

**laboratorium voor  
grondmechanica**

**delft**

S. g. b. o. s. b.





Vergelijkend Onderzoek  
Cel- en Triaxiaalproeven

Rapport: 23064-II

laboratorium voor grondmechanica

delft



stieltjesweg 2  
postbus 69  
telefoon: (015)-56 92 23\*  
telex: solab nl 33326  
postgiro: 234342  
bank: mees en hope nv delft

*Vergelijkend Onderzoek  
Cel- en Triaxiaalproeven  
Rapport: 230640-II  
(oktober 1978)*

*Dit rapport is het vervolg op het rapport: 230640-I van december 1977, waarin de resultaten van de vergelijkende cel- en triaxiaalproeven op kunstmatig gefabriceerde monsters van Limburgse klei worden besproken.*

*In dit rapport worden de resultaten van de aanvullende vergelijkende cel- en triaxiaalproeven op natuurlijke monsters Betuweklei behandeld.*

*De proeven werden uitgevoerd onder verantwoordelijkheid van ing. H. Pieters.*

*Het rapport is opgesteld door ir. W.J. Heijnen.*



## 1. Inleiding

Ten behoeve van de eerste versie vergelijkende proeven (zie: Rapport 230640-I d.d. december 1977) werden de kleimonsters met behulp van een kleine vacuumstrengpers gemaakt. Het is vrijwel zeker dat hierdoor in de kleimonsters een zekere mate van structuur werd gebracht die afwijkend is van de structuur van natuurlijk afgezette klei. In verband hiermee was in het beproevingsprogramma ter vergelijking van cel- en triaxiaalproeven ook een serie proeven voorzien op natuurlijke kleimonsters.

De structuur van de klei kan invloed hebben op een aantal factoren die een rol spelen bij de interpretatie van de resultaten van zowel de cel- als de triaxiaalproeven.

Voor een belangrijk deel zijn dit de verdeling van de waterspanning in het monster bij de ongedraineerde triaxiaalproeven en het vormveranderingsgedrag. De laatste factor kan van belang zijn voor de mate van ontwikkeling van de bezwijktoestand bij celproeven waarbij de normaal bij LGM gebruikelijke procedure wordt toegepast.

Doordat de resultaten van de vergelijkende proeven op de kunstmatig gemaakte monsters grote verschillen te zien geven tussen de verschillende beproevingsprocedures werd de behoefte tot het uitvoeren van een soort toetsingsonderzoek met natuurlijke kleimonsters gevoeld.

Hiervoor werd nabij Arnhem een kleilaag gevonden waarvan, op grond van een oriënterend vooronderzoek kan worden aangenomen dat deze redelijk homogeen was.

In dit rapport zal deze klei worden aangeduid als "Betuwe-klei".



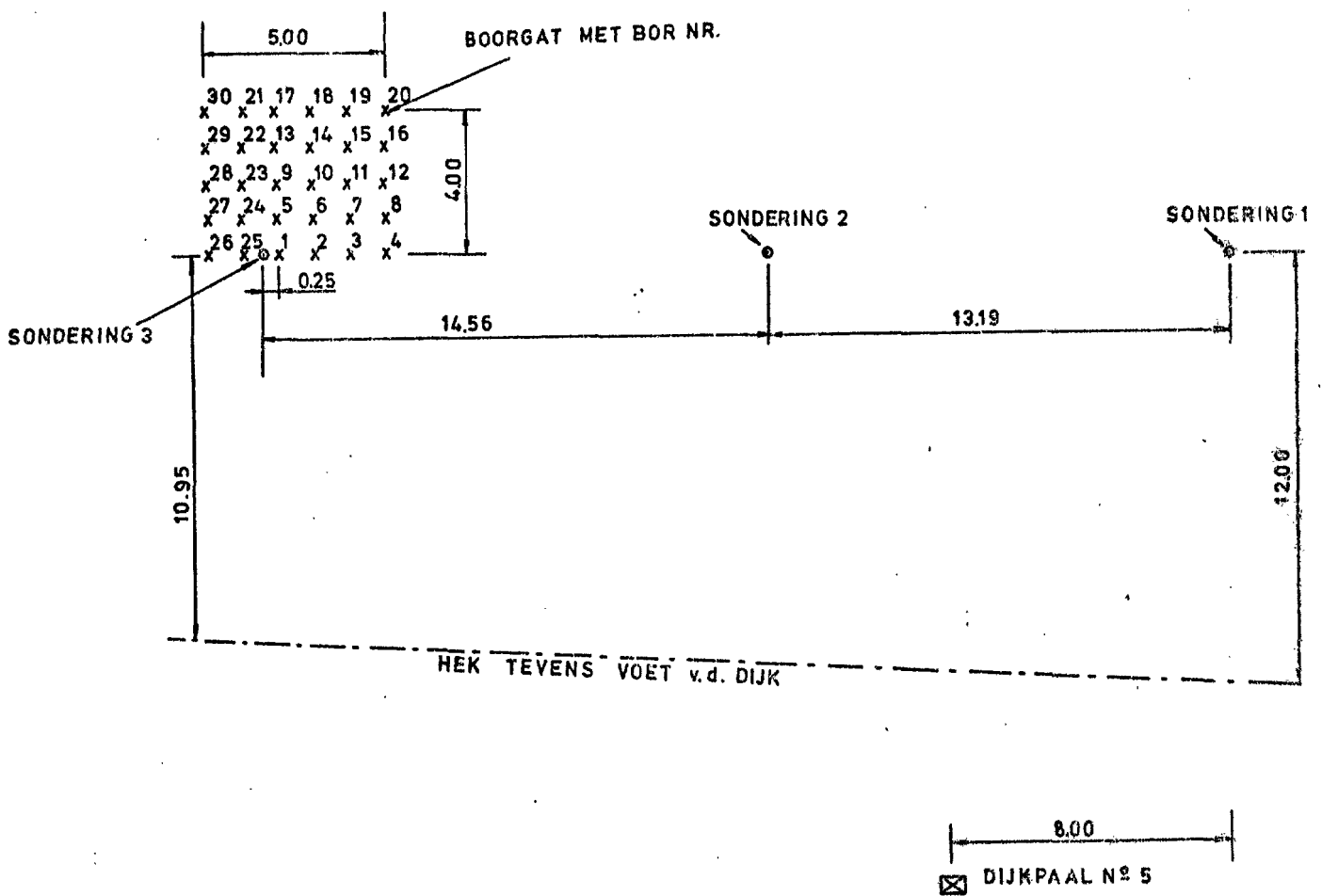


## 2. Betuwe-klei monsters

Op het betreffende terrein bij Arnhem werden, binnen een rechthoek van 4 bij 5 m, 30 boringen gemaakt (zie situatieschets van figuur 1).

De monsters voor de beproeving zijn hieruit genomen op de volgende niveaus: 1,0 - 1,3 m; 1,3 - 1,6 m; 1,6 - 1,9 m.

De monsters zijn genummerd: 209 t/m 298.

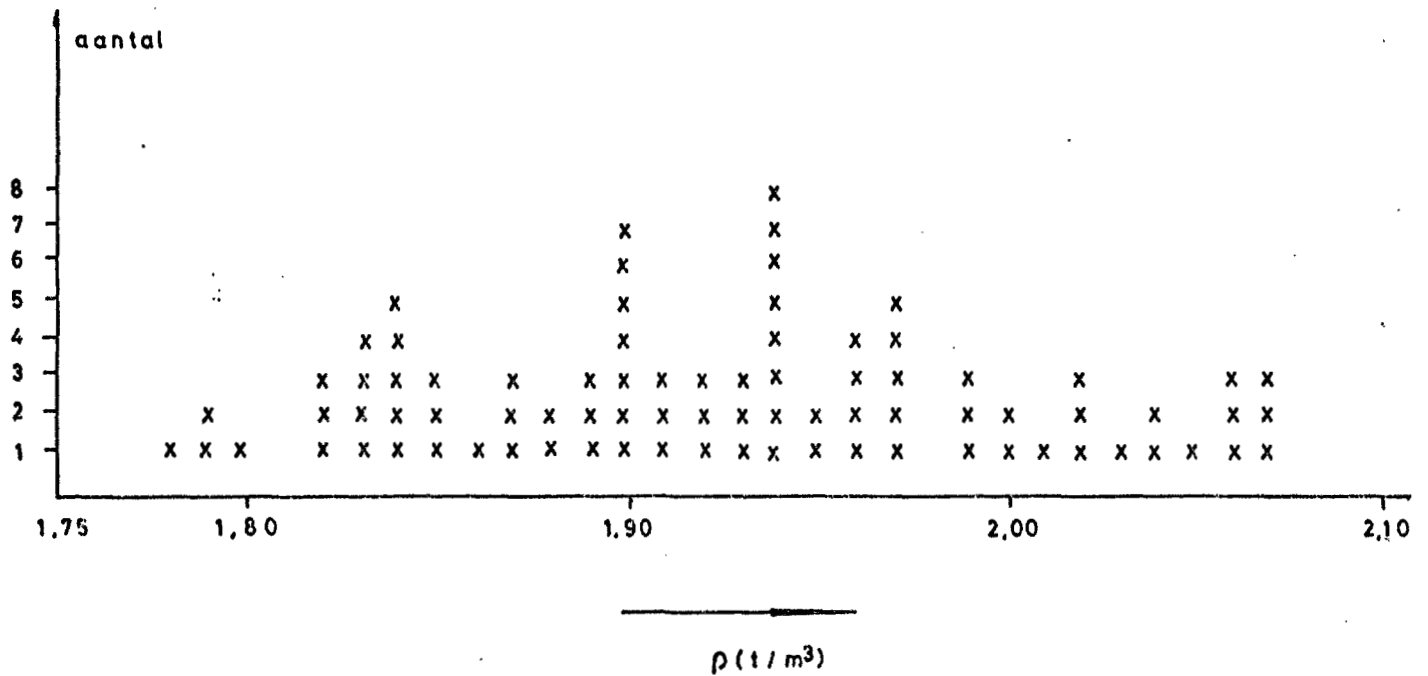


Figuur 1. Situatie boringen bij Arnhem (Betuwe-klei)



In het terrein werd van de monsters een ruwe bepaling van de natte volumieke massa gedaan.

De resultaten hiervan zijn in figuur 2 samengevat.



Figuur 2. Natte dichtheid van de monsters, gemeten in het terrein

In het laboratorium werden op een aantal willekeurig gekozen monsters verschillende bepalingen gedaan. De resultaten zijn in tabel 2.1. samengevat. Hieruit blijkt dat er wel dichtheidsverschillen en verschillen in schuifsterkte ( $c_u$ ) zijn. Deze verschillen liggen echter binnen de normaal verwachte spreidingen en gaven geen aanleiding een andere plaats op te zoeken.

Bovendien zouden de monsters vóór de beproeving worden aangepast bij isotrope spanningen van 30 en 50 kN/m<sup>2</sup>.



Tabel 2.1.: resultaten laboratoriumproeven op willekeurige  
monsters Betuwe-klei

monster nr.	natte volumieke massa (t/m <sup>3</sup> )	droge vol. massa (t/m <sup>3</sup> )	water- gehalte %	verzadi- gings- graad %	cohesie c <sub>u</sub> kN/m <sup>2</sup>	diepte m ÷ mv
210	1,74	1,22	42,0	95,3		1,35
215	1,91	1,47	30,4	100,0		1,10
216	1,77	1,22	45,4	100,0		1,30
220	1,90	1,44	32,4	100,0	22	1,75
237	1,81	1,30	39,1	99,8	54	1,45
238	1,88	1,43	31,0	97,1	41	1,75
239	1,81	1,31	37,8	98,2	36	1,15
241	1,92	1,45	32,4	100,0	44	1,75
245					40	1,15
265	1,93	1,48	30,2	100,0		1,75
269	1,84	1,34	37,7	100,0	41	1,15
273	1,76	1,25	41,0	97,0	49	1,45



### 3. Triaxiaalproeven

Omdat deze proeven werden uitgevoerd ter toetsing van de resultaten op de kunstmatig gemaakte kleimonsters werd het aantal proeven per soort beproevingsmethode beperkt.

Als aanvulling werd een serie langzame ongedraineerde triaxiaalproeven uitgevoerd met gladde eindvlakken (de zogenaamde TLOG-proeven).

Alle monsters voor de proefnemingen werden voorgeconsolideerd bij een alzijdige celspanning van respectievelijk  $30 \text{ kN/m}^2$  en  $50 \text{ kN/m}^2$ .

Achtereenvolgens zullen de resultaten worden besproken van de volgende soorten triaxiaalproeven:

TSO -proeven: snelle ongedraineerde triaxiaalproeven bij een vervormingssnelheid van  $\dot{\Delta z} = 1,5 \text{ mm/min}$ .

TLO -proeven: langzame ongedraineerde triaxiaalproeven bij een vervormingssnelheid van  $\dot{\Delta z} = 0,15 \text{ mm/min}$ .

TLOG-proeven: langzame ongedraineerde triaxiaalproeven met gladde eindvlakken, bij een vervormingssnelheid van  $\dot{\Delta z} = 0,15 \text{ mm/min}$ .

TZLO-proeven: zeer langzame ongedraineerde triaxiaalproeven bij een vervormingssnelheid van  $\dot{\Delta z} = 0,015 \text{ mm/min}$ .

TLD -proeven: langzame gedraineerde triaxiaalproeven bij een vervormingssnelheid van  $\dot{\Delta z} = 0,0006 \text{ mm/min}$ .

Voor de beschrijving van de triaxiaalproeven wordt verwezen naar hoofdstuk 4 van rapport 230640-I van december 1977.

#### 3.1. Resultaten van TSO-proeven

In tabel 3.1. zijn de gegevens verzameld van de laboratoriumproeven op de 6 monsters van deze serie proeven:



Tabel 3.1. Gegevens laboratoriumonderzoek monsters TSO-proeven

monster nr.	soort proef	begintoestand		vóór proef			tijdens proef		na proef			
		$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$c_u$ kN/m <sup>2</sup> *)	$\rho_{dr}$ t/m <sup>3</sup>	w %	$S_r$ %	$\epsilon_{vcons}$ %	$B_f$ %	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{dr}$ t/m <sup>3</sup>	w %	$S_r$ %
233	TSO-30	1,71					2,01	92	1,74			
216	30	1,77	47,6	1,30/1,22	35,4/45,4	92/103	0,93	89	1,81	1,27	42,5	103
220	30	1,90	22,2	1,44	32,4	101	1,66	100	1,94	1,48	31,0	104
261	50	1,80	35,5	1,35	33,4	92	0,23	91	1,84	1,37	35,4	101
265	50	1,93	-	1,48	30,2	101	1,60	96	1,97	1,51	30,3	107
237	50	1,81	54	1,30	39,1	100	1,72	96	1,85	1,31	40,7	105

\*) laboratorium vane-proef

De meetresultaten van deze TSO-triaxiaalproeven zijn uitgezet op de bijlagen 1 t/m 6.

Bij vergelijking met de resultaten van de TSO-proeven op kunstmatige klei valt op dat bij de proeven op natuurlijke Betuwe-klei de waterspanning  $u$  bij een  $\epsilon_z = 1 - 2\%$  de maximale waarde bereikte, terwijl bij de kunstmatige klei de waterspanning in het monster bij toenemende vervorming bleef toenemen.

Bij enkele monsters Betuwe-klei wordt de maximale deviatorspanning  $\sigma_d$  pas bereikt bij zeer grote vervormingen. De waterspanning neemt daarbij in het traject van  $2\% < \epsilon_z < 10\%$  af.

In een enkel geval, zoals bij monster 220, is deze afname erg groot. Dit zou kunnen wijzen op een zekere mate van overconsolidatie van de monsters.

In tabel 3.2. zijn de resultaten van de TSO-proeven samengevat. Hierin zijn de p- en q-waarden opgenomen bij zowel de maximale deviatorspanning  $\sigma_v - \sigma_H$  als bij de maximale waarden van de inhouding van de korrelspanningen in het monster  $\sigma'_v/\sigma'_H$ , ook wel aangeduid als 1/K. De verschillen zijn overigens onbeduidend.



Tabel 3.2. Resultaten TSO-proeven op Betuweklei

mon- ster nr.	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>		u kN/m <sup>2</sup>		bij $\tau_{max}$		bij $(1/K)_{max}$		cons. kN/m <sup>2</sup>	opmerkingen
		$\tau_{max}$	$(1/K)_{max}$	bij $\tau_{max}$	bij $1/K_{max}$	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>		
233	28,8	26,5	25,0	16,5	17,0	38,5	26,5	36,5	25,0	30	
216	32,0	31,7	28,0	16,2	19,5	47,5	31,7	40,5	28,0	30	
220	30,0	43,0	36,2	4,0	17,0	69,0	43,0	49,2	36,2	30	$\epsilon=14\%$ bij $\tau_{max}$
261	53,3	46,0	46,0	27,2	27,2	72,1	46,0	72,1	46	50	
265	44,0	53,0	41,0	11,0	23,5	86,0	53,0	61,5	41	50	$\epsilon=14\%$ bij $\tau_{max}$
266	48,0	44,7	44,7	28,5	28,5	64,2	44,7	64,2	44,7	50	

Het verband tussen q en p wordt weergegeven door de volgende formule:

$$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$$

Uit de regressie van q op p volgt nu:

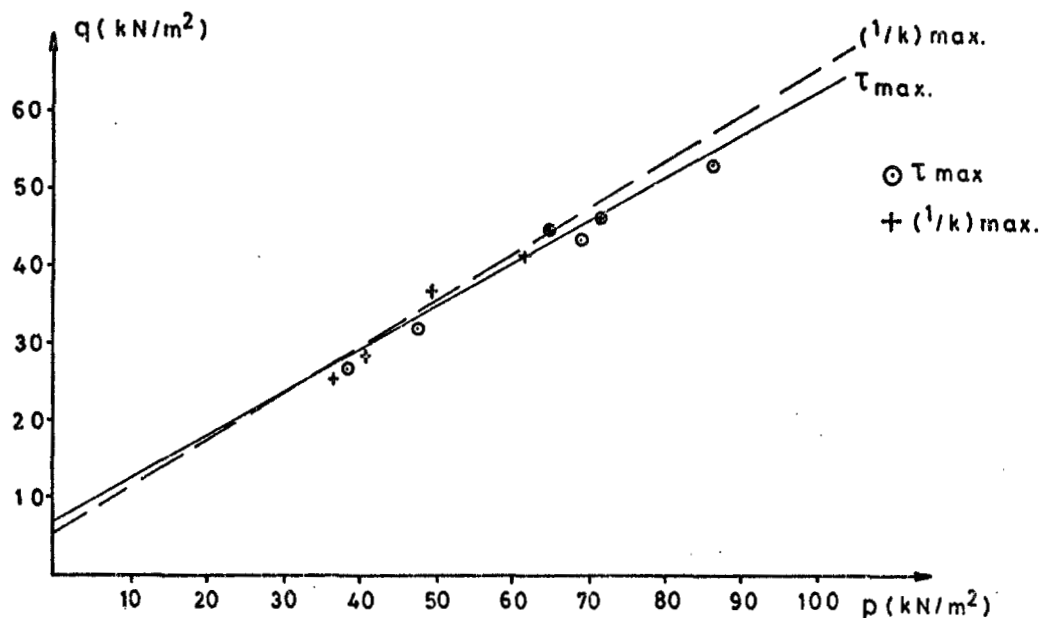
voor  $\tau_{max}$ :

$$\phi' = 34^{\circ} \quad \text{en } c' = 6,6 \text{ kN/m}^2$$

voor  $(1/K)_{max}$ :

$$\phi' = 37,4^{\circ} \quad \text{en } c' = 5,1 \text{ kN/m}^2$$

De resultaten van deze proeven zijn uitgezet in de grafiek van figuur 3. Duidelijk is te zien dat de spreiding om de berekende regressielijnen klein is. De correlatie-coëfficiënt is dan ook hoog.



Figuur 3. Resultaten TSO-proeven

### 3.2. Resultaten TLO-proeven

De resultaten van de laboratoriumbepalingen op de serie monsters voor de langzame ongedraineerde triaxiaalproeven zijn weergegeven in tabel 3.3.



Tabel 3.3. Gegevens van de laboratorium bepalingen monsters TLO-proeven

monster nr.	soort proef	begintoestand		vóór de proef			tijdens proef		na de proef			
		$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$c_u$ kN/m <sup>2</sup>	$\rho_{dr}$ t/m <sup>3</sup>	w %	$S_r$ %	$\epsilon_{vcons}$ %	$B_f$ %	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{dr}$ t/m <sup>3</sup>	w %	$S_r$ %
239	TLO-30	1,81	35,5	1,31	37,8	98	1,11	87	1,84	1,34	37,0	100
259	30	1,89	-	-	-	-	0,84	95	1,92	1,45	32,3	103
231	30	1,80	-	-	-	-	0,56	76	1,82	1,29	40,8	103
241	30	1,92	44,0	1,45	32,4	103	0,49	100	1,93	1,48	30,1	101
269	30	1,84	40,2	1,34	37,7	101	1,48	90	1,89	1,40	34,9	103
286	30	1,88	51,0	1,39	34,8	102	1,69	-	1,91	1,43	33,8	105
218	30	1,85	41,7	1,37	31,3	89	1,43	96	1,84	-	-	-
238	30	1,88	40,2	1,43	31,0	97	0,99	96	1,90	1,46	30,4	99
245	30	1,78	40,0	1,32/1,23	34,8/45,3	91,5/104,0	2,23	96	1,84	1,33	38,4	102
291	50	1,75	46,0	1,25	40,0	95	1,45	99	1,79	-	-	-
279	50	1,74	-	1,23	41,7	95	0,71	86	1,75	1,24	41,7	97
254	50	1,74	-	1,29	35,0	88	1,67	-	1,79	1,28	39,4	98

De meetresultaten van de TLO-triaxiaalproeven zijn uitgezet in de grafieken van de bijlagen 7 t/m 18.

Het gedrag van de monsters tijdens deze triaxiaalbeproeving is in algemene zin hetzelfde als van de monsters bij de TSO-proeven. De waterspanning neemt bij voortgaande vervorming af: een aanwijzing dat de monsters overgeconsolideerd zijn.

In tabel 3.4. zijn de resultaten van de TLO-proeven samengevat. Hierbij zijn zowel de  $p$ - als de  $q$ -waarde gegeven bij de maximale  $\tau_{max}$  - en  $1/K$ -waarden.





Tabel 3.4. Resultaten TLO-proeven op Betuweklei

mon- ster nr.	$H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>		$u$ kN/m <sup>2</sup>		bij $\tau_{\max}$		bij $(1/K)_{\max}$		cons. kN/m <sup>2</sup>	opmerkingen
		$\tau_{\max}$	$(1/K)_{\max}$	bij $\tau_{\max}$	bij $(1/K)_{\max}$	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>		
239	30,0	32,0	32,0	13,7	13,7	48,3	32,0	48,3	32,0	30	
259	18,8	29,5	18,0	2,0	10,7	56,3	29,5	26,1	18,0	30	
231	26,0	30,5	25,0	5,0	11,0	51,5	30,5	40,0	25,0	30	
241	18,4	37,0	19,0	-7,0	10,0	62,4	37,0	27,4	19,0	30	
269	30,0	34,5	30,0	7,0	15,0	57,5	34,5	45,0	30,0	30	
286	34,4	37,0	30,0	9,5	19,0	61,9	37,0	45,4	30,0	30	
218	32,0	40,0	32,0	10,0	18,0	62,0	40,0	46,0	32,0	30	
238	32,0	46,0	37,0	-4,0	10,0	82,0	46,0	59,0	37,0	30	
245	32,0	33,5	32,5	7,0	11,5	58,5	33,5	53,0	32,5	30	
291	41,2	33,5	33,5	18,5	18,5	56,2	33,5	56,2	33,5	50	
279	43,2	36,0	32,0	19,5	23,5	59,7	36,0	51,7	32,0	50	
254	66,8	46,5	43,5	25,0	28,3	88,3	46,5	32,1	45,0	50	

Uit de regressie van  $q$  op  $p$  volgt:

voor  $\tau_{\max}$ :

$$\phi' = 26,0^{\circ} \quad \text{en} \quad c' = 10,1 \text{ kN/m}^2$$

voor  $(1/K)_{\max}$ :

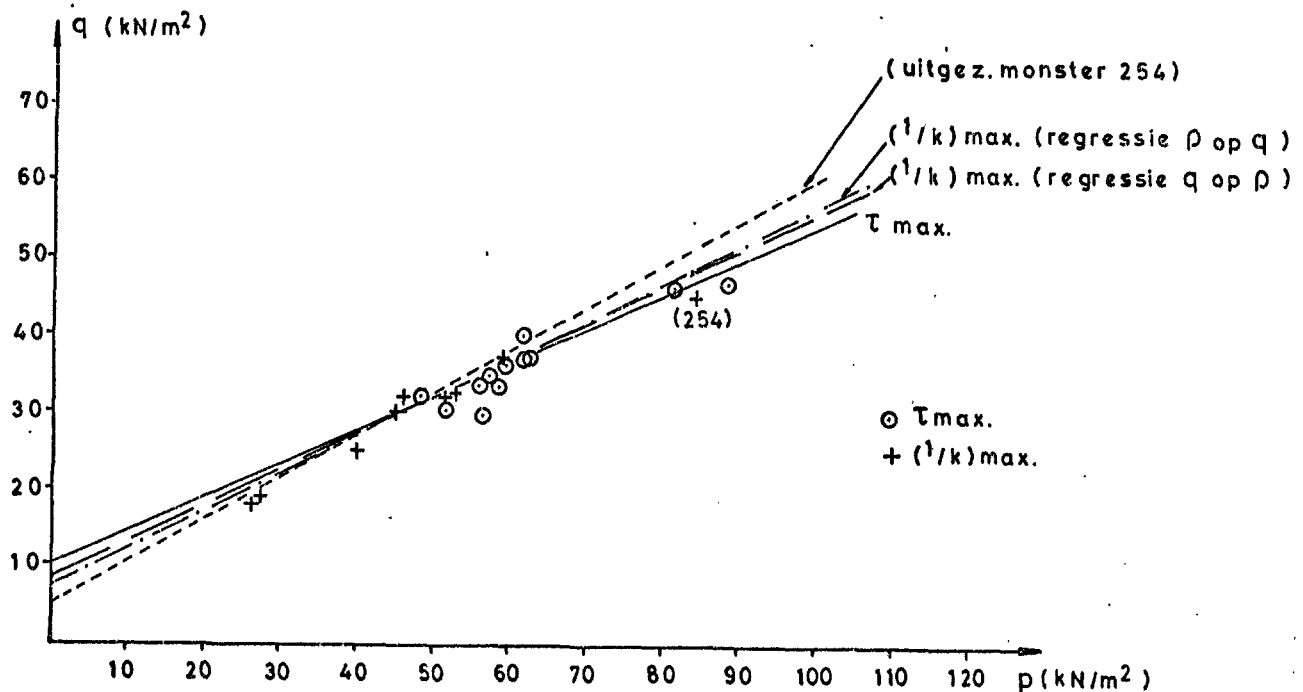
$$\phi' = 27,9^{\circ} \quad \text{en} \quad c' = 8,8 \text{ kN/m}^2$$

In figuur 4 zijn de resultaten in een  $p$ - $q$  diagram uitgezet. Hieruit valt duidelijk af te lezen dat de spreiding in dit geval wat groter is dan bij de TSO-proeven.

Het valt ook op dat de spreiding rond de lijn voor  $(1/K)_{\max}$  (punten +) minder groot is dan rond de  $\tau_{\max}$  lijn (punten  $\odot$ ).

Wordt het resultaat van proef 254 buiten beschouwing gelaten dan wordt uit de regressie op de  $(1/K)_{\max}$ -punten gevonden:

$$\phi' = 33,6^{\circ} \quad \text{en} \quad c' = 5,0 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 4. Resultaten TLO-proeven

### 3.3. Resultaten TLOG-proeven

Zoals reeds werd opgemerkt, zijn de proeven op de Betuwe-klei uitgebreid met een serie ongedraineerde triaxiaalproeven volgens de TLO-beproevingprocedure, waarbij echter zogenaamde wrijvingsloze eindvlakken werden toegepast. Hierdoor wordt de vervorming tijdens de triaxiaalproef meer uniform over de hoogte van het monster dan in het geval dat door de wrijving bij de eindvlakken de vervorming aan de uiteinden wordt beperkt. Vanzelfsprekend zal hierdoor ook de waterspanning meer uniform over de hoogte van het monster verdeeld blijven.

In tabel 3.5. zijn de gegevens uit de laboratoriumbepalingen voor de TLOG-proeven verzameld.



Tabel 3.5. Gegevens van laboratorium-bepalingen op de monsters voor de TLOG-proeven

Monster nr.	soort proef	begintoestand		gegevens vóór de proef			tijdens de proef		na de proef			
		$C_u$ kN/m <sup>2</sup>	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	$S_r$ %	$\epsilon_v$ , cons %	Bf %	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	$S_r$ %
217	TLOG-30	49,9	1,80	1,29	39,2	99,1	0,3	98	1,81	1,27	42,3	104,1
222	30	-	1,79	1,26	41,4	100,0	0,3	95	1,80	-	-	-
294	30	-	1,77	1,23	43,7	100,0	0,8	95	1,78	1,26	41,4	99,8
262	30	16,0	1,92	1,47	31,0	102,3	0,8	92	1,95	1,48	31,6	106,1
250	30	56,6	1,89	1,44	31,8	99,7	0,99	92	1,92	1,47	30,7	101,0
277	30	60,4	1,92	1,43	34,1	105,8	0,7	91	1,93	1,47	31,5	103,8
211	TLOG-50	40,6	1,84	1,39	33,2	96,3	1,9	88	1,88	1,42	32,7	99,4
282	50	46,4	1,78	1,25	42,4	100,7	0,9	95	1,80	1,27	42,2	102,2
230	50	-	1,80	1,29	39,0	98,2	1,5	95	1,83	1,30	40,8	104,0
287	50	-	-	-	-	-	3,2	76	1,92	1,45	32,4	103,9

De meetresultaten van de TLOG-proeven zijn uitgezet op de bijlagen 19 t/m 28.

Ook in dit geval is het algemene patroon van schuifspanning  $\tau$  en waterspanning  $u$  versus vervorming  $\epsilon_z$  in grote lijnen gelijk aan dat van de hiervoor beschreven TSO- en TLO-proeven.

In tabel 3.6. zijn de resultaten van de TLOG-proeven samengevat.

Ook in dit geval zijn hierin weer de p- en q-waarden opgegeven voor respectievelijk  $\tau_{max}$  en  $(1/K)_{max}$ .



Tabel 3.6. Resultaten TLOG-proeven op Betuwe-klei

Monster nr.	$\sigma_{H1}$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>		$u$ kN/m <sup>2</sup>		bij $\tau_{max}$		bij $(1/K)_{max}$		cons. kN/m <sup>2</sup>	opmerking
		$\tau_{max}$	$(1/K)_{max}$	bij $\tau_{max}$	bij $(1/K)_{max}$	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>		
217	27,8	29,7	28,0	13,5	16,5	44,0	29,7	39,3	28,0	30	
222	31,2	34,0	32,5	14,0	16,5	51,2	34,0	47,2	32,5	30	
294	34,2	32,7	29,5	15,0	20,0	51,9	32,7	43,7	29,5	30	
262	27,6	48,5	37,0	1,5	16,0	74,6	48,5	48,6	37,0	30	
250	29,2	40,0	32,0	4,0	14,0	65,2	40,0	47,2	32,0	30	
277	33,2	43,5	34,2	5,5	17,5	71,2	43,5	49,9	34,2	30	
211	46,6	41,7	38,7	21,0	25,5	67,3	41,7	59,8	38,7	50	
202	48,6	45,5	43,2	21,0	25,5	73,1	45,5	66,3	43,2	50	
230	50,6	42,5	41,0	27,0	28,0	66,1	42,5	63,6	41,0	50	
287	42,6	57,0	51,0	2,5	17,5	97,1	57,0	81,1	51,0	50	

De resultaten uit deze tabel zijn uitgezet in het p-q diagram van figuur 5.

Hieruit blijkt dat de spreiding om de berekende regressielijnen voor de punten  $\tau_{max}$ , respectievelijk  $(1/K)_{max}$  bijzonder klein is.

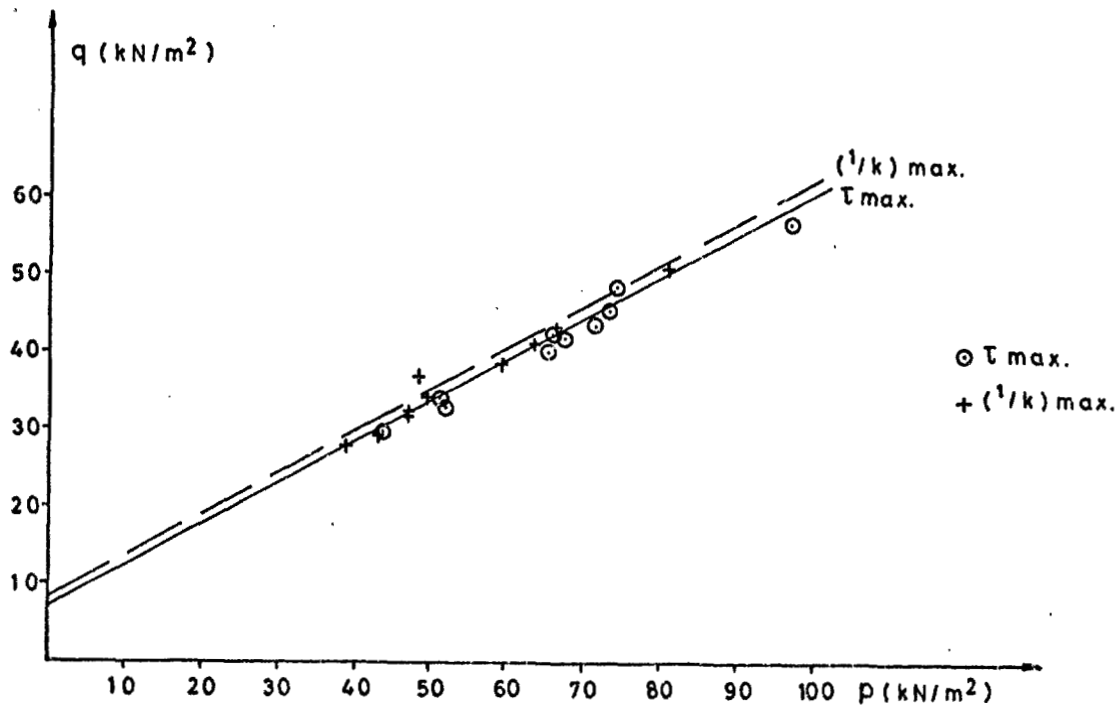
Uit deze regressie werd gevonden:

Voor  $\tau_{max}$ :

$$\phi' = 32,2^{\circ} \quad \text{en } c' = 7,4 \text{ kN/m}^2$$

voor  $(1/K)_{max}$ :

$$\phi' = 32,6^{\circ} \quad \text{en } c' = 8,6 \text{ kN/m}^2$$



Figuur 5. Resultaten TLOG-proeven

#### 3.4. Resultaten TZLO-proeven

Bij deze serie ongedraineerde triaxiaalproeven werd een vervormingssnelheid toegepast van 0,015 mm/min.

Voor het bereiken van een verticale vervorming  $\epsilon_z$  van ca 10% is de benodigde beproevingsduur dus ongeveer 16 uur.

In tabel 3.7. zijn de gegevens uit de verschillende laboratoriumbepalingen op de monsters voor deze serie TZLO-proeven verzameld.



Tabel 3.7. Laboratoriumbepalingen op monsters voor de TZLO-proeven

Monster nr.	soort proef	begin-toestand		gegevens vóór de proef			tijdens de proef		gegevens na de proef			
		Cu kN/m <sup>2</sup>	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	S <sub>r</sub> %	EV <sub>cons</sub> %	B <sub>f</sub> %	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	S <sub>r</sub> %
270	TZLO-30	48	1,80	1,28	40,3	100	0,7	95	1,81	1,31	38,3	100
225	30	48	1,80	1,28	41,0	101	0,1	94	1,81			
214	30	46	1,90	1,43	32,7	101	0,4	94	1,92	1,46	31,8	103
251	30	45	1,76				1,3	86	1,80	1,29	39,0	98,7
275	30	39	1,76	1,25	40,1	96	1,5	91	1,80	1,30	38,5	98
289	50	41	1,86				2,0	95	1,89	1,42	33,4	101
209	50	35	1,83	1,38	32,9	94	1,8	98	1,87	1,41	32,4	98
260	50	39	1,78	1,26	40,6	98	2,2	91	1,82	1,28	41,6	102
267	50	48	1,77	1,26	41,2	98	1,9	91	1,79	1,27	41,1	100
242	50	36	1,87	1,36	37,3	104	1,6	86	1,88			

De meetresultaten van de triaxiaalproeven zijn uitgezet in de diagrammen van de bijlagen 29 t/m 38.

Ook in dit geval is het algemene beeld van de uitkomsten hetzelfde als van de andere triaxiaalproeven.

Sommige resultaten, vooral van de TZLO-30 kN/m<sup>2</sup> proeven, wijzen wederom naar overgeconsolideerde monsters.

In tabel 3.8. zijn de resultaten samengevat.



