.

5. Ondoorlatende basis (fig. 1).

Hier geldt de voorwaarde dat het debiet loodrecht op de rand nul is. De diepteligging van de ondoorlatende basis moet kunnen worden opgenomen.

6. Achterbegrenzing (fig. 1).

Hier geldt de voorwaarde dat de potentiaal ϕ in de ondergrond gelijk is aan de vaste waterstand H_p .

Plaats van deze doorsnede is bepaald door deze eis uit de grondwaterstroming. In § 1.2. komt dit nader aan de orde.

7. Dijk (bijlage 31.7).

De materiaaleigenschappen inhomogeniteit en anisotropie dienen eventueel te kunnen worden opgenomen, evenals freatische en/of elastische berging.

De afmetingen van de dijk moeten bij de schematisatie zo goed mogelijk worden weergegeven.

Als aangenomen wordt dat de hoofdrichtingen van de anisotropie horizontaal en verticaal zijn, dan betekent één en ander dat de horizontale en verticale doorlatendheid k_h en k_v en de bergingscoëfficiënten μ en S (freatische en elastische berging) puntsgewijs moeten kunnen worden ingevoerd (netwerk); door de puntsgewijze definiëring kunnen de afmetingen van de dijk als ook de aanwezigheid van verstoringen, bermten etc. zonder meer worden aangenomen.

8. Ondergrond (bijlage 31.8).

Ook hier dienen de materiaaleigenschappen inhomogeniteit en anisotropie eventueel te kunnen worden opgenomen en moet elastische berging in rekening kunnen worden gebracht; de afmetingen dienen bij de schematisatie zo goed mogelijk te worden weergegeven.

Dit betekent weer dat de horizontale en verticale doorlatendheid k_h en k_v en de bergingscoëfficiënt S puntsgewijs moeten kunnen worden ingevoerd. Aanwezigheid van b.v. kleilagen of zandlagen kan dan zonder meer worden opgenomen.

1.2. Grondwaterstroming

Zoals in § 1.1. al aan de orde gesteld, is de niet-stationaire grondwaterstroming bepaald door de voorwaarden op de randen en door de eigenschappen van het grondmassief; beginvoorwaarden bepalen de begintestand (bijlage 31.1).

Juist als de randvoorwaarden en de eigenschappen van de deelgebieden zijn ook beginvoorwaarden vast te leggen in een aantal grootheden. Bij berekening dienen aan deze grootheden weer getalwaarden te worden toegekend.

Wat de grondwaterstroming zelf betreft moeten kunnen worden opgenomen
of de geschatte lengte λ achter de dijk waarover de potentiaal ϕ in de ondergrond de waarde van het polderpeil H_p bereikt;
of de geschatte potentiaal ϕ_A in A (fig. 1) bij maatgevend hoog water (MHW).

Keuze voor één van de twee betekent dat de ander uit de berekening dient te volgen.

1.3. Berekening

Bijlage 31.9 (legenda bijl. 31.3) geeft een beeld van hoe de eisen zijn bepaald waaraan de berekening dient te voldoen.

Uit het voorafgaande volgt al dat de berekening niet-stationair dient te zijn. Er dient twee-dimensionaal, eventueel drie-dimensionaal gerekend te kunnen worden.

In te voeren grootheden zijn in het voorafgaande al aan de orde geweest, waarbij met name de inhomogeniteit en anisotropie, freatische en elastische berging eventueel moeten kunnen worden opgenomen.

Als resultaat van de berekening dienen te worden uitgevoerd het verloop van debieten, potentialen c.q. waterspanningen en de ligging van de freatische lijn in de dijk. Voorzover deze laatste uit het binnendijkstalud treedt, het zgn. kweloppervlak, dient hiervoor een signalering aanwezig te zijn of berekend te kunnen worden. Voor het bereiken van de grenspotentiaal dient eveneens een signalering aanwezig te zijn; de hiervoor te verwachten veranderingen in het stromingsbeeld dienen te worden verrekend.

Onder grenspotentiaal verstaan wij die potentiaal waarbij de binnendijkse kleilaag in labiel evenwicht verkeert. Verhogen van de potentiaal heeft opbarsten van het kleidek tot gevolg.

2. Toetsproblemen

Uitgaande van het in de vorige paragraaf gestelde "eisenpakket" is er naar gestreefd drie in moeilijkheidsgraad oplopende toetsproblemen op te stellen.

Daarbij moet nog worden voldaan aan de eis, dat voor zeker een van deze toetsproblemen een analytische oplossing beschikbaar is, die als vergelijkingsbasis kan dienen voor de uitkomsten van andere berekeningswijzen. Deze eis is ondergebracht in het eerste toetsprobleem.

2.1. Toetsprobleem 1.

Toetsprobleem 1 (bijlage 31.10) omvat een homogeen en isotroop watervoerend pakket, afgesloten door de semi-permeabele kleilaag, waarbij elastische berging in het watervoerend pakket in beschouwing wordt genomen.

De dijk is geschematiseerd tot een ondoorlatende wand met breedte = 0. Aan de buitenkant dijk wordt als randvoorwaarde een in de tijd sinusvormig variërende waterstand $H_0 = a + b \sin \omega t$ aangenomen. Er is geen neerslag.

De analytische oplossing van dit probleem bestaat uit de superpositie van de oplossing voor de in de tijd sinusvormig variërende waterstand volgens Bosch (1951) en de oplossing voor een stationaire waterstand welke te vinden is in Van Dam. Beide oplossingen hebben betrekking op één-dimensionale stroming; te verwachten is dat de rekenprogramma's twee-dimensionale stroming zullen aannemen.

2.2. Toetsprobleem 2

Toetsprobleem 2 (bijlage 31.11) is een uitbreiding van toetsprobleem 1: de dijk is nu als een homogeen, isotroop dijklichaam opgenomen, waarin zowel freatische als elastische berging mogelijk zijn.

De aan de buitenkant dijk geldende eisen, stationaire waterstand $H_0 = a$, een in de tijd lineair verlopende waterstand $H_0 = a + b t$ en een in de tijd sinusvormig variërende waterstand $H_0 = a + b \sin \omega t$ zijn allen opgenomen.

2.3. Toetsprobleem 3

Toetsprobleem 3 (bijlage 31.12) is weer een uitbreiding van toetsprobleem 2: inhomogeniteit en anisotropie zijn nu ook opgenomen, evenals neerslag f , constant in de tijd.

Een samenvatting van welke eisen in welk toetsprobleem zijn ondergebracht is gegeven in bijlage 31.13.

Getalwaarden, voorzover van toepassing op het betreffende toetsprobleem, zijn in bijlage 31.14 vermeld. Het referentievlak ligt op het niveau van het maaiveld.

De vorm van de dijk laat zich beschrijven door getalwaarden voor paren L_i, α_i , waarin L_i de lengte is, horizontaal gemeten beginnend bij de buitenteen en α_i de taludhelling over deze lengte (bijlage 31.15).

Bij toetsprobleem 1 is voor ω de waarde $2\pi/44700 \text{ radsec}^{-1}$ gekozen; hiermee representeert de kromme $H_0 = a + b \sin \omega t$ juist een getij met een periode van 12 u 25 min $\approx 44700 \text{ sec}$.

Bij toetsprobleem 2 en 3 is voor de buitenwaterstand een willekeurige kromme opgenomen, zie bijlage 31.16.

De lengte van voorland L_v is op 50 m gekozen (ontgrondingsgrens); de lengte van achterland L_a is om en nabij de waarde 3λ gekozen.

Het polderpeil H_p is overal nul genomen; een andere waarde dan deze mag bij berekening echter geen bezwaar opleveren !

3. Criteria voor beoordeling

Bijlage 31.17 en 31.18 geven de criteria waaraan de invoer resp. de uitvoer dienen te voldoen om handzame verwerking mogelijk te maken. Beoordeling van de rekenprogramma's zal naast de vergelijking van de resultaten en het voldoen aan de bovenvermelde criteria tevens plaatsvinden op rekenprogramma zelf (toegankelijkheid voor de gebruiker) en de kosten en tijdsaspecten die bij het uitvoeren van een berekening van belang zijn.

Samenvattend: beoordeling op

- vergelijking van resultaten
- in- en uitvoer dienen handzaam verwerkbaar te zijn
- het rekenprogramma; toegankelijkheid voor de gebruiker
- kosten en tijdsaspecten bij het uitvoeren van een berekening.

LITERATUUR

Bosch, H.

Geo-hydrologisch onderzoek Bergambacht

Hydrologisch Colloquium H.C. (S) no. 255A, 1951.

van Dam, J.C.

Kwel in een polder door een weinig doorlatende laag,
waarin een meer doorlatend deel aanwezig is.

Kollegediktaat F 15B, TH Delft.

TOETSPROBLEEM 1.

GEGEVENS

$$\text{Buitenwaterstand: } H_0 = a_3 + b_3 \sin \omega t$$

$$\text{met } a_3 = 2,5 \text{ m +P.}$$

$$b_3 = 2,0 \text{ m +P.}$$

$$\omega = 2\pi/43200 \text{ radsec}^{-1}$$

$$T = 43200 \text{ sec} \hat{=} 12 \text{ h}$$

$$\text{Neerslag} : f = 0 \text{ (geen neerslag)}$$

$$\text{Polderpeil} : H_p = 0 \text{ m +P.}$$

$$\text{Overigen} : k = 10^{-4} \text{ msec}^{-1}$$

$$D = 10 \text{ m}$$

$$c = 10^7 \text{ sec}$$

$$d' = 5 \text{ m}$$

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$S = 10^{-3}$$

$$\lambda = \sqrt{kDc} = 100 \text{ m}$$

$$L_a = 300 \text{ m}$$

GEVRAAGD

1. Uitvoer verloop van de potentiaal ϕ in de tijd voor:

$$x = 0 \text{ m} \qquad y = 7,5 \text{ m}$$

$$x = 10 \text{ m (} = 0,10\lambda \text{)} \qquad y = 7,5 \text{ m}$$

$$x = 25 \text{ m (} = 0,25\lambda \text{)} \qquad y = 7,5 \text{ m}$$

$$x = 50 \text{ m (} = 0,50\lambda \text{)} \qquad y = 7,5 \text{ m}$$

$$x = 100 \text{ m (} = 1,00\lambda \text{)} \qquad y = 7,5 \text{ m}$$

toetsprobleem 1



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 1blad 1

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.155

2. Aangeven van berekende

damping

faseverschuiving

middenstandsverlaging

voor de bovengenoemde punten

3. Uitvoer verloop van de potentiaal ϕ in de lengterichting van het model
($x = 0$ tot $x = 300$ m ; $y = 7,5$ m) op de tijdstippen:

$t = \frac{1}{4} T$ en $t = \frac{3}{4} T$

Schalen

ad 1. horizontaal: 1 cm $\hat{=}$ 0,5 h

vertikaal : 1 cm $\hat{=}$ 0,20 m

ad 3. horizontaal: 1 cm = 10 m

vertikaal : 1 cm = 0,20 m

Tijdstap

ad 1. $\Delta T = 0,5$ h

toetsprobleem 1 (vervolg)



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

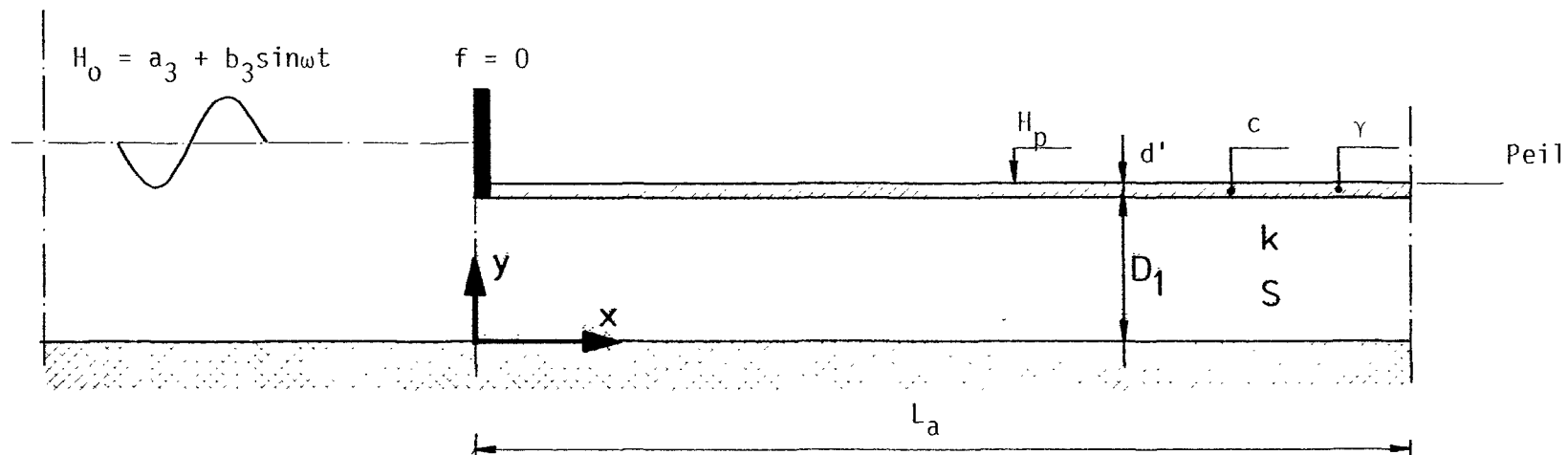
gez

Schaal -

Bijlage 1 blad 2

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.156 a



CONW

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 1 (vervolg)

get

[Handwritten signature]

gew

gez

Schaal -

werknr S-78.047

Bijlage 1blad 3

tek nr A4-79.156 b

Kwel in een polder door een weinig doorlatende laag, waarin een meer doorlatend deel aanwezig is.

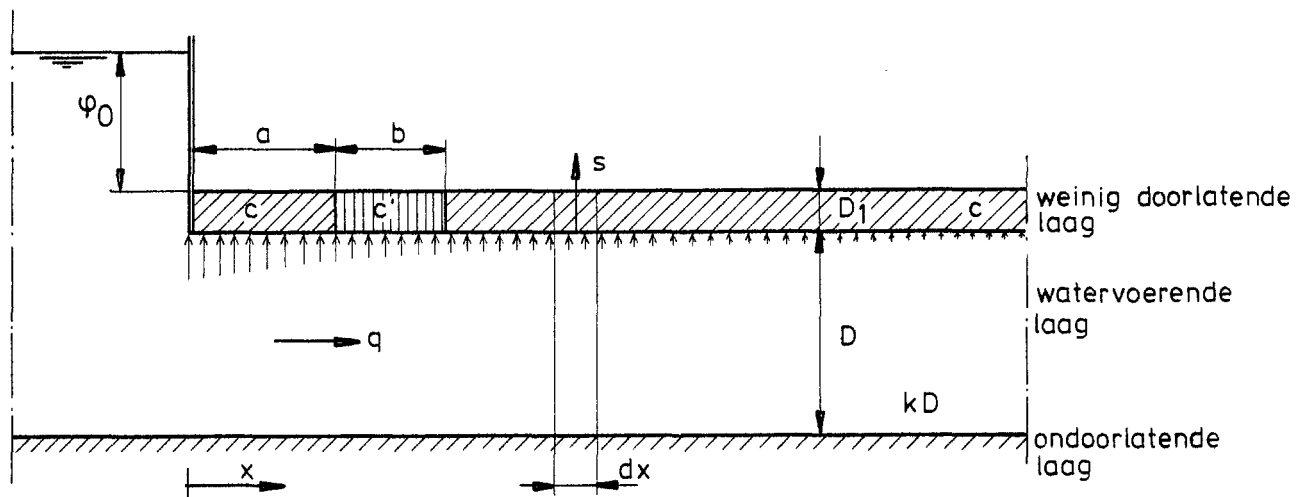


fig. 1

- $\phi = \varphi$ = overdruk (l)
 s = kwel (l/t)
 q = debiet door watervoerende laag (l²/t)
 c = hydraulische weerstand (t) = D_1/k'
 D_1 = laagdikte weinig doorlatende laag (l)
 k' = vertikale doorlatendheid (l/t)
 kD = doorlaatvermogen (l²/t).
 k = horizontale doorlatendheid (l/t)
 D = laagdikte watervoerende laag (l)

De kwel in een polder is geschematiseerd zoals in fig. 1 is getekend.

Aangenomen is: 1^e De polderdijk is ondoorlatend.

2^e De stroming door de watervoerende laag is horizontaal.

3^e De stroming door de weinig doorlatende laag is vertikaal.

4^e Het kwelwater wordt direkt afgevoerd.

In de weinig doorlatende afsluitende laag in de polder is een deel over afstand b meer doorlatend: $c' < c$.

Gevraagd wordt: Bereken het verloop, met toenemende afstand x tot de dijk, van: de overdruk ϕ
 de kwel s en
 het debiet q .

oplossing toetsprobleem 1, stationair gedeelte

(zie verder bijlage 2 blad 2 t/m 6)

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 2blad 1
				werknr S-78.047	

Oplossing

Horizontaal $q = v \cdot D$ (bewegingsvergelijking)

$$v = -k \dot{\phi} = -k \frac{d\phi}{dx}$$

$$\text{dus: } q = -kD \frac{d\phi}{dx} \dots\dots\dots(1)$$

Vertikaal $s = k' \frac{\phi}{D_1}$ (bewegingsvergelijking)

$$c = \frac{D_1}{k'} \quad \text{dus } s = \frac{\phi}{c} \dots\dots\dots(2)$$

Continuïteitsvoorwaarde $s \, dx = -d \, q \dots\dots\dots(3)$

Hieruit volgen 3 vergelijkingen met drie onbekenden ϕ , s en q .

$$\text{Uit (1) volgt: } \frac{dq}{dx} = -kD \frac{d^2\phi}{dx^2}; \quad (3) \text{ geeft: } s = -\frac{dq}{dx}$$

$$\text{Dit combineren: } s = kD \frac{d^2\phi}{dx^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$(2) \text{ in (4): } \frac{\phi}{c} = kD \frac{d^2\phi}{dx^2} \quad \text{dus } \phi = c kD \frac{d^2\phi}{dx^2}$$

$$\text{Stel } \sqrt{kDc} = \lambda \quad \text{Invullen: } \frac{\phi}{\lambda^2} = \frac{d^2\phi}{dx^2}$$

$$\text{Hieruit volgt: } \frac{d^2\phi}{dx^2} - \frac{\phi}{\lambda^2} = 0$$

$$\text{Algemene oplossing: } \phi = c_1 e^{-x/\lambda} + c_2 e^{x/\lambda} \dots\dots\dots(5)$$

Het continue geval ($b=0$); continue weinig doorlatende laag.

$$\text{Randvoorwaarden: } x = 0 \quad \phi = \phi_0, \quad \text{dus } \phi_0 = c_1 + c_2$$

$$x = \infty \quad \phi = 0, \quad \text{dus } 0 = c_1 \cdot 0 + c_2 \cdot \infty$$

$$\text{Hieruit volgt: } c_2 = 0 \text{ en } c_1 = \phi_0$$

(5) wordt nu: overdruk $\phi = \phi_0 e^{-x/\lambda}$

(2) geeft : kwel $s = \frac{\phi_0}{c} e^{-x/\lambda}$

(1) geeft : debiet $q = -k D \frac{d\phi}{dx}$, dus $q = \frac{k D \phi_0}{\lambda} e^{-x/\lambda}$

Het discontinue geval: ($b \neq 0$)

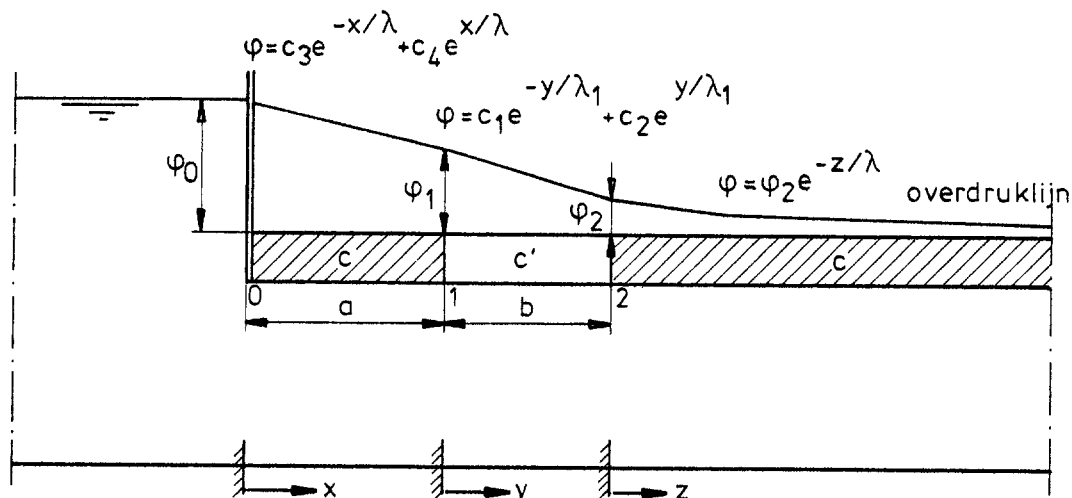


fig. 2

Over z geldt (rechtse, continue deel): $\phi = \phi_2 e^{-z/\lambda}$

Over $y(b)$ geldt: $\phi = c_1 e^{-y/\lambda'} + c_2 e^{y/\lambda'} \quad (\lambda' = \sqrt{k D c'})$

Over $x(a)$ geldt: $\phi = c_3 e^{-x/\lambda} + c_4 e^{x/\lambda}$

s en q zijn m.b.v. (2) en (1) direct af te leiden.

M.b.v. de randvoorwaarden vinden wij uiteindelijk 5 vergelijkingen, waaruit c_1, c_2, c_3, c_4 en ϕ_2 zijn op te lossen.

T.p.v. doorsnede 2: $\phi_{\text{links } 2} = \phi_{\text{rechts } 2} (= \phi_2)$ en $q_{\text{links } 2} = q_{\text{rechts } 2}$

T.p.v. doorsnede 1: $\phi_{\text{links } 1} = \phi_{\text{rechts } 1}$ en $q_{\text{links } 1} = q_{\text{links } 2}$

T.p.v. doorsnede 0: $\phi_{\text{links } 0} (= \phi_0) = \phi_{\text{rechts } 0}$

Een snellere en elegantere methode is echter van rechts naar links werkend, steeds de randvoorwaarden gebruikend, de constanten c_1 t/m c_4 in ϕ_2 uit te drukken en ϕ_2 op te lossen uit de vergelijking $\phi_{\text{links}} (= \phi_0) = \phi_{\text{rechts } 0}$

T.p.v. doorsnede 2

$$\phi_{12} = \phi_{r2} \quad \text{dus } c_1 e^{-b/\lambda'} + c_2 e^{b/\lambda'} = \phi_2$$

$$\text{ook } q_{12} = q_{r2} \quad \text{dus } \frac{k D}{\lambda'} (c_1 e^{-b/\lambda'} - c_2 e^{b/\lambda'}) = \frac{k D \phi_2}{\lambda}$$

$$\text{hieruit volgt: } c_1 = \frac{1}{2} \phi_2 \left(1 + \frac{\lambda'}{\lambda}\right) e^{b/\lambda'} \dots\dots\dots(6)$$

$$c_2 = \frac{1}{2} \phi_2 \left(1 - \frac{\lambda'}{\lambda}\right) e^{-b/\lambda'} \dots\dots\dots(7)$$

T.p.v. doorsnede 1

$$\phi_{11} = \phi_{r1} \quad \text{dus } c_3 e^{-a/\lambda} + c_4 e^{a/\lambda} = c_1 + c_2$$

$$q_{11} = q_{r1} \quad \text{dus } \frac{k D}{\lambda} (c_3 e^{-a/\lambda} - c_4 e^{a/\lambda}) = \frac{k D}{\lambda'} (c_1 - c_2)$$

$$\text{hieruit volgt: } c_3 = \frac{1}{4} \phi_2 Q e^{a/\lambda} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{waarin } Q = \left(2 + \left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'}\right)\right) e^{b/\lambda'} + \left(2 - \left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'}\right)\right) e^{-b/\lambda'}$$

$$c_4 = \frac{1}{4} \phi_2 R e^{-a/\lambda} \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{waarin } R = \left(\frac{\lambda'}{\lambda} - \frac{\lambda}{\lambda'}\right) e^{b/\lambda'} - \left(\frac{\lambda'}{\lambda} - \frac{\lambda}{\lambda'}\right) e^{-b/\lambda'}$$

T.p.v. doorsnede 0

$$\phi_{10} = \phi_{r0} \quad \text{dus } \phi_0 = c_3 + c_4$$

$$c_3 \text{ en } c_4 \text{ invullen geeft: } \phi_0 = \frac{1}{4} \phi_2 (e^{a/\lambda} \cdot Q + e^{-a/\lambda} R)$$

$$\text{Stel } (e^{a/\lambda} Q + e^{-a/\lambda} R) = S$$

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 2blad 4
	get gew gez			werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.160

$$\text{dan: } \phi_2 = \frac{4\phi_0}{S}$$

Dit ingevuld in (6) t/m (9) geeft:

$$c_1 = \frac{2}{S} \left(1 + \frac{\lambda'}{\lambda}\right) \cdot e^{b/\lambda'} \cdot \phi_0 \quad c_2 = \frac{2}{S} \left(1 - \frac{\lambda'}{\lambda}\right) e^{-b/\lambda'} - \phi_0$$

$$c_3 = \frac{1}{S} \cdot Q \cdot e^{a/\lambda} \cdot \phi_0 \quad c_4 = \frac{1}{S} \cdot R \cdot e^{-a/\lambda} \cdot \phi_0$$

Een goede controle op het berekenen van de constanten vormt de voorwaarde dat t.p.v. doorsnede 1 en doorsnede 2 de afgeleiden van ϕ naar x (resp. y, z) links en rechts gelijk moeten zijn.

Voorbeeld: $\phi_0 = 5 \text{ m}$ $c = 1000 \text{ dagen}$
 $b = 100 \text{ m}$ $c' = 100 \text{ dagen}$
 $kD = 1000 \text{ m}^2 \text{ etm.}, \text{ dus: } \lambda = \sqrt{k D c} = 1000 \text{ m en}$
 $\lambda' = \sqrt{k D c'} = 316,2 \text{ m.}$

Na enig rekenwerk vinden wij:

$$c_1 = \frac{18,03}{S} \quad c_2 = \frac{4,98}{S}$$

$$c_3 = \frac{1}{S} (32,1 \cdot e^{a/1000}) \quad c_4 = -\frac{1}{S} (9,14 \cdot e^{-a/1000})$$

$$\text{terwijl } S = 6,42 e^{a/1000} - 1,83 e^{-a/1000}$$

Hieruit volgt:

$$\text{Over afstand } a \quad \phi = \frac{1}{S} (32,1 e^{a/1000} \cdot e^{-x/1000} - 9,14 e^{-a/1000} \cdot e^{x/1000})$$

$$\text{Over afstand } b = 100 \text{ m} \quad \phi = \frac{1}{S} (18,03 e^{-y/316,2} + 4,98 e^{y/316,2})$$

$$\text{Over afstand } z \quad \phi = \frac{1}{S} (20 \cdot e^{-z/1000})$$

s en q zijn m.b.v. (2) en (1) direct af te leiden.

