

## STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

### UNDERSÖKNING AV SKJUVKRAFTER I LERA UNDER LÅNGSAM DEFORMATION

#### INNEHÅLL

	<u>Sidor</u>
SAMMANFATTNING	1
1. INLEDNING	
1.1 - Ansett med försöken	3
1.2 - Litteraturstudier	3
1.3 - Program för försöken	6
1.4 <b>UNDERSÖKNING AV SKJUVKRAFTER I LERA UNDER LÅNGSAM DEFORMATION</b>	8
2. UTFÖRANDE	
2.1 - Bengt H Fellenius	10
2.2 - Förfarande vid försöken	10
2.3 - Jord	11
2.4 - Felkällor	12
3. RESULTAT	
3.1 - Förberedande försök	14
4. LITTERATURREFERENSER	19
5. BILAGOR	
Slutrapport till Statens råd för byggnadsforskning (anslag nr C 230)	
Bilaga 1 - Fotografier	
Bilaga 2 - Diagram	

Stockholm februari 1970

### SAMMANFATTNING

Denna rapport redovisar resultat från direkta skjuvförsök med en specialkonstruerad skjuvbox, där lera skjuvats mot en betongyta vid varierande skjuvningshastighet, 0,01, 0,10 och 1,00 mm/timme. Vid försöken studerades även inverkan på skjuvningsmotståndet av ett 1,0 mm asfaltlager på betongytan. Försöken utfördes på lerprov med 5,0 mm tjocklek och 45 x 157 mm yta. Lerproven upptogs från 5,0 m och 20,0 m djup och fick under ett dygn före skjuvningen konsolidera för en vertikallast som motsvarade det effektiva överlagringstrycket på provtagningsnivån. Vertikallasten kvarlåg under skjuvningen. Försöken utfördes med såväl förhindrad som oförhindrad vertikaldeformation av lerprovet.

Avsikten med försöken var att i laboratoriet försöka att reproducera vad som sker längs en betongpåles mantelyta, när den omgivande jorden sätter sig i förhållande till pålen. Dels skulle undersökas om de uppträdande skjuvmotstånden var beroende av skjuvningshastigheten och dels i vad mån skjuvmotstånden kan reduceras med hjälp av ett asfaltlager på pålens mantelyta.

De vid försöken erhållna maximala skjuvmotstånden var genomgående ca 50% större än de värden som bestämdes från konförsök och vingborring. Detta har sin grund i den hållfasthetsökning som skedde under det inledande konsolideringsdygnet och den konsolidering som ägde rum under skjuvningen. Vid försöken med förhindrad vertikaldeformation minskade skjuvmotståndet till ett residualvärde som var 30-50% lägre än det maximala skjuvmotståndet. Detta har samband med den samtidigt erhållna minskningen av vertikallasten. Skjuvningen åstadkom dock även vid dessa försök en konsolidering av provet.

Den uppställda hypotesen att skjuvmotstånd i lera vid långsam deformation skulle vara hastighetsberoende har inte kunnat verifieras. De skillnader som erhållits mellan jämförbara försök har inte följt något särskilt mönster, utan berott på andra betingelser som störning vid provtagning och trimning av provet. Det kan dock inte helt uteslutas att det maximala skjuvmotståndet

under verkliga förhållanden, dvs runt en i lera slagen påle, är hastighetsberoende.

Den vid försöken ansatta lägsta deformationshastigheten 0,01 mm/timme är den som motsvarar normalt förekommande sättningshastigheter i verkligheten, ca 10 cm/år. Vid en rörelse av denna storlek mellan en påle och omgivande lera kan, att döma av denna undersökning, skjuvmotståndet uppgå till samma storleksordning som lerans skjuvhållfasthet.

Det ovan sagda innebär att långa stödpålar i vissa fall kan erhålla avsevärda påhängskrafter p g a negativ mantelfriktion. Som framgår av litteraturgenomgången och asfaltförsöken, kan den negativa mantelfriktionen emellertid väsentligt reduceras med hjälp av ett asfaltlager på pålen. Undersökningen visar att ett 1 mm tjockt asfaltlager av asfalt A 130 torde kunna nedbringa den negativa mantelfriktionen till värdet  $0,5 \text{ Mp/m}^2$  och mindre.

## 1. INLEDNING

### 1.1 Avsikt med försöken

I samband med mätningar av negativ mantelfriktion på pålar som utförts av Statens geotekniska institut, har vissa kompletterande laboratorieförsök utförts. Avsikten med dessa försök har varit att i laboratoriet försöka reproducera vad som sker längs en påles mantelyta, när den omgivande jorden sätter sig i förhållande till pålen. Dels skulle undersökas om de uppträdande skjuvmotstånden var beroende av rörelsehastigheten och dels i vad mån skjuvmotstånden kan reduceras med hjälp av ett asfaltlager på pålens mantelyta.

Kostnaderna för försöken har bestritts av ett anslag från Statens råd för byggnadsforskning, anslag C 230 13.12 1965.

### 1.2 Litteraturstudier

En påles bärförmåga är en summa av dess mantel- och spetsmotstånd. Mantelmotståndet i lera anses motsvara lerans odränerade skjuvhållfasthet. För pålar i lera med en skjuvhållfasthet större än ca  $5 \text{ Mp/m}^2$  gäller inte detta på grund av att sådana fasta leror får dålig anliggning mot pålen i de övre jordlagren, där trycket i jorden är otillräckligt för att sluta det mellanrum mellan påle och jord som uppstår vid installationen av en påle. (Tomlinson 1957, Woodward et. al, 1961, Coyle och Reese 1966).

På senare tid har visats att pålens mantelmotstånd även i lösa leror inte alltid motsvarar den odränerade skjuvhållfastheten gånger mantelytan. Skjuvmotståndet beror nämligen av pålens rörelse. Försök har visat att skjuvmotståndet ökar från noll till ett visst värde och att den därefter är konstant eller avtagande (Fellenius 1955, Seed och Reese 1957, Nilsson 1965,

Coyle och Reese 1966). Sambandet visas i följande principfigur.

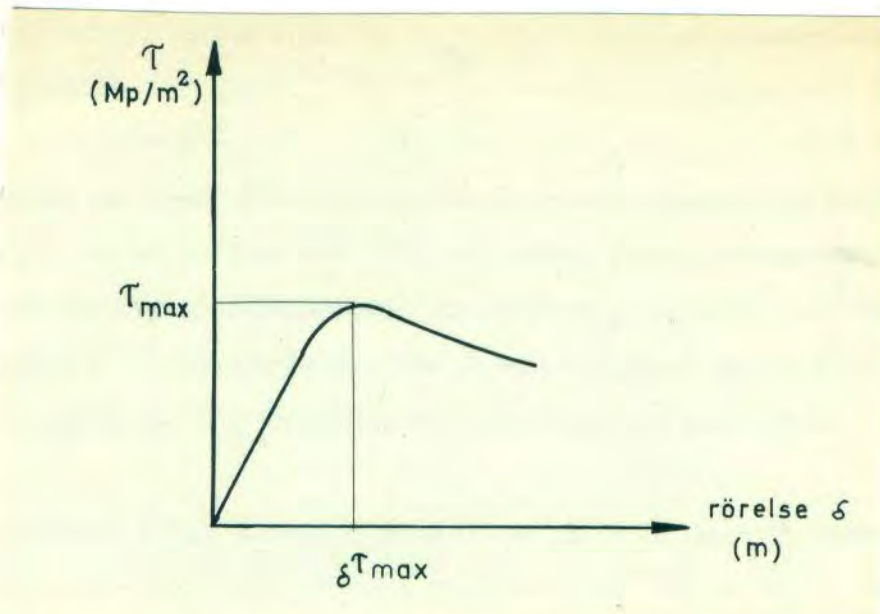


Fig. 1. Principfigur. Samband mellan skjuvspänning och rörelse för en lera.

Det visade sambandet är i stort sett linjärt upp till ett visst värde  $\tau_{\max}$ .

Den linjära delens ekvation kan tecknas

$$= K \cdot \delta, \text{ där } K \text{ är en skjuvmodul med dimensionen } \text{Mp/m}^3.$$

Nilsson (1965) fann vid försök i Göteborg med uppdragning av jordskrivar med 5 till 25 cm diameter ( $D$ ) att skjuvmodulen minskar med ökad skruvdiameter. Produkten  $KD$ , dvs skjuvmodulen gånger skruvdiametern, var relativt konstant, ca  $150 \text{ Mp/m}^2$ . Uppdragningshastigheten har ej angivits. Nilsson uppmätte värden på  $K$  mellan  $0,2 \cdot 10^3$  och  $3 \cdot 10^3 \text{ Mp/m}^3$ . Förskjutningens storlek vid  $\tau_{\max}$ ,  $\delta^{\tau_{\max}}$ , minskade med ökat djup, dvs då horisontaltrycket mot pålen ökade. Nilsson uppmätte värden på  $\delta^{\tau_{\max}}$

till värden mellan 2 och 4 mm.

Fellenius (1955) utförde försök med nedpressning av pålar i Göteborgslera. Försöken utfördes på trä-, betong- och stålplålar med konstant nedpressningshastighet (15-60 mm/tim). Ur dessa försök kan de resulterande skjuv-

modulerna beräknas till storleken  $2 \cdot 10^3 \text{ Mp/m}^3$  och KD till storleken  $400 \text{ Mp/m}^2$ . Deformationen vid brottskjuvspänningen  $\tau_{\text{max}}$  var 1,6 à 4,8 mm, där de lägsta värdena erhöles vid de lägsta nedpressningshastigheterna. Vidare minskade  $\tau_{\text{max}}$  något vid minskad nedpressningshastighet.

Coyle och Reese (1966) utförde försök på laboratorium med nedpressning av modellpålar i lera med olika vattenhalt. Nedpressningshastigheten var 90 mm/tim. Skjuvmodulen kan beräknas till ca  $0,2 \cdot 10^3 \text{ Mp/m}^3$  och  $\delta^{\tau\text{-max}}$  till 5 à 25 mm. Vid ökande vattenhalt ökade  $\delta^{\tau\text{-max}}$ . Vidare ökade  $\tau_{\text{max}}$  vid ökat horisontaltryck mot modellpålen.

Kormonik (1962) utförde i samband med pålförsök med svällande lera (montmorillonit-lera) ett antal skjuvboxförsök. Ena halvan av skjuvboxen var fylld med lera och den andra halvan bestod av betong. Försöken utfördes med skjuvningshastigheterna 0,1 och 10,0 mm/timme. Ur resultaten kan utläsas en tendens till ökning av skjuvmodulen och till en minskning av  $\delta^{\tau\text{-max}}$  vid ökad skjuvningshastighet. Någon förändring i  $\tau_{\text{max}}$  kan dock inte utläsas.

Hutchinson och Jensen (1968) redovisar resultat från provbelastningar utförda på 25 betongpålar slagna i lera. Av dessa pålar hade 12 bestrukt med asfalt före slagningen. Asfalten (penetration 60/70) värmdes och ströks med borste på pålarna. Asfalmängden var  $1,3 \text{ kg/m}^2$ , vilket motsvarar en beräknad genomsnittlig asfalttjocklek av 1,0 mm. Resultaten visade att asfalten gav en reduktion av pålarnas bärförmåga med mellan 30 och 80%. Spridningen i resultaten visade sig bero på temperaturvariationer i jorden.

Bjerrum, Johannessen och Eide (1969) har på två skilda platser undersökt inverkan av negativ mantelfriktion på stålpålar slagna genom lera till berg. Vissa pålar beströks med ett 1 mm tjockt skyddande asfaltlager (penetration 80/100). Mätresultaten visade att de asfaltskyddade pålarna erhöles en påhängslast av storleken 10-15 Mp, medan belastningen av de oskyddade pålarna var 150-210 Mp, dvs asfalten reducerade den negativa mantel-

friktionen med mer än 90%.

Uppgifter i litteraturen antyder således att en leras skjuvmotstånd är hastighetsberoende. Det har emellertid ej klart påvisats att även  $\tau_{\max}$  är hastighetsberoende. Vidare har de använda hastigheterna, som lägst 15 mm/timme (= 13 .n/år), varit väsentligt större än de rörelsehastigheter som förekommer i verkligheten, ca 10 cm/år (= 0,01 mm/timme).

De två referenser som redovisat inverkan av ett asfaltlager visar att ett asfaltlager kan ha en betydande reducerande effekt på kraftöverföringen mellan en påle och omgivande jord.

### 1.3 Program för försöken

Undersökningen omfattade direkta skjuvförsök med lera vid olika hastigheter. Lerprover skjuvades mot en betongplatta (pålyta) vid hastigheterna 0,01, 0,10 och 1,00 mm/timme. Inverkan av konstant vertikallast mot provet (oförhindrad vertikaldeformation) och avtagande vertikallast (förhindrad vertikaldeformation) studerades. Vidare undersöktes inverkan på resultaten av ett asfaltlager som påfördes betongytan.

Lerprover upptogs från 5,0 och 20,0 m djup vid Backadalsmotet i Göteborg. Lerprovernas egenskaper redovisas i kap 2.1. Efter trimning av proverna och placering i en specialkonstruerad skjuvbox (kap 2.2) fick proverna konsolidera vid en last motsvarande det effektiva förkonsolideringstrycket vid provtagningsnivån; 4,2 Mp/m<sup>2</sup> respektive 12,4 Mp/m<sup>2</sup>. Där efter skjuvades proven med en viss hastighet.

Lerprovernas höjd var 5 mm och ytan (= skjuvningsarean) var 7060 mm<sup>2</sup> (45 x 157 mm).

Försöken kan indelas i fyra grupper:

- 1 Förberedande försök för att fastställa omfattningen och utförandet av de egentliga försöken (Prov 1-2).
- 2 Försök med oförhindrad vertikaldeformation (Prov 3-9).
- 3 Försök med förhindrad vertikaldeformation (Prov 10-15).
- 4 Försök med reducering av erforderlig skjuvkraft med hjälp av ett asfaltlager (Prov 16-17).

Försöksprogrammet har sammanställts i tabell I.

Prov nr	Provtagningsdjup		Vertikaldef.		Skjuvningshastighet mm/tim			Anmärkning
	5 m	20 m	oförh.	förh.	0,01	0,10	1,00	
1		x	x		x	x	x	Förberedande försök
2		x	x		x	x	x	
3	x		x		x			
4	x		x			x		
5	x		x				x	
6	x		x				x	Ökande vertikallast
7		x	x		x			
8		x	x			x		
9		x	x				x	
10	x			x	x			
11	x			x		x		
12	x			x			x	
13		x		x	x			
14		x		x		x		
15		x		x			x	
16			x	x	x	x		Betongdummy och asfalt
17		x		x	x	x	x	Asfalt

Tabell I. Sammanställning av försöksprogrammet.



#### 1.4 Beskrivning av skjuvboxen med utrustning

För försöken tillverkades en speciell skjuvbox av följande utseende.

