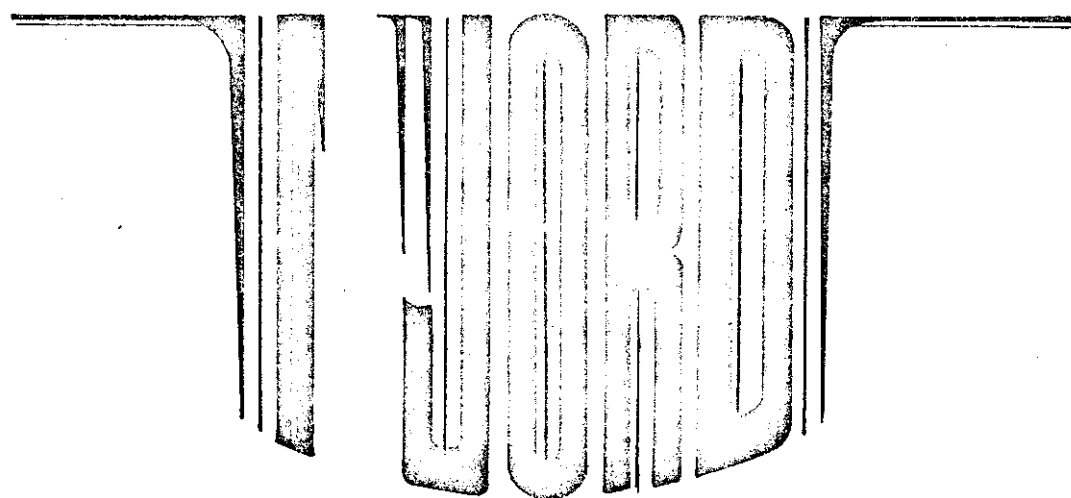


Virkning av vegtrafikk og peleramming



Av

*Tor Erik Frydenlund*

## INNHOLDSFORTEGNELSE

	side
1. FORORD	1
2. BØLGEFORPLANTNING I JORD	
2.01 Innledning	2
2.02 Løsavleiringers elastiske egenskaper	3
2.03 Bølgeforplantning i elastiske legemer	5
2.04 Bølgeforplantning i elastiske halvrom	8
2.05 Amplityde og dempning ved bølgeforplantning i elastiske halvrom	16
2.06 Bølgeforplantning i lagdelte elastiske legemer	20
2.07 Bølgeforplantning i løsavleiringer	20
3. VIRKNING AV VEGTRAFIKK	
3.01 Generelt	23
3.02 Instrumentering	26
3.03 Orienterende forsøk	
3.03.1 Forsøksbetingelser	28
3.03.2 Resultater	29
3.04 Måling av rystelser fra vegtrafikk	
3.04.1 Forsøksbetingelser	32
3.04.2 Resultater	34
4. VIRKNING AV PELERAMMING	
4.01 Generelt	37
4.01.1 Vibrasjonsmetoden	37
4.01.2 Peleramming	38
4.02 Måling av rystelser fra peleramming	
4.02.1 Forsøksbetingelser	39
4.02.2 Resultater	41
5. SKADEKRITERIER	
5.01 Generelt	43
5.02 Menneskelig følsomhet	43
5.03 Skade på hus	44
6. KONKLUSJON	48
LITTERATURLISTE	51

## 1. FORORD

I takt med den tekniske utvikling har også det miljø vi lever i gjennomgått store forandringer. Mens det tidligere stort sett bare var naturkreftene som fra tid til annen forårsaket rystelser i jordskorpen, er situasjonen i dag den at rystelser forårsaket av menneskelige aktiviteter er blitt en del av vårt moderne samfunn. Atomeksplosjoner som kan gi registrerbare rystelser over hele jordkloden, og luftstøt fra overlydsfly med følbare virkninger i flere miles omkrets, er ikke ukjente fenomen. Vibrasjoner av mer lokal karakter kan også ha en generende og endog ødeleggende virkning. I denne sammenheng kan nevnes sprengningsarbeider av forskjellig slag, arbeid med vibrerende komprimeringsutstyr, peleramming og andre former for anleggsvirksomhet. Rystelser fra veg- og jernbanetraffikk kan også virke generende på samme måte som enkelte større industrimaskiner kan føre til følbare rystelser i nærliggende områder.

Menneskene synes imidlertid å tilpasse seg denne miljøendring relativt lett, og daglig lar vi oss frivillig utsette for til dels store rystelser på offentlige transportmidler eller i egen bil. Ikke alle rystelser aksepteres imidlertid like lett, spesielt ikke der skade på eiendom er involvert. En undersøkelse i Sverige fra noen år tilbake (7) viser at det der årlig gjennom forsikringsselskapene ble utbetalt ca. 3 M.S. kr. i erstatning for bygningsskader som menes ha sammenheng med rystelser. I tillegg må en regne med skader som ikke har vært dekket av forsikring.

Foranlediget av en del erstatningssaker i de senere år knyttet til rystelser fra vegtraffikk, har forfatteren i sitt arbeid ved Veglaboratoriet følt et behov for å sette seg inn i de fenomen som er forbundet med rystelser. De spørsmål som melder seg, er for det første å få klarlagt hvorledes rystelsene oppstår og styrkegraden nær kilden under forskjellige forhold. Videre er det behov for å vite hvorledes rystelsene forplantes i fjell og ulike løsavleiringer, samt hvorledes rystelsene virker inn på konstruksjoner og betingelsene for at skade skal oppstå på disse.

Tildelingen av NGI-stipendiet for 1969-70 har gitt den nødvendige inspirasjon til å gjennomgå tilgjengelig litteratur samt foreta en del målinger i marken i et forsøk på å belyse noen av de ovennevnte problemer. Hensikten har, foruten å gi et bilde av hvorledes rystelser forplantes i løsavleiringer, vært å undersøke størrelsesorden og virkning av de rystelser nåværende vegtraffikk kan forårsake under forskjellige forhold. I tillegg er det også gjort forsøk på å fremskaffe et bilde av de forhold som er knyttet til rystelser fra peleramming.

Gjennomføringen av dette program hadde imidlertid ikke vært mulig uten velvillig assistanse fra Veglaboratoriet og vegadministrasjonen i enkelte fylker. En del måledata er også skaffet til veie med tillatelse av Ungdomsbygg A/S. Forfatteren vil derfor benytte denne anledning til å takke alle impliserte for hjelp og bistand i forbindelse med det foreliggende arbeid. En spesiell takk til Knut Haldorsen og Arne Kristoffersen ved Veglaboratoriet for deres innsats i arbeidet med å bearbeide og publisere resultatene.

## 2. BØLGEFORPLANTNING I JORD

### 2.1 Innledning

Opptakten til studiet av bølgeforplantning i løsavleiringer ble gjort i 1930 årene da den tyske organisasjon DeGeBo (Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik) satte i gang en serie forsøk for å måle rystelser i forbindelse med maskinfundamenter samt undersøke jordartenes dynamiske egenskaper ut fra bølgemålinger. Senere har interessen for denne gren av geoteknikken økt i takt med de behov som har oppstått etter hvert, med stadig snevrere toleranser for bevegelser i og rundt maskinfundamenter, økning av rystelser i forbindelse med sprengninger og større konsekvenser av jordskjelv i stadig mer tettbygde jordskjelvaktive områder. I USA har det i de senere år vært en nærmest "eksplosjonsartet" utvikling i forbindelse med den kalde krig og de problemer denne skaper både når det gjelder bygging av tilfluktsrom som kan motstå sjokkbølgene fra en atomeksplosjon, og det å holde gjengjeldelsesvåpen, i form av interkontinentale raketter, inntakte etter at fiendens raketter har begynt å nå frem til sine mål. En tilsvarende utvikling har funnet sted i USSR i samme tidsrom.

Forskningen konsentreres i dag hovedsakelig om jordskjelv, sprengninger og maskinfundamenter. Mens hovedprinsippene og analysemetodene stort sett er like for disse tre hovedretninger, er det forholdsvis stor skilnad i størrelsen av de opptredende spenninger og deformasjoner i løsavleiringene under maskinfundamenter og i nærheten av atomeksplosjoner og større jordskjelv. Problemene angripes som vanlig fra to kanter ved teoretiske utledninger og praktiske målinger i marken, det siste for kontroll og eventuell bekreftelse av teorien. Teoretisk arbeides det med ideelle homogene, isotrope materialer med varierende egenskaper fra fullstendig elastisk til elasto-plastisk og fullstendig plastisk. Selv med slike ideelle forutsetninger er imidlertid forholdene fortsatt komplisert, og det foreligger ikke til denne tid noen generell teoretisk

beskrivelse av bølgeforplantning i et halvrom bestående av løsavleiringer. Bruk av analogmodeller og data-maskiner i den senere tid har imidlertid brakt det teoretiske utledningsarbeid inn i en ny gate.

På den måltekniske siden har det også skjedd relativt mye i den senere tid. Det er nå utviklet elektronisk utstyr som gjør det mulig å registrere både partikkel bevegelse, hastighet og akselerasjon samt trykkendringer med stor nøyaktighet. Spesielt har moderne elektronikk gjort en nøyaktig tidsregistrering av hendelsesforløpet mulig. Dette fører til at mere pålitelige data fra markundersøkelser kan skaffes til veie i store kvanta for sammenligning og kontroll av teorien.

## 2.02 L ø s a v l e i r i n g e r s e l a s t i s k e e g e n s k a p e r

Teoretiske utledninger i forbindelse med bølgeforplantning i jord forutsetter gjerne innledningsvis et homogent, isotropt, fullstendig elastisk legeme. Hvis vi gjør denne forenkling, la oss da se på hvorledes de aktuelle jordarter avviker fra de ideelle forhold.

Elastisitetsteorien forutsetter at enhver deformasjon i et elastisk legeme vil kunne spaltes opp enten i deformasjoner i forbindelse med volumendringer eller skjærdeformasjoner. Videre vil et elastisk legeme gjenoppta sin opprinnelige form etter at lasten som forårsaket deformasjonen er fjernet.

Hvis vi betrakter en del av et homogent elastisk legeme som vist på skissen, fig. 1, og benevner normalspenninger og skjærspenninger i de enkelte akseretninger for henholdsvis  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  og  $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{zy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$ , kan forholdet mellom spenningene og de resulterende liniære- og skjærdeformasjoner, henholdsvis  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  og  $\gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{zy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xz}$  uttrykkes i følgende ligninger som representerer Hook's lov i generell form.

$$\sigma_x = \lambda e + 2G \epsilon_x$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \gamma_{xy}$$

$$\sigma_y = \lambda e + 2G \epsilon_y$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = G \gamma_{zy}$$

$$\sigma_z = \lambda e + 2G \epsilon_z$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \gamma_{xz}$$

— (1)

hvor  $\lambda$  og  $G$  (skjær modulen) er elastiske konstanter kalt Lamé's konstanter og  $e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$

Hvis en normalspenning  $\sigma$  virker på legemet i retning langs Z-aksen vil vi ut fra (1) få følgende forhold:

$$\begin{aligned} \lambda e + 2G\epsilon_x &= 0 \\ \lambda e + 2G\epsilon_y &= 0 \\ \lambda e + 2G\epsilon_z &= \sigma \end{aligned} \quad \text{mens} \quad \begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{zy} = \tau_{xz} = 0 \\ \text{og } \gamma_{xy} &= \gamma_{zy} = \gamma_{xz} = 0 \end{aligned}$$

Dette gir

$$\epsilon_z = \frac{\lambda + G}{G(3\lambda + 2G)} \sigma \quad \text{--- (2)}$$

$$\epsilon_x = \epsilon_y = - \frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2G)} \sigma \quad \text{--- (3)}$$

Uttrykket

$$E = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} \quad \text{--- (4)}$$

som definerer forholdet mellom trykk (eller strekk) spenninger i et legeme og den resulterende forkortelse (eller forlengelse) av legemet i spenningsretningen er kalt "elastisitetsmodulen" for legemet. Vi kan også få et uttrykk for forholdet mellom lengdeendringen i retning normalt på hovedretningen og lengdeendringen i hovedretningen

$$\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad \text{--- (5)}$$

$\nu$  er kalt Poissons tall og varierer mellom grensene  $0 < \nu < 1/2$ . Siden  $\epsilon_x$  og  $\epsilon_y$  har motsatt fortegn i forhold til  $\epsilon_z$  er det videre klart at en forlengelse langs Z-aksen vil resultere i en reduksjon i tverrsnittet langs de to øvrige akser.

