

11666  
02.07.84

# OPPDRAKS RAPPORT

STATENS BYGGE- OG EIENDOMS-  
DIREKTORAT

POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET,  
BERGEN

DYPKOMPRIMERT SPRENGSTEINS-  
FYLLING - OVERFLATEBØLGESEISMIKK



84302-1

21. mai 1984

## INNHold:

	<u>Side:</u>
SAMMENDRAG - KONKLUSJONER . . . . .	2
1. INNLEDNING . . . . .	3
2. METODEBESKRIVELSE . . . . .	4
2.1 Teoretisk bakgrunn . . . . .	4
2.2 Praktisk gjennomføring . . . . .	5
3. UTFØRTE KONTROLLER . . . . .	6
4. RESULTATER . . . . .	8
4.1 Forplantningshastigheter . . . . .	8
4.2 Skjærmoduler ved lave tøyingsnivåer - $G_{max}$ . . . . .	9
4.3 Moduler for statiske laster . . . . .	10
REFERANSER . . . . .	12
TEGNINGER (NR. 001 - 012)	

Norges Geotekniske Institutt

Postadresse:  
Postboks 40 Tåsen  
Oslo 8

Kontoradresse:  
Sognsveien 72

Telegramadresse:  
GEOTEKNIKK

Telefon:  
(02) 23 03 88

Telex:  
19787 ngi n

## SAMMENDRAG - KONKLUSJONER

Ny postterminal for Bergen skal bygges på en opptil 15 m tykk, dypkomprimert sprengsteinsfylling ved Solheimsvannet.

Effekten av komprimeringen er kontrollert ved at forplantningshastigheten for Rayleighbølger i fyllingen er målt før og etter komprimeringen. Kontrollen er utført i to ca. 20 m lange profiler, vist som A og B på fig. 1. Metoden gir et mål for fyllingens gjennomsnittlige egenskaper over hele dens tykkelse.

Kontrollen viser at komprimeringen har øket forplantningsbølgehastigheten fra 265 m/s til 350 m/s for profil A og fra 250 m/s til 320 m/s for profil B. Disse hastigheter tilsvarer skjærmoduler ved små tøyingsnivåer,  $G_{\max}$ , på 160 MPa før komprimering og 290 MPa etter komprimering i profil A. Tilsvarende verdier for profil B er 140 MPa og 245 MPa.

Modulene ved statiske laster, som f.eks. fra bygningsvekter, vil være langt lavere enn de oppgitte  $G_{\max}$  verdiene. Sammenhengene mellom dynamisk bestemte moduler og statiske moduler for steinfylling er foreløpig lite avklaret. Rapporten antyder imidlertid en mulig betraktningsmåte. En slik betraktning forutsier en større relativ effekt av komprimeringen på de statiske modulene enn på  $G_{\max}$  modulene.

## 1. INNLEDNING

Ved Solheimsvannet i Bergen skal det oppføres en postterminal. Tomten for bygget består av sprengstein fylt ut i vannet. Fyllingens tykkelse varierer fra ca. 6 til 15 m. Over det meste av området er dårlige masser fjernet ved mudring før utfylling. Over fjell er det et tynt lag fast sand og grus.

For å forbedre steinfyllingens egenskaper er det utført dynamisk dypkomprimering, med to og til dels tre overfarer, over hele området. Et 20 tonns lodd, og fallhøyder fra 10 til 15 m er benyttet ved komprimeringen.

Det har lenge vært et problem å få kontrollert den effekt dypkomprimering har på de mekaniske egenskapene av sprengstein. Platebelastningsforsøk har vært en mulighet, men blir urimelig kostnadskrevende dersom de skal gi representative verdier.

På dette prosjektet ble det besluttet å forsøke å måle fyllingens mekaniske egenskaper ved hjelp av forplantningshastigheten for overflatebølger. Dette er en metode under utvikling, men den har ikke tidligere vært benyttet på sprengstein.

NOTEBY, som er geoteknisk konsulent for prosjektet, har engasjert NGI for å gjennomføre målingene.



## 2. METODEBESKRIVELSE

### 2.1 Teoretisk bakgrunn

Når elastiske bølger forplanter seg langs et geologisk profil, vil en del av bølgeenergien følge den fri overflaten i form av Rayleigh bølger. Slike bølger består av både horisontale og vertikale bevegelser som avtar med dybden, slik at kun materialet ned til ca. en bølgelengde under overflaten er influert.

Bølgenes forplantningshastighet er avhengig av materialets skjærmodul,  $G$ , som vist i nedenstående ligning:

$$v_R = f(v) \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Her er  $\rho$  fyllingens massetetthet og  $f(v)$  en funksjon av Poissons tall.  $f(v)$  varierer i området 0,9 til 1,0 og er derfor av mindre betydning.

Skjærmodulen kan således bestemmes ved følgende ligning når Rayleighbølgehastigheten,  $v_R$ , er målt og  $\rho$  og  $v$  kan antas kjent:

$$G = \rho \cdot \left[ \frac{v_R}{f(v)} \right]^2$$

Bølgekomponenter med forskjellig frekvens vil ha forskjellig bølgelengde:  $\lambda = v_R/f$ , og således penetrere profilet til forskjellig dybde. For profiler der modulen endrer seg med dybden, vil derfor bølger med forskjellig frekvens forplante seg med forskjellig hastighet, d.e. forplantningen er dispersiv.

Grovt sett vil forplantningshastigheten for en bølgekomponent med bølgelengde  $\lambda$ , være bestemt av middelverdien av skjærmodulen ned til ca.  $2/3\lambda$  dybde. Forplantningshastighet som

funksjon av frekvens inneholder således informasjon om hvorledes modulen endrer seg med dybden.

Gangtiden for en bølge med frekvens  $f$ , mellom to punkter på overflaten, med avstand  $\ell$ , d.e. fasetidsforsinkelsen, vil være:

$$\Delta t_{ph} = \frac{\Delta \phi / f}{2\pi}$$

der  $\Delta \phi$  er endringen i fase fra det ene punktet til det andre. Tilsvarende forplantningshastighet, d.e. fasehastighet, vil være:

$$v_{R_{ph}} = \ell / \Delta t_{ph}$$

Dersom bølgene er generert ved et slag eller av en random vibrator, vil de inneholde et kontinuerlig spektrum av frekvenskomponenter, og faseendringen mellom to punkter vil være en kontinuerlig funksjon av frekvensen:  $\Delta \phi(f)$ . Tolkningen for hver enkelt frekvens blir imidlertid den samme.

## 2.2 Praktisk gjennomføring

For å generere bølger i steinfyllingen ble det benyttet det samme fall-loddet som til komprimeringen. Energien fra et slikt slag forplanter seg i det alt vesentlige i form av Rayleigh-bølger.

Vertikale og horisontale akselerasjoner fra hvert slag ble registrert i tre punkter langs det profilet som skulle kontrolleres, slik det er vist på fig. 2. Akselerometre av type Q-flex ble benyttet. For å oppnå god kontakt mellom fylling og akselerometre ble det støpt små betongkaker i fyllingen.



Signalene ble forsterket, filtrert og registrert på FM båndopptaker for senere analyse.