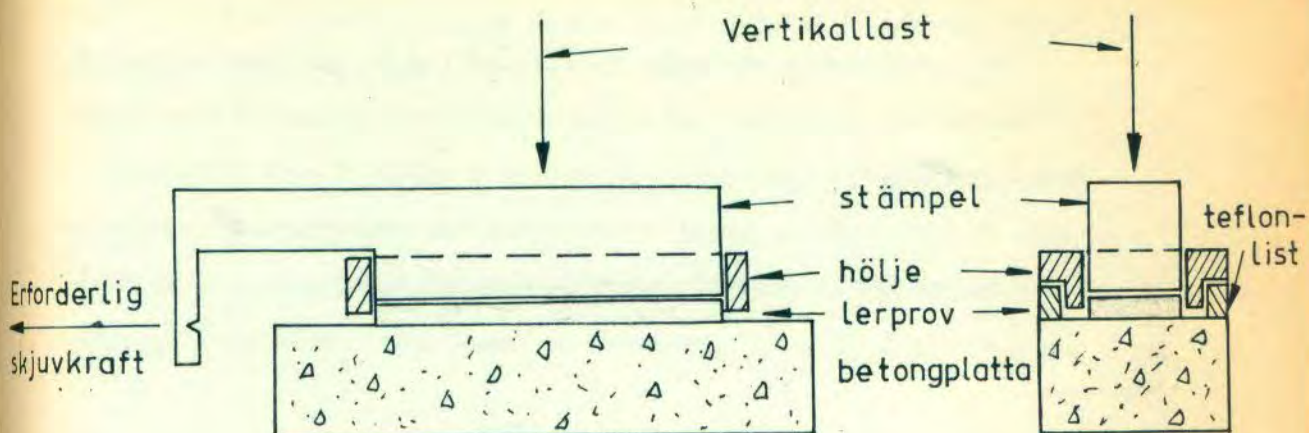


Fig. 2. Längd- och tvärsnitt av skjuvboxen. Ej skalenlig principfigur.

Lerprovet ligger an mot betongplattan. Skjuvkraften överförs till lerprovet via ett stålhölje som omsluter lerprovets sidor, men som går fri från betongplattan. Detta hölje vilar på två glidlistor av teflon. Vertikallasten överförs till provet via en stämpel. Lerprovets sammanpressning och skjuvningsrörelse mäts med extensometrar graderade i mm/100. Skjuvboxen står i ett vattenbad.

Skjuvboxen placeras i ett stativ enligt följande principfigur.

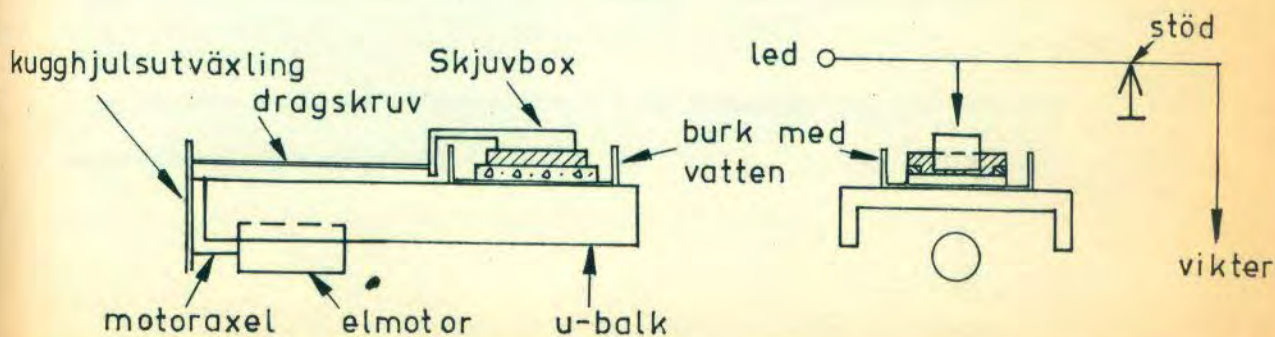


Fig. 3. Principfigur över skjuvboxstativet.

Skjuvningshastigheten regleras med en dragskruv och dragkraften mäts med trådtöjningsgivare placerad på en speciell dragkrok. Skjuvningen åstadkommes genom att en elmotor via en kugghjulsutväxling roterar dragskruven, som därvid drar skjuvboxens övre halva.

Provet belastas, som visas i fig. 4, med vikter via en hävstång. Vid försök med förhindrad vertikaldeformation låses hävarmen med ett stöd. Vid försökets start är stödet obelastat, men under skjuvningen ökar lasten på stödet, samtidigt som vertikaltrycket på provet minskar. För att mäta detta är en Boforsgivare placerad på stödet. Givaren är kalibrerad så att dess mätvärde direkt anger lasten på lerprovet.

För närmare detaljer om arrangemanget hänvisas till Statens geotekniska instituts maskintekniska avdelning, ritningar nr 31477 - 31489 och till fotografierna i bilaga 1.

Skjuvningsförsök utförda med boxen tom gav skjuvboxens egenfriktion, dvs det motstånd som teflonglidlisterna ger vid skjuvningen. Egenfriktionen var 0,8 kp vid en vertikallast om 6,4 kp och 2,0 kp vid vertikallasten 10,4 kp. Detta motsvaras av friktionskoefficienterna 0,13 och 0,19. Av praktiska skäl måste stämpelvikten ingå i vertikallasten vid denna bestämning. Vid de egentliga försöken vilar dock endast höljet, 2,75 kp, på teflonlisterna. Det är därför troligt att egenfriktionens andel i den registrerade erforderliga skjuvkraften vid försöken är mindre än den kraft som motsvaras av friktionskoefficienten 0,13. Med denna friktionskoefficient och kraften beräknad på lerprovets yta, är egenfriktionen  $0,06 \text{ Mp/m}^2$ .

Skjuvboxen var under försöken placerad i ett temperaturreglerat rum, där temperaturen hölls vid ca  $+4^\circ\text{C}$ .

## 2. UTFÖRANDE

### 2.1 Lerprover

Den lera som användes för försöken var som nämnts hämtad från 5 och 20 m djup vid Backadalsmotet på Hisingen i Göteborg. Lerans geotekniska egenskaper sammanfattas i tabell II.

		5,0 m	20,0 m
Skjuvhållfasthet (Mp/m <sup>2</sup> )	vingborr	1,3	3,8
	konprov	1,4	3,4
	sensitivitet	32	15
Vattenhalter (%)	naturlig	100	80
	finlekstal	85	75
	flytgräns	88	78
	plasticitetsgräns	34	34
Volymvikt t/m <sup>3</sup>		1,50	1,60
Lerprocent %		84	72
Glödningsförlust %		3,3	6,5

Tabell II. Lerprovernas geotekniska egenskaper.

### 2.2 Förfarande vid försöken (Se även fotobilagan)

Lerproverna skjuts ut ur kolvburken på en speciell trimningsvagg, där först bredden 45 mm och längden 157 mm skärs till med en trådsjärare. Överdelen av provet skärs sedan bort, varefter hölje och stämpel placeras över provet. Höljet vilar på fyra stöd, avpassade så att exakt 5 mm av lerprovet omsluts av höljet. Hölje och stämpel fixeras sedan med speciella bultar till trimningsvaggan. Detta är nödvändigt, då annars

provet kan skadas vid den vändning av systemet som är nästa arbetsmoment. Efter vändningen tas trimningsvaggan bort och provet skärs av längs höljets underkant, varefter betongplattan och "burken" läggs på höljet. Efter förnyad vändning är skjuvboxen laddad, dvs lerprovet är intrimmat i boxen. Stämpeln är härvid i kontakt med provet, men genom att stämpeln bär på två stålstavar, belastas ej provet.

Skjuvboxen placeras härefter på sitt stativ och destillerat vatten fylls i "burken". Efter ett dygn har box och lera antagit det temperaturreglerade rummets temperatur, stålstavarna tas bort och vertikallasten påförs. Lerprovet får sedan konsolidera under ytterligare ett dygn.

Försöket påbörjas genom att starta elmotorn, som via kugghjulsutväxling och dragstång åstadkommer den önskade skjuvningen. Skjuvningshastigheten regleras genom lämpligt val av kugghjul och skjuvningsrörelsen kontrolleras med en extensometer. Under försökets gång registreras erforderlig skjuvkraft, provets sammanpressning och vertikallastens förändring.

### 2.3 Asfalt

För asfaltförsöken (prov 16 och 17) användes en asfalt med penetration 120 och handelsbeteckning A 130. Asfalten värmdes i en torkugn till  $100^{\circ}\text{C}$  temperatur och penslades sedan på den likaledes uppvärmda betongplattan. Betongplattan värmdes, för att inte asfalten skulle svalna alltför snabbt och för att betongplattan skulle bli helt torr. Asfalten fäste nämligen ej på betongen, om denna var fuktig. (Vid försöken utan asfalt var betongplattan alltid genomfuktad före intrimning av provet).

Asfalten var vid normal rumstemperatur hård och spröd och kunde ej anbringas på betongplattan. För att kunna föra på asfalten prövades först med att lösa upp den i bensen, som sedan fick avdunsta i rumstemperatur. Ännu efter 14 dagar var dock så mycket av bensen kvar i asfalten att den var mycket mjuk. Metoden med uppvärmning var å andra sidan snabb och enkel och asfalten tycktes efter att den svalnat till rumstemperatur vara helt opåverkad av behandlingen.

## 2.4 Felkällor

Skjuvboxens egenfriktion har diskuterats i kap 1.4. Denna motsvarar en skjuvspänning av  $0,06 \text{ Mp/m}^2$  över lerprovets skjuvningsyta.

Dragkraften i dragkroken registrerades medelst trådtöjningsgivare.

Mätningarnas noggrannhet kan bedömas av de kalibreringar som utförts.

Felet visar sig uppgå till max  $0,36 \text{ kp}$  eller  $0,05 \text{ Mp/m}^2$  i skjuvkraften.

Sammanlagt är således felet i den erhållna skjuvkraften av storleken  $0,1 \text{ Mp/m}^2$ , vilket är försumbart i förhållande till de aktuella skjuvspänningarna som är av storleken  $1,0$  à  $8,0 \text{ Mp/m}^2$ .

Deformationshastigheten kontrollerades med extensometer. Det visade sig att skjuvningshastigheten varierade något under försökets gång. Den verkliga hastigheten var 5 till 12% högre än den avsedda. Eftersom de olika deformationshastigheterna var och en var 1000% större än den närmast lägre hastigheten, antas hastighetsfelet ej inverka på resultaten.

Trimningen av provet utfördes med största möjliga omsorg. En viss störning av provet kunde dock inte undvikas. Denna störning bör ha varit lika för varje prov, varför resultaten ur denna synpunkt bör vara jämförbara. Såväl provtagning i fält som trimning och montering av provet bör dock ha förändrat proverna jämfört med deras ursprungliga egenskaper. Betydelsen av detta har inte kunnat studeras.

Under skjuvningens gång ändrar leran sina egenskaper, främst p g a ändring av vattenhalten. Detta och andra felmöjligheter kommer närmare att beröras i samband med redovisningen av resultaten.

Asfaltlagrets tjocklek mättes med en noggrannhet av en tiondels millimeter. Detta värde bestämdes med en mikrometer och är ett medelvärde av ett flertal tjockleksbestämningar. Betongplattan hade visserligen gjutits mot en plan stålyta, men mellan ytans "toppar och dalar" erhöles ändå nivåskillnader på

några tiondels millimeter. Det angivna medelvärdet på asfaltlagrets tjocklek innefattar därför värden som avviker  $\pm 0,5$  mm från medelvärdet och felet i medelvärdet uppskattas till ca  $\pm 0,2$  mm. Då asfaltlagrets tjocklek var 1,0 mm (prov 16) och 1,3 mm (prov 17) och tjockleken har väsentlig betydelse för resultaten, är felet därmed relativt stort.



Fig. 4. Tvåanslutet prov av asfaltlagrets tjocklek.

Den övre delen av provet är asfaltlagret och den nedre delen är betong. Asfaltlagrets tjocklek är 12 mm och betongens tjocklek är 13 mm. Detta innebär att asfaltlagret utgör 48% av provets totala tjocklek. Detta är en relativt liten tjocklek för asfaltlagret och kan ge upphov till stora avvikelser i resultaten.

De två proven som används i denna studie är prov 16 och prov 17. Prov 16 har en asfaltlagrets tjocklek på 1,0 mm och prov 17 har en asfaltlagrets tjocklek på 1,3 mm. Detta innebär att asfaltlagret utgör 40% av provets totala tjocklek för prov 16 och 49% för prov 17. Detta är en relativt liten tjocklek för asfaltlagret och kan ge upphov till stora avvikelser i resultaten.

### 3. RESULTAT

#### 3.1 Förberedande försök

De förberedande försöken utfördes med ett lerprov med samma basyta som angivits i kap 2.2, men med en större höjd. Fig 4 visar ett tvärsnitt genom provet.

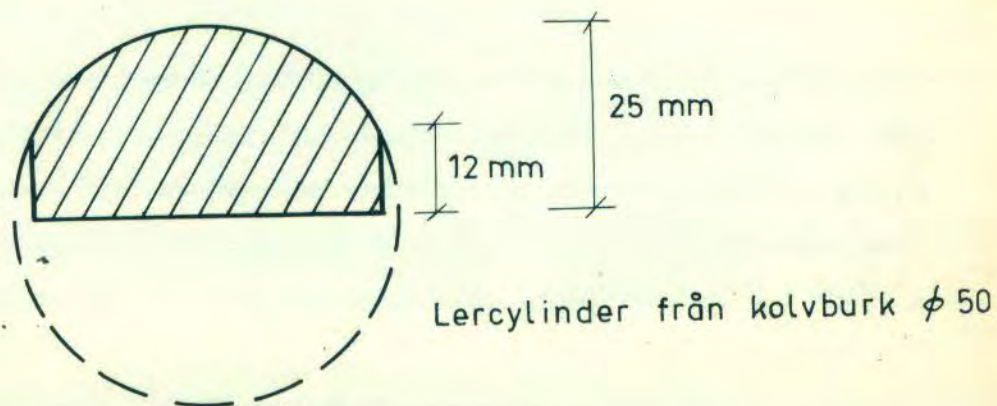


Fig. 4. Tvärsnittet genom provkropp (Förberedande försök).

Med denna utformning kunde provets vattenhalt och skjuvhållfasthet undersökas även efter försöket. Som visas nedan konstaterades att vattenhalten varierade inom lerprovet, vilket tyder på en ojämn skjuvspänningsfördelning inom provet. Eftersom en konstant skjuvspänning var önskvärd, utfördes försöken med ett tunnare lerprov, med endast 5 mm höjd.

Avsikten var att studera skjuvningshastighetens inverkan, varför de tre olika skjuvningshastigheterna ansattes vid skjuvningen av ett och samma prov. Mellan varje hastighetsändring måste då skjuvkraften avlastas. Det visade sig emellertid att avlastningen påverkade resultaten. (Se prov 1 och 2). Vid avlastning och därpå följande skjuvning med samma hastighet erhöles olika utseende på kraft-deformationskurvan. Då avlastningens inverkan därmed förhindrade en jämförelse mellan resultat vid skjuvning med olika hastigheter, valdes att ta ett nytt lerprov för varje ny hastighet.

Prov nr 1. Se ritningsbilagan, bilaga 2.

Resultatet visar att skjuvningsmotståndet ökade något med ökad deformation. När rörelsen uppgick till 7 à 8 mm, började skjuvmotståndet att minska och ett mer eller mindre konstant slutvärde, residualmotstånd (ca  $1,9 \text{ Mp/m}^2$ ), erhöles, när deformationen var 11 mm. Som nämnts störs jämförelsen mellan resultat erhållna vid olika hastigheter av inverkan från avlastningarna vid hastighetsändringarna.