Lamé's konstanter kan også uttrykkes i form av  $E$  og  $\nu$ , og ved å løse ligningene (4) og (5) med hensyn på  $\lambda$  og  $G$  får vi

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{--- (6)}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{--- (7)}$$

Hvis vi nå ser på løsavleiringenes struktur, består denne av mineralkorn av forskjellig form og størrelse med tilfeldig orientering slik at bare deler av kornene berører hverandre. Hulrommene mellom kornene kan være fylt med vann, delvis vann og delvis luft eller bare luft. Materialet som helhet har således vesentlig mindre romvekt enn det enkelte mineralkorn. Ser vi på en terning av leirjord med sidekant på et par mm, er det likevel klart at materialet i terningen må kunne betraktes som homogent på bakgrunn av leirpartikkelens størrelse. En tilsvarende terning av sandig/grusig materiale vil imidlertid ikke kunne betraktes som homogen. Økes sidekantene i terningen vil vi imidlertid ved en gitt terningsstørrelse kunne si at også dette materialet er homogent. Jordarter kan således bare betraktes som homogene i volumenheter som er store sammenlignet med dimensjonene på de enkelte mineralkorn.

I en avsetning vil de enkelte korn i en jordart være spredd mer eller mindre tilfeldig, men likevel såvidt likt at det er rimelig å anta at de elastiske egenskaper er like i de forskjellige retninger. En jordart kan dermed ansees å være et isotropt medium. Avvik fra dette forhold vil selvfølgelig oppstå der en har lagdelte jordarter. I slike tilfeller kan jordarten bare betraktes som isotrop innen de enkelte lag.

Hook's lov i den generelle form som angitt i ligning nr. ①, forutsetter at det ikke eksisterer indre spenninger eller deformasjoner i et legeme i den opprinnelige tilstand før de utvendige krefter begynner å virke. I virkeligheten er initialspenninger til stede i alle legemer, men virkningen av disse kan neglisjeres hvis de er små sammenlignet med de påførte spenninger. Når det gjelder løsavleiringer, kan disse påføres indre spenninger i form av intern friksjon, kohesjon, kapillære krefter og andre fysisk-kjemiske påvirkninger. Er disse spenningene store, kan ikke initialdeformasjonene betraktes som små, og ved beregning av deformasjoner ut fra påførte ytre spenninger kan ikke fremgangsmåten for elastiske legemer benyttes. For en tilnærmet vurdering vil en med de begrensninger som er anført over, likevel kunne få et bilde av det som skjer ved bølgeforplantning i en jordart, ved å betrakte denne som et homogent, isotropt, elastisk legeme.

## 2.03 Bølgeforplantning i elastiske legemer

Bølgebevegelser i ulike legemer kan vanligvis uttrykkes ved en differensialligning av formen

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \text{--- ⑧}$$

hvor  $a$  representerer bølgenes forplantningshastighet.

Med tanke på mulige bølgebevegelser i et homogent, isotropt elastisk legeme, la oss betrakte likevektsbetingelsene for et lite element (fig. 2) i et slikt legeme hvor bølgeforplantning foregår.

Ved å summere de krefter som virker parallelt med x-aksen får vi da

$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \Delta x\right) \Delta y \Delta z - \sigma_x \Delta y \Delta z + \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \Delta y\right) \Delta x \Delta z - \tau_{xy} \Delta x \Delta z + \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \Delta z\right) \Delta x \Delta y - \tau_{xz} \Delta x \Delta y = 0$$

Tilsvarende ligninger fremkommer ved summering av krefter i retning parallelt med y- og z-aksen.

Ved å benytte Newtons annen lov for bevegelser i x-retningen får vi

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) \Delta x \Delta y \Delta z = \rho (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

hvor  $\rho$  er legemets tetthet og  $u$  er resulterende deformasjon i x-retningen.

Tilsvarende betraktninger kan gjøres for de to andre retningene og vi får

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad \text{--- (9a)}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad \text{--- (9b)}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad \text{--- (9c)}$$

hvor  $v$  og  $w$  er deformasjoner i y- og z-retningene.

Høyre side av ligningene kan også uttrykkes i form av deformasjoner ved å benytte forholdet mellom spenninger og deformasjoner som angitt i ligning (1). Ved å kombinere samvarende størrelser i dette ligningsett med ligning (9a) får vi

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u \quad \text{--- (10)}$$



hvor

$$\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

På tilsvarende måte får vi for ligning (9b) og (9c)

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v \quad \text{--- (11)}$$

og

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w \quad \text{--- (12)}$$

Ligning (10), (11) og (12) beskriver bevegelser i et uendelig, homogent, isotropt, elastisk legeme. Ligningene kan imidlertid omformes slik at vi får beskrevet to forskjellige bevegelsesformer. Hvis vi deriverer ligning (10), (11) og (12) med hensyn på henholdsvis x, y og z får vi en ligning av formen.

$$\rho \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} = (\lambda + 2G) \nabla^2 e \quad \text{--- (13)}$$

eller

$$\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} = v_p^2 \nabla^2 e$$

som er en "bølgligning" hvor

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad \text{eller} \quad v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{--- (14)}$$

Dette vil si at volumendringer (e) forplantes med en hastighet  $v_p$  i elastiske legemer.

En annen bølgligning kan oppnås ved å derivere ligning (11) med hensyn på z og ligning (12) med hensyn på y og deretter eliminere e ved subtraksjon. Vi får da

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = G \nabla^2 \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

Hvis vi lar  $\bar{\omega}_x$  representere den resulterende rotasjon om x-aksen får vi videre

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = G \nabla^2 \bar{\omega}_x$$

eller

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = v_s^2 \nabla^2 \bar{\omega}_x$$

— (15)

som viser at skjærdeformasjoner om x-aksen forplantes med hastighet

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{eller} \quad v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

— (16)

Tilsvarende uttrykk fremkommer for skjærdeformasjoner om y- og z-aksen.

Av dette ser vi at det i et uendelig, homogent, isotropt, elastisk legeme kan opptre to bølgetyper som representerer forskjellige bevegelsesformer og som forplantes med forskjellig hastighet. Disse betegnes vanligvis som

- 1) Trykkbølger (p-bølger) med tilknytning til volumdeformasjoner
- og 2) skjærbølger (s-bølger) med tilknytning til skjærdeformasjoner.

Av formlene for forplantningshastighet fremgår det at  $v_p > v_s$ .

## 2.04 Bølgef orpl antning i elastiske halvrom

Hvis vi ser på de bølgeformer som kan opptre i et halvrom, kan vi utlede nok en bølgeform i tillegg til de tidligere omtalte p- og s-bølger. Denne tredje bølgeform som må betraktes som et overflatefenomen, ble først undersøkt av lord Rayleigh i 1885 og betegnes derfor ofte som Rayleigh-bølger.

Fig. 3 er ment å illustrere et halvrom hvor x-y planet representerer overflaten av halvrommet og z regnes positiv nedover som vist. Hvis vi betrakter en bølgebevegelse

i retning langs x-aksen med plan bølgefront, vil de bevegelser som oppstår i legemet være uavhengig av bevegelser i retning langs y-aksen. Ved å la  $u$  og  $w$  som før representere liniære deformasjoner i retning langs henholdsvis  $x$  og  $z$  aksen kan vi definere følgende hjelpefunksjoner

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad \text{og} \quad w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

summen av de liniære volumdeformasjoner blir da

$$e = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = \nabla^2 \Phi$$

og skjærdeformasjonene i  $xz$ -planet blir

$$2\bar{\omega}_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = \nabla^2 \Psi$$

$\Phi$  og  $\Psi$  er således valgt slik at  $\Phi$  er knyttet til volumendringer og  $\Psi$  til skjærdeformasjoner i legemet.

Hvis vi nå setter inn uttrykkene for  $u$  og  $w$  i ligning (10) og (12) får vi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2G) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Phi) + G \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Psi) \quad \text{--- (17)}$$

og

$$\rho \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2G) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Phi) - G \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Psi) \quad \text{--- (18)}$$

Ligning (17) og (18) er tilfredsstilt hvis

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t^2} = \left( \frac{\lambda + 2G}{\rho} \right) \nabla^2 \Phi = v_p^2 \nabla^2 \Phi \quad \text{--- (19)}$$

og

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \nabla^2 \Psi = v_s^2 \nabla^2 \Psi \quad \text{--- (20)}$$

Hvis vi forsøker løsninger for  $\Phi$  og  $\Psi$  i form av harmoniske bevegelser (sinus-svingninger) med vinkelhastighet  $\omega$  i x-retningen kan vi skrive

x)

$$\Phi = F(z) \exp. [i(\omega t - Nx)] \quad \text{--- (21)}$$

$$\Psi = G(z) \exp. [i(\omega t - Nx)] \quad \text{--- (22)}$$

hvor  $F(z)$  og  $G(z)$  representerer variasjoner i amplityden med dybden  $z$  og  $N$  er bølgetallet definert ved

$$N = 2\pi/L \text{ og } L \text{ er bølgelengden.}$$

Ved å sette inn disse uttrykk for  $\Phi$  og  $\Psi$  i ligning (19) og (20) får vi

$$-\frac{\omega^2}{v_p^2} F(z) = [-N^2 F(z) + F''(z)] \quad \text{--- (23)}$$

og

$$-\frac{\omega^2}{v_s^2} G(z) = [-N^2 G(z) + G''(z)] \quad \text{--- (24)}$$

eller omskrevet

$$F''(z) - \left(N^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2}\right) F(z) = 0 \quad \text{--- (25)}$$

$$G''(z) - \left(N^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2}\right) G(z) = 0 \quad \text{--- (26)}$$

Ved å sette

$$q^2 = \left(N^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2}\right) \quad \text{--- (27)}$$

og

$$s^2 = \left(N^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2}\right) \quad \text{--- (28)}$$

---

x) For å unngå forveksling av grunntallet  $e$  i det naturlige logaritmesystem og  $e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$  definert tidligere, er den engelske uttrykksformen  $\exp. x$  benyttet for  $e^x = \exp x$ .

får vi

$$F''(z) - q^2 F(z) = 0 \quad \text{--- (29)}$$

$$G''(z) - s^2 F(z) = 0 \quad \text{--- (30)}$$

Løsningene for dette ligningssystem vil ha følgende form.

$$F(z) = A_1 \exp.(-qz) + B_1 \exp.(qz) \quad \text{--- (31)}$$

$$G(z) = A_2 \exp.(-sz) + B_2 \exp.(sz) \quad \text{--- (32)}$$

Vi kan imidlertid ikke ha løsninger som gir uendelig store amplityder med økende  $z$ . Derfor må  $B_1 = B_2 = 0$  og vi får

$$\Phi = A_1 \exp.[-qz + i(\omega t - Nx)] \quad \text{--- (33)}$$

$$\Psi = A_2 \exp.[-sz + i(\omega t - Nx)] \quad \text{--- (34)}$$

Hvis vi nå setter inn de betegnelser som gjelder for overflaten av halvrommet,  $\sigma_z = 0$  og  $\tau_{xz} = 0$  for  $z = 0$  får vi fra lignings sett (1)

$$\sigma_z = \lambda e + 2G \epsilon_z = \lambda e + 2G \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

og

$$\tau_{xz} = G \gamma_{xz} = G \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0$$

Ved å benytte definisjonen for  $u$  og  $w$  og løsningene for  $\Phi$  og  $\Psi$  fra (33) og (34) får vi

$$\sigma_z|_{z=0} = A_1 [(\lambda + 2G) q^2 - \lambda N^2] - 2A_2 G i s N = 0 \quad \text{--- (35)}$$

$$\tau_{xz}|_{z=0} = A_1 2q i N + A_2 (s^2 + N^2) = 0 \quad \text{--- (36)}$$

Ligning (35) og (36) kan omformes til

$$\frac{A_1}{A_2} \frac{(\lambda + 2G)q^2 - \lambda N^2}{2GisN} - 1 = 0 \quad \text{--- (37)}$$

$$\frac{A_1}{A_2} \frac{2qiN}{s^2 + N^2} + 1 = 0 \quad \text{--- (38)}$$

Ved å summere (37) og (38) får vi

$$\frac{(\lambda + 2G)q^2 - \lambda N^2}{2GisN} = - \frac{2qiN}{s^2 + N^2} \quad \text{--- (39)}$$

eller

$$4qGsN^2 = (s^2 + N^2)[(\lambda + 2G)q^2 - \lambda N^2] \quad \text{--- (40)}$$

Ved å kvadrere begge sider av ligning (40) og sette inn for  $q$  og  $s$  fra (27) og (28) får vi

$$16G^2N^4 \left(N^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}\right) \left(N^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2}\right) =$$

$$\left[(\lambda + 2G)\left(N^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}\right) - \lambda N^2\right]^2 \left[N^2 + \left(N^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2}\right)^2\right]^2$$

eller

$$16 \left(1 - \frac{\omega^2}{V_P^2 N^2}\right) \left(1 - \frac{\omega^2}{V_S^2 N^2}\right) = \left[2 - \frac{\lambda + 2G}{G} \frac{\omega^2}{V_P^2 N^2}\right]^2 \left[2 - \frac{\omega^2}{V_S^2 N^2}\right]^2 \quad \text{--- (41)}$$