Før videre analyse ble 5 s lange sekvenser fra hvert slag digitalisert med en samplefrekvens på 1500 Hz. Fig. 3 viser et typisk akselerasjonsforløp fra et slag.

Signalanalysen bestod i fouriertransformering av signalene og beregning av krysspektra mellom samhørende akselerasjonskomponenter i profilet. Det ble slått en rekke slag i hvert profil og både fallhøyde og avstand ble variert for å oppnå best mulig frekvensdekning. Krysspektrene for alle slag, med god signal-kvalitet, ble midlet for hvert profil. Fasedelen av de midlede krysspektrene dannet grunnlaget for beregning av forplantningshastigheten. Fig. 4 viser et eksempel på et slikt fasespekter. Koherens for de midlede krysspektrene ble beregnet. Signalanalysen ble utført med programsystemet SANTO (Ref. 1).

### 3. UTFØRTE KONTROLLER

Steinfyllingen er kontrollert med overflatebølger langs to profiler, A og B, som vist i plantegningen på fig. 1. Feltmålinger ble også utført langs et tredje profil, C, men resultatene derfra er ikke tolket.

Det er gjennomført to måleserier i hvert profil:

24.1.84 - Da fyllingen var ferdig utlagt, men før komprimering var påbegynt.

27.4.84 - Etter at komprimeringen var ferdig.

Fig. 5 og 6 viser vertikalsnitt av henholdsvis profil A og profil B. Akselerometerplasseringen og slagpunktene for de to kontrolltidspunktene er vist.



24. januar ble det benyttet ca. 10 m innbyrdes avstand mellom målepunktene, og en lengde på ca. 20 m av fyllingen ble således kontrollert i hvert snitt. 27. april ble det benyttet ca. 20 m innbyrdes avstand og ca. 40 m lengder ble da kontrollert.

Dataene i profil B er basert på både 30 og 50 m avstand fra slagpunkt til nærmeste akselerometer. I profil A var det av plasshensyn bare mulig med 30 m avstand.

Ved hver av de to måleseriene ble det også gjennomført en kalibreringsmåling, der alle akselerometre ble plassert på samme sted.

For å unngå for mye flytting av kranen, ble målinger i profil B utført med bølgeforplantning mot Nord 24.1. og mot Sør 27.4. I profil A var bølgeforplantningen mot Øst begge ganger. Bølgeforplantningsretningen vil ikke influere på resultatene.

For begge profiler ble det benyttet både 10 og 15 m fallhøyde for loddet.

Antall registrerte slag pr. profil var 24.1. ca. 40, mens antallet var ca. 30 den 27.4. Kryssspektrene fra alle slag der signalkvaliteten var god ble midlet sammen for hvert profil. De spektrene som danner grunnlag for hastighetsberegningene er basert på mellom 15 og 28 midlinger.

Det var meget lave temperaturer i januar, og fyllingen hadde et hardfrosset topplag da målingene ble utført. Dette medførte at de horisontale sensorene vesentlig registrerte hurtige kompressjonsbølger i dette topplaget, mens de vertikale sensorene registrerte overflatebølger. Tolkningen av dataene fra 24.1. er derfor kun basert på de vertikale sensorene. Ved målingene i april, derimot, er det full overensstemmelse mellom horisontale og vertikale sensorer, og tolkningen av dataene fra 27.4. er basert på begge komponenter.

#### 4. RESULTATER

##### 4.1 Forplantningshastigheter

Fig. 7 og 8 viser Rayleighbølgenes fasehastighet som funksjon av frekvens for henholdsvis profil A og profil B. Målinger både fra første til annen, fra annen til tredje og fra første til tredje sensorposisjon er vist. Overensstemmelsen for de forskjellige avstandene innen hvert profil er god. Fra målingene i profil B 27.4. var det bare mulig å få tolkbare resultater mellom første og tredje sensorposisjon.

Fig. 9 og 10 viser de samme data, men plottet med fasehastighet som funksjon av bølgelengde.

For begge profilene kommer effekten av komprimeringen tydelig fram:

Hastigheten ved de store bølgelengdene er vesentlig dominert av fjellets egenskaper, og ingen innflytelse av komprimeringen finnes her.

Profil A er dypere enn profil B, noe som gir seg uttrykk i at innflytelsen fra fjellet inntreffer ved større bølgelengder her enn i profil B.

Målingene fra januar viser en noe større hastighet for de minste bølgelengdene enn for de noe større. Dette tilskrives det frosne topplaget i fyllingen.

Steinfyllingens tykkelse er i profil A ca. 15 m og i profil B ca. 11 m. Frekvenskomponenter med bølgelengde på henholdsvis 22,5 og 16,5 m skulle derfor ifølge avsnitt 2.1 ha fasehastigheter som er representative for hele fyllingens tykkelse i de to respektive profilene. Tabell 1 viser hastighetene for disse frekvenskomponentene før og etter komprimeringen, og gir således et mål på den gjennomsnittlige effekt av komprimeringen tvers gjennom fyllingen.



PROFIL	FASEHASTIGHET		
	FØR KOMPRIMERING m/s	ETTER KOMPRIMERING m/s	ØKNING %
A	265	350	32
B	250	320	28

Tabell 1

#### 4.2 Skjærmoduler ved lave tøyningsnivåer - $G_{\max}$

Deformasjonsmodulen i steinfylling er sterkt avhengig av tøyningsnivået. De bølger som er benyttet ved disse seismiske målingene har tøyninger omkring  $5 \cdot 10^{-4}\%$ , som er så lave at materialet oppfører seg elastisk. Skjærmodulen i dette tøyningsområdet betegnes  $G_{\max}$ .

På grunnlag av målte Rayleighbølgehastigheter kan  $G_{\max}$  regnes som angitt i avsnitt 2.1:

$$G_{\max} = \rho \left[ \frac{v_R}{f(v)} \right]^2$$

Målingene er foretatt i frekvensområdet 5 - 35 Hz, et frekvensområde der den aktuelle fyllingen må forventes å oppføre seg drenert. Poissons tall er derfor antatt:  $\nu = 0,25$ , som gir  $f(\nu) = 0,92$ .

Etter opplysninger fra NOTEBY antas fyllingens massetetthet å være  $1,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2$  (vannmettet) før komprimering. På grunnlag av nivellementene og de masser som er tilført fyllingen under komprimeringsarbeidet, er tettheten antatt øket til  $2,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2$  etter komprimeringen.

Tabell 2 stiller opp  $G_{\max}$  verdier for de to profilene før og etter komprimeringen. Modulene er basert på hastigheten i tabell 1, og er derfor representative for gjennomsnittsmodulen for hele fyllingstykkelsen:

PROFIL	$G_{\max}$		
	FØR KOMPRIMERING MPa	ETTER KOMPRIMERING MPa	ØKNING %
A	158	289	83
B	140	243	74

Tabell 2

#### 4.3 Moduler for statiske laster

Moduler som er representative ved beregning av statiske deformasjoner fra bygningslaster o.l. er langt lavere enn de modulene som er angitt i foregående avsnitt. Forskjellen skyldes dels at slike laster representerer langt høyere spennings- og tøyingsnivåer enn de bølgene som er brukt i de seismiske målingene, dels at det foregår langtidsdeformasjoner (kryp) i fyllingen.