Den borttrimmade lercylindern undersöktes m a p ursprunglig vattenhalt och skjuvhållfasthet. Vattenhalten var 100% och skjuvhållfastheten, som mättes i ett antal punkter vinkelrätt mot den vertikala snittytan, var  $1,6 \text{ Mp/m}^2$ . Efter avslutad skjuvning var lerprovets vattenhalt reducerad till ca 80%. Skjuvhållfastheten hade däremot ökat till  $2,7 \text{ Mp/m}^2$ .

Prov nr 2. Försöksresultatet överensstämmer med prov nr 1, med den skillnaden att de erhållna skjuvspänningarna är 2 à 3 gånger så stora. Residualmotståndet var ca  $7,5 \text{ Mp/m}^2$ .

Den ursprungliga vattenhalten och skjuvhållfastheten var 71% respektive  $3,3 \text{ Mp/m}^2$ . De slutliga värdena var 57% respektive  $5,4 \text{ Mp/m}^2$ . Vattenhalten närmast betongplattan och närmast stämpeln var 52% respektive 62%. Någon liknande variation fanns ej i den oskjuvade leran. Vattenhaltsvariationen visar att lerprovets tjocklek förhindrade en fullständig dränering genom betongplattan med åtföljande porvattentrycksutjämning i lerprovet.

Prov nr 3, 4 och 5

Resultaten visar att det maximala skjuvmotståndet var 2,1 till  $2,3 \text{ Mp/m}^2$ . Residualmotståndet var ca  $1,5 \text{ Mp/m}^2$ . Vid den högsta hastigheten erhöles ingen avtagande tendens. Vattenhalten mätt efter försöken var ca 10% lägre än före försöken.



Prov nr 6. Detta prov utfördes för att studera skjuvmotståndets ökning med ökande vertikallast. Vid varje ökning av vertikallasten fick leran konsolidera under ett dygn innan skjuvningen igångsattes. Efter avslutat försök konstaterades att vattenhalten minskat från 107% till 66%.

Som framgår av fig. 5 ökade den erforderliga skjuvkraften i stort sett linjärt med den ansatta vertikallasten.

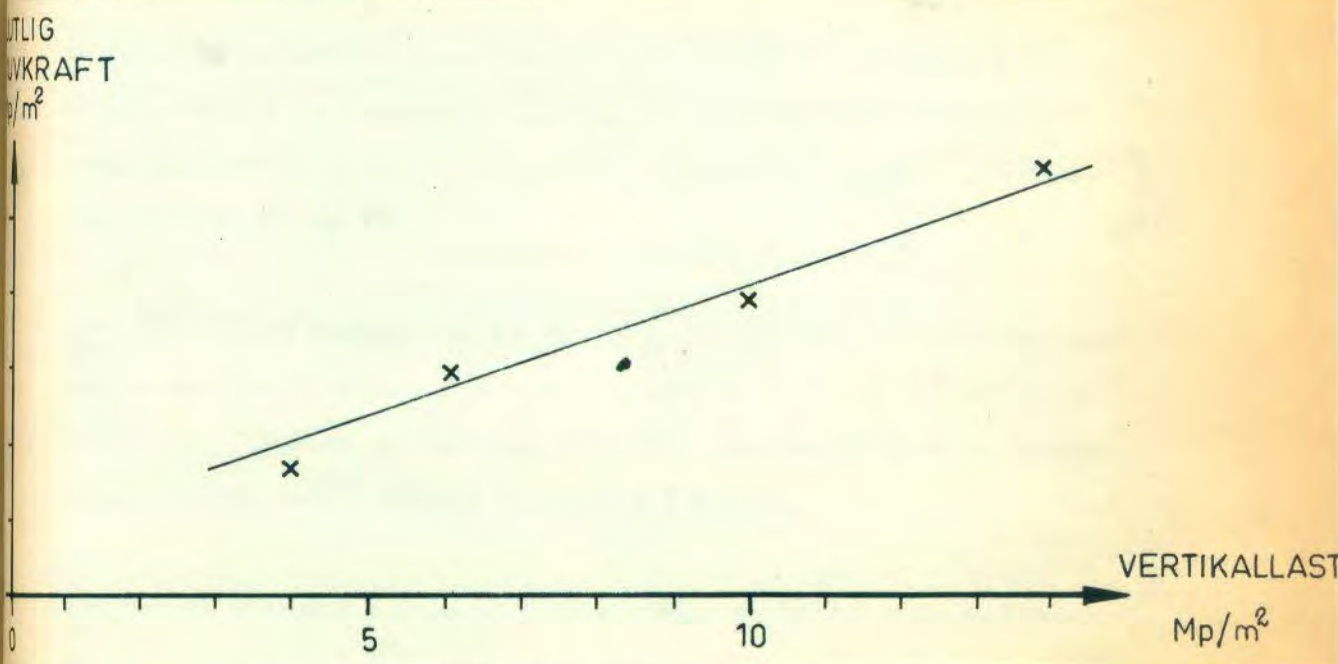


Fig. 5. Residualmotståndets förändring med ökad vertikallast.

Prov nr 7, 8 och 9

Maximalt skjuvmotstånd var 6,1 à 6,8 Mp/m<sup>2</sup>. Residualmotståndet var 6,5 Mp/m<sup>2</sup>. Diagrammen visar att skjuvdeformationen vid maximalt skjuvmotstånd minskade något med ökad skjuvningshastighet. Vattenhaltsreduktionen var ca 10%.

Prov 10, 11 och 12

Maximalt skjuvmotstånd uppmättes till 1,6 à 2,0 Mp/m<sup>2</sup>. Residualmotståndet var 0,9, 1,0 respektive 1,1 Mp/m<sup>2</sup>. Vertikallasten minskades från ursprungsvärdet 4,2 Mp/m<sup>2</sup> till 1,4, 1,0 respektive 1,6 Mp/m<sup>2</sup>. Vattenhalten reducerades med ca 5%, vilket till stor del torde ha erhållits vid konsolideringen under det första dygnet.

Att en viss konsolidering med åtföljande skjuvhållfasthetsökning dock även hade ägt rum under skjuvningen kan konstateras i diagrammet för prov 11. Detta försök avslutades med en skjuvning med oförhindrad vertikaldeformation vid den ursprungliga vertikallasten. Det erforderliga slutliga skjuvmotståndet var  $2,2 \text{ Mp/m}^2$ , ca 40% större än det som uppmätts för prov 4.

#### Prov 13, 14 och 15

Maximalt skjuvmotstånd uppmättes till  $4,5$  à  $5,0 \text{ Mp/m}^2$ . Residualmotståndet var  $2,8$ ,  $2,2$  respektive  $2,6 \text{ Mp/m}^2$ . Vertikallasten minskade från ursprungsvärdet  $12,4 \text{ Mp/m}^2$  till  $4,7$ ,  $4,3$  respektive  $4,6 \text{ Mp/m}^2$ . Vattenhaltsreduktionen var 3%.

Prov 16. Provet bestod av en s k dummy av betong, dvs en betongkropp med samma mått som lerprovet. Betongplattan hade täckts av ett  $1,0 \text{ mm}$  tjockt asfaltlager. Försöken utfördes med oförhindrad vertikaldeformation. Vertikallasten växlade mellan värdena  $12,4$  och  $4,2 \text{ Mp/m}^2$ .

Kylrummets termostat krånglade under försöket, varför den avsedda konstanta temperaturen om  $4,0^\circ\text{C}$  inte kunde åstadkommas, utan temperaturen varierade mellan  $1,9^\circ$  och  $3,9^\circ\text{C}$ . Det visade sig att skjuvningsmotståndet var mycket beroende av temperaturen. Vid skjuvningshastigheten  $1,0 \text{ mm/timme}$  medförde temperaturstegringen från  $2,0$  till  $3,5^\circ\text{C}$  en minskning av skjuvkraften från  $6,3 \text{ Mp/m}^2$  till  $5,5 \text{ Mp/m}^2$ , dvs med ca  $0,5 \text{ Mp/m}^2$  och grad. Avgörande för den erforderliga skjuvkraften var dock den ansatta skjuvningshastigheten.

I allmänhet anses asfalt kunna betraktas som en newtonsk vätska. Skjuvspänningen,  $\tau$ , i ett newtonskt vätskelager av konstant temperatur och med tjockleken  $d$  mellan två ytor som rör sig med hastigheten  $v$  i förhållande till varandra, kan tecknas

$$\tau = \frac{v}{d} \cdot \eta, \text{ där } \eta \text{ är vätskans viskositet.}$$

Sambandet anger att skjuvspänningen är direkt linjärt beroende av hastigheten och omvänt linjärt beroende av vätskelagrets tjocklek.

Vid den tiodubbling och hundradubbling av skjuvningshastigheten som utförts i prov nr 16 kunde därför förväntas att skjuvningsmotståndet skulle öka i motsvarande grad. Motståndet ökade dock endast 1,5 till 2 gånger vid varje tiodubbling.

Då vertikallasten  $12,4 \text{ Mp/m}^2$  påfördes, pressades asfaltlagret samman från 1,0 mm till 0,8 mm och under det första dygnets väntan innan skjuvningen startade reducerades tjockleken ytterligare 0,2 mm p g a flytning i asfalten. När vertikallasten sedan sänktes från  $12,4 \text{ Mp/m}^2$  till  $4,2 \text{ Mp/m}^2$  återfjädrade asfaltlagret till 0,8 mm tjocklek. Samtidigt minskade skjuvningsmotståndet. För hastigheterna 1,00 mm/tim och 0,10 mm/tim var motståndsminskningen 25 à 30%, vilket jämföres med ca 30% tjockleksökning p g a återfjädring. Motståndsminskningen vid hastigheten 0,01 mm/tim var 50%, men denna minskning inkluderar effekten av den samtidiga temperaturhöjningen på  $0,7^\circ\text{C}$ , som enligt ovan svarade för ca  $0,4 \text{ Mp/m}^2$  eller 20% av skjuvmotståndets minskning.

Skjuvmotståndet i asfalten var således för alla tre hastigheterna omvänt beroende av asfaltlagrets tjocklek.

Prov 17. Prov från 20,0 mm djup. Betongplattan täckt med ett 1,3 mm tjockt asfaltlager. Skjuvningen börjades med den lägsta hastigheten.

De uppmätta skjuvmotstånden är väsentligt lägre än de som registrerades vid motsvarande försök (prov 13-15) utan asfalt. Asfalten har således kunnat reducera den erforderliga skjuvkraften p g a att glidning skett i asfaltlagret. Skjuvmotståndet visar samma hastighetsberoende som vid prov 16, dvs motståndet dubblas då skjuvningshastigheten tiodubblas.

#### 4. LITTERATURREFERENSER

Bjerrum, L, Johannessen I J och Eide O 1969. "Reduction of negative skin friction on steel piles to rock", Proc 7th Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Eng., Mexico City 1969, Vol II, pp 27-34.

Coyle, H M och Reese, L C 1966. "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay", ASCE, Vol 92 SM 2 1966, pp 1-26.

Fellenius, B 1955. "Resultat från pålprovningar vid Göteborg C", Meddelande nr 5 från Järnvägsstyrelsens geotekniska avdelning, 53 pp.

Hutchinson, J N och Jensen E V 1968, "Loading tests on piles driven into estuarine clays at part of Khorramshar, and observations on the effect of bitumen coatings of shaft bearing capacity" Norges Geotekniske Institutt, Publ. nr 78, 12 pp.

Komornik, A 1962, "The effect of swelling properties of unsaturated clay on pile foundations" Ph D thesis, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 235 pp.

Nilsson, S M 1965, "En ny metod för beräkning av kohesionspålar", Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Geoteknik med Grundläggning, 22 pp.

Seed, H B och Reese, L C 1957. "The Action of Soft Clay Along Friction Piles", Trans ASCE, Vol 122 1957, pp 731-764.

Tomlinson, M J 1957. "The Adhesion of Piles driven in Clay Soils", Proc 4th Int. Conf., Soil Mech. and Found. Eng., London 1957, Vol II pp 66-71.

Woodward, R J, Lundgren, R och Boitano, J D 1961. "Pile Loading tests in Stiff Clays", Proc 5th Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Eng., Paris 1961, Vol II



Fig. 1:1. Trimmingsvagg och kolvborrprov.

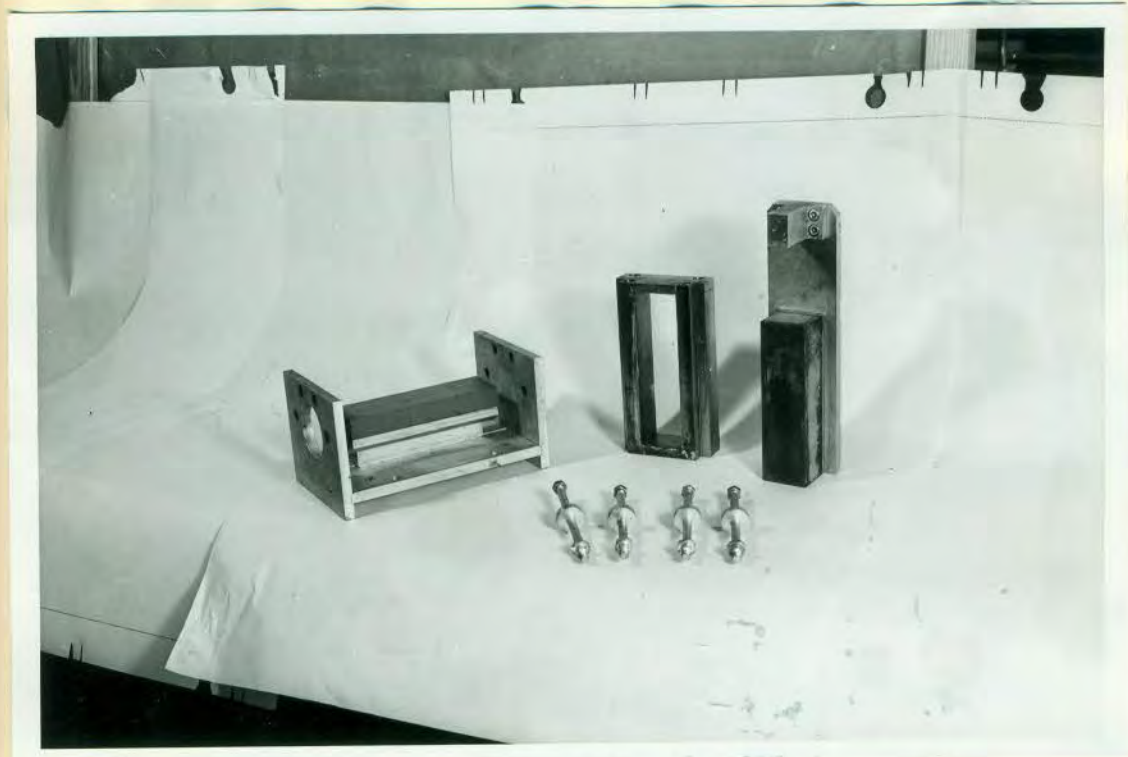


Fig. 1:2. Sidor och överyta trimmade, hölje och stämpel.