Tabel 3.8. Resultaten TZLO-proeven op Betuwe-klei.

mon- ster nr.	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>		$u$ kN/m <sup>2</sup>		bij $\tau_{\max}$		bij $(1/K)_{\max}$		cons. kN/m <sup>2</sup>	opmerking
		$\tau_{\max}$	$(1/K)_{\max}$	bij $\tau_{\max}$	bij $(1/K)_{\max}$	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>		
270	31,2	32,5	30,0	6,0	11,0	57,7	32,5	52,2	30,0	30	
225	39,0	39,0	32,0	2,0	13,0	76,0	39,0	58,0	32,0	30	
214	41,0	47,5	39,0	-1,0	8,5	89,5	47,5	71,5	39,0	30	
251	41,0	29,0	20,0	20,0	20,0	50,0	29,0	50,0	29,0	30	
275	35,2	31,5	29,5	11,5	17,0	55,2	31,5	47,7	29,5	30	
289	39,0	39,5	36,0	13,2	17,0	65,3	39,5	58,0	36,0	50	
209	45,0	42,0	42,0	19,5	19,5	67,5	42,0	67,5	42,0	50	
260	64,0	40,7	40,7	16,2	16,2	88,5	40,7	88,5	40,7	50	
267	60,2	48,0	45,7	9,0	13,0	99,2	48,0	92,9	45,7	50	
242	61,0	57,0	50,7	6,0	15,5	112,0	57,0	96,2	50,7	50	

Uit de regressie-analyse (q op p) volgt:

voor  $\tau_{\max}$ :

$$\phi' = 23,2^{\circ} \quad \text{en} \quad c' = 11,7 \text{ kN/m}^2$$

voor  $(1/K)_{\max}$ :

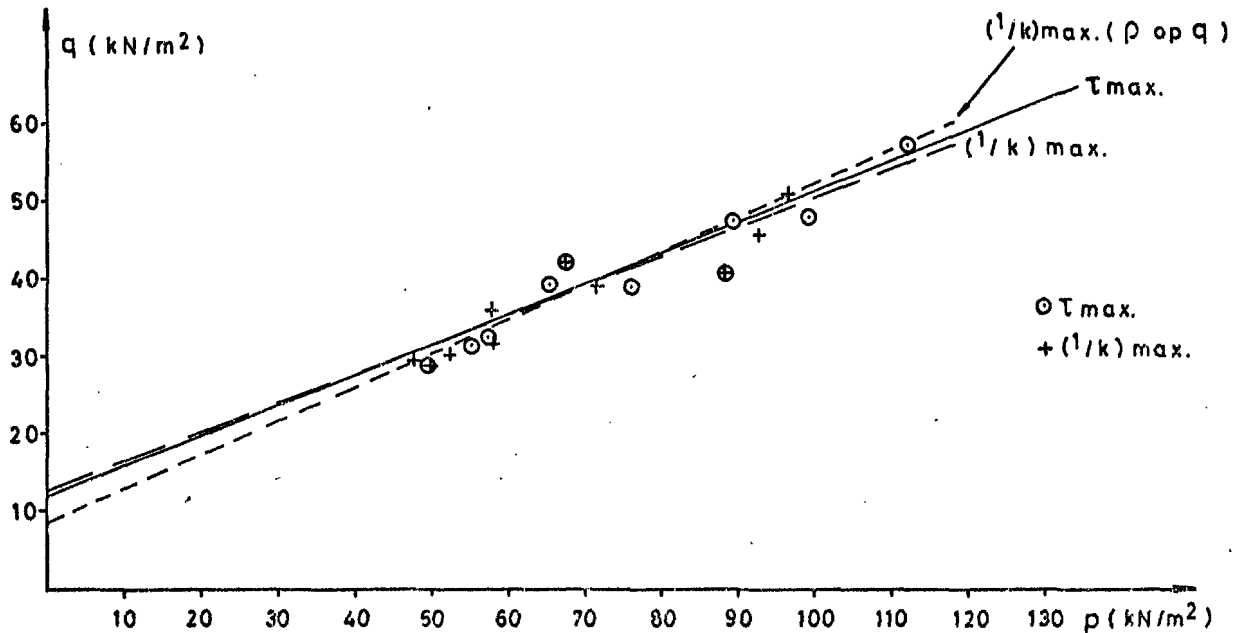
$$\phi' = 22,3^{\circ} \quad \text{en} \quad c' = 12,5 \text{ kN/m}^2$$

Bij de regressie van p op q wordt voor de punten  $(1/K)_{\max}$  gevonden:

$$\phi' = 25,8^{\circ} \quad \text{en} \quad c' = 8,6 \text{ kN/m}^2$$



In figuur 6 zijn de resultaten in een p-q diagram uitgezet.



Figuur 6. Resultaten TZLO-proeven

Ook nu blijkt weer de spreiding van de  $\tau_{\max}$ -punten beduidend groter te zijn dan de spreiding van de  $(1/K)_{\max}$ -punten.

### 3.5. Resultaten TLD-proeven

Op 5 monsters werden gedraineerde triaxiaalproeven uitgevoerd bij dezelfde vervormingssnelheid van 0,0006 mm/min die ook bij de TLD-proeven op de kunstmatig gemaakte monsters werd toegepast.

In tabel 3.9 zijn de gegevens uit de laboratoriumbepalingen op de 5 monsters opgenomen.





Tabel 3.9. Laboratoriumbepalingen op TLD-monster

Monster nr.	soort proef	begin-toestand		gegevens vóór de proef			tijdens de proef		gegevens na de proef			
		$C_u$ kN/m <sup>2</sup>	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	$S_r$ %	$EV_{cons}$ %	$B_f$ %	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	$S_r$ %
228	TLD-30	-	1,80	-	-	-	0,3	86	1,81	1,29	40	100
232	30	-	1,91	-	-	-	2,9	94	1,96	1,51	30	104
236	30	-	1,81	1,30	39	99	1,6	92	1,84	1,32	39	101
246	50	34	1,79	1,26	42	101	2,0	93	1,80	1,28	41	101
296	50	44	1,81	1,29	40	101	3,1	76	1,86	1,38	34	99

De meetresultaten van deze gedraineerde triaxiaalproeven zijn in de diagrammen van de bijlagen 39 t/m 43 uitgezet. Hierbij is, naast het verband  $\tau - \epsilon_z$  ook het verband  $\epsilon_{vol} - \epsilon_z$  gegeven. Uit deze resultaten blijkt dat ook bij de lage waarden van  $\epsilon_z$  geen volume-vergroting optreedt, zoals bij overgeconsolideerde monsters zou worden verwacht.

In tabel 3.10 zijn de resultaten van de TLD-triaxiaalproeven samengevat.

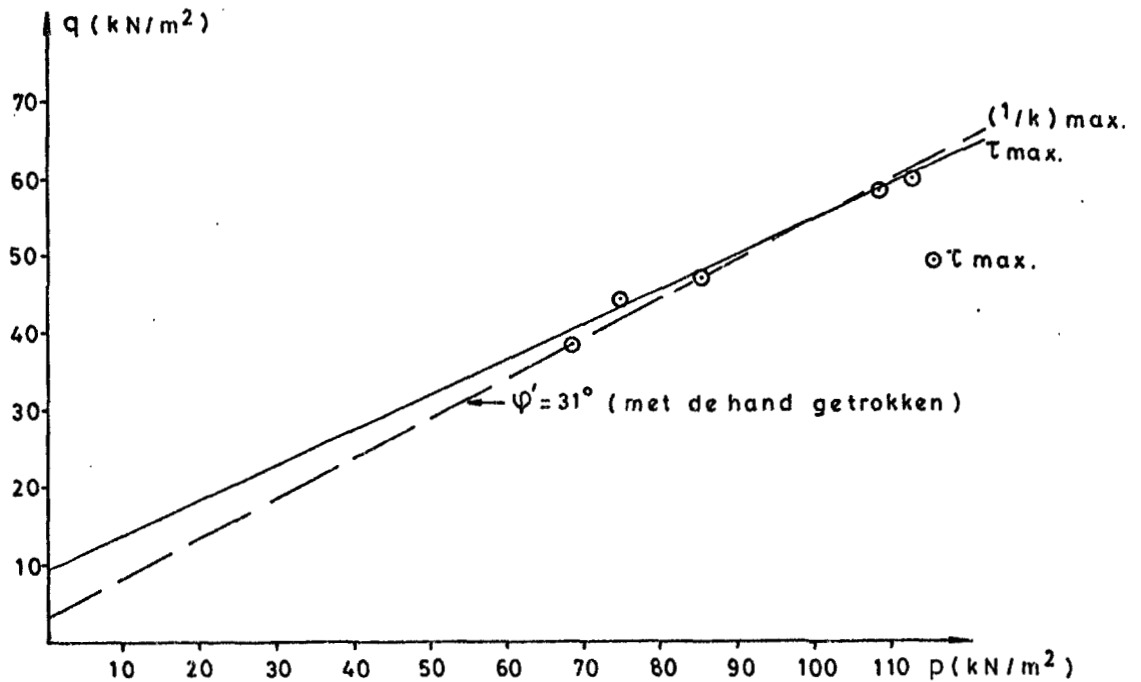
Tabel 3.10. Resultaten TLD-proeven

Monster nr.	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$\gamma$ %	voorcons. kN/m <sup>3</sup>
228	37,6	47,5	85,1	6,5	30
232	30,0	44,5	74,5	10,2	30
236	30,0	38,6	68,6	2,6	30
246	50,0	58,6	108,6	6,9	50
296	53,0	59,8	112,8	13,0	50

Uit de regressie van  $q$  op  $p$  volgt nu:

$$\phi' = 27,2^\circ \quad \text{en} \quad c' = 9,8 \text{ kN/m}^2$$

De resultaten zijn in figuur 7 uitgezet in een  $p$ - $q$  diagram.



Figuur 7. Resultaten TLD-proeven

#### 4. Celproeven

Evenals bij het programma van celproeven op de kunstmatig gemaakte kleimonsters werden ook op de Betuwe-klei de volgende beproevingsprocedures toegepast:

- 1) ééntraps-celproeven, aangeduid met CL-1, waarbij telkend de schuifweerstand van één monster werd bepaald bij een verticale belasting van ongeveer 52 kN/m<sup>2</sup> of 92 kN/m<sup>2</sup>.
- 2) viertraps-celproeven, aangeduid als CL-4 proeven, waarbij telkens een monster werd beproefd bij de verticale belastingen van ca 26 kN/m<sup>2</sup>, 52 kN/m<sup>2</sup>, 88 kN/m<sup>2</sup> en 126 kN/m<sup>2</sup>.

De beproevingsprocedure is beschreven in hoofdstuk 5 van het rapport "Vergelijkend onderzoek Cel- en Triaxiaalproeven op de kunstmatig gemaakte kleimonsters".



#### 4.1. Eentraps-celproeven (CL-1)

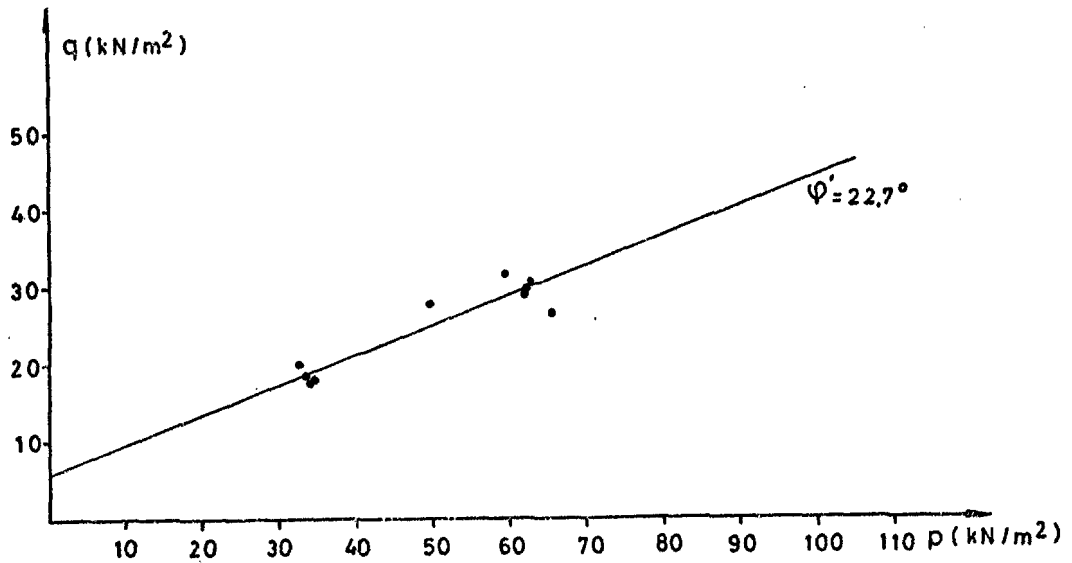
In tabel 4.1 zijn de gegevens van de laboratorium-bepalingen op de monsters voor de CL-1 proeven verzameld.

Tabel 4.1. Laboratoriumbepalingen op CL-1 monsters

mon-ster nr.	soort proef	begin-toestand		gegevens vóór de proef			gegevens na de proef			
		C <sub>u</sub> kN/m <sup>2</sup>	nat t/m <sup>3</sup>	droog t/m <sup>3</sup>	water %	Sr %	nat t/m <sup>3</sup>	droog t/m <sup>3</sup>	water %	Sr %
213	CL-1	52	1,74	1,23	41,5	95	1,74	1,25	38,8	92
221		50	1,79	1,32	35,2	93	1,73	-	-	-
224		54	1,78	1,33	34,0	91	1,81	1,37	32,4	91
234		55	1,73	1,26	37,7	90	1,72	1,24	39,1	91
253		38	1,89	1,44	31,3	99	1,85	1,44	28,1	89
255		44	1,78	1,32	34,9	92	1,81	1,30	39,2	100
264		48	1,76	1,29	36,7	92	1,79	1,27	40,8	100
268		42	1,89	1,45	30,2	97	1,93	-	-	-
274		28	1,85	1,44	28,6	90	1,90	-	-	-
278		39	1,71	1,25	36,7	87	1,76	1,25	41,3	97
284		59	1,77	1,31	35,0	91	1,78	-	-	-
292		42	1,84	1,40	31,1	93	1,88	1,48	27,2	91

De resultaten van de celproeven zijn samengevat in tabel 4.2.





Figuur 8. Resultaten CL-1 proeven

#### 4.2. Viertraps-celproeven (CL-4)

De gegevens van de laboratoriumbepalingen op de monsters van deze serie proeven zijn verzameld in tabel 4.3.

Tabel 4.2. Gegevens van laboratoriumbepalingen op CL-4 monsters

Mon-ster nr.	soort proef	begin-toestand		gegevens vóór de proef			gegevens na de proef			
		$C_u$ kN/m <sup>2</sup>	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	$S_r$ %	$\rho_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	water %	$S_r$ %
219	CL-4	54	1,78	1,25	41,9	100	1,75	1,28	36,3	90
223		53	1,87	1,41	32,4	98	1,87	1,46	28,2	91
227		42	1,77	1,32	34,5	90	1,66	1,22	36,1	82
249		-	1,79	1,36	31,4	88	1,79	1,33	34,7	92
271		42	1,88	1,44	30,9	97	1,93	1,49	29,7	100
293		43	1,78	1,31	35,4	92	1,82	1,36	33,8	94



De resultaten van de celproeven zijn uitgezet in de digrammen van bijlagen 44 t/m 49.

In tabel 4.3 zijn de resultaten in cijfers samengevat.

Tabel 4.3. Resultaten CL-4 proeven

Mon-ster	F <sub>v</sub> kN	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	A <sub>e</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>v</sub> kN/m <sup>2</sup>	σ <sub>H</sub> kN/m <sup>2</sup>	ε <sub>z</sub> %	P kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>	opm.
219	0,100	3576		26,4	5,8	1,3	16,1	10,3	
	0,200			51,7	14,7	2,5	33,2	18,5	
	0,350			88,1	32,4	4,1	60,2	27,9	
	0,500			3733	123,4	50,5	5,6	87,0	36,4
223	0,100	3587		26,0	9,8	0,7	17,9	8,1	
	0,200			51,8	19,3	1,5	35,6	16,2	
	0,350			89,7	35,7	2,8	62,7	27,0	
	0,500			3644	177,0	51,9	3,9	89,5	37,6
227	0,100	3563		26,2	5,0	1,6	15,6	10,6	
	0,200			50,6	13,7	3,0	31,2	18,4	
	0,350			84,8	32,4	4,9	58,6	26,2	
	0,500			3963	117,2	52,5	6,4	84,8	32,4
249	0,100	3566		26,6	6,0	0,9	16,3	10,3	
	0,200			52,5	15,0	1,8	33,8	18,8	
	0,350			90,4	31,5	3,1	61,0	29,5	
	0,500			3621	127,5	49,3	4,3	88,4	39,1
271	0,100	3577		26,7	3,6	1,6	15,2	11,5	
	0,200			52,3	11,9		32,1	20,2	
	0,350			89,5	28,4		58,9	30,6	
	0,500			3634	126,0	41,9		83,9	42,1
293	0,100	3610		26,3	5,0	1,6	15,7	10,7	
	0,200			51,9	13,1	2,7	32,5	19,4	
	0,350			89,1	30,7	4,3	59,9	29,2	
	0,500			3587	125,7	49,1	5,5	87,4	38,3



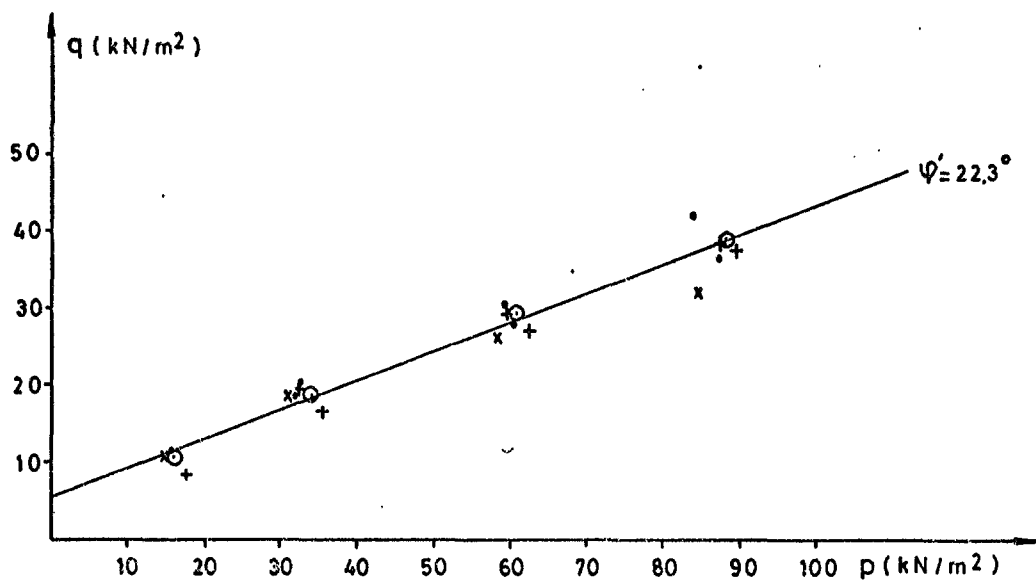
Uit de regressie-analyse op alle p- en q-waarden volgt:

$$\phi' = 22,3^\circ$$

$$c' = 5,49 \text{ kN/m}^2$$

$$r = 0,98$$

In figuur 9 zijn de resultaten in een p-q diagram uitgezet.



Figuur 9. Resultaten CL-4 proeven



### 5. BESPREKING VAN DE RESULTATEN

In tabel 5.1. zijn de uit de verschillende proevenseries berekende schuifweerstandparameters  $c'$  en  $\phi'$  samengevat.

Tabel 5.1. Schuifweerstandparameters uit proevenseries op de Betuwe-klei

type proef	$\phi'$ graden	$c'$ kN/m <sup>2</sup>	correlatie-coëfficiënt	opmerkingen
TSO	34	6,6	0,98	bij $\tau_{\max}$
	37,4	5,1		bij $(1/K)_{\max}$
TLO	26,0	10,1	0,98	bij $\tau_{\max}$
	27,9	8,8	0,98	bij $(1/K)_{\max}$
	33,6	5,0		bij $(1/K)_{\max}$ en zonder monster 254
TLOG	32,2	7,4	0,98	bij $\tau_{\max}$
	32,6	8,6		bij $(1/K)_{\max}$
TZLO	23,2	11,7	0,93	bij $\tau_{\max}$
	22,3	12,7		bij $(1/K)_{\max}$
	25,8	8,6		bij $(1/K)_{\max}$ , regressie p op q
TLD	27,2	9,8	0,99	bij $\tau_{\max}$
CL-1	22,7	6,15	0,94	
CL-4	22,3	5,49	0,98	

Evenals bij de proeven op de kunstmatige kleemonsters blijkt ook nu de spreiding van de resultaten binnen de verschillende beproevingsprocedures betrekkelijk klein te zijn. Dat wil zeggen dat voor de gevonden  $\phi'$ - en  $c'$ -waarden de meetpunten maar kleine afwijkingen vertonen van het verband:

$$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$$





Daarentegen zijn de verschillen tussen de resultaten van de onderzochte beproevingsprocedures groot.

Anders dan bij de kunstmatige kleimonsters nam, na een aanvankelijke toename, de waterspanning bij voortgaande vervorming af. In een aantal gevallen wordt de waterspanning zelfs licht negatief.

Uit het verloop van de volumeverandering  $\epsilon_{vol}$  bij de langzame gedraineerde triaxiaalproeven blijkt overigens dat er gedurende praktisch de gehele fase waarin de deviatorspanning toeneemt een volumeverkleining optrad.

Bij voortgaande verticale vervorming waarbij de deviatorspanning praktisch gelijk blijft, werd een doorgaande volumevergroting gemeten.

Deze verschijnselen wijzen mogelijk op een lichte mate van overgeconsolideerdheid van de Betuwe-klei.

Uit tabel 5.1. blijkt verder dat de TSO-proeven, uitgevoerd bij een vervormingssnelheid van 1,5 mm/min., de hoogste waarde geven voor de hoek van inwendige wrijving  $\phi'$ .

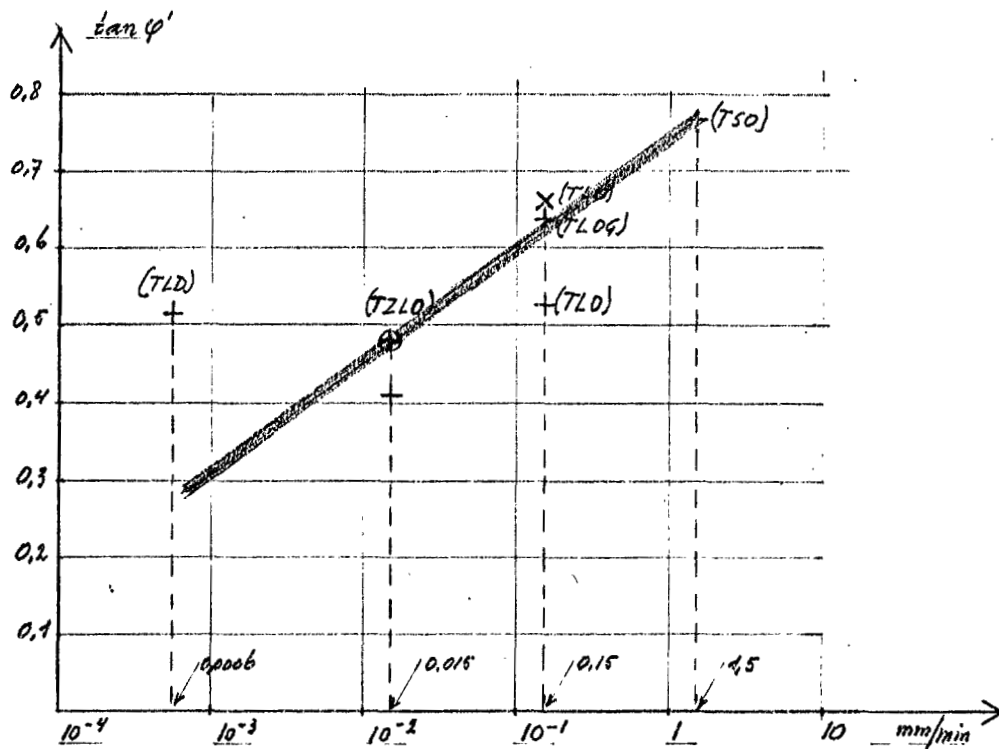
Bij afnemende snelheid neemt ook de waarde van  $\phi'$  af met uitzondering van de zeer langzaam uitgevoerde gedraineerde TLD-proeven.

In figuur 10 zijn de resultaten van de triaxiaalproeven in een grafiek uitgezet die het verband geeft tussen  $\tan \phi'$  en de vervormingssnelheid.

Hierbij zijn de  $\phi'$ -waarden genomen bij de maximale  $1/K$ -waarde. Het verschil tussen de TLOG (gladde eindvlakken) en de TLO-proeven die een gelijke deformatiesnelheid hadden, is wellicht het gevolg van het wat afwijkende resultaat van de proef op monster 254.

Wordt dit buiten beschouwing gelaten dan wordt uit TLO-proefresultaten gevonden dat  $\phi' = 33,6$  ; een resultaat dat nauwelijks afwijkt van de TLOG-proeven. (Zie x in figuur 10).

Bij de TZLO-proeven werd een iets grotere spreiding gevonden dan bij de andere proeven. De regressie p op q geeft in dit geval een resultaat dat een iets hogere  $\phi'$ -waarde oplevert (zie  $\otimes$  in figuur 10).



Figuur 10. Verband tussen vervormingssnelheid en  $\tan \phi'$

Naar aanleiding van de waargenomen trend met betrekking tot de afname van de  $\tan \phi'$  bij afnemende vervormingssnelheid moet worden opgemerkt dat in de literatuur over het algemeen een minder sterke afname wordt vermeld.

De hogere waarde van  $\tan \phi'$  bij de TLD-proeven is te verklaren uit de compressie van het monster tijdens de proef.

De uitkomsten van de 1-traps en 4-traps celproeven leveren een lagere  $\phi$ -waarde op dan die van de triaxiaalproeven. Het verschil ten opzichte van de TLD-proeven is overigens minder uitgesproken dan bij de vergelijkende proeven op kunstmatig gemaakte monsters. Ook in dit geval was de hoekverdraaiing  $\gamma$  bij de "kritieke" spanningstoestand in de celproeven over het algemeen kleiner dan in de triaxiaalproeven. Dit betekent dat de schuifspanning op de schuifvlakken in het monster mogelijk niet volledig tot ontwikkeling is gekomen.



Ten gevolge van de spreiding in de resultaten van de deformatiemetingen van de verschillende monsters voor de gedraaide triaxiaalproeven en de celproeven kan de invloed van dit effect alleen maar globaal worden afgeschat.

Uit een dergelijke globale opvatting blijkt dat uit de resultaten van de TLD-proeven bij de gemiddelde hoekverdraaiing die hoort bij de kritieke spanningstoestanden uit de celproeven wordt gevonden dat:

$$\phi' \approx 24^{\circ}$$

Dit komt de uit de celproeven gevonden  $\phi'$  van ca  $22,5^{\circ}$  redelijk goed nabij.

#### 6. Conclusies en aanbevelingen

Het uitgevoerde vergelijkende onderzoek heeft uitsluitend ten doel gehad om door middel van een redelijk groot aantal triaxiaalproeven en celproeven een goed inzicht te verkrijgen omtrent de mogelijke afwijkingen tussen de resultaten van beide beproevingsprocedures. Dit hield verband met de beoordeling van stabiliteitsanalyse van dijken waarbij, afgezien van de omstandigheid dat verschillende rekenmodellen worden gebruikt, door een aantal adviesbureaus de resultaten van triaxiaalproeven worden toegepast en door anderen, waaronder het LGM, de resultaten van celproeven.

Het is daarbij niet duidelijk welke criteria daarbij worden gehanteerd ten aanzien van de aan te houden stabiliteitsfactoren (veiligheidscoëfficiënten).

Het is duidelijk dat de stabiliteit van een talud in hoge mate afhangt van de schuifweerstandsparementers  $c'$  en  $\phi'$ .



Dit betekent dat de bepaling van deze parameters, en de spreiding ervan, van groot belang is.

Het vergelijkend onderzoek heeft zich beperkt tot middelmatig vaste klei zoals die in de grondslag van de rivierdijken in ons land wordt aangetroffen.

Bij zand speelt de beproevingsprocedure een ondergeschikte rol ten opzichte van andere onzekerheden in de gehele stabiliteitsanalyse. Het werd daarom niet nodig geacht ook zand in het vergelijkend onderzoek te betrekken.

Veen is voorlopig ook buiten beschouwing gebleven. Dit materiaal vereist een totaal andere aanpak in verband met de gecompliceerde en vaak sterk anisotrope structuur en de chemische proeven die erin plaatsvinden.

Het gangbare fysische model voor het schuifweerstandsgedrag van klei wijkt in principe niet af van dat van een loskorrelig materiaal als zand.

Uit de grote veelheid aan figuren die in de literatuur over de praktische grondmechanica zijn te vinden, blijkt dit fysische model goed te kunnen worden beschreven door de formule van Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

waarin  $c'$  over het algemeen een lage waarde heeft.

Hierbij moet wel worden opgemerkt dat bij sterk lutumhoudende klei ( $< 0,002$  mm) ten gevolge van de waterhuidjes rond de korrels, het gedrag enigszins visceus is. Dat wil zeggen dat de schuifweerstand dan mede afhankelijke is van de vervormingssnelheidsgradient.



Voor een isotrope klei is de drukproef op een cilindrisch monster bij uitstek geschikt om de schuifweerstandsparementers  $\phi'$  en  $c'$  te bepalen.

Bij een dergelijke proef is de spanningsverdeling en de vervorming axiaal-symmetrisch.

In principe kan deze drukproef op 2 manieren worden uitgevoerd:

a) het cilindrisch monster wordt door middel van een pers met een constante snelheid in verticale zin gedeformeerd, waarbij continu de uitgeoefende druk wordt gemeten.

Het monster wordt daartoe in een cel geplaatst die geheel of gedeeltelijk met water is gevuld. In deze cel wordt een bepaalde druk gehandhaafd die alzijdig op het monster werkt.

De proef wordt voortgezet tot bij voortgaande vervorming geen verdere toename van de verticale druk optreedt.

Deze proef wordt internationaal aangeduid als triaxiaalproef.

b) Het cilindrische monster wordt in een afgesloten, met water gevulde cel geplaatst. De constructie is zodanig dat het water alleen zijdelingse steun geeft aan het monster. Daarna wordt op het monster een verticale belasting aangebracht, welke gedurende een bepaalde tijd wordt gehandhaafd. Omdat het water in de cel de zijdelingse vervorming belemmert, zal zich nu een druk in deze cel ontwikkelen. Door vervolgens water aan de cel te onttrekken, wordt deze steundruk zoveel verminderd totdat de voor evenwicht benodigde minimum steundruk is bereikt. De druk neemt dan niet verder meer af.

Deze beproevingsmethode, aangeduid als celproef, wordt praktisch alleen in ons land toegepast.

Voor de bepaling van  $\phi'$  en  $c'$  met de triaxiaalproef wordt meestal gebruik gemaakt van de zogenaamde geconsolideerde ongedraineerde methode.

Het monster wordt bij een bepaalde alzijdige spanning geconsolideerd. Deze spanning wordt meestal ongeveer gelijk genomen aan de gemiddelde spanning van het monster in de grond.



De drukproef wordt daarna uitgevoerd, waarbij de drainage van het monster wordt afgesloten.

Voor de vaststelling van de effectieve parameters  $\phi'$  en  $c'$  moeten uit de proefresultaten de korrelspanningen kunnen worden afgeleid. Daarom moet tijdens de ongedraineerde proef het verloop van de waterspanning in het monster worden gemeten. Dit gebeurt meestal bij het boven- en ondervlak van de monsters. Ten gevolge van de wrijving van de grond op de oplegvlakken wordt de vervorming van het monster nabij de eindvlakken belemmerd. Als gevolg hiervan is alleen het midden-gedeelte van het monster representatief voor de bezwijktoestand. Het is dus alleen mogelijk om de effectieve schuifweerstandsparementers uit de resultaten te berekenen als de waterspanning in het monster uniform is verdeeld. In het algemeen zal dit alleen het geval zijn als de vervormingen zo langzaam plaats vinden dat een vereffening van de waterspanning in het monster kan plaats vinden. Dit proces van vereffening kan aanzienlijk worden versneld als zijdrainage wordt toegepast.

Bij toepassing van gladde oplegvlakken aan de boven- en onderzijde van het monster zal waterspanningsverdeling nagenoeg uniform over de gehele monsterhoogte zijn. Immers wordt in dit geval ook bij de einden de vervorming niet of nauwelijks belemmerd. Bij deze ongedraineerde proef verandert het volume van het monster niet gedurende de triaxiaalproef. Dit betekent dat er geen verandering van het poriëngehalte van het monster kan optreden.

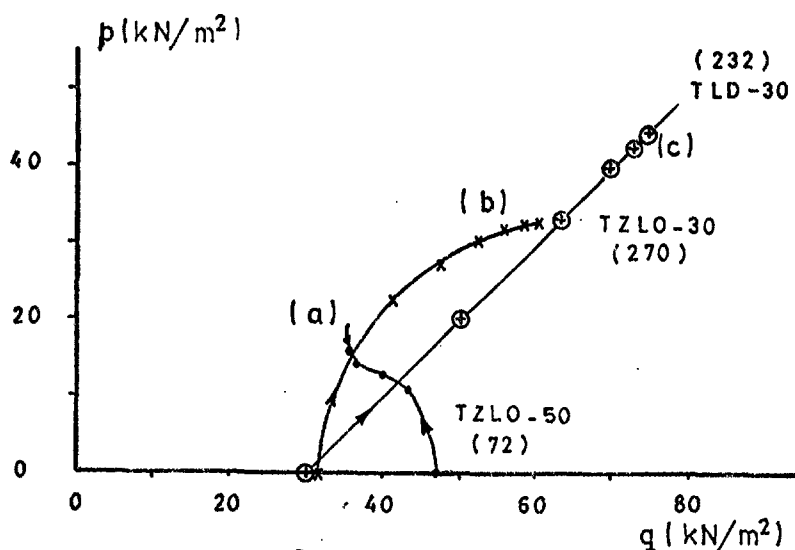
Bij een gedraineerde proef zal wel een verandering van het poriëngehalte en van de structuur optreden. Als gevolg daarvan zullen de schuifweerstandsparementers afgeleid uit een ongedraineerde proef verschillen van die uit een gedraineerde triaxiaalproef.

Bij een ongedraineerde triaxiaalproef op een normaal geconsolideerd monster zal gedurende de gehele belastingsfase, als gevolg van de tendens tot compressie, een toename van de waterspanning optreden.



Overgeconsolideerde monsters vertonen in dat geval een neiging tot volumevergroting (dilatantie). Hierdoor zal, na een geringe waterspanningstoename tijdens het begin van de drukproef, een vermindering van de waterspanning optreden.

In figuur 11 is in een p-q diagram het spanningspad uitgezet voor een ongedraineerde triaxiaalproef op een normaal geconsolideerd monster (nr. 72 uit de eerste serie proeven), een ongedraineerde proef op een overgeconsolideerd monster (nr. 270 uit de tweede serie proeven), en een gedraineerde proef (nr. 232 uit de tweede serie proeven).



Figuur 11 - Verschillende spanningspaden

- (a) normaal geconsolideerd monster
  - (b) overgeconsolideerd monster
  - (c) gedraineerde proef
- } ongedraineerde proef

Celproeven worden altijd gedraineerd uitgevoerd. Het monster moet dus gelegenheid krijgen zich aan te passen aan de belasting. Bij de voor deze proeven gevolgde procedure wordt daarom gewacht tot de zakkingsnelheid minder dan 250  $\mu$ m per 24 uur is geworden.



Pas daarna wordt de druk in de cel verlaagd door het aftappen van enige druppels water, het zogenaamde Mohren.

Het Mohren wordt voorzichtig voortgezet totdat de celdruk, na het sluiten van het aftapkraantje, een stijging vertoont. De horizontale druk die zich dan instelt, wordt dan beschouwd als de kritische waarde voor de bepaling van  $\phi'$  en  $c'$ .

De zijdelingse afmeting van het monster wordt daarbij als het ware vastgehouden; de steunspanning relaxeert naar een soort eindwaarde die behoort bij een zeer lage vervormingssnelheid. Bij deze procedure ondergaat het monster meestal een veel geringere hoekverdraaiing dan bij de triaxiaalproef.

In wezen vertoont de celproef veel overeenkomst met de zeer langzaam uitgevoerde gedraineerde triaxiaalproef. Eventuele verschillen tussen de uitkomsten van beide beproevingsmethoden moeten dan ook worden toegeschreven aan de volgende factoren:

- verschil in vormveranderingssnelheid
- verschil in de totale hoekverdraaiing bij het bereiken van de kritische spanningstoestand

De uitgevoerde vergelijkende proeven, zowel op de kunstmatige klei als op de natuurlijke Betuwe-klei, geven een indicatie dat het gevonden verschil tussen de uit de celproeven en de gedraineerde triaxiaalproeven afgeleide schuifweerstandspaarparameter  $\phi'$  in belangrijke mate kan worden toegeschreven aan het verschil in hoekverdraaiing bij "bezwijken".

Bij de vergelijking van de resultaten van de verschillende onge-draineerde triaxiaalproeven op kleimonsters spelen de volgende factoren een rol:

- afwijkingen van de uniforme waterspanningsverdeling over de hoogte van het monster.





- Het enigszins visceuze gedrag van klei, waardoor de schuifweerstand mede wordt bepaald door de vervormingssnelheidsgradient in het monster gedurende de triaxiaalproef.

Door enkele onderzoekers zijn methoden aangegeven voor de bepaling van de gewenste vervormingssnelheid teneinde een uniforme waterspanning in het monster te verkrijgen.

Over het algemeen worden echter in voorschriften of normen vastgelegde vervormingssnelheden toegepast.

In verband hiermede zijn in het vergelijkend onderzoek ongedraineerde triaxiaalproeven bij een aantal verschillende deformatiesnelheden opgenomen, variërend van 1,5 mm/min tot 0,015 mm/min.

Bij de deformatiesnelheid van 0,015 mm/min duurt de proef ca 16 uur.

De meest gebruikte deformatiesnelheden zijn 1,5 mm/min en 0,15 mm/min, waarbij de snelheid van 1,5 mm/min meestal wordt gebruikt voor de snelle bepaling van de schuifsterkte van het monster in een ongedraineerde triaxiaalproef. De elementaire schuifweerstandsparementers  $c'$  en  $\phi'$  worden daarbij niet bepaald.

Uit de resultaten van de uitgevoerde ongedraineerde triaxiaalproeven op beide kleisoorten zijn de effecten van de niet uniforme waterspanningsverdeling en van de invloed van de vormveranderingssnelheid op de schuifweerstand niet gescheiden waarneembaar. Het is daarom onmogelijk de gevonden verschillen tussen de schuifweerstandsparementers uit de verschillende beproevingsprocedures toe te schrijven aan één van deze effecten.

Uit de ligging van de uitkomst van de proeven met gladde eindvlakken (TLOG) - nagenoeg op de lijn in figuur 10 die het verband tussen  $\tan \phi'$  en vervormingssnelheid aangeeft - zou met enig voorbehoud de conclusie kunnen worden getrokken dat de waterspanningsverdeling redelijk uniform geweest moet zijn bij alle proeven op de Betuweklei. Hierbij moet bovendien worden bedacht dat de aanwezigheid van zijdelingse drainage een snelle nivellering van eventuele waterspanningsverschillen in hoge mate bevordert.



Een andere indicatie in dit verband wordt gevonden uit de extrapolatie van het in figuur 10 aangeduide verband naar de vervormingssnelheid die bij de gedraineerde proef werd toegepast. Dit geeft aan dat het niet onwaarschijnlijk is dat voor een ongedraineerde proef bij dezelfde vervormingssnelheid de waarde  $\tan \phi' \approx 0,3$  zou zijn gevonden.

Dit is dus ongeveer 60% van de  $\tan \phi'$ -waarde gevonden uit de gedraineerde proeven. Uit de gegevens uit de literatuur (Scott) blijkt dat een dergelijk verschil voor normaal geconsolideerde of licht overgeconsolideerde klei normaal is.

Nog een enkele opmerking over de voorconsolidatie van de monsters voor de triaxiaalproeven:

- Deze voorconsolidatie gebeurt in een triaxiaalcel onder alzijdige druk. Daarbij wordt dus geen extra verticale belasting op het monster aangebracht door middel van de stempel. Een nauwkeurige elektrische belastingsopnemer is dus niet nodig.

In verband met het grote aantal te onderzoeken monsters en de beperkte beschikbaarheid van deze elektrische opnemers moet deze loadcel kort voor de triaxiaalbeproeving worden aangebracht. Daartoe moest de consolidatiecel worden geopend, hetgeen vanzelfsprekend een ontlasting van het monster ten gevolge heeft.