In de nu volgende grafieken is het verloop van ϕ , s en q getekend voor de 4 gevallen: I $b = 0$ IIa $= 0$ $b = 100 \text{ m}$

III $a = 100 \text{ m}; b = 100 \text{ m}$

IV $a = 300 \text{ m}; b = 100 \text{ m.}$



kwel in polder

geval I

$b = 0$

geval II $a = 0$

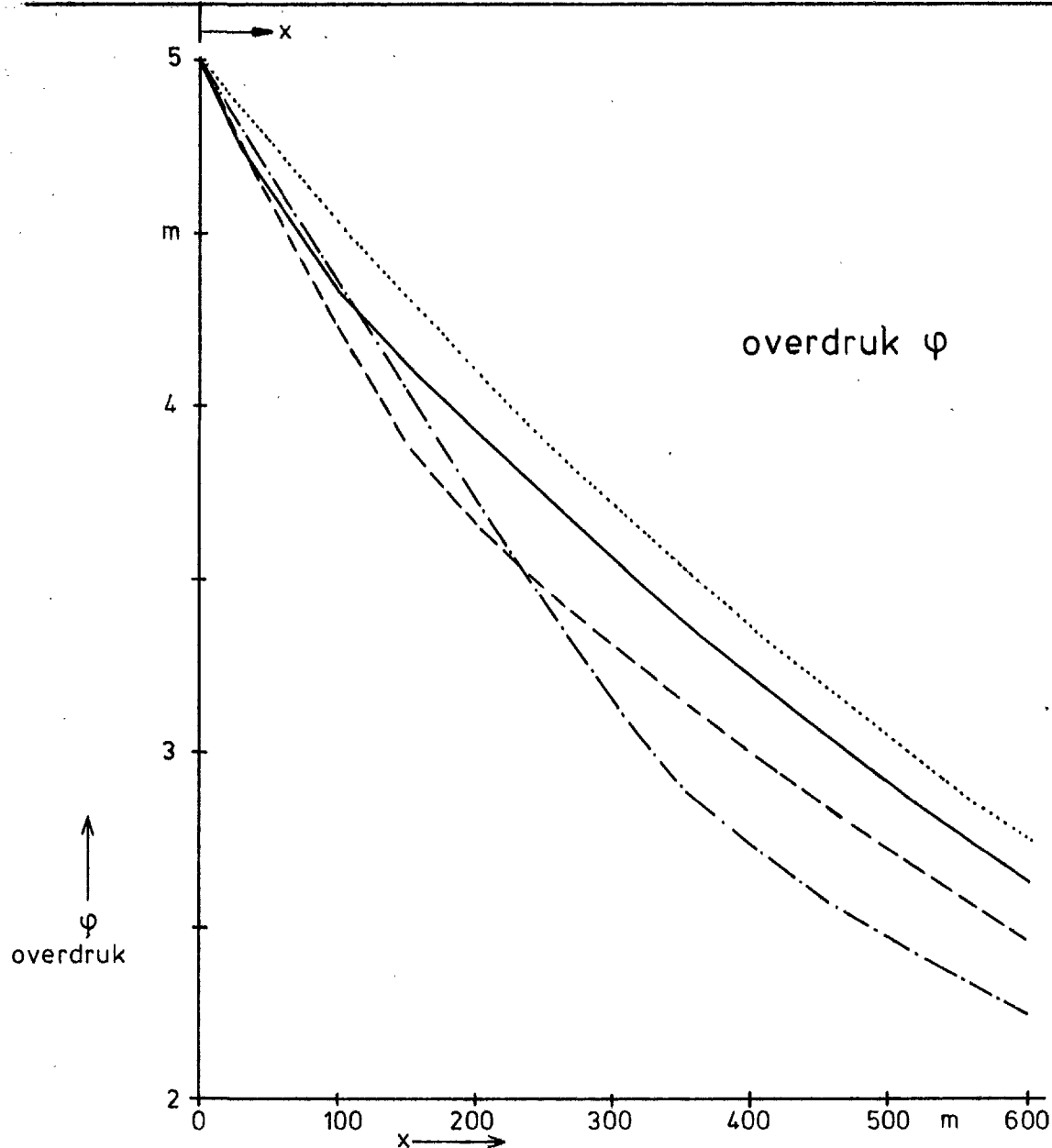
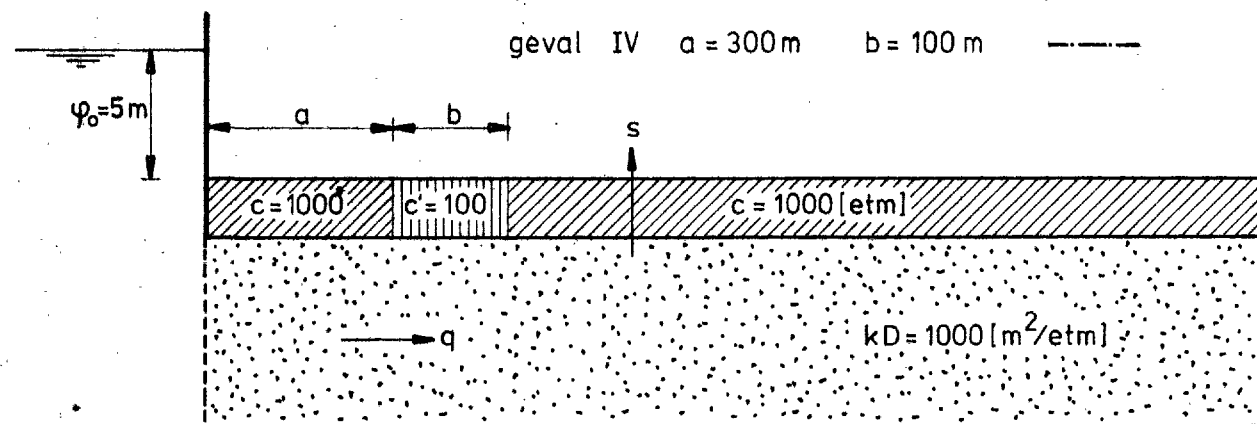
$b = 100 \text{ m}$

geval III $a = 100 \text{ m}$

$b = 100 \text{ m}$

geval IV $a = 300 \text{ m}$

$b = 100 \text{ m}$



oplossing toetsprobleem 1, stationaire gedeelte (vervolg)

CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal -

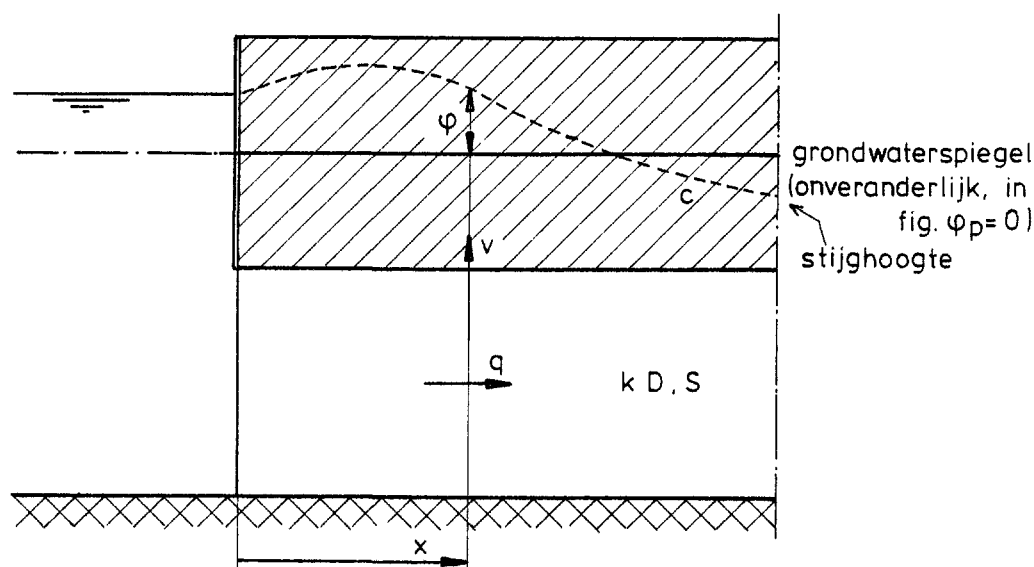
Bijlage 2 blad 6

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.162

Onvolkomen spanningsgrondwater

volgens Bosch (1951)



Bosch ontwikkelde een formule waarin de berging (S) door de samendrukbaarheid van het water en het korrelskelet in het watervoerende pakket in rekening worden gebracht. De formule werd opgesteld voor het geval van een onveranderlijke grondwaterstand ϕ_p in de semi-permeabele laag. De demping en de faseverschuiving worden nu mede veroorzaakt door de veranderende elastische berging onder invloed van de variërende waterspanning.

Voor het watervoerende pakket geldt:

$$\begin{array}{l} \text{Darcy:} \quad q = -kD \frac{\partial \phi}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial q}{\partial x} = -kD \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \\ \text{Continuïteit} \quad \frac{\partial q}{\partial x} + v + S \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Darcy:} \\ \text{Continuïteit} \end{array}} \right\} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\phi - \phi_p}{kDc} - \frac{S}{kD} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$$

Voor de semi-permeabele laag geldt:

$$\text{Darcy:} \quad v = \frac{\phi - \phi_p}{c}$$

Continuïteit: $v = \text{afvoer naar het oppervlaktewater in de polder.}$

oplossing toetsprobleem 1, niet-stationair gedeelte
(zie verder bijlage 3 blad 2 en 3)

CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 3 blad 1

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.163

Randvoorwaarden:

$$\begin{aligned} x = 0, & -\infty \leq t \leq +\infty \\ x = \infty, & -\infty \leq t \leq +\infty \\ -\infty < x < +\infty, & -\infty \leq t \leq +\infty \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0 \sin \omega t \\ \phi &= 0 \\ \phi_p &= 0 \end{aligned}$$

waarin ϕ_0 = amplitude van het getij

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ waarin } T = \text{periode van het getij}$$

Oplossing:

$$\phi = \phi_0 e^{-\alpha x} \sin (\omega t - \beta x)$$

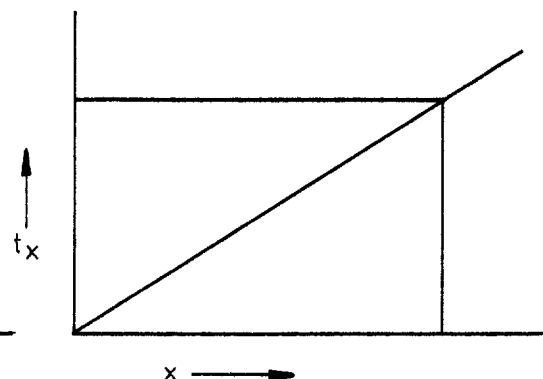
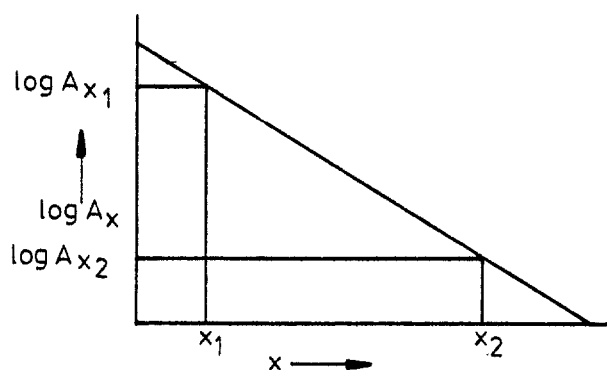
$$\phi_p = 0$$

Dit betekent dat de amplitude $A_x = \phi_0 e^{-\alpha x}$ uitdempt met $e^{-\alpha x}$ en dat

de faseverschuiving t_x gelijk is aan $\frac{\beta x}{\omega}$ (want $\sin (\omega t - \beta x) = \sin \omega(t - \frac{\beta x}{\omega})$).

De dempingsfactor α kan worden bepaald door het uitzetten van de amplitude $A_x = \phi_0 e^{-\alpha x}$, op logaritmische schaal tegen de afstand x , op lineaire schaal.

De faseverschuivingsfactor β kan worden bepaald door het uitzetten van de faseverschuiving t_x tegen de afstand x , beiden op lineaire schaal.



$$\alpha = \frac{2,30 \log A_{x1} / A_{x2}}{x_2 - x_1}$$

$$\beta = \frac{\omega t_x}{x}$$

(vervolg van blad 1)

Tussen α en β bestaan de volgende betrekkingen:

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{kDc}$$

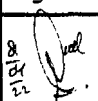
$$2\alpha\beta = \frac{S\omega}{kD}$$

$$\text{zodat } kDc = \frac{1}{\alpha^2 - \beta^2}$$

$$\text{en } \frac{kD}{S} = \frac{\omega}{2\alpha\beta}$$

waarmee twee geohydrologische constanten kunnen worden berekend als de derde op andere wijze (b.v. een pompproef) is bepaald of geschat.

(vervolg van blad 2)

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 3 blad 3
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.165

α en β -berekening

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{kDc} = \frac{1}{10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^7} = 10^{-4} \text{ m}^{-2}$$

$$2\alpha\beta = \frac{S\omega}{kD} = \frac{10^{-3}}{10^{-4} \cdot 10} \omega = \omega$$

$$\text{zodat: } \beta = \frac{\omega}{2\alpha}$$

$$\alpha^2 - \frac{\omega^2}{4\alpha^2} = 10^{-4}$$

$$4\alpha^4 - 4 \cdot 10^{-4} \alpha^2 - \omega^2 = 0$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1,2}^2 &= \frac{4 \cdot 10^{-4} \pm \sqrt{16 \cdot 10^{-8} + 16\omega^2}}{8} \\ &= \frac{1}{2} \cdot 10^{-4} \pm \frac{1}{2} \cdot 10^{-4} \sqrt{1 + \omega^2 \cdot 10^8} \end{aligned}$$

alleen +teken geldt

$$\begin{aligned} \alpha &= + \sqrt{\frac{1}{2} \cdot 10^{-4} + \frac{1}{2} \cdot 10^{-4} \sqrt{1 + \omega^2 \cdot 10^8}} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{2} \cdot 10^{-2} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \omega^2 \cdot 10^8}} \end{aligned}$$

$$\text{Nu is } \omega = \frac{2\pi}{43200} \text{ rads}^{-1} = 1,45 \cdot 10^{-4} \text{ rads}^{-1}$$

Dit geeft

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,18 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1} \\ \beta &= 6,16 \cdot 10^{-3} \text{ radm}^{-1} \end{aligned}$$

Kontrole

$$\begin{aligned} \alpha^2 - \beta^2 &= (1,18^2 - 0,616^2) \cdot 10^{-4} = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2} \\ 2\alpha\beta &= 2 \cdot 1,18 \cdot 0,616 \cdot 10^{-4} = 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ rads}^{-1} \end{aligned}$$

oplossing toetsprobleem



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal

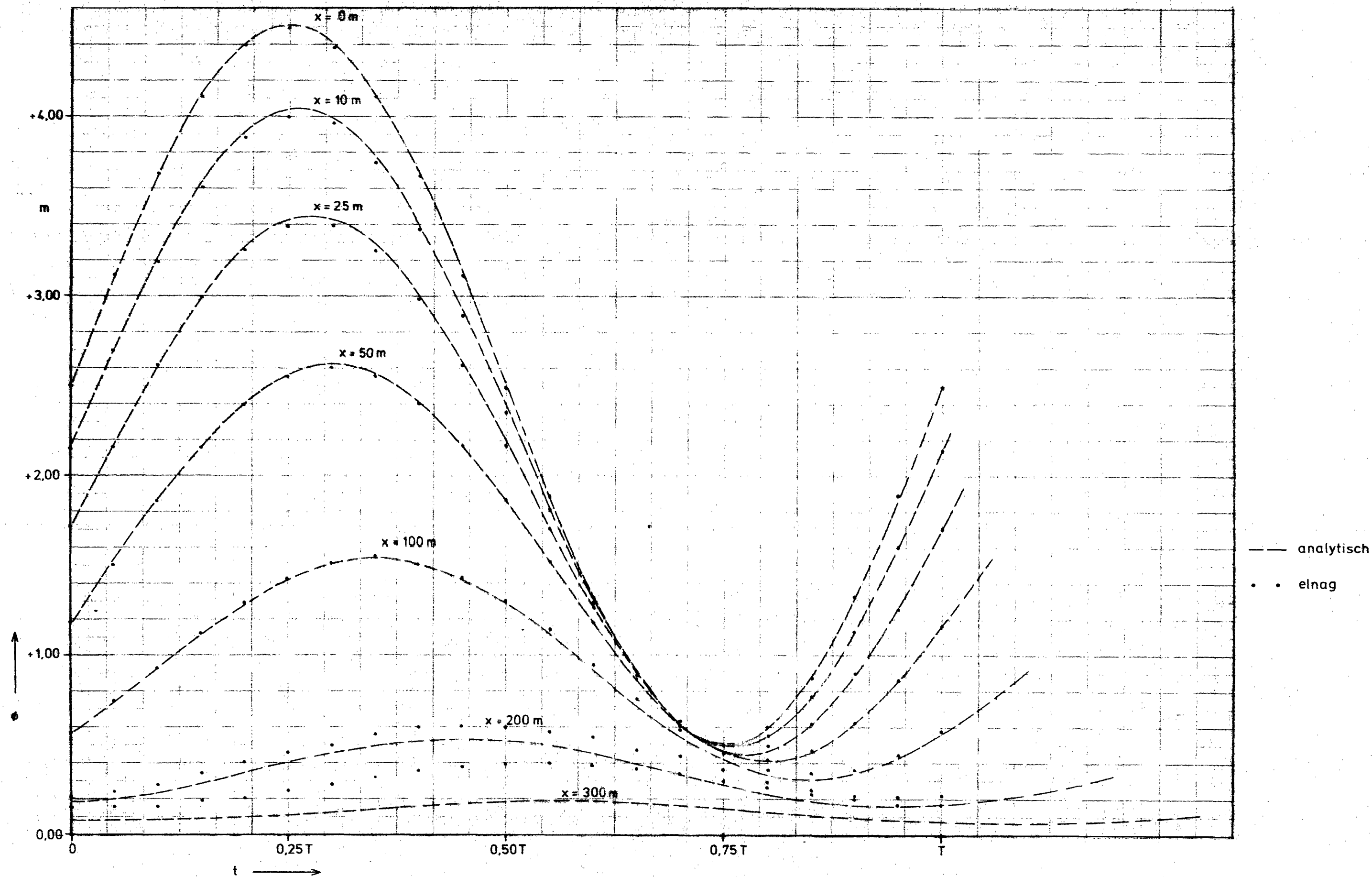
-

Bijlage

4

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.166



toetsprobleem 1
verloop van de potentiaal ϕ in de tijd

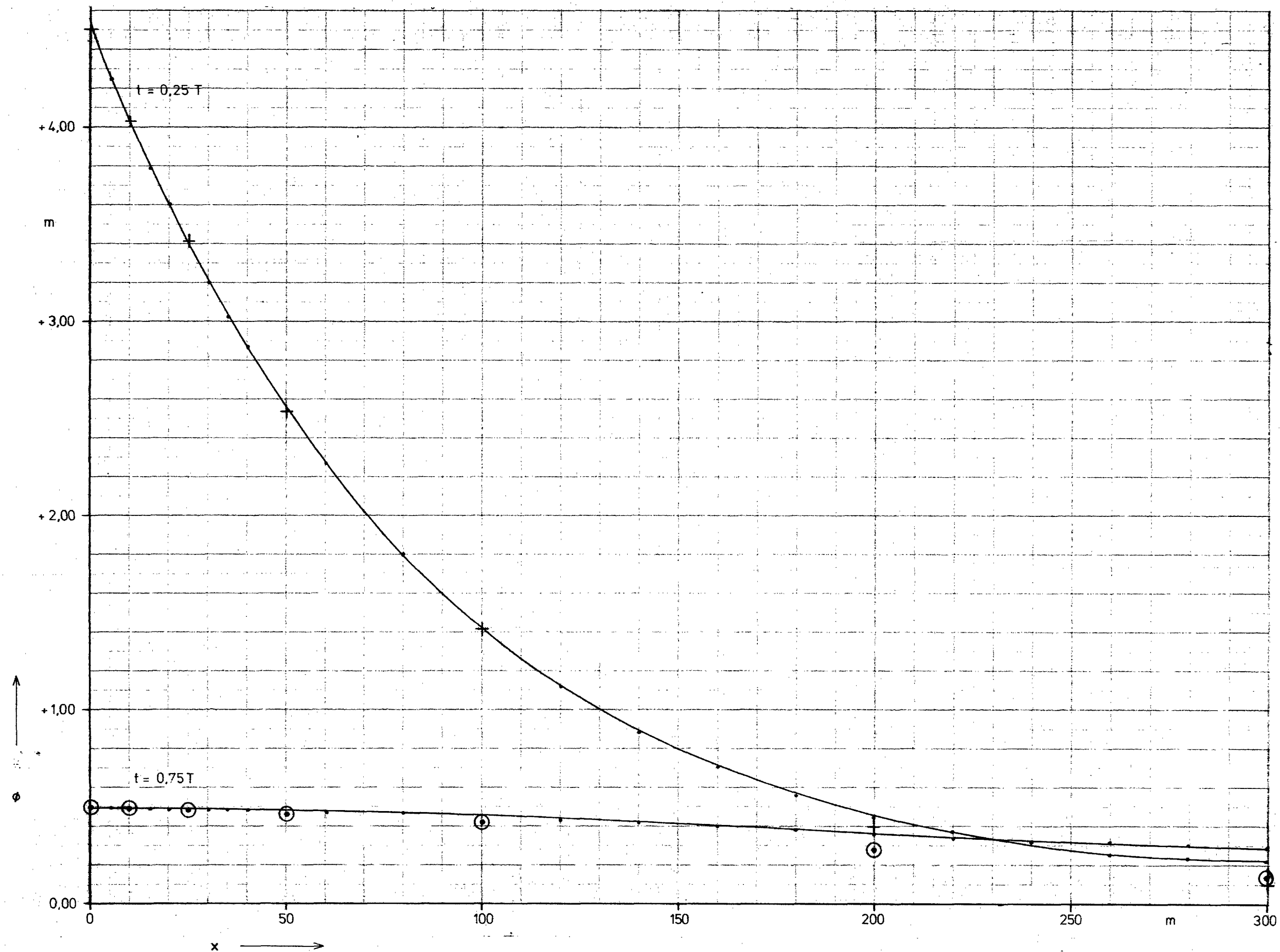
CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

gew	get	gez
	vd 5/29	

bijlage 5

SCHAAL -

A3 WERKNR. S-78.047
TEK. NR. 79.167



toetsprobleem 1

verloop van de potentiaal ϕ in de lengte
van het model

CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

gew	get	gez
	vdj	
	5.79	

bijlage 6

SCHAAL -

A3

WERKNR.	S-78.047
TEK. NR.	79.168

demping $e^{-\alpha x}$			faseverschuiving β_x		middenstandsverlaging $\phi_0 (1-e^{-x/\lambda})$		
	analytisch	ELNAG uit bijlage 5	analytisch	ELNAG uit bijlage 5	analytisch	ELNAG uit bijlage 5	
						L=300 m	L=400 m
x = 0 m	1	1	0	0	0,00 m	0,00 m	0,00 m
x = 10 m	0,89	0,89	425 s	+ 400 s	0,24 m	0,25 m	0,25 m
x = 25 m	0,74	0,75	1060 s	+ 1100 s	0,55 m	0,56 m	0,57 m
x = 50 m	0,55	0,56	2130 s	+ 2400 s	0,98 m	0,99 m	1,00 m
x = 100 m	0,31	0,31	4250 s	+ 4200 s	1,58 m	1,56 m	1,58 m
x = 200 m	0,09	0,09	8500 s	+ 8500 s	2,16 m	2,09 m	2,14 m
x = 300 m	0,03	0,03	12750 s	+ 12700 s	2,38 m	2,23 m	2,34 m



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

Toetsprobleem 1. Tabel voor demping, faseverschuiving en middenstandsverlaging, zowel voor de analytische oplossing als voor de berekening met ELNAG.

get	gew	gez	Schaal	-	Bijlage	7
					werknr S-78.047	tek nr A4-79.169

toetsprobleem 2

GEGEVENS

Buitenwaterstand: H_0 = waterstandskromme voorjaar 1977 (28-1-1977 tot en met 16-3-1977) dagelijkse waarnemingen, zie tabel

Neerslag : f_0 = neerslagkromme voorjaar 1977, dagelijkse waarnemingen, zie tabel

Polderpeil : H_p = 0,60 m -NAP

Dijkafmetingen : zie figuur

Lengte voorland : zie figuur, L_v = 150 m

Lengte achterland: zie figuur, L_a = 500 m

Overige afmetingen: zie figuur

hoogteligging voorland: 2,60 m +NAP

hoogteligging achterland: 1,00 m -NAP

Gelaagdheden:

Onderscheid tussen:

1. laag 1 boven 0 m +NAP
 2. laag 2 tussen 0 en 7 m -NAP
 3. laag 3 tussen 7 m -NAP en 40 m -NAP
- ad 1.: klei
- ad 2.: klei
- ad 3.: zand, Formaties van Kreftenheije

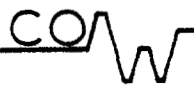
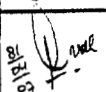
Urk en

Sterksel

aan de basis afgesloten door kleien uit de formatie van Kedichem

Getalwaarden:

Doorlatendheden	laag 1	laag 2	laag 3
$k_h \text{ msec}^{-1}$	8×10^{-10}	4×10^{-10}	8×10^{-4}
$k_v \text{ msec}^{-1}$	22×10^{-10}	5×10^{-10}	8×10^{-4}

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 8blad 1
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.170

Soort. gewichten	laag 1	laag 2	laag 3
γ kN/m ³	18,5	14,2	20,0
Konsolidatiecoëfficiënten	laag 1	laag 2	laag 3
c_v m ² /sec	1×10^{-6}	$0,2 \times 10^{-6}$	—
Bergingscoëfficiënt	laag 1	laag 2	laag 3
S	—	—	$3,5 \times 10^{-3}$