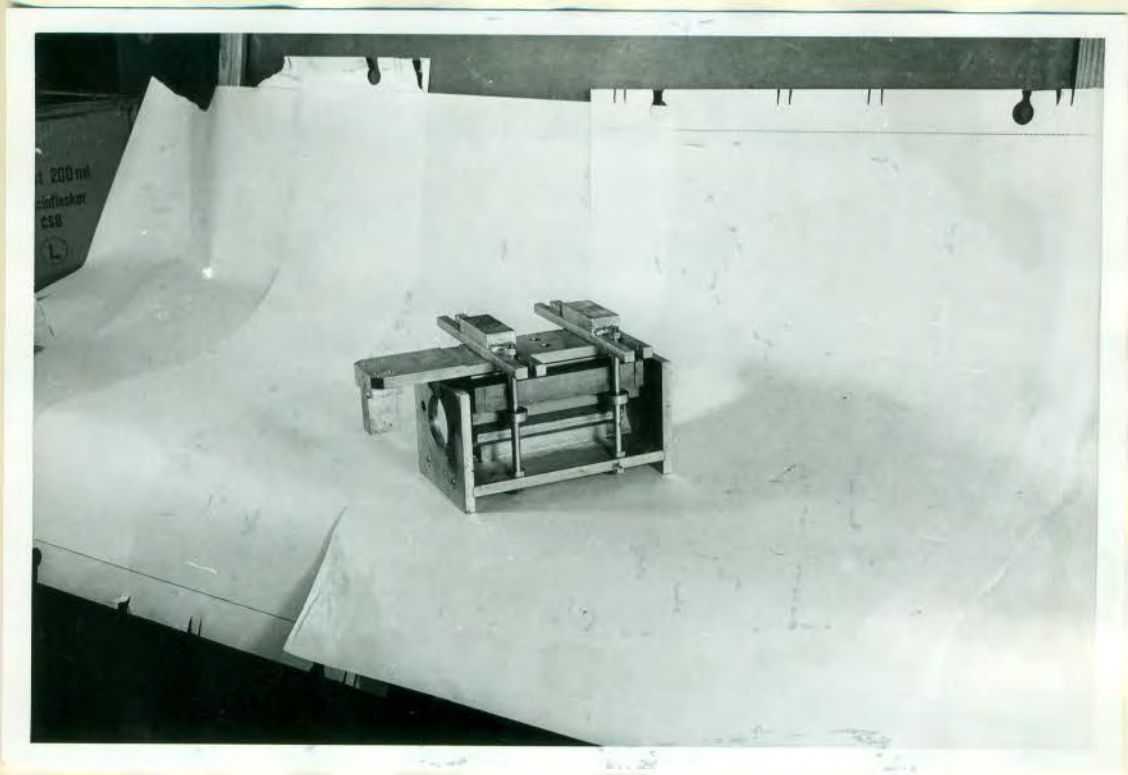


Fig. 1:3. Hölje och stämpel påförda. Före vändning.

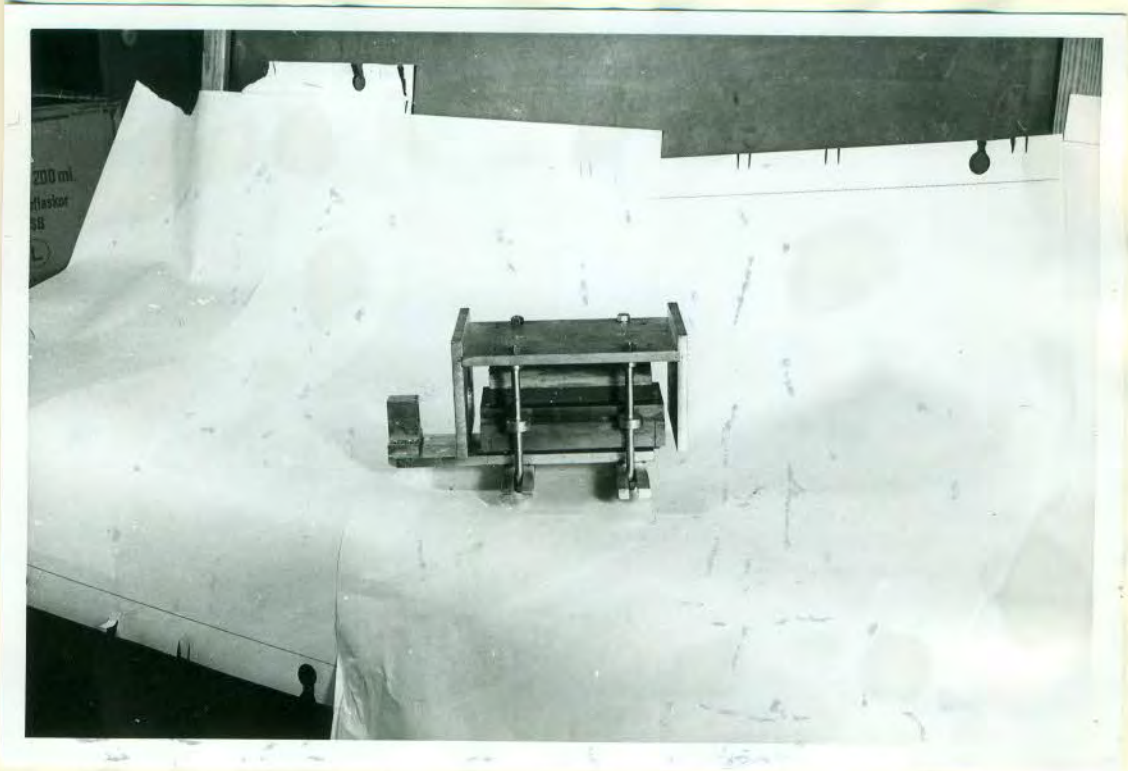


Fig. 1:4. Efter vändning.



Fig. 1:5. Trimning av underyta efter det att vaggan borttagits.



Fig. 1:6. Färdigtrimmat prov, betongplatta och burk.

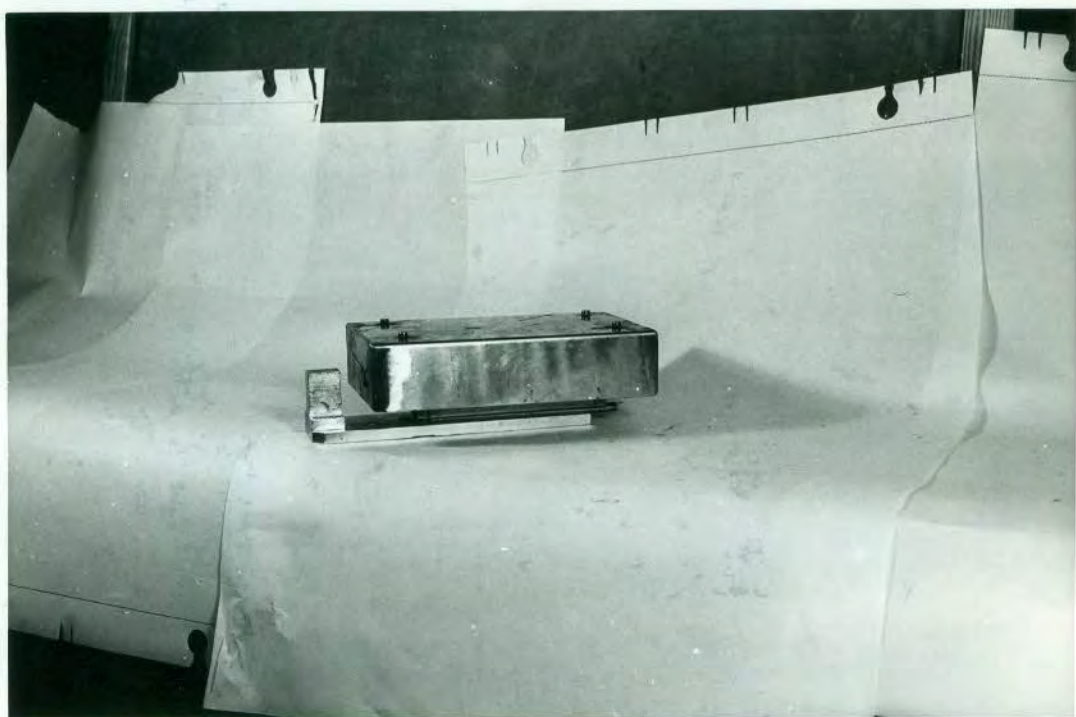


Fig. 1:7. Betongplatta och burk pålagda.



Fig. 1:8. Efter vändning; skjuvboxen klar att sättas i stativet.





Fig. 1:9. Kolvborrhurk och uttagen, trimmad lerprovsbit.



Fig. 1:10. Skjuvbox och stativ i kylrum.

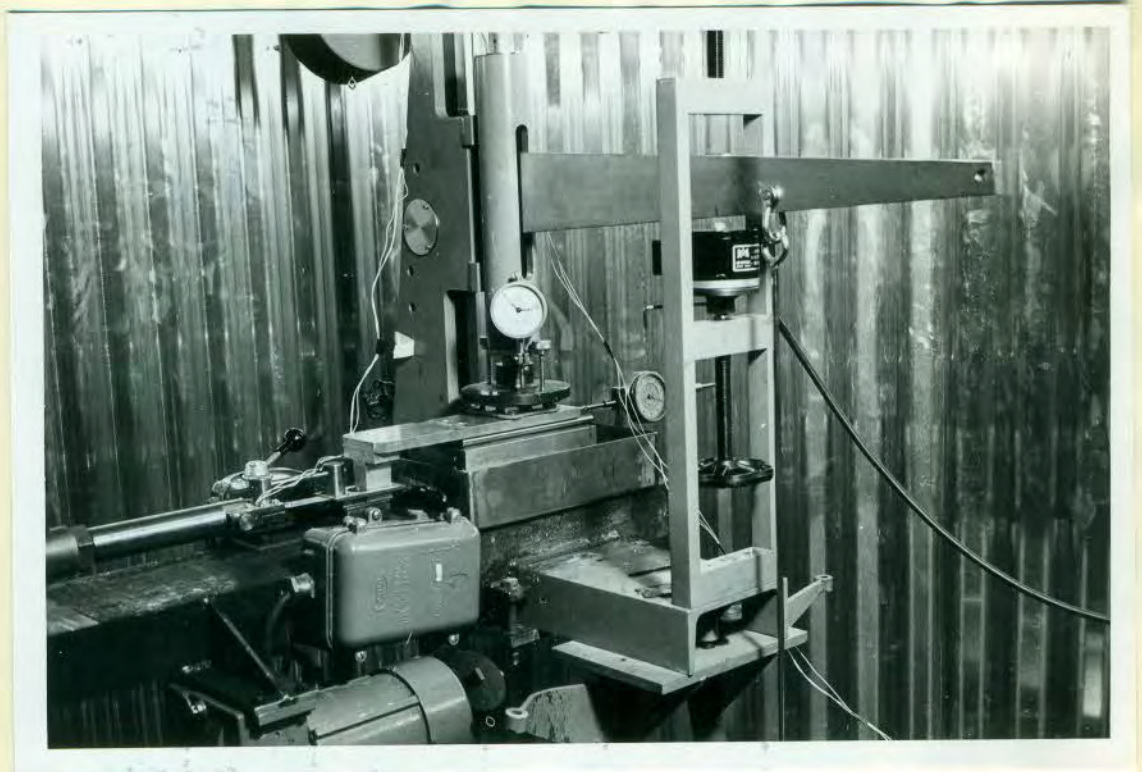


Fig. 1:11. Placering av Boforsgivaren.