Dessverre finnes det svært lite kunnskap om sammenhengen mellom statiske moduler og seismisk bestemte moduler for steinfylling. Det etterfølgende må betraktes mer som en "pekepinn" på hvordan en slik vurdering kan utføres enn noen form for pålitelig angivelse av tallverdier.

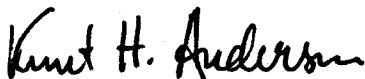
For sand er sammenhengen mellom sykliske moduler ved forskjellige tøyingsnivåer relativt godt klarlagt. Et eksempel på en slik sammenheng er gitt av Seed og Idriss (Ref. 2). Seed

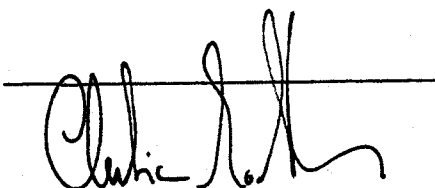
hevder at sammenhengen stemmer relativt godt også for steinfyllingsmaterialer.

Informasjonen i Seed-Idriss kurven kan omformes til å angi normalisert skjærmodul mot normalisert skjærspenning, slik fig. 11 viser. Ved å benytte kurven kan man finne G-verdiene ved høyere spenningsnivåer, slik det er vist i fig. 12. De modulene som her er angitt, er sykliske moduler, som ofte stemmer godt overens med rebelastningsmodulen. Hvor representative de er for en førstegangsbelastning av den aktuelle fylling vites ikke. Det fremgår tydelig av figuren at den relative økningen av modulene ved høye tøyingsnivåer, er større enn økningen i  $G_{\max}$ -modulen.

De utførte målingene gir ingen informasjon om fyllingens krypegenskaper. Imidlertid tilsier erfaringer at krypdeformasjonene aldri utgjør mer enn korttidsdeformasjonene. En reduksjon av de statiske moduler med en faktor på 2, for å ivareta kryp, skulle derfor være konservativt.

for NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT

  
Knut H. Andersen

  
Christian Madshus



#### REFERANSER

Hansteen, O.E. (1983)

User manual to SANTO - a computer program to analyse measured time series. Rev. 1.

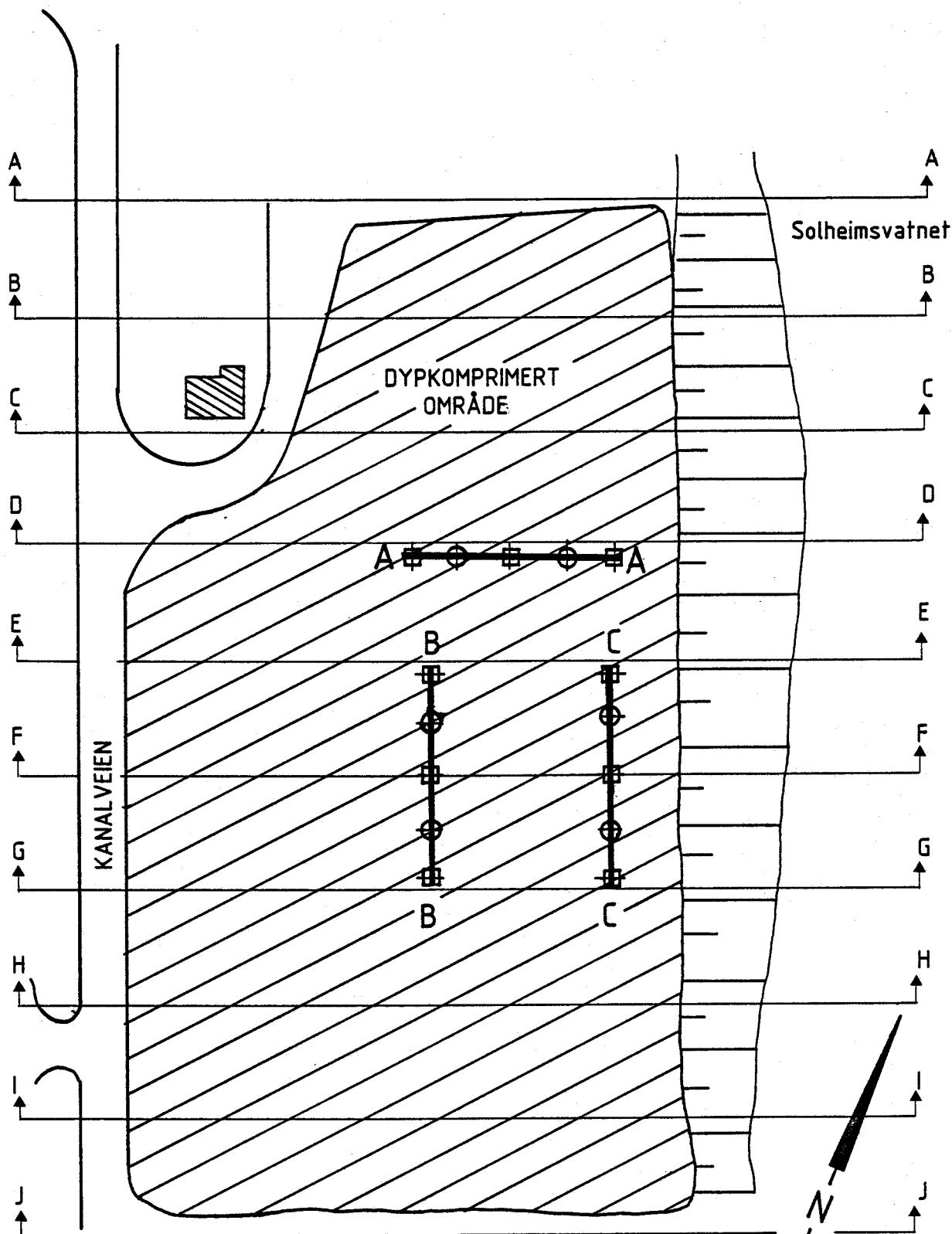
Norwegian Geotechnical Institute, Oslo. Report, 51512-6.

Seed, H.B. and I.M. Idriss (1970)

Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses.

University of California, Berkeley. College of Engineering.

Earthquake Engineering Research Center. Report, EERC 70-10.



⊗ Målepunkt - 24.1.84

⊠ Målepunkt - 27.3.84

— Måleprofil

M = 1:1000

POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Komprimeringskontroll, måleprofiler  
Plantegning

Norwegian Geotechnical Institute

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Approved

*U*

Project  
no. 84302

Drawing  
no.