Alhoewel een dergelijke handeling enige onzekerheid introduceert, kan toch wel worden gesteld dat het effect van consolidatie-toestand van het monster nauwelijks van invloed is. Het monster zou daarvoor water moeten aanzuigen. In de korte tijd nodig voor de plaatsing van de loadcel is hiervoor nauwelijks gelegenheid.

Bovendien werd bij het herbelasten aan het begin van de triaxiaalproeven rekening gehouden met de mogelijkheid dat de consolidatie-toestand iets kan zijn gewijzigd.

Voor celproeven op voorgeconsolideerde monsters kan ontlasting van het monster niet worden vermeden. Het monster moet uit de consolidatiecel in het celapparaat worden geplaatst.



Overigens is de procedure van de celproef zodanig dat het monster bij de verschillende belastingstrappen gelegenheid krijgt onder een niet isotrope spanningstoestand te consolideren voordat de "kritieke" spanningscombinatie wordt bepaald.

De conclusies uit het onderzoek kunnen als volgt worden samengevat:

- De effectieve schuifweerstandsparementers  $c'$  en  $\phi'$  afgeleid uit triaxiaalproeven kunnen aanzienlijk afwijken van de bij de celproef gevonden waarden. Daarbij geeft de celproef een lagere waarde voor de hoek van inwendige wrijving  $\phi'$ . De verschillen in de cohesie  $c'$  tussen de verschillende proeven zijn minder significant.
- Er is een sterke aanwijzing uit de proefresultaten dat het verschil tussen de resultaten van de gedraineerde triaxiaalproeven (TLD) en de celproeven grotendeels moet worden toegeschreven aan de totale hoekverdraaiing bij bezwijken, die bij de celproef kleiner was dan bij de triaxiaalproeven.
- De resultaten van de ongedraineerde triaxiaalproeven bij verschillende deformatiesnelheden vertonen - vooral bij de Betuwe-klei - tamelijk grote verschillen. Er zijn enige aanwijzingen dat deze verschillen voor het grootste deel moeten worden toegeschreven aan de afhankelijkheid van de schuifweerstand van de vervormingsnelheidsgradient. Dit volgt vooral uit de vergelijking van de resultaten van de TLOG-proeven (gladde eindvlakken) met die van de TLO-proeven.
- Over het algemeen gaven de proeven op de natuurlijke Betuwe-klei meer "homogene" en consistente resultaten dan de proeven op de kunstmatige klei.

Waarschijnlijk houdt dit verband met de minder goede structuur van de met een strengpers vervaardigde kleimonsters.



Het onderzoek leidt verder tot de volgende aanbevelingen:

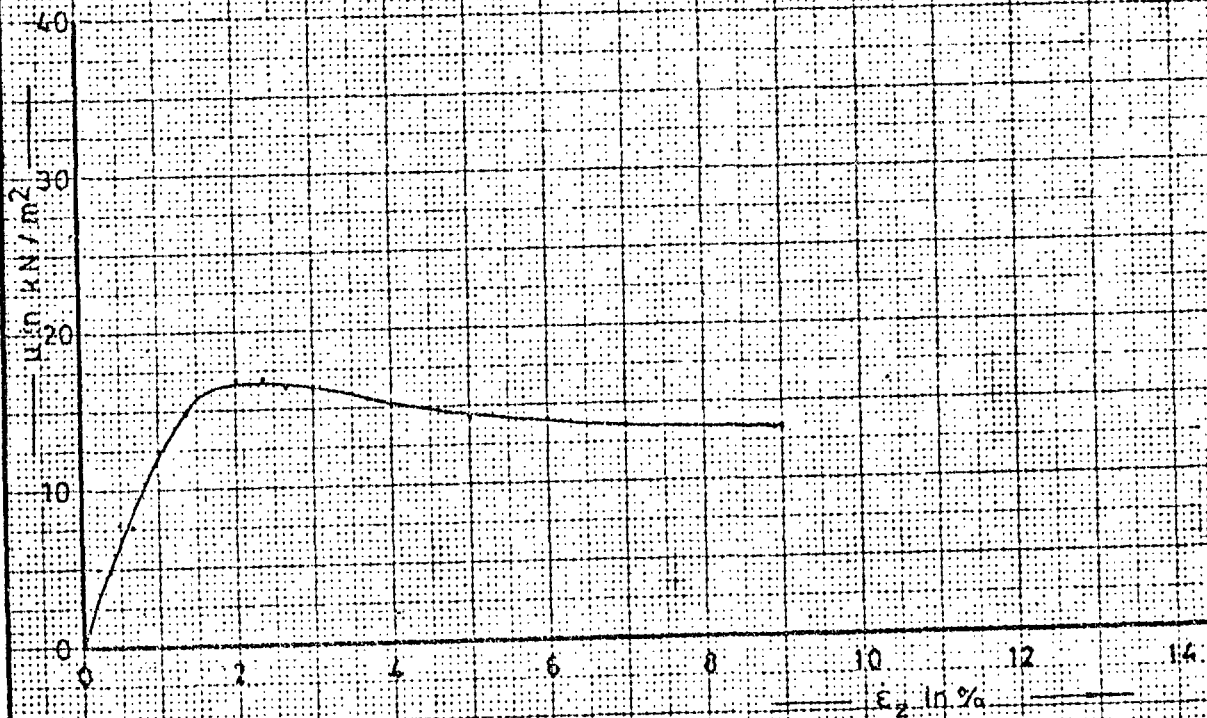
- Een nadere evaluatie van de celproef in verband met de opgewekte vervormingstoestand is gewenst. In dit verband wordt gewezen op het onderzoek van de celproef van Prof. De Josselin de Jong.

De celproef lijkt een bij uitstek praktische proef voor de bepaling van de schuifweerstandseigenschappen bij een zeer geringe vormveranderingssnelheid.

- Het is gewenst om ook de ongedraineerde triaxiaalproef verder te onderzoeken. Met name is het gewenst om zowel het effect van de vormveranderingssnelheid op de schuifweerstand als op de water-spanningsverdeling in het monster te scheiden.

Het doel zou kunnen zijn richtlijnen vast te stellen voor de uitvoering van ongedraineerde triaxiaalproeven.

Bij een en ander moet wel rekening worden gehouden met de praktische bruikbaarheid van de proef, zowel qua kosten als qua uitvoering.



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 56 92 23  
telex 33320 solab nl

1978

get  
Voorl  
gec

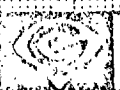
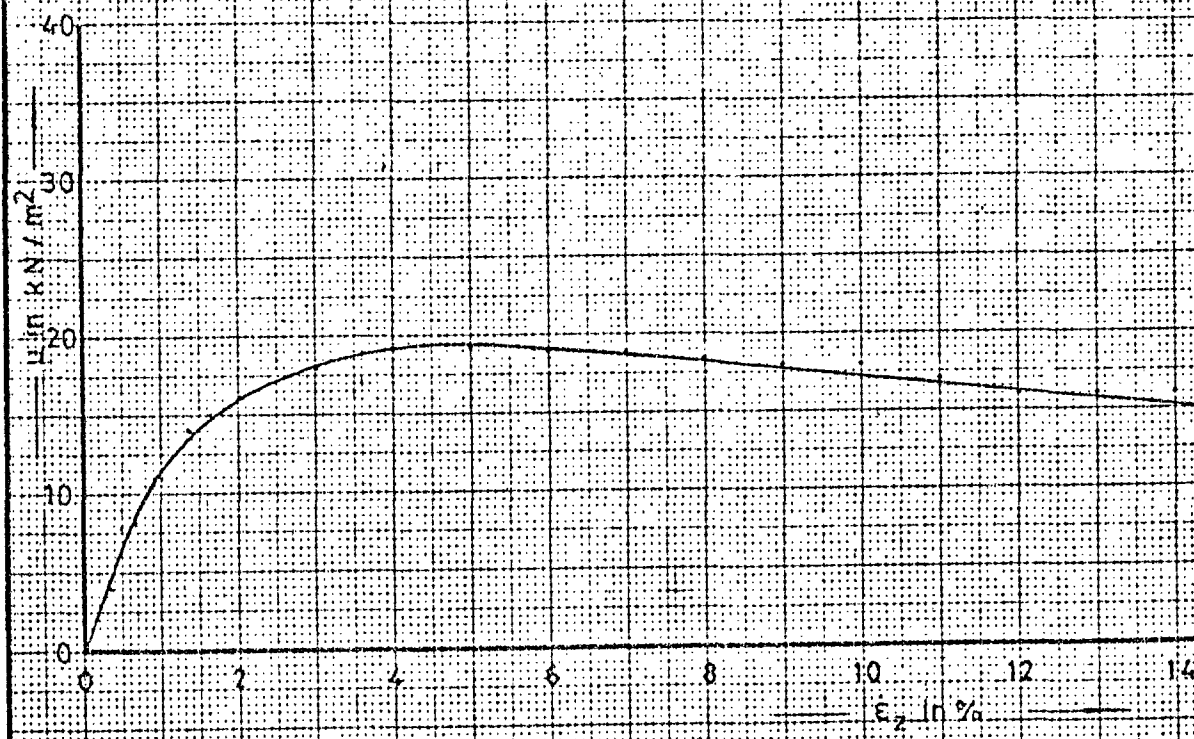
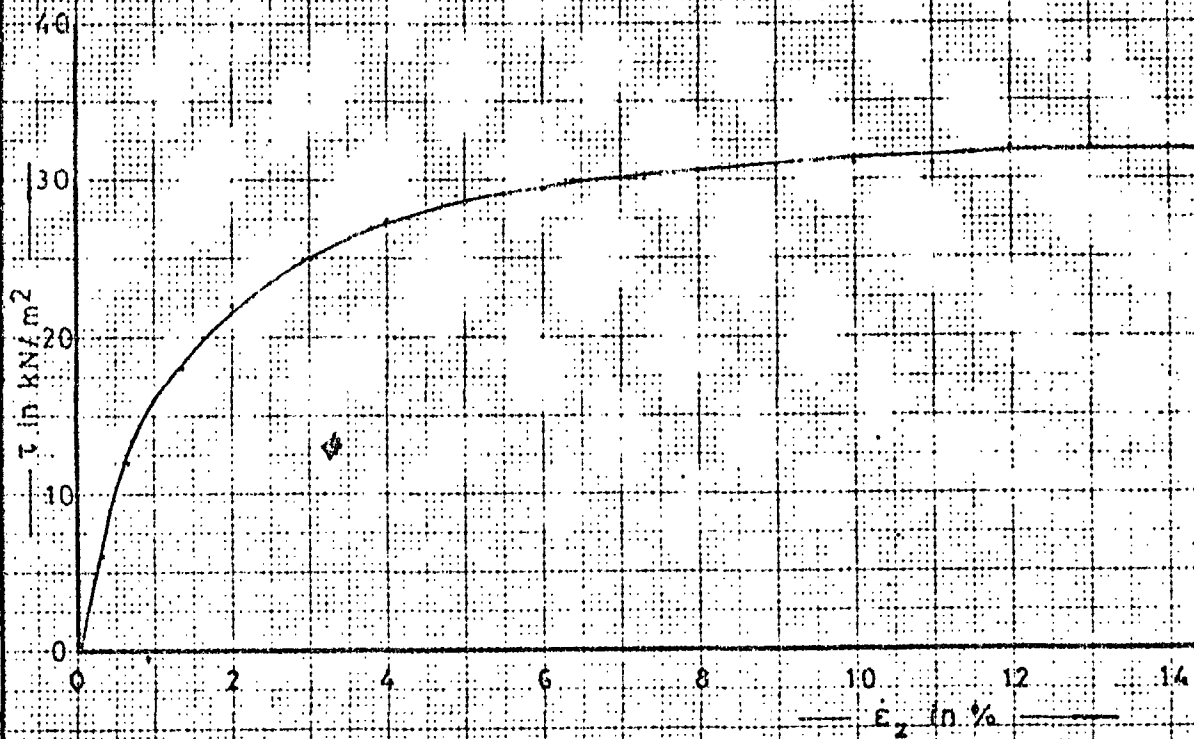
$\dot{\epsilon}_z = 60\% / h$   
 $G = 28,8 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.S.O. 30 monster 233

BIJL. 1

norm  
A<sub>4</sub>



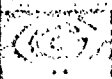
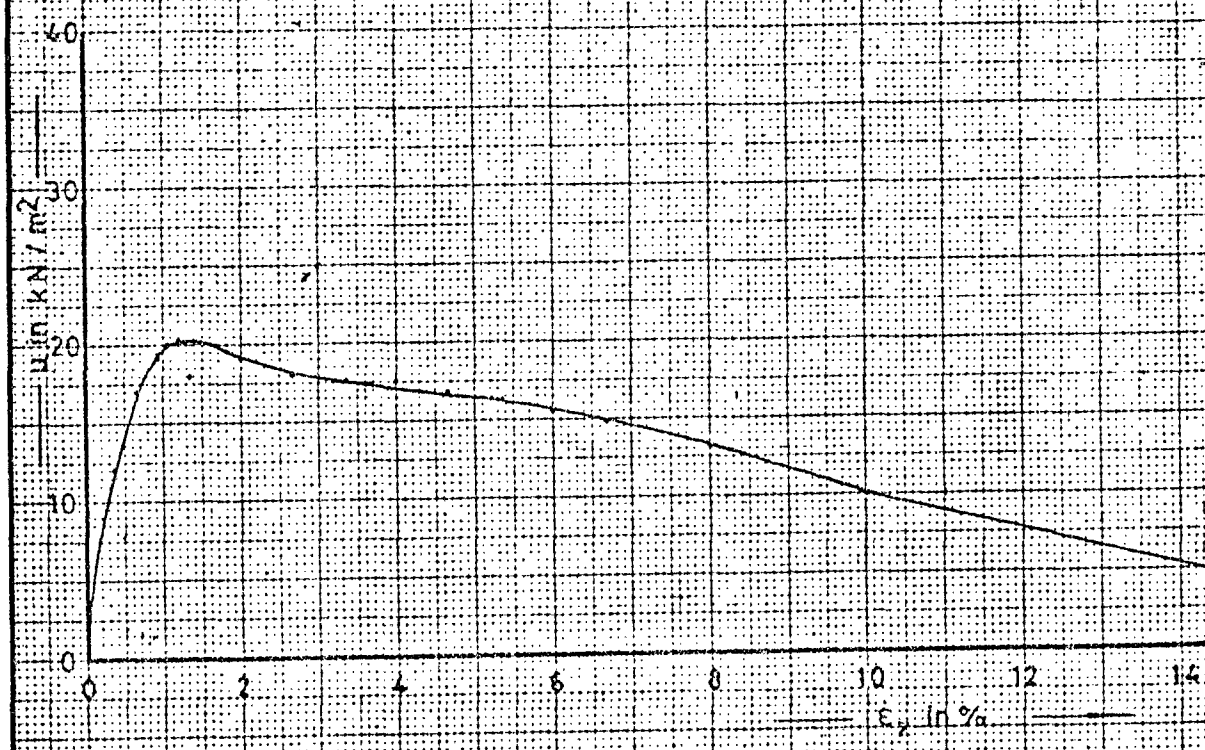
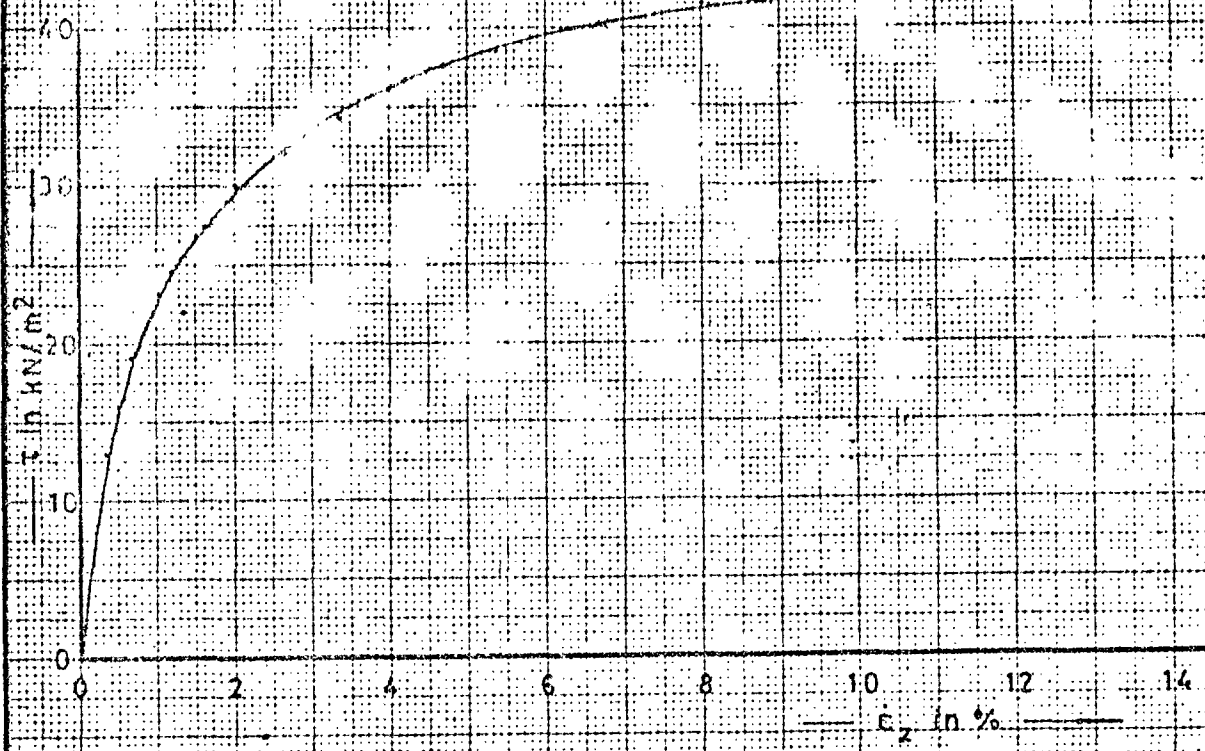
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

1978      *get*  
*van*  
 dec

$\dot{\epsilon}_z = 60\%/h$   
 $\sigma'_v = 320\text{ kN/m}^2$

T.S.O. 30 monster 216

CO-230640  
 BIJL. 2      *norm*  
 A<sub>4</sub>



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 50 92 23

telefax 33326 voldad nl

1978  
get  
vond  
doc

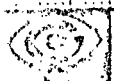
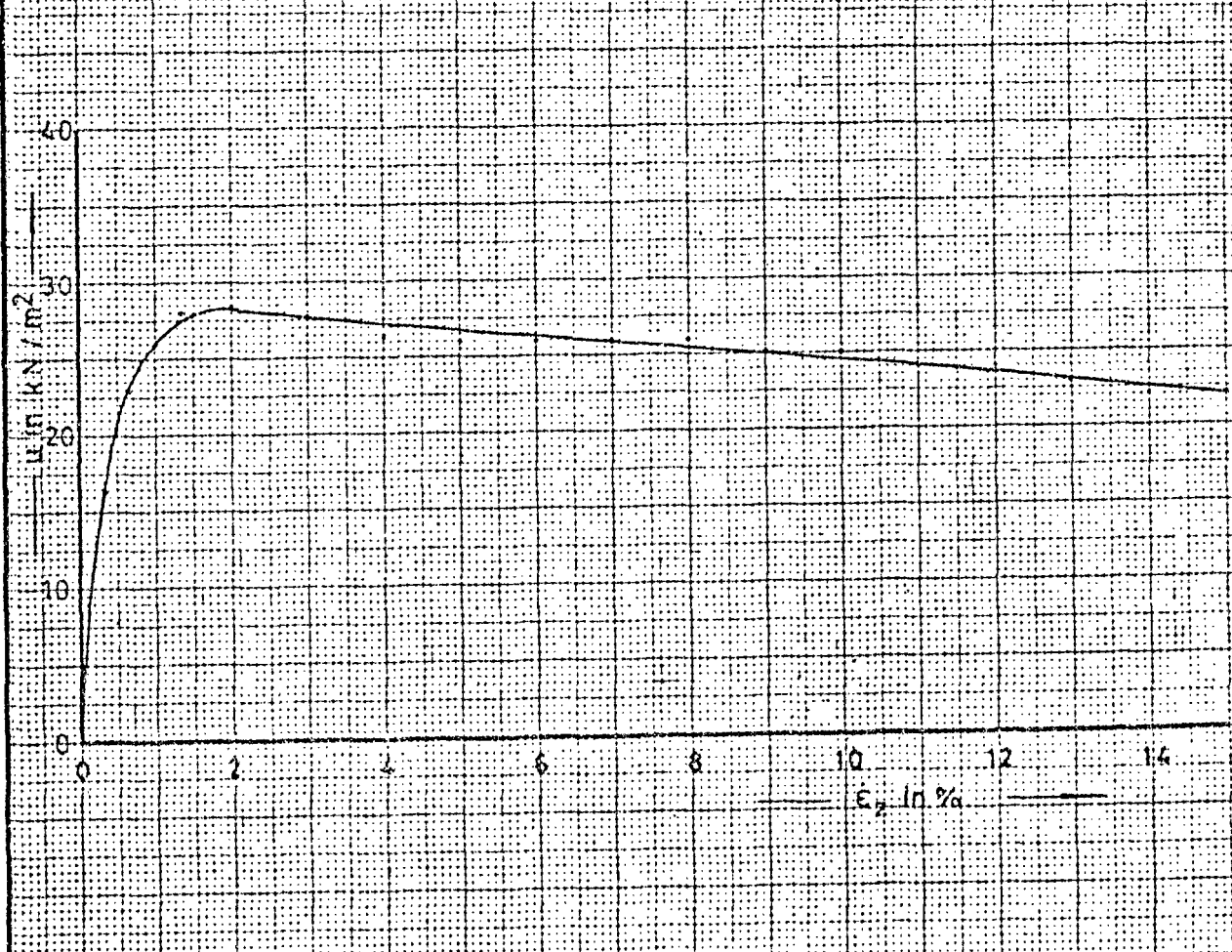
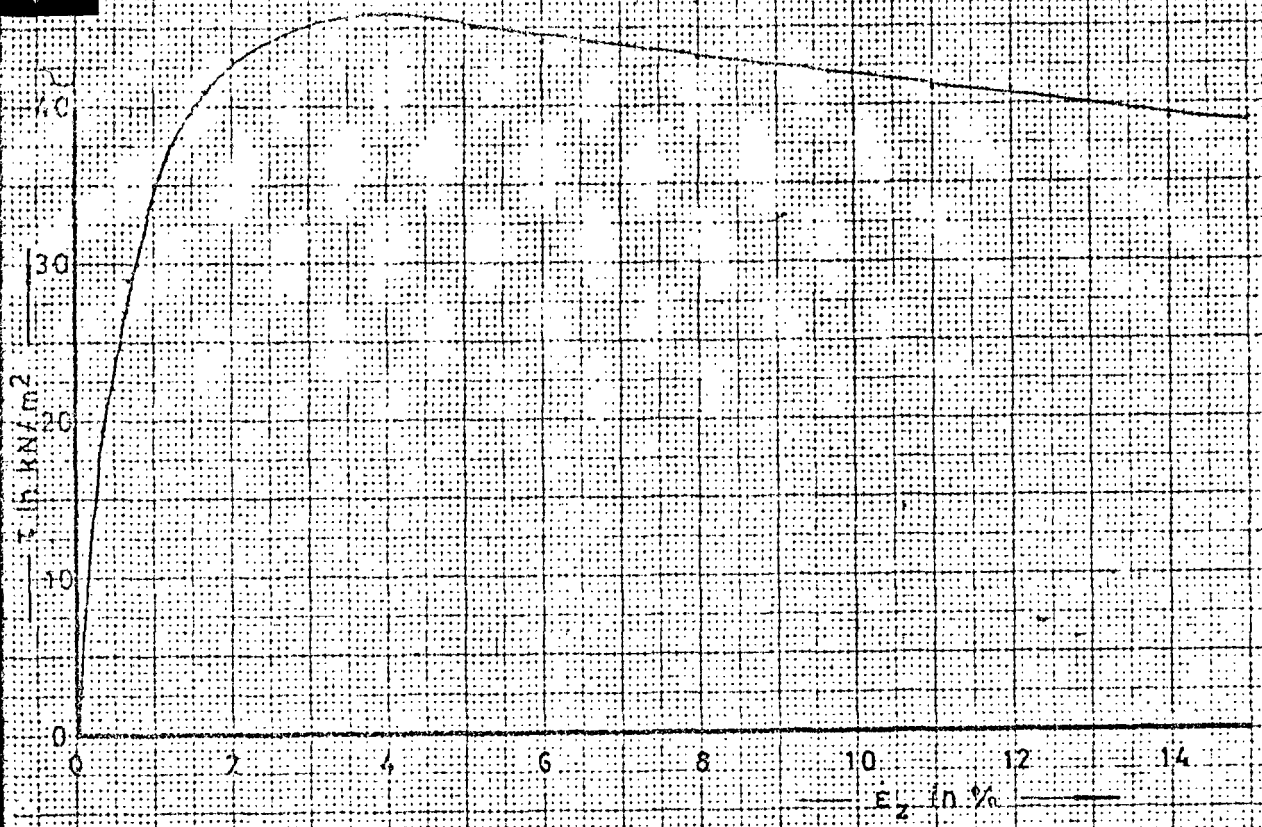
$\dot{\epsilon}_z = 60 \% / h$   
 $\sigma'_v = 30,0 \text{ kN/m}^2$   
T.S.O. 30 monster 220

CO-230640

BIJL. 3

form  
A4





laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 56 92 23  
telex 33326 solab nl

1978  
get  
van  
goc

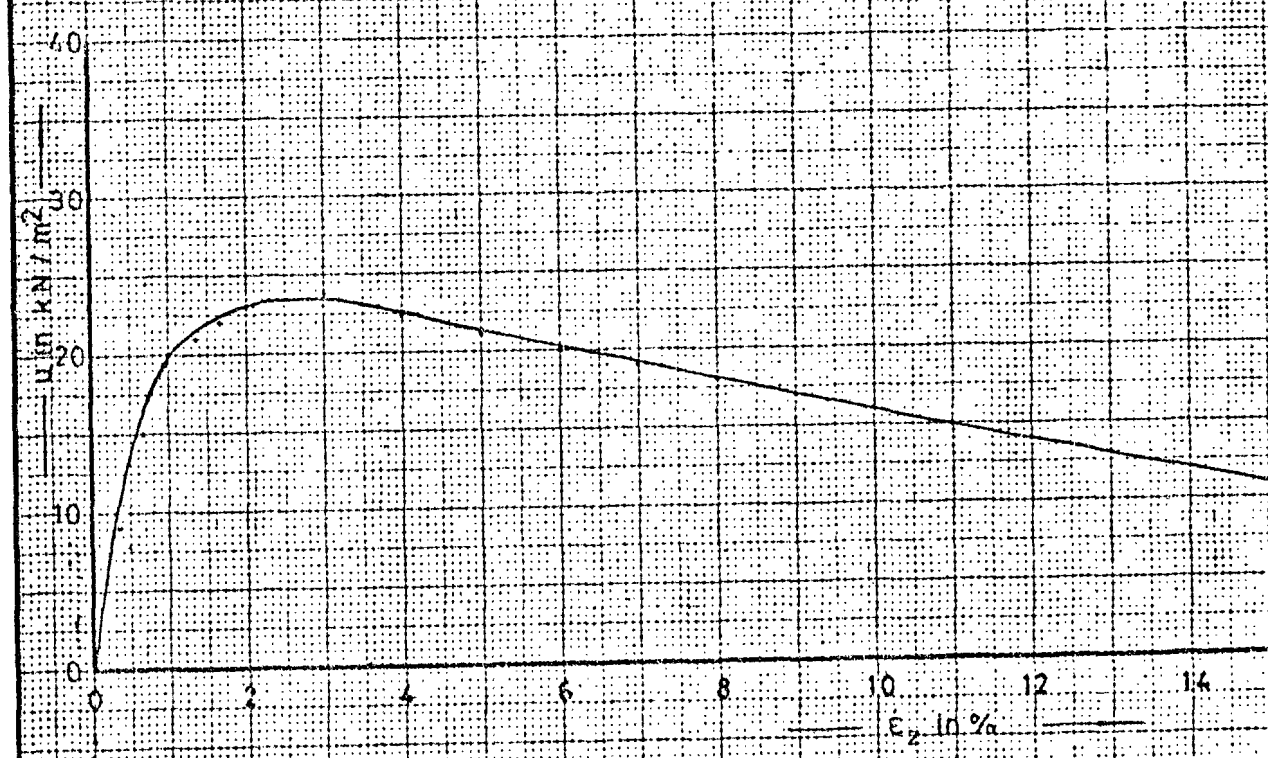
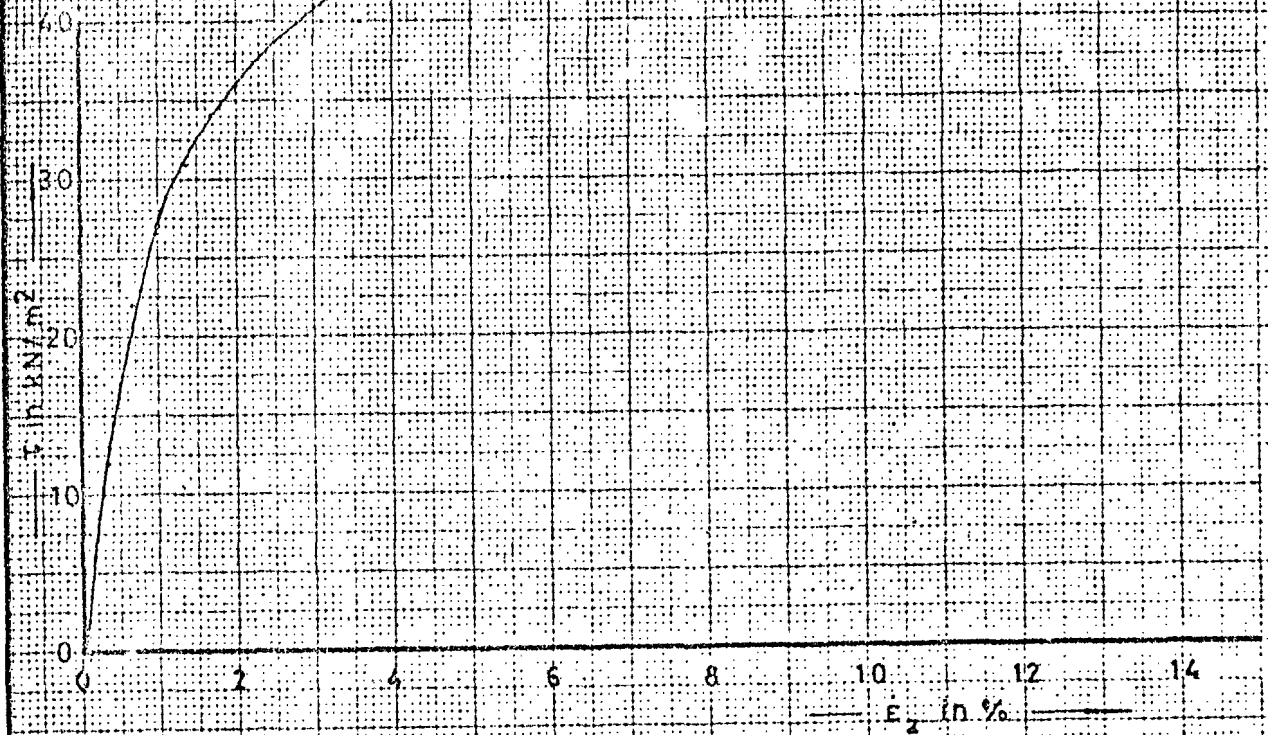
$\dot{\epsilon}_z = 60\% / h$   
 $\sigma'_v = 53,3 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.S.O, 50 monster 261

BIJL. 4  
form  
A<sub>4</sub>



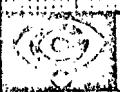
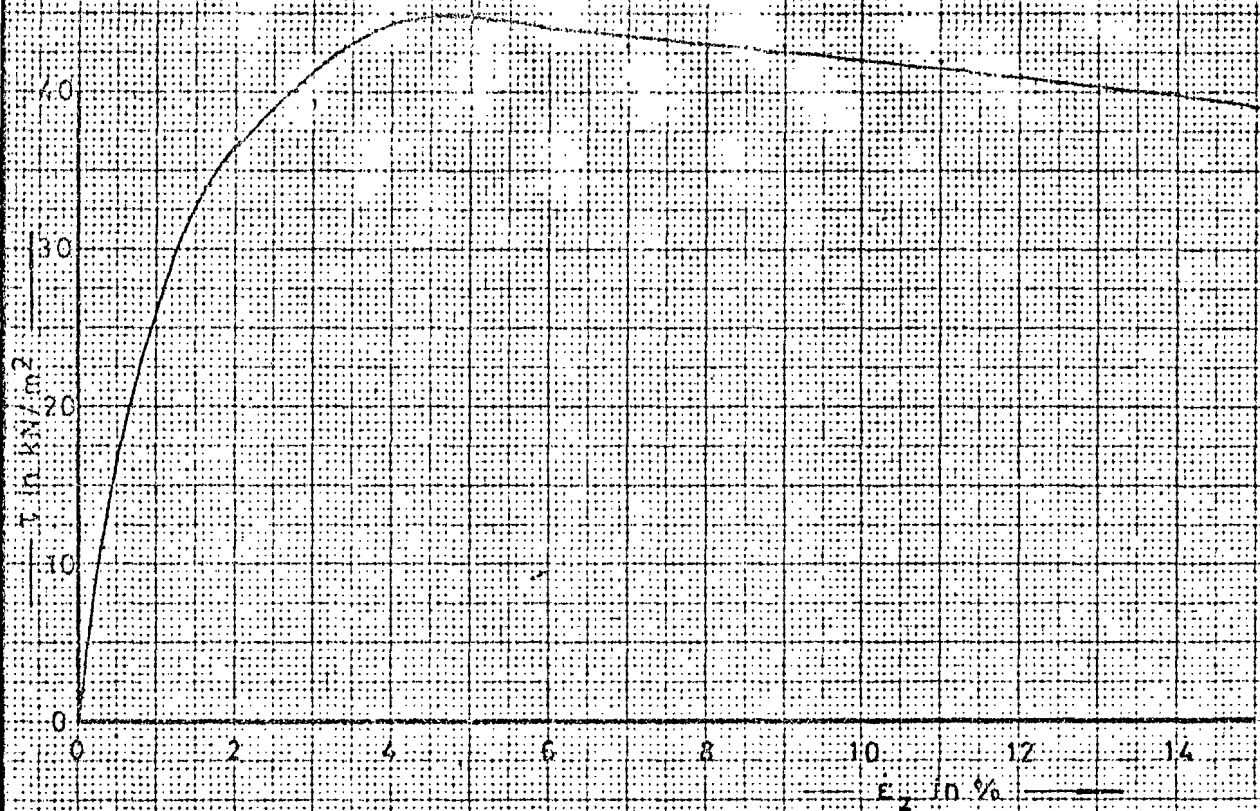


**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23  
 telex 33326 SOLAD NL

1978  
 CO-230640  
 BIJL. 5  
 get. / ver. / dec. / form. / A<sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 60\%/h$   
 $\sigma = 44,0 \text{ kN/m}^2$

T. S. O. 50 monster 265



laboratorium voor grondmechanica delft  
 telefoon (015) - 56 92 23  
 telex 33326 solab nl

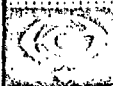
1978  
 got  
 Vrom

$\dot{\epsilon}_z = 60\% / h$   
 $\sigma = 48,0 \text{ kN/m}$

CO-230640  
 dec

T.S.O. 50 monster 237

BIJL. 6  
 form  
 A4



**laboratorium voor grondmechanica delft**

telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 solah nl

1978

get  
vrou  
dec

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma = 30,0 \text{ kN/m}^2$

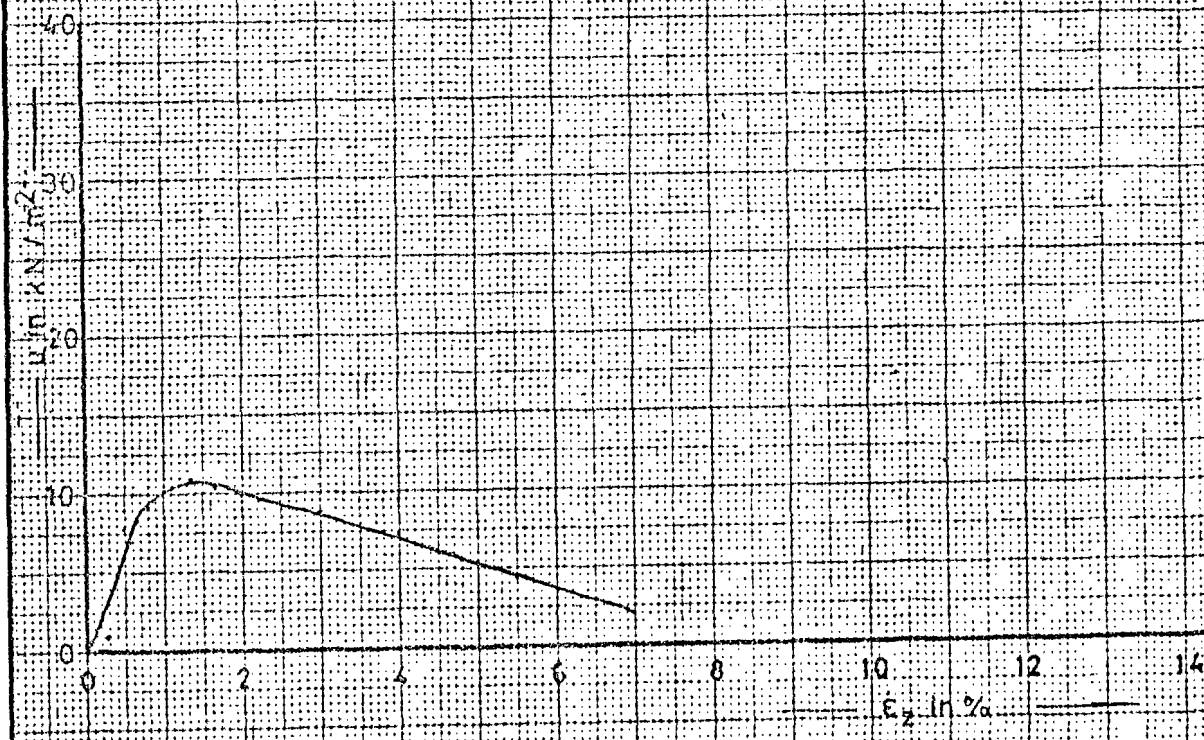
CO-230640

T.L.O. 30

monster 239

BIJL. 7

form  
A<sub>4</sub>



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 50 92 23      telex 33320 90lab nl