GEVRAAGD

1. Uitvoer van het verloop van de potentialen in de tijd (in diepe zandpakket) op de plaatsen

x = +4,50 m	y = 7,60 m -NAP
x = +37,00 m	y = 8,00 m -NAP
x = +162,00 m	y = 8,00 m -NAP

2. Uitvoer van het verloop van de waterspanningen in de tijd (in laag 2) op de plaatsen

x = +4,50 m	y = 3,60 m -NAP
x = +12,00 m	y = 4,80 m -NAP
x = +37,00 m	y = 5,50 m -NAP

3. Uitvoer van het verloop van de freatische lijn in de tijd in het dijkmassief

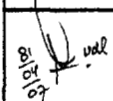
Schalen

- ad 1. horizontaal 1 cm $\hat{=}$ 2 dagen
 vertikaal 1 cm $\hat{=}$ 0,2 m
- ad 2. idem
- ad 3. horizontaal 1 cm $\hat{=}$ 1 m
 vertikaal 1 cm $\hat{=}$ 1 m

Tijdstap

- ad 1. $\Delta T = 1$ dag
 ad 2. $\Delta T = 1$ dag
 ad 3. $\Delta T = 1$ dag

toetsprobleem 2 (vervolg)

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 8 blad 2
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.171

toetsprobleem 2
(vervolg)

		H ₀ m ⁺	NAP	f mm/dag	peilbuis II m ⁺ NAP	peilbuis IV m ⁺ NAP	peilbuis V m ⁺ NAP
jan. 1977	28-1	1.67		6.3	1.26	1.22	0.95
	29-1	2.15		0.3	1.63	1.53	1.21
	30-1	2.68		0	2.00	1.85	1.53
	31-1	3.12		0	2.34	2.27	1.88
februari 1977	1-2	3.13		0	2.34	2.25	1.92
	2-2	2.90		0	2.14	2.03	1.70
	3-2	2.57		0	1.92	1.75	1.50
	4-2	2.38		5.1	1.76	1.68	1.27
	5-2	2.15		5.8	1.58	1.52	1.14
	6-2	1.95		1.2	1.47	1.42	1.10
	7-2	1.94		10.0	1.36	1.33	1.07
	8-2	1.92		2.4	1.38	1.34	1.08
	9-2	1.90		0	1.46	1.39	1.12
	10-2	2.46		7.3	1.86	1.83	1.50
	11-2	2.96		2.1	2.24	2.17	1.83
	12-2	3.28		0.5	2.56	2.48	2.08
	13-2	3.56		0.6	2.78	2.65	2.24
	14-2	3.76		0.4	2.92	2.82	2.40
	15-2	3.86		0	3.02	2.89	2.46
	16-2	3.90		0	3.02	2.88	2.46
	17-2	3.83		0	2.91	2.80	2.40
	18-2	3.58		7.8	2.73	2.62	2.22
	19-2	3.37		8.0	2.60	2.47	2.08
	20-2	3.12		2.9	2.45	2.34	1.98
	21-2	3.04		4.6	2.30	2.23	1.88
	22-2	3.16		2.4	2.40	2.35	1.94
	23-2	3.70		7.6	2.88	2.78	2.32
	24-2	4.14		0.9	3.20	3.10	2.56
	25-2	4.25		3.1	3.28	3.16	2.68
	26-2	4.25		3.5	3.28	3.16	2.68
	27-2	3.90		0.7	3.01	2.87	2.45
	28-2	3.58		0	2.76	2.62	2.22
maart 1977	1-3	3.27		0	2.47	2.33	2.00
	2-3	2.98		0	2.16	2.12	1.80
	3-3	2.82		1.7	2.10	2.02	1.72
	4-3	2.67		0	2.02	1.93	1.63

CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

get

gew

gez

Schaal -

werknr S-78.047

Bijlage 8blad 3

tek nr A4 - 79.172

maart 1977	5-3	2.58	0	1.94	1.81	1.56
	6-3	2.37	0	1.78	1.65	1.40
	7-3	2.14	0	1.61	1.49	1.26
	8-3	2.04	1.1	1.49	1.39	1.17
	9-3	1.90	0	1.36	1.29	1.09
	10-3	1.84	0	1.30	1.24	1.00
	11-3	1.76	0.3	1.24	1.19	0.93
	12-3	1.60	4.1	1.20	1.15	0.90
	13-3	1.50	0	1.17	1.10	0.87
	14-3	1.42	1.6	1.14	1.06	0.85
	15-3	1.48	3.4	1.12	1.05	0.84
	16-3	1.45	0.4	1.09	1.05	0.84

toetsprobleem 2 (vervolg)

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 8blad 4
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.173

toetsprobleem 2
(vervolg)

jan. 1977

28-1	1.67	0.26	-	0.50
29-1	2.15	0.28	-	0.64
30-1	2.68	0.30	-	0.81
31-1	3.12	0.33	-	0.94

Februari 1977

1-2	3.13	0.40	-	1.04
2-2	2.90	0.56	0.88	1.06
3-2	2.57	0.64	0.95	1.05
4-2	2.38	0.71	1.02	1.03
5-2	2.15	0.76	1.12	0.95
6-2	1.95	0.77	1.10	0.87
7-2	1.94	0.73	1.10	0.82
8-2	1.92	0.68	1.20	0.78
9-2	1.90	0.67	1.20	0.74
10-2	2.46	0.74	1.26	0.88
11-2	2.96	0.84	1.37	1.08
12-2	3.28	0.93	1.42	1.33
13-2	3.56	1.02	1.54	1.50
14-2	3.76	1.12	1.66	1.58
15-2	3.86	1.25	1.76	1.55
16-2	3.90	1.37	1.81	1.66
17-2	3.83	1.43	1.84	1.68
18-2	3.58	1.37	1.85	1.60
19-2	3.37	1.30	1.80	1.54
20-2	3.12	1.24	1.77	1.50
21-2	3.04	1.23	1.80	1.48
22-2	3.16	1.21	1.70	1.42
23-2	3.70	1.40	1.85	1.51
24-2	4.14	1.58	1.98	1.62
25-2	4.25	1.64	2.08	1.72
26-2	4.25	1.64	2.15	1.76
27-2	3.90	1.56	2.10	1.74
28-2	3.58	1.43	2.00	1.68

maart 1977

1-3	3.27	1.34	1.90	1.58
2-3	2.98	1.26	1.83	1.46
3-3	2.82	1.19	1.80	1.38
4-3	2.67	1.12	1.75	1.28

CO₂W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal

-

Bijlage 8 blad 5

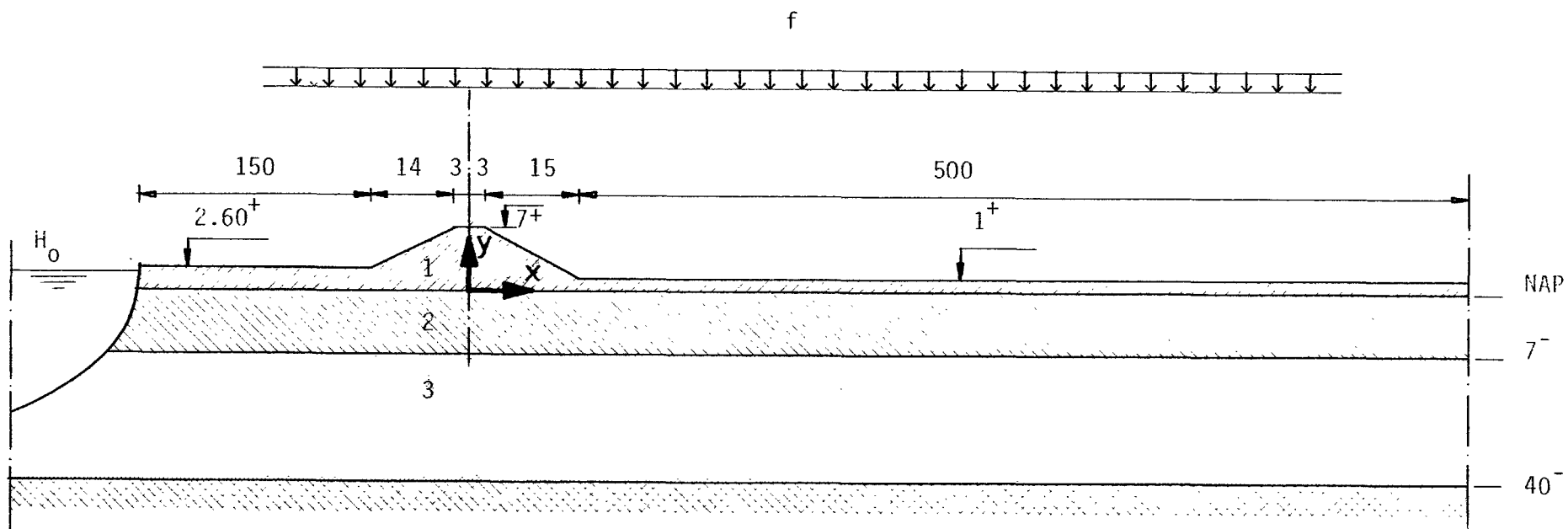
werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.174

maart 1977	5-3	2.58	1.03	1.63	1.18
	6-3	2.37	0.96	1.56	1.07
	7-3	2.14	0.92	1.54	1.00
	8-3	2.04	0.88	1.49	0.93
	9-3	1.90	0.84	1.45	0.85
	10-3	1.84	0.78	1.42	0.82
	11-3	1.76	0.76	1.38	0.78
	12-3	1.60	0.72	1.35	0.74
	13-3	1.50	0.67	1.30	0.68
	14-3	1.42	0.62	1.26	0.65
	15-3	1.48	0.60	1.24	0.64
	16-3	1.45	0.60	1.23	0.63

toetsprobleem 2 (vervolg)

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 8blad 6
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.175



maten in meters

CONW

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 2 (vervolg)

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 8 blad 7

get
gew
gez

werknr S-78.047

tek nr A4-79.176

† H_0 in m t.o.v. NAP

4,00 m⁺

3,00 m⁺

2,00 m⁺

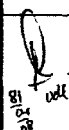
1,00 m⁺

26 28 30 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19
jan. '77 februari '77 maart '77

CONW

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 2 (vervolg)

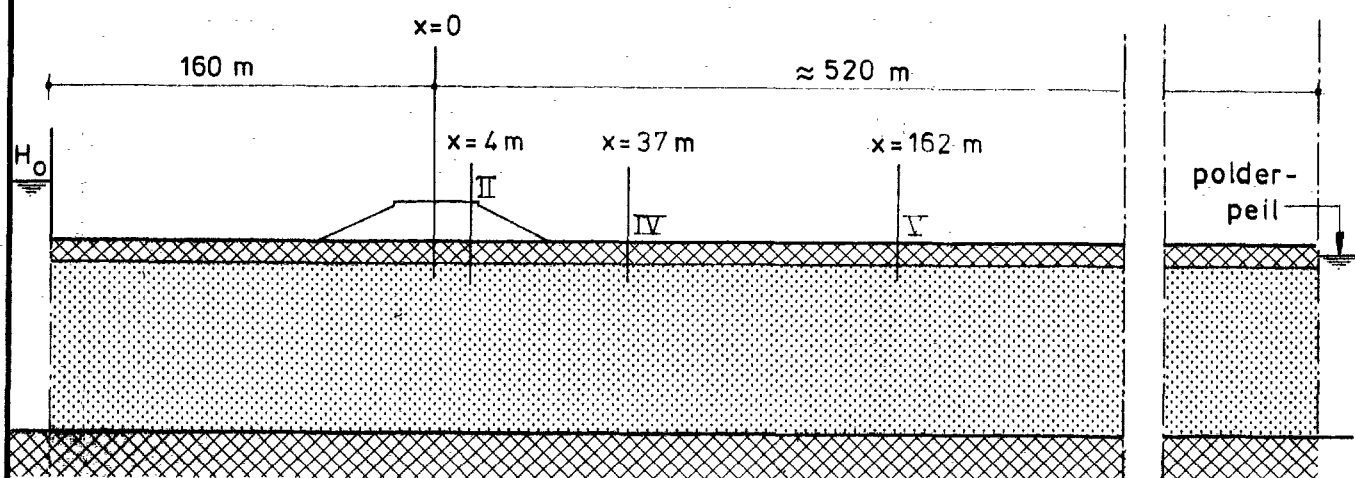
get	gew	gez
		

Schaal -

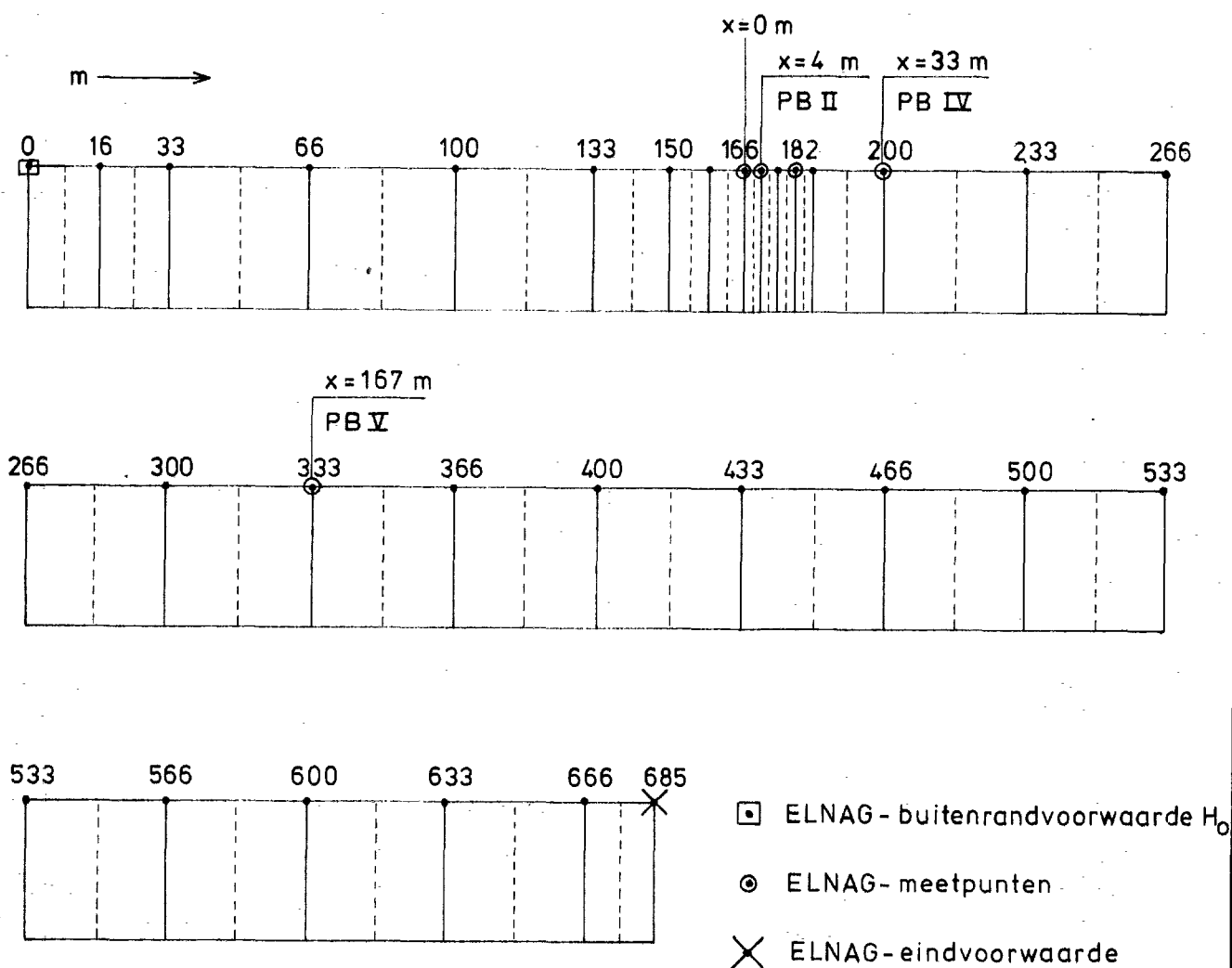
werknr S-78.047

Bijlage 8 blad 8

tek nr A4-79.177



toetsprobleem 2

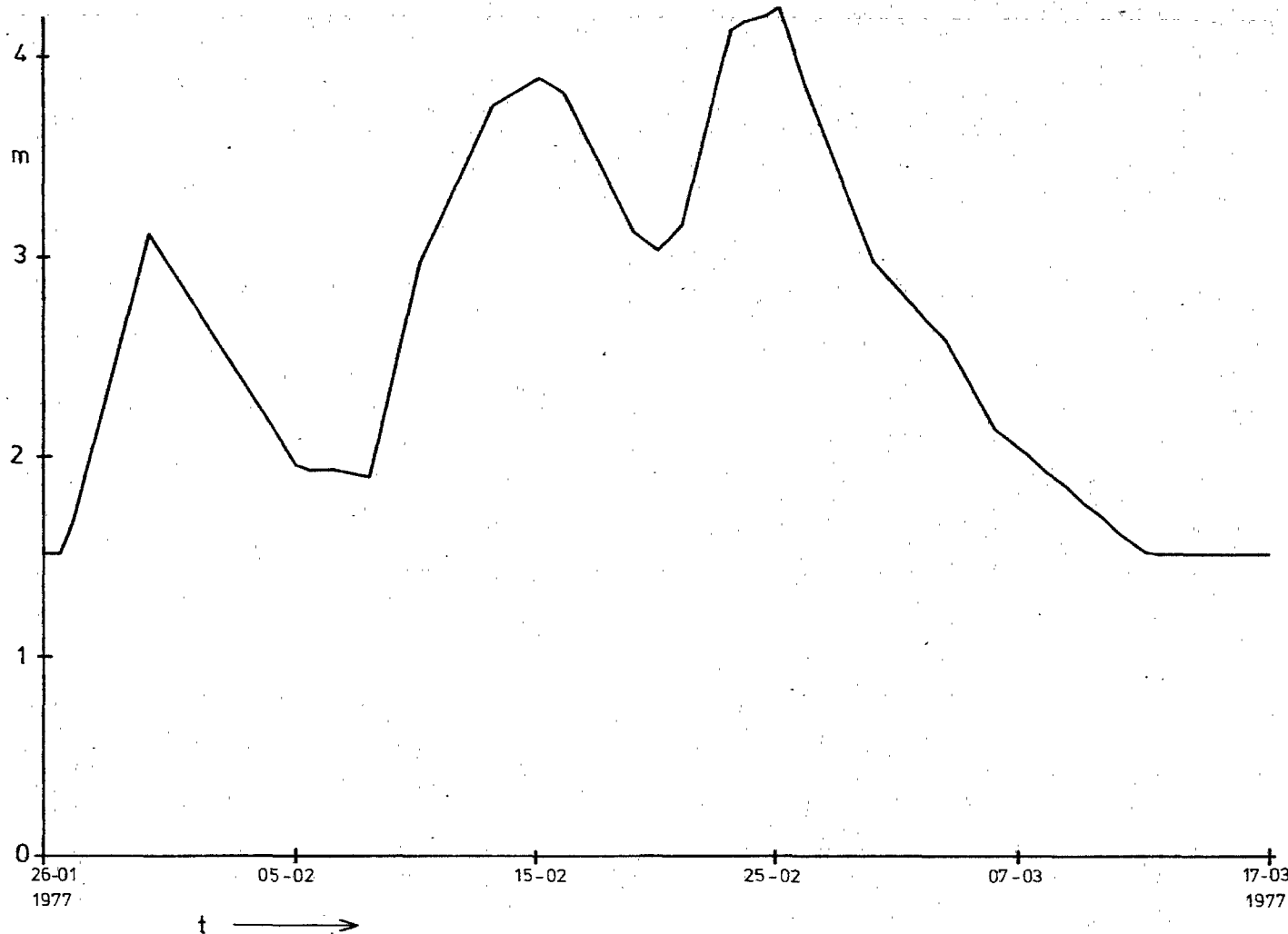


vakken-indeling ELNAG

toetsprobleem 2

toetsprobleem 2				bijlage 9	
ELNAG-indeling				SCHAAL —	
CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN	gem	get	gez	A4	WERKNR. S-78.047
		G 7-79			TEK. NR. 79.178

H_0
 buiten-
 water-
 stand



CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 2 , ELNAG-schematisatie
buitenwaterstand H_0

get

gew

gez

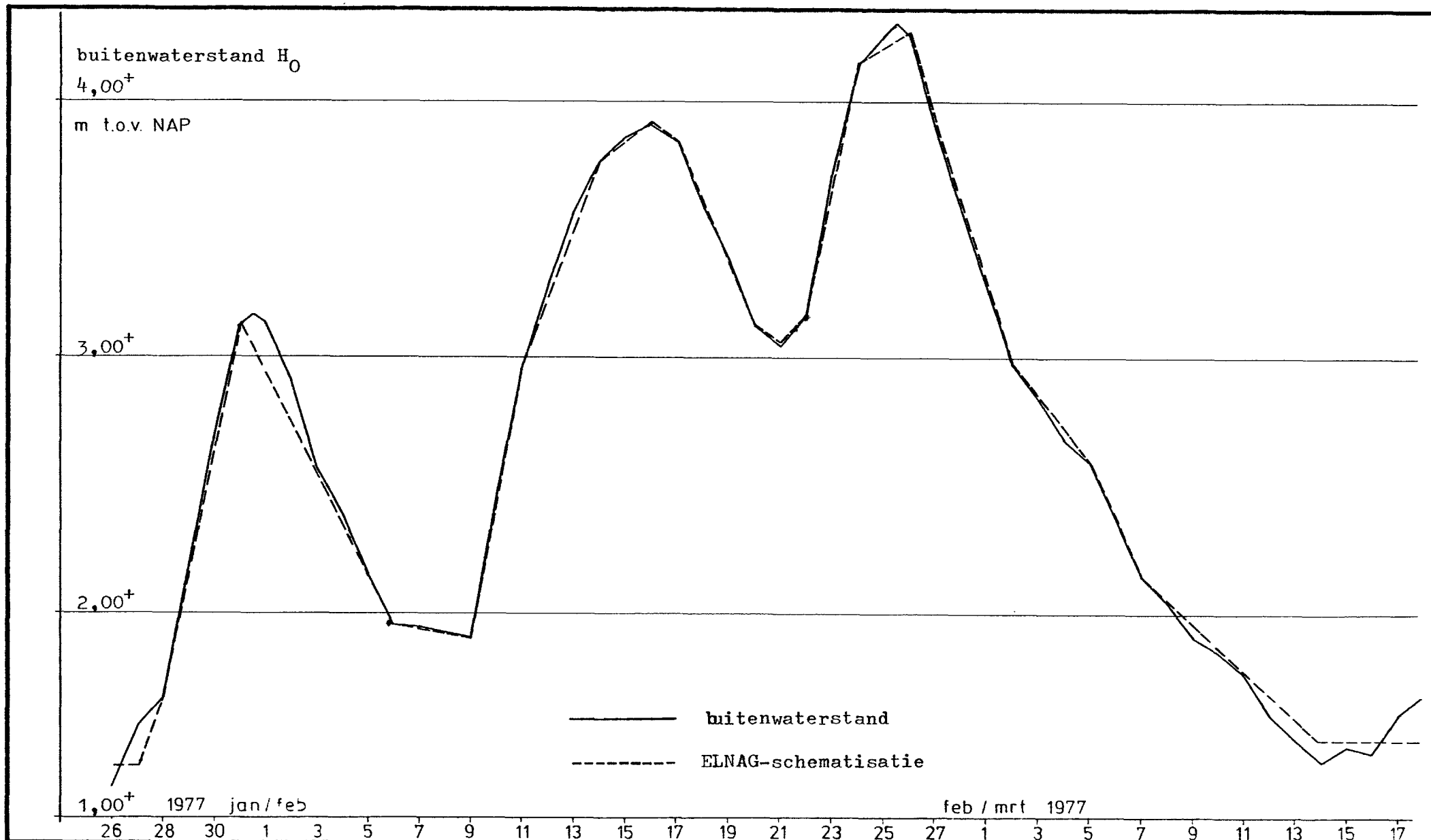
Schaal -

Bijlage 10

81-
04-
06

werknr S-78.047

tek nr A4-79.179



CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

Toetsprobleem 2
buitenwaterstand H_0

BIJLAGE 11

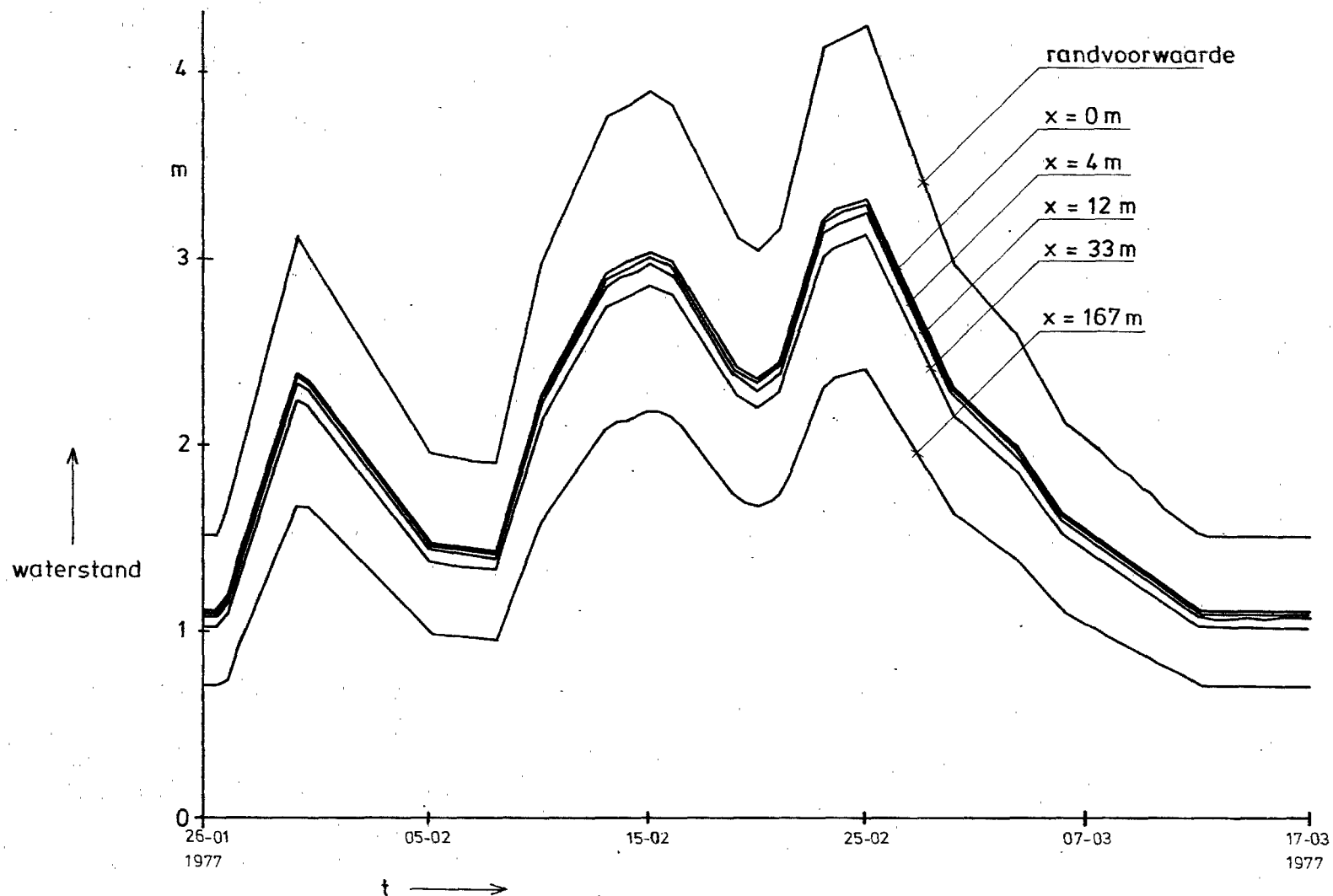
werknr S-78.047

get. 5/29

gez

gew.