001



AKSELEROMETRE

SLAGPUNKT

$V_R$

Rayleigh bølge

KONTROLLSTREKNING

POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Komprimeringskontroll med overflatebølgesismikk  
Prinsipper

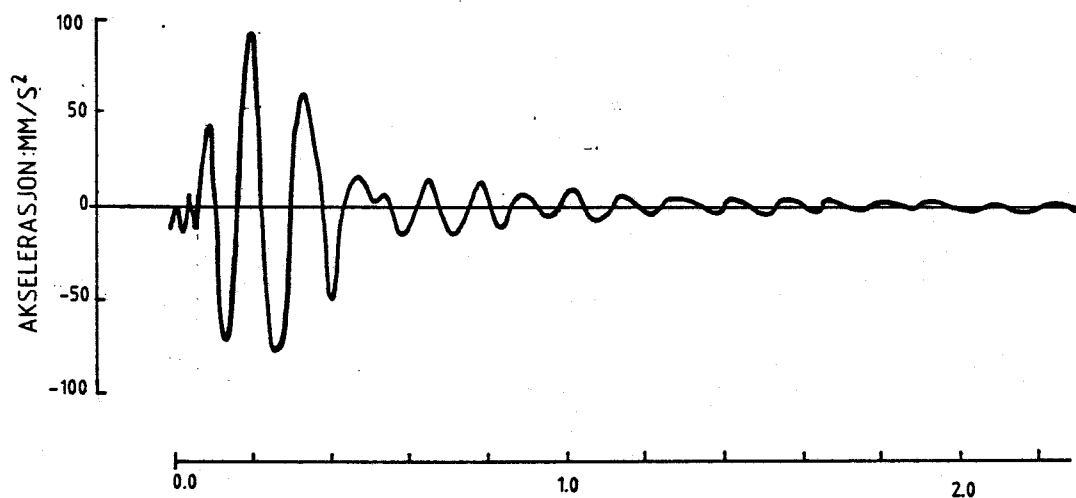
Approved *M*

Project  
no. 84302



Norwegian Geotechnical Institute

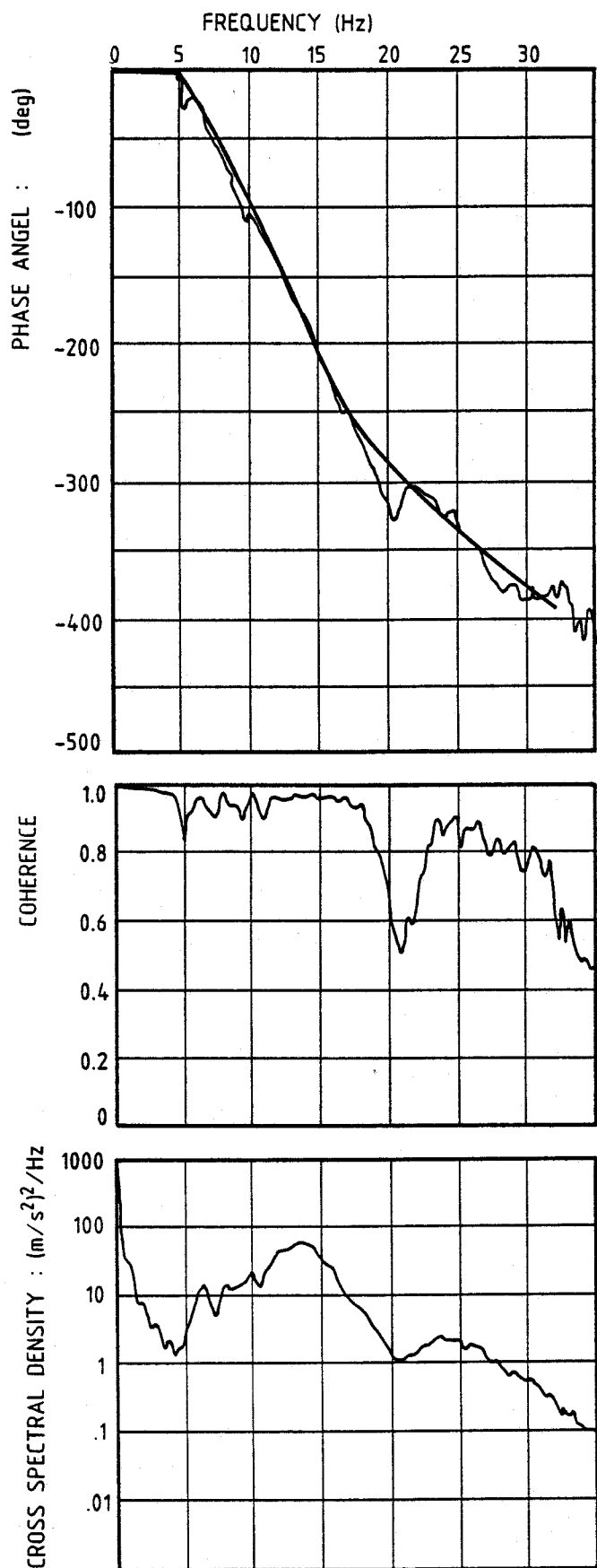


Drawing  
no. 002



Loddvekt : 20t  
 Fallhøyde : 15m  
 Avstand : ~40m  
 Måleretning : Vertikal  
 Ukomprimert steinfylling

POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET	Date 21.05.84	Drawn by T.S.
Komprimeringskontroll Registrert akselerasjonsforløp fra slag med komprimeringslodd. Eksempel	Approved 	
	Project no.	84302
Norwegian Geotechnical Institute		Drawing no. 003



PROFILE A  
24.1.84  
Average 16  
Ch. 2 → 4  
Vertical  
l = 10.10 m

POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Komprimeringskontroll:  
Profil A: kryss spektrum og kokerens mellom vertikal akselerasjon  
i målepunkt 1 og 2. Middel av 16 slag. Eksempel

Approved

*M*

Project  
no. 84302

Norwegian Geotechnical Institute

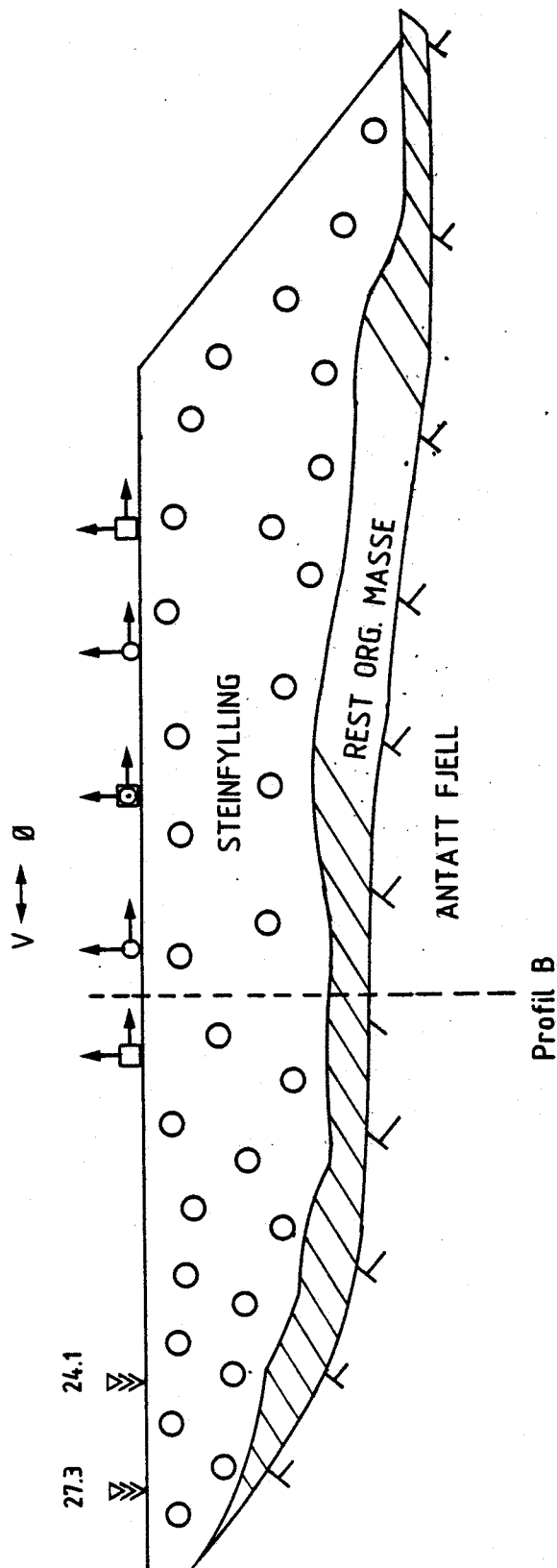


Drawing  
no.