1978  
get  
norm  
dec

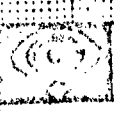
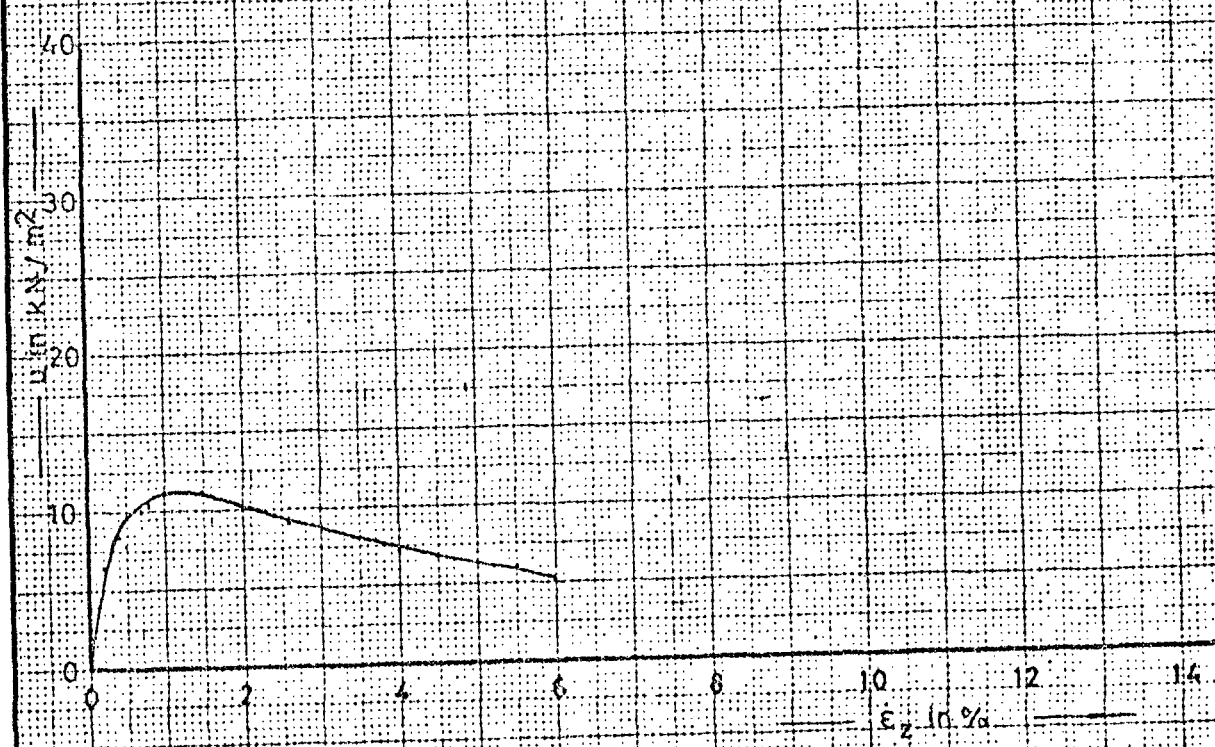
$\dot{\epsilon}_z = 6\% / \text{h}$   
 $\sigma = 18,8 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.L.O. 30    monster 259

BIJL. 8    A<sub>4</sub>





**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 solab nl

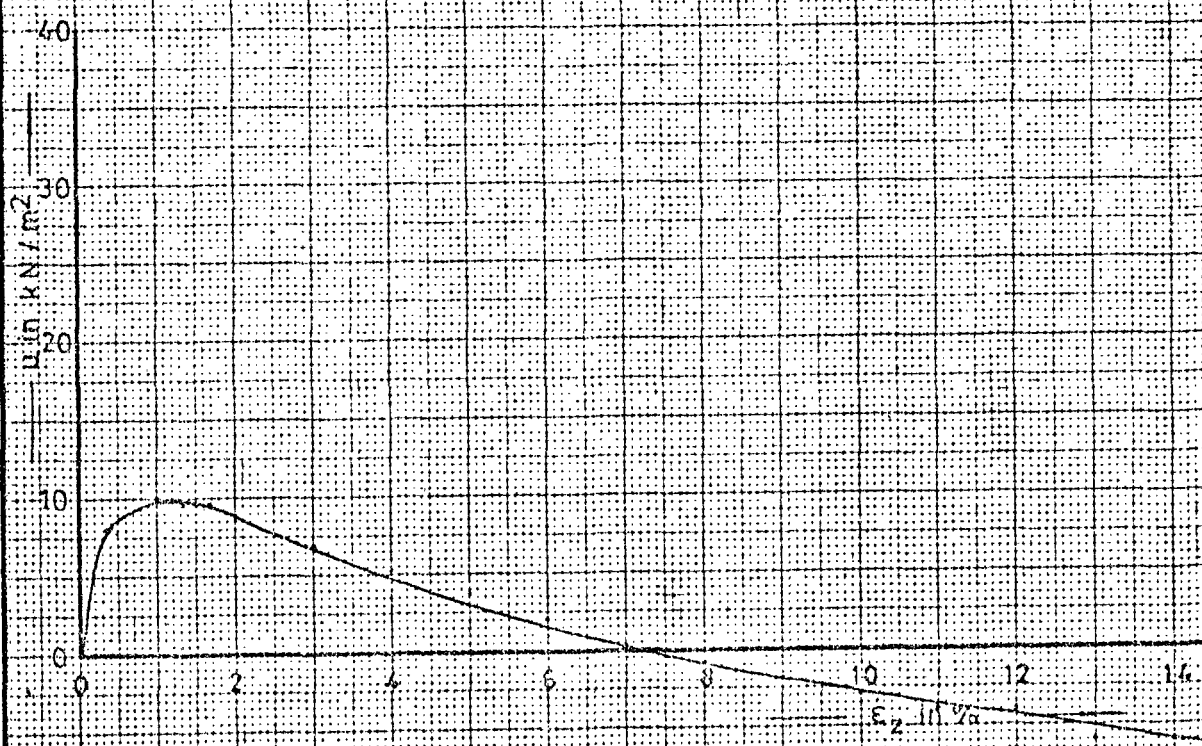
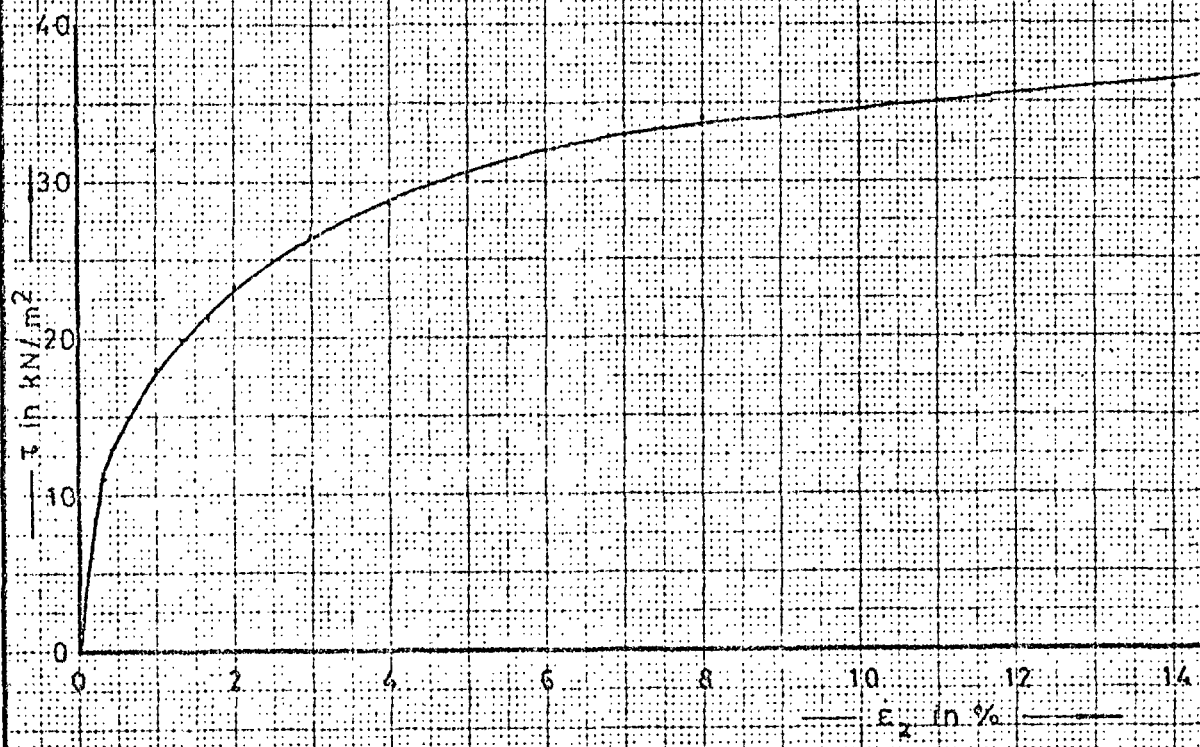
1978 get  
voor  
sec

CO-230640

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma' = 260 \text{ kN/m}^2$

BIJL. 9 norm  
A<sub>4</sub>

T.L.O. 30 monster 231

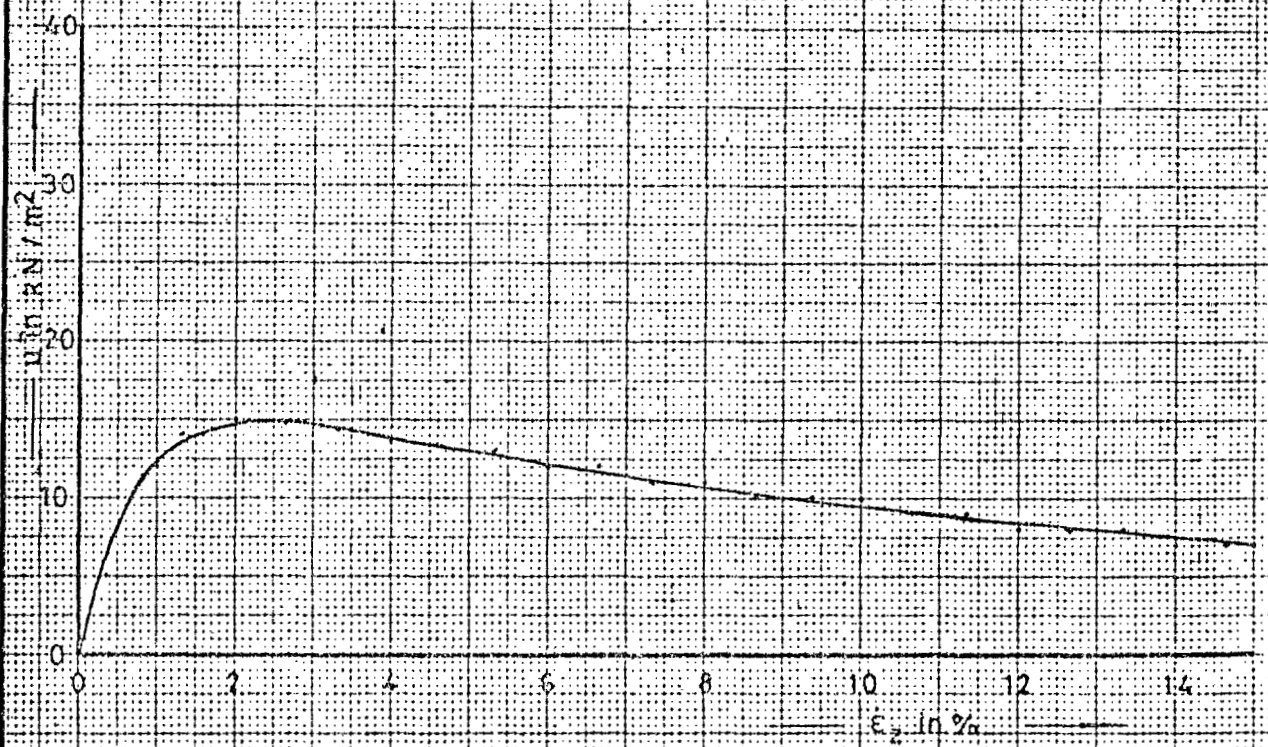
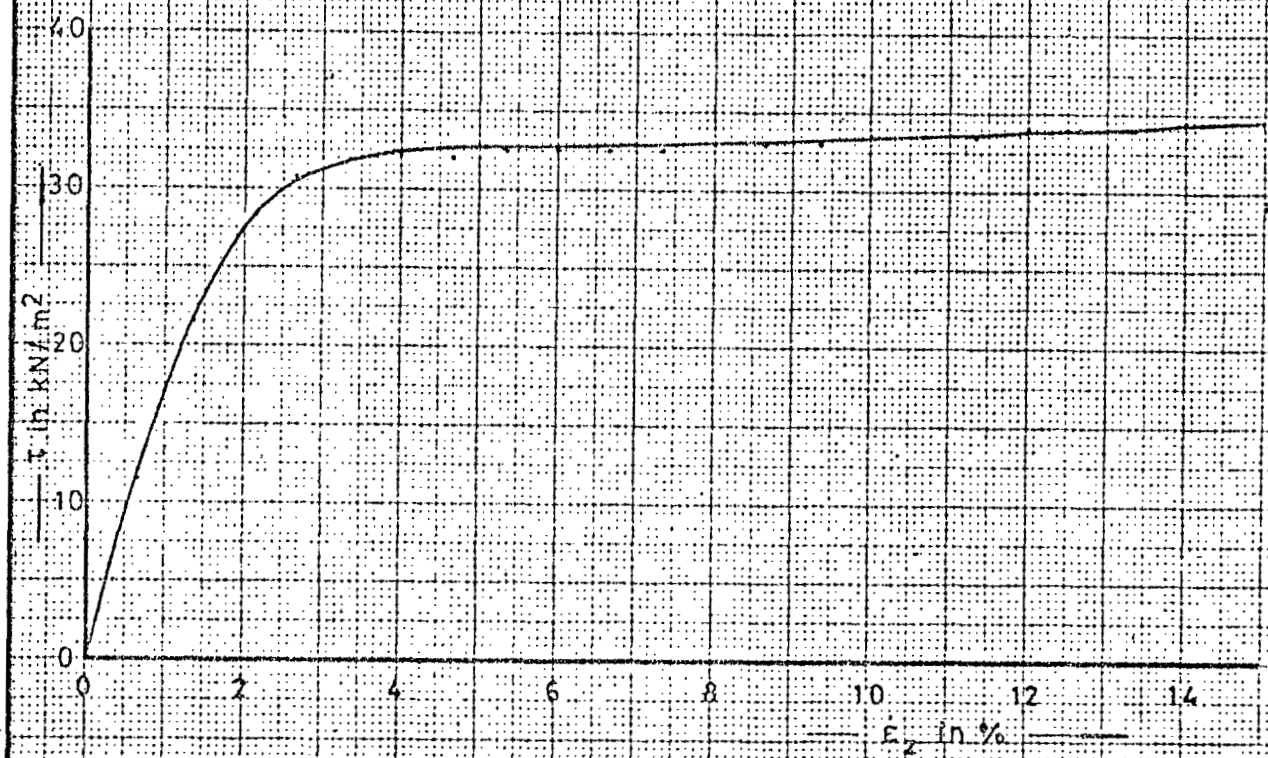


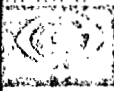
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

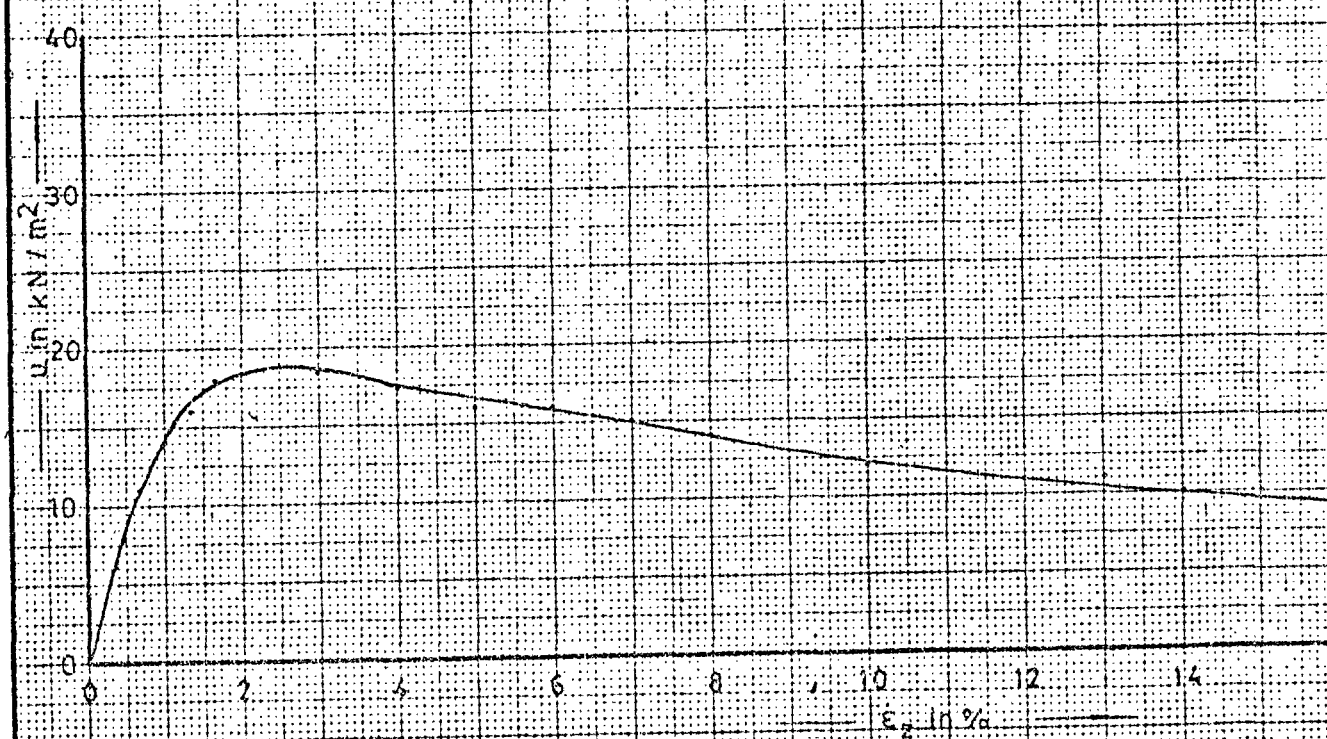
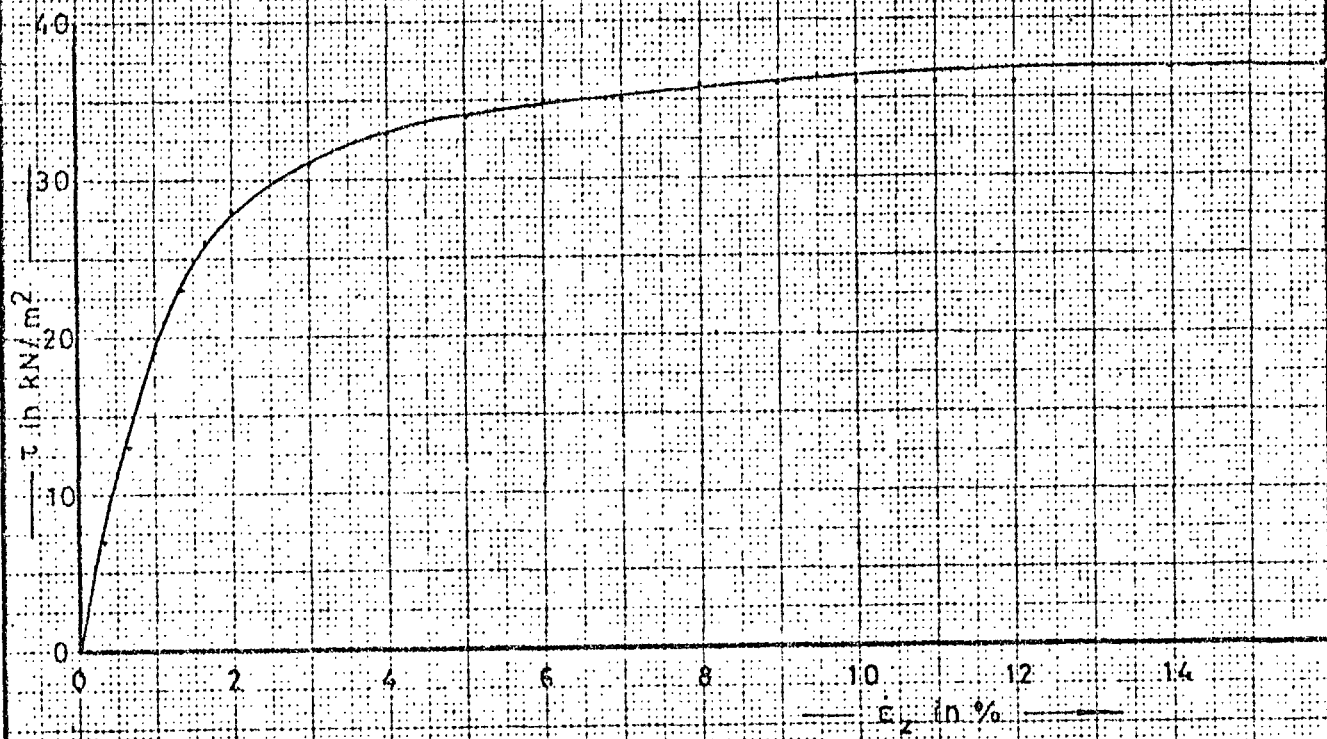
1978      CO-230640

T.L.O. 30    monster 241     $\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $G = 18,4 \text{ kN/m}^2$

BIJL. 10      A<sub>4</sub>



	<b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon (015) - 569223 telex 33326 solab nl	dd	get
		1978	<i>[Signature]</i>
$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$ $\sigma = 30,0 \text{ kN/m}^2$		CO-230640	pec
		BIJL. 11	form A4
T.L.O. 30 monster 269			

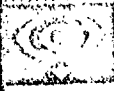
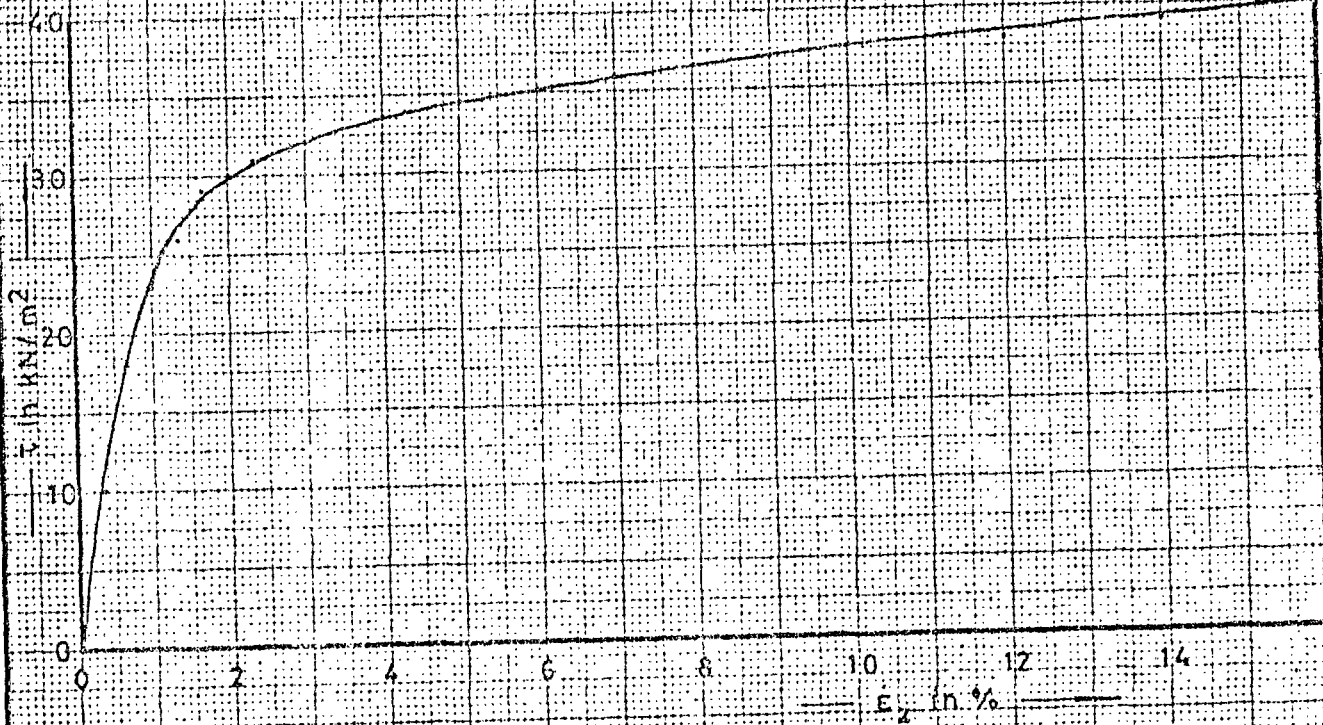


**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

1978	get voor
CO-230640	gec
BIJL. 12	form A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma'_0 = 34.4 \text{ kN/m}^2$   
T.L.O 30    monster 286

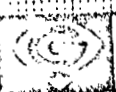
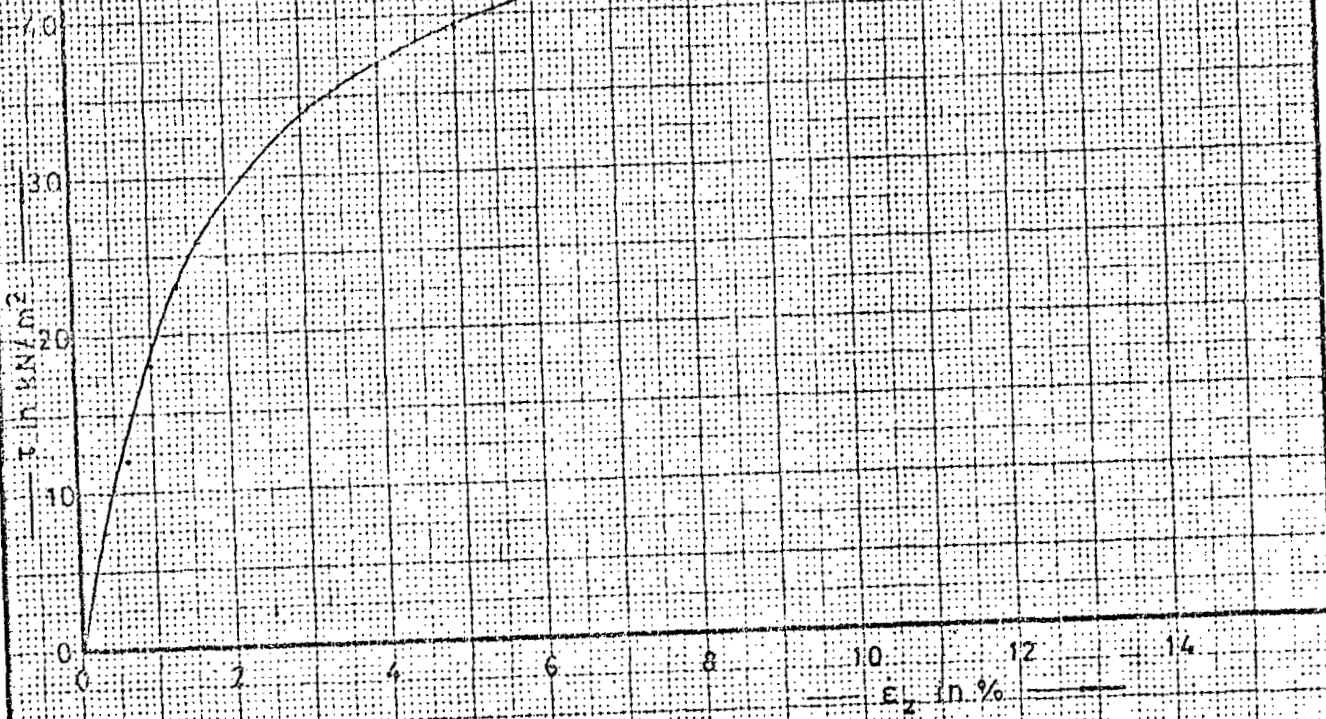




**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326    sorab nl

1978	get vond
CO-230640	goc
BIJL. 13	form A <sub>4</sub>

T.L.O. 30    monster 218     $\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma = 32.0 \text{ kN/m}^2$

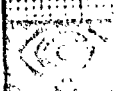
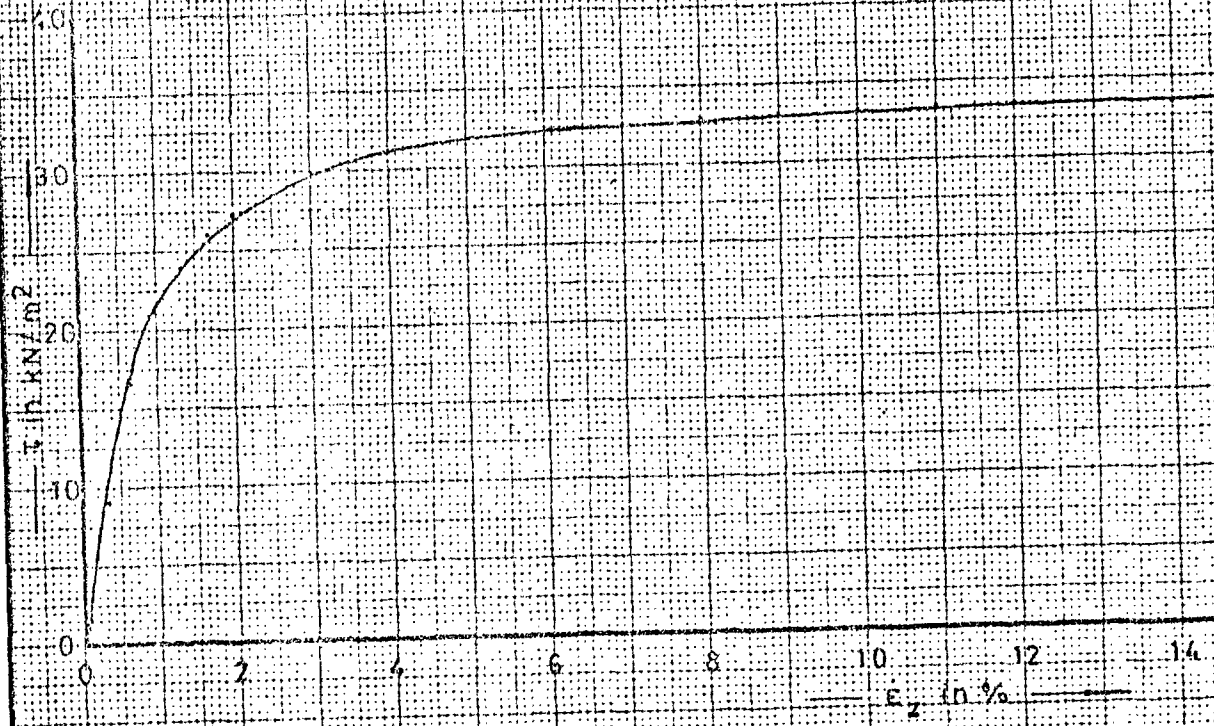


**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23

1978	get vrij
CO-230640	pr.
BIJL. 14	norm A <sub>16</sub>

T.L.O. 30 monster 238

$\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$   
 $\sigma'_v = 320 \text{ kN/m}^2$

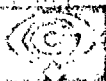
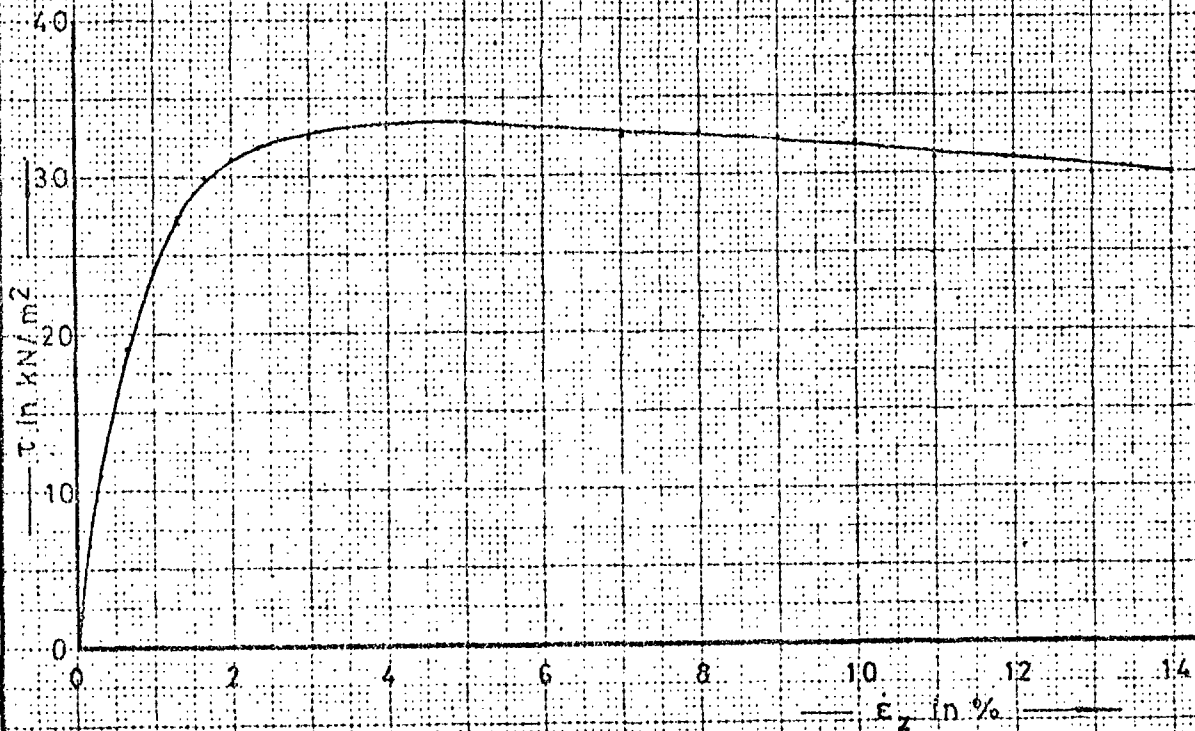


laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 56 92 23  
telex 33328 solab nl

1978  
CO-230640  
BIJL. 15  
get  
190  
sec  
form  
A<sub>4</sub>

T.L.O. 30  
monster 245  
 $\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$   
 $\sigma' = 32,0 \text{ kN/m}^2$





laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33320 soledb nl

1978

dot  
Vroul  
soc

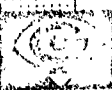
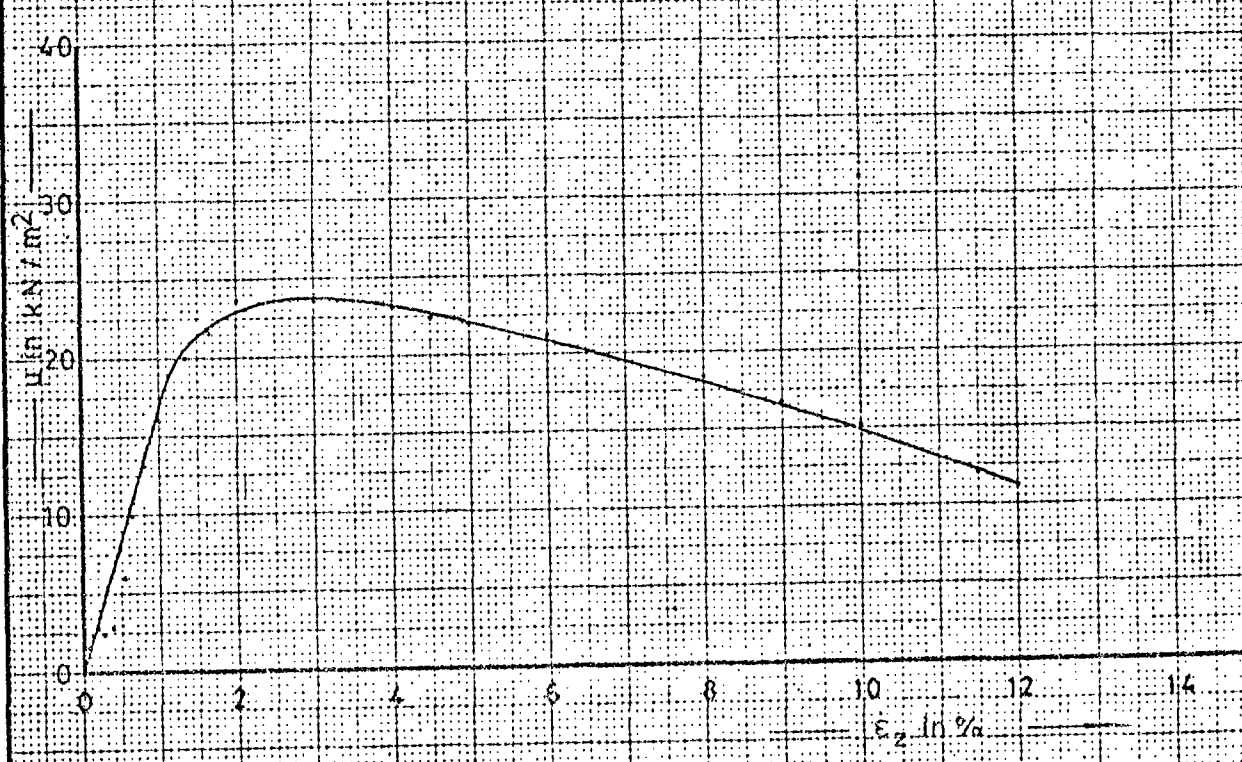
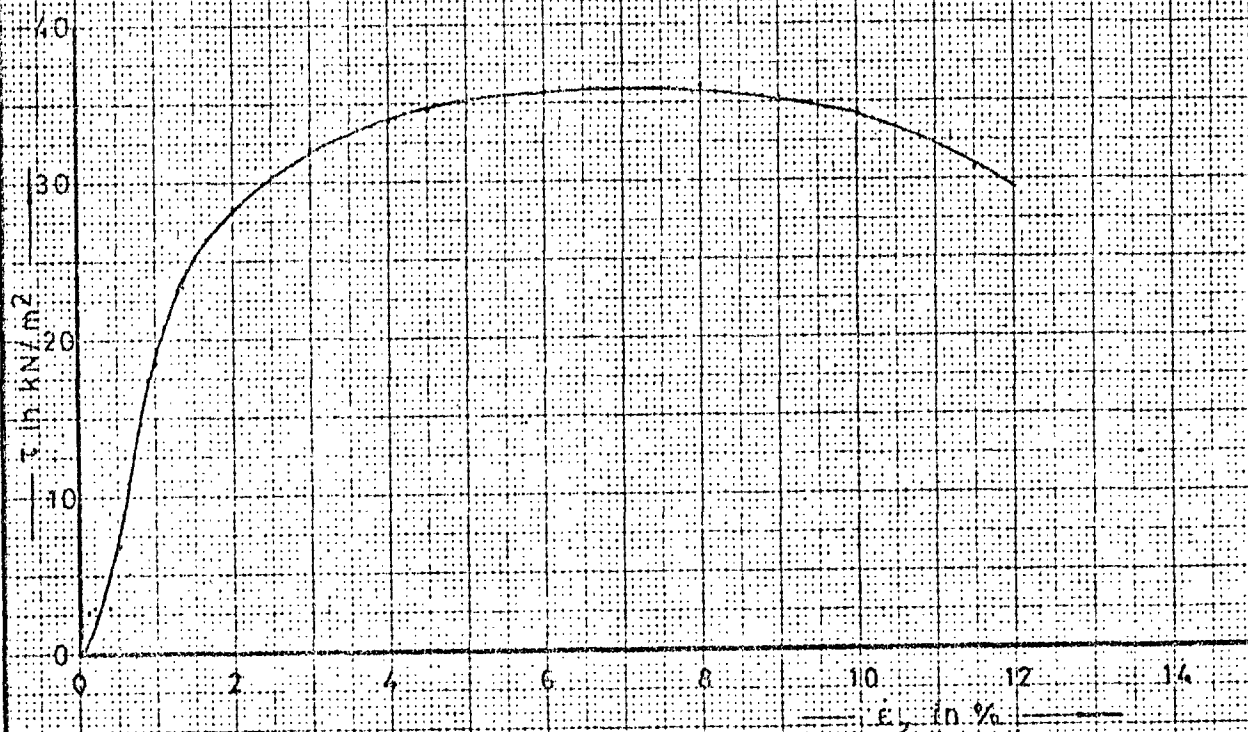
$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma = 41,2 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.L.O. 50 monster 291