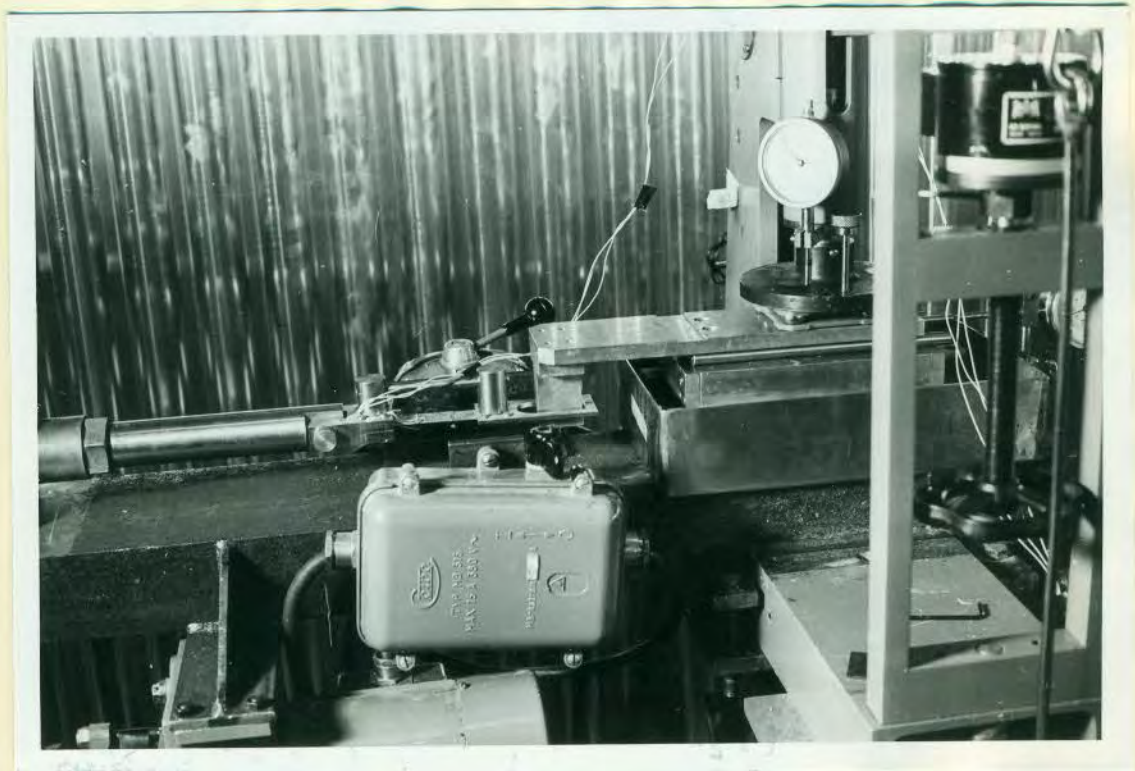
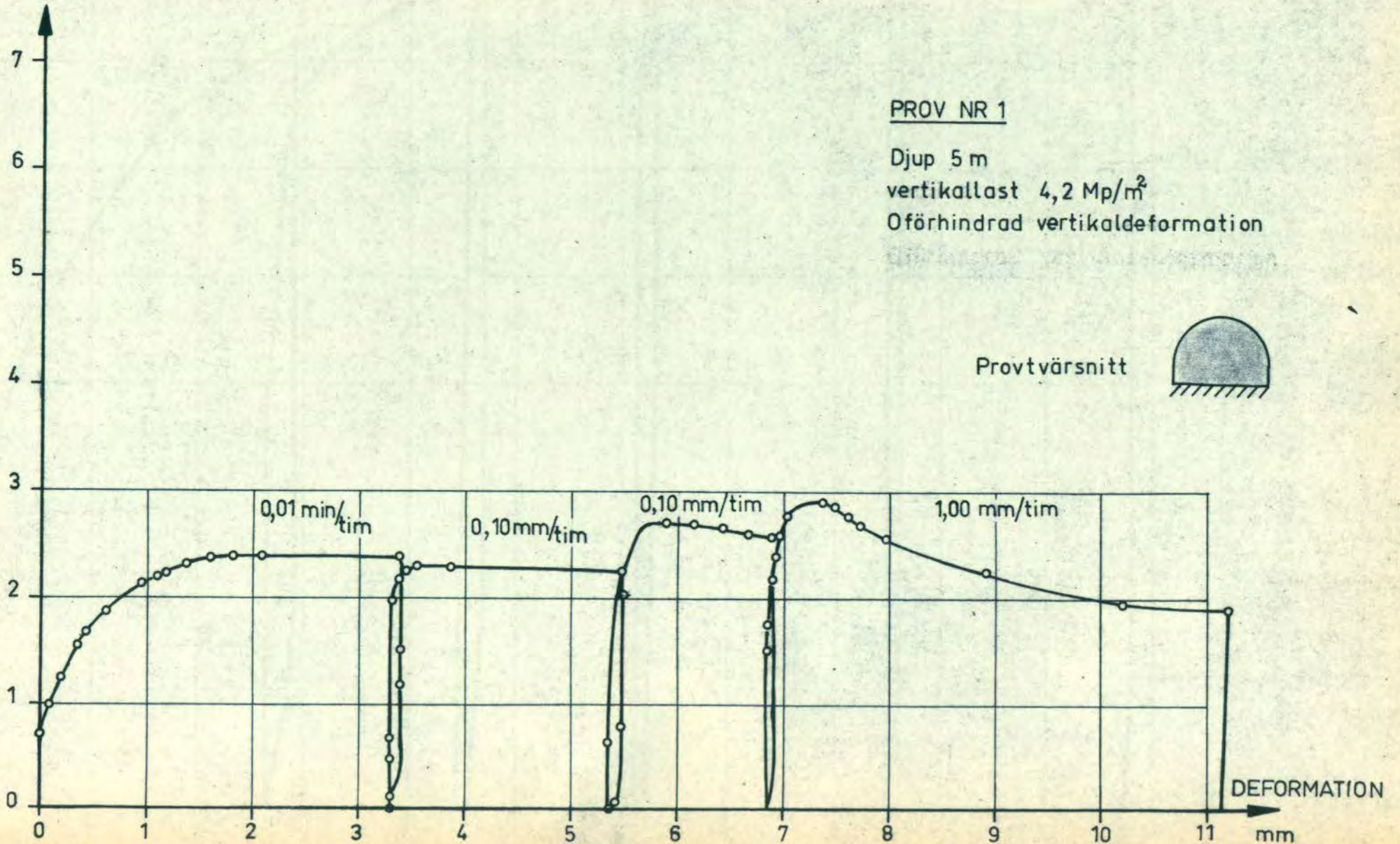
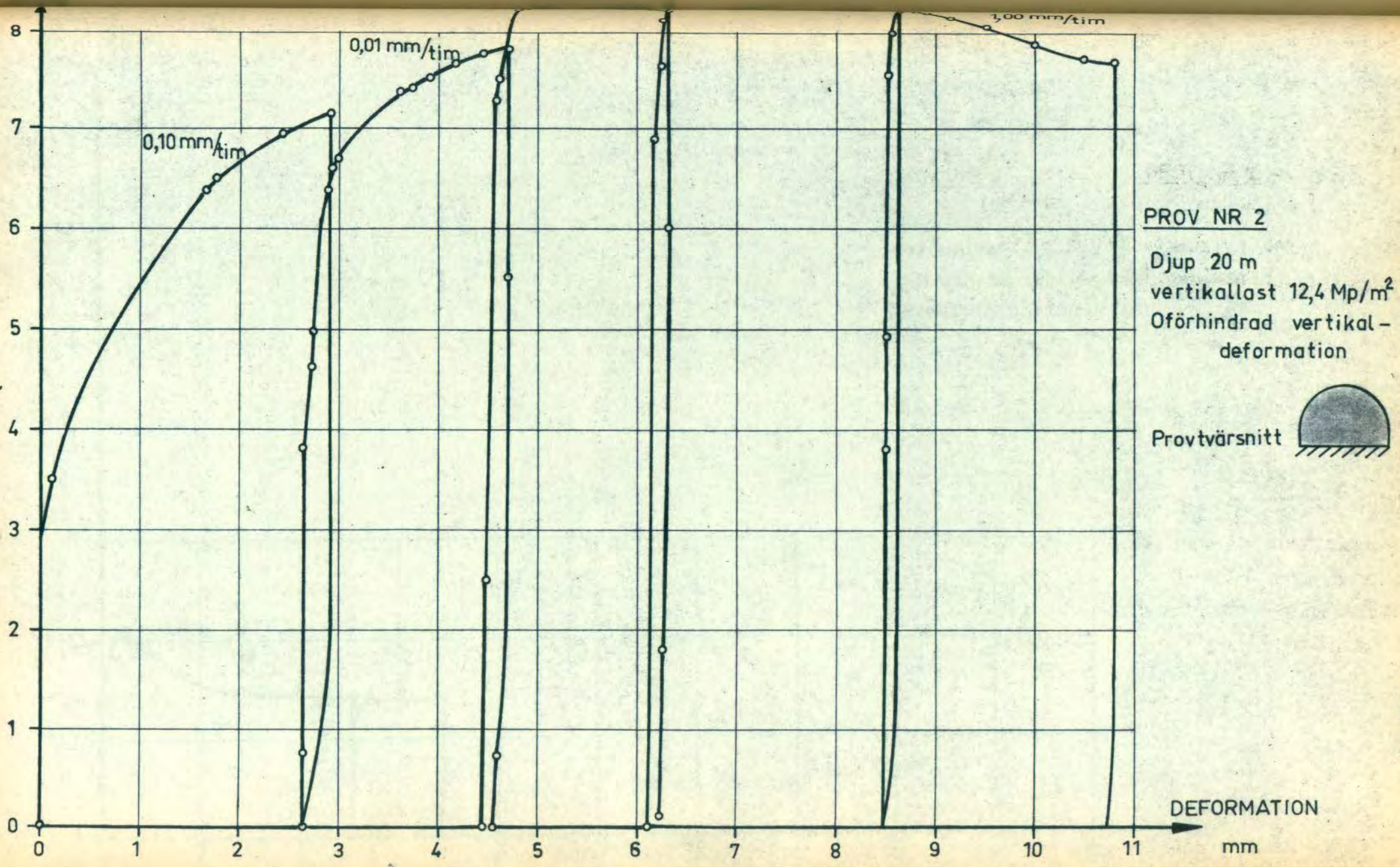


Fig. 1:12. Närbild av skjuvboxen i stativet.

ERFORDERLIG  
SKJUVKRAFT  
Mp/m<sup>2</sup>





PROV NR 2  
 Djup 20 m  
 vertikallast 12,4 Mp/m<sup>2</sup>  
 Oförhindrad vertikal-  
 deformation



DEFORMATION  
 mm

ERFORDERLIG  
SKJUVKRAFT

$\text{Mp/m}^2$

7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

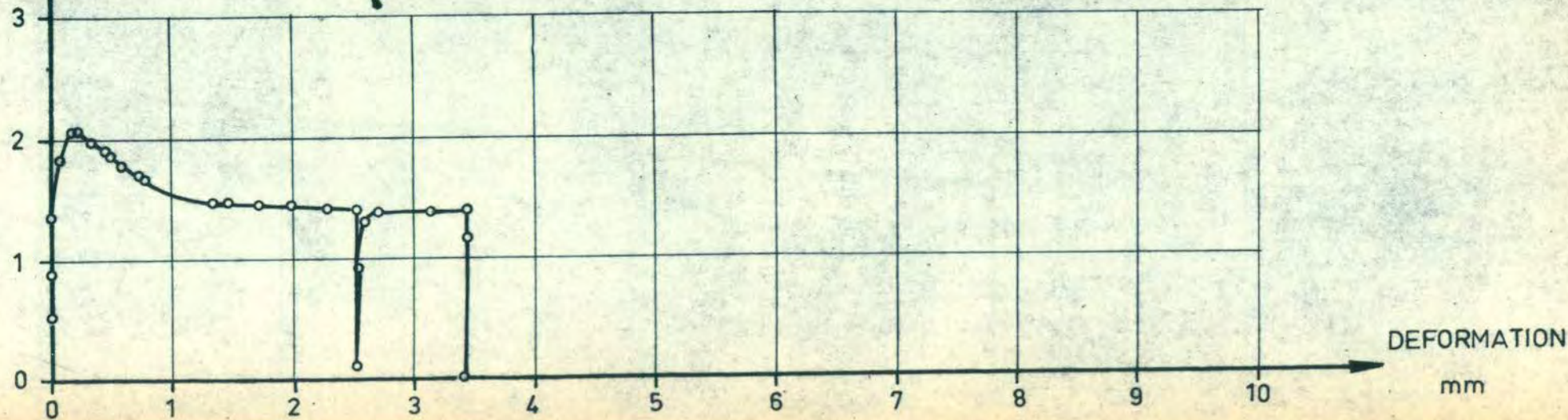
PROV NR 3

Djup 5 m

vertikallast  $4,2 \text{ Mp/m}^2$

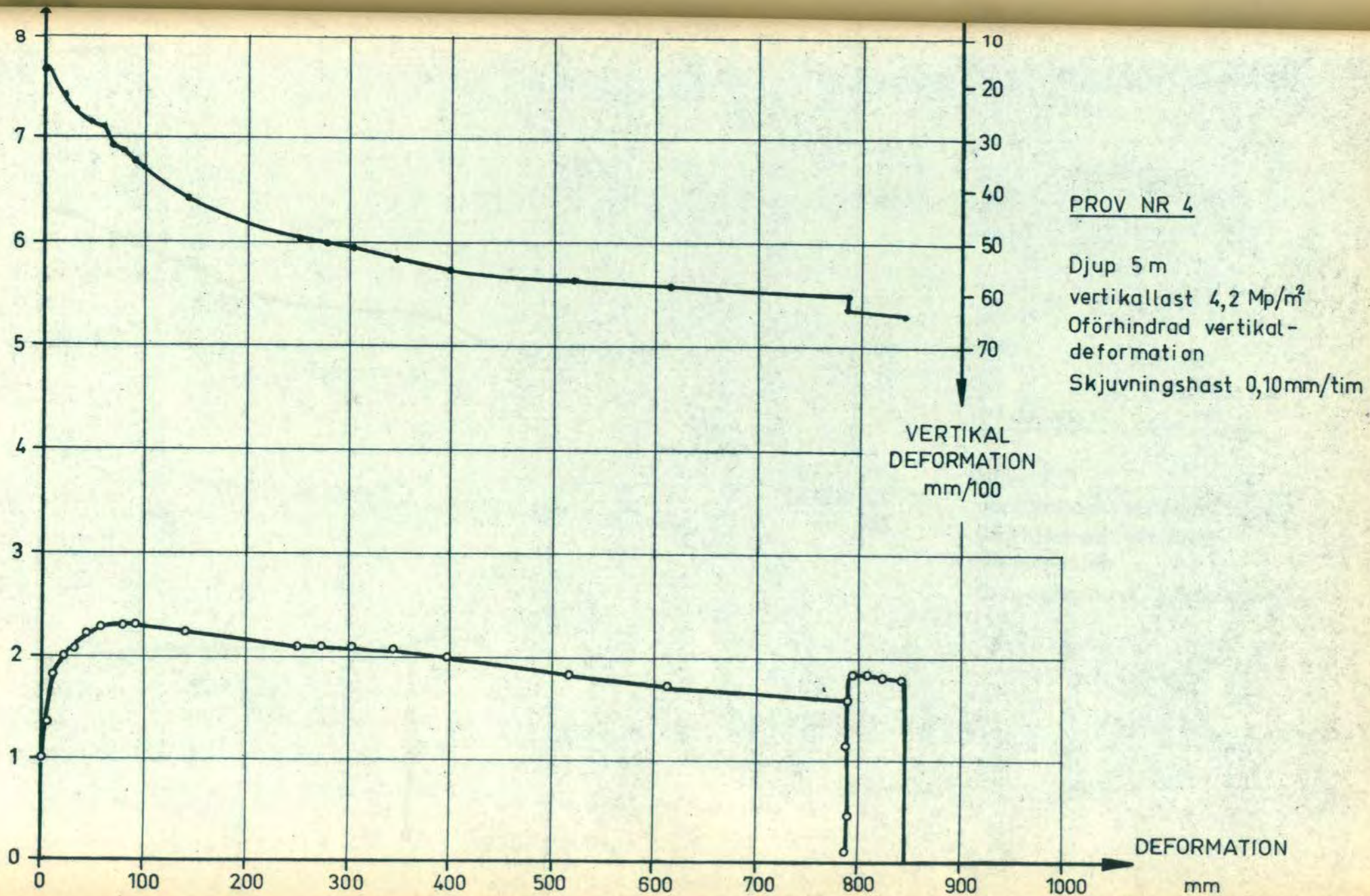
Oförhindrad vertikal deformation

Skjuvningshastighet  $0,01 \text{ mm/tim}$



DEFORMATION

mm

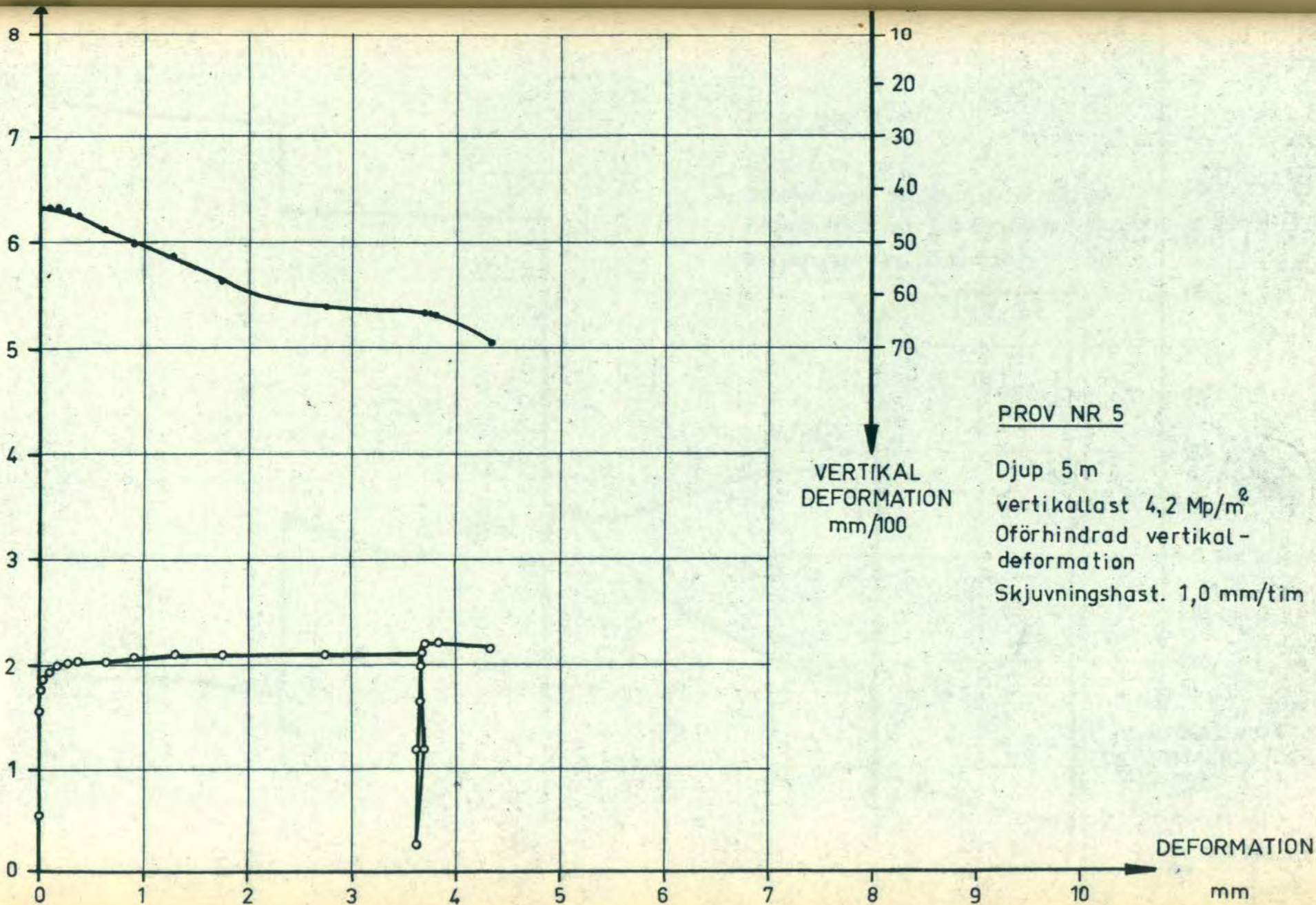


PROV NR 4

Djup 5 m  
 vertikallast 4,2 Mp/m<sup>2</sup>  
 Oförhindrad vertikal-  
 deformation  
 Skjuvningshast 0,10mm/tim