004




# PROFIL A



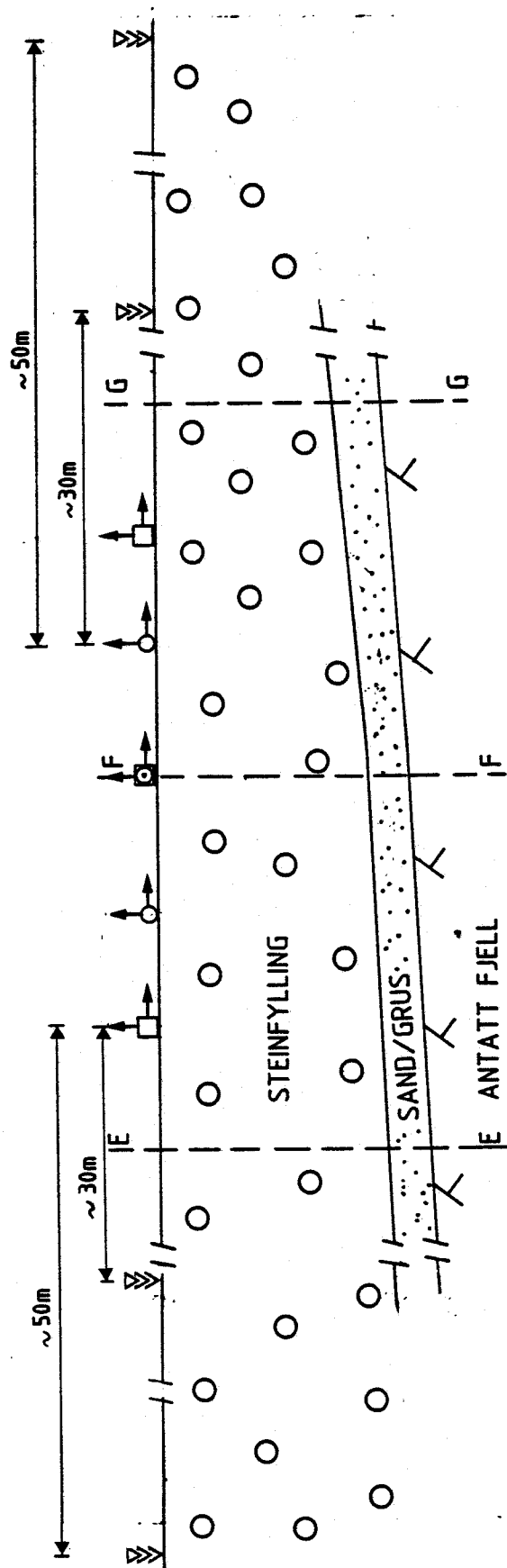
Målepunkt 24.1.84  
 Målepunkt 27.3.84  
 Slagpunkt

M = 1:500

POST-TERMINAL, SOLHEIMSVANNET	Date 21.05.84	Drawn by T.S.
SEISMIKK PROFIL A	Approved <i>m</i>	
	Project no. 84302	Drawing no. 005
Norwegian Geotechnical Institute		

PROFIL B

N ↔ S



Målepunkt 24.1.84

Målepunkt 27.3.84

Slagpunkt

M = 1:500

POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

SEISMIKK PROFIL B

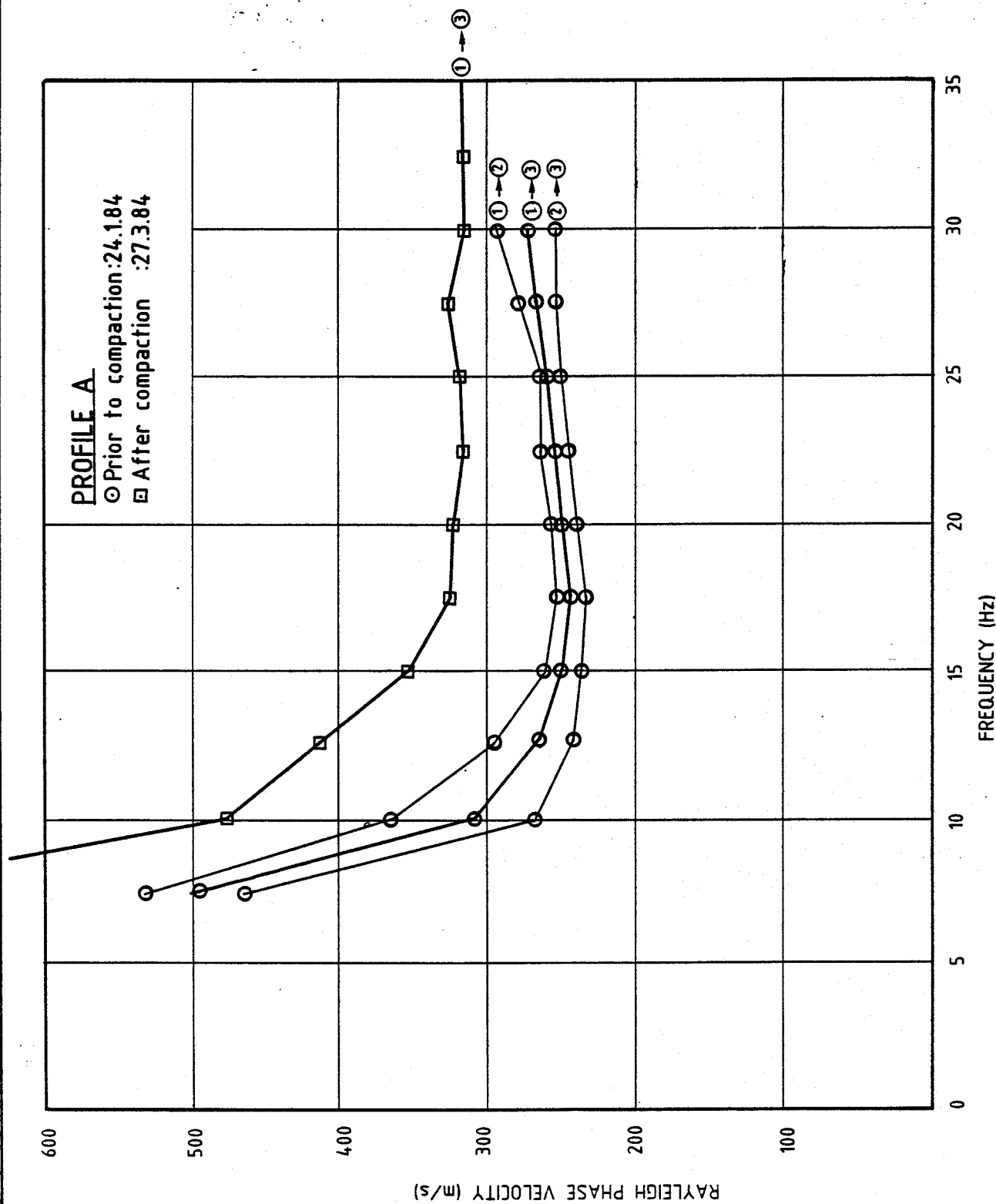
Approved *M*

Project  
no. 84302

Norwegian Geotechnical Institute



Drawing  
no. 006



POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Komprimeringskontroll: Profil A  
 Rayleigh fasehastighet før og etter komprimering