tek.nr A4 - 79.180



CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 2, meetresultaat ELNAG

get

gew

gez

Schaal

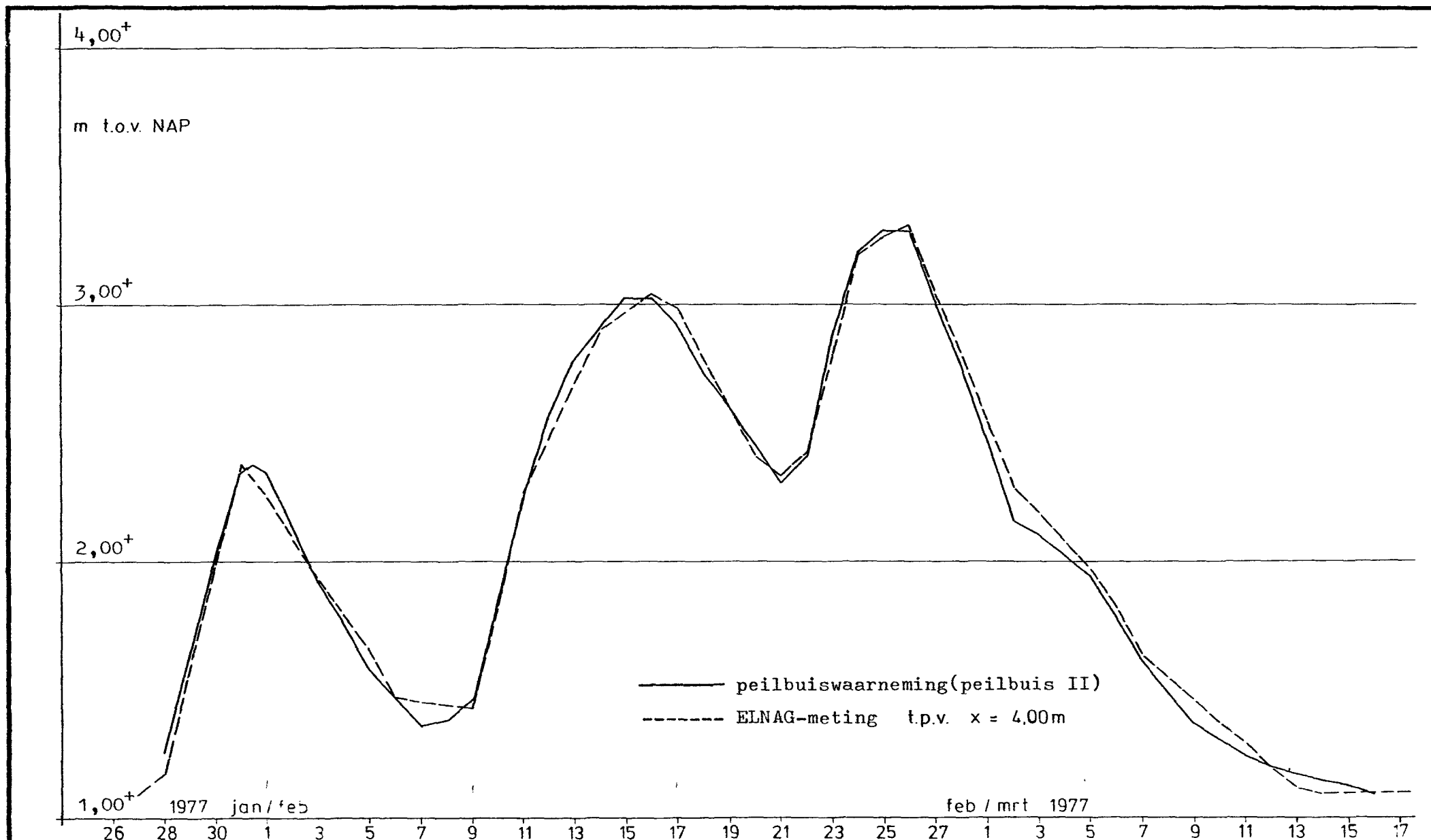
—

Bijlage 12

get
01/04/06

werknr S-78.047

tek nr A4- 79.181



CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

Toetsprobleem 2
peilbuis II

BIJLAGE 13

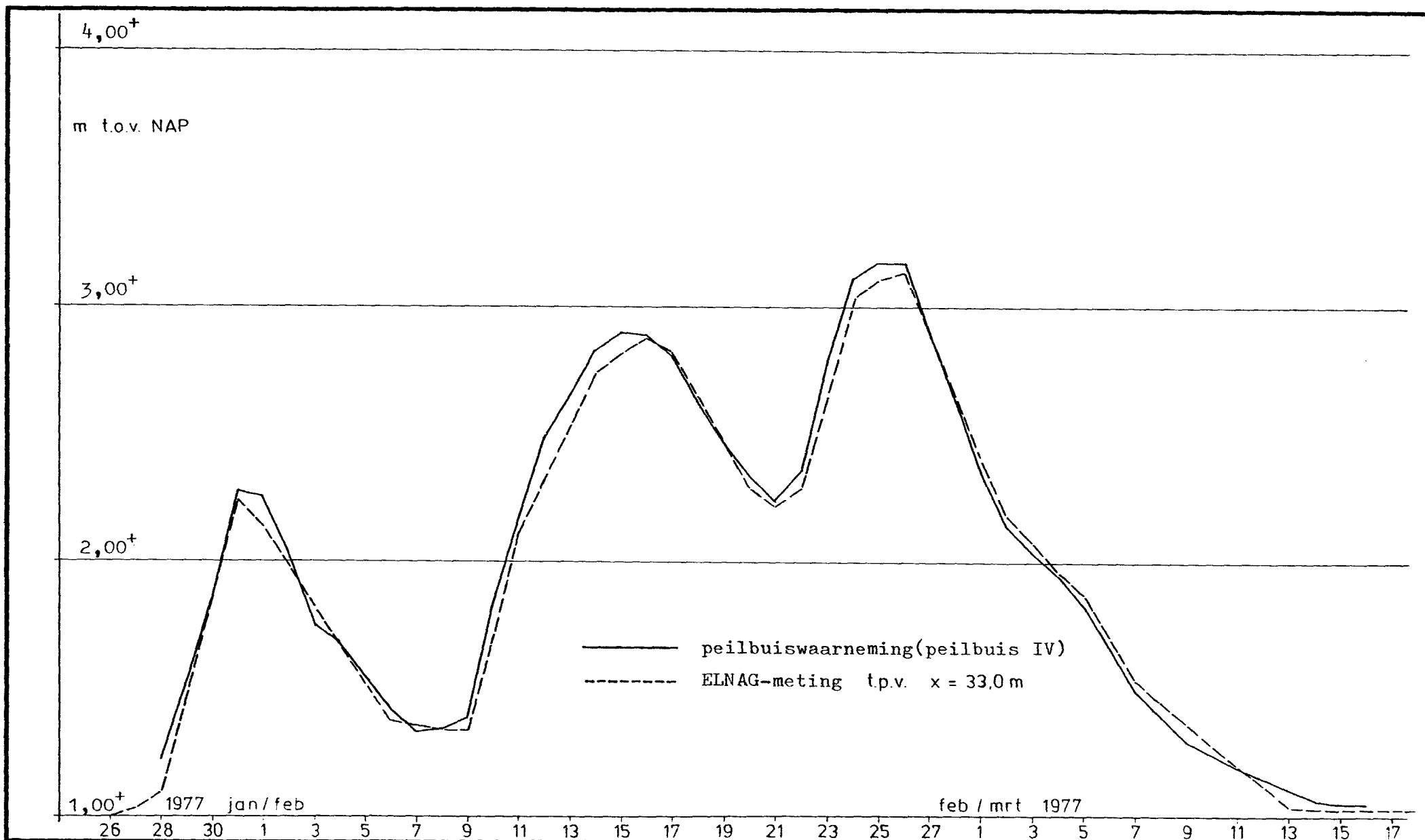
werknr. S-78.047

get. 5/79

gez

gew.

tek nr A4-79.182



CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

Toetsprobleem 2
peilbuis IV

BIJLAGE 14

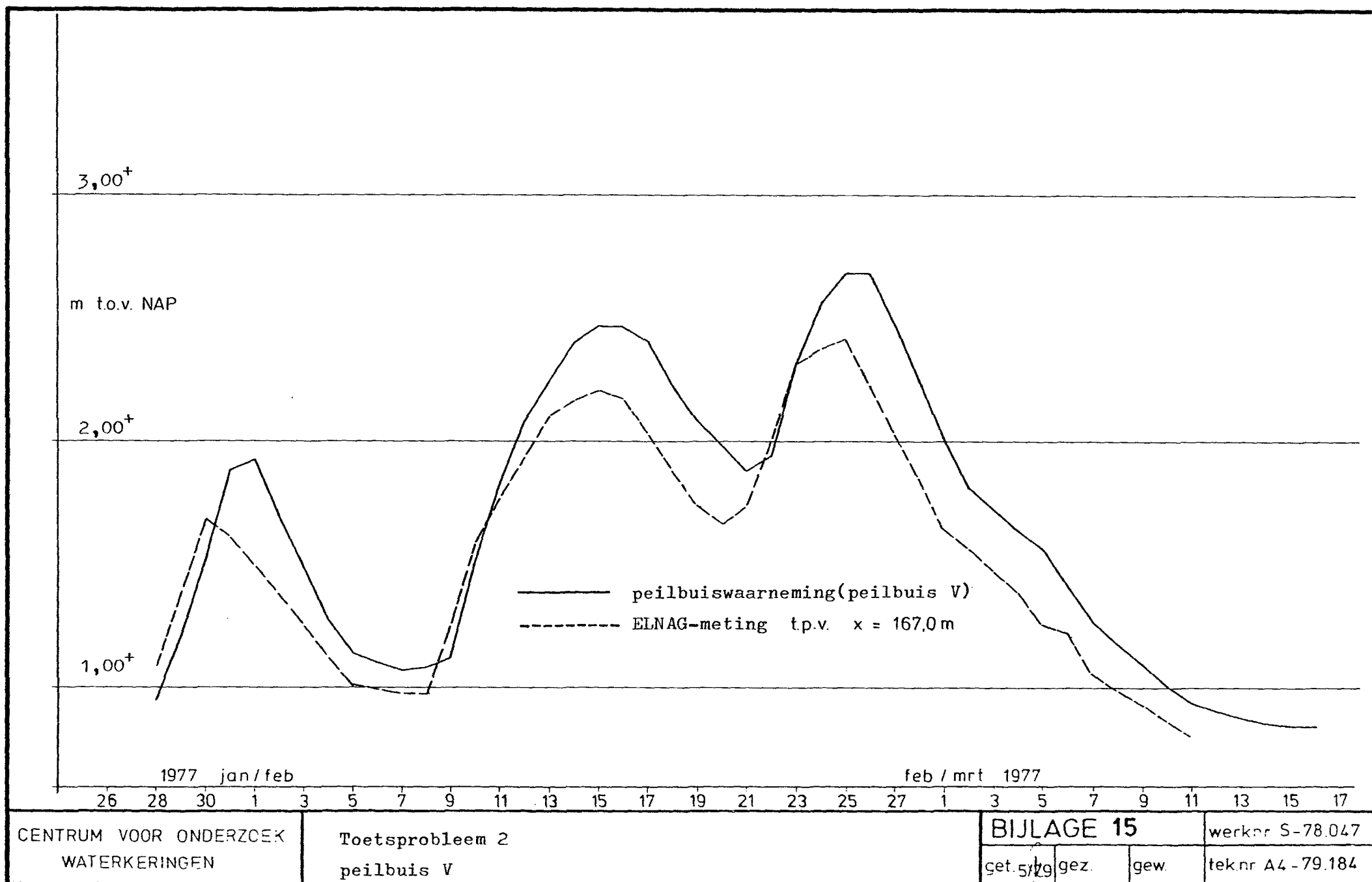
werknr S-78 047

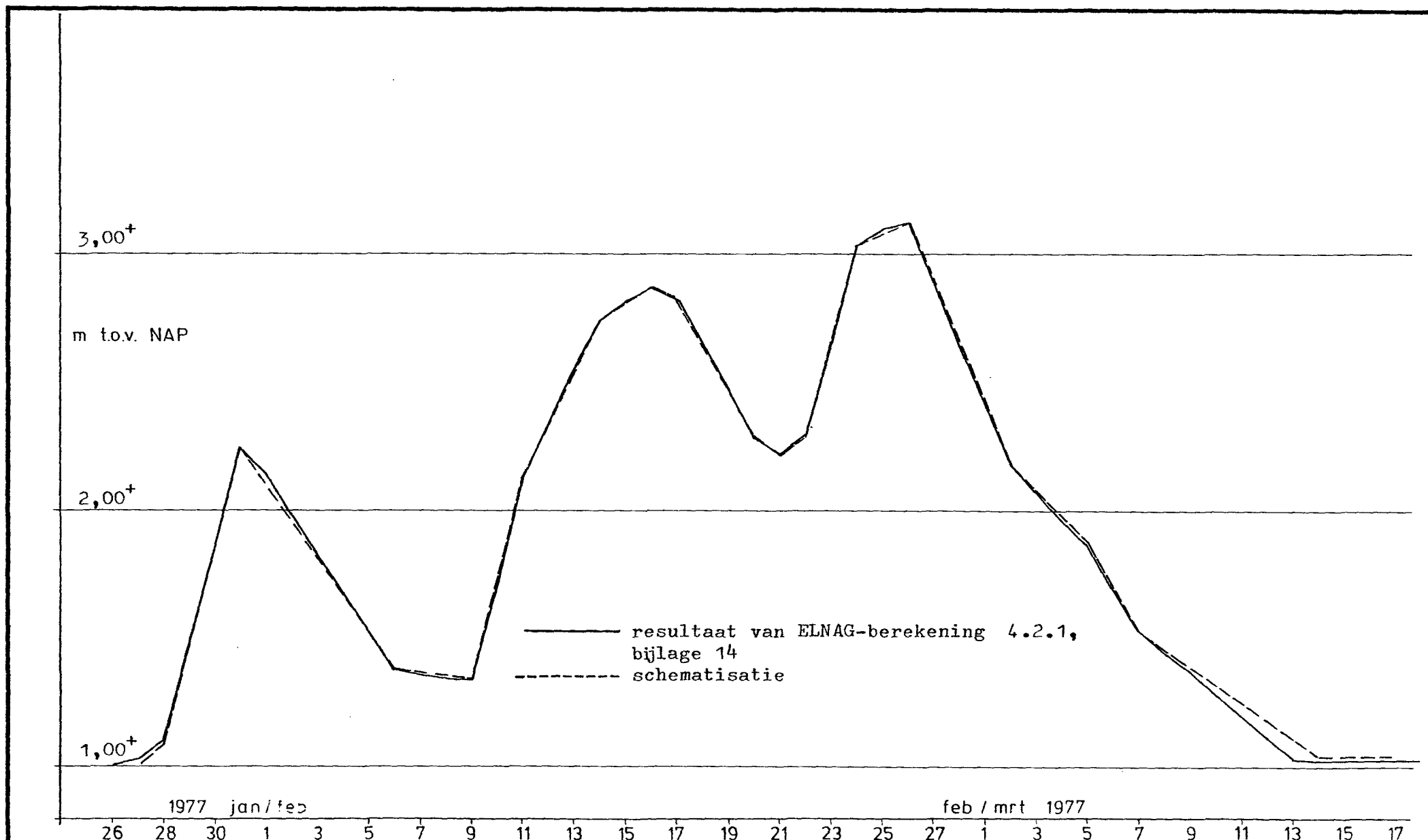
get. 5/79

gez

gew

tek nr. A4 - 79.183





CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

Toetsprobleem 2

randvoorwaarde onderzijde kleipakket t.p.v. x = 33 m

BIJLAGE 16

werknr S-78.047

get. 5/29

gez.

gew.

tek.nr A4 - 79.185

2,00⁺

m t.o.v. NAP

1,00⁺

0,00⁺

— waarneming
- - - ELNAG-meting

1977 jan / feb

feb / mrt 1977

26 28 30 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 1 3 5 7 9 11 13 15 17

CENTRUM VOOR ONDERZEC-
WATERKERINGEN

Toetsprobleem 2

potentiaal kleipakket diepte NAP -5,50 m t.p.v. x = 33.0 m

BIJLAGE 17

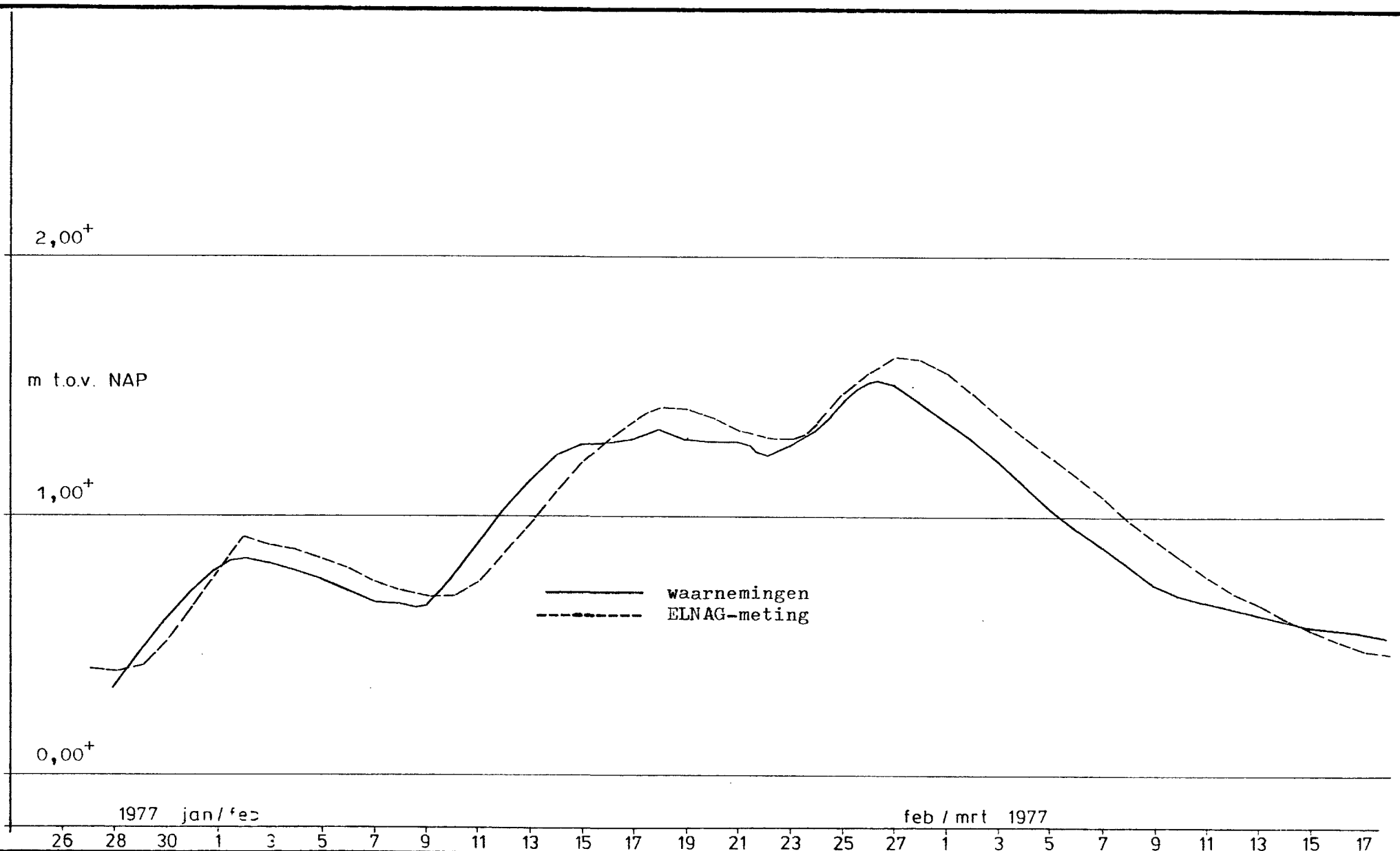
werknr. S-78.047

get. 5/29

gez

gew

tek.nr A4-79.186



CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

Toetsprobleem 2
potentiaal kleipakket diepte NAP -4,75 m tp.v. x = 33,0m

BIJLAGE 18

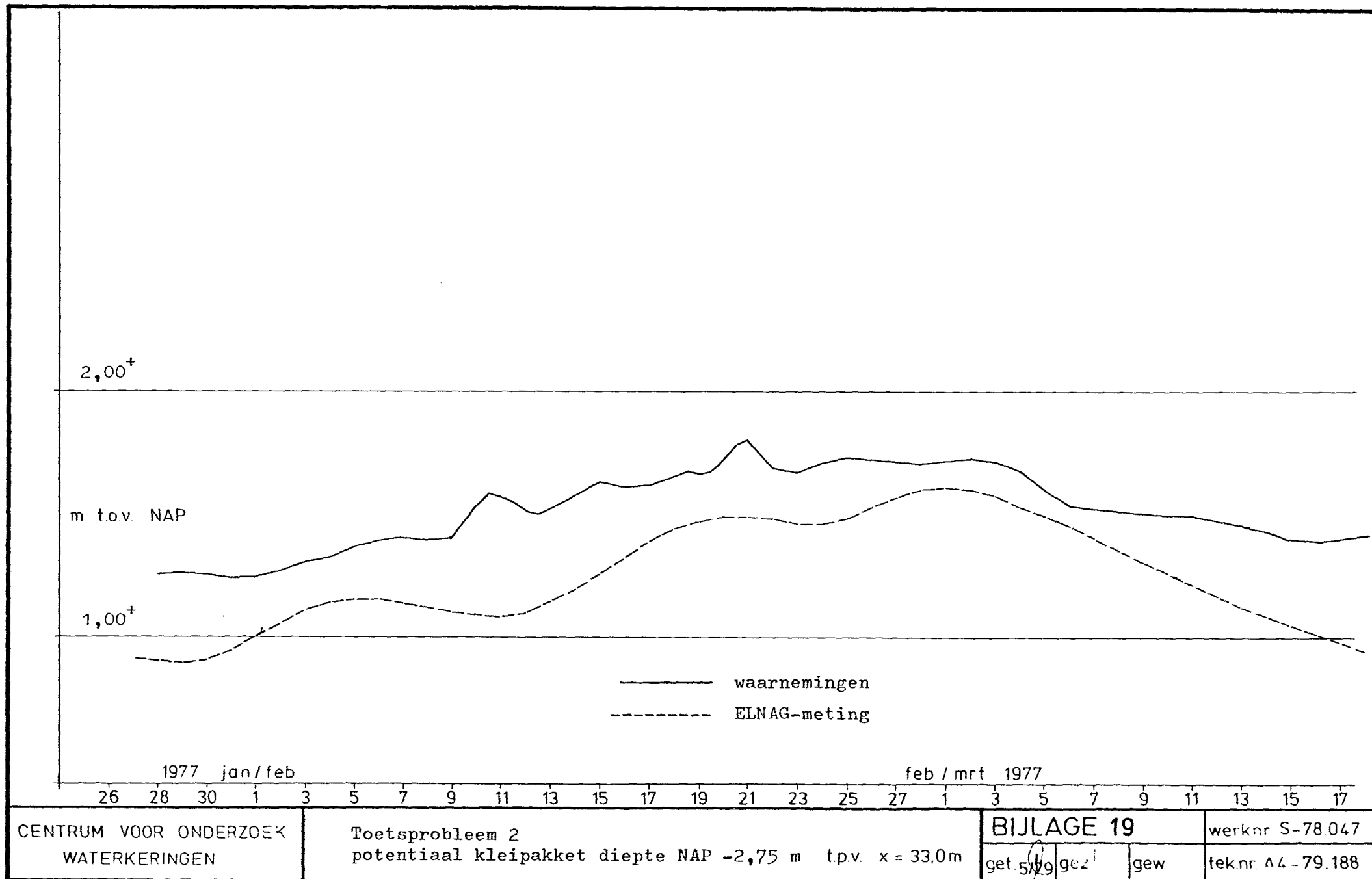
werknr. S-78.047

get. 5/79

gez.

gew.

tek.nr. A4 - 79.187

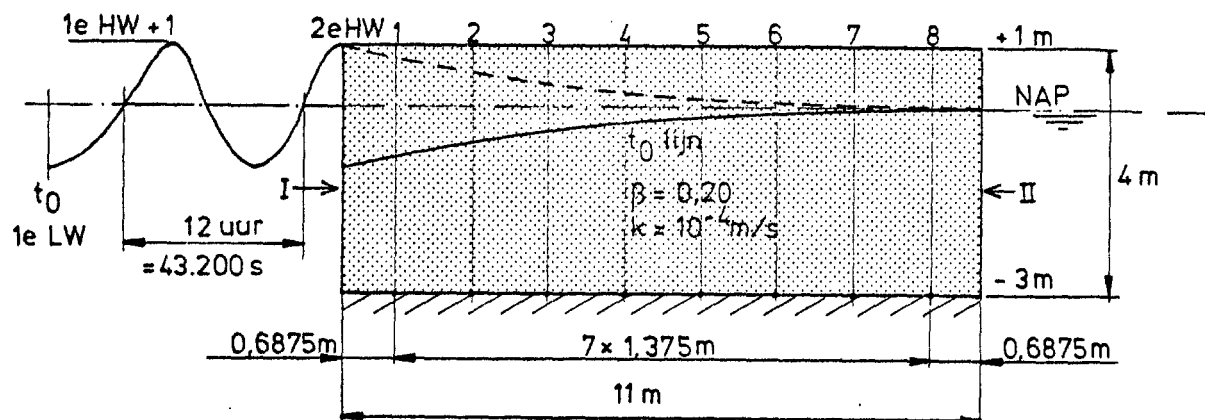


Opdracht aan LGM (ir. F. Barends):

Seep berekeningen uit te voeren voor de volgende gevallen.