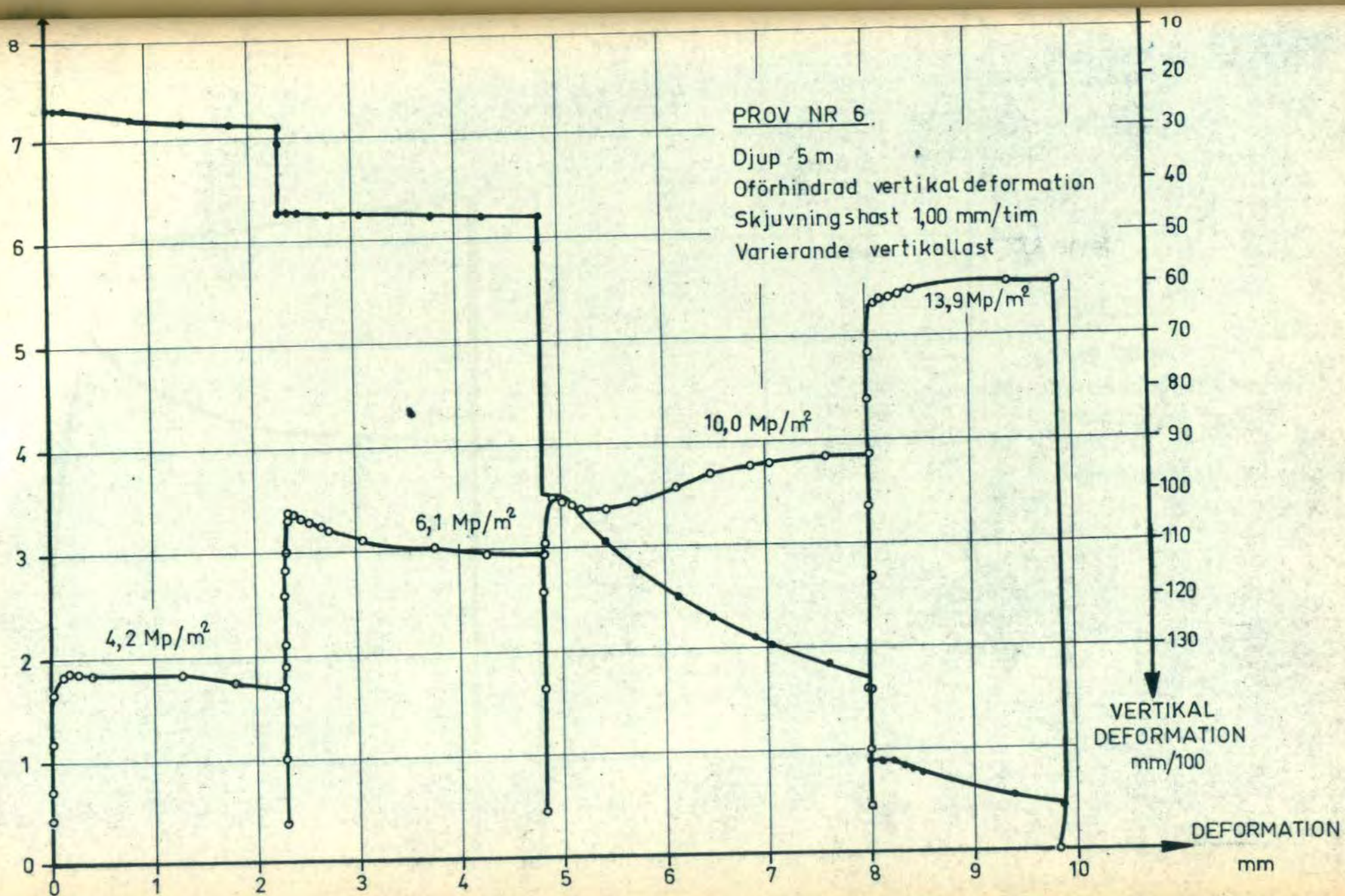
VERTIKAL  
 DEFORMATION  
 mm/100

DEFORMATION  
 mm

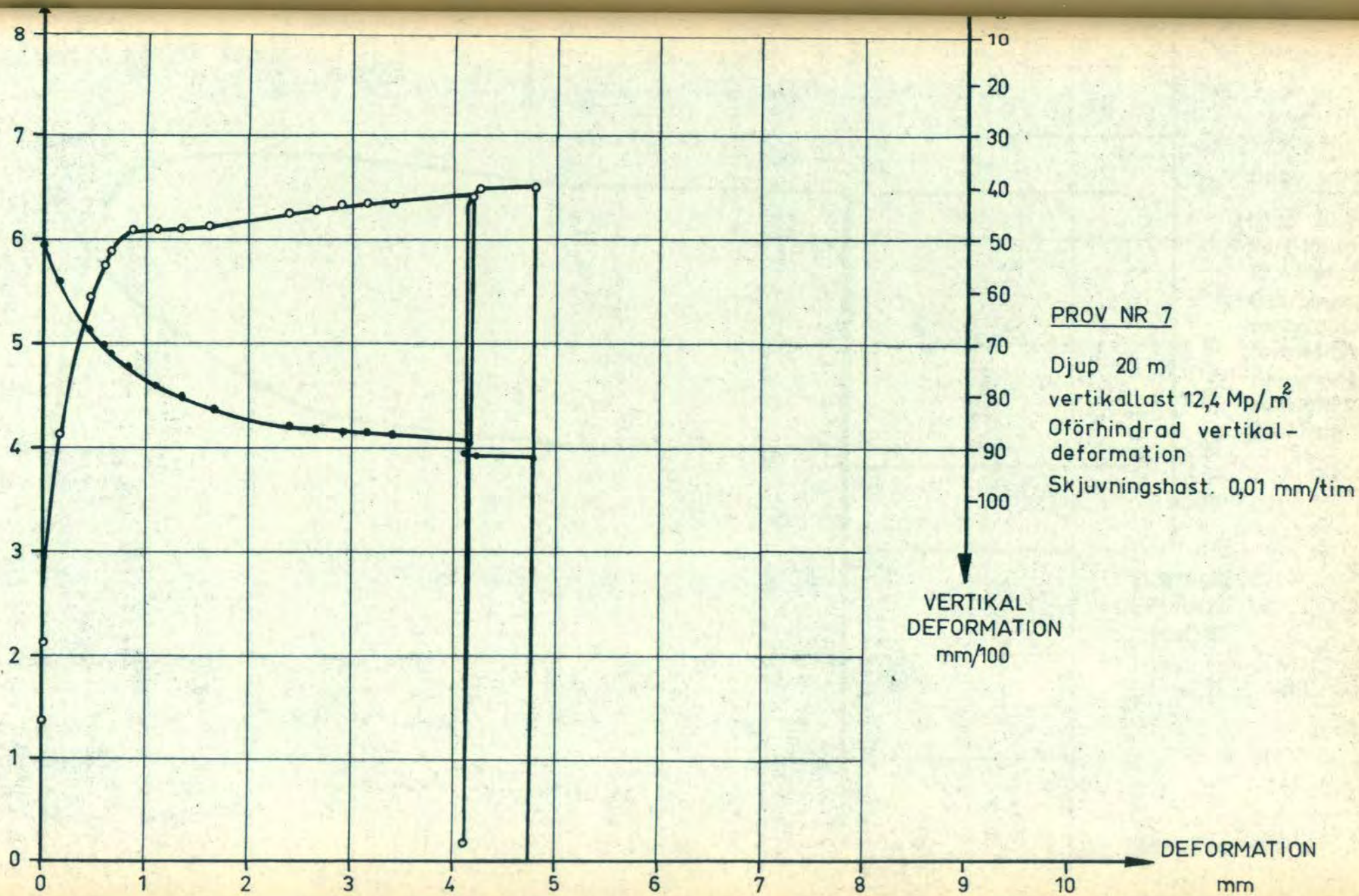


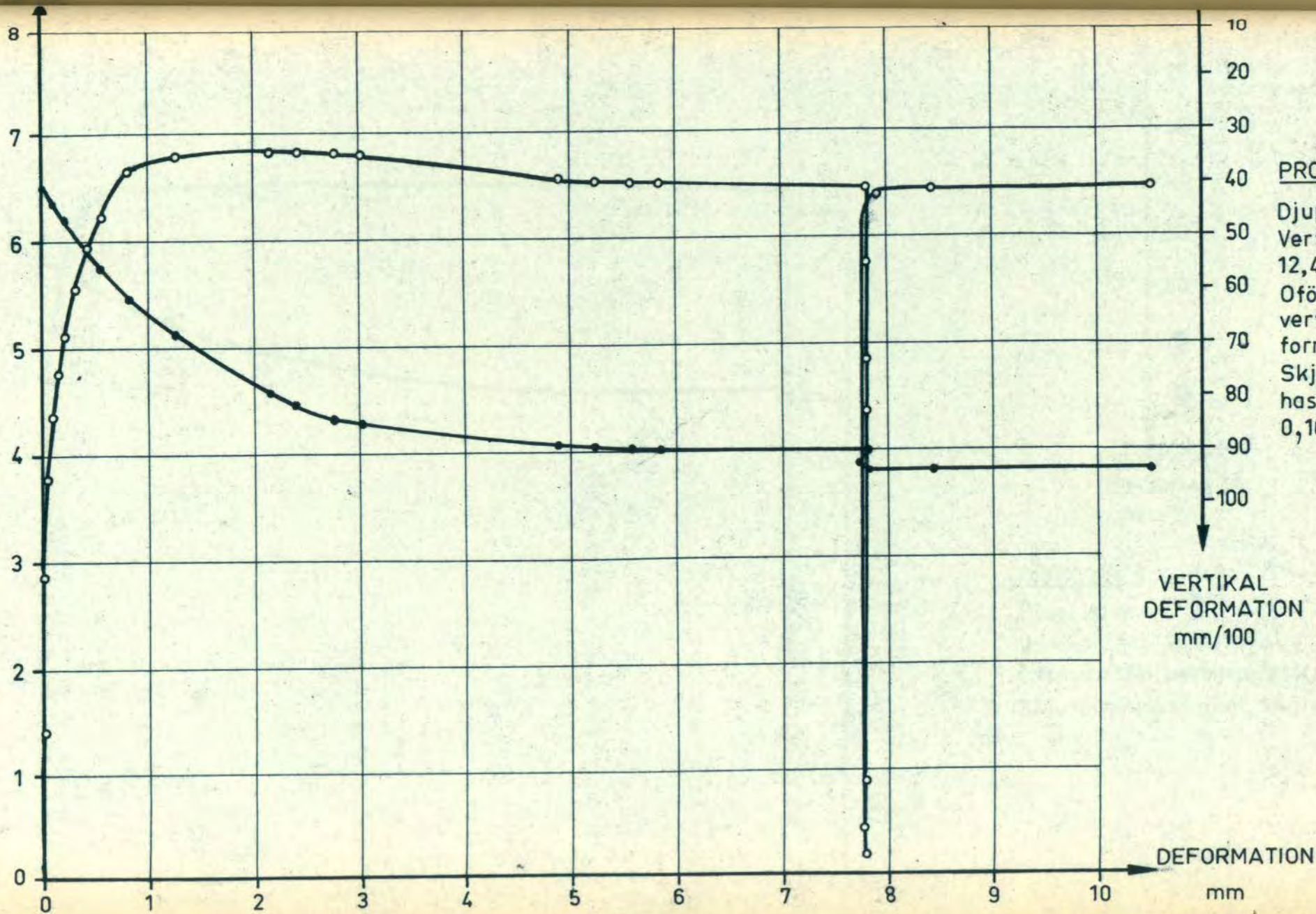
PROV NR 5

Djup 5 m  
 vertikallast  $4,2 \text{ Mp/m}^2$   
 Oförhindrad vertikal-  
 deformation  
 Skjuvningshast.  $1,0 \text{ mm/tim}$







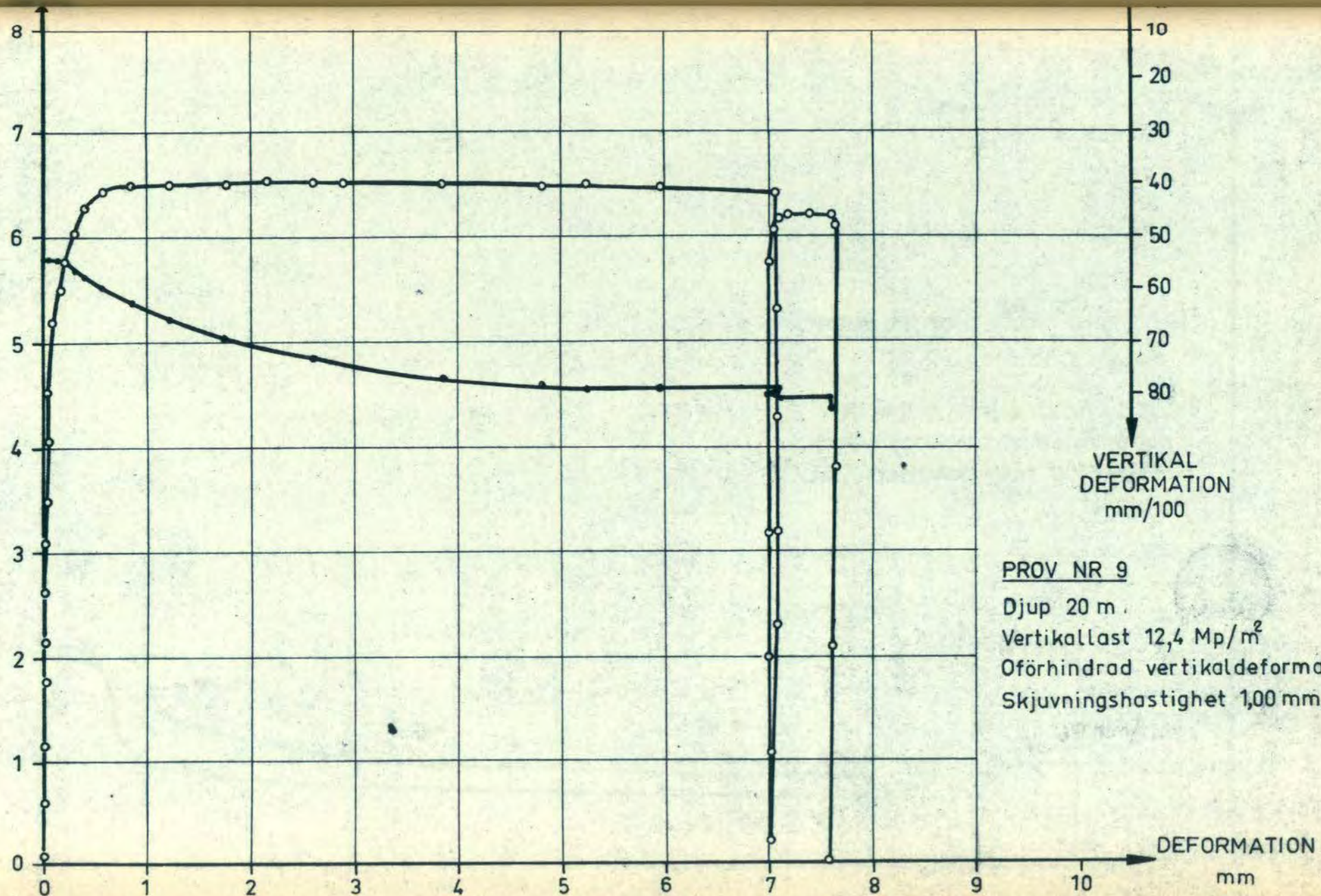


PROV NR 8

Djup 20 m  
 Vertikallast  
 12,4 Mp/m<sup>2</sup>  
 Oförhindrad  
 vertikalde-  
 formation  
 Skjuvnings-  
 hastighet  
 0,10 mm/tim