Approved

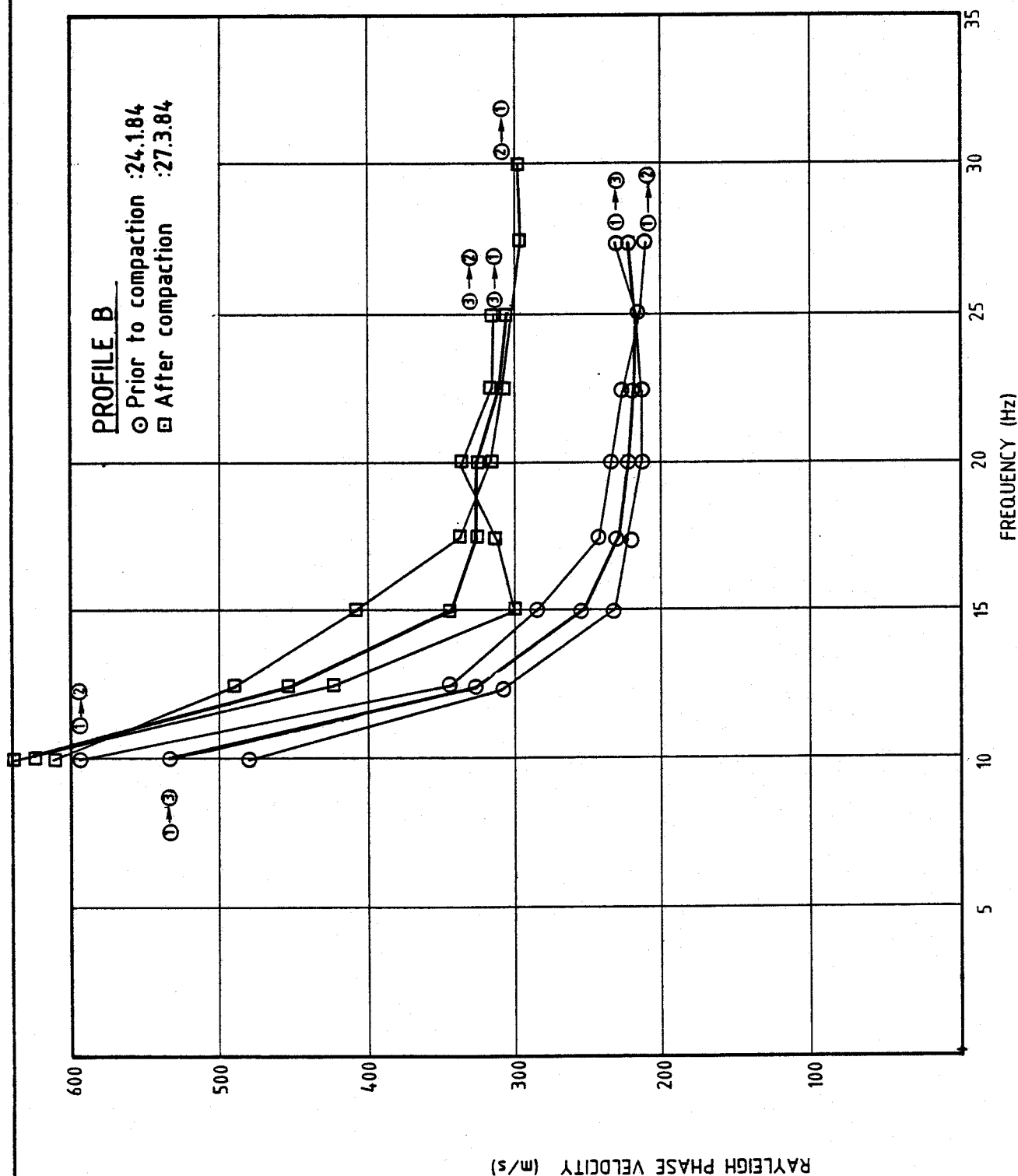
*[Signature]*

Project  
no. 84302

Norwegian Geotechnical Institute



Drawing  
no. 007



POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Komprimeringskontroll: Profil B  
 Rayleigh fasehastighet før og etter komprimering,  
 som funksjon av frekvens.