BIJL. 16

form  
A<sub>4</sub>



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 vordb nl

1978  
get  
100-1  
gec

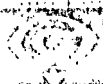
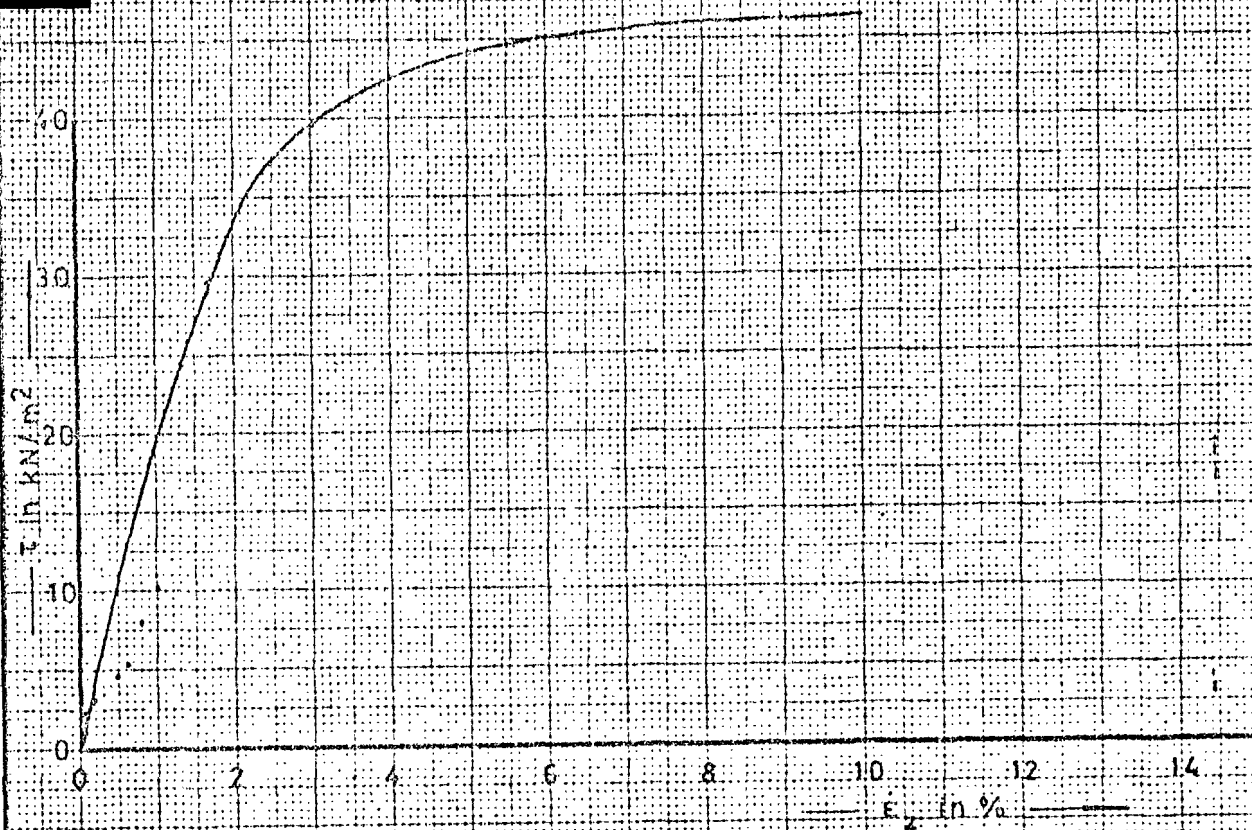
$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma = 43.2 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.L.O. 50 monster 279

BIJL 17

100-1  
A<sub>4</sub>



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telex 33326 solad nl

1978

CO-230640

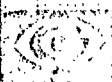
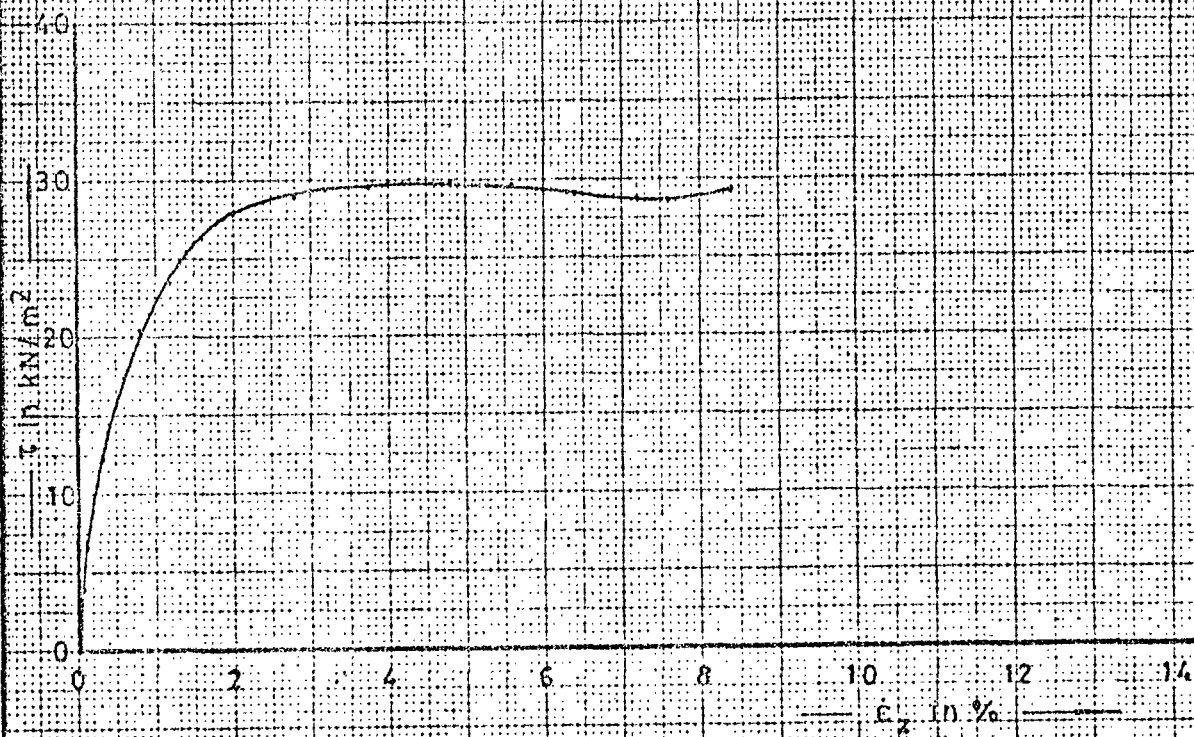
BIJL. 18

T.L.O. 50 monster 254

$\epsilon_z = 6\%/h$   
 $\sigma = 66,8 \text{ kN/m}^2$

get  
Vand  
pec

form  
A4



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telex 33323 sorab nl

1978-08-

CO-230640

BIJL. 19

T.L.O.G. 30 monster 217

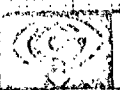
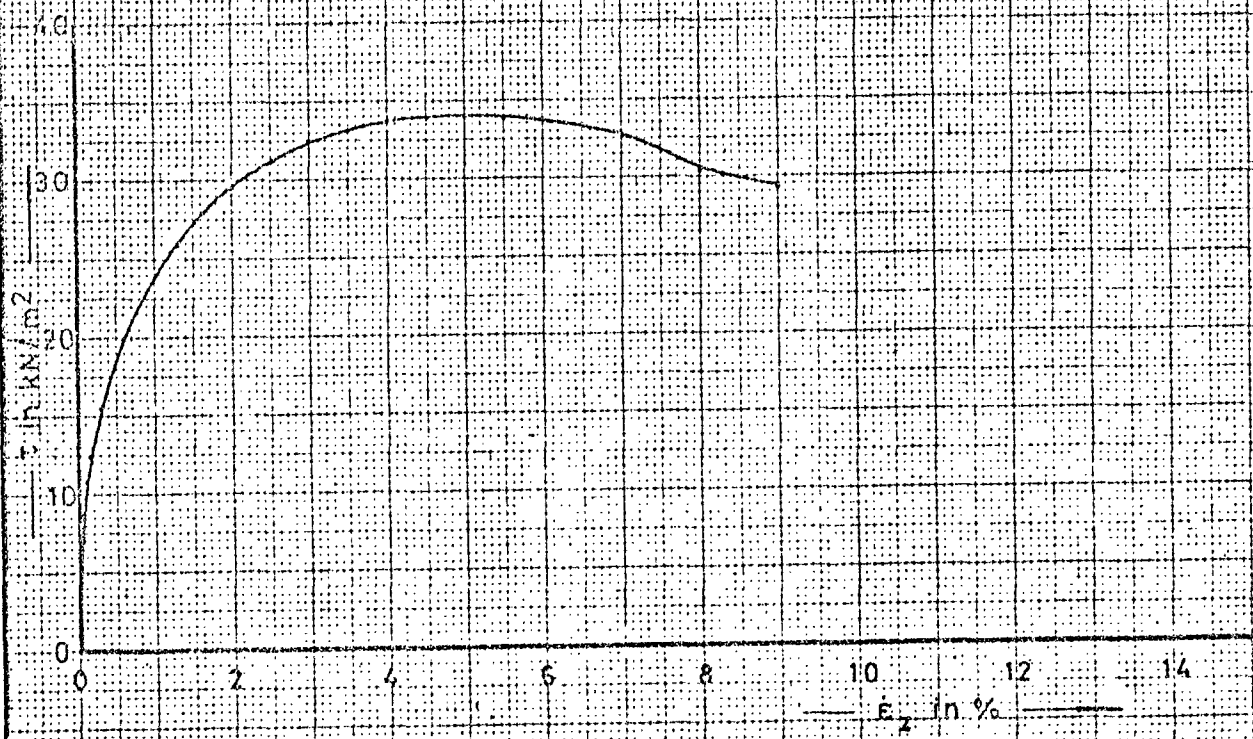
$\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$   
 $\sigma = 278 \text{ kN/m}^2$

get  
Kraai

sec

form  
A<sub>4</sub>





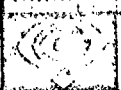
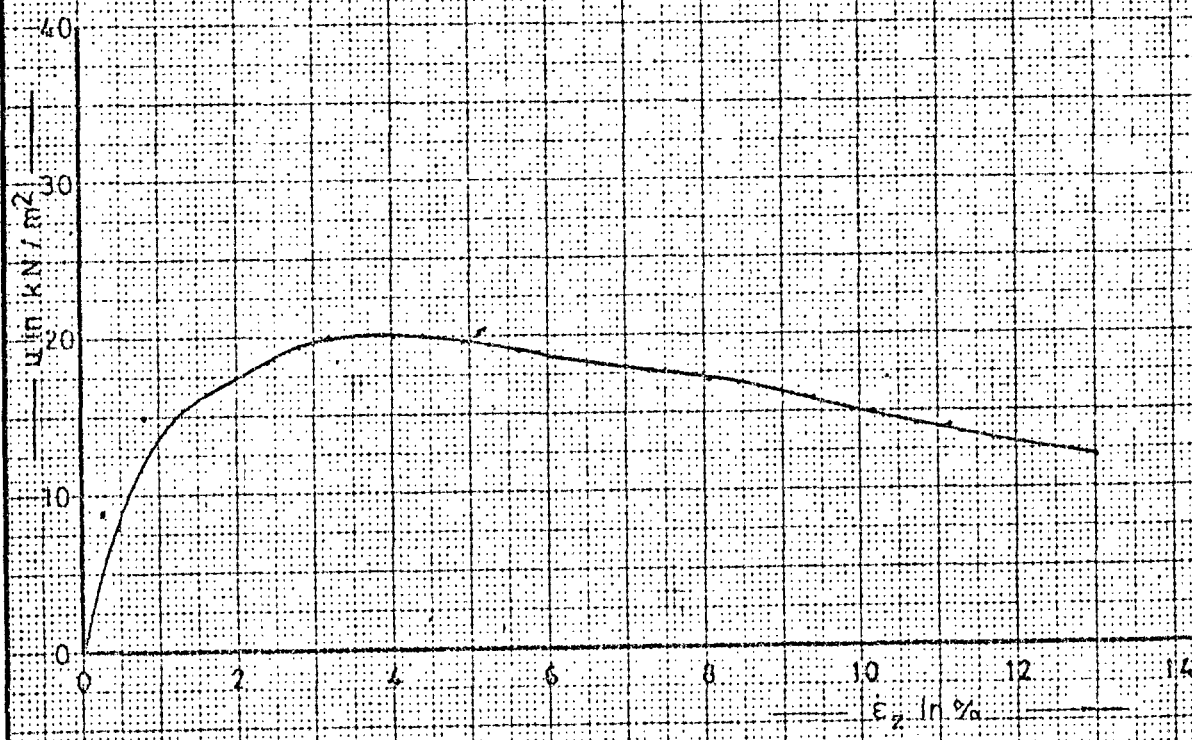
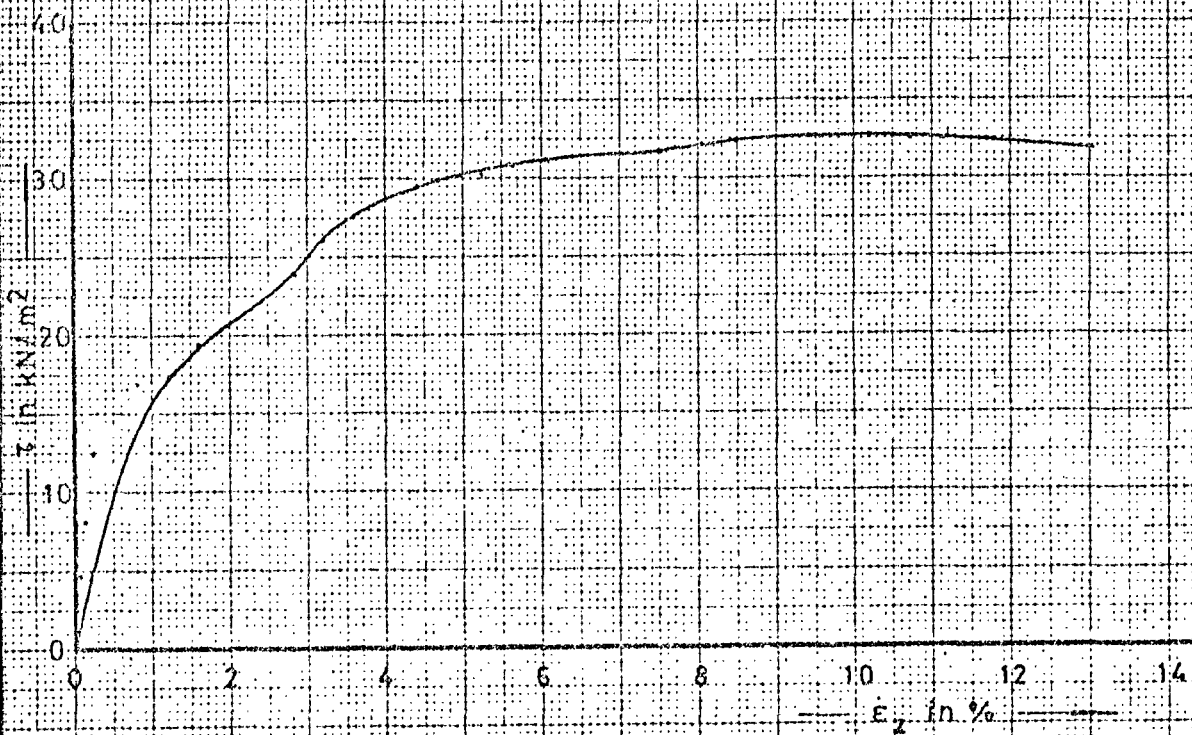
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23  
telex 33326 sorab nl

1978-08-  
get  $\sqrt{10}$   
2<sup>o</sup>c

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $\sigma' = 31,2 \text{ kN/m}^2$   
T.L.O.G. 30 monster 222

CO-230640  
BIJL. 20  
form A<sub>4</sub>



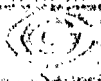
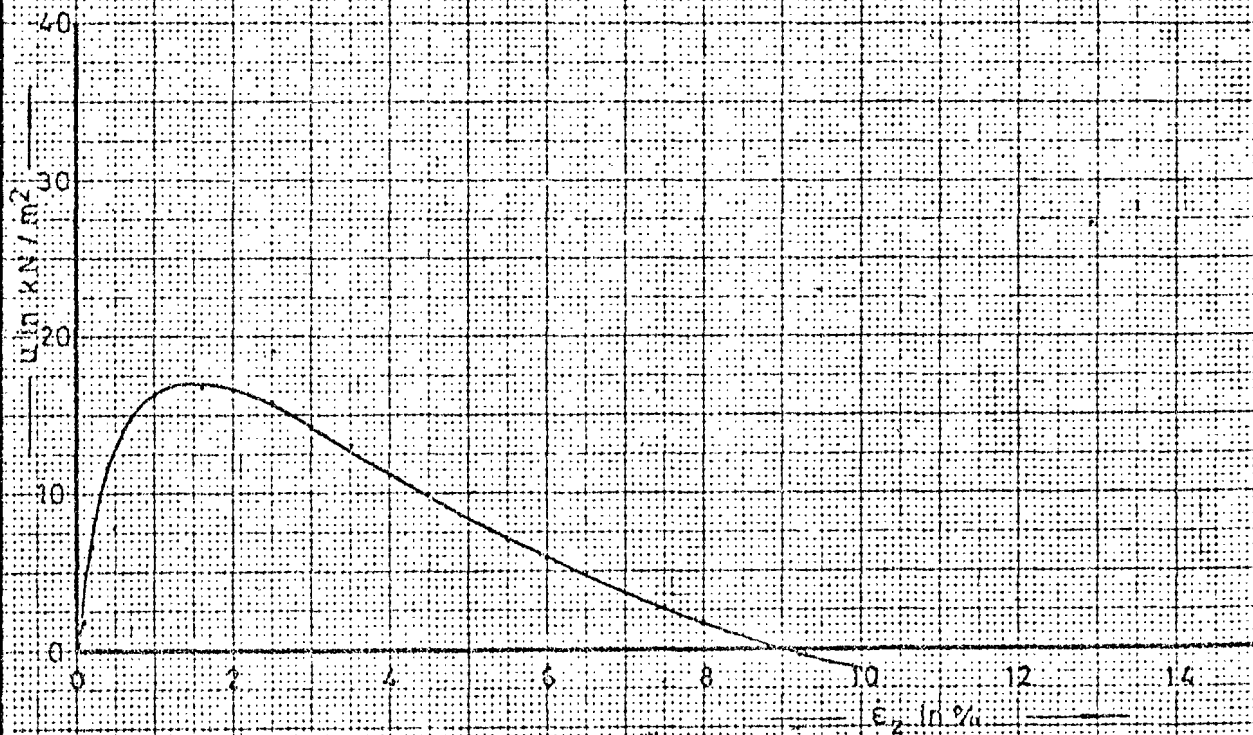
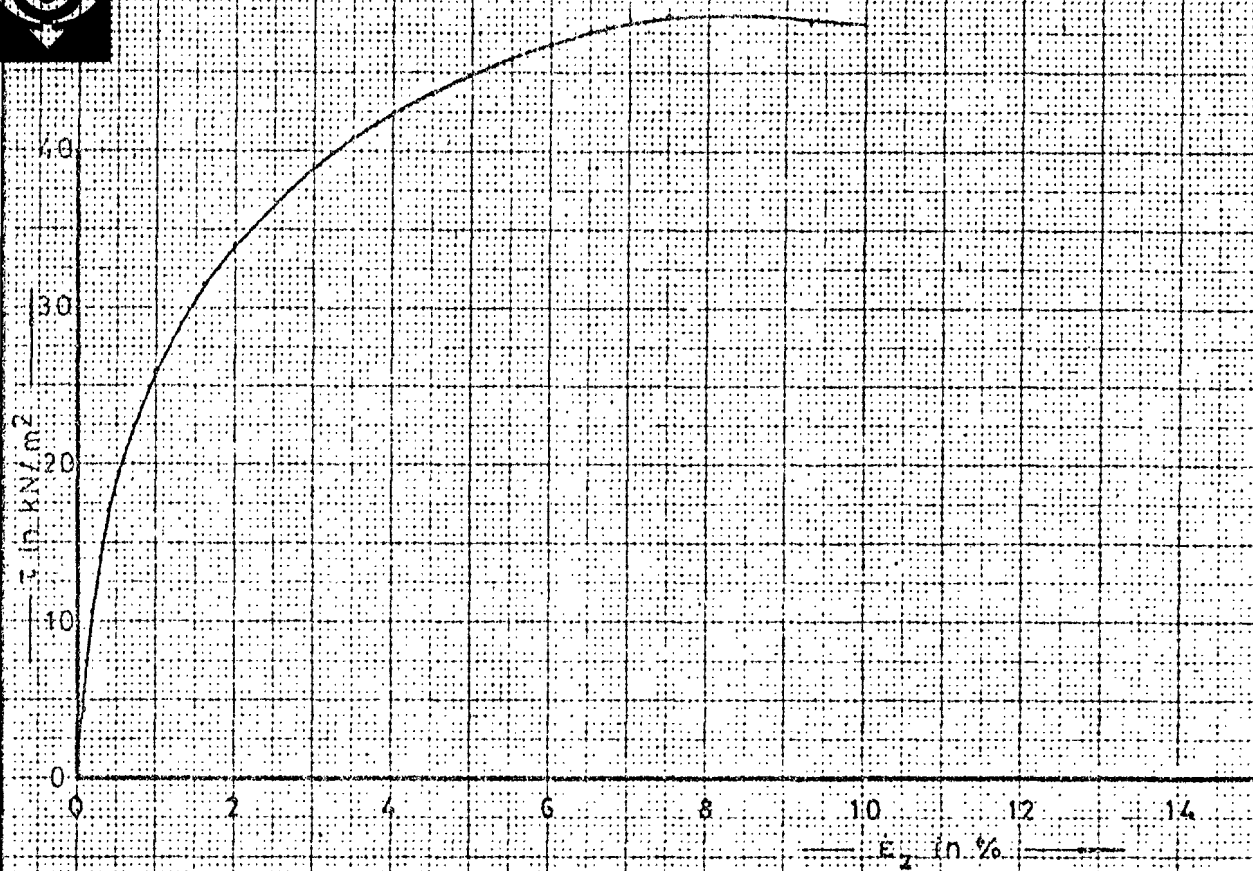


**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23      telex 33328 solab nl

1978-08-  
CO-230640

T.L.O.G. 30 monster 294  
 $\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$   
 $\sigma = 34,2 \text{ kN/m}^2$

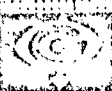
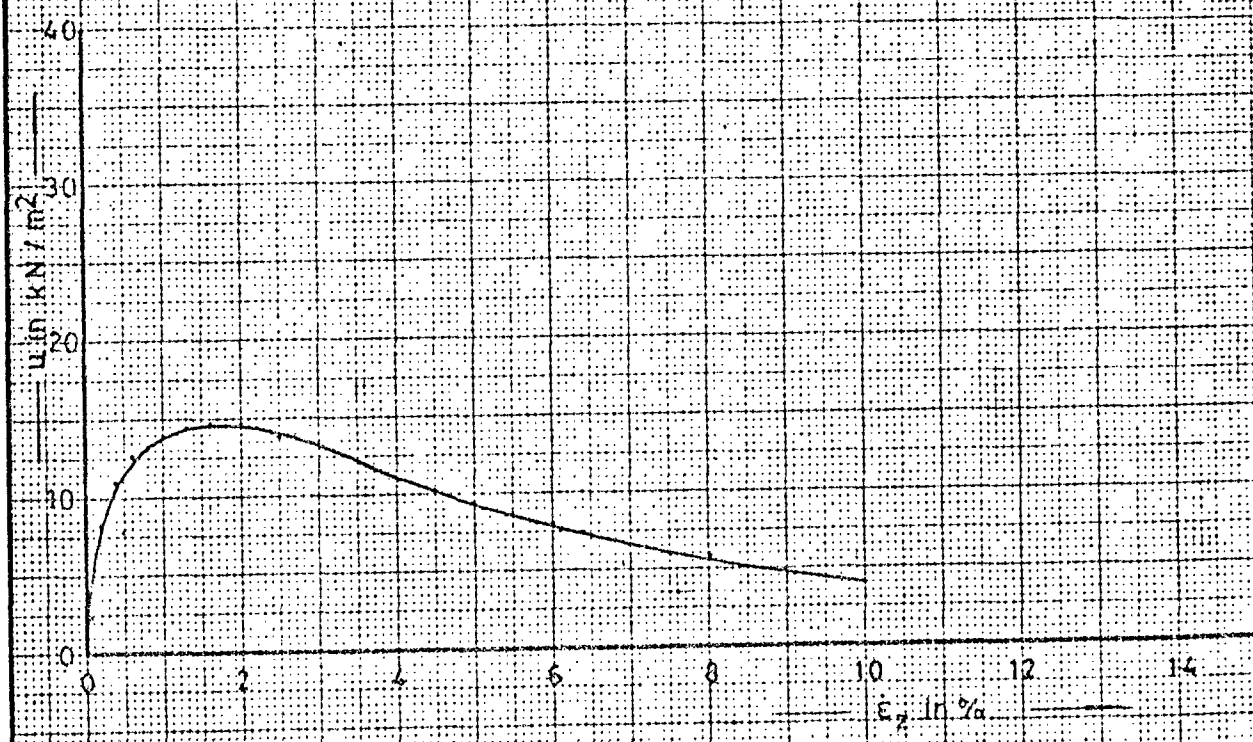
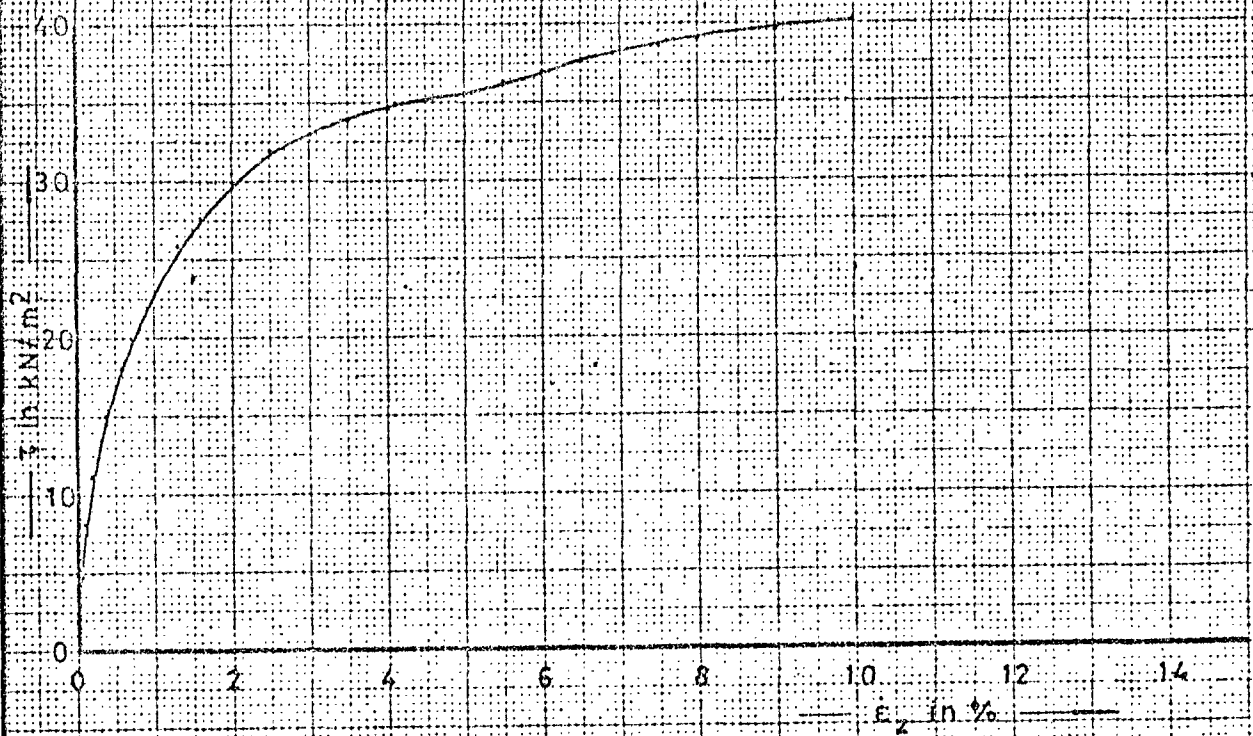
BIJL. 21  
A<sub>4</sub>



**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

1978-08-	get. van
CO-230640	sec
BIJL. 22	form A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / \text{h}$   
 $\sigma = 27,6 \text{ kN/m}^2$   
T.L.O.G. 30 monster 262



**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23

telex 33326 solab nl

1978-08-

get  
Vrouw

CO-230640

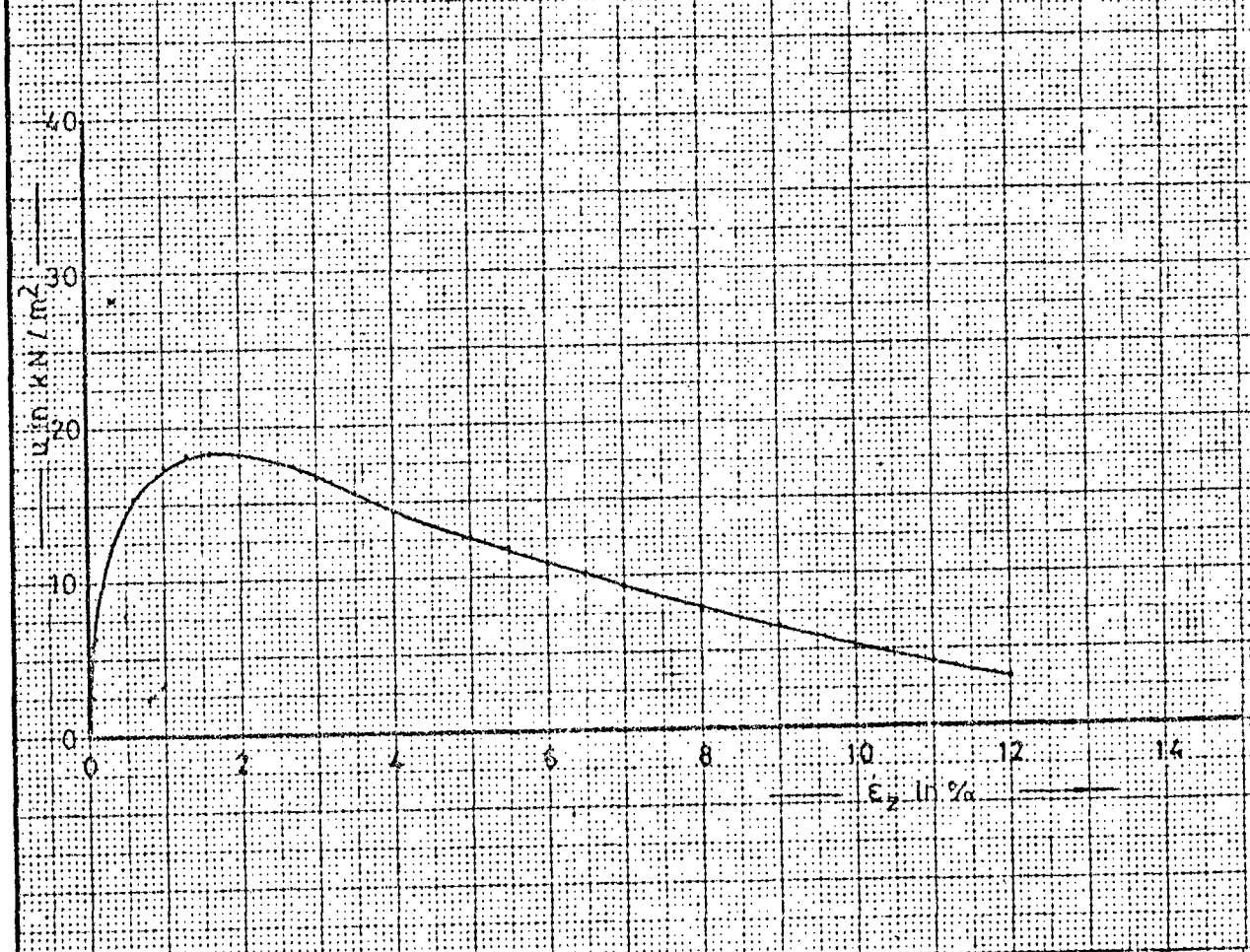
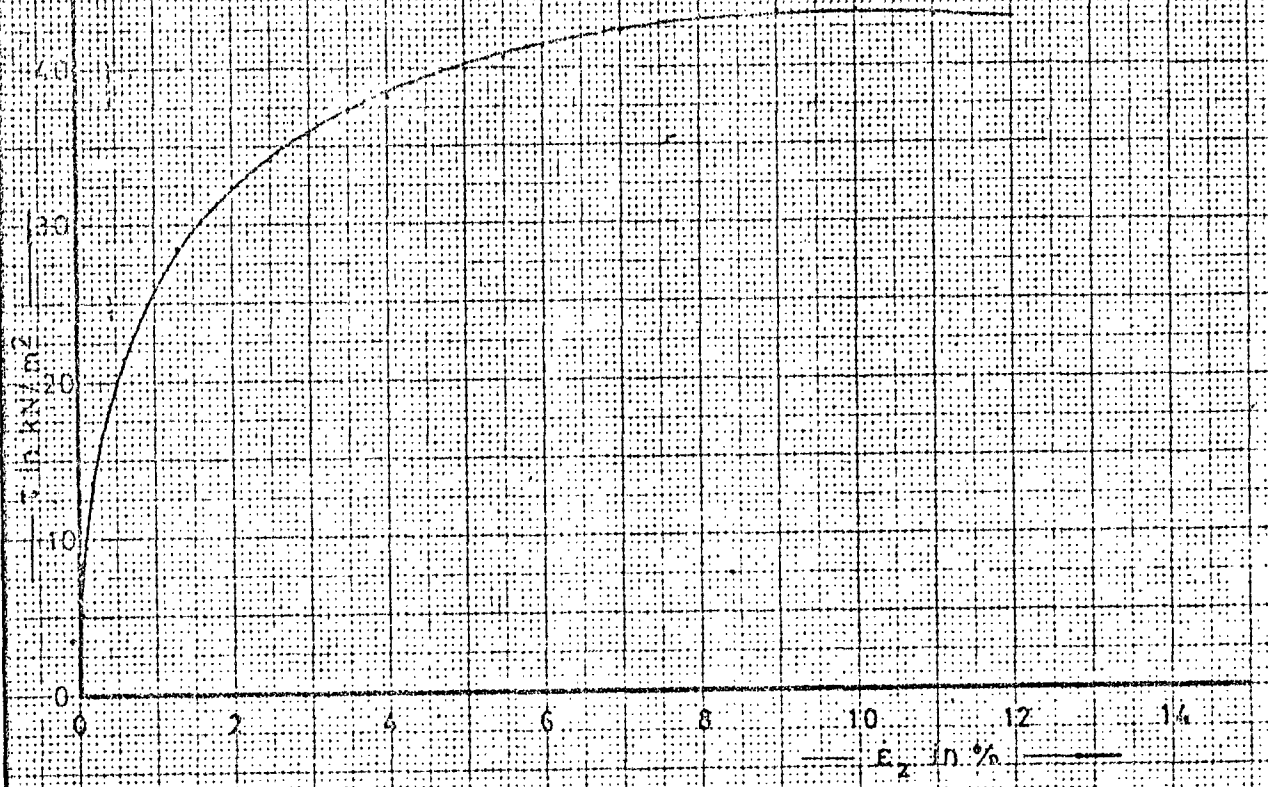
goc


$\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$   
 $\sigma = 29,2 \text{ kN/m}^2$