Hvis vi nå definerer to størrelser  $k$  og  $\alpha$  slik at

$$\frac{V_R^2}{V_S^2} = k^2 \quad \text{og} \quad \frac{V_R^2}{V_P^2} = \alpha^2 k^2$$

hvor  $V_R$  er Rayleigh bølgenes forplantningshastighet, og vi lar  $L_R$  være Rayleigh bølgenes bølgelengde, får vi videre

$$L_R = \frac{V_R}{f} = \frac{V_R 2\pi}{\omega}$$

$$\text{men } L_R = \frac{2\pi}{N} \quad \text{eller} \quad N = \frac{\omega}{V_R}$$

$$\text{og } N^2 = \frac{\omega^2}{V_R^2}$$

Vi kan derfor skrive

$$\frac{\omega^2}{V_P^2 N^2} = \frac{V_R^2}{V_P^2} = \alpha^2 k^2$$

$$\text{og } \frac{\omega^2}{V_S^2 N^2} = \frac{V_R^2}{V_S^2} = k^2$$

Dette gir

$$\frac{1}{\alpha^2} = \frac{V_P^2}{V_S^2} = \frac{\lambda + 2G}{G} \quad \text{eller} \quad \frac{1}{\alpha^2} = \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}$$

Vi kan nå omskrive ligning (41)

$$16(1 - \alpha^2 k^2)(1 - k^2) = \left(2 - \frac{1}{\alpha^2} \alpha^2 k^2\right)^2 (2 - k^2)^2 \quad \text{--- (42)}$$

eller

$$k^6 - 8k^4 + (24 - 16\alpha^2)k^2 - 16(1 - \alpha^2) = 0 \quad \text{--- (43)}$$

Dette er en tredjegradslikning i  $k^2$  som kan løses for forskjellige verdier av  $\nu$ .  $k$  representerer forholdet mellom overflate - eller Rayleigh bølgenes hastighet og s-bølgenes hastighet. Det fremgår av ligning (43) at  $k$  er uavhengig av bølgefrequens, følgelig er også Rayleigh bølgenes forplantningshastighet uavhengig av frekvensen.

For forskjellige verdier av  $\nu$  kan vi ved hjelp av forholdet  $1/\alpha^2$  og ligning (43) få frem et kurvesett som vist i fig. 4 (29). Kurvene gir et klart bilde av hvorledes forholdet mellom forplantningshastighetene for de tre bølgetyper vi har definert varierer med varierende  $\nu$ .

Uttrykkene for  $\Phi$  og  $\Psi$  definert i ligning (33) og (34) kan imidlertid benyttes til å utlede flere opplysninger om Rayleigh bølge. Hvis vi setter inn ligning (33) og (34) i uttrykkene for  $u$  og  $w$  får vi

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} = -A_1 i N \exp.[-qz + i(\omega t - Nx)] - A_2 s \exp.[-sz + i(\omega t - Nx)] \quad \text{--- (44)}$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} = -A_1 q \exp.[-qz + i(\omega t - Nx)] + A_2 i N \exp.[-sz + i(\omega t - Nx)] \quad \text{--- (45)}$$

Fra ligning (38) har vi videre at

$$A_2 = \frac{2 q i N A_1}{s^2 + N^2}$$

Ved å sette inn for  $A_2$  i ligning (44) og (45) får vi

$$u = A_1 \left[ -i N \exp.(-qz) + \frac{2 q i s N}{s^2 + N^2} \exp.(-sz) \right] \exp. i(\omega t - Nx) \quad \text{--- (46)}$$

$$w = A_1 \left[ \frac{2 q N^2}{s^2 + N^2} \exp.(-sz) - q \exp.(-qz) \right] \exp. i(\omega t - Nx) \quad \text{--- (47)}$$

Ligning (46) og (47) kan videre omskrives til

$$u = ANi \left\{ -\exp. \left[ -\frac{q}{N}(zN) \right] + \frac{2 \frac{q}{N} \frac{s}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} \exp. \left[ -\frac{s}{N}(zN) \right] \right\} \exp. i(\omega t - Nx) \quad \text{--- (48)}$$

$$w = AN \left\{ \frac{2 \frac{q}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} \exp. \left[ -\frac{s}{N}(zN) \right] - \frac{q}{N} \exp. \left[ -\frac{q}{N}(zN) \right] \right\} \exp. i(\omega t - Nx) \quad \text{--- (49)}$$

betydningen av  $i$  i uttrykket for  $u$  mens  $i$  mangler i uttrykket for  $w$  er at  $u$ -komponenten er  $90^\circ$  ut av fase med  $w$ -komponenten.

Av ligning (48) og (49) kan vi få et sett funksjoner som gir variasjonene i  $u$  og  $w$  med varierende  $z$  (dybde under terreng)

$$U(z) = -\exp. \left[ -\frac{q}{N}(zN) \right] + \frac{2 \frac{q}{N} \frac{s}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} \exp. \left[ -\frac{s}{N}(zN) \right] \quad \text{--- (50)}$$

$$W(z) = \frac{2 \frac{q}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} \exp. \left[ -\frac{s}{N}(zN) \right] - \frac{q}{N} \exp. \left[ -\frac{q}{N}(zN) \right] \quad \text{--- (51)}$$



Fra ligning (27) og (28) har vi at

$$\frac{q^2}{N^2} = 1 - \frac{\omega^2}{N^2 v_p^2}$$

$$\frac{s^2}{N^2} = 1 - \frac{\omega^2}{N^2 v_s^2}$$

som kan omskrives videre med  $\alpha$  og  $k$  til

$$\frac{q^2}{N^2} = 1 - \alpha^2 k^2 \quad \text{--- (52)}$$

$$\frac{s^2}{N^2} = 1 - k^2 \quad \text{--- (53)}$$

Ligning (50) og (51) kan dermed omskrives til

$$U(z) = - \exp. \left[ - \left( \sqrt{1 - \alpha^2 k^2} \right) (zN) \right] + \frac{2 \left( \sqrt{1 - \alpha^2 k^2} \right) \left( \sqrt{1 - k^2} \right)}{2 + k^2} \exp. \left[ - \left( \sqrt{1 - k^2} \right) (zN) \right] \quad \text{(54)}$$

$$W(z) = \frac{2 \sqrt{1 - \alpha^2 k^2}}{2 - k^2} \exp. \left[ - \left( \sqrt{1 - k^2} \right) (zN) \right] - \left( \sqrt{1 - \alpha^2 k^2} \right) \exp. \left[ - \left( \sqrt{1 - \alpha^2 k^2} \right) (zN) \right]$$

Ved hjelp av ligning (43) kan vi nå for forskjellige verdier av  $\nu$  regne ut verdien av  $U(z)$  og  $W(z)$  for varierende verdier av  $zN$  eller  $z/L_R$  ( $N = 2\pi/L_R$ ). Fig. 5 (29) viser de kurver som fremkommer for  $\nu = 0,25, 0,33, 0,4$  og  $0,5$  hvor dybden er angitt i bølglengde enheter ( $z/L_R$ ). (54<sup>a</sup>)

Som vi ser av figuren dempes Rayleigh bølgeene relativt raskt med dybden. Vi kan videre se at den vertikale komponenten har en maksimalverdi i en dybde av ca.  $0,15 (z/L_R)$ , mens den horisontale komponenten avtar raskt ned til 0 i omtrent samme dybde for så å skifte fortegn og gi en maksimalverdi i dybde  $0,4 (z/L_R)$ .

2.05 Amplitude og dempning ved  
bølgeforplantning i elastiske  
halvrom

Etter å ha definert de bølgeformer som kan opptre i et elastisk halvrom, vil det være av interesse å undersøke størrelsen av de bevegelser som oppstår i legemet ved forskjellig ytre påvirkning på legemets overflate samt hvorledes disse forplantes og dempes med økende avstand fra kilden. De matematiske utledninger som er nødvendig i denne sammenheng, er imidlertid ganske omfattende og det skal her bare kort gjengis løsninger presentert av Barkan (3).

For små avstander fra kilden oppgir Barkan de resulterende vertikale bevegelser forårsaket av en periodisk vertikal punktlast av størrelse  $P$  og svingehastighet  $\omega$  å ha følgende form.

$$w = A_0 \psi(a) \sin(\omega t - \gamma) \quad \text{--- (55)}$$

hvor

$$A_0 = \frac{P\omega}{v_s G}, \quad \psi(a) = \sqrt{f_1^2 + f_2^2}, \quad \tan \gamma = \frac{f_1}{f_2}$$

$a$  er en dimensjonsløs parameter  $a = \omega r / v_s$  ( $r$  er avstand fra kilden) og  $f_1$  og  $f_2$  er funksjoner av  $a$  og  $\nu$ .

For  $\nu = 0,5$  er

$$f_1 = -0,0796 \frac{1}{a} + 0,0598a - 0,00607a^3 + 0,000243a^5 - 0,00000517a^7$$

$$f_2 = 0,0571 J_0(1,047a) + 0,0474 - 0,00647a^2 + 0,000264a^4 - 0,00000517a^6$$

for  $\nu = 0,25$

$$f_1 = 0,119 \frac{1}{a} + 0,0895a - 0,0104a^3 + 0,000466a^5 - 0,0000109a^7$$

$$f_2 = 0,0998 J_0(1,08777a) + 0,0484 - 0,00595a^2 + 0,000240a^4 - 0,00000484a^6$$

for  $\nu = 0$

$$f_1 = -0,159 \frac{1}{a} + 0,1392a - 0,0185a^3 + 0,000937a^5 - 0,0000246a^7$$

$$f_2 = 0,163 J_0(1,1441a) + 0,0512 - 0,00585a^2 + 0,000228a^4 - 0,00000445a^6$$

$J_0(\ )$  betegner en Bessel funksjon.

Bruken av ligning (55) kan forenkles noe ved å fremstille et kurvesett for  $\psi(\alpha)$  med varierende  $\alpha$  for forskjellige verdier av  $\gamma$  som vist i fig. 6 (3).

For store avstander fra kilden angis den vertikale deformasjon til

$$w = \frac{NP}{2G} K_0 \sqrt{\frac{2}{\pi Nr}} \sin\left(\omega t - Nr - \frac{\pi}{4}\right) \quad \text{--- (56)}$$

og horisontale deformasjoner  $q$  i radiell retning fra kilden til

$$q = \frac{NP}{2G} H_0 \sqrt{\frac{2}{\pi Nr}} \cos\left(\omega t - Nr - \frac{\pi}{4}\right) \quad \text{--- (57)}$$

hvor  $r$  er den radielle avstand fra kilden og

$$K_0 = - \frac{k^2(1-\alpha^2k^2)\sqrt{1-k^2}}{4\{2(2-k^2)\sqrt{1-\alpha^2k^2}\sqrt{1-k^2}+3(1+\alpha^2)k^2-2\alpha^2k^4-4\}} \quad \text{--- (58)}$$

$$H_0 = - \frac{(2-k^2)\sqrt{1-\alpha^2k^2}\sqrt{1-k^2}+2(1+\alpha^2)k^2-2\alpha^2k^4-2}{4\{2(2-k^2)\sqrt{1-\alpha^2k^2}\sqrt{1-k^2}+3(1+\alpha^2)k^2-2\alpha^2k^4-4\}} \quad \text{--- (59)}$$

Verdier for  $k$  og  $\alpha$  kan beregnes for varierende verdier av  $\gamma$  ut fra forholdet  $\frac{1}{\alpha^2} = \frac{2-2\gamma}{1-2\gamma}$  og ligning (43).

Hvis vi ser på ligning (55), (56) og (57) forutsetter disse en harmonisk pulserende last, og ligningene har da også en harmonisk form som i prinsippet kan uttrykkes ved

$$A = A_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{--- (60)}$$

hvor  $A$  er deformasjonsamplitude,  $A_0$  er maksimalamplitude,  $\omega$  er vinkelhastighet,  $t$  er tid og  $\varphi$  er en faseforskyvningskonstant. Ligning (60) kan imidlertid omformes til også å uttrykke hastighetsamplitude eller akselerasjonsamplitude da hastighet er tilbakelagt distanse pr. tidsenhet og akselerasjon er hastighetsforandring pr. tidsenhet. Hvis vi lar  $V$  og  $a$  definere henholdsvis

hastighet og akselerasjon får vi

$$V = \frac{dA}{dt} = A_0 \omega \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{--- (61)}$$

og

$$V_{\text{maks}} = \omega A_0 = 2\pi f A_0 \quad \text{--- (62)}$$

$$a = \frac{dV}{dt} = -A_0 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{--- (63)}$$

$$a_{\text{maks}} = \omega^2 A_0 = 4\pi^2 f^2 A_0 \quad \text{--- (64)}$$

For harmoniske svingninger er det således mulig på en enkel måte å uttrykke både deformasjon, hastighet og akselerasjon når bare en av størrelsene samt svingefrekvensen  $f$  er kjent. Tilsvarende omregning kan også foretas for andre former for svingende bevegelse forutsatt at en av størrelsens ( $A, V, a$ ) variasjon med tiden er kjent, enten i form av matematiske uttrykk eller i kurveform.