Toetsprobleem zandblok: (zonder kweloppervlak)

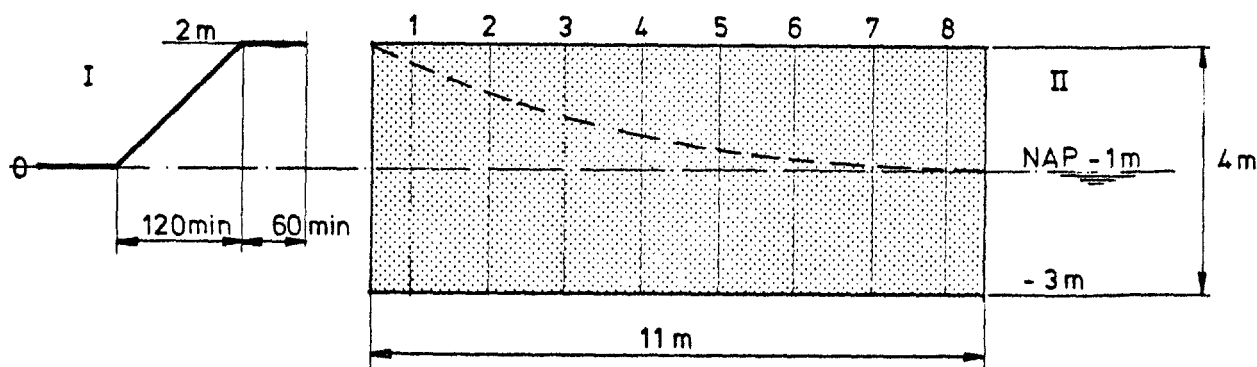
a) $1\frac{1}{2}$ getijcyclus



Gevraagd: Voor $1\frac{1}{2}$ getijcyclus uitgaande van opgegeven t_0 -standen dus t/m 2e H.W.

- * in 8 meetraaien in zowel de punten van het freatisch vlak als de 8 bodempunten.
- * om het kwartier de uitvoer van de potentialen
- * en indien mogelijk de kwel of stroomkromme via rand I en rand II.

b) Lineair stijgende randvoorwaarden → 2 uur stijgen, 1 uur stationair.



Gevraagd: * als boven om het kwartier uitvoer voor 2 x 8 punten.
* en stroomkrommen via rand I en II.

toetsprobleem 3

CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

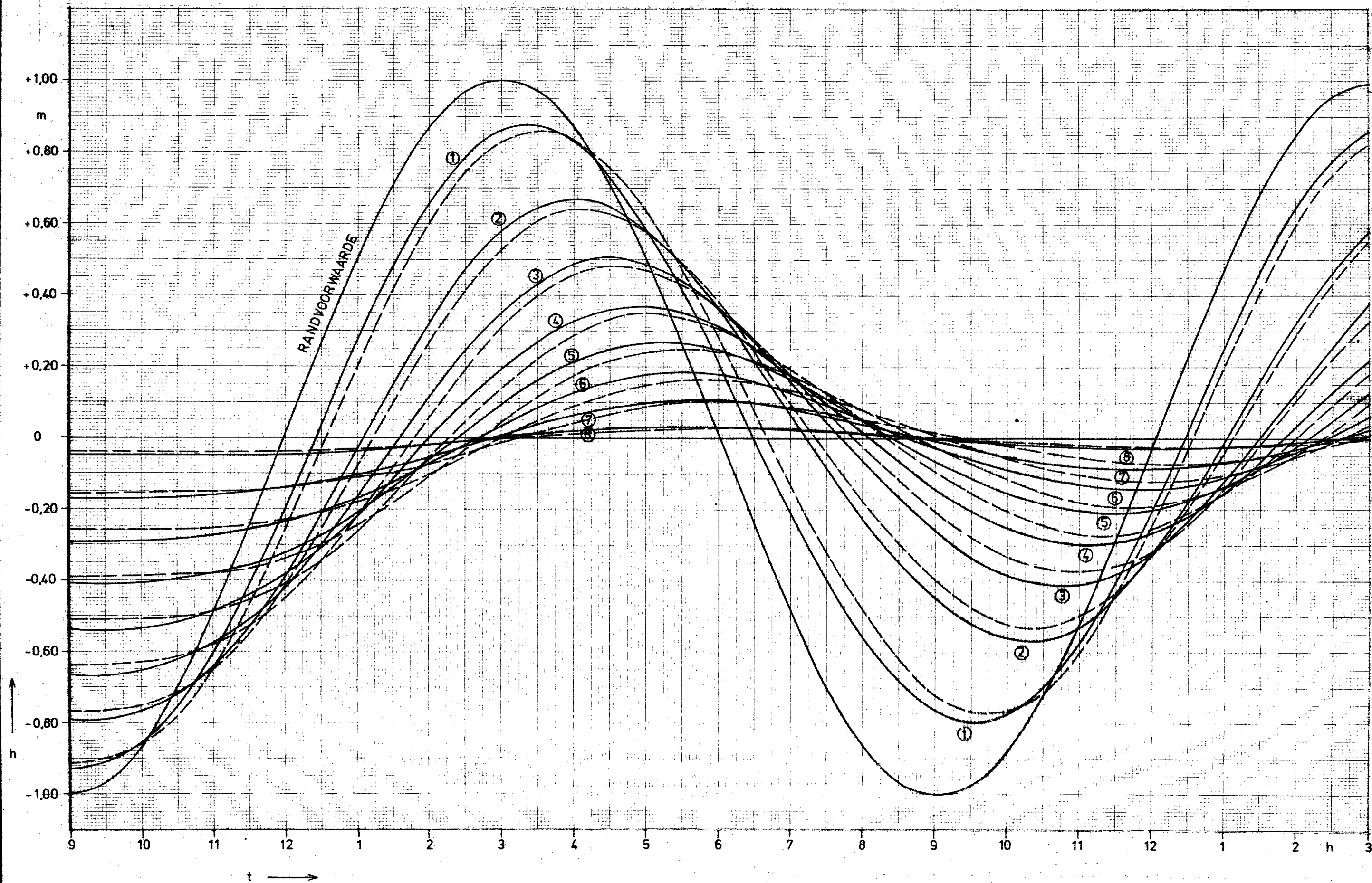
gez

Schaal -

Bijlage 20

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.189



— berekening SEEP
 --- ELNAG - meting

toetsprobleem 3a, verloop freatisch vlak
 in de tijd, vergelijking SEEP - ELNAG

CENTRUM VOOR ONDERZOEK
 WATERKERINGEN

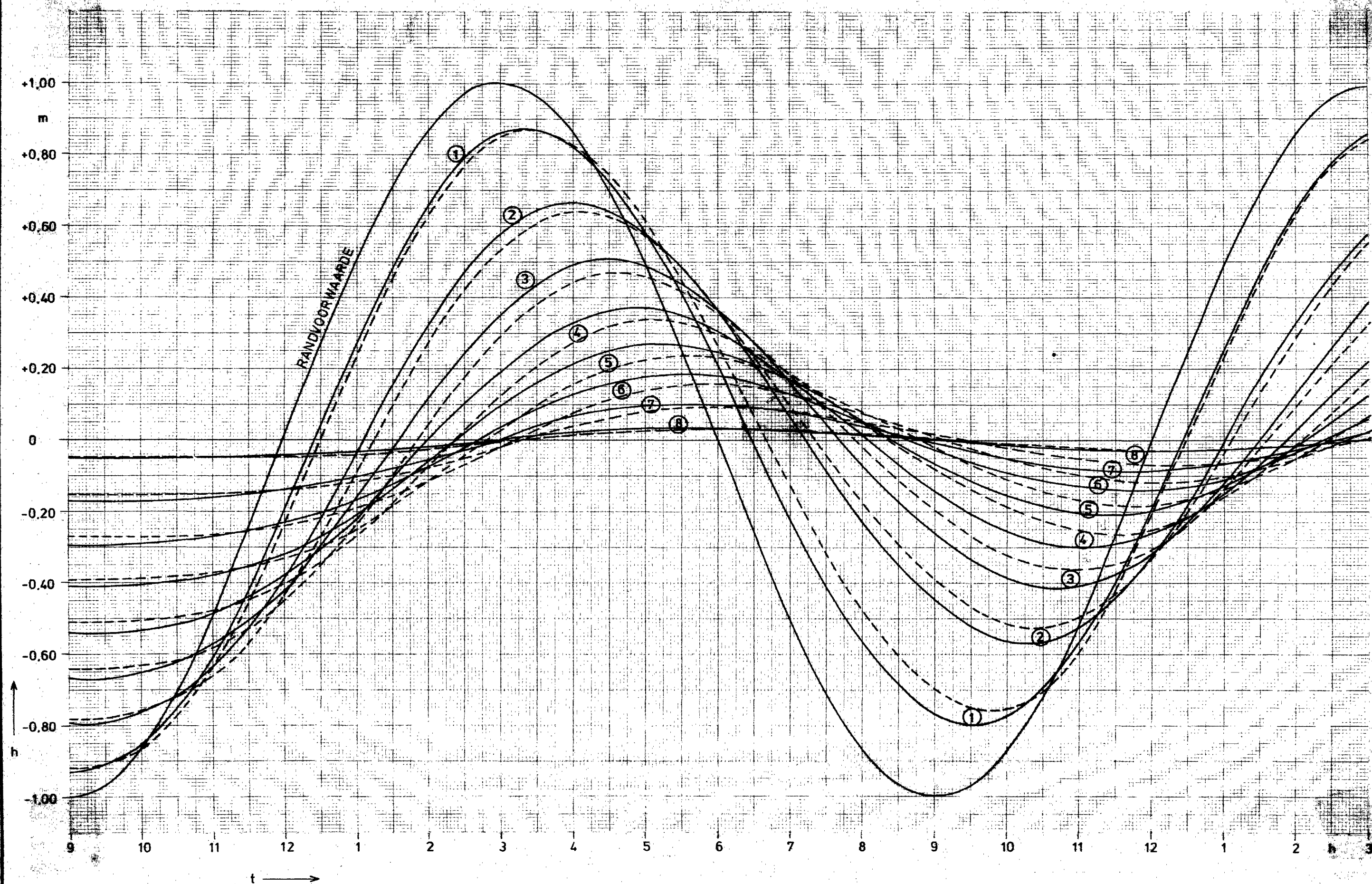
gew	get	gez
	vd	
	5479	

bijlage 21

SCHAAL —

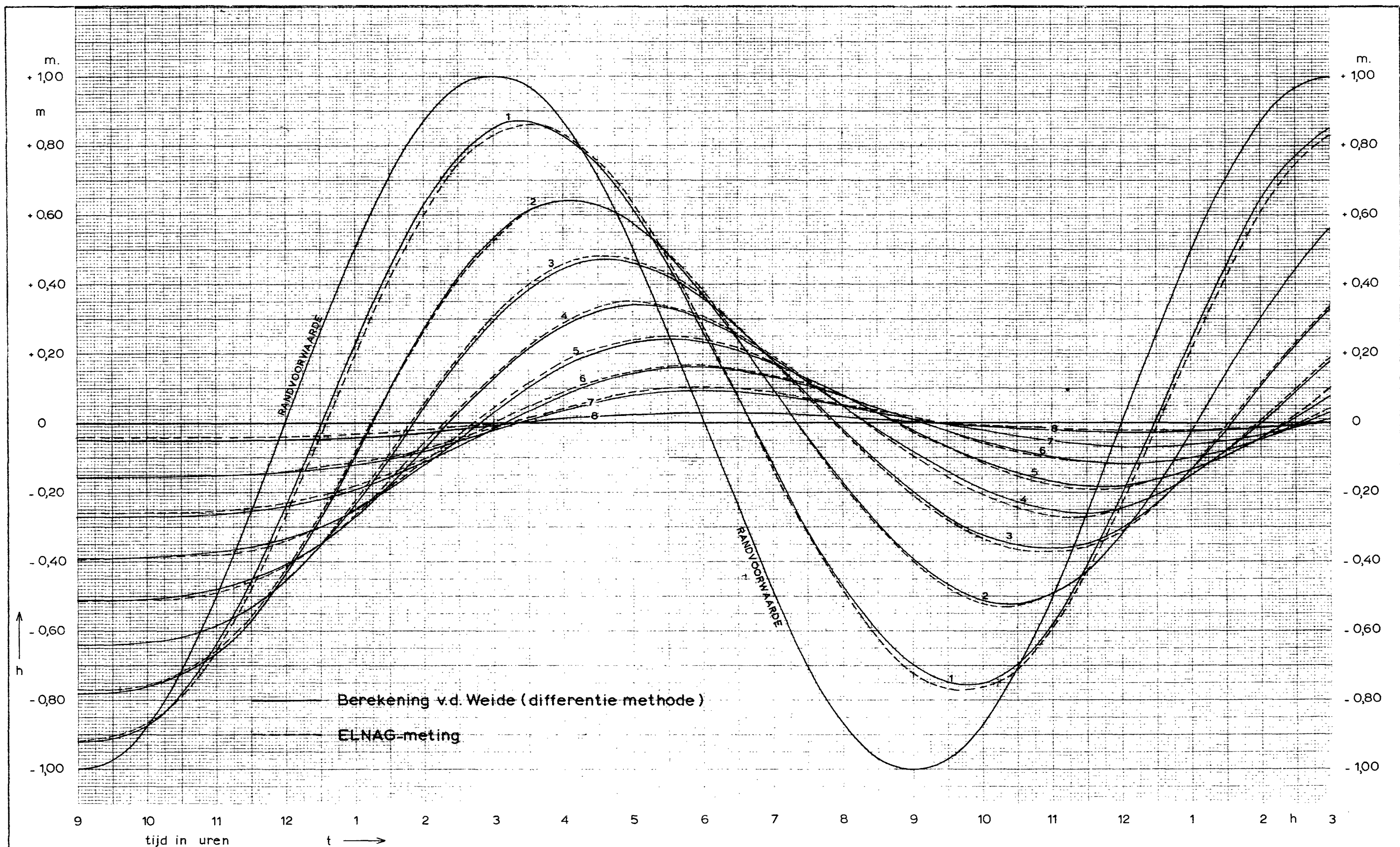
A3

WERKNR. S-78.047
 TEK. NR. 79.190



— berekening SEEP
 ---- berekening van der Weide

toetsprobleem 3a, verloop freatisch vlak in de tijd, vergelijking SEEP-v.d.WEIJDE				bijlage 22	
CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN				SCHAAL -	
		gem	get	gez	
			6 7-79		
					A3
					WERKNR. S-78.047 TEK. NR. 79.191



rijkswaterstaat
deltadienst - hoofdafdeling waterbouwkunde

v. G7724B00

ELNAG TOETSPROBLEEM ZANDBLOK
METINGEN BIJ SINUSVORMIGE RANDVOORWAARDE

ELNAG 5.2

79 W.0127

toetsprobleem 3a, verloop freatisch vlak
in de tijd, vergelijking ELNAG -
v.d. WEIJDE

CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

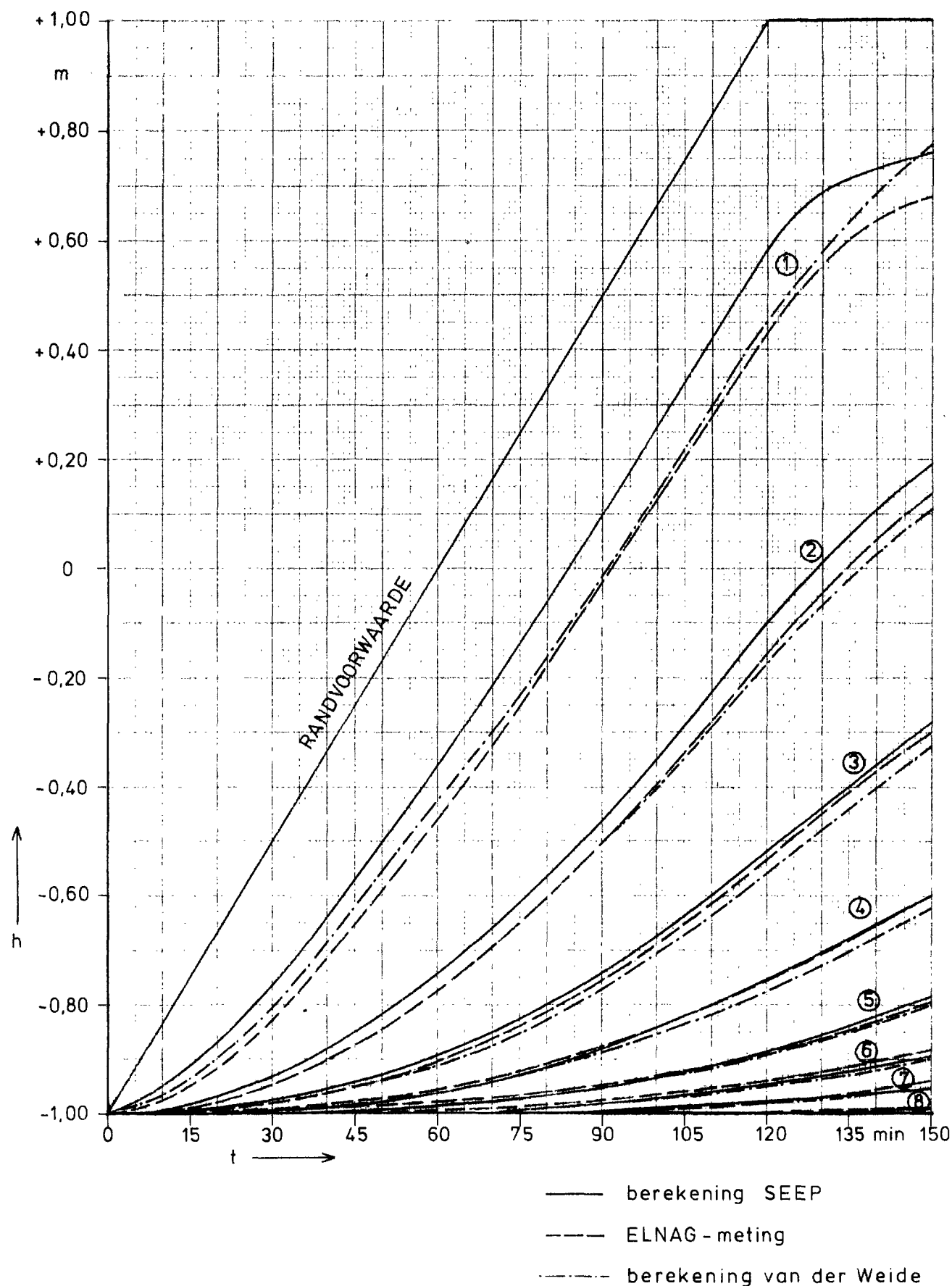
gem. get. gez.
30%

bijlage 23

SCHAAL -

A3

WERKNR. S-78.047
TEK. NR. 79.192



toetsprobleem 3b, verloop freatisch vlak
in de tijd, vergelijking SEEP-ELNAG -
vd. WEIJDE

bijlage 24

SCHAAL -

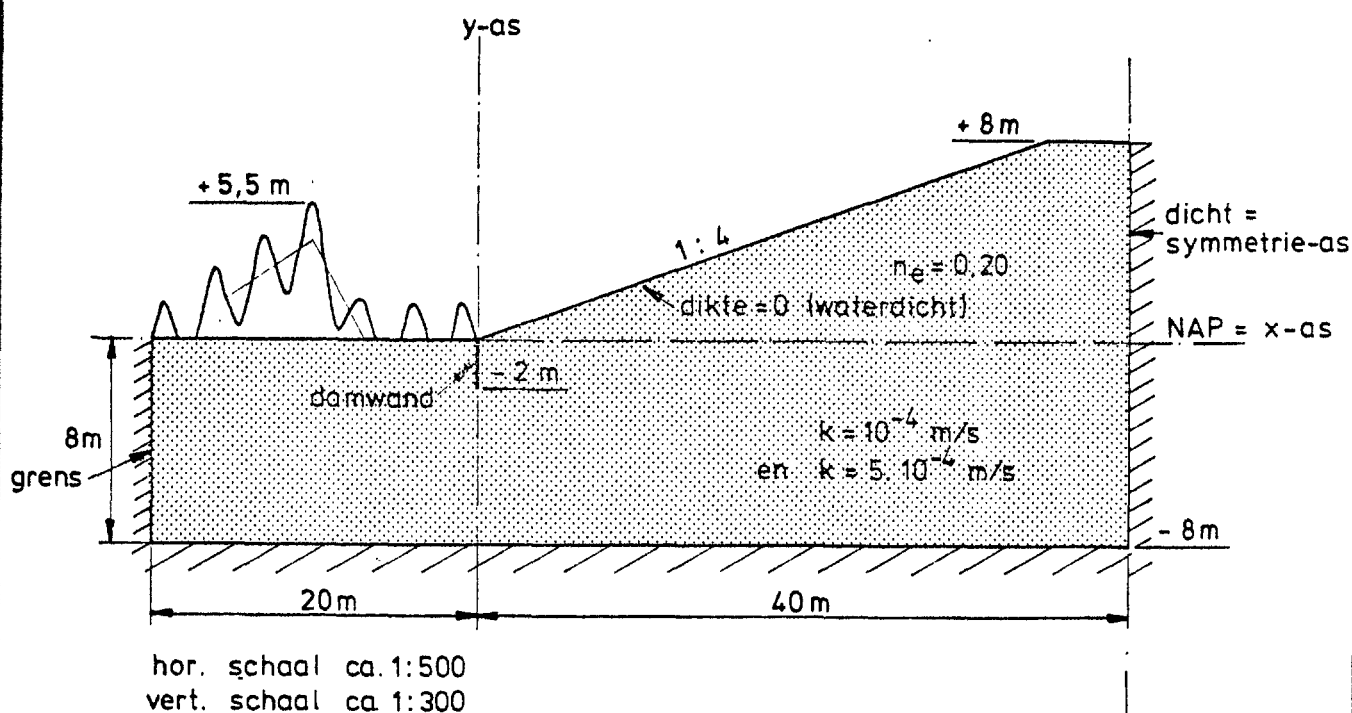
CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

gew	get	gez
	val	
	509	

A4

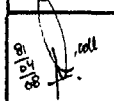
WERKNR.	S-78.047
TEK. NR.	79.193

Standaardprobleem: dijklichaam met damwand en dichte bekleding.



- * Randvoorwaarde: stormvloedkromme - opgegeven zie bijlage (max. 5.50 m⁺)
stormvloedkromme aan onderkant begrensd op
NAP = strandhoogte.
- * Te leveren uitvoer: potentialen aan de onderkant van de bekleding resp. op het freatisch vlak, de uitvoer van de stijghoogten om het half uur.
- * Beginnend op 1½ getij voor begin windeffect - 7 à 8 getijden doorrekenen.
- * Stormvloed "afkappen" op NAP-hoogte.

toetsprobleem 4

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 25blad 1
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.194

* Voor 2-tal K-waarden 10^{-4} en $5 \cdot 10^{-4}$ m/sec ($n_e = 0,20$ voor beiden) uit te voeren.

* In de meetpunten moeten zijn opgenomen:

x = 0	x = 9,50 m	x = 30,50
x = 0,5 m	x = 11,50 m	x = 40 m (eindpunt)
x = 2,5 m	x = 14,50 m	
x = 4,5 m	x = 18,50 m	
x = 6,5 m	x = 23,50 m	

* Te leveren een equipotentiaallijnenbeeld op de tijdstippen van $t = 5,25$ getijde (= top stormvloed) en $t = \text{ca. } 5,75$ getijde (= LW na stormvloedtop) voor beide k-waarden 10^{-4} en $5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

toetsprobleem 4 (vervolg)



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 25blad 2

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.195

toetsprobleem 4 (vervolg)

bijlage 25 blad 3

CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

gem get gez

18/8	18/8	18/8
13	13	13

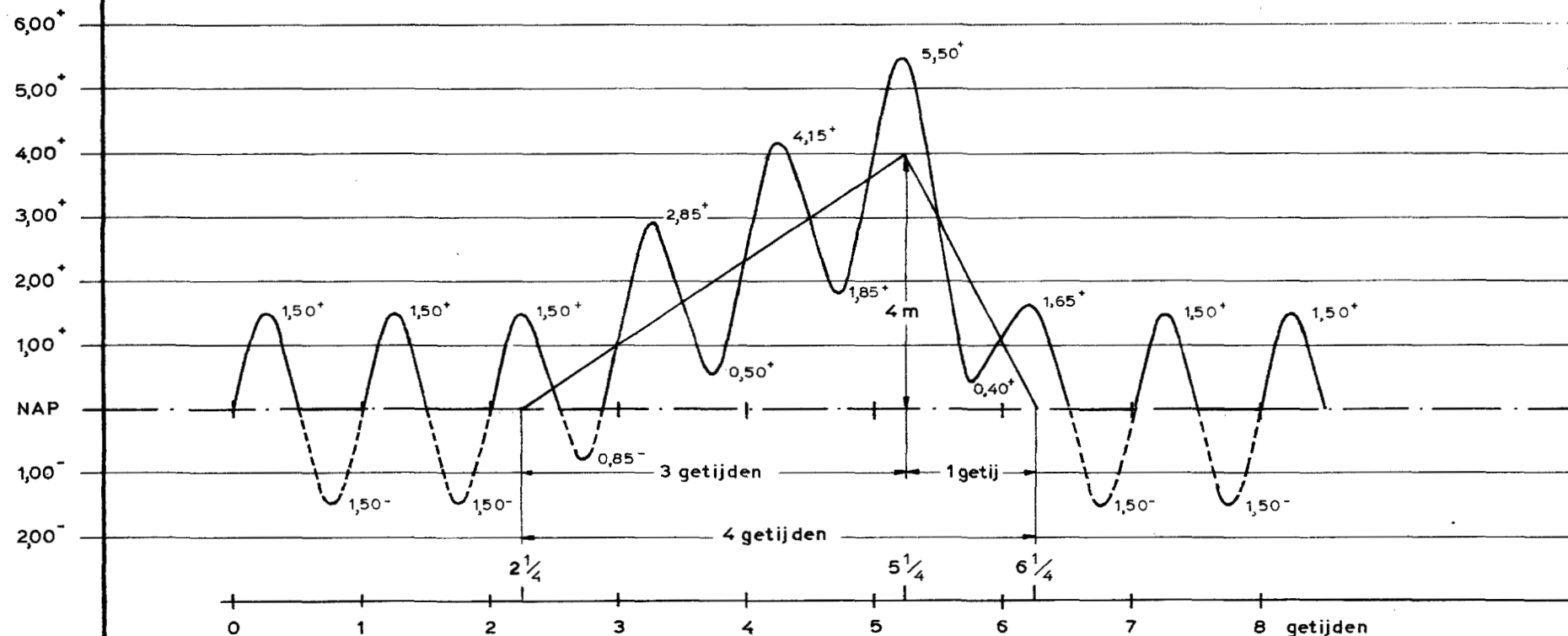
SCHAAL -

A4

WERKNR. S-78.047

TEK. NR. 79.196

m. t.o.v. NAP



STANDAARDPROBLEEM ELNAG

RIJKSWATERSTAAT
DELTADIENST
Waterloopkundige Afdeling

get	gec	gez
v.		