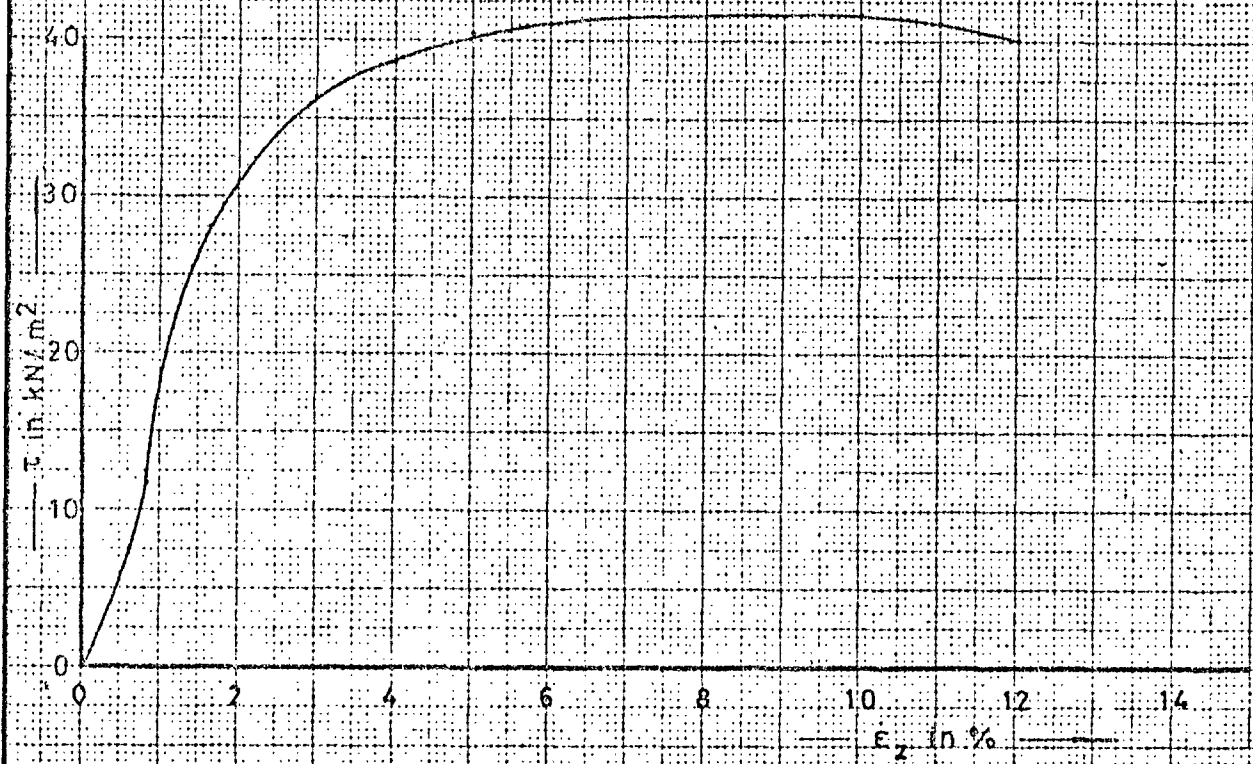
T.L.O.G. 30 monster 250

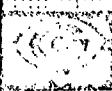
BIJL. 23

form  
A<sub>4</sub>

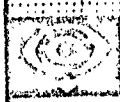
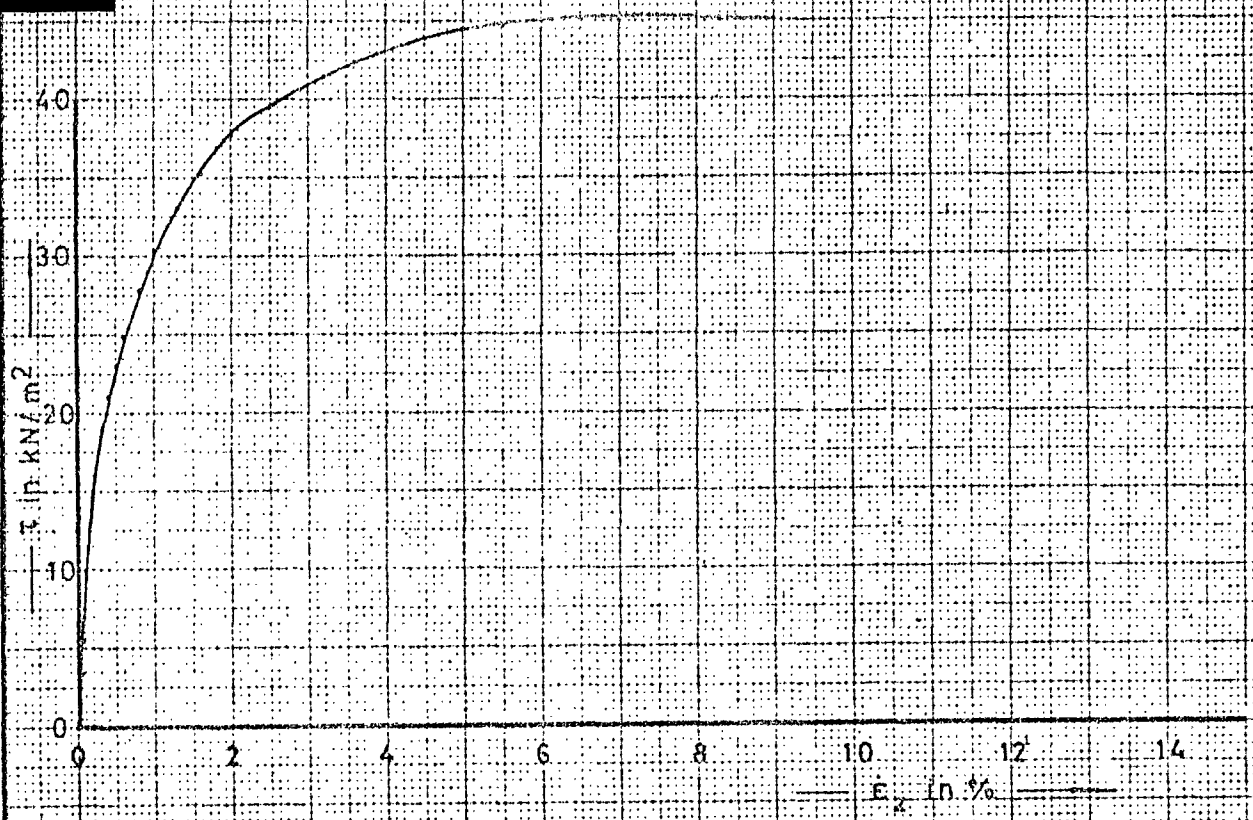


 <b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon (015) - 56 92 23	dd 1978-08-	get van
	CO-230640	pec
$\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$ $\sigma' = 33,2 \text{ kN/m}^2$	BIJL. 24	form A4
TL.O.G. 30 monster 277		



	<b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon (015) - 56 92 23 telex 33326 solab nl	1978-08-	get Vrou goc
	$\dot{\epsilon}_z = 6\%/h$ $\sigma' = 46,6 \text{ kN/m}^2$	CO-230640	
	T.L.O.G. 50 monster 211	BIJL. 25	form A <sub>4</sub>



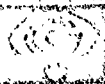
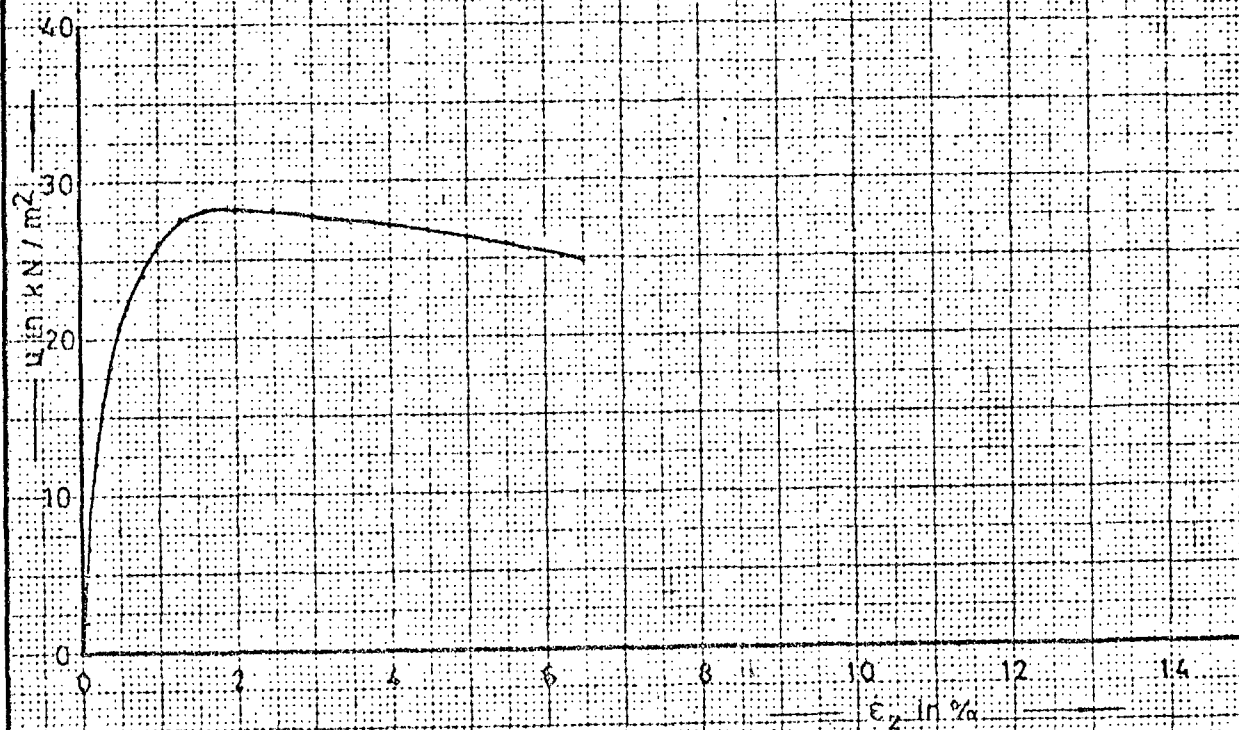
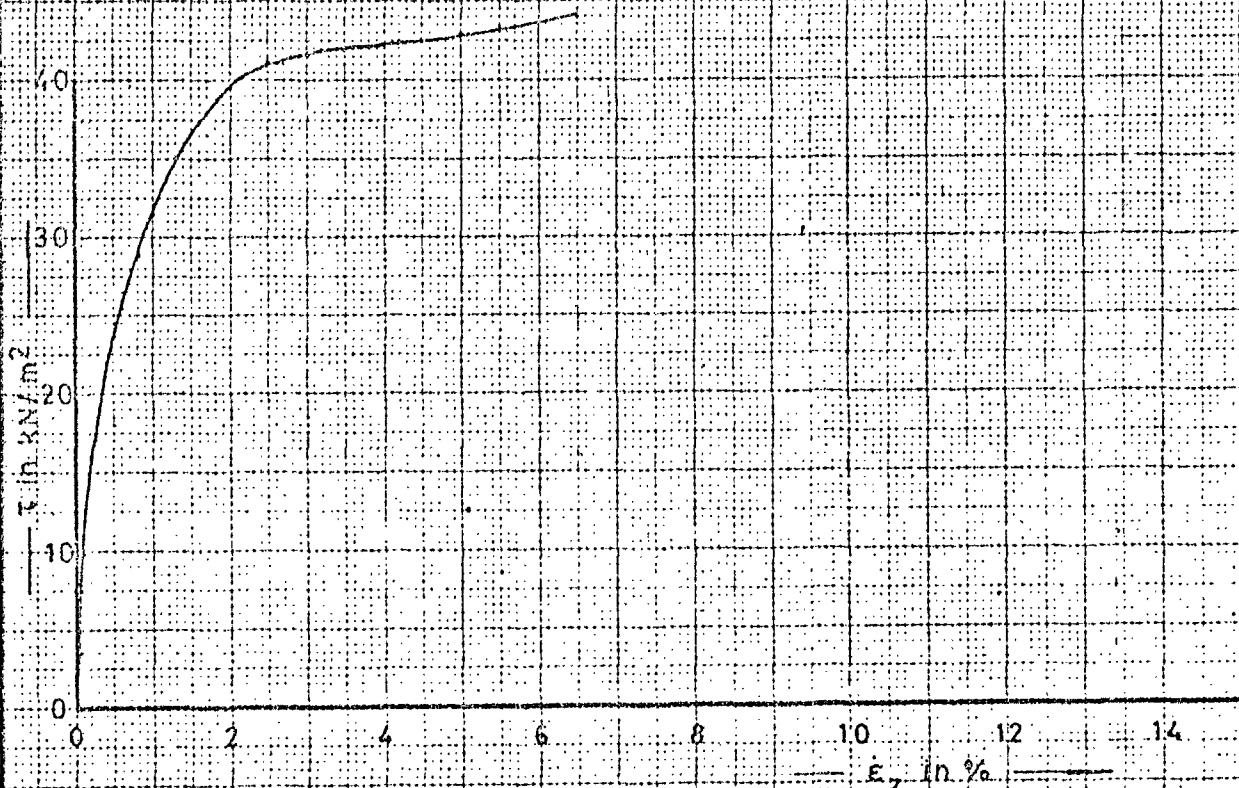


**laboratorium voor grondmechanica deift**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

1978-08-  
 CO-230640

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $G = 48,6 kN/m^2$   
 T.L.O.G. 50 monster 282

BIJL. 26  
 A<sub>4</sub>



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) 56 92 23

teleex 33326 solab nl

1978-08-

CO-230640

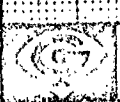
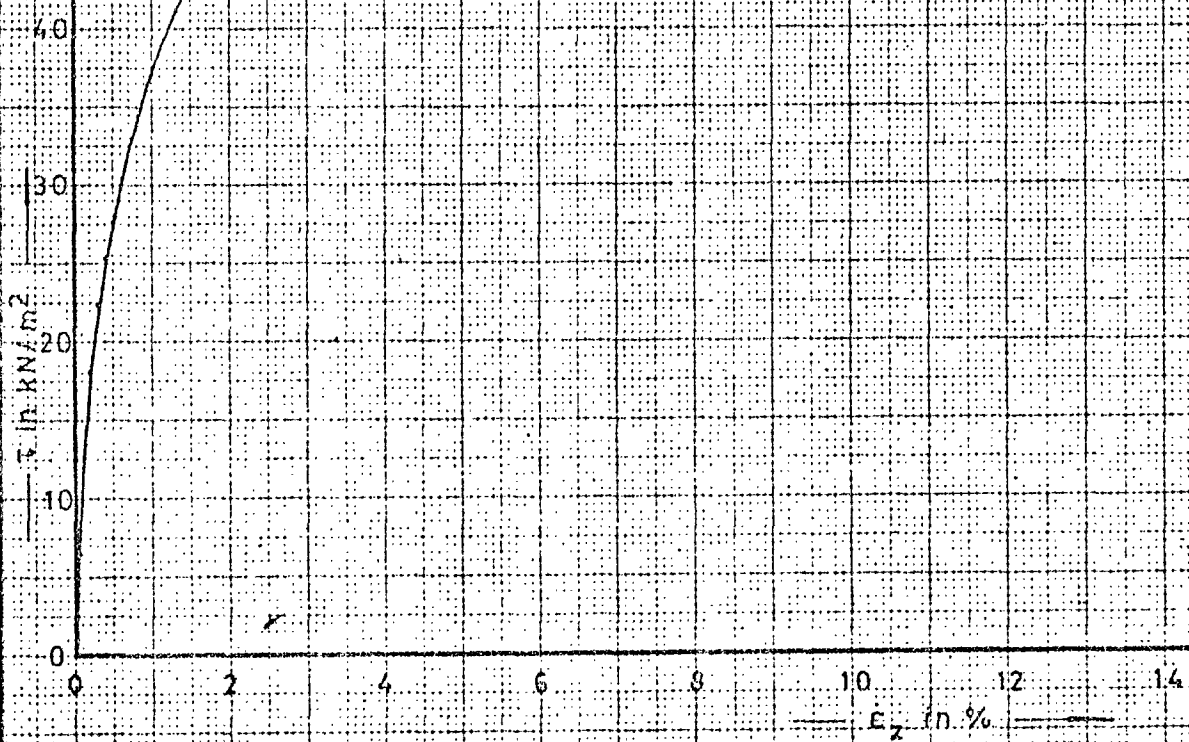
BIJL. 27

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$

$\sigma = 50,6 \text{ kN/m}^2$

T.L.O.G. 50 monster 230

gat  
gec  
form  
A<sub>4</sub>



**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23

telex 33326 VOIRD NL

1978-08-  
get  
form  
goc

$\dot{\epsilon}_z = 6\% / h$   
 $G = 42.6 \text{ kN/m}^2$

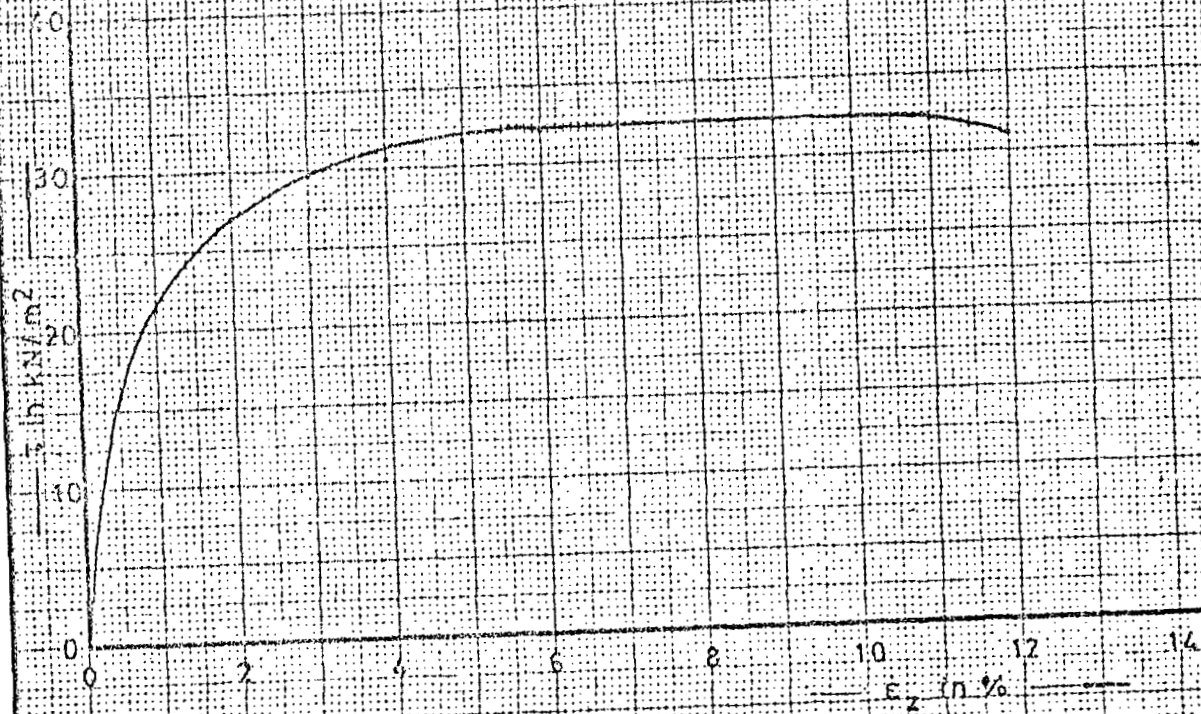
CO-230640


T.L.O.G. 50 monster 287

BIJL. 28

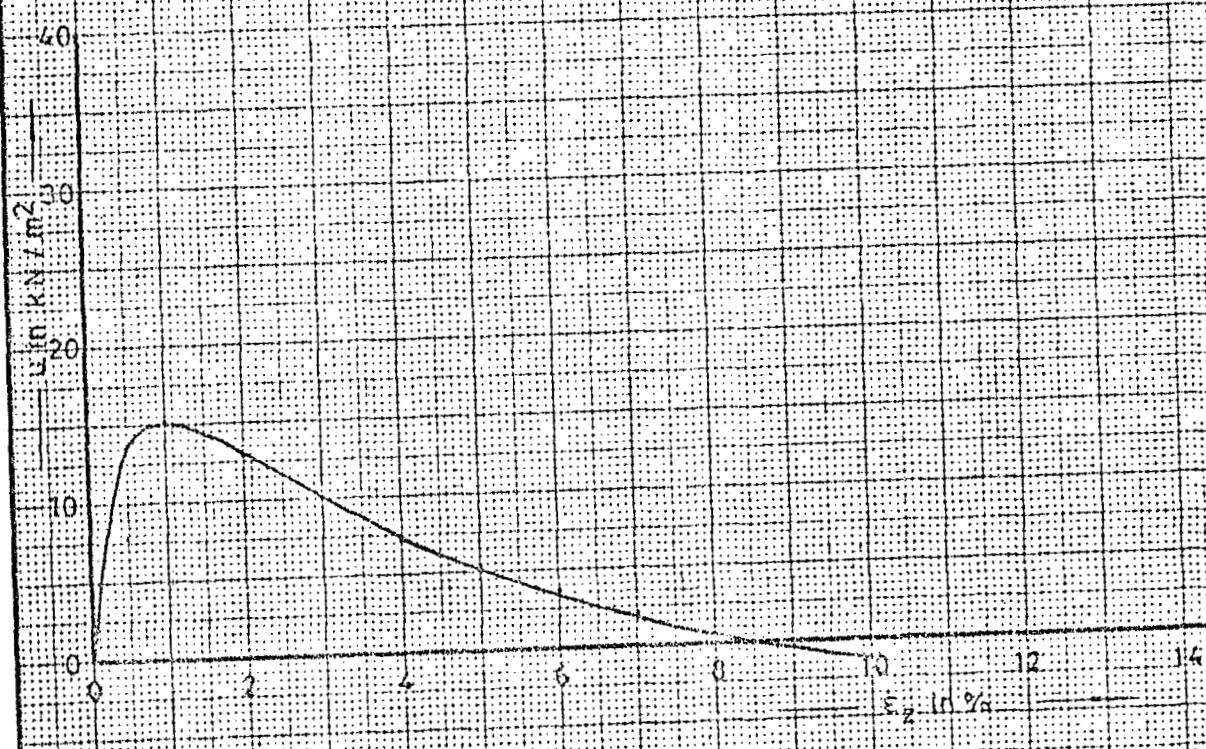
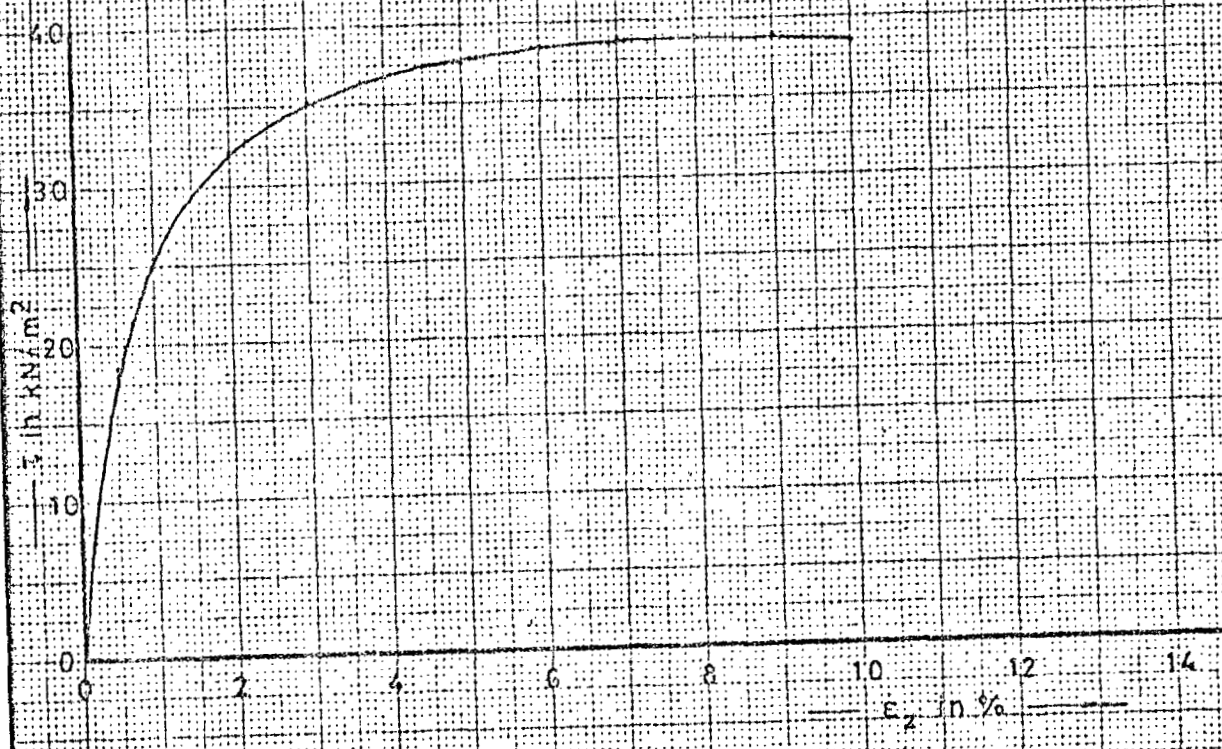
form  
A<sub>4</sub>





 laboratorium voor grondmechanica delft telefoon (015) - 56 92 23 telex 33326 solab nl	1978	get form
	CO-230640	sec
T.Z.L.O. 30 monster 270	BIJL. 29	form A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 0,6 \text{ \% / h}$   
 $\sigma = 31,2 \text{ kN/m}^2$



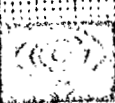
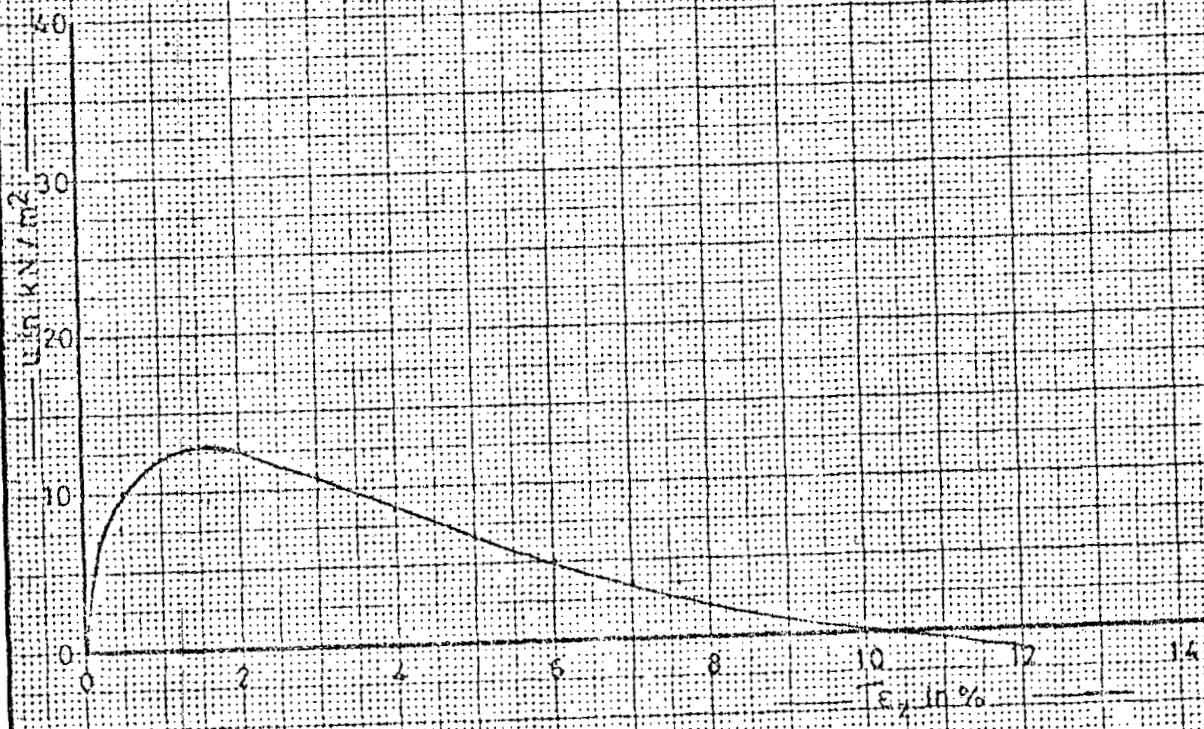
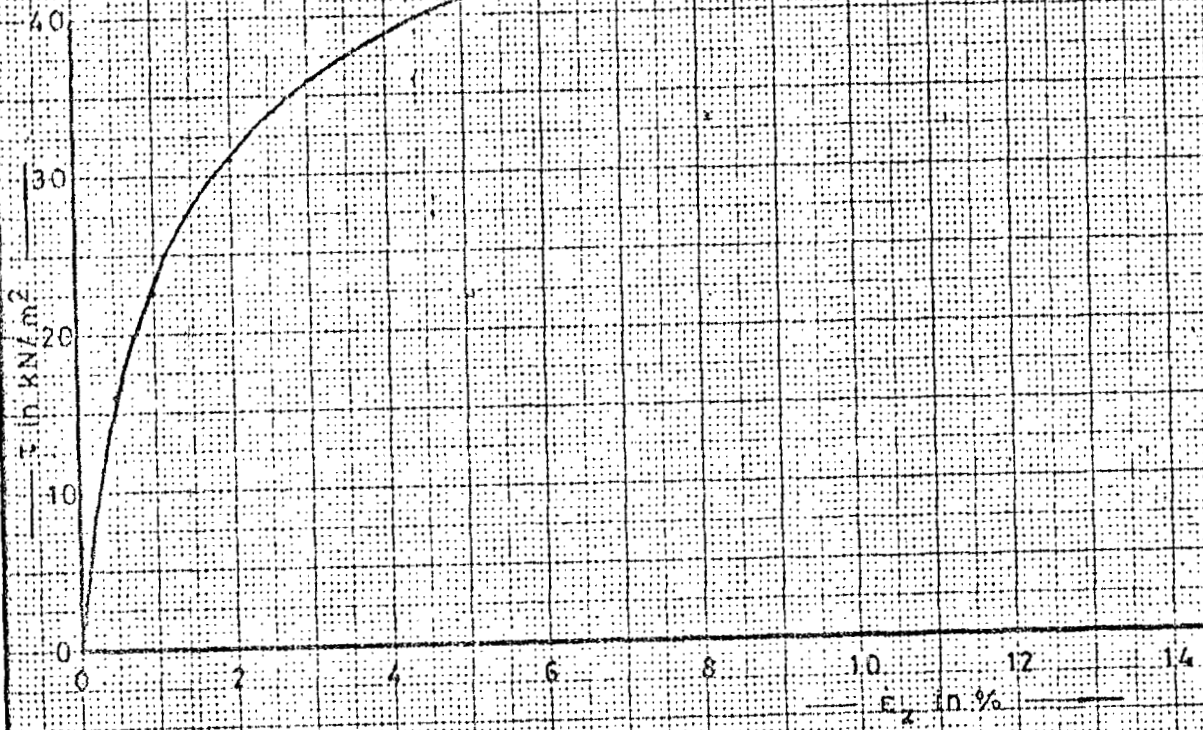
laboratorium voor grondmechanica delft  
 telefoon (015) 56 9223  
 telex 33326 solab nl

1978	get Kraal Bec
CO-230640	
BIJL. 30	norm A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 0,6 \% / h$   
 $\sigma = 39,0 \text{ kN/m}^2$

T.Z.L.O. 30 monster 225



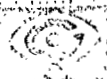
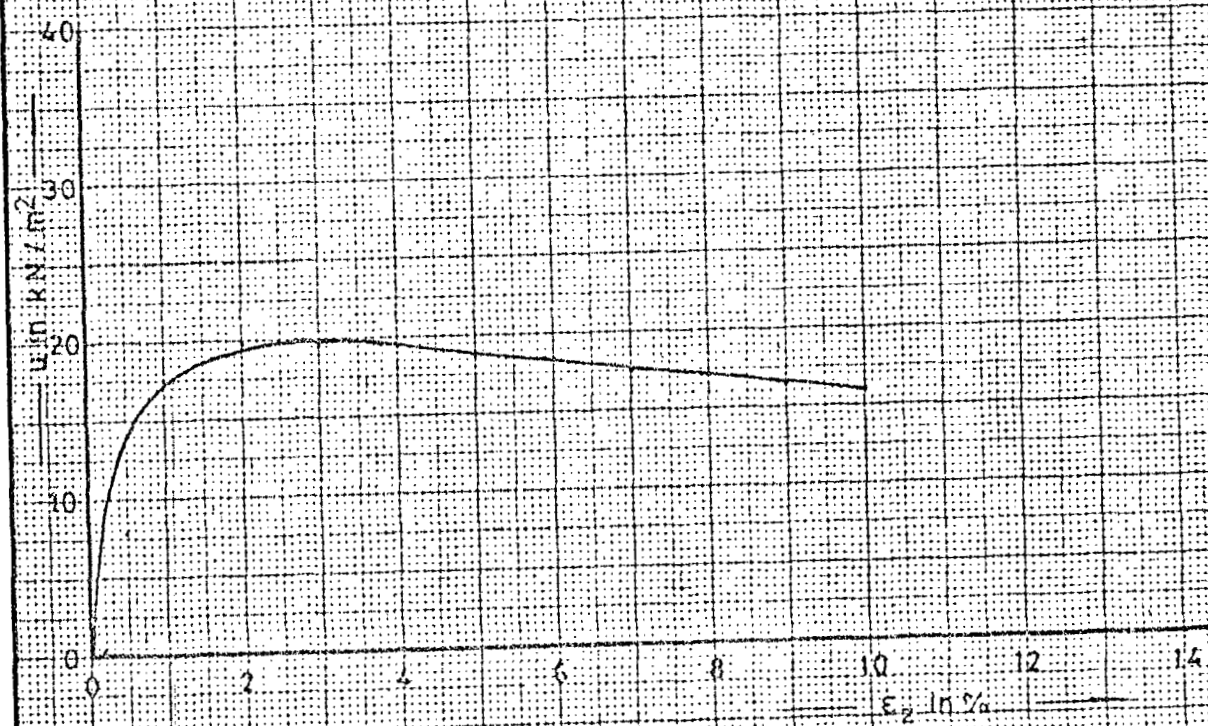


**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) 55 92 23 talex 33326 solab nl

1978	get vond
CO-230640	gec
BIJL. 31	form A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 0,6 \% / h$   
 $G = 410 \text{ kN/m}^2$

T.Z.L.O. 30 monster 214



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33328

1978-08-  
get  
1/10/1  
gpc

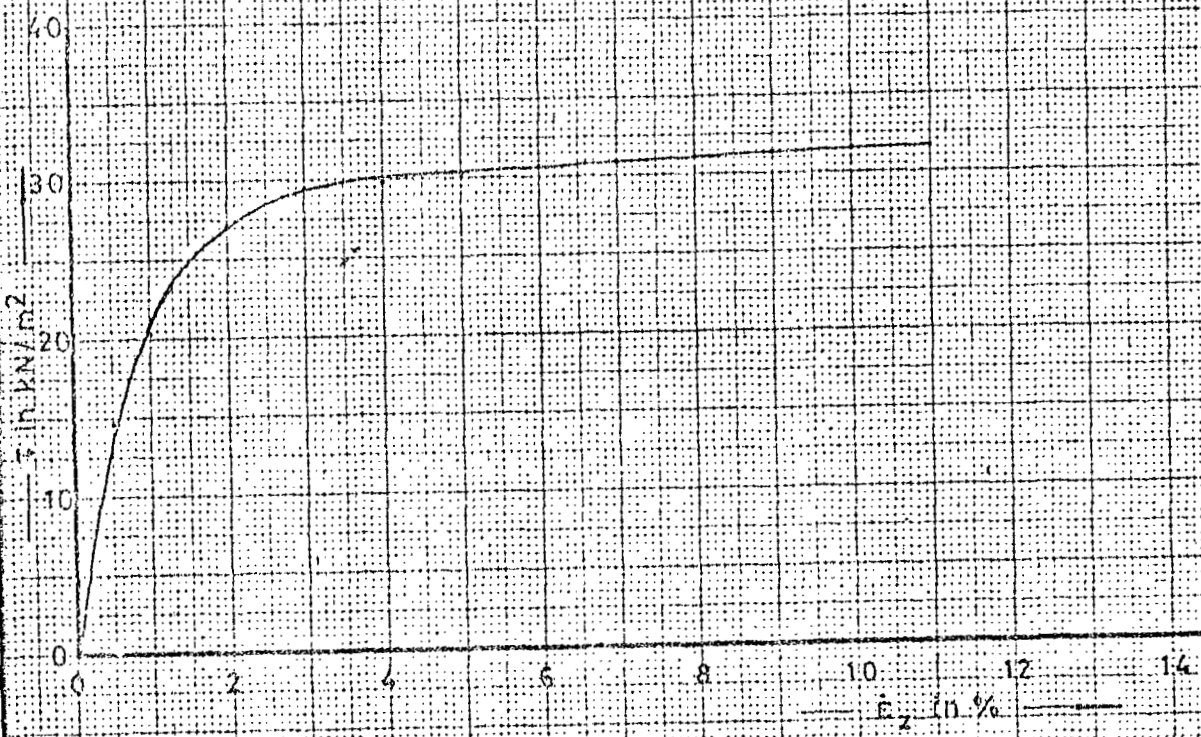
$\dot{\epsilon}_z = 0.6 \% / h$   
 $\sigma' = 41.0 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.Z.L.O. 30 monster 251

BIJL. 32  
norm  
A4





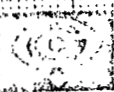
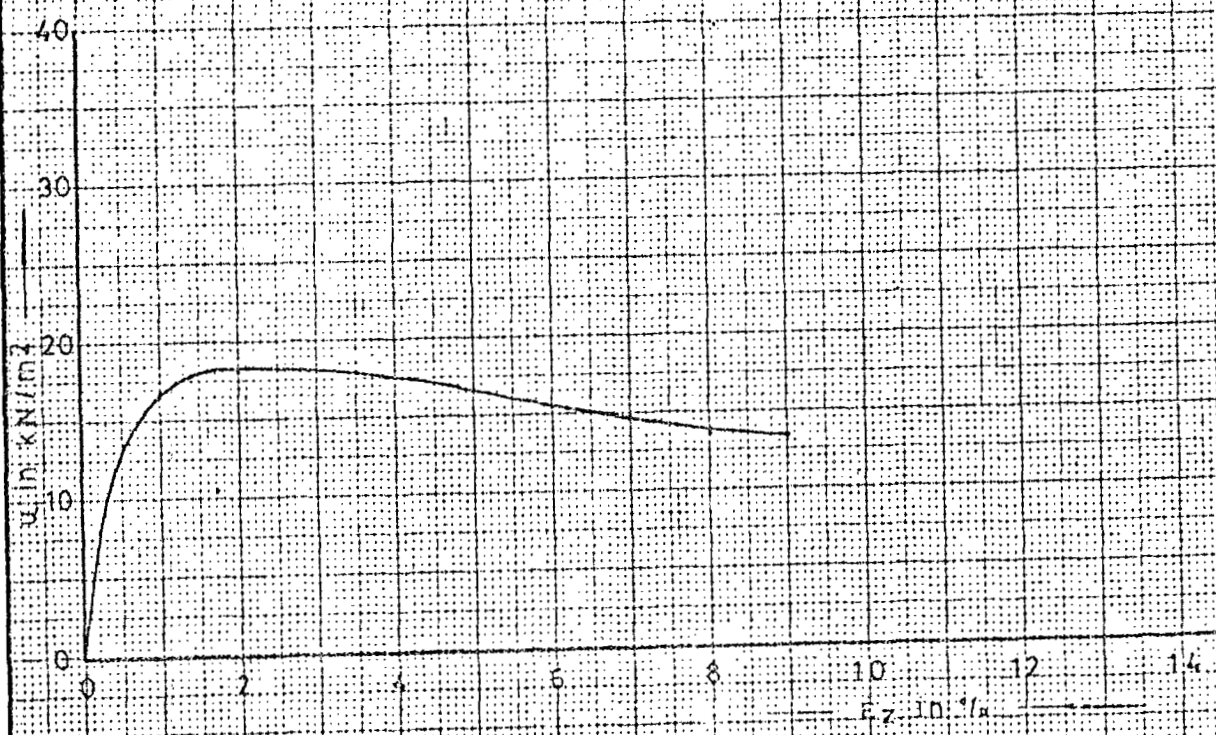
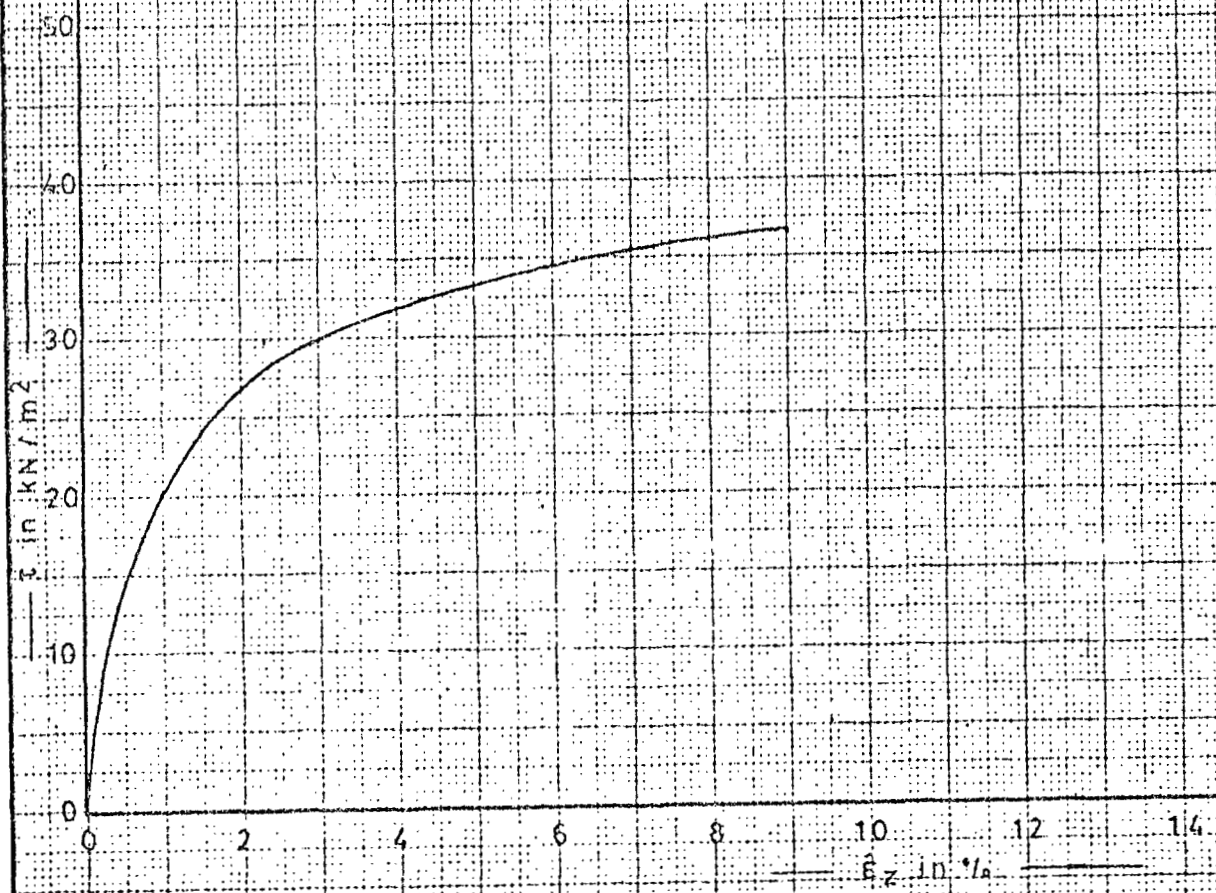
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23

telex 33326 solab nl

1978	get vrou
CO-230640	pec
BIJL. 33	norm A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 0.6 \% / h$   
 $\sigma'_v = 35.2 \text{ kN/m}^2$