Hvis vi ser på hvorledes bølgenes amplitude dempes med økende avstand fra kilden ser vi av ligning (55) at  $w$  er uavhengig av  $r$ , dvs. at det nær kilden ikke er noen endring i de vertikale bølgers amplitude med økende avstand. De resulterende bevegelser vil her være en kombinasjon av p-, s- og R-bølger.

Etter som avstanden fra kilden øker, dempes bølgene som en følge av at energien fordeles over en stadig økende bølgefront, geometrisk demping. p- og s-bølgene dempes imidlertid vesentlig raskere enn R-bølgene idet amplituden for de første bølgetyper nær overflaten av halvrommet avtar omvendt proporsjonalt med  $r^2$ , mens amplituden for R-bølgene avtar omvendt proporsjonalt med  $\sqrt{r}$ . I en viss avstand fra kilden vil en dermed kunne se bort fra p- og s komponentene. Denne forenkling er gjort i uttrykkene for  $w$  og  $q$  gitt i ligning (56) og (57). Uttrykkene for  $w$  og  $q$  viser da at de bevegelser R-bølgene forårsaker er av eliptisk form og forholdet mellom elipsens akser er lik  $K_0/H_0$ .

For å avgjøre i hvilken avstand fra kilden det er aktuelt å benytte ligning (56) og (57) kan vi sammenligne ligning (55) og (56) for vertikale deformasjoner.

For  $v_s \approx v_R$  får vi

$$\psi(a)\sqrt{a} = K_0 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad \text{--- (65)}$$

Hvis vi lar  $\nu = 0,5$  er  $K_0 = 0,109$

og  $\psi(a)\sqrt{a} = 8,7 \cdot 10^{-2}$

Fra fig. 6 kan vi se at dette gir en verdi for  $a$  hvor  $a_0 = 1$

men  $a_0 = \frac{\omega}{v_s} r_0 \approx \frac{2\pi}{v_R T} r_0 = \frac{2\pi}{L_R} r_0 = 1$

og vi får  $r_0 = \frac{L_R}{2\pi}$  for  $\nu = 0,5$

Fig. 7 a (29) viser de bølgebevegelser en pulserende belastning fra et sirkulært fundament på overflaten av et elastisk halvrom forårsaker i relativ stor avstand fra kilden. Den relative størrelse av de enkelte bølgers amplitude og deres innbyrdes avstand fra kilden er beregnet for  $\nu = 0,25$ . Som en ser forplantes p- og s-bølgene radielt ut fra kilden og bølgefronten har form av et halvkuleskall. R-bølgene har derimot en sylindrisk bølgefront. Figuren antyder også at p- og s-bølgene dempes noe forskjellig i forskjellige deler av bølgefronten idet dempningen ved overflaten er omvendt proporsjonal med  $r^2$  som nevnt tidligere mens dempningen i legemet forøvrig er omvendt proporsjonal med  $r$ . Variasjonene i R-bølgenes amplitude med dybden under overflaten er også angitt både for den vertikale og den horisontale komponent.

Energifordelingen mellom de forskjellige bølgeformer forårsaket av en pulserende belastning fra et sirkulært fundament på overflaten av et elastisk halvrom er gjengitt i fig. 7 (b). Tallene viser at ca.  $2/3$  av den totale tilførte energi forplantes vekk fra kilden i form av R-bølger. Videre vet vi at R-bølgene dempes vesentlig mindre enn p- og s-bølgene med økende avstand fra kilden. Dette indikerer at det er R-bølgene som har størst betydning når det gjelder overføring av energi fra en vibrasjonskilde på overflaten av et elastisk halvrom til andre punkter nær overflaten i en viss avstand fra kilden.

## 2.06 Bølgeforplantning i lagdelte elastiske legemer

Ved bølgeforplantning i lagdelte elastiske legemer vil p og s bølgene reflekteres og refrakteres i kontaktflaten mellom de enkelte lag. Bølgenes forplantningsmønster blir dermed vesentlig mer komplisert enn i et elastisk halvrom. En analytisk utledning av bølgenes forplantning blir tilsvarende vanskelig selv der en bare har et enkelt lag over et halvrom.

De bølger som reflekteres fra kontaktflaten mellom de to lag og tilbake til overflaten vil her i sin helhet reflekteres på ny. Hvis en har et system med flere lag, vil det fra hver kontaktflate mellom de enkelte lag reflekteres bølger tilbake til overflaten av det øverste lag. Ved gjentatt fullstendig refleksjon innen det øvre lag, kan det oppstå en spesiell type overflatebølger kalt Love-bølger. Disse består av polariserte horisontale (transversale) s-bølger og de forplantes ved gjentatt fullstendig refleksjon mellom grenseflatene i det øvre lag.

Ved høy svingefrekvens (korte bølgelengder) vil forplantningshastigheten for Love-bølgene tilnærmet være lik s-bølgenes hastighet i det øvre lag. For lave frekvenser (store bølgelengder) vil Love-bølgenes forplantningshastighet tilnærmet være lik s-bølgenes hastighet idet underliggende lag.

Når det gjelder R-bølgenes forplantningshastighet i lagdelte legemer vil denne avhenge av de fysiske egenskaper i det lag der hoveddelen av R-bølgens energi forplantes. Bølgenes svingefrekvens vil således være bestemmende for hvor dypt ned under overflaten R-bølgens effekt når, og dermed hvilken forplantningshastighet de får.

## 2.07 Bølgeforplantning i løsavleiringer

Som nevnt i avsnitt 2.02 vil løsavleiringer på mange måter kunne avvike fra de forutsetninger ovenstående utledninger er basert på, nemlig homogene, isotrope elastiske legemer. Forsøk viser da også at bølgebevegelser i jord assosiert med f.eks. Rayleighbølger til dels kan avvike sterkt fra den teoretiske eliptiske form (3). Da det til nå ikke foreligger noen almen-gyldig teori for bølgeforplantning i løsavleiringer, er en likevel henvist til å bygge på teorien for elastiske legemer, men med enkelte empiriske tillempninger der erfaringene viser at dette er nødvendig.

For beregning av dynamiske deformasjoner i jord etter ligning (55), (56) og (57) er en avhengig av å vite verdiene for skjærmodulen  $G$  og Poissons tall  $\nu$  for den aktuelle jordart. Måling av disse verdier har vært foretatt på forskjellig måte i forskjellige jordarter. Verdier for Poissons tall  $\nu$  fremkommet både under statiske og dynamiske forsøksbetingelser viser da også relativt store variasjoner. Samtlige forsøk indikerer imidlertid høyere verdier for  $\nu$  i leire enn i sand. Generelt synes det som om leire har verdier nær opp mot  $\nu = 0,5$  mens de tilsvarende verdier for sand ligger i området  $\nu = 0,30 - 0,35$  (3).

En måte å bestemme verdier for  $\nu$  i en aktuell jordart er å benytte forholdet mellom  $p$  og  $s$  bølgenes forplantningshastighet.  $1/\alpha^2 = (2-2\nu)/(1-2\nu)$ . Siden  $v_p > v_s > v_R$  kan trykkbølgenes forplantningshastighet måles direkte ved å utløse rystelser i et punkt på terrengoverflaten ved slag eller sprengning, og så måle tiden det tar til de første rystelser når andre punkter på overflaten i kjent avstand fra kilden.  $v_s$  kan bestemme indirekte ved å måle  $v_R$ . Vanligvis anvendes da en vibrator som kilde i et punkt på overflaten og resulterende bølgebevegelser registreres i forskjellig avstand fra kilden. På denne måten er det mulig å bestemme  $R$ -bølgenes bølgelengde og dermed  $R$ -bølgenes forplantningshastighet når vibratorens svingefrekvens er kjent ( $v_R = fL_R$ ). Som vist i fig. 4 er avviket i hastighet mellom  $s$  - og  $R$  bølger meget lite for verdier av  $\nu$  i det aktuelle området ( $0,25 < \nu < 0,50$ ) og tilnærmet kan vi sette  $v_s = v_R$ .

Når verdien for  $v_s$  er bestemt, er det også mulig å beregne verdien av  $G$  ut fra formel (16)  $G = v_s^2 \rho$ . Ut fra forsøk av denne type, samt laboratorieforsøk med såkalte "resonans-søyler" (eng.: resonant-column), hvor skjær bølgenes forplantningshastighet kan måles direkte i "jordsøyler" av forskjellige jordarter, har det vært mulig å etablere generelle formler for  $v_s$  og  $G$  i friksjonsjordarter (sand). Verdiene for  $v_s$  og  $G$  synes hovedsakelig å avhenge av poretalet  $e$  og midlere trykk  $\sigma_0$  (definert ved  $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ ), men kornformen har også betydning. Richart (29) angir for avrundede korn:

$$v_s = (350 - 161e) \sigma_0^{1/4} \quad \text{--- (66)}$$

$\text{m/sek} \qquad \qquad \qquad \text{kg/cm}^2$

$$G = \frac{697(2,17 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad \text{--- (67)}$$

$\text{kg/cm}^2 \qquad \qquad \qquad \text{kg/cm}^2$

For kantete korn

$$v_s = (326 - 110 e) \sigma_0^{1/4} \quad \text{--- (68)}$$

$\frac{\text{m/sek}}{\text{kg/cm}^2}$

$$G = \frac{326(2,97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad \text{--- (69)}$$

$\frac{\text{kg/cm}^2}{\text{kg/cm}^2}$

For leire er de foreliggende data noe mangelfulle, men for normalkonsoliderte leirer vil ligning (68) og (69) kunne gi tilnærmede verdier.

Ligning (55), (56) og (57) forutsetter periodiske belastninger av harmonisk form. Det er imidlertid også mulig ut fra empiriske utledninger å beregne resulterende bevegelser fra slag eller støt på terrengoverflaten. En må da kjenne lastens størrelse og variasjon med tiden. De resulterende bevegelser vil ha form av dempede svingninger som vil dø ut etter en viss tid (transiente svingninger).

Når det gjelder bølgenes dempning med økende avstand fra kilden, vil en i løsavleiringer i tillegg til den geometriske dempning beskrevet ovenfor, få energitap også på grunn av forskjellige virkninger som med et fellesnavn kan betegnes som indre friksjon. De forhold som er forbundet med indre friksjon i løsavleiringer er imidlertid meget komplisert, og så vidt vites foreligger det ikke noen almengyldig teori som helt ut forklarer disse forhold og deres virkemåte. Det er imidlertid likevel mulig å ta hensyn til denne form for dempning ved å justere de uttrykk som er utledet for elastiske legemer, ut fra observasjonsresultater. På denne bakgrunn er det i litteraturen (3) oppgitt følgende justerte formel for amplitydevariasjon med økende avstand fra kilden ved bølgeforplantning i jord.

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \exp. -\alpha(r-r_0) \quad \text{--- (70)}$$

hvor  $A_0$  er amplityden i avstand  $r_0$  fra kilden og  $A_r$  er amplityden i avstand  $r$ . Koeffisienten  $\alpha$  betegnes som en energitapskoeffisient eller dempningskoeffisient og har benevnning (lengde)<sup>-1</sup>. Uttrykket  $\exp. -\alpha(r-r_0)$  representerer endringen i dempning på grunn av indre friksjon, og for et fullstendig elastisk legeme vil således  $\alpha = 0$ . En kan dermed si at  $\alpha$  er et mål for i hvilken grad den aktuelle jordart avviker fra et fullstendig elastisk legeme.



Verdien for  $\alpha$  i en aktuell jordart kan beregnes ved enten å observere bølgeamplitydenes variasjon i forskjellig avstand fra kilden og sette inn i formel (70), eller ved å måle dempningen av transiente bølgetog i et gitt punkt. Som mål for dempningen av transiente svingninger benyttes vanligvis en "logaritmisk reduksjonsfaktor"  $\delta$  (eng.: logarithmic decrement) definert ved  $\delta = \ln A_1/A_2$  hvor  $A_1$  og  $A_2$  er de respektive amplityder for to påhverandrefølgende bølger i et bølgetog.

Fra kurver over registrerte rystelser er det således mulig å avlese verdier for  $A$  og beregne  $\delta$ . Verdier for  $\alpha$  kan så beregnes ut fra formel (16),

$$\delta = \frac{2\pi v \alpha}{\omega} \quad \text{--- (71)}$$

når R-bølgenes forplantningshastighet og svingefrekvenser er kjent. Siden  $\delta$  og  $v$  er uavhengig av svingefrekvens for et gitt materiale vil  $\alpha$  i henhold til ligning (70) variere proporsjonalt med svingefrekvensen. Mens den direkte metode ved å sette inn forskjellige verdier for  $A$  og  $r$  i formel (70) bare gir verdier for  $\alpha$  for den aktuelle svingefrekvens vil det således ut fra (71) være mulig å beregne  $\alpha$  for varierende svingefrekvens.