VERTIKAL  
 DEFORMATION  
 mm/100

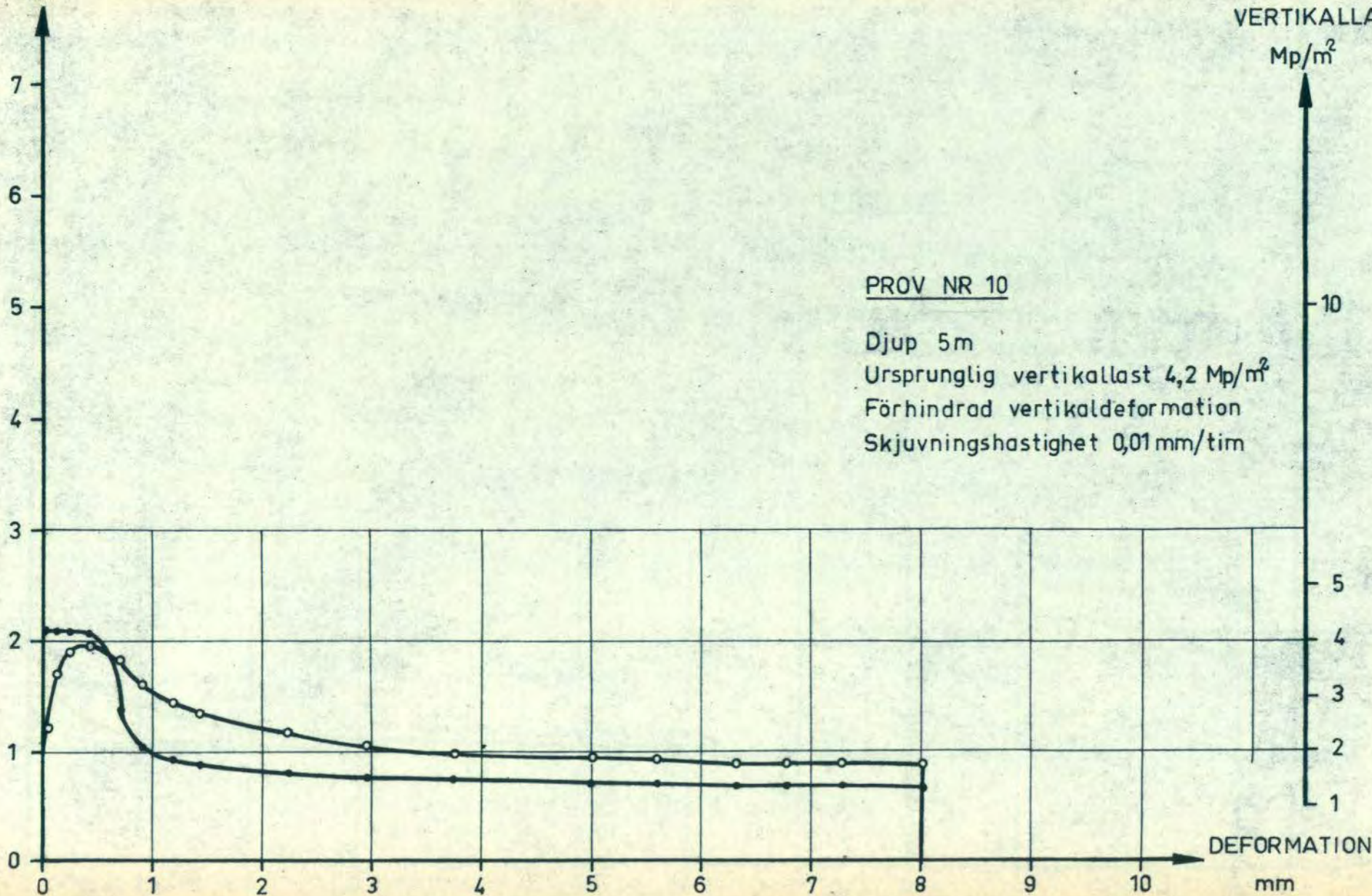
DEFORMATION  
 mm



PROV NR 9  
 Djup 20 m.  
 Vertikallast 12,4 Mp/m<sup>2</sup>  
 Oförhindrad vertikaldeformation  
 Skjuvningshastighet 1,00 mm/tim