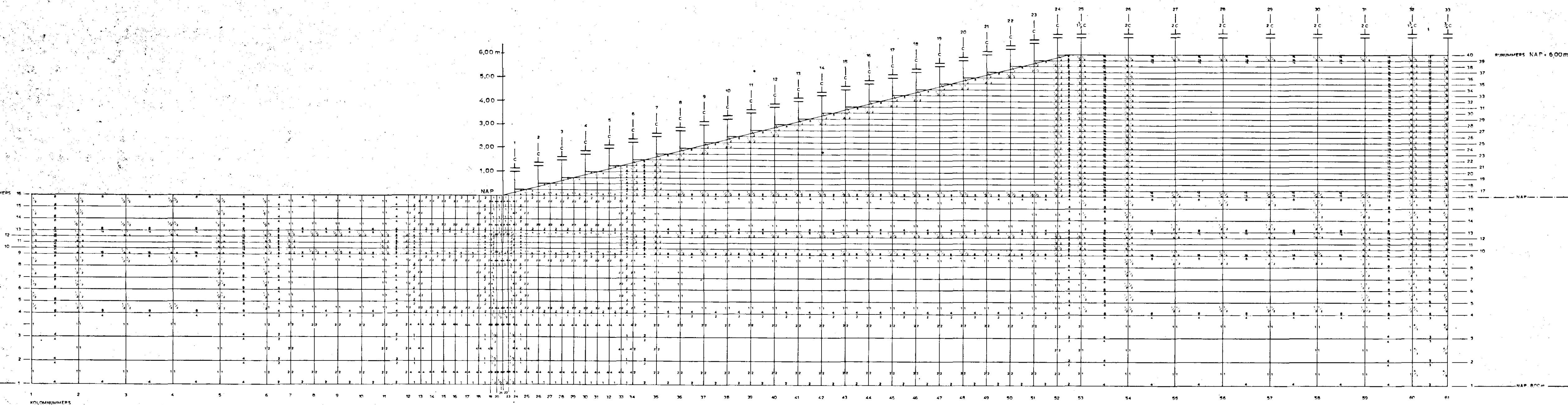
Project G77M380W

Bijlage

DIN A4 Nr.

MEETPUNTEN x = 0 0,50 2,50 4,50 6,50 9,50 11,50 14,50 18,50 23,50 30,50 40,00 m

0 1 2 3m
SCHAAL 1:100



rijkswaterstaat
deltadienst - hoofdafdeling waterloopkunde

STANDAARDPROBLEEM ELNAG
OPBOUW NETWERKMODEL

getekend: V. accoord: projectcode: G7724B00

nota: ELNAG bijlage 5.12

din 1/2 A1 nr. 79W.0137

toetsprobleem 4
opbouw netwerk ELNAG

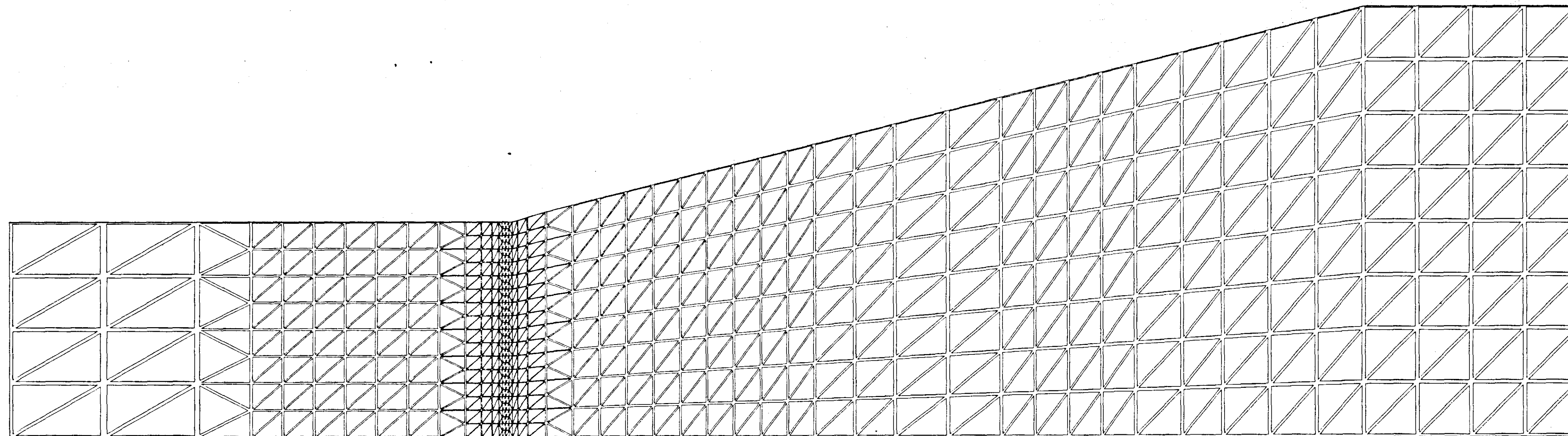
CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

gem. gez.

bijlage 26

SCHAAL -

WERKNR. S-78.047
TEK. NR. 79.197

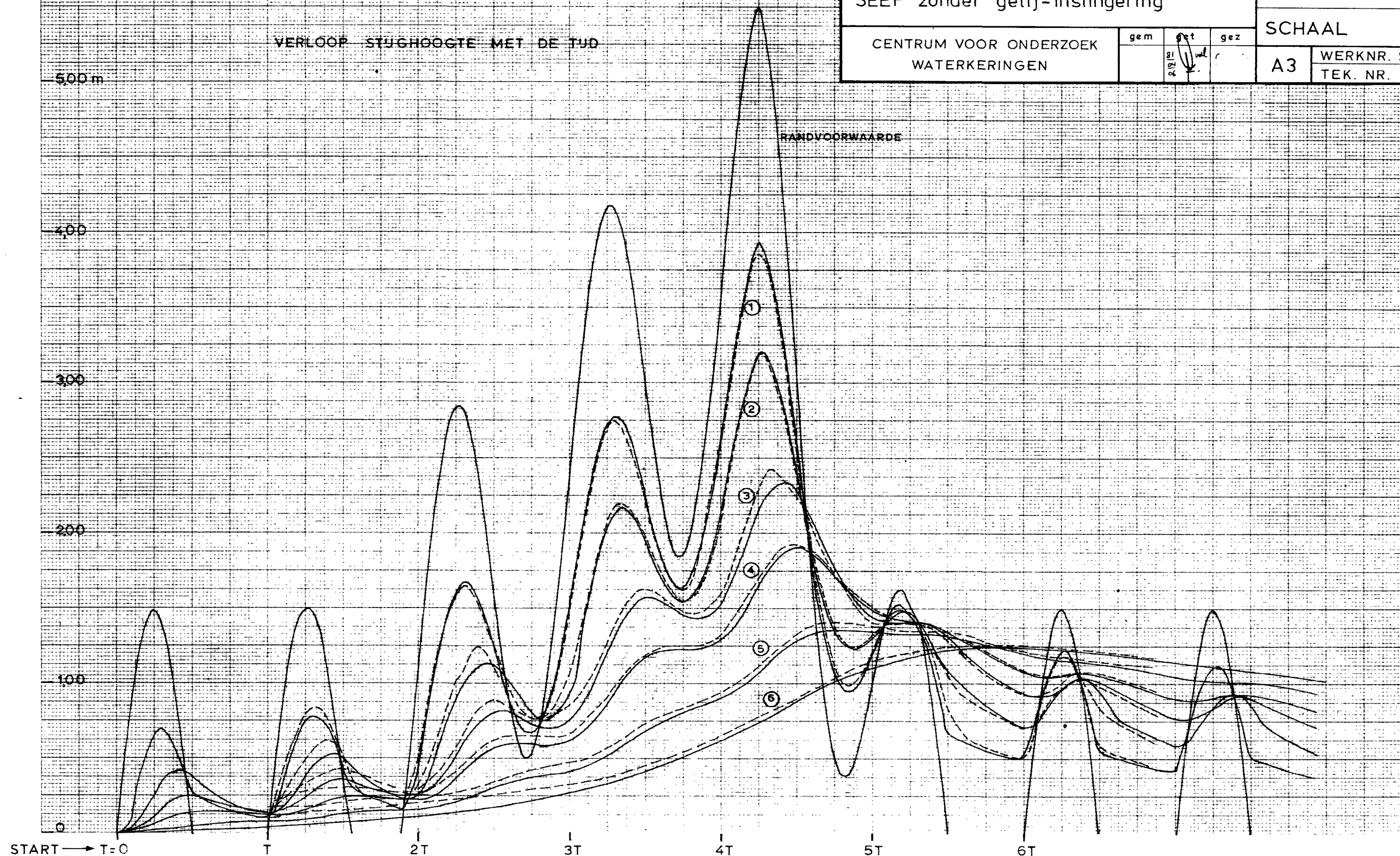


1:100

	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT	79-05-11
SEEP PIPINGPROBLEEM STORMVLOED OP ZANDDIJK MET ASFALT TALUD		CO-406144 PR2
1	BIJL.	

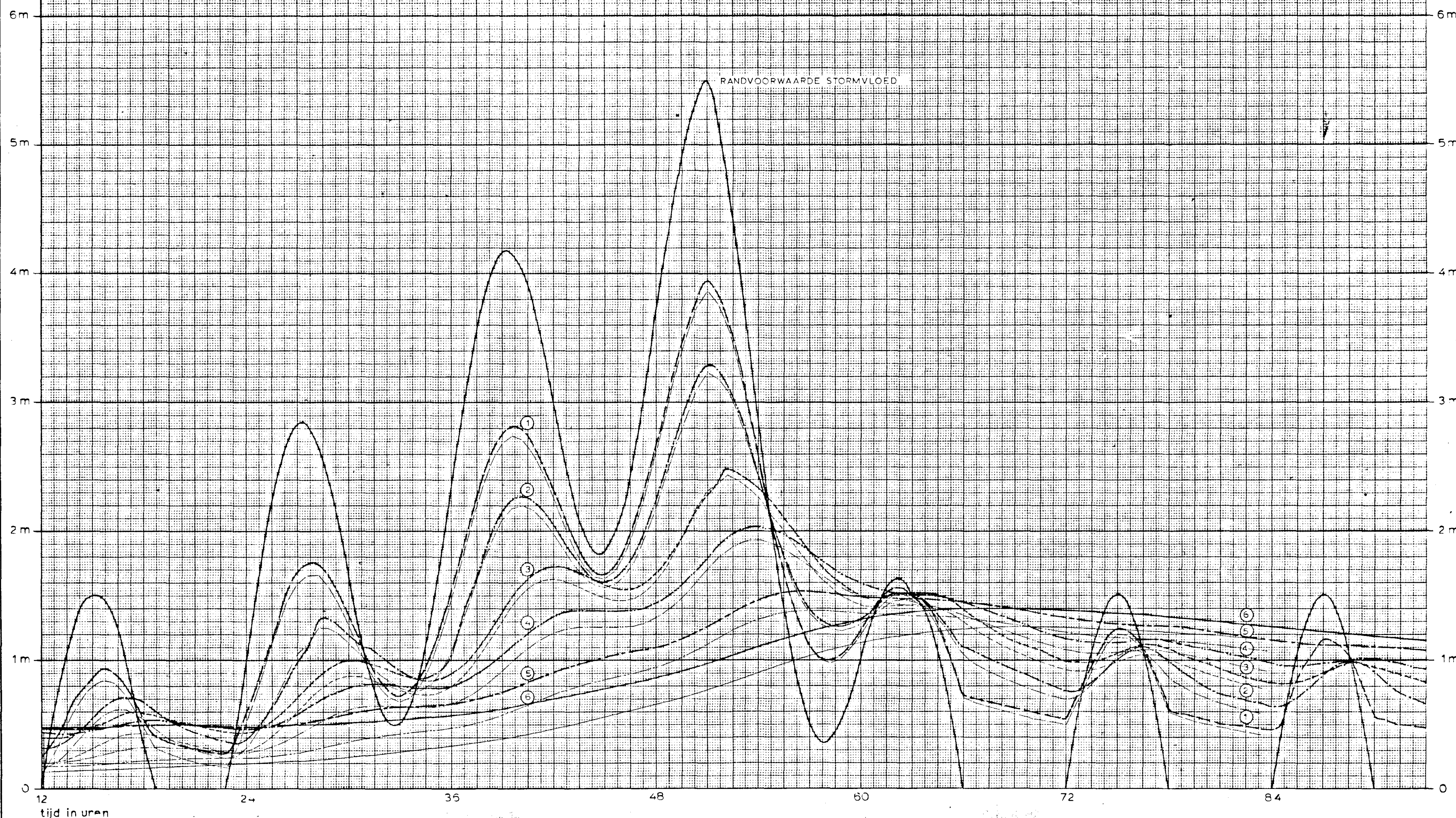
toetsprobleem 4
opbouw MESH - SEEP

bijl. 27
S-78.047
4Z-79.198

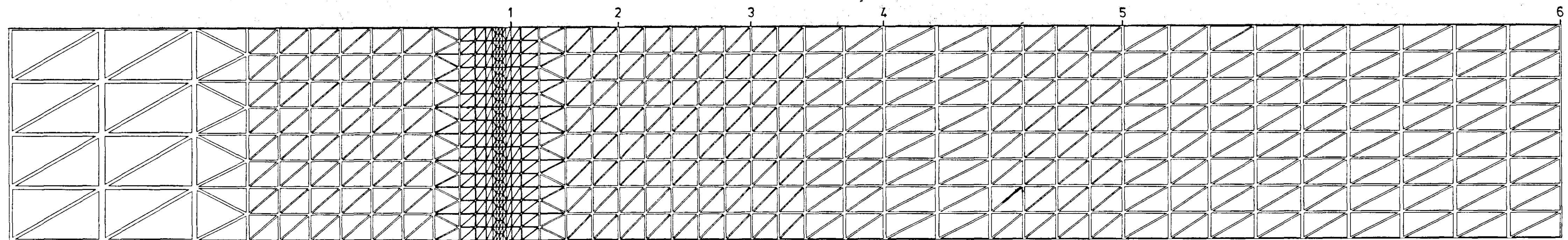


rijkswaterstaat deltadienst - hoofdafdeling waterloopkunde	verg.	standaard G7724B00	— ELNAG-METINGEN STANDAARD PROBLEEM - - - SEEP BEREKENINGEN ZONDER GETIJ-INSLINGERING
VERGELUKING STANDAARDPROBLEEM ELNAG EN SEEP BEREKENINGEN ZONDER GETIJ-INSLINGERING	79W0717	meetpunt 1, x = 0,5 m van uit de damwand " 2, x = 4,5 m " " " " " 3, x = 9,5 m " " " "	meetpunt 4, x = 14,5 m van uit de damwand " 5, x = 23,5 m " " " " " 6, x = 40,0 m " " " "

VERLOOP VAN DE STUGHOOGTE MET DE TIJD



rijkswaterstaat deltadienst - hoofdafdeling waterloophkunde	afkennend, afgeoord. V	projectcode G7724B00	ELNAG SEEP ——— meetpunt 1, x = 0,5 m vanuit damwand ELNAG SEEP —:— meetpunt 2, x = 4,5 m " " ELNAG SEEP —==— meetpunt 3, x = 9,5 m " "	ELNAG SEEP ——— meetpunt 4, x = 14,5 m vanuit damwand ELNAG SEEP —:— meetpunt 5, x = 23,5 m " " ELNAG SEEP —==— meetpunt 6, x = 40,0 m " "	toetsprobleem 4, vergelijking ELNAG - SEEP	bijlage 28.2
ELNAG METINGEN - STANDAARDPROBLEEM DICHT TALUD $k=10^4$ m/sec	data	bijlage 5 13 din A2 nr 79W.0138			CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN	SCHAAAL — A2 WERKNR S-78.047 TEK. NR 79.200

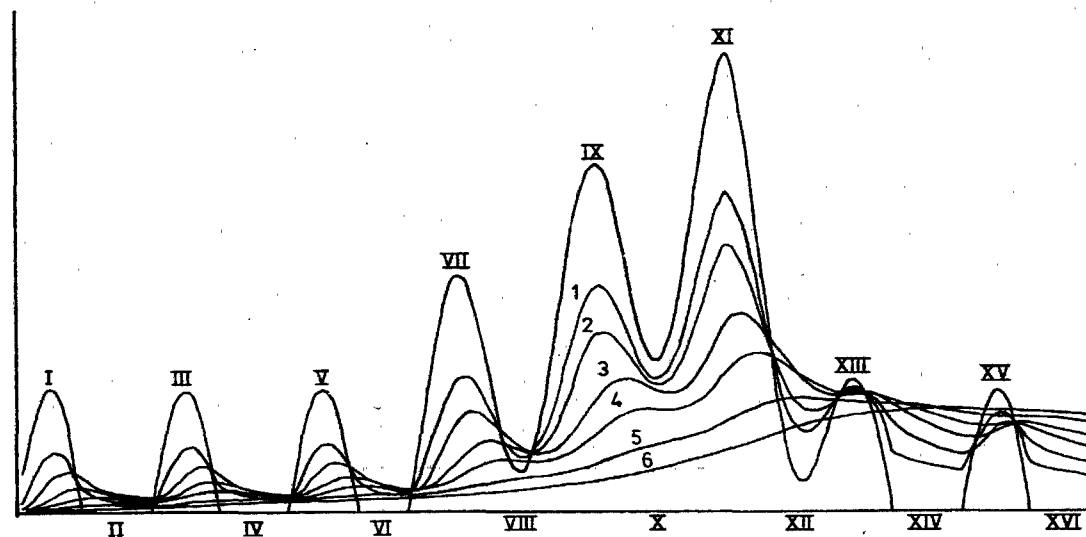


1:100

	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT	79-06-19	
SEEP 2-DIM TEMP. STORMVLOED OP ZANDDIJK MET ASFALT TALUD		CO-406144	PRB
15		BIJL.	

toetsprobleem 4, elementen MESH - SEEP
in de begintoestand

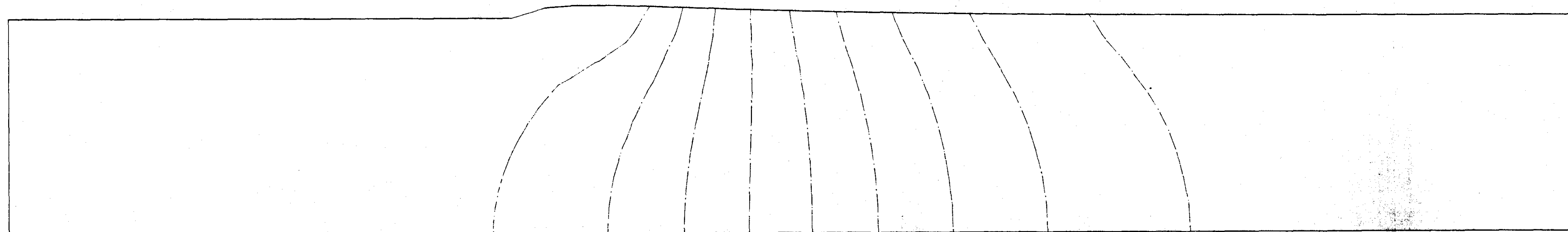
bijl. 29
S-78.047
42-79.201



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 4
meetresultaten SEEP

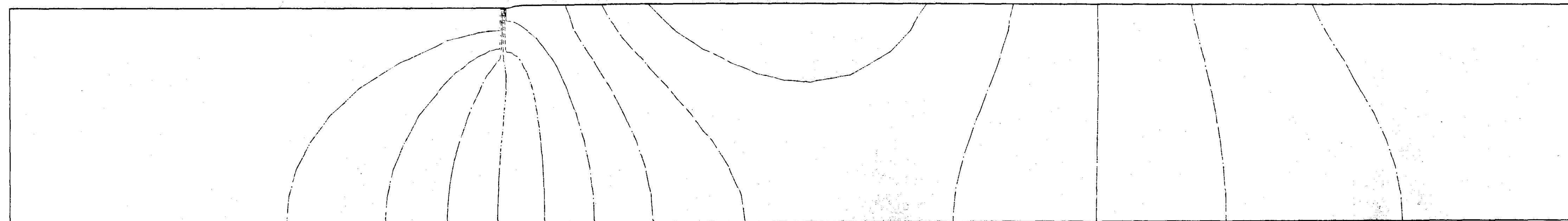
get	gew	gez	Schaal	Bijlage
			-	30.1
			werknr S-78.047	tek nr A4-79.202



TIJDSTIP 19439.64
17

toetsprobleem 4.
stromingsbeeld SEEP op tijdstip I

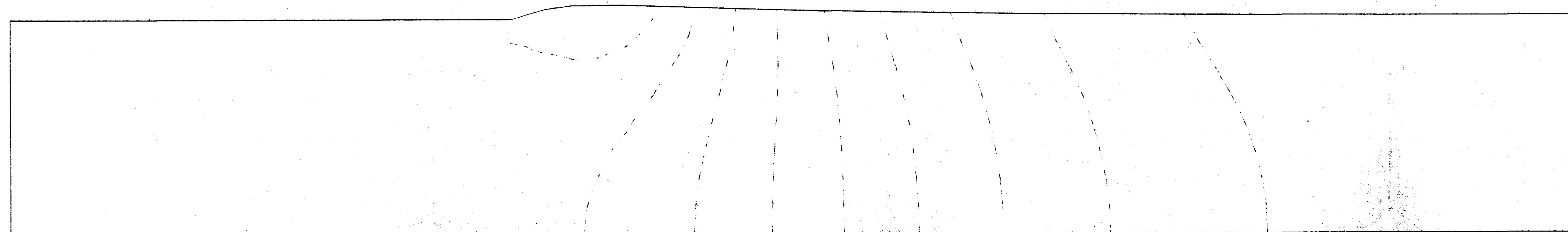
bijl. 30.2
S-78 047
4Z-79 203



TIJDSTIP 41039.25
18

toetsprobleem 4 ,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip II

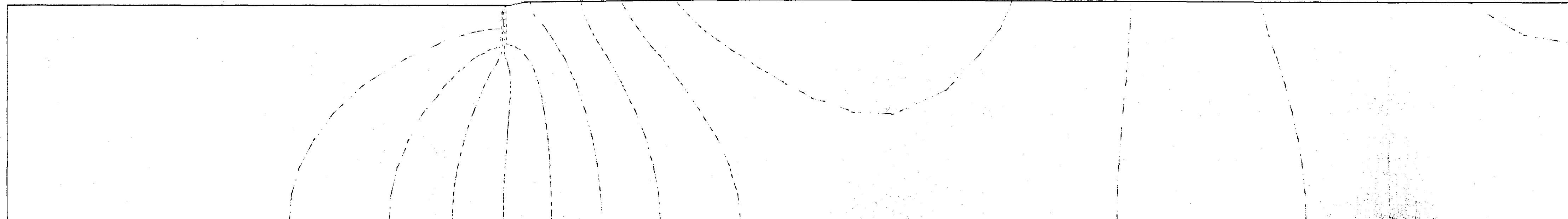
bijl. 30.3
S-78.047
4Z-79.204



Tijdstip 02533.00

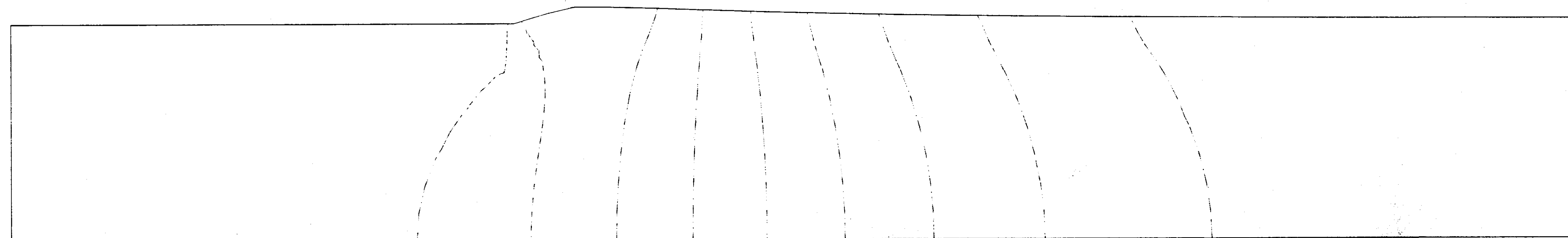
toetsprobleem 4, stromingsbeeld op
tijdstip III

bijl. 30.4
S-78.047
42-79.205



TIJDSTIP 64233.25
20

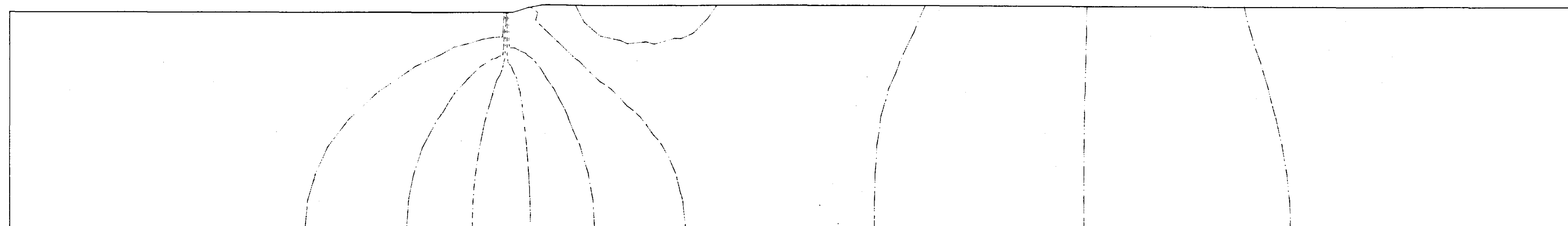
toetsprobleem 4, stromingsbeeld SEEP op tijdstip IV	bijl. 30.5
	S-78.047
	4Z-79.206