T.Z.L.O. 30 monster 275



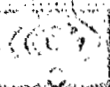
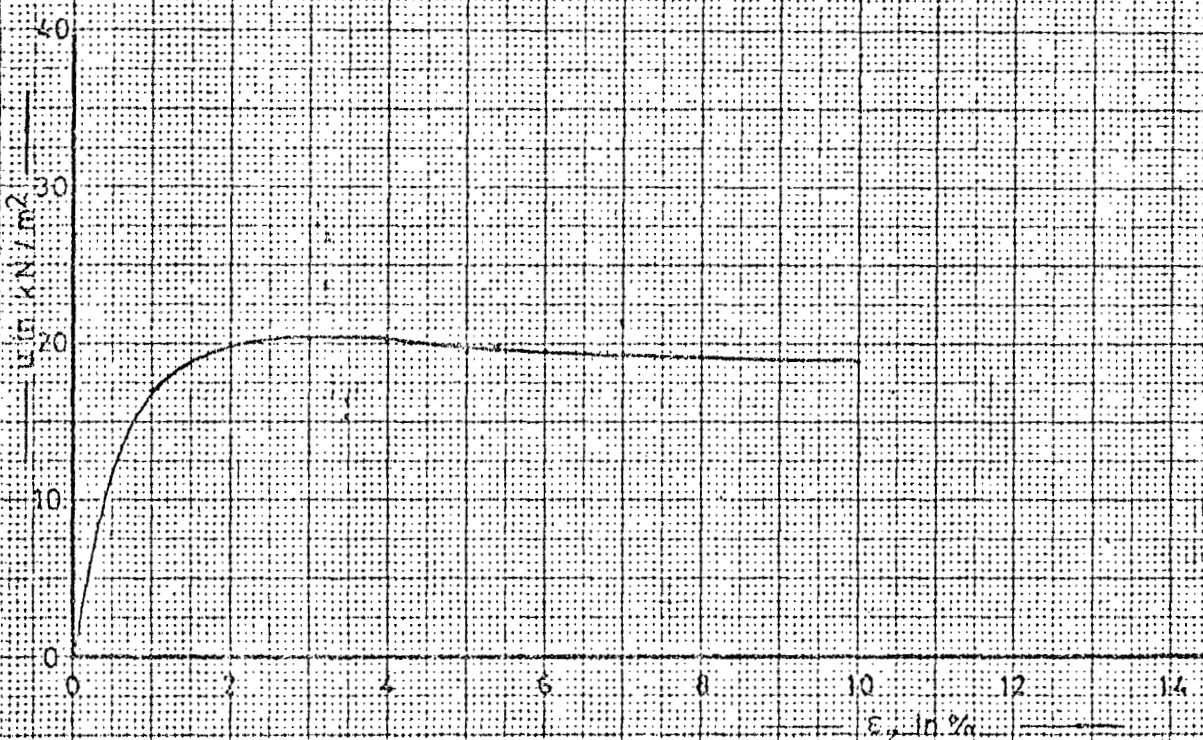
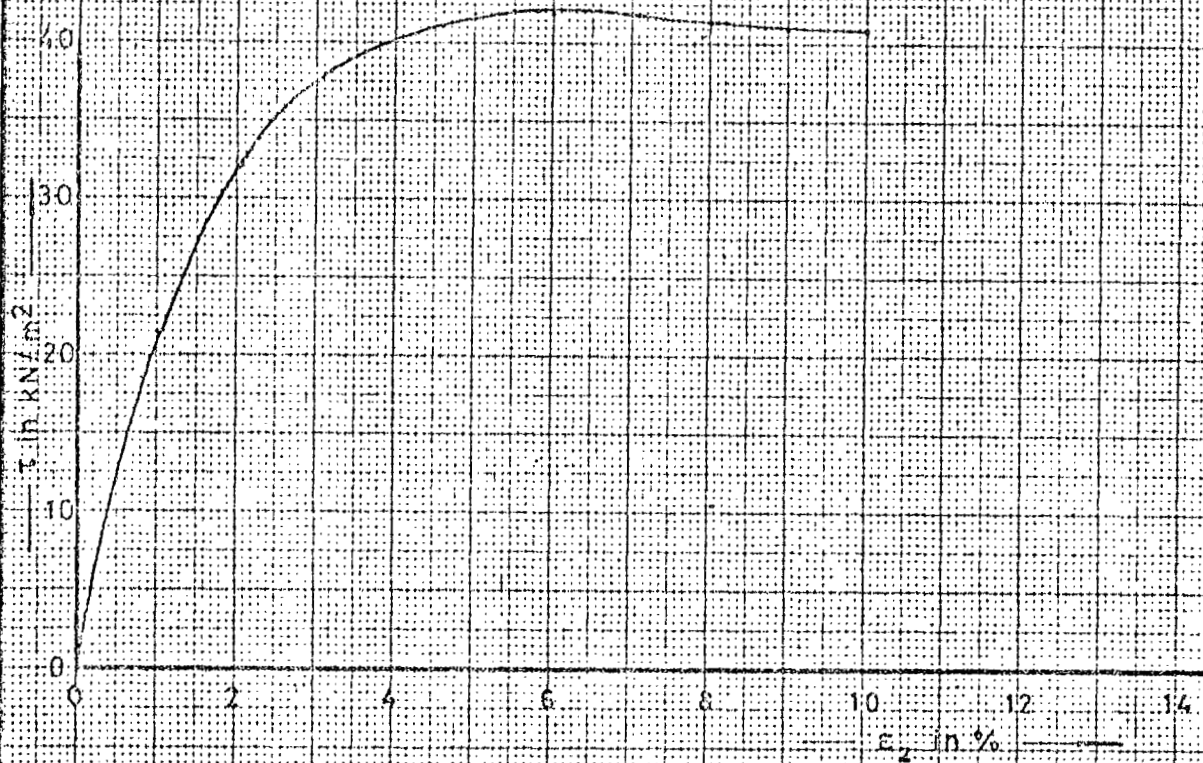
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
telefoon (015) - 56 92 23  
telex 33326 sofab nl

1978	got
CO-230640	goc
BIJL. 34	form
	A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 0,6 \% / h$   
 $\sigma' = 39,0 \text{ kN/m}^2$

T.Z.L.O. 50 monster 289





laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telex 33326 soreb nl

1978

get  
vond  
goc

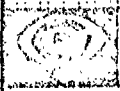
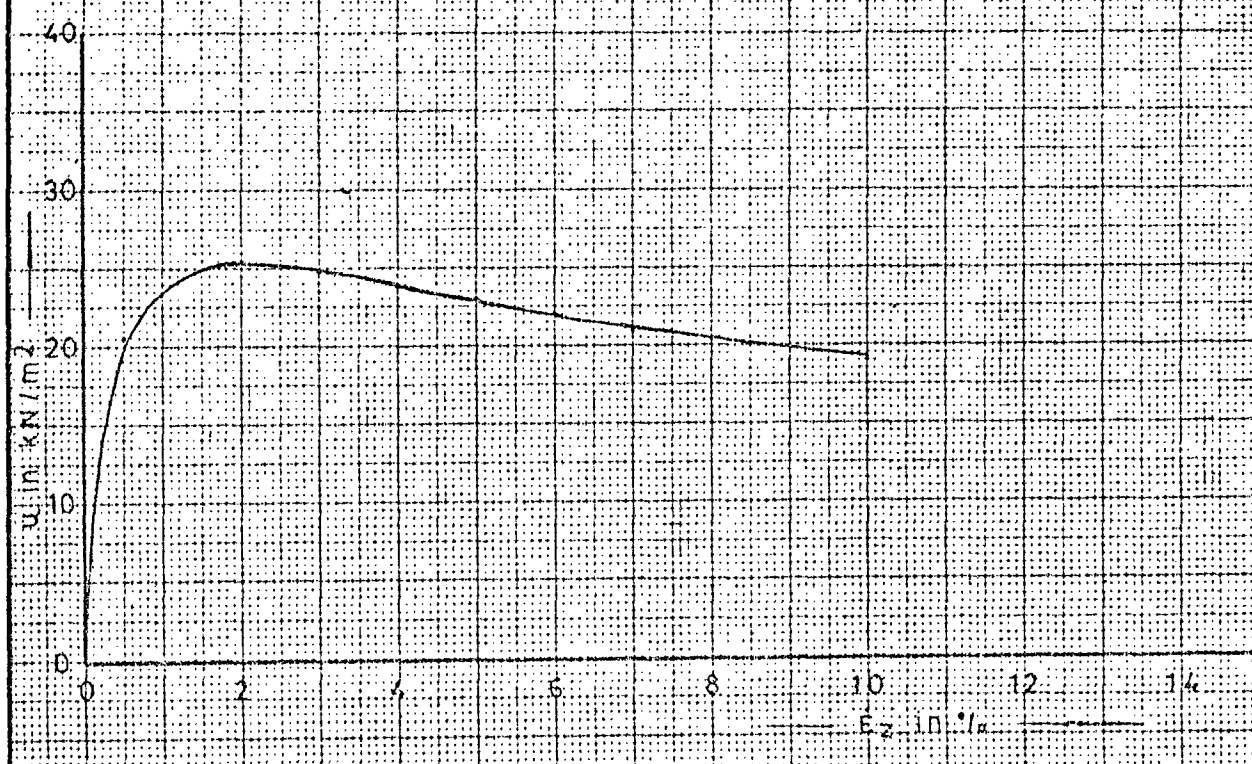
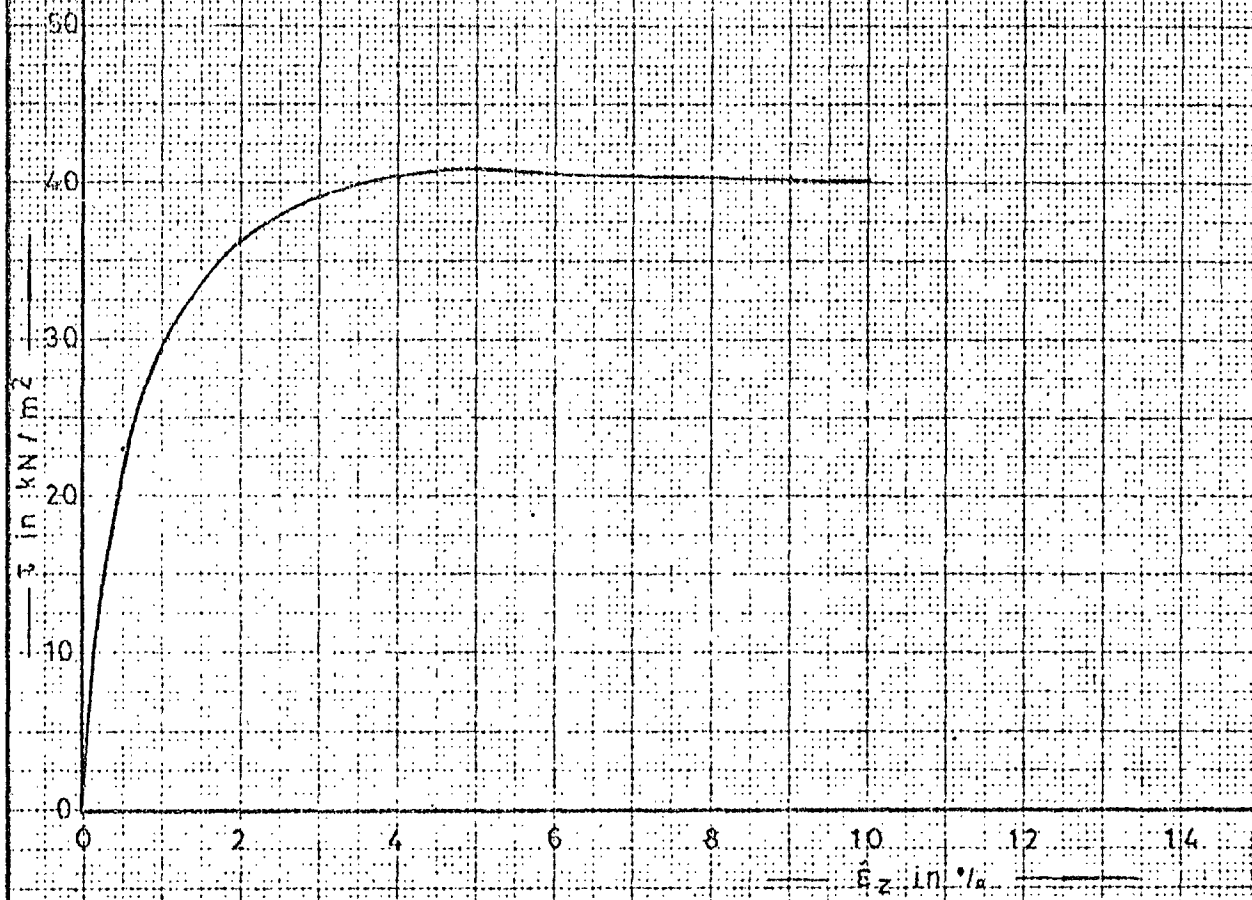
$\dot{\epsilon}_z = 0,6 \% / h$   
 $\sigma' = 45,0 \text{ kN/m}^2$

CO-230640

T.Z.L.O. 50 monster 209

BIJL. 35

form  
A<sub>4</sub>



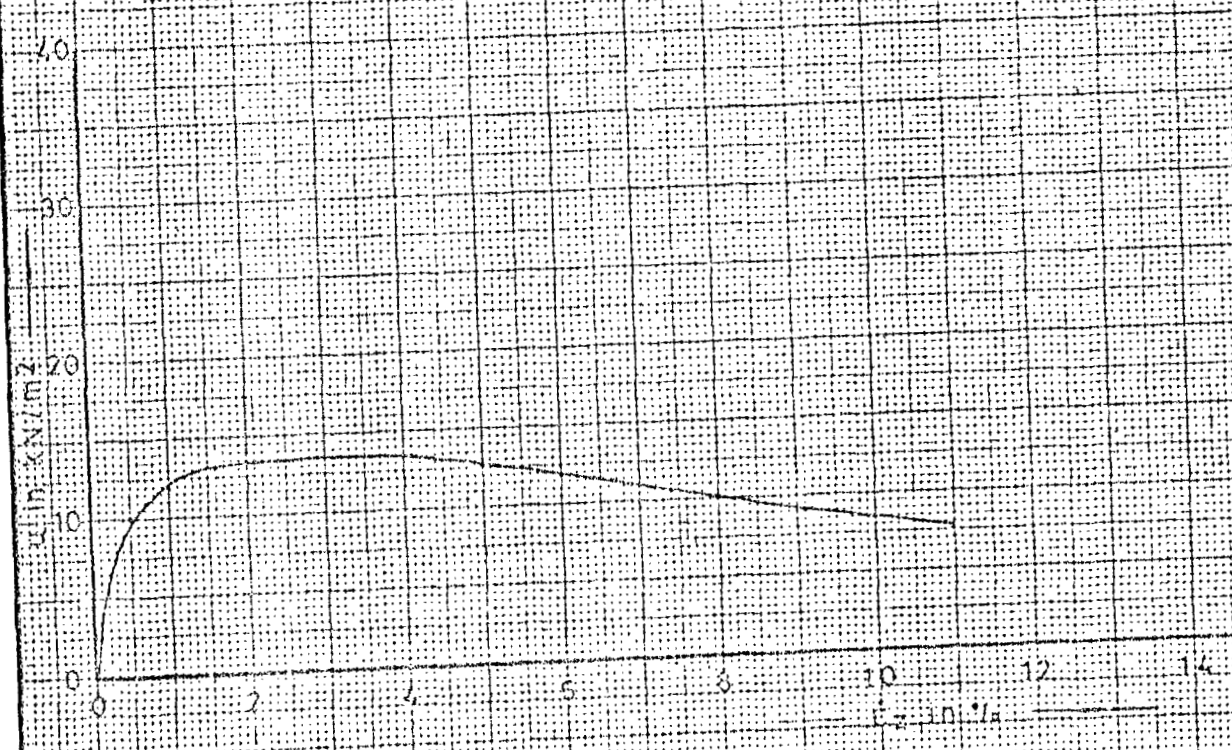
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl


1978<sup>dd</sup>      get  
 voor

T.Z.L.O. 50 monster 260       $\dot{\epsilon}_z = 0,6 \text{ \% / h}$   
 $\sigma' = 64,0 \text{ kN/m}^2$

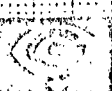
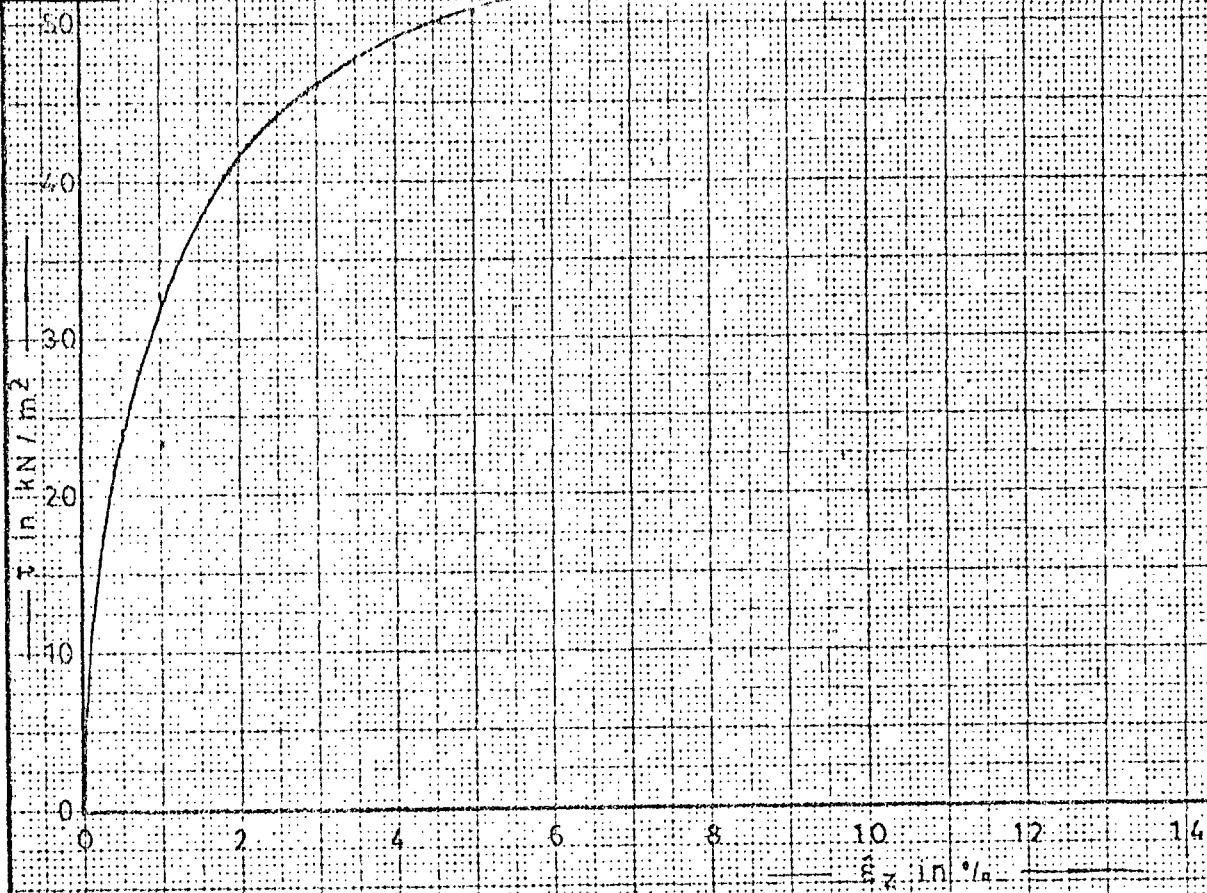
CO-230640      form  
 BIJL. 36      A<sub>4</sub>





 <b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon (015) - 56 92 23 telex 33326 sonab nl	1978	Det <i>Van</i>
	CO-230640	Dec
T.Z.L.O. 50 monster 267	BIJL. 37	form A <sub>4</sub>

$\dot{\epsilon}_z = 0.6 \% / h$   
 $\sigma'_v = 60.2 \text{ kN/m}^2$

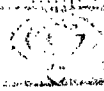
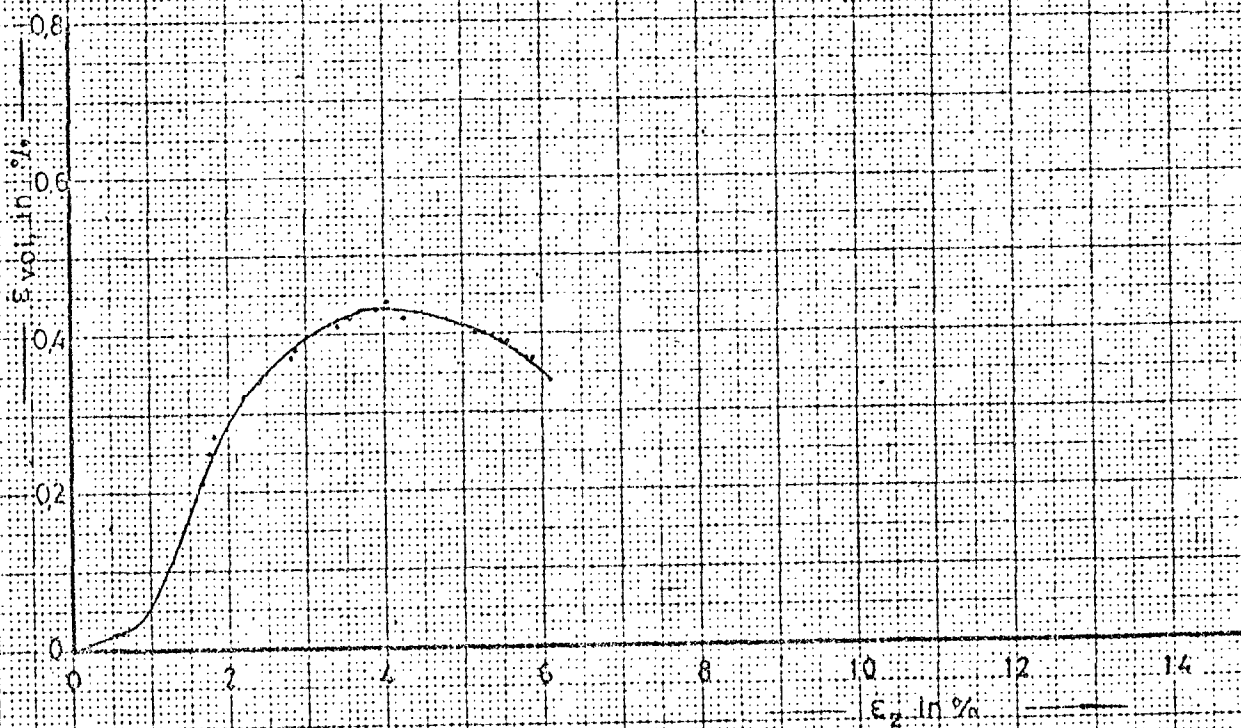
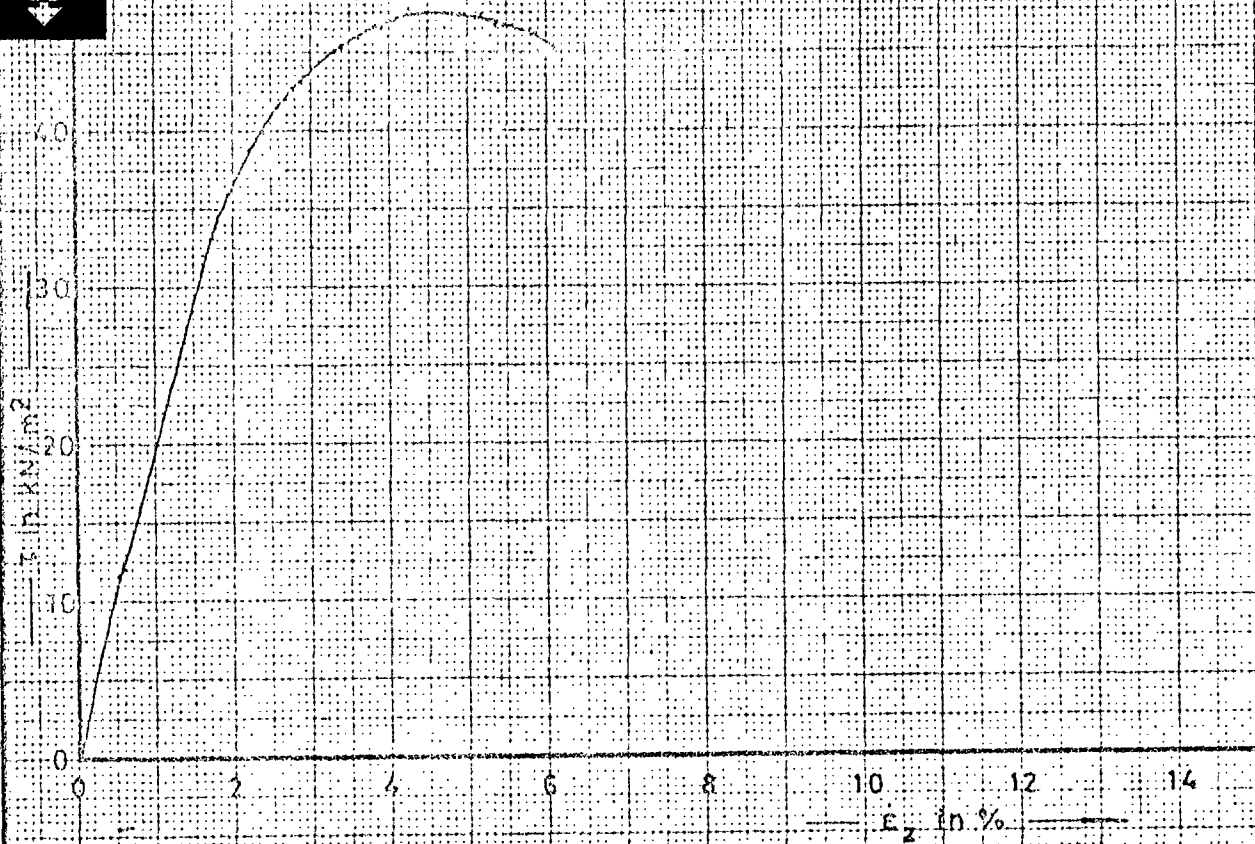


laboratorium voor grondmechanica delft  
 telefoon (015) - 56 92 23  
 telek 33326 solab nl

1978  
 CO-230640  
 BIJL. 38

T.Z.L.O. 50 monster 242  
 $\dot{\epsilon}_z = 0,6 \% / h$   
 $\sigma' = 610 \text{ kN/m}^2$

get  
 voort  
 gec  
 form  
 A<sub>3</sub>

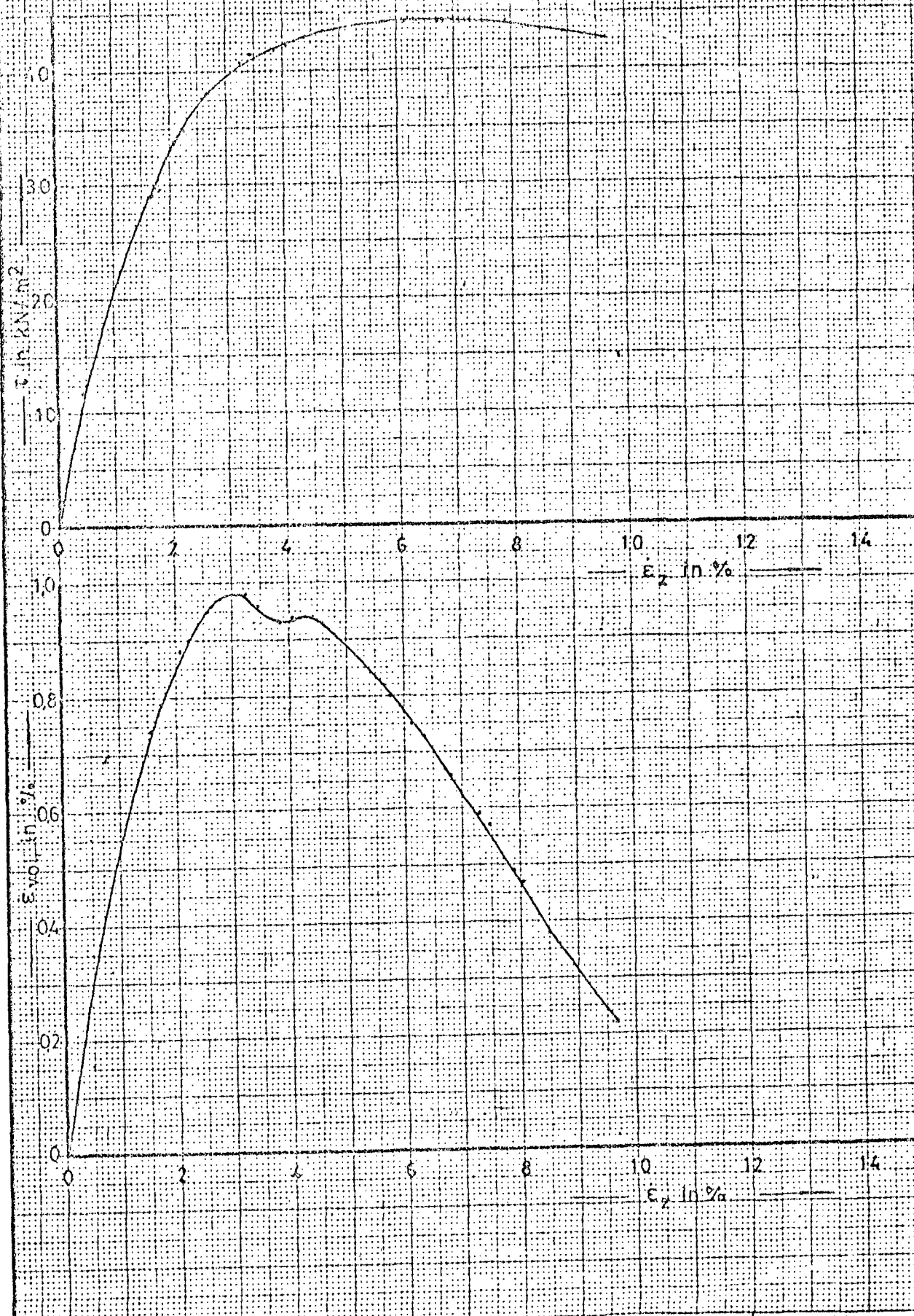


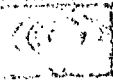
**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

1978  
 CO-230640  
 BIJL. 39  
 get. *[signature]*  
 gec. *[signature]*  
 loc. m  
 A<sub>4</sub>

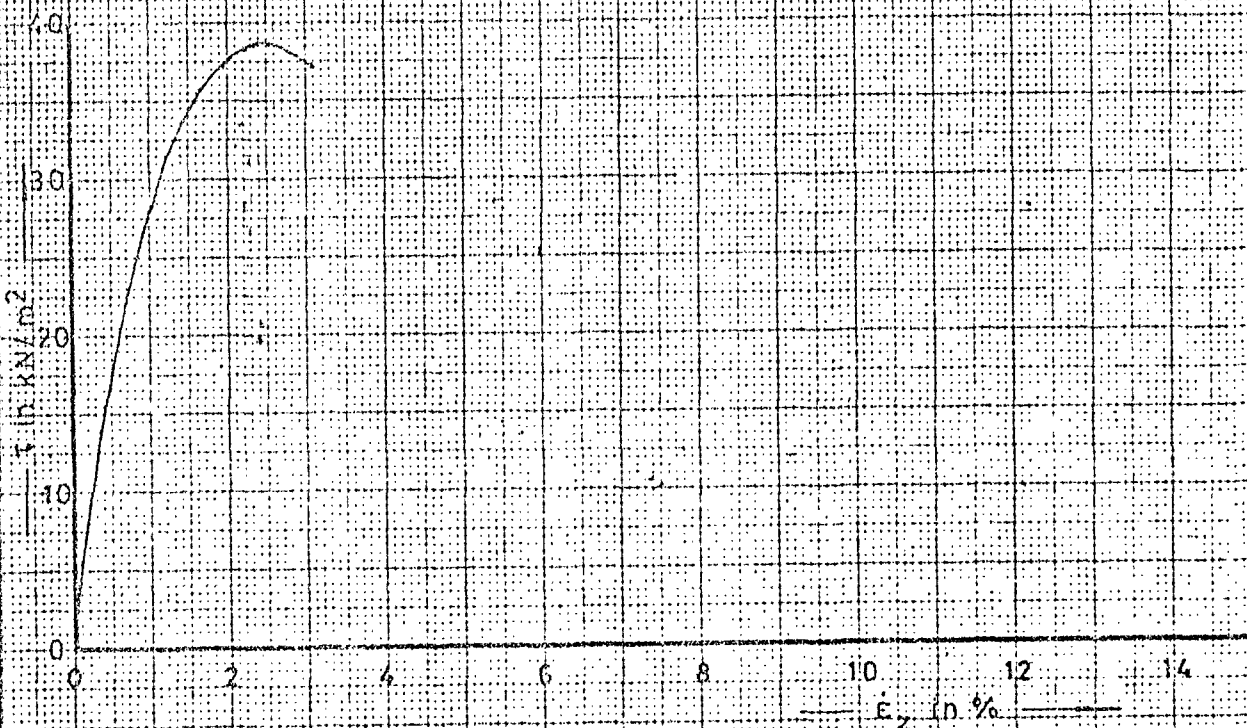
$\dot{\epsilon}_z = 2.33 \cdot 10^{-2} \% / h$   
 $\bar{\sigma} = 37.6 \text{ kN/m}^2$

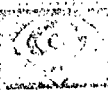
T.L.D. 30      monster 228

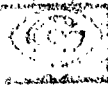
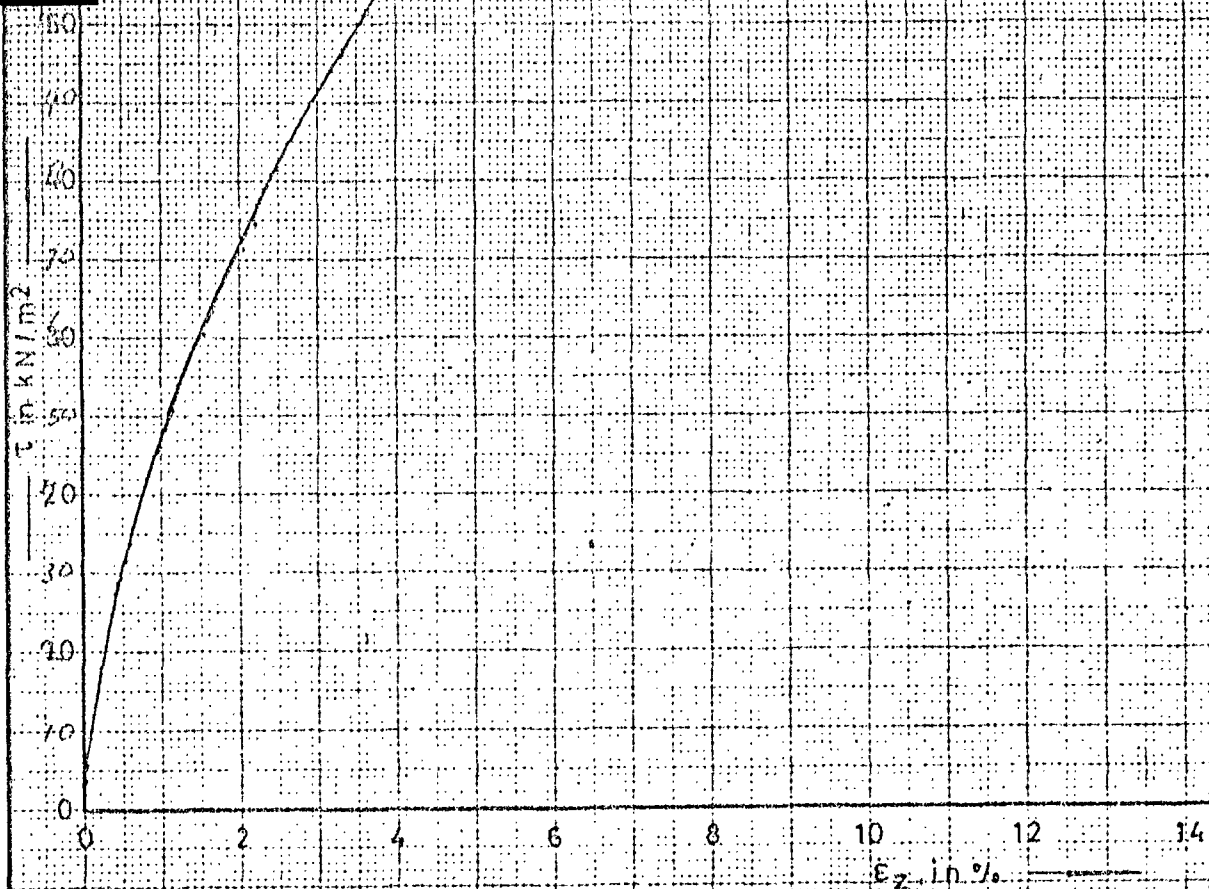