På bakgrunn av det ovenstående er det således mulig tilnærmet å beskrive bølgeforplantning i jord ved hjelp av empiriske verdier for "elastiske konstanter" i tilknytning til en bølgeteori som forutsetter ideelle elastiske legemer.

### 3. VIRKNING AV VEGTRAFIKK

#### 3.01 G e n e r e l t

En vegkropp består som kjent av en underbygning og en overbygning. Underbygningens primære oppgave er å rette av ujevnheter i terrenget, mens overbygningen skal fordele belastningene på vegoverflaten slik at overbelastning av materialene i underbygningen ikke oppstår. På veger beregnet for stor og tung trafikk består overbygningen som regel av flere lag stein eller grusmaterialer med varierende gradering og med et fast dekke (asfalt/betong) på toppen. Mindre trafikkerte veger kan ha overbygninger bestående av et enkelt gruslag.

Hvis en ser på belastningsfordelingen i over- og underbygningen for en veg fra et stillestående kjøretøy er det mulig å beregne denne hvis de fysiske egenskaper i de enkelte av lag av overbygningen (lagtykkelse, elastisitetsmodul, tetthet etc.) og belastningen fra kjøretøyet er kjent. Dets siste avhenger av akseltrykk og hjuldimensjoner samt lufttrykket i hjulene.

Når kjøretøyet beveger seg langs vegen vil spenningsmønsteret i vegkroppen flyttes med. Hvis vi ser på spenningene i et gitt tverrprofil av vegen vil de enkelte deler i veglegemet gjennomgå en spenningsøkning i det kjøretøyet nærmer seg. Vi vil få et spenningsmaksimum omtrent i det øyeblikk første hjulpar passerer, og deretter en reduksjon. En gjentagelse av dette forløp vil skje idet neste hjulpar passerer, men spenningenes størrelse og fordeling vil være avhengig av akseltrykk, hjultype og hjuldimensjoner samt lufttrykk i hjulene. Spenningspulsens varighet er avhengig av kjøretøyets hastighet.

Denne form for pulserende belastninger som rullende trafikk forårsaker, vil således i seg selv være en kilde til pulserende bevegelser (rystelser) i veglegemet og det omkringliggende terreng. I tillegg kommer de rystelser som forårsakes av støtbelastninger på grunn av ujevnheter i vegbanen.

Ved forsøk utført ved Road Research Laboratory (RRL) i England (37) på asfalterte forsøksveger med varierende overbygning, har en forsøkt å kartlegge virkningen av varierende hjultrykk og kjørehastighet på kontakttrykket mot vegbanen og trykkfordelingen i over- og underbygningen, samt virkningen av forskjellige ujevnheter i vegbanen på de samme forhold. Forsøkene indikerer at trykket mot vegoverflaten er avhengig av hjultrykket og ikke av hjullasten eller akseltrykket. Overført spenning i underbygningen er imidlertid hovedsakelig avhengig av akseltrykk eller hjullast og bare i mindre grad av hjultrykk. Med økende kjørehastighet fant en at overført spenning i underbygningen avtok noe. Ellers viste det seg at variasjoner i temperaturen i vegdekket under målingene hadde en ikke ubetydelig effekt på spenningene i underbygningen.

Ved de forsøk hvor hensikten var å studere virkningen av ujevnheter i vegbanen, ble det benyttet 3 m lange planker med 15 cm bredde og varierende tykkelse (2,5, 3,75 og 5 cm) montert på tvers av vegbanen. Forsøkene som alle ble utført på samme overbygning, viste at med det kjøretøy og de kjørehastigheter (15 m p h) som ble benyttet, var spenningsøkningen i underbygningen, forårsaket av kjøretøyets framhjul, ca. 1,75 for 2,5 cm planketykkelse og ca. 2,35 for 3,75 cm og 5 cm. For bakhjulene var de tilsvarende tall 1,41 og 1,75.

Forskjellen mellom framhjul og bakhjul kan ha sammenheng med avvikende fjæringsforhold for de to hjulsett. Ellers synes forsøkene å vise at effekten av ujevnhetene avtar med økende høyde idet avlesningene for 3,75 cm og 5 cm planketykkelse var større enn for 2,5 cm planketykkelse, mens innbyrdes avvik for de to største planketykkelsene var lite.

Når det gjelder å vurdere virkningen av et kjøretøys fjæringssystem og de variasjoner som kan forekomme for forskjellige kjøretøy, er det flere faktorer som spiller inn. Fig. 8 viser en skjematisk fremstilling av hvorledes fjæringssystemet i et kjøretøy er bygd opp. For kjøretøy av forskjellig fabrikat og type vil fjæringssystemet mellom aksel og chassis variere. For kjøretøy av samme fabrikat og merke vil f.eks. støtdempernes virkning endres med tiden på grunn av slitasje. I tillegg kommer at det på samme modell ofte kjøres med forskjellige dekk med avvikende fjæring og dempkonstanter. Massetyngdepunktets plassering for chassis og last vil også variere med varierende lastforhold, og dermed vil den innbyrdes lastfordelingen mellom hjulparene ved en dynamisk lastendring for de ene par, også variere.

Forsøk utført ved RRL (28) for å undersøke forskjellen i dynamisk effekt for kjøretøy med vanlig fjæringssystem og kjøretøy uten fjærer (traktorer etc.) viser imidlertid i denne sammenheng ganske interessante resultater. Under forsøkene ble nevnte kjøretøy kjørt over en 4,5 cm høy og 25 cm bred planke plassert på tvers av vegbanen samtidig som en registrerte resulterende spenninger i undergrunnen (ca. 70 cm under vegbanen). For et av kjøretøyene med fjærer ble det også foretatt forsøk med fjærene låst.

Forsøkene med kjøretøy uten fjærer viste at disse ga en mindre spenningsøkning i undergrunnen med planken i vegbanen enn vanlige kjøretøy med normale lufttrykk i hjulene. Forsøkene med låste fjærer ga spenningsøkninger av samme størrelsesorden som når fjærene virket, for den ujevnheter og de kjørehastigheter som ble benyttet. Kjøretøyets bevegelser og dermed spenningspulsenes form var imidlertid noe forskjellig i de to tilfeller. Dette indikerer at kjøretøyets fjæringssystem likevel har en beskjeden innvirkning på størrelsen av resulterende spenningspuls i undergrunnen på grunn av ujevnheter i vegbanen. Det som

synes å ha størst betydning for spenningspulsenes maksimalverdi er dermed kjøretøyets hjul eller akseltrykk. Betydningen av kjøretøyets fjæringssystem kommer imidlertid inn når det gjelder spenningspulsenes form og varighet. I denne sammenheng vil også ujevnhetenes form ha en viss betydning. Formen av ujevnheten vil likeledes ha betydning for støtets hovedretning. Fig. 9 a viser en forhøyning som i alt vesentlig vil forårsake et vertikalt støt mot vegbanen, mens en forsenkning som vist i fig. 9 b også vil ha en horisontalkomponent.

For beregning av resulterende bevegelser ved slag eller støt mot et elastisk legeme, er en avhengig av å kjenne støtpulsens variasjon med tiden. Videre må en kjenne legemets elastiske konstanter. Det siste kan bestemmes ved forsøk av samme type som nevnt i avsnitt 2.07. Lagdelingen i vegoverbygningen kompliserer imidlertid forholdene en del. Det er imidlertid mulig å oppnå gjennomsnittsverdien for forskjellige lagkombinasjoner ved å forandre vibratorens svingefrekvens og dermed R-bølgenes dybdevirkning. Denne metode har blant annet vært anvendt for bestemmelse av elastisitetensmodulen E i forskjellige lag av vegkroppen for kontroll og dimensjoneringsformål.

Selv med gjennomsnittsverdier for de elastiske konstanter i vegoverbygningen vil imidlertid beregning av resulterende bølgebevegelser i undergrunnen by på problemer, idet den foreliggende teori er basert på et homogent elastisk halvrom. Videre vil dokumentering av støtpulsens form i et gitt punkt på vegoverflaten også være noe komplisert. Uten å gå inn på disse forhold synes det da rimelig, for en orienterende undersøkelse av mulige rystelsesnivå fra vegtrafikk, å måle rystelsen fra kjøretøy med største tillatte akseltrykk ved forskjellige grunnforhold og overbygningstykkelser. Forsøk utført ved Chalmers Tekniska Högskole, med det formål å undersøke rystelsesnivået i et gitt område forårsaket av tilfeldig trafikk ( 2 ), kan tas til inntekt for dette syn, idet en med en inndeling av kjøretøyene i følgende grupper, 1) middels tung lastebil, 2) tung lastebil og 3) buss registrerte de største deformasjonsamplityder for gruppe 2).

### 3.02 I n s t r u m e n t e r i n g

Samtlige registreringer i den aktuelle måleserie ble foretatt med et instrument av typen "VS-1100 Engineering Seismograph" produsert av Sprengnether Instrument Co, USA. Instrumentet består av to enheter, et seismometer og en skriver.

Seismometeret er bygd på induksjonsprinsippet med en bevegelig spole opphengt i et magnetfelt. Spole-systemets egenfrekvens er 2 hz. For å kunne registrere bevegelser i alle tre hovedplan samtidig er det montert tre spoler med bevegelsesretning normalt på hverandre (transversalt, vertikalt og lateralt). Indusert spenning i spolene ved relativ bevegelse mellom spole og magnetfelt er proporsjonal med antall feltlinjer som overskjæres av spolen pr. tidsenhet, dvs. indusert spenning er proporsjonal med den relative hastighet mellom spole og magnetfelt. Seismometeret gir således et mål for bevegeshastigheten eller svingningshastigheten i det legemet der enheten er plassert.

Signalene fra spolene overføres via kabel til skriveren. Her sendes signalene inn på tre speilgalvanometere - ett for hver bevegelsesretning. Galvanometerenes utslag kan varieres ved hjelp av et system med motstander som demper signalene i forskjellig grad. Speilgalvanometerenes bevegelser overføres ved hjelp av en lyskilde og et optisk system til en filmstrimmel som trekkes frem med konstant hastighet (100 mm/sek). Seismometerets bevegelser fremkommer således som en kurve på filmen og kurvens avvik fra nøytralaksen er et mål for seismometerets svingningshastighet. Avhengig av hvilken bryteposisjon for dempningsenheten som benyttes, kan en velge mellom fire forskjellige skalaer på filmen, 1) 0,2 mm/mm/sek, 2) 1 mm/mm/sek, 3) 5 mm/mm/sek og 4) 20 mm/mm/sek. Instrumentet er avstemt slik at forholdet mellom svingningshastighet og utslag på filmstrimmelen er liniært for svingefrekvensen i området 2-200 hz.

Øvre grense for registrerbare svingningshastigheter er begrenset av seismometerets vekt. Ved akselerasjoner på over 0,3 g vil således seismometeret kunne miste kontakten med underlaget uten at det er gjort spesielle tiltak for å hindre dette (nedveiling med lodd - nedgraving i løsavleiringer). Avlesningsnøyaktigheten for de enkelte forsterkninger er henholdsvis 1) + 5 mm/sek, 2) + 1 mm/sek, 3) + 0,2 mm/sek og 4) 0,05 mm/sek.

For registrering av eksterne signaler er skriveren utstyrt med en ekstra galvanometerkrets. Denne kan tilkoples en bryter eller en eller annen form for signalgenerator og benyttes til å markere koordinerte hendelser på filmstrimmelen.

Filmstrimmelen fra et opptak viser kurver for registrerte svingningshastigheter (hastighetsamplityder). Opptaket kan imidlertid også benyttes til å måle deformasjons- og akselerasjonsamplityder ved henholdsvis å integrere og derivere hastighetskurvene. Hvis disse operasjoner skal utføres for hånd vil det imidlertid være en såvidt langsom og tidkrevende prosess at metoden ikke er gjennomførbar for registreringer av noen lengde. I praksis vil det derfor bare være aktuelt å regne ut

maksimale enkeltverdier for deformasjon og akselerasjon. For harmoniske svingninger er imidlertid overgangen mellom de enkelte enheter relativ enkel.

Som det fremgår av det ovenstående kan instrumentet bare registrere svingningshastigheter i et målepunkt om gangen. Ved registrering av variasjoner i svingningshastigheten med økende avstand fra kilden er en således avhengig av at kilden gir identiske bølgetog for hver registrering. For vedvarende svingninger fra en stasjonær kilde med konstant amplityde er dette ikke noe problem. For transiente svingninger forårsaket av slag eller støt er en imidlertid avhengig av å kunne reprodusere slaget eller støtet for hver måling.