TIJDSTIP 105337.60
21

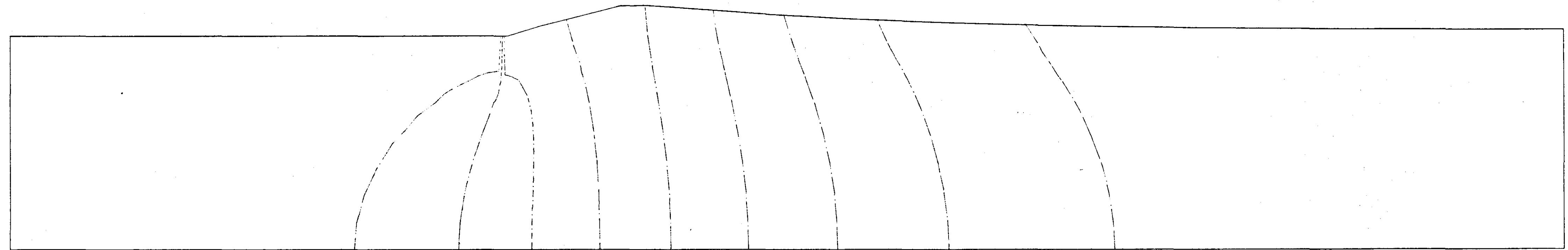
toetsprobleem 4,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip V

bijl. 30.6
S-78.047
4Z-79.207



TIJDSTIP 127437.00
22

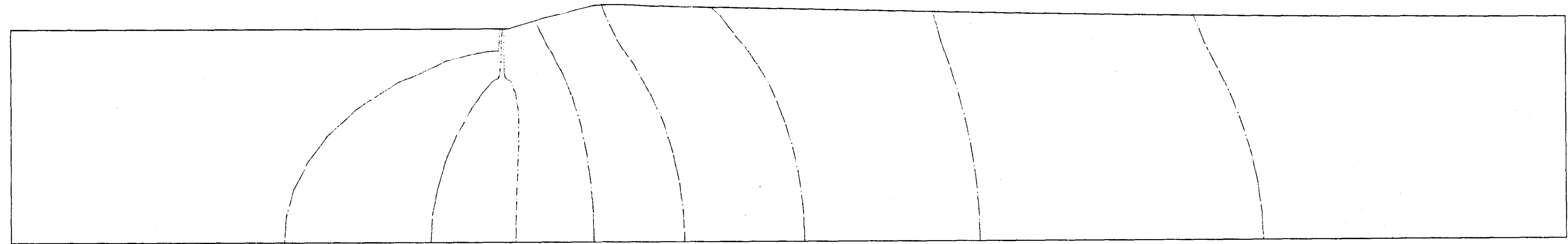
toetsprobleem 4 , stromingsbeeld SEEP op tijdstip VI	bijl. 30.7
	S - 78.047
	4Z - 79.208



TIJDSTIP 149036.30
23

toetsprobleem 4,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip VII

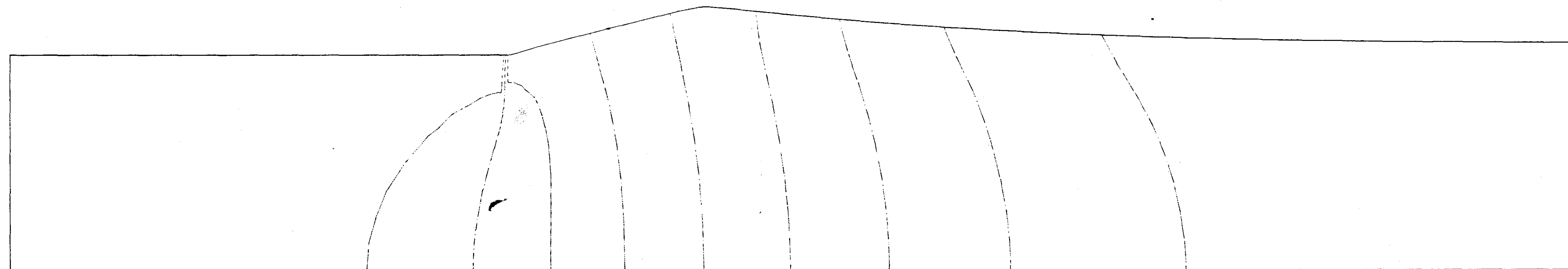
bijl. 30.8
S-78.047
4Z-79.209



TIJDSTIP 170635.68
24

toetsprobleem 4 ,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip VIII

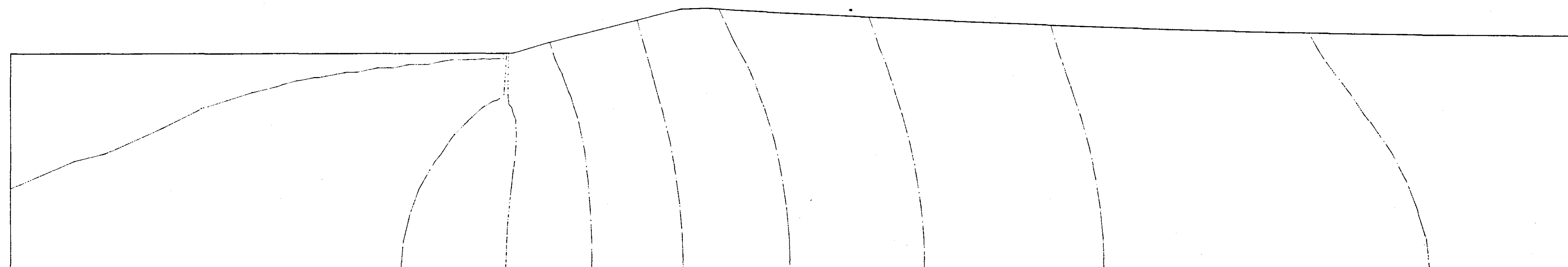
bijl. 30.9
S-78.047
4Z-79.210



TIJDSTIP 192235.04
25

toetsprobleem 4.
stromingsbeeld SEEP op tijdstip IX

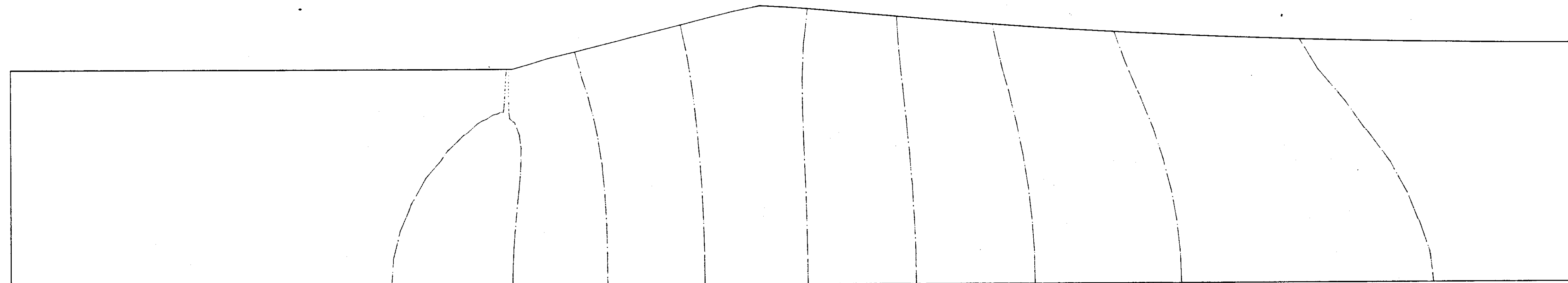
bijl. 30.10
S-78.047
4Z-79.211



TIJDSTIP 213334.40
26

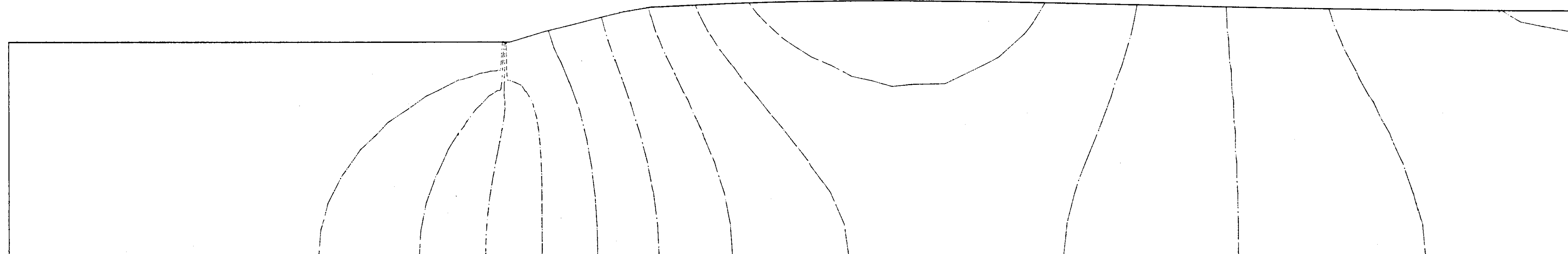
toetsprobleem 4,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip X

bijl. 30.11
S-78.047
4Z-79.212



TIJDSTIP 235433.76
27

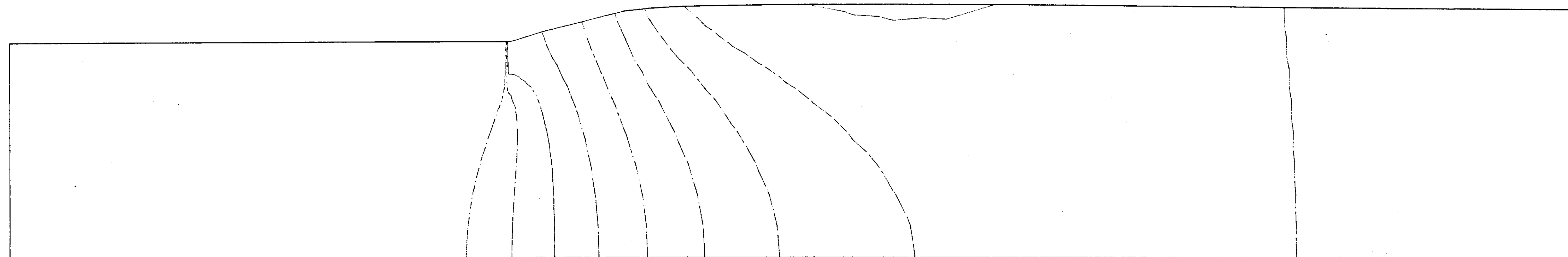
toetsprobleem 4 ,	bijl. 30.12
stromingsbeeld SEEP op tijdstip XI	S-78.047
	4Z-79.213



TIJDSTIP 257033.12
28

toetsprobleem 4.
stromingsbeeld SEEP op tijdstip XII

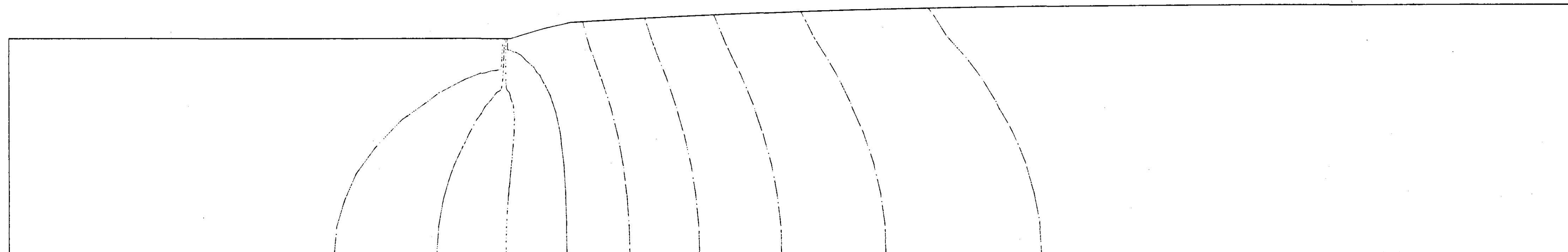
bijl. 30.13
S-78.047
4Z-79.214



TIJDSTIP 278632.48
29

toetsprobleem 4,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip XIII

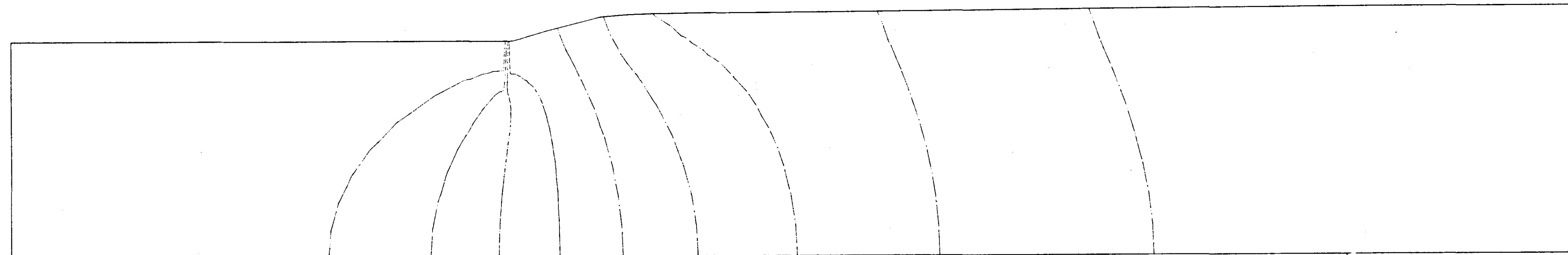
bijl. 30.14
S-78.047
4Z-79.215



TIJDSTIP 300232.00
30

toetsprobleem 4,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip XIV

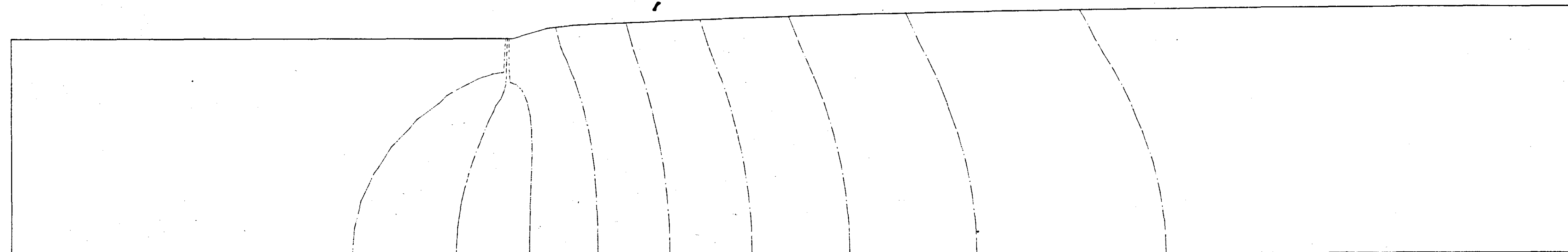
bijl. 30.15
S-78.047
4Z-79.216



TIJDS TIP 321831.20
31

toetsprobleem 4 ,
stromingsbeeld SEEP op tijdstip XV

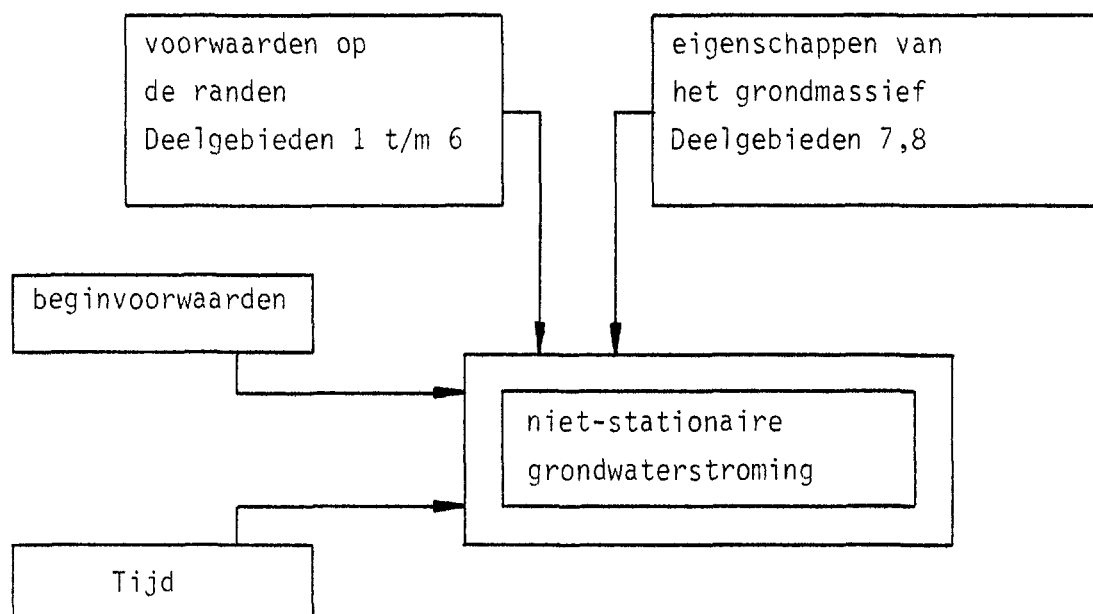
bijl.30.16
S-78.047
42-79.217



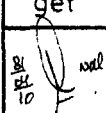
TIJDSTIP 343430.56
32

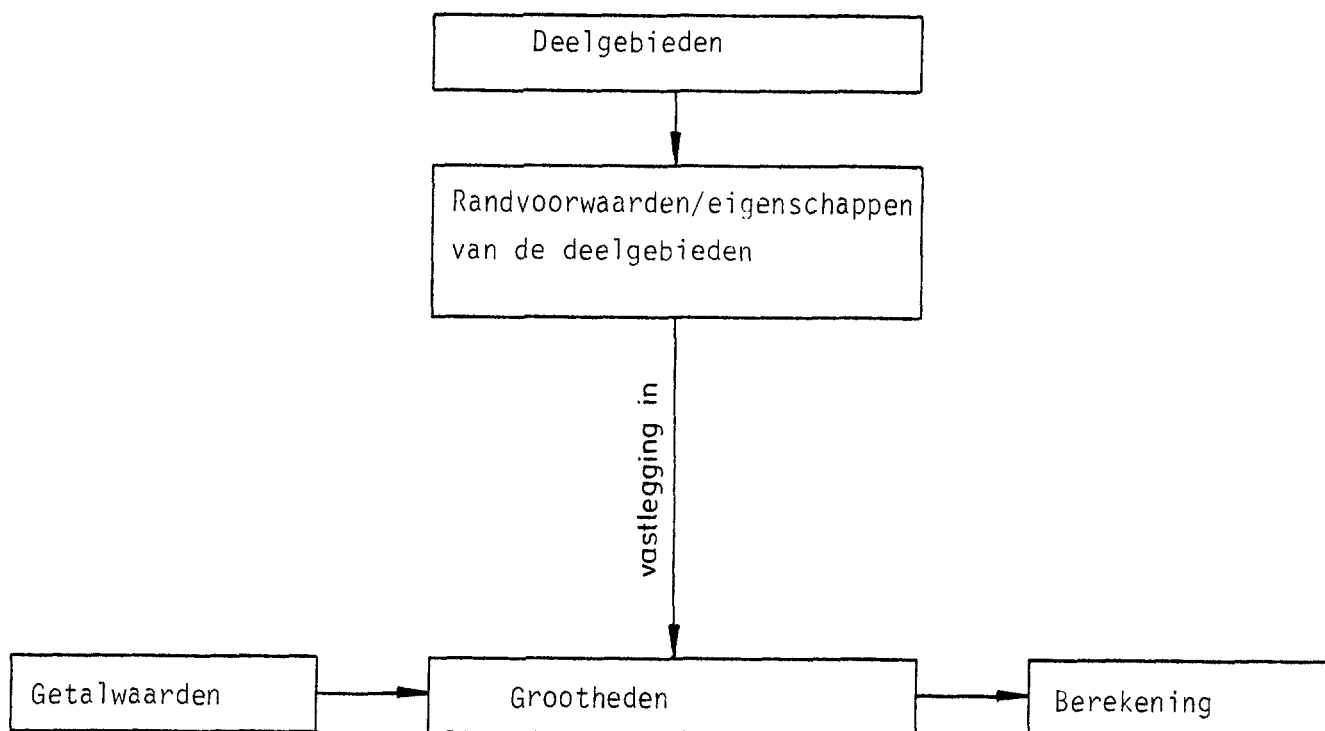
toetsprobleem 4
stromingsbeeld SEEP op tijdstip XVI

bijl. 30.17
S-78.047
4Z 79.218

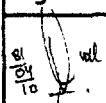


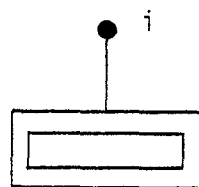
relatieschema niet stationaire grondwaterstroming I

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 31.1
	 21/10			werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.408

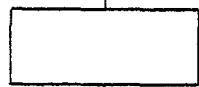


relatieschema niet-stationaire grondwaterstroming II

 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 31.2
				werknr S-78.047	tek nr A4 - 79.409



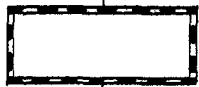
te beschouwen
deelgebied i



eigenschap/randvoorwaarde
die verder buiten
beschouwing gehouden
wordt.



eigenschap/randvoorwaarde
die in toetsprobleem
moet kunnen worden opgenomen.



eigenschap/randvoorwaarde
die eventueel in toetsprobleem
moet kunnen worden opgenomen.



eigenschap/randvoorwaarde
die vanuit deelgebied i
bepaald is.



eigenschap/randvoorwaarde
die ook nog in deelgebied j
aan de orde komt.

----- verbindingslijnen

legenda

CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

10/10/10
10/10/10

gew

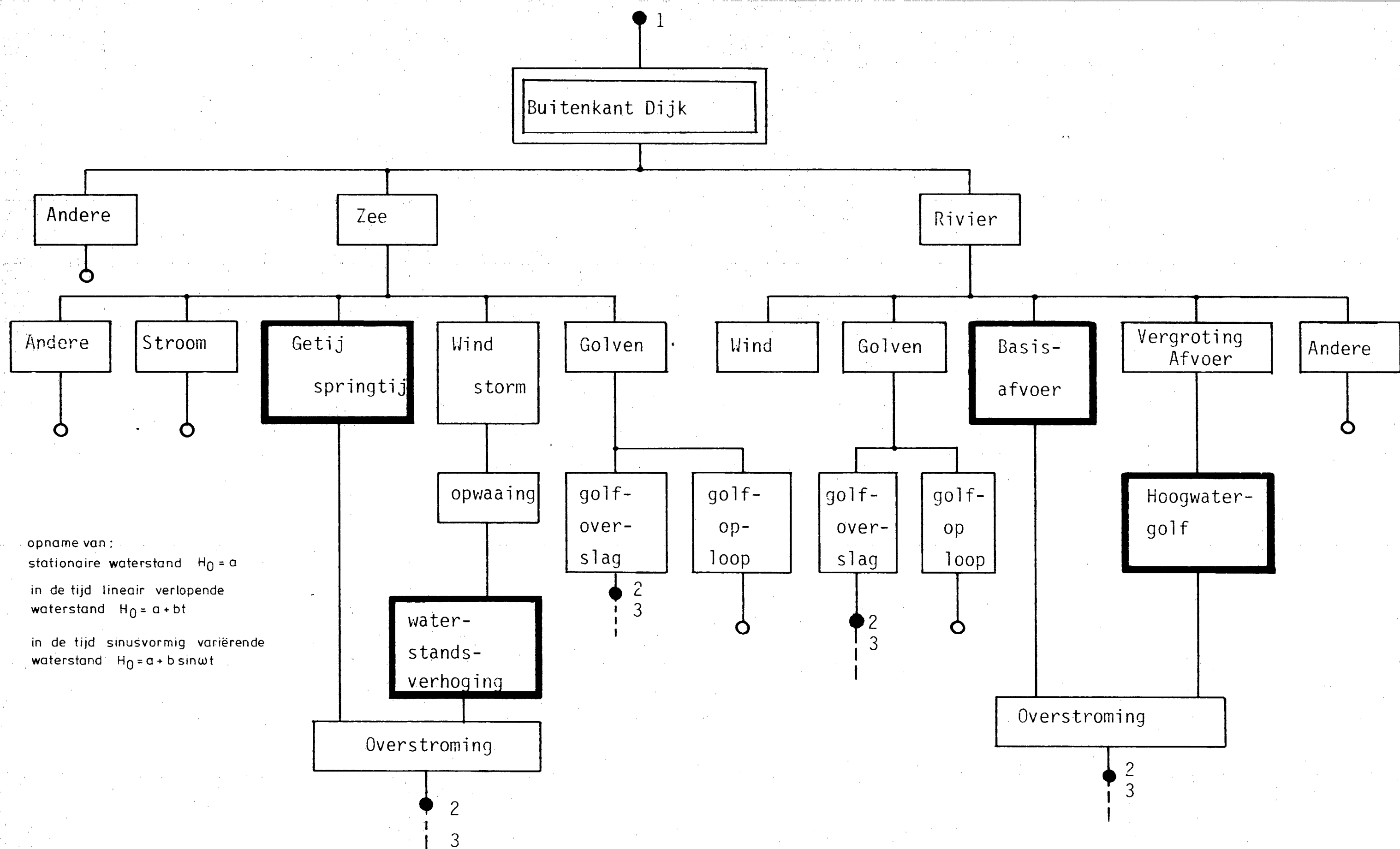
gez

Schaal -

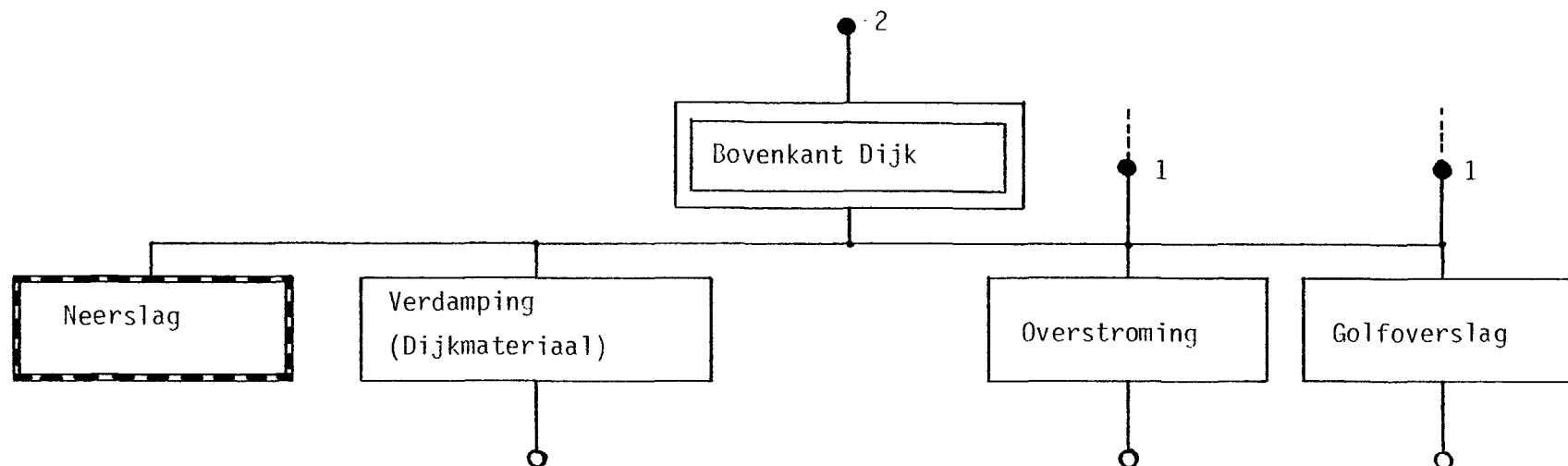
werknr S-78.047

Bijlage 31.3

tek nr A4 - 79.410



randvoorwaarden buitendijks				bijlage 31.4	
CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN				SCHAAL -	
				A3	WERKNR. S-78.047 TEK. NR. 79.411