Approved

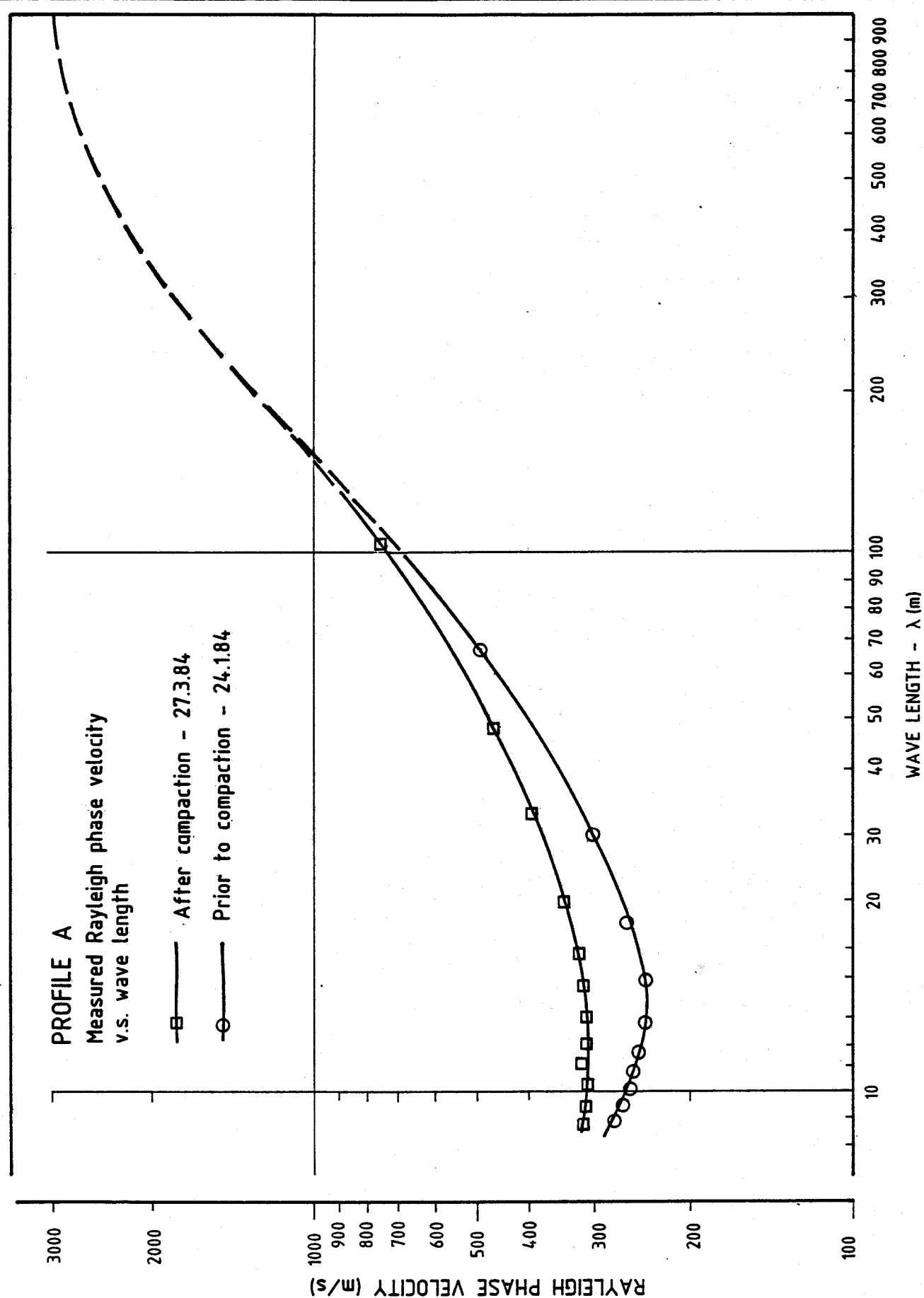
*M*

Project  
no. 84302

Norwegian Geotechnical Institute



Drawing  
no. 008



POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Komprimeringskontroll : Profil A  
Rayleigh fasehastighet før og etter komprimering,  
som funksjon av bølgetengde.

Norwegian Geotechnical Institute

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

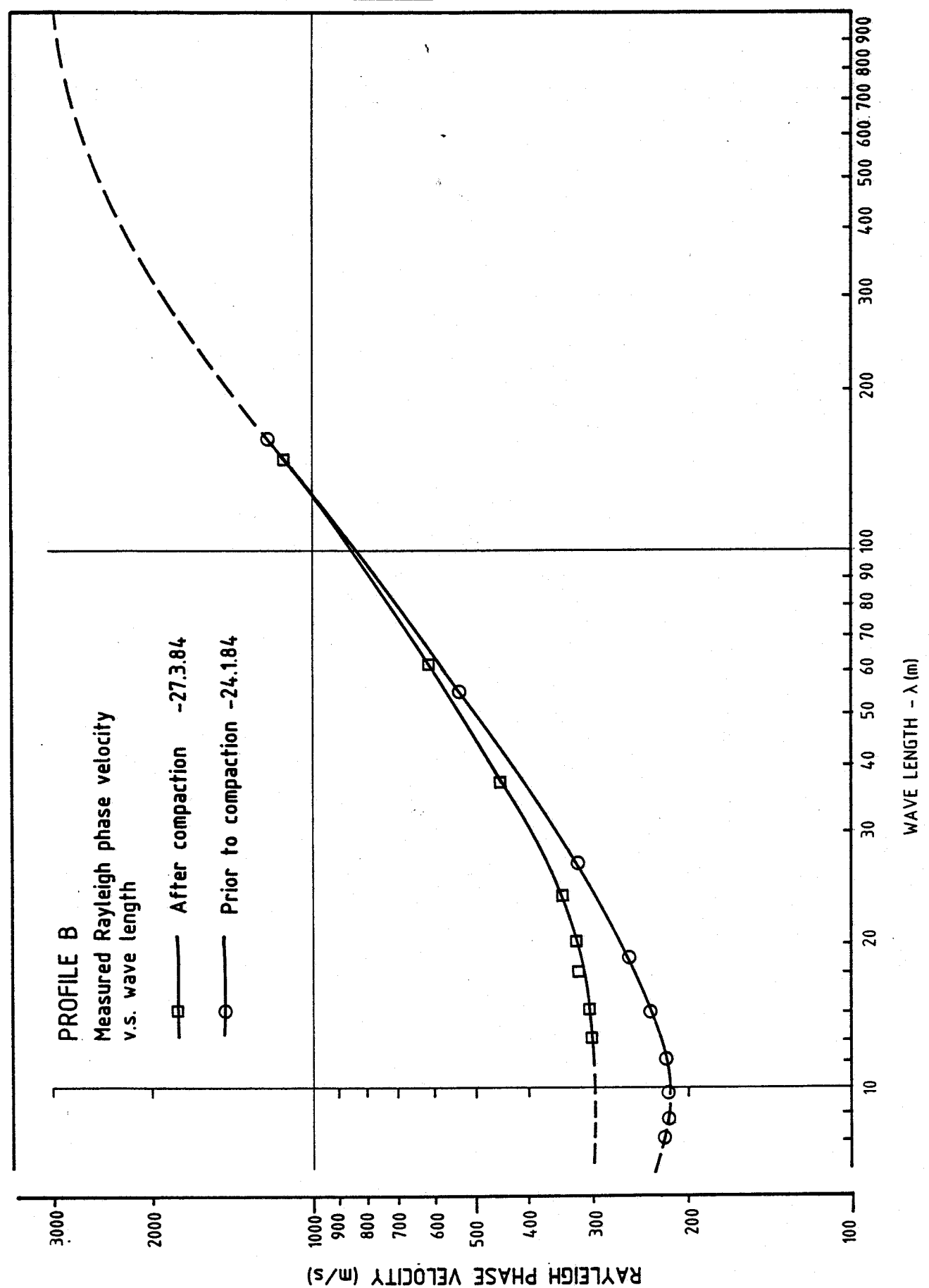
Approved

*M*

Project  
no. 84302

Drawing  
no. 009





POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Komprimeringskontroll : Profil B  
Rayleigh fasehastighet før og etter komprimering,  
som funksjon av bølgelengde.