### 3.03 O r i e n t e r e n d e f o r s ø k

#### 3.03.1 Forsøksbetingelser

For å undersøke hvor reproduserbare registreringer av transiente svingninger i jord forårsaket av slag eller støt mot terreng er, samt hvorledes de resulterende bølgebevegelser dempes med økende avstand fra kilden i forskjellige jordarter, ble følgende forsøksserie utført.

Med et fall-lodd i fritt fall mot en underlagsplate på terreng ble det foretatt registrering av resulterende svingningshastigheter i forskjellig avstand fra loddet. Loddets fallhøyde ble variert i tre trinn for hvert målepunkt og for hver fallhøyde ble det foretatt tre registreringer.

Fig. 10 viser oppstillingen av forsøksapparatet. Som fall-lodd ble benyttet et vanlig hejarborlodd (65 kg) opphengt i en spesiell utløsermekanisme. Føringsstangen (Ø 32 mm hejarborstang) ble vatret opp og låst fast i toppen av hejarborbukken slik at eventuell friksjon mellom loddet og stangen skulle bli minimal. For feste i bakken var stangen ført 1 m ned under terreng. Platen som loddet slo an mot var festet i skjøten mellom to stenger.

Fallhøydene som ble benyttet under målingene var  $H = 50$  cm, 75 cm og 100 cm, og det ble foretatt registreringer i avstand 0,2 m, 1 m, 5 m, 10 m, 20 m, 50 m og 100 m fra loddet. Denne forsøksserien ble gjentatt på tre forskjellige jordarter; grus, silt og leire. For å måle bølgenes forplantningshastighet i de forskjellige jordarter ble det på fall-loddet montert en mikrobryter som via skriverenheten kunne tidfeste loddets anslag mot underlaget på filmstrimmelen.

De steder som ble valgt for målingene hadde følgende grunnforhold:

#### 1) Hovinmoen grustak

Løsavleiringene består av sandig grus og grusig sand i lagvis vekslende avsetning. Avsetningens mektighet er ikke kjent i detalj, men antas ut fra grustakets høyde å være minst 10 m.

## 2) Hjelmark i Eidsberg

Løsavleiringene består her av relativt homogene leirige siltmasser med 80% av materialet innenfor siltfraksjonen og ca. 10% leirinnhold. Registrert vanninnhold ligger i området 25%. Sonderboringer i området er ført til ca. 15 m under terreng uten at fjell er påtruffet. Ut fra høydeforskjellen mellom de enkelte borpunkt er det grunn til å tro at løsavleiringene har en mektighet på min. 20 m.

## 3) Slependen i Asker

Løsavleiringene består av relativt fet leire (ca. 50% leirstoff) med vanninnhold i området 45-50%. De øvre 1,5 m består av tørrskorpemasser. Dybden til fjell varierer mellom 13-20 m.

Måleprofilene er på alle tre steder valgt lagt i et flatt lende, og høydeforskjellen mellom de enkelte målepunkt i samme måleprofil er meget beskjeden.

### 3.03.2 Resultater

Når det gjelder variasjoner i målte svingningshastigheter for samme forsøksbetingelser (samme målepunkt og fallhøyde på loddet) viser resultatene relativ god overensstemmelse mellom de enkelte forsøk. Fig. 11 viser eksempler på opptak fra Slependen i 50 m avstand fra kilden og med 75 cm fallhøyde på loddet. Som en ser er både bølgetogenes forløp og amplitydenes størrelse meget like for de tre opptakene.

Av tabellen over måleresultater fremgår det også at avviket mellom de parallelle fall-loddforsøk er forholdsvis beskjedent. Avviket er størst for vertikale svingninger i målepunkt 1 nærmest kilden. Dette skyldes antagelig at resulterende akselerasjoner ligger i og over det nivå hvor registreringsnøyaktigheten reduseres hvis seismometeret ikke er belastet eller gravet ned.

Den ventede spredning av bølgetogene med økende avstand fra kilden på grunn av forskjellige bølgetyper med forskjellig forplantningshastighet vil fremgå av fig. 11. Mens de største utslag kommer først i bølgetoget på opptak like ved kilden, og den totale lengde av bølgetogene er ca. 0,2 sek, ser vi av fig. 11 at de største utslag (antatte R-bølger) kommer et stykke ut i bølgetoget

og at varigheten av bølgebevegelsene er ca. 0,8 sek. Ved avlesning av filmene er største utslag for antatte R-bølger benyttet.

Resultater fra måleserien på Slependen er vist på kurver i fig. 12 hvor variasjonene i registrerte hastighetsamplityder er fremstilt som en funksjon av avstand fra kilden for største fallhøyde på loddet. Som en ser avtar svingningshastigheten relativt raskt med økende avstand fra kilden for alle tre svingeretninger.

Ut fra observert demping av de enkelte bølgetog i hvert målepunkt, og målt forplantningshastighet for de enkelte bølgetyper (p, s og R-bølger), har en forsøkt å beregne dempningskoeffisienten  $\alpha$  for de tre forsøksfeltene ved hjelp av formel (71). Verdien av  $\delta$  varierer imidlertid en del innenfor samme målefelt, og fastsettelsen av s og R-bølgenes hastighet var også noe vanskelig. Beregningene gir imidlertid  $\alpha$  verdier innenfor samme variasjonsområde som angitt av Barkan (3) for tilsvarende svingefrekvenser.

For Slependen er beregnet  $\alpha = 0,12$ . Den tilsvarende teoretiske kurve for variasjoner i svingningshastigheten med økende avstand fra kilden beregnet ut fra hastighetsamplityden i målepunkt 2, er vist på fig. 12. For svingninger i vertikalplanet ligger denne kurve noe over de observerte verdier for målepunkter nær kilden. For laterale svingninger følger den teoretiske kurve de observerte verdier bedre, men de observerte verdier ligger noe over de teoretiske. For de øvrige forsøksfelt ligger den teoretiske kurve noe over de observerte verdier både for laterale og vertikale svingninger, med størst avvik nær kilden.

Dette kan indikere at bølgene dempes noe mer på grunn av jordartenes avvik fra ideelle elastiske legemer enn det den empiriske faktoren  $\exp -\alpha(r-r_0)$  gir dekning for. Tilsynelatende er dempningen også noe avhengig av bølgenes amplitude slik at dempningen øker med økende amplitude. Målte  $\delta$  verdier tyder på dette idet disse synes å være noe større nær kilden enn lenger ut.

Av fig. 11 fremgår det ellers at bølgetogenes frekvens i samme målepunkt avtar noe etter hvert som bølgene dempes. Svingefrekvensen varierer også noe i de enkelte målepunkt, og tendensen er avtagende frekvens



med økende avstand fra kilden. Hvis en ser på formel (71) vil også dette bidra til å redusere  $\alpha$  med økende avstand fra kilden.

For å bedre å kunne sammenligne måleresultatene fra de enkelte forsøksfelt, er variasjonene i vertikale hastighetsamplityder med varierende avstand fra kilden for største fallhøyde på loddet tegnet opp i halvlogaritmisk skala på fig. 13. Som en ser er registrerte svingningshastigheter i vertikal retning størst for leire under de gitte forsøksbetingelser. De laveste verdier er registrert på siltmasser. Kurvene synes ellers å ha et noenlunde likt forløp med innbyrdes lik avstand. De tilsvarende kurver for svingninger i lateral retning, viser tilnærmet et lignende forhold, men kurvene ligger noe tettere og krysser hverandre i enkelte områder. I følge de teoretiske betraktninger skulle normalt hoveddelen av energien fra en svingende kilde forplantes ut fra kilden i form av R-bølger. Dette vil si at en kunne vente de største svingninger i vertikal og lateral retning og noe mer beskjedne svingninger i transversal retning. For målingene på Slependen stemmer det teoretiske bildet ganske bra med det observerte. Målingene ved Hjelmarm og Hovinmoen viser imidlertid noe større utslag i transversal retning idet disse i enkelte målepunkt overstiger målte svingninger i de to øvrige svingeplan. Dette kan muligens skyldes refleksjonsfenomen (Love-bølger) som omtalt tidligere. Kurvene for transversale svingninger har imidlertid også et noe annet forløp enn de to øvrige kurvesett.

Forskjellen i registrert svingningshastighet for varierende fallhøyde er for målingene fra Slependen fremstilt for alle tre svingeretninger i fig. 14. Fig. 15 viser forskjellen i vertikale svingninger for de tre målesteder. Kurvene viser at forskjellen i målte svingningshastigheter er relativt beskjeden for til dels store variasjoner i "teoretisk" tilført energi ( $W H \text{ kg m}$ ). Med de forsøksbetingelser som valgt, vil imidlertid ikke all tilført energi omformes til svingeenergi idet det vil oppstå energitap i selve støtet (delvis elastisk støt). Videre hadde anleggsplaten for forsøkene på Hovinmoen en tendens til å presses noe ned i løsavleiringene for største fallhøyde på loddet, hvilket indikerer at en del av energien her har gått med til å utløse brudd-deformasjoner. Loddets fallhøyde kan derfor ikke benyttes som mål for tilført energi. Kurvene for varierende fallhøyde viser imidlertid relativt like forløp.

Forsøksserien med fall-lodd er ellers relativt begrenset hva angår mulig virkning av variasjoner i grunnforhold innen de tre jordartsgrupper, variasjoner i tilført energi etc., og en kan vanskelig trekke særlig vidtgående konklusjoner ut av resultatene. Kort summert indikerer forsøkene imidlertid av bølgebevegelser som forårsakes av slag eller støt mot terreng har et forløp som lett kan reproduseres for like forsøksbetingelser, og at bølgenes amplitude dempes relativt raskt med økende avstand fra kilden. Generelt synes dempningen å være noe større enn det ligning (70) gir dekning for i området nær kilden.

### 3.04 M å l i n g a v r y s t e l s e r f r a v e g t r a f i k k

#### 3.04.1 Forsøksbetingelse

For de aktuelle undersøkelser valgte en å legge opp til en forsøksserie hvor virkningen av forskjellige ujevnheter i vegbanen, forskjellige materialer i undergrunnen samt rystelsenes dempning med økende avstand fra vegen kunne studeres. Et slikt opplegg forutsetter imidlertid at en kan holde kontroll med kilden i de enkelte forsøk. Det var derfor nødvendig å benytte kjente kjøretøy som kilde med muligheter til å kontrollere kjørehastighet og akseltrykk.

Som kjøretøy ble valgt lastebiler, lastet med grusmasser eller tilsvarende løsmasser (sand, singel, pukk etc.). Akseltrykk på bakaksel ble satt til 8 t, og kontrollmåling ble foretatt på vekt. For en del av måleseriene ble det benyttet samme type lastebil (Volvo F 86), men ikke alltid samme bil. Av andre bilmerker ble det for en del forsøk benyttet Magirus Deutz 150 D 14. Normale arbeidslaste er forøvrig relativt like for samtlige kjøretøy og fjærings-systemet antas å ha fjæringskonstanter i alle fall av samme størrelsesorden. Ut fra de betraktninger som er gjort i avsnitt 3.01 antas mulige variasjoner i resultatene på grunn av variasjoner i fjærings-systemet på bilene å være meget beskjedne.

For å illustrere forskjellige ujevnheter i vegbanen ble det valgt å benytte to ramper av forskjellig høyde. Rampenes dimensjoner er angitt på skissene fig. 16. Under forsøkene ble disse etter tur plassert på vegbanen i ytre hjulspor etter at det først var foretatt registrering av rystelser uten kunstige ujevnheter i vegbanen.

Arsaken til at en valgte å benytte rampe bare for ett hjulsett, var at en på denne måten ville få en forholdsvis konsentrert støtpuls mot vegdekket. Dernest var det enklere å foreta registreringene uten å hindre øvrig trafikk på vegen. For å karakterisere vegdekkets tilstand ble det benyttet en gradering fra 0 til 5 med 0 som et dårlig, hullet og oppsprukket dekke og 5 som et jevnt fint dekke.

For å undersøke kjørehastighetens innflytelse på rystelsene ble det både med uendret vegbane og med de kunstige ujevnheter kjørt med to hastigheter, 30 km/time og 50 km/time. I alt ble det således foretatt 6 registreringer i hvert enkelt målepunkt.

For hvert målested ble det foretatt registreringer i punkter på kjørebane ca. 0,5 m fra ytre hjulspor og på terreng i 10, 20 og 50 m avstand fra kjørebane-kant. På to steder ble det også målt i 100 m avstand fra kjørebane-kant. Skissen fig. 17 viser eksempel på oppstilling av rampe og målepunkt på vegbanen. Seismometret var i disse tilfellene plassert ca. 0,5 m ut til siden for hjulsporet og ca. 0,5 m foran rampene nær antatt nedslagspunkt for bilhjulet.