	<b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon (015)-56 92 23 teleex 33320 solab nl	1978	ont van
		CO-230640	gec
T.L.D. 30 monster 232	$\dot{\epsilon}_z = 233 \cdot 10^{-2} \% / h$ $\sigma = 30,0 \text{ kN/m}^2$	BIJL. 40	norm A <sub>4</sub>





	<b>laboratorium voor grondmechanica delft</b> telefoon (015) - 55 92 23	1978	get voul
	$\dot{\epsilon}_z = 2,33 \cdot 10^{-2} \% / h$ $\sigma'_v = 30,0 \text{ kN/m}^2$	CO-230640	dec
T.L.D. 30 monster 236		BIJL. 41	form A <sub>4</sub>



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 solab nl

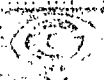
$$\dot{\epsilon}_z = 2,33 \cdot 10^{-2} \% / h$$
$$\sigma = 50,0 \text{ kN/m}^2$$

CO-230640

BIJL. 42

T.L.D. 50 monster 246

get  
1/1001  
doc  
form  
A<sub>4</sub>

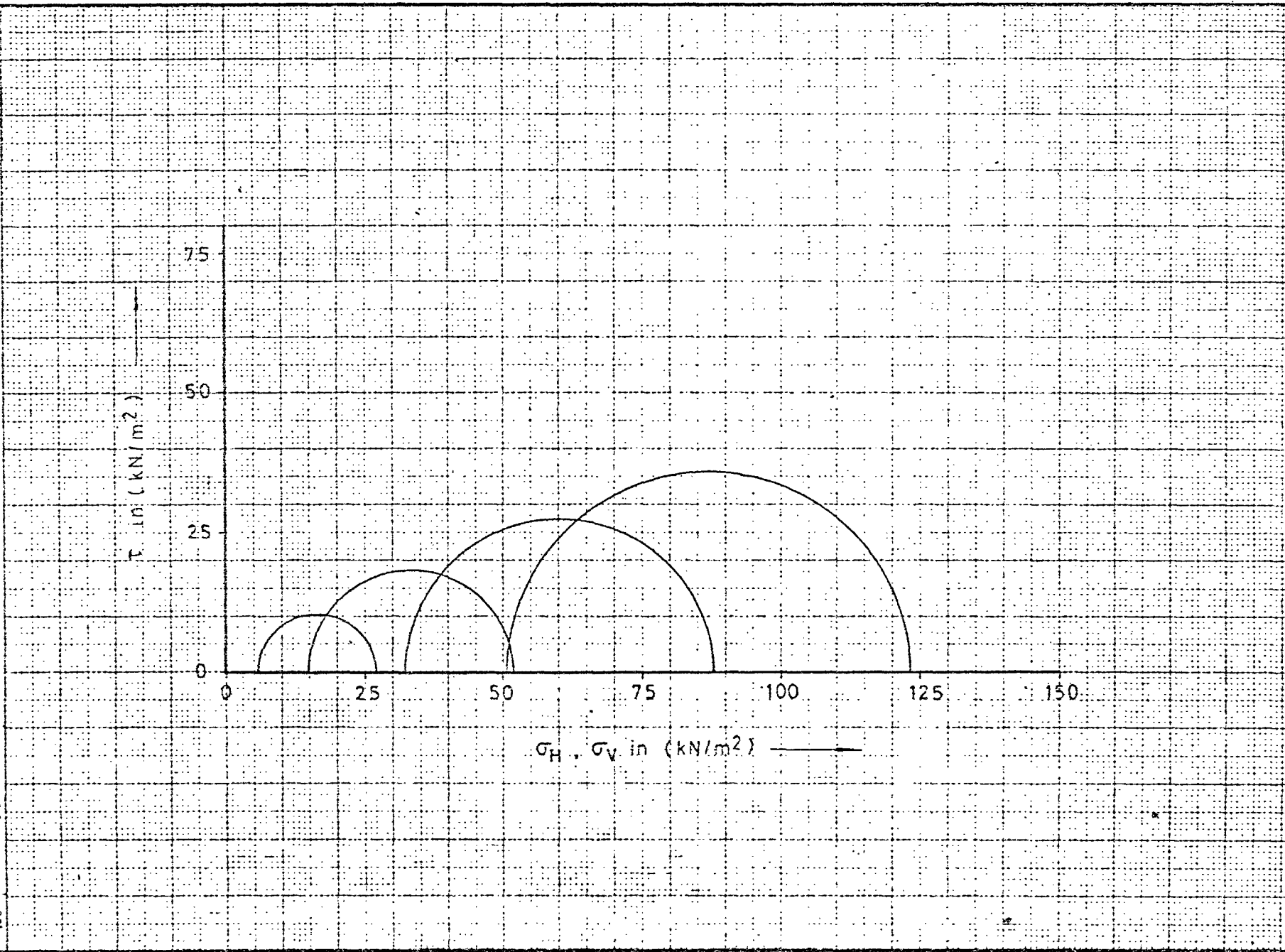


**laboratorium voor grondmechanica delft**  
 telefoon (015) - 56 92 23      telex 33326 solab nl

$\dot{\epsilon}_z = 2,33 \cdot 10^{-2} \% / h$   
 $\sigma = 53,0 \text{ kN/m}^2$

T.L.D. 50      monster 296

da	dat
CO-230640	dec
BIJL. 43	form
	A <sub>4</sub>



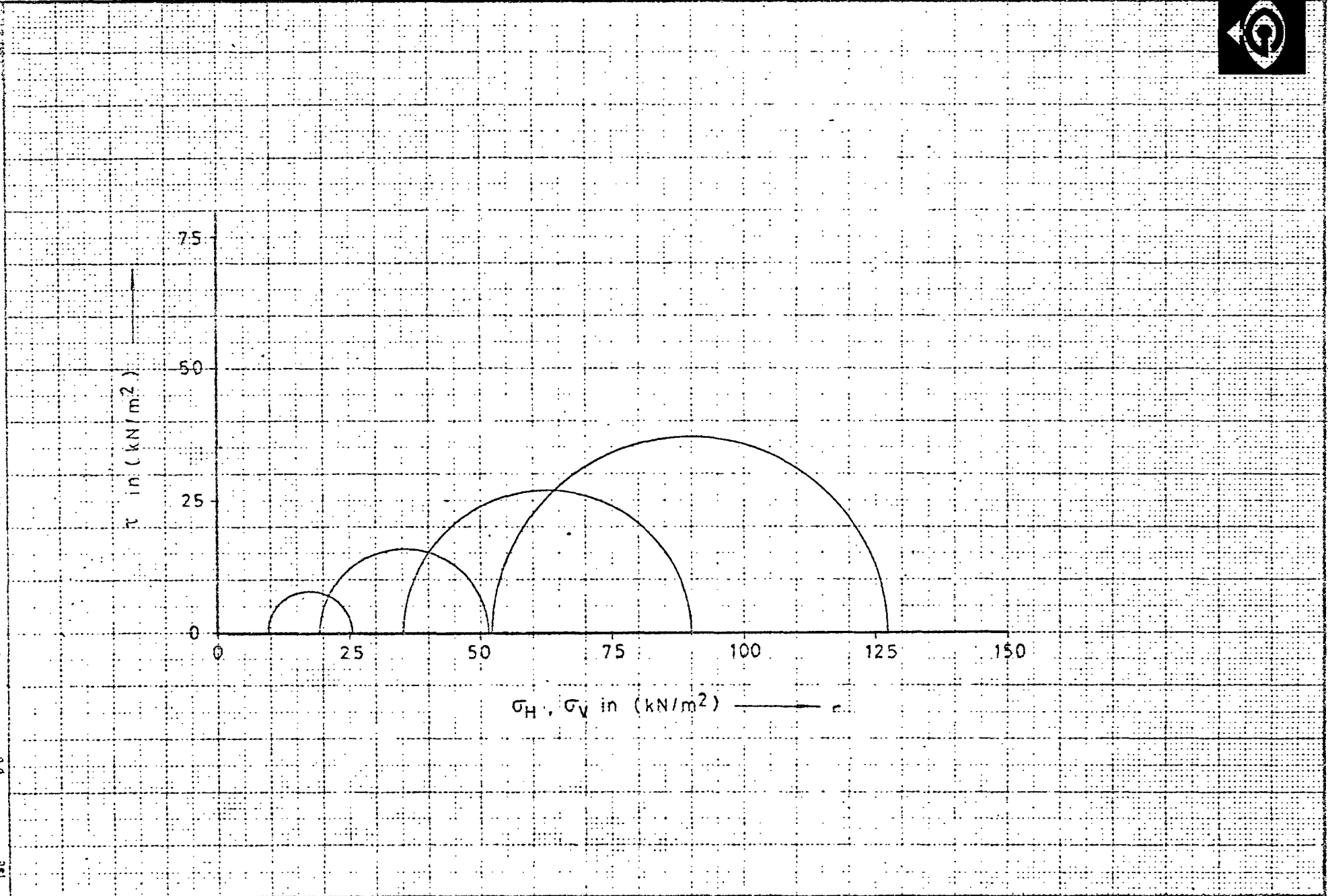
laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) 569221  
teleax 33720 10040 71

CELPROEF monster 219

CO-230640  
BUL 44

A4





laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) 265223

telefax 11724 11140

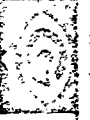
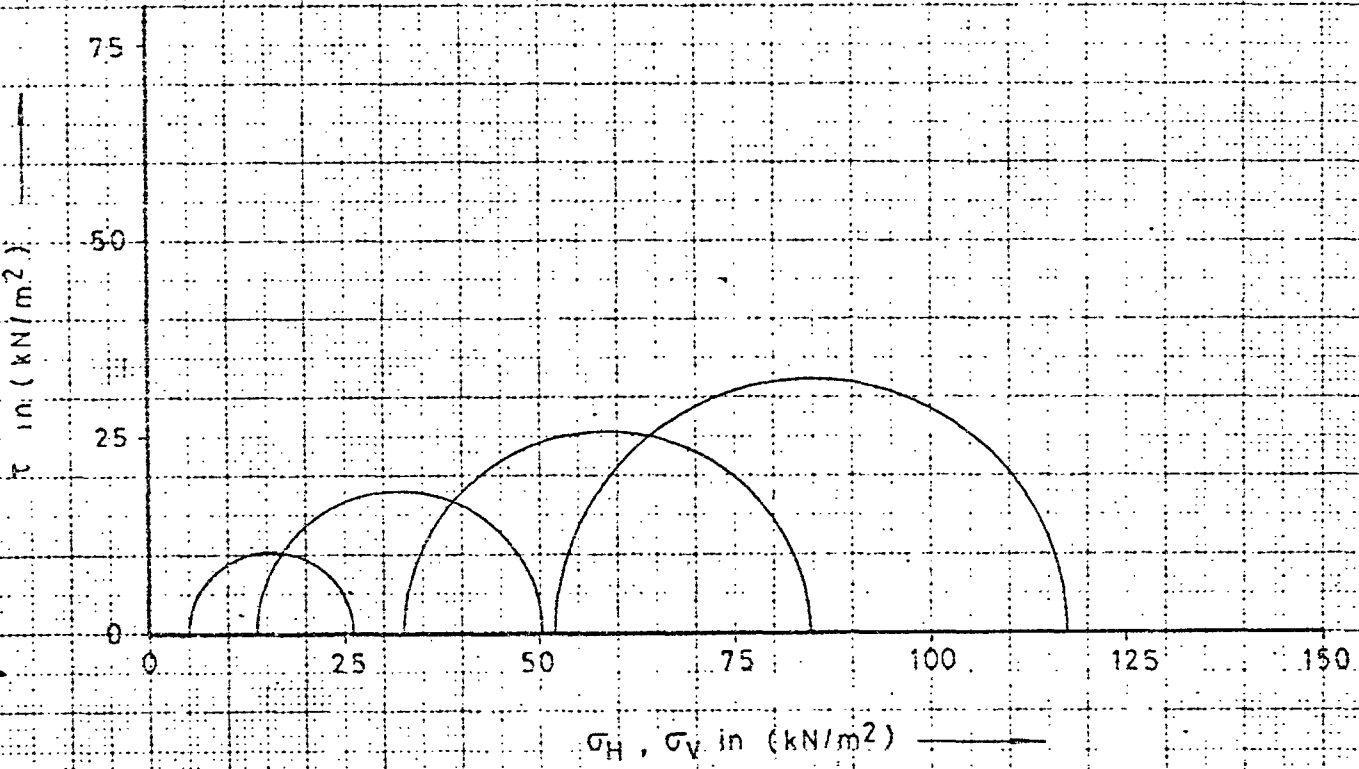
00

CELPROEF monster 223

CO 230640

BUL 45

A4



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon 015 264121

telefax 015 264121

CELPROEF monster 227

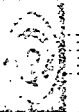
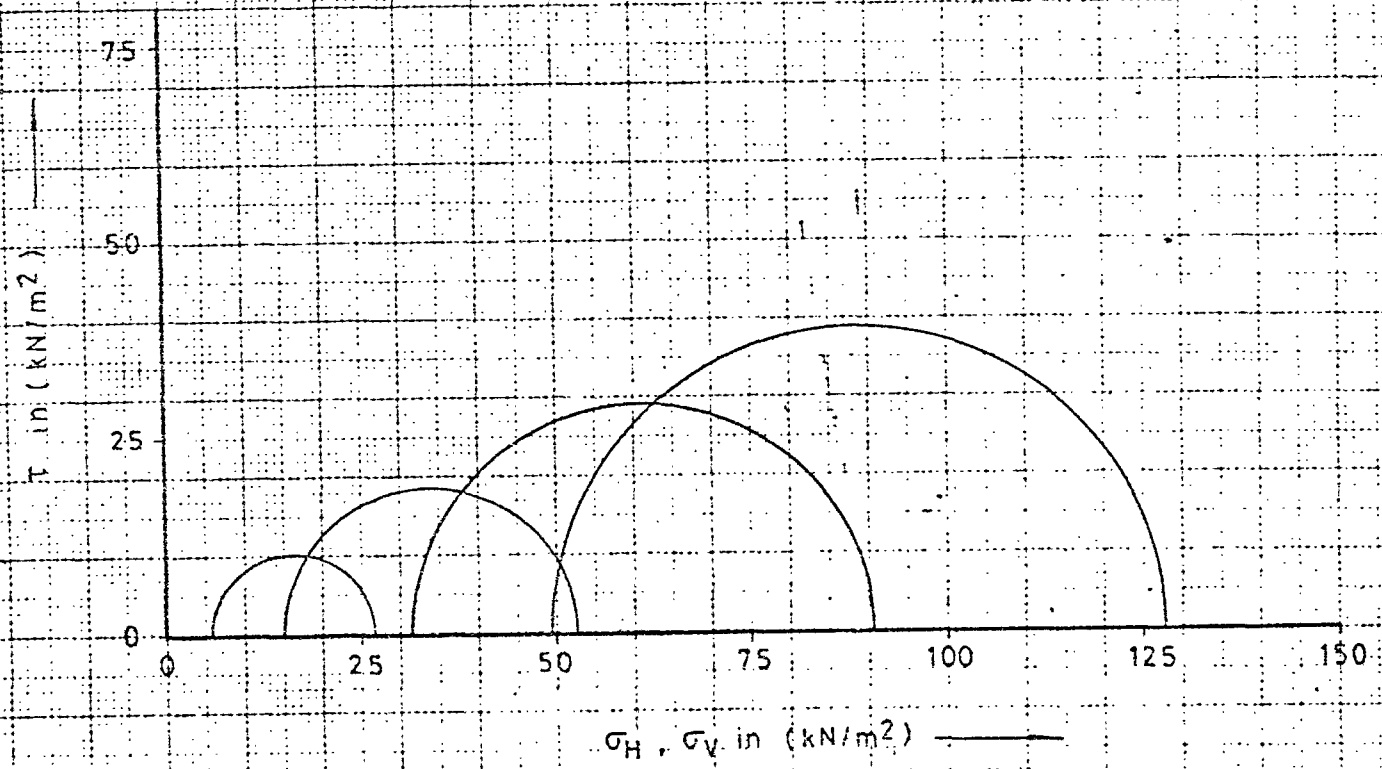
BUL 46

A4

CO-230640

00

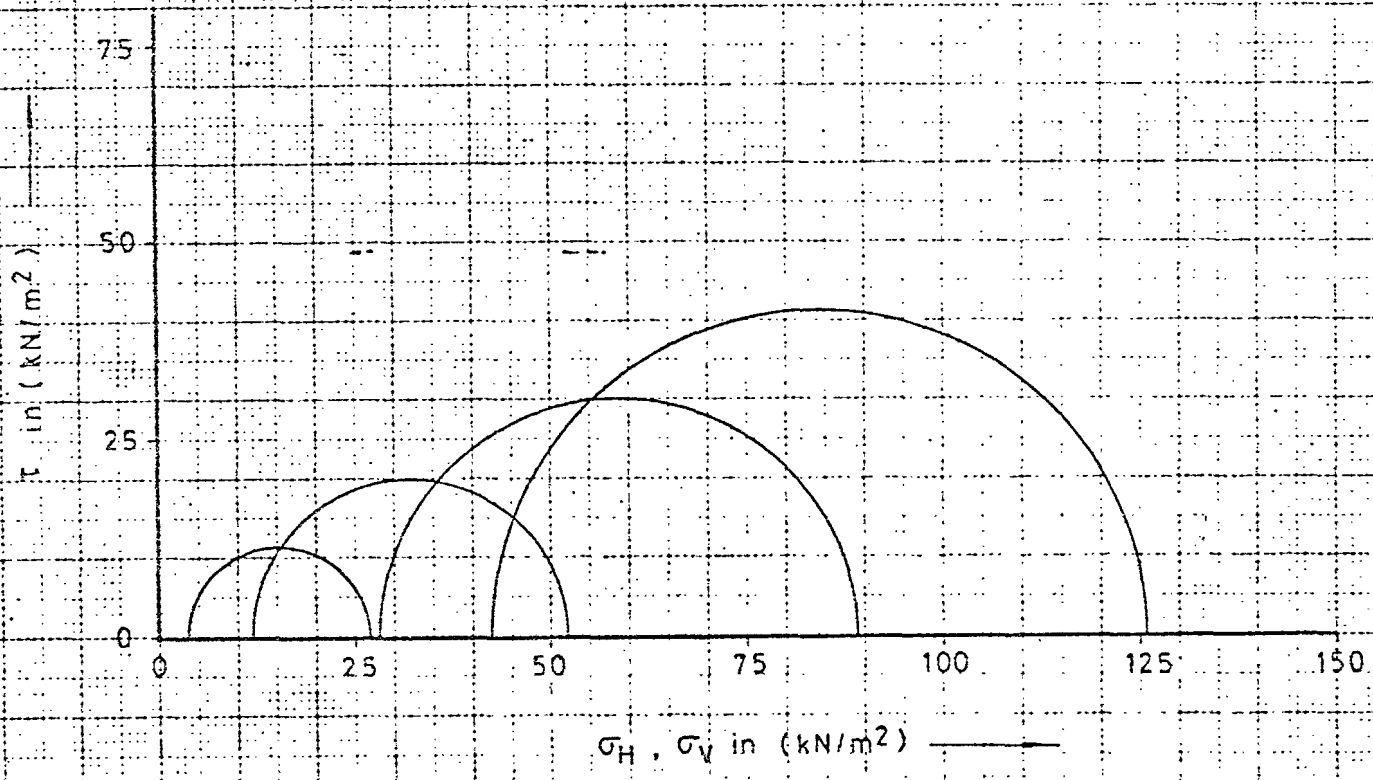
001



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) 269223  
10114 3370 10110 n1

CELPROEF monster 249

CO 230640  
BUL 47  
A<sub>4</sub>



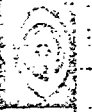
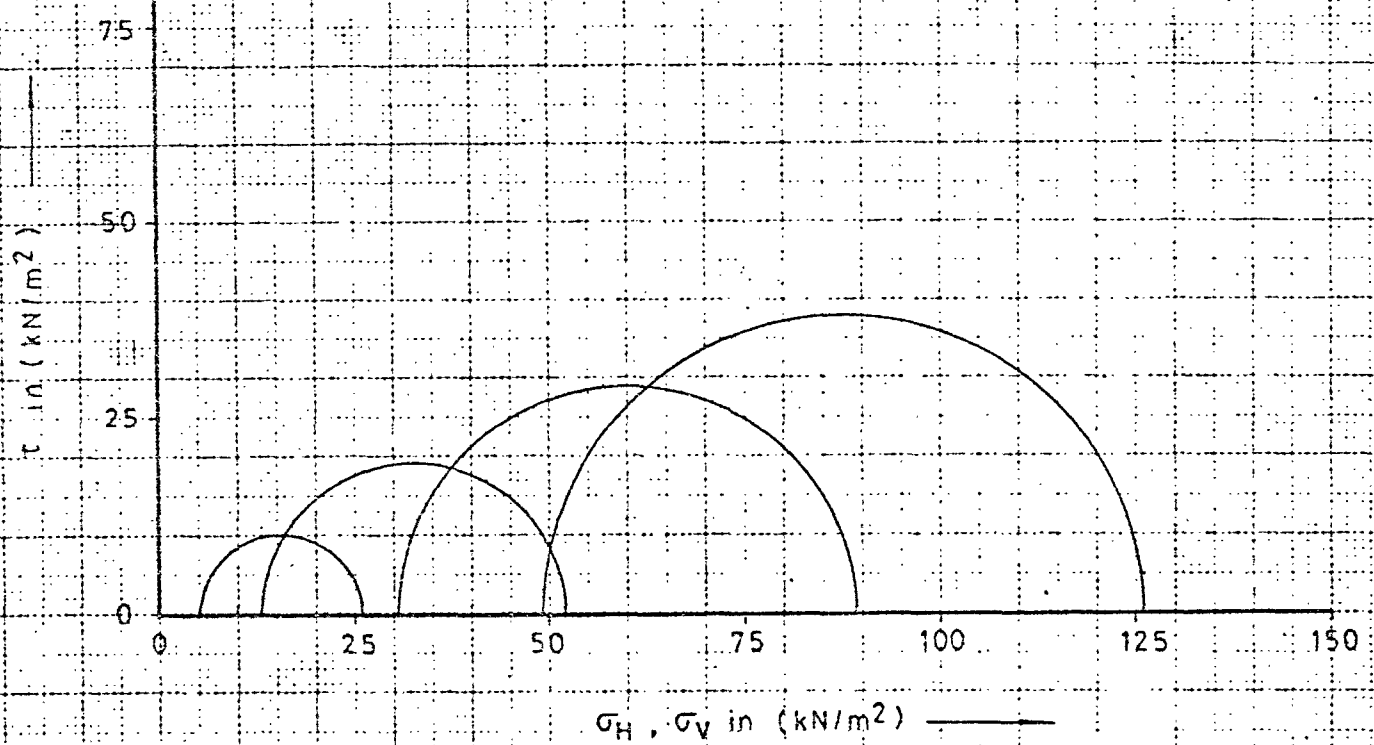
laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (015) 563223  
telefax 13326 1048

CELPROEF monster 271

CO-230640

BUL 48

A.



laboratorium voor grondmechanica delft  
telefoon (0151) 569223  
telefax 13126 3044

CELPROEF monster 293

CO-230640  
BUL 49  
A4

1991  
delft



APPENDIX "A" bij het rapport  
Vergelijkend Onderzoek  
Cel- en triaxiaalproeven

Rapport: 230640--I



In deze appendix zijn de gegevens uit de triaxiaalproeven van de diverse series op de min of meer gestandaardiseerde methode geïnterpreteerd. Dit betekent dat de p en q-waarden zijn bepaald bij respectievelijk de maximaal gemeten waarden van  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  en  $\sigma_1'/\sigma_3'$ .

Tevens zijn in de tabellen nog een aantal gegevens die bij de afzonderlijke triaxiaalproeven worden gemeten.

Bij de tabellen zijn tevens de door middel van de regressie-analyse bepaalde effectieve waarden van de hoek van inwendige wrijving  $\phi'$  en de cohesie  $c'$  opgenomen.

In de volgende tabel A1 zijn de aldaar gevonden waarden van  $\phi'$  en  $c'$  vergeleken met de overeenkomstige waarden van de in het rapport gebruikte analyse, waarbij werd uitgegaan van de resultaten van p en q bij de maximum vervorming.



Tabel A-1 Overzicht van de beproevingsresultaten

Type proef	vlg. interpret. in het rapport			$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}$			$(\sigma_1' / \sigma_3')_{\max.}$		
	$\phi'$	$c'$	r	$\phi'$	$c'$	r	$\phi'$	$c'$	r
TSO	17.5	2.67	0.92	12.9	5.8	0.92	13.3	5.66	0.92
TLO	21.6	1.7	0.96	18.5	3.34	0.99	19.5	2.84	0.94
	17.7	5.43	0.93	16.9	5.73	0.92	17,9	5.87	0.96
TZLO	15.5	5.26	0.72	14.9	5.71	0.70	15.2	5.57	0.72
TLD	24.5	2.13	0.99						
CL-1	16.9	2.61	0.95						
CL-4	15.0	2.26	0.98						

Bij de TLO-proeven (langzame gedraineerde triaxiaalproeven) en de celproeven is de toepassing van de hiervoor aangegeven interpretatie niet relevant.

Uit de in tabel A-1 vermelde resultaten volgt dat, met uitzondering van de TSO-proevenserie, de afwijkingen betrekkelijk gering zijn. Zowel bij  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}$  als  $(\sigma_1' / \sigma_3')_{\max.}$  worden steeds lagere waarden voor de belangrijke parameter  $\phi'$  gevonden dan met de in het rapport gebruikte methode. Dit betekent dat deze laatste methodiek meer betrouwbare waarden voor  $\phi'$  geeft - en daarmee ook voor  $c'$  - dan de gestandaardiseerde methode(n).

Overigens veranderen de voorlopige conclusies van hoofdstuk 9 uit het rapport niet als uitgegaan wordt van de waarden voor  $\phi'$  en  $c'$  die gevonden worden bij  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}$  en  $(\sigma_1' / \sigma_3')_{\max.}$ .





Aanvulling op tabel 6.1 Resultaten TSO-proeven

Monster no	gegevens voor de proef				gegevens na de proef			
	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %
24	1.84	1.35	100	36.3	1.86	1.37	101	35.8
38	1.84	1.35	100	36.2	1.86	1.38	100	34.6
67								36.9
90	1.82	1.32	100	37.9	1.85	1.36	100	35.7
96	1.84	1.35	101	36.8	1.86	1.36	102	36.3
103								34.7
12								
16								34.2
30	1.84	1.35	100	36.3	1.85	1.37	100	35.5
98	1.84	1.35	101	36.8	1.86	1.37	101	35.4
104	1.85	1.36	100	35.6	1.88	1.40	102	34.4
15	1.85	1.36	100	35.7	1.87	1.39	101	34.2
32	1.84	1.35	100	36.4	1.87	1.39	101	34.7
43								34.2
66								34.5
89								33.6
105								33.2
9								31.9
28	1.84	1.35	100	36.0	1.86	1.40	98	33.1
36	1.85	1.36	100	35.7	1.90	1.43	102	33.0
49	1.84	1.35	100	36.1	1.90	1.42	103	33.6
57	1.83	1.33	100	37.2	1.89	1.41	103	34.4
65								33.6
107	1.82	1.33	99	37.3	1.88	1.40	102	34.2



Aanvulling op tabel 6.1 Resultaten TSO-proeven

Monster no	gegevens bij max. ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )					gegevens bij max. $\sigma_1' / \sigma_3'$				
	$\sigma'$ vol kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	$u$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>	$\sigma'$ vol kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	$u$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>
24	14.8	12.6	4.2	23.2	12.6	14.8	12.0	5.0	21.8	12.0
38	15.4	12.3	1.8	25.9	12.3	15.4	11.8	4.6	22.6	11.8
67	15.0	10.3	4.0	21.3	10.3	15.0	10.3	4.0	21.3	10.3
90	15.0	9.8	4.8	20.0	9.8	15.0	9.8	4.8	20.0	9.8
96	13.6	10.1	4.0	19.7	10.1	13.6	10.1	4.0	19.7	10.1
103	15.0	11.2	5.2	21.0	11.2	15.0	11.1	5.4	20.7	11.1
12	30.0	12.8	12.4	30.4	12.8	30.0	12.6	13.0	29.6	12.6
16	23.8	11.7	6.6	28.9	11.7	23.8	11.6	6.6	28.8	11.6
30	29.6	13.5	7.8	35.3	13.5	29.6	13.5	7.8	35.3	13.5
98	23.4	12.7	5.5	28.3	12.7	23.4	12.7	5.5	28.3	12.7
104	28.6	10.6	8.6	30.6	10.6	28.6	10.5	9.0	30.1	10.5
15	37.8	12.3	13.2	36.9	12.3	37.8	11.7	15.0	34.5	11.7
32	34.4	15.3	9.4	40.3	15.3	34.4	14.9	11.6	37.7	14.9
43	40.0	12.8	16.4	36.4	12.8	40.0	niet bepaald			
66	40.0	13.6	11.0	42.6	13.6	40.0	13.3	12.6	40.7	13.3
89	40.0	13.1	13.7	39.4	13.1	40.0	12.5	15.6	36.9	12.5
105	39.0	13.9	11.6	41.3	13.9	39.0	13.6	14.4	38.2	13.6
9	50.0	18.0	16.0	52.0	18.0	50.0	17.6	17.8	49.8	17.6
28	48.0	17.6	15.4	50.2	17.6	48.0	17.6	15.4	50.2	17.6
36	50.6	17.4	20.6	47.4	17.4	50.6	17.1	21.8	45.9	17.1
49	49.8	18.0	16.0	51.8	18.0	49.8	17.8	17.2	50.4	17.8
57	46.0					46.0				
65	50.0	16.4	22.4	44.0	16.4	50.0	16.0	23.4	42.6	16.0
107	44.8	15.6	14.6	45.8	15.6	44.8	niet bepaald			
$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$ $\phi' = 12.92^\circ$ $c' = 5.80 \text{ kN/m}^2$ $r = 0,92$						$\phi' = 13.33^\circ$ $c' = 5.66 \text{ kN/m}^2$ $r = 0,92$				
Als de overgeconsolideerde monsters 24 t/m 103 buiten beschouwing gelaten worden:										
$\phi' = 15.97^\circ$ $c' = 3.53 \text{ kN/m}^2$ $r = 0,92$						$\phi' = 16.79^\circ$ $c' = 3.19 \text{ kN/m}^2$ $r = 0,92$				



Aanvulling op tabel 6.3 Resultaten TLO-proeven

Monster no	gegevens voor de proef				gegevens na de proef			
	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %
10								34.7
29	1.84	1.35	100	36.6	1.86	1.38	100	35.0
42								36.9
51	1.86	1.38	100	35.0	1.90	1.43	103	33.2
58	1.83	1.34	100	37.0	1.86	1.37	101	35.5
100								34.9
17	1.84	1.35	100	36.1	1.87	1.40	100	33.6
23	1.84	1.35	100	36.4	1.90	1.43	102	33.0
25	1.86	1.38	100	35.0	1.90	1.43	102	32.5
41								33.8
93								32.5
97	1.84	1.35	100	36.2	1.89	1.42	101	33.2
34	1.85	1.37	100	35.2	1.97	1.53	104	28.6

Monster no	gegevens bij max. ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )					gegevens bij max. $\sigma_1 / \sigma_3$				
	$\sigma_{H_2}$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	u kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>	$\sigma_{H_2}$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	u kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>
10	30.0	12.6	13.8	28.8	12.6	30.0	12.6	13.8	28.8	12.6
29	28.6	13.7	12.3	30.0	13.7	28.6	13.7	12.3	30.0	13.7
42	30.0	11.2	15.8	25.4	11.2	30.0	11.2	15.8	25.4	11.2
51	34.4	12.6	13.6	33.4	12.6	34.4	12.5	13.8	33.1	12.5
58	27.8	12.8	12.2	28.4	12.8	27.8	12.8	12.2	28.4	12.8
100	30.0	10.0	15.0	25.0	10.0	30.0	9.9	15.2	24.7	9.9
17	46.6	15.5	26.0	36.1	15.5	46.6	15.5	26.0	36.1	15.5
23	46.8	16.5	21.6	41.7	16.5	46.8	16.4	22.0	41.2	16.4
25	41.6	14.8	21.4	35.0	14.8	41.6	niet bepaald			
41	50.0	14.8	25.4	39.4	14.8	50.0	niet bepaald			
93	47.6	16.2	22.0	41.8	16.2	47.6	16.0	22.8	40.8	16.0
97	47.8	15.4	24.8	38.4	15.4	47.8	15.4	24.8	38.4	15.4
34	117.8	33.3	56.3	94.8	33.3	117.8	niet bepaald			
$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$ $\phi' = 18.52^\circ$ $c' = 3.34 \text{ kN/m}^2$ $r = 0.99$						$\phi' = 19.52^\circ$ $c' = 2.84 \text{ kN/m}^2$ $r = 0.94$				



Aanvulling op tabel 6.5 Resultaten TLD-proeven

Monster no	$\sigma_{H_2}$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>
20	28.8	24.6	53.4	24.6
37	30.0	24.8	54.8	24.8
56	29.8	24.6	54.4	24.6
27	49.6	37.5	87.1	37.5
31	51.0	40.1	91.1	40.5

$$\begin{aligned}\phi' &= 24.35^\circ \\ c' &= 2.52 \text{ kN/m}^2 \\ r &= 1.00\end{aligned}$$

Monster no	gegevens voor de proef				gegevens na de proef			
	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ (%)	$w$ (%)	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ (%)	$w$ (%)
20	1.85	1.36	100	35.9	1.88	1.41	100	33.2
37	1.84	1.35	100	36.6	1.87	1.40	100	34.0
56	1.81	1.33	97	36.2	1.87	1.40	100	33.8
27	1.88	1.41	101	33.4	1.89	1.43	100	32.2
31	1.85	1.36	100	35.6	1.91	1.46	100	30.6



Aanvulling op tabel 6.7 Resultaten TZLO-proeven

Monster no	gegevens bij max. ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )					gegevens bij max. ( $\sigma_1 / \sigma_3$ )				
	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	$u$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	$u$ kN/m <sup>2</sup>	$p$ kN/m <sup>2</sup>	$q$ kN/m <sup>2</sup>
77	15.4	11.8	4.8	22.4	11.8	15.4	11.8		22.4	11.8
109	20.8	10.4	12.0	19.2	10.4	20.8	10.4		19.2	10.4
80	22.2	12.3	10.6	23.9	12.3	22.2	12.0		23.2	12.0
79	23.2	10.2	12.2	21.2	10.2	23.2	10.0		20.8	10.0
69	24.4	14.0	15.0	23.4	14.0	24.4	14.0		23.4	14.0
83	32.4	11.1	13.9	29.6	11.1	32.4	11.1		29.6	11.1
76	36.0	13.2	17.2	32.0	13.2	36.0	13.2		31.6	13.2
74	40.6	13.4	23.0	31.0	13.4	40.6	13.4		31.0	13.4
111	41.8	11.6	22.3	31.1	11.6	41.8	11.6		31.1	11.6
48	41.8	11.4	24.8	28.4	11.4	41.8	11.4		28.4	11.4
72	45.6	16.4	25.8	36.2	16.4	45.6	16.4		36.2	16.4
81	46.6	16.0	28.2	34.4	16.0	46.6	16.0		34.4	16.0
$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$ $\phi' = 14.90^\circ$ $c' = 5.71 \text{ kN/m}^2$ $r = 0.70$						$\phi' = 15.19^\circ$ $c' = 5.57 \text{ kN/m}^2$ $r = 0.72$				

Monster no	gegevens voor de proef				gegevens na de proef			
	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %
77	1.89	1.41	97	34.4	1.89	1.44	100	31.7
109	1.86	1.38	102	35.4	1.88	1.39	103	35.4
80	1.88	-	-	-	1.89	1.43	100	32.2
79	1.88	-	-	-	1.89	1.44	100	31.9
69	1.88	1.43	100	32.2	1.89	1.43	100	32.2
83	1.89	1.42	101	33.0	-	-	-	-
76	1.88	-	-	-	1.89	1.43	100	31.9
74	1.88	1.42	100	32.4	1.90	1.45	100	31.3
111	-	-	-	-	1.89	1.41	102	33.6
48	1.84	-	-	-	1.87	1.40	99	33.3
72	1.87	1.42	96	31.5	1.89	1.43	100	32.4
81	1.88	-	-	-	1.89	1.45	97	29.8



Aanvulling op tabel 6.9 Resultaten TLO-proeven

Monster no	gegevens bij max. ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )					gegevens bij max. ( $\sigma_1 / \sigma_3$ )				
	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	u kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>	$\sigma_H$ kN/m <sup>2</sup>	$\tau$ kN/m <sup>2</sup>	u kN/m <sup>2</sup>	p kN/m <sup>2</sup>	q kN/m <sup>2</sup>
47	27.0	12.8		27.8	12.8	27.0	12.7		27.1	12.7
110	24.0	14.8		27.6	14.8	24.0	14.5		24.7	14.5
82	20.0	13.9		27.1	13.9	20.0	14.0		27.0	14.0
70	57.6	21.6		51.0	21.6	57.6	21.6		51.0	21.6
75	44.2	16.1		40.1	16.1	44.2	16.0		36.0	16.0
113	45.4	15.6		40.0	15.6	45.4	niet gemeten			
$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$  $\phi' = 16.85^\circ$ $c' = 5.73 \text{ kN/m}^2$ $r = 0.92$						$\phi' = 17.86^\circ$ $c' = 5.87 \text{ kN/m}^2$ $r = 0,96$				

Monster no	gegevens voor de proef				gegevens na de proef			
	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %	$\gamma_{nat}$ t/m <sup>3</sup>	$\gamma_{droog}$ t/m <sup>3</sup>	$S_r$ %	w %
47	1.84	1.34	100	36.6	1.82	1.34	97	35.9
110	1.83	1.34	99	36.5	1.84	1.37	99	34.7
82	1.88	1.44	97	30.7	1.88	1.42	99	32.2
70	1.87	1.42	97	31.5	1.88	1.43	98	31.6
75	1.87	1.42	98	31.9	1.90	1.44	99	31.2
113	1.84	1.37	97	34.3	1.86	1.39	98	33.5