Norwegian Geotechnical Institute

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Approved

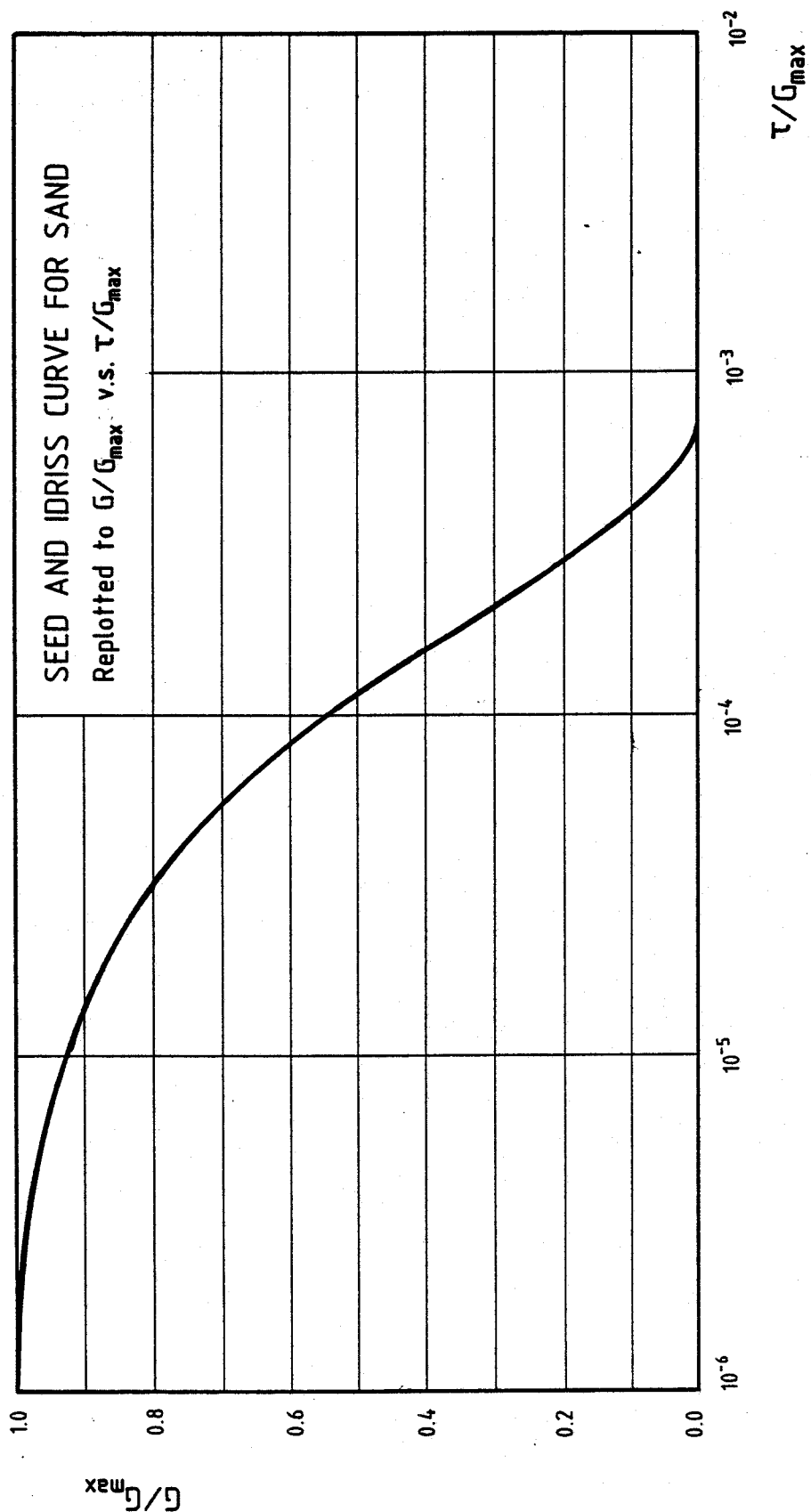
*M*

Project  
no. 84302

Drawing  
no.

010





POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Sammenheng mellom syklisk skjærmodul  
og syklisk skjærspenningsnivå for sand.  
Etter Seed og Idriss.

Approved

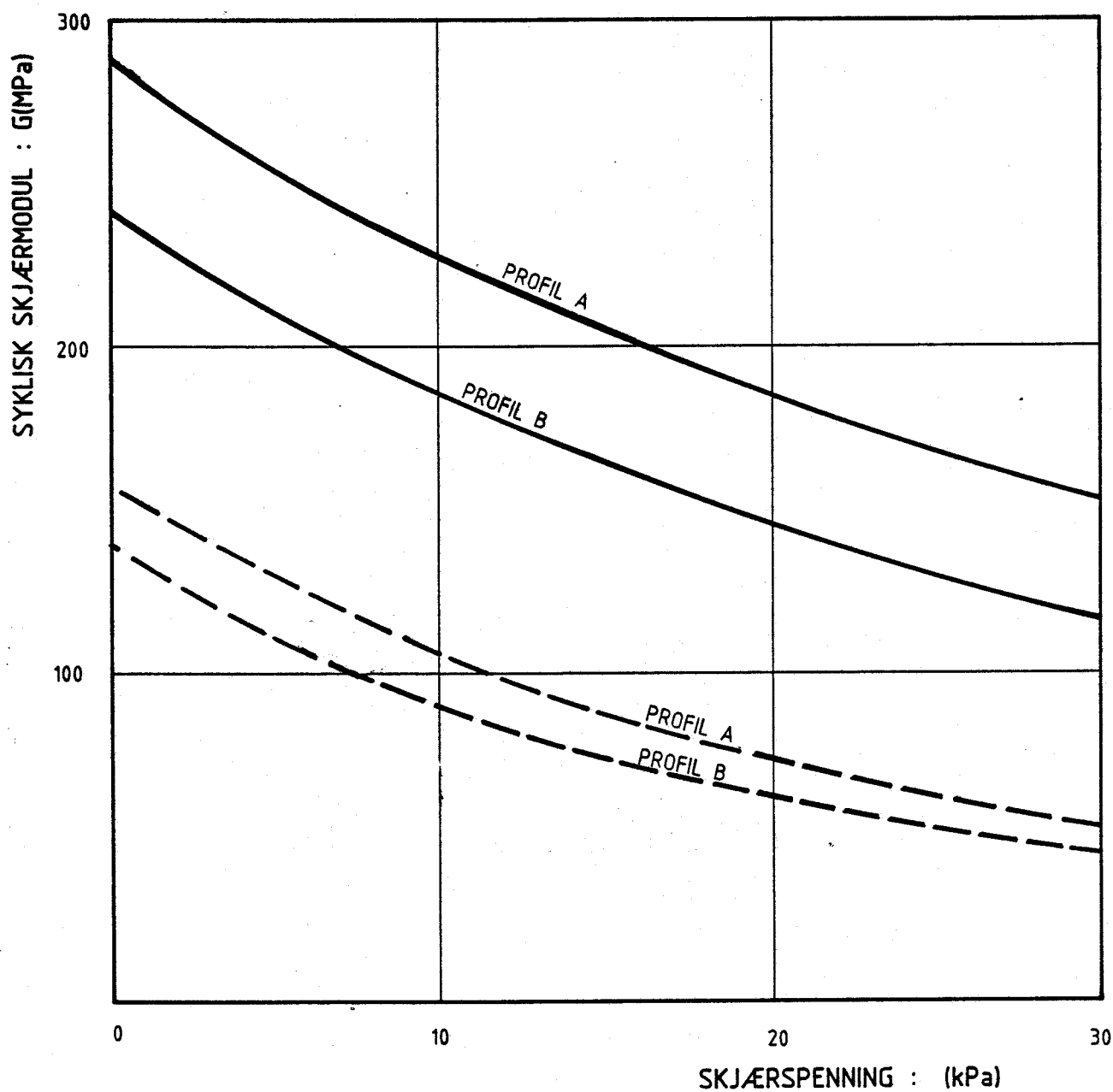
*ur*

Project  
no. 84302

Norwegian Geotechnical Institute



Drawing  
no. 011



POSTTERMINAL, SOLHEIMSVANNET

Date  
21.05.84

Drawn by  
T.S.

Komprimeringskontroll.  
Antydnet skjærmodul for steinfylling ved høye  
spenningsnivåer før og etter komprimering

Approved  
*U*

Project  
no. 84302

Norwegian Geotechnical Institute



Drawing  
no. 012