De første målingene ble utført i mars 1969 i en periode hvor en erfaringsmessig har størst frostdybde under vegbanen. Målestedene som ble valgt, var områder hvor registrering av telegrensen under vegbanen pågikk, og hvor det ved prøvegraving var kartlagt hvilken sammen-setning vegens overbygning hadde og hva slags materialer som var i undergrunnen. Under rystelsesmålingene ble både teledybden i vegbanen og teledybden i tiliggende terreng samt snødybden registrert for hvert målested. Forsøksserien ble så senere gjentatt for en del av disse målestedene på en annen årstid uten tele i bakken.

Da de første forsøkene ble utført i områder med i alt vesentlig leire og siltig leire i undergrunnen, ble det senere også foretatt målinger i områder med friksjonsmasser i undergrunnen. I alt er det utført målinger på 10 forskjellige steder i den aktuelle forsøksserie. I tillegg har en også hatt muligheter til å trekke inn en del resultater fra tidligere undersøkelser i vurderingene.

Fig. 18 gir en oversikt over 8 av målestedene med angivelse av materialer og lagtykkelse i overbygning og undergrunn. På samtlige målesteder var terrenget meget flatt, bortsett fra ved Motorvegen og Yssi, med vegen omtrent i terrengnivå og jevnt flatt profil i måle-retningen. På Motorvegen lå målestedet i ca. 3 m

skjæring, og med hellende terreng fra vegen på ytter-  
siden av skråningstopp. På Yssi lå vegen også i  
mindre skjæring (ca. 2 m), men med relativt flatt  
terreng utenfor skjæringstopp bortsett fra en liten  
dalsenkning som krysset skrått over målelinja.

### 3.04.2 Resultater

Eksempel på registreringsopptak fra vegtrafikk er vist  
i fig. 19. Opptaket er gjort ved Sarpebakken i 50 m  
avstand fra vegkant med kjørehastighet 50 km/time og  
største rampe i vegbanen. Som en ser har de største  
utslagene (antatte R-bølger) en tilnærmet harmonisk  
form, og kurvene gir større verdier i vertikal og  
lateral retning enn i transversal retning. Dette  
forhold varierer imidlertid noe for de forskjellige  
målesteder. Ved avlesning av kurvene er de største  
utslagene benyttet. Resulterende svingningshastigheter  
og svingefrekvens er presentert i tabells form med  
angivelse av hvilken forsterkning som er benyttet.  
(Tabell 2 )

Fig. 20 viser resultatet av målinger fra fire av  
målestedene under telefrie forhold og med største  
hastighet og største rampe i vegbanen. Kurvene er  
fremstilt i halvlogaritmisk skala for bedre å kunne  
skille måleresultatene, og viser registrerte svingnings-  
hastigheter i alle tre svingeplan. Som en ser har  
kurvene et noe mer uregelmessig forløp enn tilsvarende  
kurver fra forsøkene med fall-lodd. Kurvene viser  
ellers at en har fått størst utslag i alle tre svinge-  
retninger ved målingene på Kisebunn. I vertikal og  
lateral retning ligger måleresultatene fra Vilbergmoen  
en del under resultatene fra de øvrige målesteder, mens  
den tilsvarende kurve for transversal svingeretning  
faller mellom kurvene fra de øvrige steder. For Vil-  
bergmoen har den transversale kurve også delvis større  
verdier enn den vertikale og laterale kurve. Det siste  
samsvarer med de observasjoner som ble gjort på til-  
svarende friksjonsmasser ved fall-lodd forsøkene, og  
indikerer mulige innvirkninger av Love-bølger.

Hvis en ser på vegoverbygningens sammensetning ved  
Kisebunn, Sarpebakken og Yssi, er både total tykkelse  
og materialsammensetning relativ lik ved Sarpebakken  
Yssi. Ved Kisebunn er tykkelsen noe større og materi-  
alene består av grusmettet pukk. Rystelsene er likevel  
gjennomgående størst på Kisebunn, og dette må antagelig  
forklares med at materialene i undergrunnen består av  
meget bløt leire, mens det ved Sarpebakken og Yssi er  
registrert noe fastere siltig leire.

Et tilsvarende kurvesett som gjengitt i fig. 20 er vist i fig. 21 for registreringer utført med tele i bakken. Registreringene fra Kisbunn og Sarpebakken skiller seg her igjen ut med de største verdier i vertikal retning. Registrerte verdier fra Gulli ligger i samme området. Motorvegen, Kjellstadveien og Yssi utgjør en egen gruppe, mens de laveste verdier er registrert på Semsletta. Det synes imidlertid ikke å være noen tilsvarende klar forskjell i snø og isforholdene på målestedene som kan forklare avvikene i måleresultatene. Da videre teledybden på samtlige steder, bortsett fra Motorvegen, var større enn vegoverbygningens tykkelse, må en igjen anta at det er forholdene i undergrunnen som har størst betydning for variasjonen i registrerte svingningshastigheter. Med tele i bakken er imidlertid svingningshastighetene vesentlig mindre i lateral og transversal retning enn i vertikal retning sammenlignet med telefrie forhold.

Det er ellers foretatt registreringer på vesentlig flere steder med tele i bakken enn uten tele. Grunnen til dette er at en på det tidspunkt det var aktuelt å foreta målinger med tele, antok at telen kunne ha vesentlig betydning for bølgeforplantningen (reduisert dempning med økende avstand fra kilden). En viss tendens i denne retning er det vel også mulig å spore på fig. 21 idet kurvene her synes å ha en noe flatere avslutning enn kurvene på fig. 20. Dette framgår også av fig. 22 som viser forskjellen mellom registreringer med og uten tele for tre av målestedene. Av dette kurvesett framgår videre at de totale utslag stort sett er mindre med tele i bakken enn uten. Spesielt i området nær vegen. Forskjellen er som nevnt størst for laterale og transversale svingninger.

I denne sammenheng kan bemerkes at kurvene for laterale og transversale svingninger er spesielt uregelmessige med tele i bakken. Dette må imidlertid sees i sammenheng med avlesningsnøyaktighet i de enkelte måleområder på instrumentet (+ 0,05 mm/sek for største forsterkning), og det forhold at en logaritmisk skala vil forstørre virkningen av eventuelle avlesningsunøyaktigheter for lave verdier.

I fig. 23 er samtlige resultater fra Kisebunn under telefrie forhold fremstilt. Som en ser følger kurvene hverandre stort sett med største utslag for rampe 2, mindre for rampe 1 og minst for uendret vegbane. Videre gir største hastighet i de fleste tilfeller større verdier enn ved lavere hastighet. En del uregelmessigheter forekommer imidlertid idet en enkelte steder har registrert større verdier for minste kjøre-

hastighet. Videre er det også enkelte målinger hvor rampe 1 gir større utslag enn rampe 2 for samme kjørehastighet. Tilsvarende variasjoner er registrert for de øvrige målesteder. Dette kan indikere at forsøksbetingelsene ikke er helt reproducerbare for hvert opptak. Årsakene kan være variasjoner i kjørehastighet, men dette lot seg relativt lett kontrollere, og avvikene mellom de enkelte forsøk antas ikke å ha vært mer enn + 5 km/time. Med uendret vegbane er det større sannsynlighet for at avvikene skyldes mindre endringer av kjørespor, spesielt vil dette ha betydning der vegdekket var noe ujevnt. For forsøkene med de kunstige ujevnheter i vegbanen kunne det også variere litt hvorledes hjulene traff rampene.

Med det foreliggende materialet er det vanskelig å trekke frem eksakte verdier for variasjoner i resultatene med varierende forsøksbetingelser. Tendensen er imidlertid klar. Større ujamnheter gir større rystelser, og forholdsvis synes forskjellen mellom normal vegbane og minste rampe å være større enn den forholdsvis forskjell mellom rampe 1 og 2. Videre gir største kjørehastighet også de største rystelsene for like forhold i vegbanen, men forskjellen synes å være relativt beskjedent for de variasjoner i kjørehastighet som ble benyttet. For relativt like vegoverbygninger synes forskjellen i undergrunnen å ha størst betydning for resulterende rystelser, og de største svingningshastigheter er registrert for veg på bløt leire, mens målingene på veg over grusmasser stort sett ga de minste verdier.

Tendensen i avvik mellom registrerte svingningshastigheter for varierende grunnforhold og varierende ujevnheter i vegbanen vil fremgå av fig. 24 som viser cm-hyldningskurver for resultatene fra Kisebunn, Sarpebakken, Yssi og Vilbergmoen for største kjørehastighet og frostfrie forhold.

Fig. 25 viser variasjoner i vertikale svingefrekvenser med varierende avstand fra vegen, og forskjellige ujevnheter i vegbanen for fire av målestedene under telefrie forhold. Kurvene representerer et gjennomsnitt av registrerte verdier for begge kjørehastigheter, men spredningen er forholdsvis beskjedent bortsett fra Vilbergmoen. Her er også registrerte svingefrekvenser vesentlig høyere enn for de øvrige målesteder nær kilden, men frekvensen avtar markert med økende avstand fra vegen. For de øvrige målesteder er variasjonene med økende avstand forholdsvis liten. For samtlige målesteder er det en viss forskjell i frekvens for varierende ujevnheter i vegbanen. Det siste indikerer at svingefrekvensen i løsavleiringen er avhengig av forsøksbetingelsene.

#### 4. VIRKNING AV PELERAMMING

##### 4.01 G e n e r e l t

I prinsippet kan det skilles mellom to måter å drive peler ned i løsavleiringer på. Mest kjent og anvendt er ramming ved hjelp av fall-lodd, damp - eller disellodd. I de senere år har neddriving ved hjelp av vibratorer også vært benyttet. Felles for metodene er at begge fører til vibrasjoner i løsavleiringene rundt pelen. I det siste tilfellet er dette en til-siktet måte å drive pelen ned på ved hjelp av konti-nuerlige vibrasjoner. Ved ramming vil rystelsene opptre i form av transiente svingninger som vanligvis dempes ut mellom hvert slag.

##### 4.01.1 Vibrasjonsmetoden

Ved denne form for pelearbeider tilføres peletoppen harmoniske svingninger i pelens lengderetning ved hjelp av en vibrator. Vibrasjonene i pelen overføres til løsavleiringene, og ved en kombinasjon av redusert bæreevne i jordarten og resulterende lokalbrudd på grunn av støtpulsen i pelen, drives denne ned i løs-massene.

Hvis vi ser på pelen i det denne settes an mot terreng, vil vi ha en situasjon som kan sammenlignes med et fundament med pulserende belastning på terreng. Etter hvert som pelen trenger ned i løsavleiringene vil energioverføringen skje over en stadig økende kontakt-flate og forholdene blir mer komplisert.

For fundamenter med pulserende belastning plassert i en dybde  $h$  under terreng, er det i litteraturen (3) fore-slått følgende empiriske formel for sammenheng mellom resulterende vibrasjonsamplityder på terrengoverflaten med fundamentet i dybde  $h$ , og med fundamentet på terreng

$$A_h = A_0 \exp. -(2\pi/L_s)h \quad \text{---} \textcircled{72}$$

hvor  $A_h$  og  $A_0$  er de respektive amplityder og  $L_s$  er s-bølgenes bølgelengde og  $h$  dybde under terreng. Formelen viser at amplitydene på overflaten vil avta relativt raskt med økende  $h$  i en gitt jordart.

Forholdene må antas å være noenlunde analoge for en pel slik at etter en viss neddriving, vil effekten som når tilbake opp til terreng fra pelespiss, være ubetydelige. Fra kurven fig. 26 hvor forholdet  $A_h/A_0$  er plottet mot  $h/L_s$  kan en se at for  $h/L_s = 0,36$  er  $A_h$  bare 10% av  $A_0$ .  $L_s$  varierer med frekvensen på vibratoren, og for høye frekvenser (60-120 hz) vil bølglengden være relativt kort (1-5 m). Det vil da bare være de øvre 2-3 m under terreng som har betydning for rystelsene på terrengoverflaten hvis en bare tar hensyn til pelespissens virkning. For lavere frekvenser (10-20 hz) vil dybden øke.

Neddrivingseffekten av pelen vil ellers variere med vibratorens svingefrekvens. For en gitt jordart og en gitt pel vil det være en eller flere svingefrekvenser som gir øket neddrivingseffekt. De fleste vibratører er derfor utstyrt med muligheter til å variere svingefrekvensen. Under variasjon av frekvensen for å søke etter større neddrivingseffekt, kan en da få tilfeller hvor de vibrasjoner som overføres via løsavleiringene til nærliggende konstruksjoner, har en svingefrekvens som gir resonansfenomen i disse. Ved bruk av vibratører må en derfor være spesielt oppmerksom på mulige skadevirkninger på grunn av resonans.