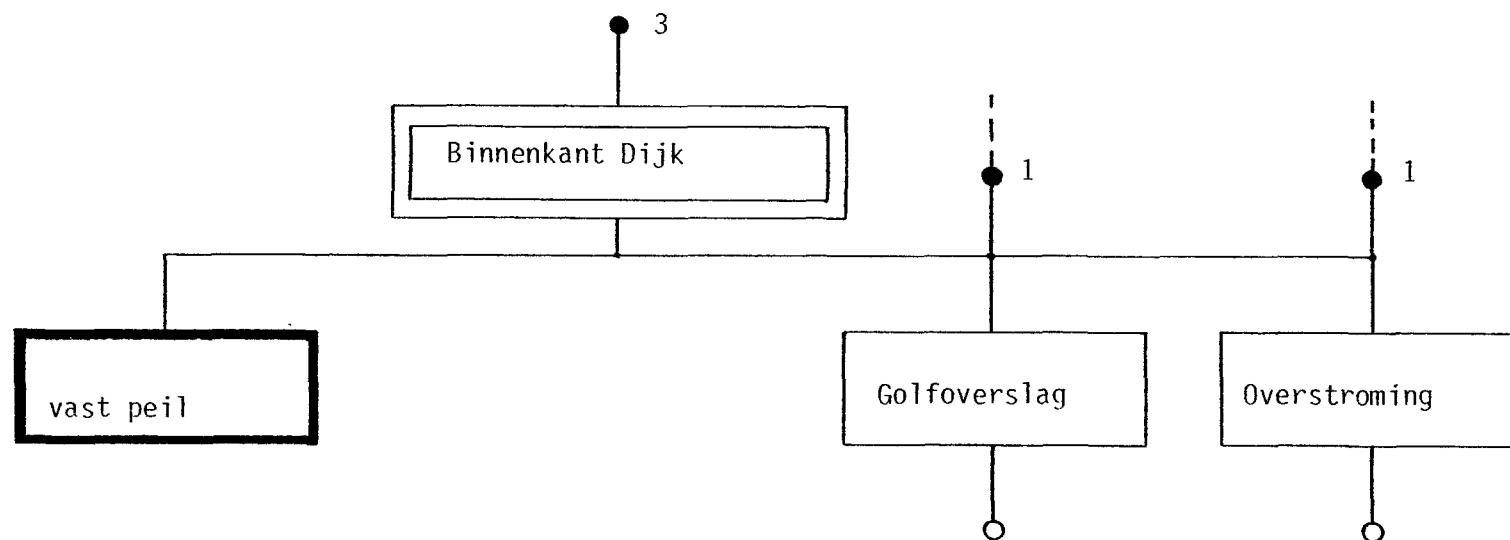
Opname van: eventueel neerslag f

CONW

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

randvoorwaarden kruin

get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 31.5
			werknr S-78.047	tek nr A4- 79.412



Opname van: vaste waterstand H_p (polderpeil)

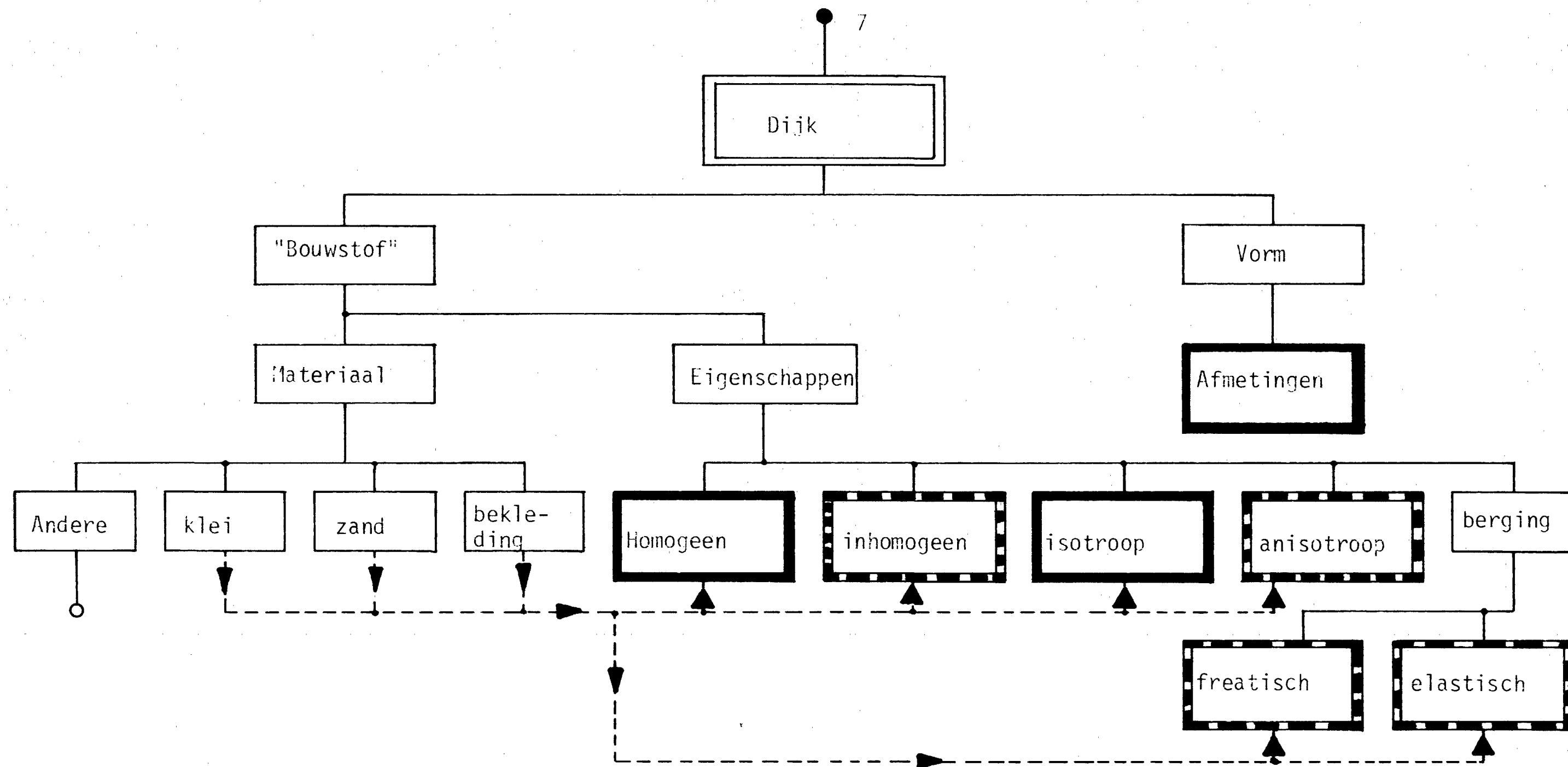
Fig. 7 Bepaling randvoorwaarden binnenkant dijk.



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

randvoorwaarden binnendijks

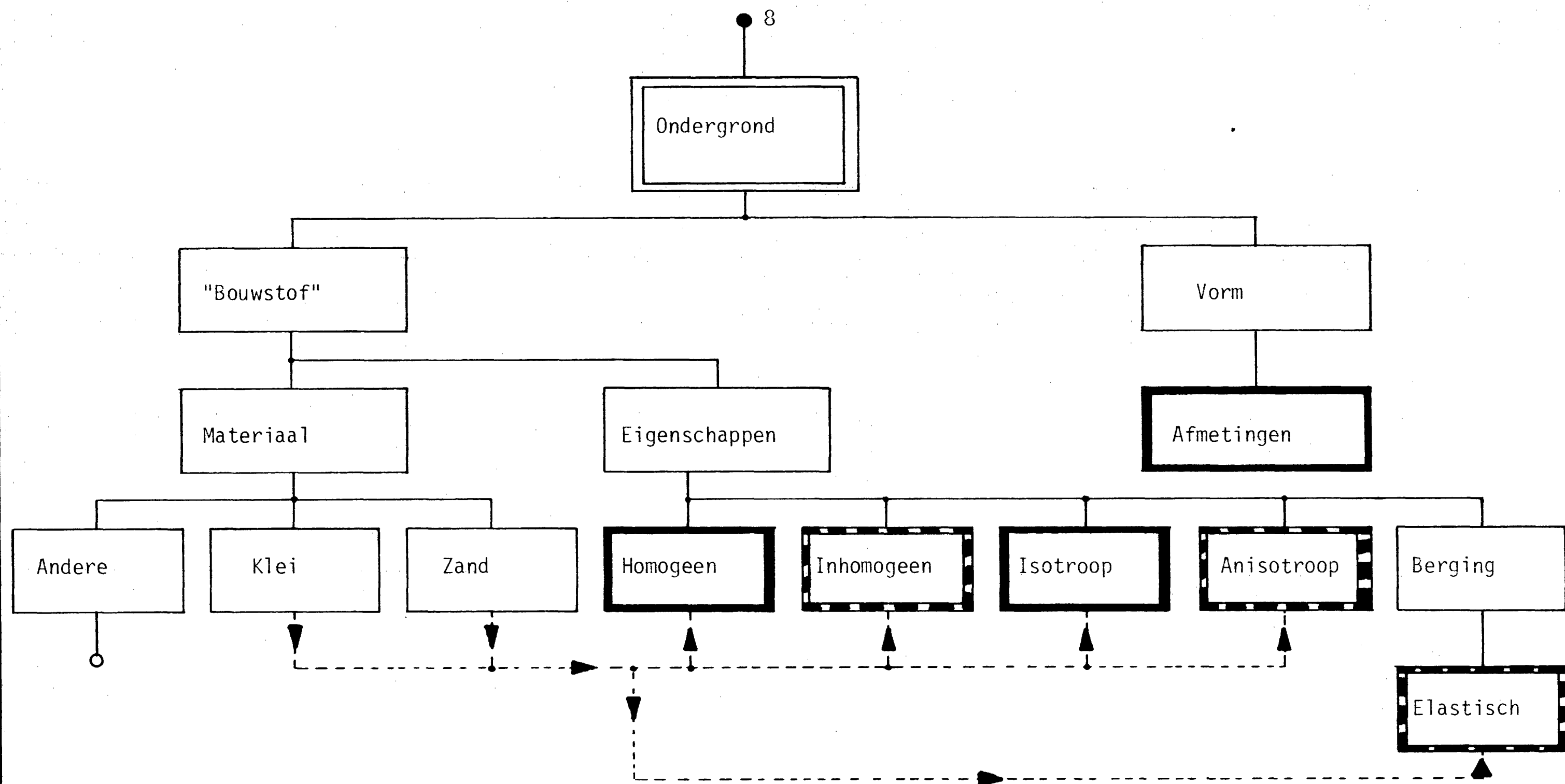
get	gew	gez	Schaal -	Bijlage 31.6
			werknr S-78.047	tek nr A4- 79.413



Opname van: Homogeniteit (eventueel inhomogeniteit)
 Isotropie (eventueel anisotropie)
 eventueel freatisch en elastische berging

Grootheden: doorlatendheden k_h en k_v
 bergingscoëfficiënten μ en S

geometrie en samenstelling dijk				bijlage 31.7	
CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN				SCHAAL -	
				A3	WERKNR. S-78.047 TEK. NR. 79.414

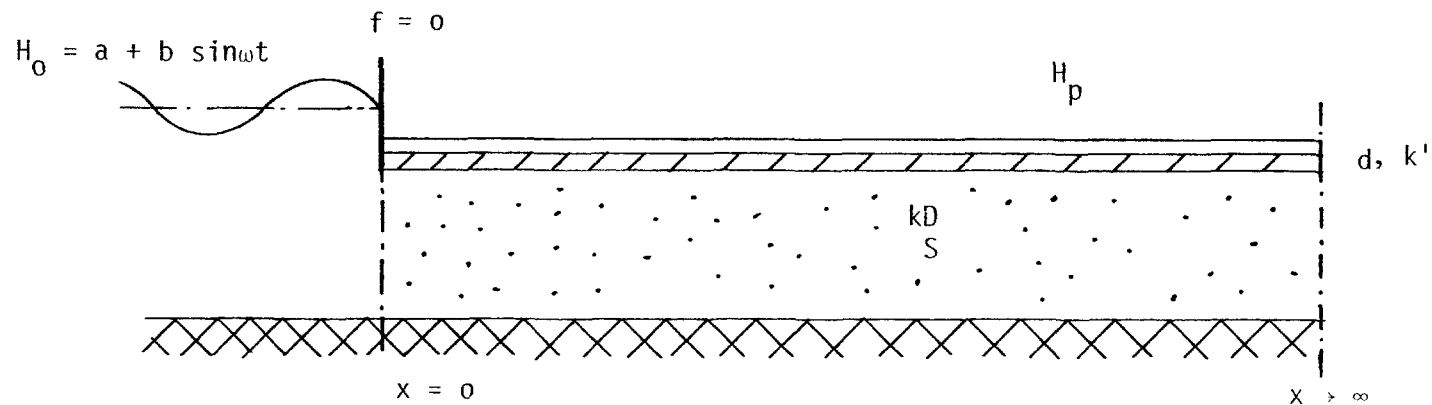


Opname van: Homogeniteit (eventueel inhomogeniteit)
 Isotropie (eventueel anisotropie)
 Eventueel elastische berging

Grootheden: Doorlatendheden k_h en k_v
 Bergingscoëfficiënt S .

Fig. 9: Bepaling eigenschappen ondergrond

geometrie en samenstelling ondergrond				bijlage 31.8	
CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN				SCHAAL -	
				A3	
				WERKNR. S-78.047	
				TEK. NR. 79.415	

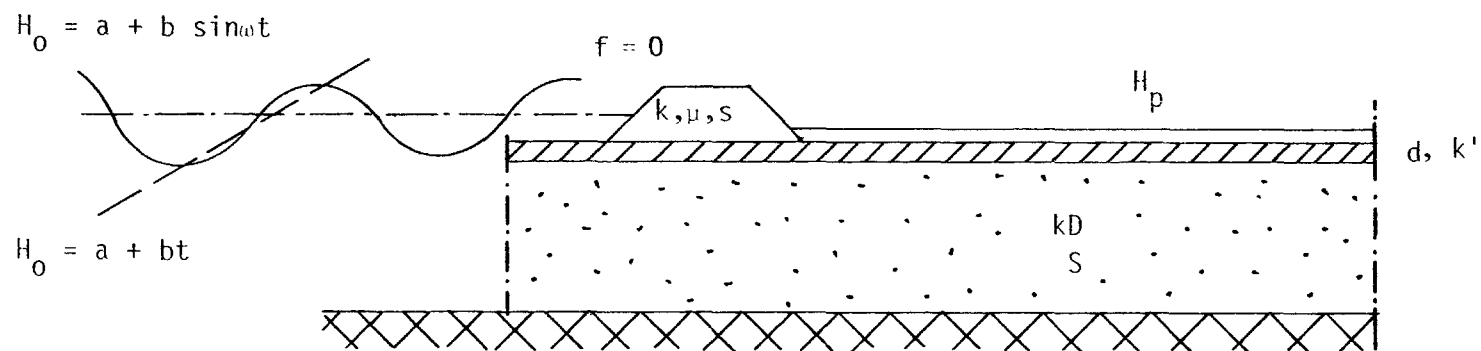


CONW

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 1

get	gew	gez	Schaal	-	Bijlage 31.10
<i>[Signature]</i>			werknr	S-78.047	tek nr A4-79.417



CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 2

get

gew

gez

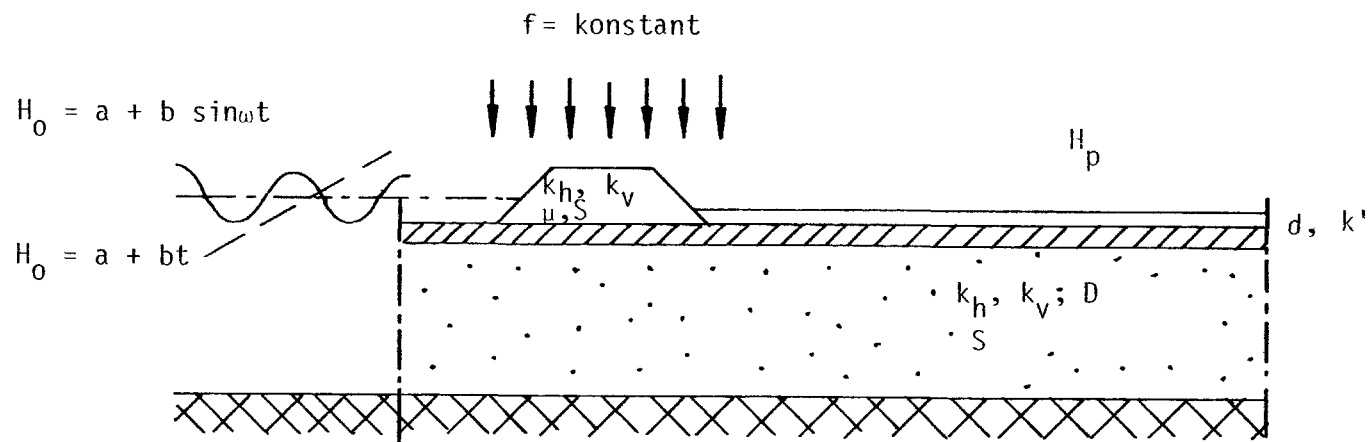
Schaal -

Bijlage 31.11

[Handwritten signature]

werknr S-78.047

tek nr A4- 79.418



CO/W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

toetsprobleem 3

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 31.12

31/10/12

werknr S-78.047

tek nr A4- 79.419

			Toetsprobleem 1	Toetsprobleem 2	Toetsprobleem 3
Buitenkant Dijk	stationaire waterstand	$H_0 = a_1$	+	+	+
	in de tijd lineair verlopende waterstand	$H_0 = a_2 + b_2 t$	-	+	+
	in de tijd sinusvormig variërende waterstand	$H_0 = a_3 + b_3 \sin \omega t$	+	+	+
Bovenkant Dijk	eventueel neerslag	f	-	-	+
Binnenkant Dijk	vaste waterstand	H_p	+	+	+
Voorbegrenzing	stationaire waterstand	$H_0 = a_1$	+	+	+
	in de tijd lineair verlopende waterstand	$H_0 = a_2 + b_2 t$	-	+	+
	in de tijd sinusvormig variërende waterstand	$H_0 = a_3 + b_3 \sin \omega t$	+	+	+
	lengte voorland	L_1	-	+	+
Ondoorlatende basis	debiet loodrecht rand nul	$q \perp = 0$	+	+	+
	diepteligging	D	+	+	+
Achterbegrenzing	potentiaal $\approx$ vaste waterstand	$\phi \approx H_p$	+	+	+
	plaats	λ	+	+	+
Dijk	eventueel inhomogeniteit		-	-	+
	anisotropie		-	-	+
	freatische berging		-	+	+
	elastische berging		-	+	+
	doorlatendheden	k	-	+	-
		k_h, k_v	-	-	+
	bergingscoëfficiënten	μ	-	+	+
		S	-	+	+
	afmetingen		-	+	+
			-	-	+
Ondergrond	eventueel inhomogeniteit		-	-	+
	anisotropie		-	-	+
	elastische berging		+	+	+
	doorlatendheden	k	+	+	-
		k_h, k_v	-	-	+
	bergingscoëfficiënt	S	+	+	+
	afmetingen		+	+	+
Grondwaterstroming	beginvoorwaarden		+	+	+
	of lengte achterdijk waarover $\phi \approx H_p$	λ	+/+	+/+	+/+
	of geschatte potentiaal in A bij MHW	ϕ_A			
Berekening	niet-stationair		+	+	+
	een-dimensionaal		+	-	-
	twee-dimensionaal		-	+	+
	drie-dimensionaal		-	-	-
	uitvoer dijk debieten		-	+	+
	potentialen		-	+	+
	freatische lijn		-	+	+
	kwel binnendijkstalud		-	+	+
	ondergrond debieten		+	+	+
	potentialen		+	+	+
	bereiken grenspotentiaal		+	+	+

samenvatting eisen / toetsprobleem

bijlage 31.13

SCHAAL -

CENTRUM VOOR ONDERZOEK
WATERKERINGEN

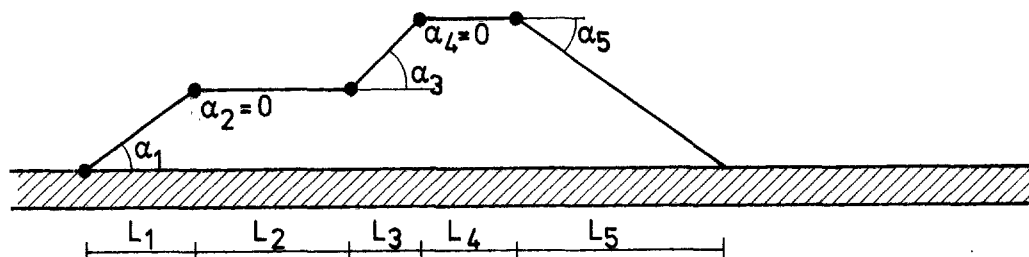
gem

get

gez

2x2Z

WERKNR. S-78 047
TEK. NR. 79 420



geometrie dijk

CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

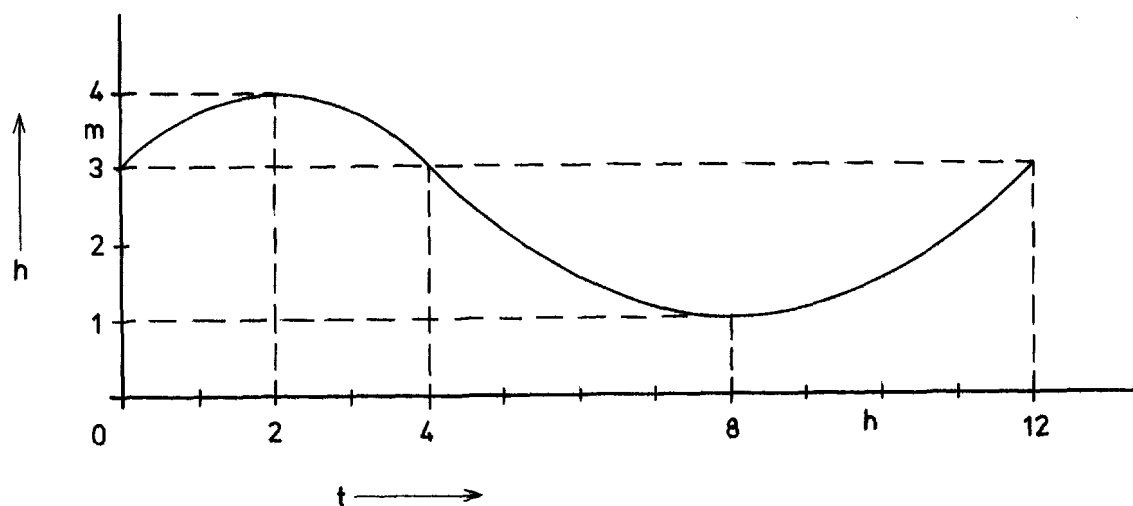
gez

Schaal -

Bijlage 31.15

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.422



Beschrijving door twee parabolen:

$$t = 0-4 \text{ uur} : H = -1/4 t^2 + t + 3$$

$$t = 4-12 \text{ uur} : H = \frac{1}{8} t^2 - 2t + 9$$

buitenwaterstand toetsprobleem 2 en 3

CO_W

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 31.16

werknr S-78.047

tek nr A4 - 79.423

Uitvoer-grootheid	Opmerkingen	Voorkeur
λ grenspotentiaal $q_{\text{ondergrond}}$ $q_{\text{hor ondergrond}}$ $q_{\text{vert ondergrond}}$ $s_{\text{semipermeabele laag}}$ $\phi_{\text{ondergrond}}$ q_{dijk} $q_{\text{hor dijk}}$ $q_{\text{vert dijk}}$ ϕ_{dijk} freatische lijn equipotentiaallijnen stroomlijnen kwel binnendijks talud overschrijden grenspotentialen	kwellengte debiet ondergrond bij isotropie hor. debiet ondergrond bij anisotropie vert. debiet ondergrond bij anisotropie vert. debiet door semi-permeabele laag potentiaal ondergrond debiet dijk bij isotropie hor. debiet dijk bij anisotropie vert. debiet dijk bij anisotropie potentiaal dijk	getalwaarde getalwaarde aangeven in plots van potentialen } of tijdsverloop van deze grootheden in een bepaald punt in plotvorm } of verloop per plaats van deze grootheden voor een bepaald tijdstip in plotvorm signalering, getalwaarden signalering, aanpassing berekening



Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

kriteria uitvoer

get

gew

gez

Schaal -

Bijlage 31.18

werknr S-78.047

tek nr A4-79.425