SKJUVKRAFT

Mp/m<sup>2</sup>



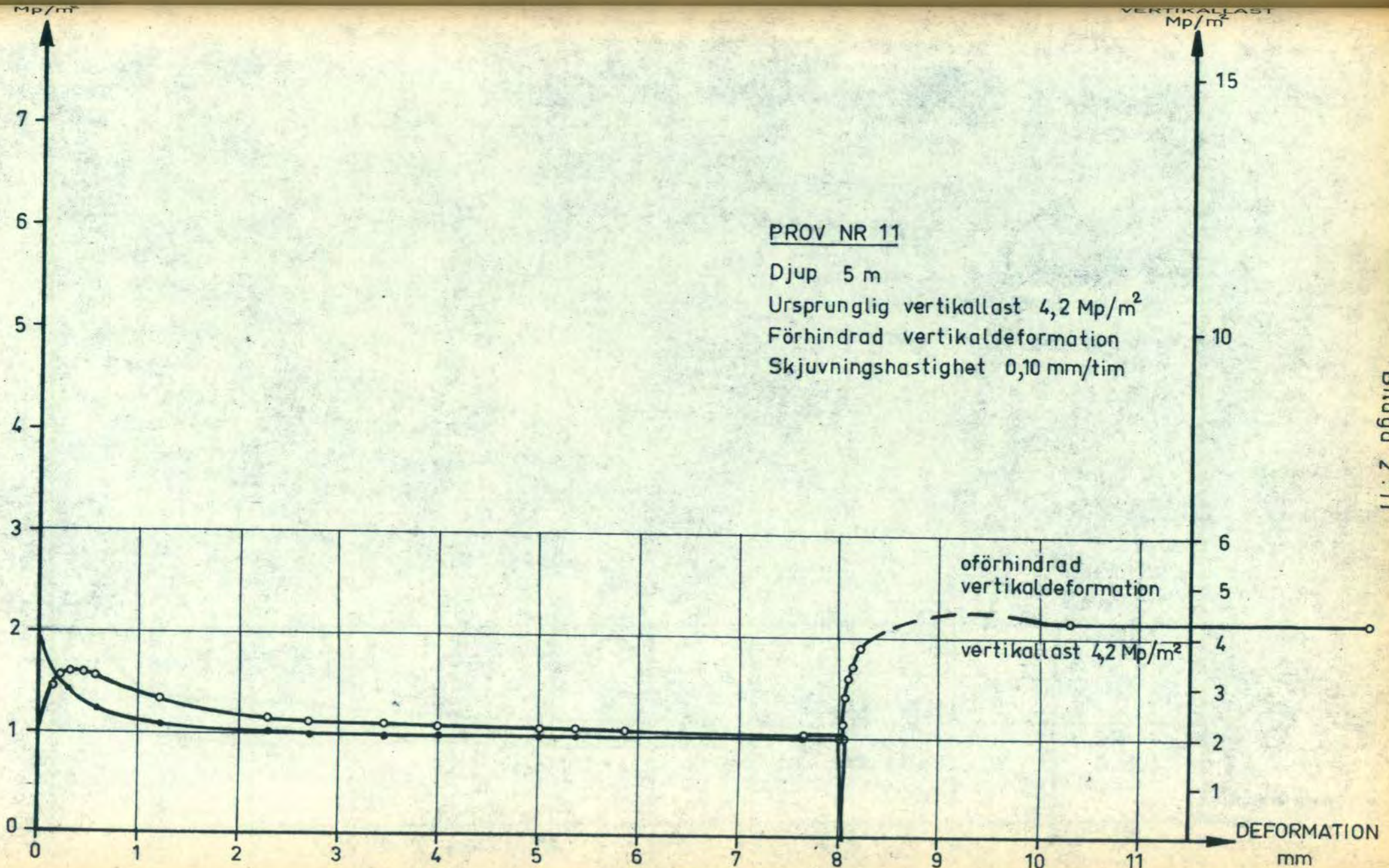
PROV NR 11

Djup 5 m

Ursprunglig vertikallast  $4,2 \text{ Mp/m}^2$

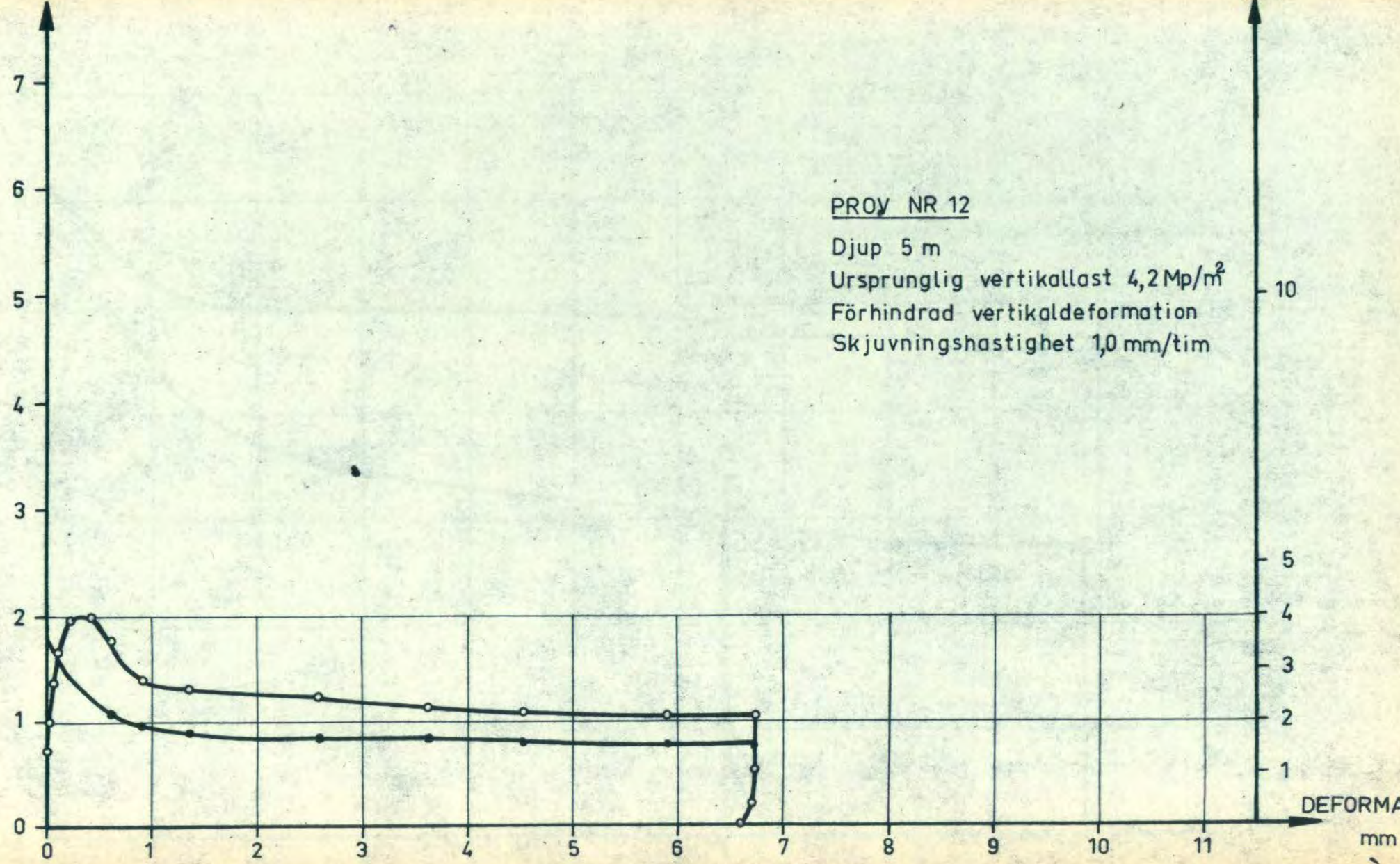
Förhindrad vertikaldeformation

Skjuvningshastighet  $0,10 \text{ mm/tim}$



BRÖCKRÄFT  
Mp/m<sup>2</sup>

VERTIKALLAST  
Mp/m<sup>2</sup>



PROY NR 12

Djup 5 m

Ursprunglig vertikallast 4,2 Mp/m<sup>2</sup>

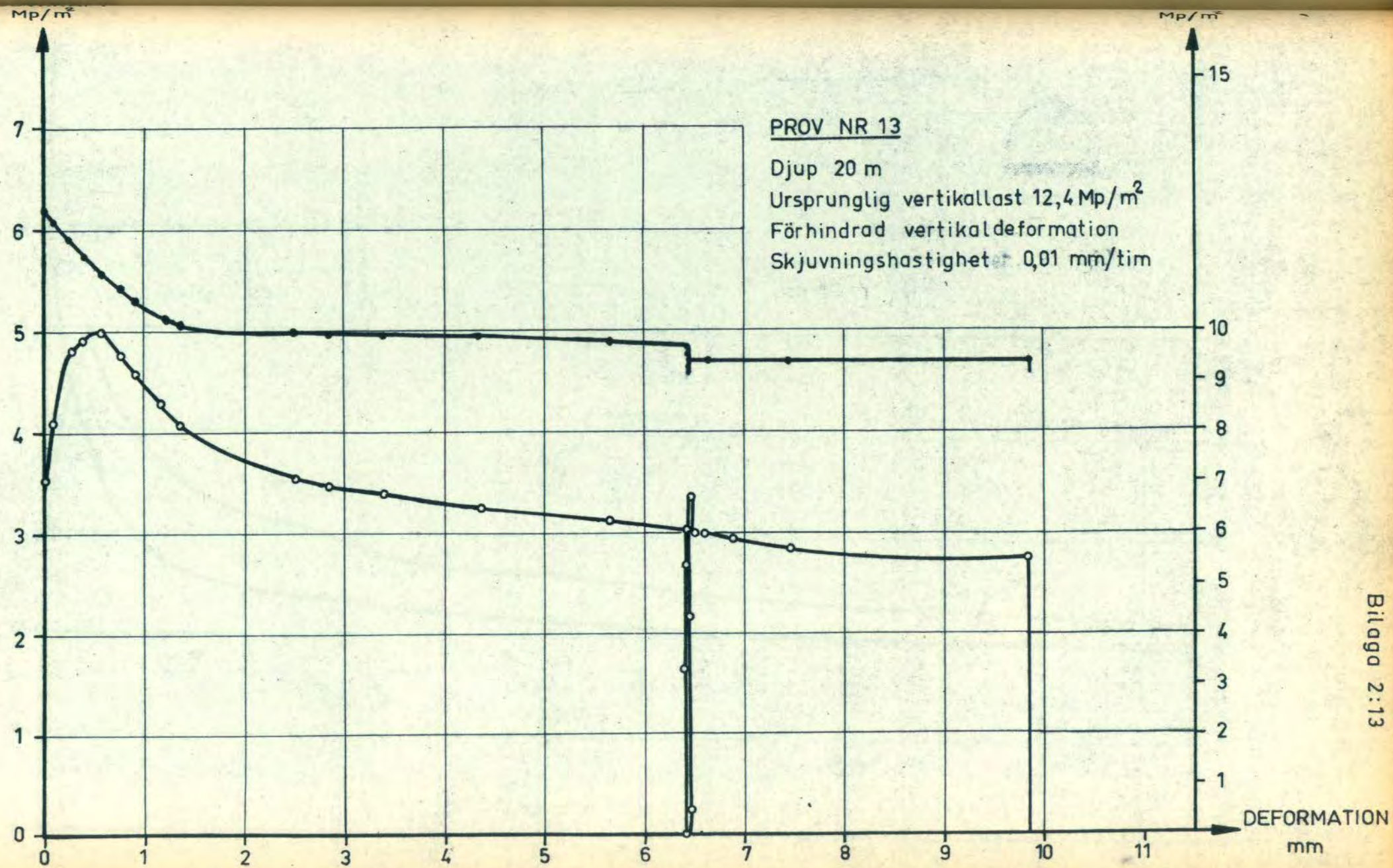
Förhindrad vertikaldeformation

Skjuvningshastighet 1,0 mm/tim

Bilaga 2:12

DEFORMATION

mm



SKJUVKRAFT  
Mp/m<sup>2</sup>

VERTIKALLAST  
Mp/m<sup>2</sup>

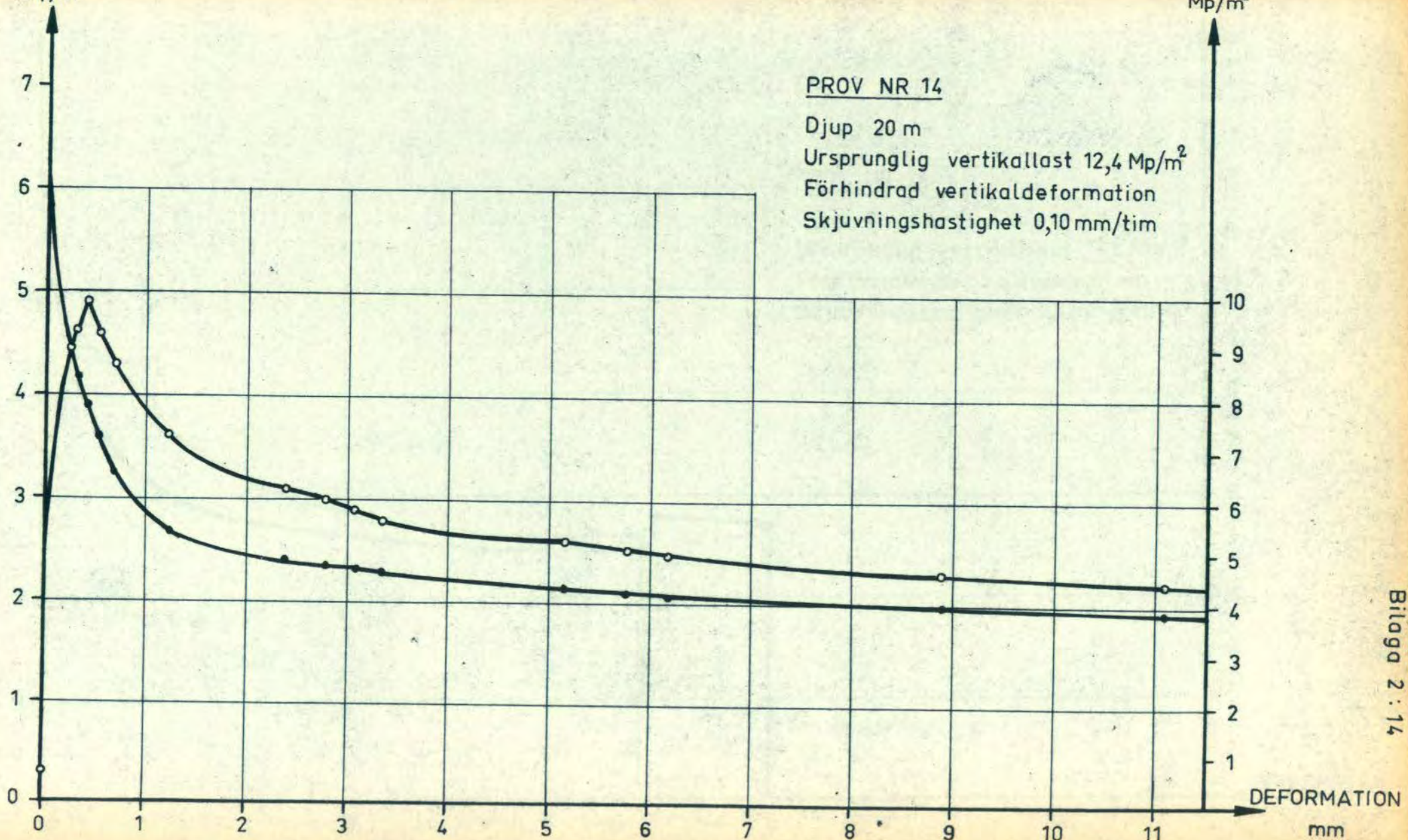
PROV NR 14

Djup 20 m

Ursprunglig vertikallast 12,4 Mp/m<sup>2</sup>

Förhindrad vertikaldeformation

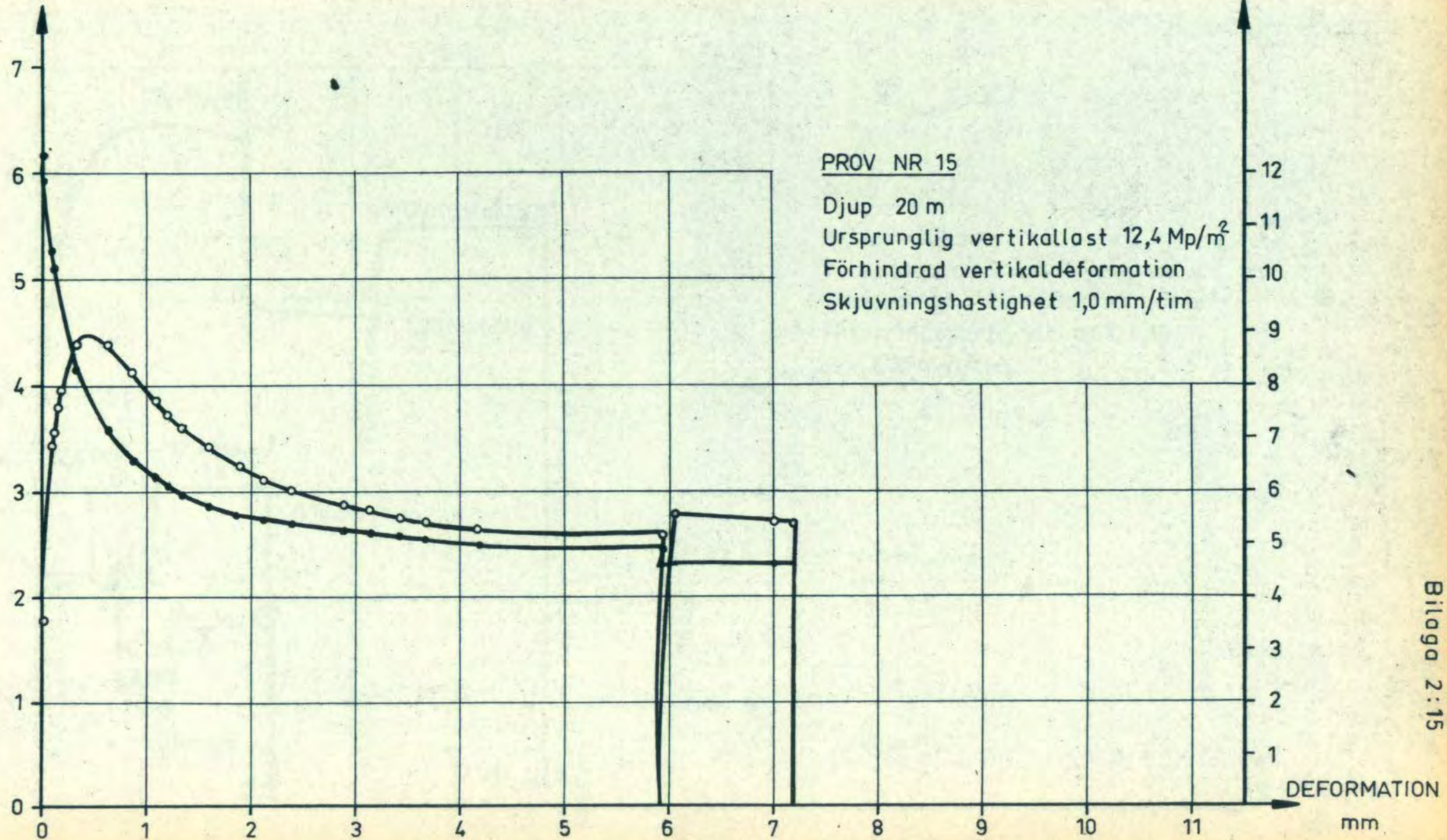
Skjuvningshastighet 0,10 mm/tim





ERFÖRDERLIG  
SKJUVKRAFT  
Mp/m<sup>2</sup>

VERTIKALLAST  
Mp/m<sup>2</sup>



PROV NR 15

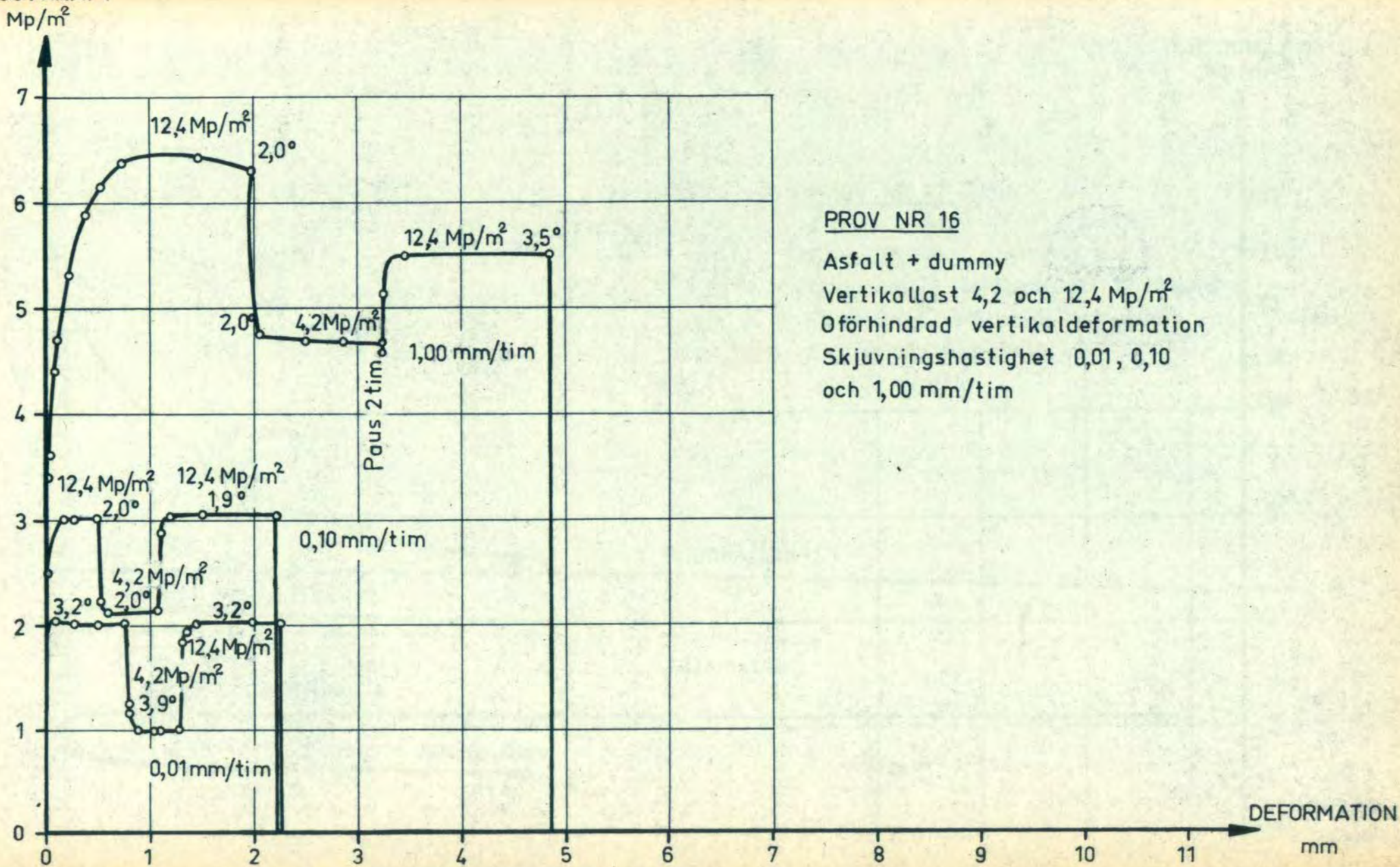
Djup 20 m

Ursprunglig vertikallast 12,4 Mp/m<sup>2</sup>

Förhindrad vertikaldeformation

Skjuvningshastighet 1,0 mm/tim

ERFÖRDERIG  
SKJUVKRAFT



PROV NR 16

Asfalt + dummy

Vertikallast 4,2 och 12,4  $Mp/m^2$

Oförhindrad vertikaldeformation

Skjuvningshastighet 0,01, 0,10

och 1,00 mm/tim

ERFORDERLIG  
SKJUVKRAFT  
Mp/m<sup>2</sup>

VERTIKALLAST  
Mp/m<sup>2</sup>

PROV NR 17  
Asfalt + lera  
Djup 20,0 m  
Ursprunglig vertikallast 12,4 Mp/m<sup>2</sup>  
Förhindrad vertikaldeformation  
Skjuvningshastigheter 0,01, 0,10  
och 1,00 mm/tim