#### 4.01.2 Pelerramming

Pelen drives her ned i løsavleiringene ved hjelp av et ramlodd. Hvis vi ser på ramloddets energi i støtøyeblikket vil denne fordeles mellom loddet selv (delvis elastisk støt), elastisk og plastisk deformasjon av støtputen, elastiske deformasjoner i pelen og elastisk og plastisk deformasjon av løsavleiringene rundt pelen (fig. 27). Pelens blivende setning er knyttet til de plastiske deformasjoner i løsavleiringene, mens de elastiske deformasjoner forplantes ut fra pelen i form av transiente bølgebevegelser. Energifordelingen vil avhenge av rammeutstyret, pelematerialet og grunnforholdene. I løst lagrede, bløte jordarter vil hoveddelen av energien således gå med til neddriving av pelen, lett ramming. I fast lagrede jordarter vil pelens synkning pr. slag være liten, og en større del av energien vil gå over i elastisk deformasjon av løsavleiringene, hard ramming. Ut fra dette vil en således kunne vente de største rystelser i områder med stor rammemotstand. Det vil videre være rimelig å anta at rammemotstanden er et mål for den del av tilført energi som omformes til rystelser.

Virkningene av at pelen trenger dypere ned etter hvert til være at vibrasjonseffekten overføres til løsavleiringene over en stadig større del av peleoverflaten. Tidligere observasjoner (11) tyder imidlertid på at vibrasjonseffekten er størst ved pelespiss. Endringene i rystelsene nær terrengoverflaten antas i alle fall som for neddriving med vibrator, å være beskjeden



etter at pelen har kommet et stykke ned under terreng.

Ved ramming gjennom bløte og ned i faste lag vil imidlertid dette bildet kunne endres. Resulterende rystelser på terreng vil, foruten fastheten i det dypereliggende lag, være avhengig av lagets dybde under terreng. Hvis dybden er stor, sammenlignet med s-bølgens bølgelengde, vil en kunne vente en beskjeden virkning fra pelespiss på terreng.

Normalt skulle en da, ved de grunnforhold hvor det er aktuelt å benytte peler, få de største rystelser nær terreng der pelene må rammes gjennom et fast topplag. Videre skulle ikke innveisling av pelen i fjell ved normale pelelengder forårsake noen vesentlig økning av rystelsene nær overflaten.

For den som skal utføre peleramming, vil det være av betydning å kunne bedømme mulige rystelser ved tiliggende konstruksjoner fundamentert på og nær terreng uten at direkte målinger foretas. I fig. 28 er vist et kurvesett med dette formål (etter Wiss, 39) Med kjent rammeenergi kan en ved hjelp av kurven lese av sannsynlig svingningshastighet i en gitt avstand fra pelen, eller rammeenergien kan justeres slik at svingningshastigheten ikke overskrider en viss verdi i en gitt avstand. Kurvene er basert på erfaringsdata og er ment å dekke alle peletyper. Som en ser er det bare skilt mellom våt og tørr sand og leire. Løsavleiringenes fasthet eller rammemotstand er ikke angitt. En kan derfor ikke vente at kurvene vil passe for alle rammeforhold.

Da en eksakt teoretisk utledning av resulterende rystelser fra peleramming ikke synes mulig på det nåværende tidspunkt på grunn av de mange usikre forhold, vil en fortsatt være avhengig av empiriske overgangsfaktorer basert på observasjonsdata. Nøyaktigheten av en slik empirisk metode vil antagelig kunne bedres hvis en i tillegg til tilført energi, også trekker variasjoner i rammemotstand inn i vurderingen.

#### 4.02 M å l i n g a v r y s t e l s e r f r a p e l e r a m m i n g

##### 4.02.1 Forsøksbetingelser

Da neddriving av peler med vibrator ikke er vanlig her i landet, var en avskåret fra mulighetene til å utføre målinger med slikt utstyr. For rammede peler var det av interesse foruten det generelle rystelsesnivå for varierende jordarter og rammemotstand, å undersøke eventuelle variasjoner i rystelsene med nedrammet pelelengde. For dette formål er det foretatt registrering

under ramming på tre forskjellige steder med ulike grunnforhold. Flere registreringer, spesielt fra områder med hard ramming hadde vært ønskelig, men på det tidspunkt det var aktuelt å utføre målingene, var det vanskelig å lokalisere aktuelle pelearbeider med slike rammeforhold. De steder hvor målinger ble foretatt var 1) Tokerud, byggefelt H i Oslo, 2) Myreng overgangsbru i Østfold og 3) Gulsvik bru i Buskerud.

På Tokerud ble det rammet betongpeler (Ø 23 cm og Ø 28 cm BB) til fjell for boligblokker. Ved de blokkene hvor det ble foretatt målinger, er dybden til fjell 10-15 m. Løsavleiringene består av inn-til 5 m tykk fast til meget fast tørrskorpeleire. Under dette lag er det registrert middels fast, lite sensitiv leire ( $w = 30-35\%$ ) med enkelte sandlag. Boligblokkene ligger på et relativt flatt platå og terrenget langs de måleprofiler som ble benyttet, var tilnærmet horisontalt. Ved den ene blokken som ligger på kanten av platået, var terrenget jevnet noe av ved utfylling av lokale leirmasser. Rammingen ble utført med 3 tonns fall-lodd.

Ved Myreng overgangsbru ble det rammet svevende tre-peler for brufundamentene. Pelelengden var ca. 14 m. Løsavleiringene i området består av et 3-4 m tykt sandlag på toppen med siltig morene under. I sandlaget er det registrert liten til middels stor sondermotstand mens sondermotstanden er meget liten i de øvre morenelag. Fastheten øker imidlertid noe med dybden. Terrenget ved brua er ganske flatt. Rammingen ble utført med 3 t fall-lodd.

For venstre landkar på Gulsvik bru ble det rammet svevende trepeler i sand. Pelelengden var ca. 14 m. Samtlige peler som det ble foretatt målinger for, var skråpeler med helning 4:1. I sandmassene er det registrert liten til middels stor motstand i de øvre lag. Sondermotstanden øker jevnt med dybden. Rammingen ble foretatt i elvekanten fra et nivå omtrent 0,5 m over elvenivå. Fra elvebredden stiger terrenget bratt opp ca. 8 m til et relativt flatt platå. På grunn av terrengforholdene var en henvist til å måle i punkter langs et måleprofil med til dels store høydeforskjeller. Rammingen ble utført med 1,75 t fall-lodd. Måledagen var det antydning til teleskorpe (2-3cm) men dette antas ikke å ha hatt noen betydning for målingene.

For hvert av målestedene ble det målt i punkter like ved og i forskjellig avstand fra pelen. For de fleste peler ble rystelsene registrert for forskjellig ned-trengning av pelen. For betongpelene ble det også foretatt målinger under innmeisling i fjell.

#### 4.02.2 Resultater

Eksempler på registreringsopptak fra peleramming er vist i fig. 29. Slagtakten har vært noe forskjellig på de forskjellige steder (ca. 1 slag pr. sek. på Tokerud), men i begge tilfeller dempes svingningene til null for hvert slag. Det fremgår ellers at svingefrekvensen er forskjellig for de to opptak. Ved avlesning av kurvene er største utslag benyttet og resultatene fremgår av tabell 3.

Tilført rammeenergi varierte en del for de forskjellige målesteder. For å kunne sammenligne måleresultatene er disse derfor i fig. 30 fremstilt som forholdet mellom største svingningshastighet og tilført energi med varierende avstand fra pelen. Kurvene er fremstilt i halvlogaritimsk skala, og har en form som tilsvarende kurver for vegtrafikk og fall-lodd forsøkene.

Som ved de fleste pelearbeider med fall-lodd, var det imidlertid vanskelig å holde kontroll med eventuelle variasjoner i tilført energi (fallhøyde) under neddrivingen. Videre er rammeutstyrets effekt bestemt ved skjønn, og det er derfor naturlig å vente en del variasjoner i resultatene. Kurvene følger imidlertid hverandre forholdsvis jevnt.

Til sammenligning er det for vertikale svingninger plottet inn en del data for ramming av spunt fra tilgjengelig litteratur (31). Som en ser har disse kurvene også samme forløpstendens, men svingningshastighet pr. tilført energi er vesentlig mindre på tross av at ramme-motstanden synes å ha vært vesentlig større. Dette kan både skyldes at effekten av spuntprofiler er mindre enn for vanlige peler, og at målingene er utført inne i bygninger hvor endringer i rystelsene på grunn av overgang fra løsavleiringer til forskjellige bygningsdeler kan komme inn i bildet.

Figur 31 viser variasjoner i registrert svingningshastighet med nedrammet pelcelengde for to av målepunktene fra Tokerud, det ene nær pelen (målepunkt 2) og det andre (målepunkt 5) i 50 m avstand fra pelen. Tendensen for målepunkt 2 er at kurvene her når en maksimalverdi i det pelene er rammet ned ca. 4-5 m. Videre ned mot fjell avtar registrert svingningshastighet. Innmeisling av pelen i fjell gir ikke noen spesiell økning av målte verdier. En tilsvarende tendens kan leses ut av kurvene for målepunkt 5 og de øvrige målepunkter selv om enkelt lokale variasjoner forekommer her.

At målte utslag reduseres etter at pelen har kommet 4-5 m ned, kan forklares ved at tørrskorpelaget da er passert. Dette indikerer imidlertid at det er virkningen fra pelespissen som har størst betydning

for resulterende rystelser, i alle fall for sylindriske peler. At det ikke er noen spesiell økning i målte svingningshastigheten når pelen når fjell, bekrefeter videre at virkningen av faste lag eller fjell i relativ stor dybde under terreng, er beskjeden.

Grunnundersøkelsene for Gulsvik bru viser en jevn økning i sandmassenes lagringsfasthet med dybden. Kurver over variasjoner i målte svingningshastigheter med nedrammet pelelengde for dette sted, fig. 32, viser likevel en tilsvarende tendens som for Tokerud. For målepunkt 1 på Gulsvik er det vanskelig å ta ut noe maksimalpunkt, men tendensen er tydelig avtagende etter at  $2/3$  av pelen er rammet ned. For målepunkt 5 er det tatt hensyn til variasjoner i loddets fallhøyde ved å benytte forholdet mellom målt svingningshastighet og anvendt fallhøyde. Disse kurvene viser en jevn avtagende tendens med økende nedrammet pelelengde.

Registreringene fra Myreng gir ikke noe entydig bilde av variasjoner i svingningshastighet med nedrammet pelelengde, men indikasjonene fra Tokerud og Gulsvik synes å gå klart i retning av at det er den første del av rammingen som har størst betydning for resulterende rystelser på terreng.

For å sammenligne målte svingningshastigheter under de aktuelle rammeforhold med mulige maksimalverdier angitt av Wiss (39) for forskjellige grunnforhold, har en i fig. 28 plottet inn resultatene fra utførte forsøk. Som en ser ligger samtlige verdier under de angitte kurver. Enkelte av målingene fra Tokerud ligger imidlertid nær opp mot grensekurven for leire. Dette kan passe med at leirmassene her var relativt faste. De avmerkede punkter ligger ellers forholdsvis samlet, og dette stemmer godt overens med at rammemotstanden var forholdsvis lik på de tre stedene.

Forsøk på å ta hensyn til rammemotstanden vil av ovennevnte grunn gi relativt like kurver for de aktuelle forsøk. Forsøksserien er videre for liten til å forsøke å angi grensekurver for resulterende svingningshastigheter med varierende rammemotstand og avstand fra kilden, særlig fordi spesiell hard ramming ikke er inkludert i forsøkene. Ved innsamling av større datamengde tror en imidlertid at det skulle være mulig å komme frem til empiriske grensekurver av dette slag.

Hvis en ser på målte svingefrekvens for de tre målestedene, er det registrert forholdsvis store variasjoner. Mens svingefrekvensen for Myreng (siltig morene) stort sett varierer mellom 5-10 hz er variasjonsområdet for Gulsvik (sand) 10-20 hz og for Tokerud (leire) 20-50 hz. Dette indikerer, som for vegtrafikkmålingene og fall-lodd forsøkene, at frekvensen ikke bare er avhengig av jordart, men også av kilden.

## 5. SKADEKRITERIER

### 5.01 G e n e r e l t

Målet for de undersøkelser som har vært foretatt i den senere tid vedrørende vibrasjoner i hus, har vært å fastlegge mulige skadegrenser for konstruksjonsdeler og beboere. Siden ordet hus er et begrep som omfatter konstruksjoner av mange slag og med ulike konstruksjonsmaterialer og kvalitet, ligger det i sakens natur at det vil være vanskelig å komme frem til skadegrenser som har generell gyldighet. Når det gjelder vibrasjonens innvirkning på beboerne, kommer det forhold at det menneskelige legemet er meget følsomt overfor rystelser, inn i bildet. Interessen for å kartlegge denne følsomhet er også meget stor, ikke minst innen bilindustrien hvor målet er å komme frem til stadig mer behagelige kjøretøy.

### 5.02 M e n n e s k e l i g f ø l s o m h e t

De første dokumenterte forsøk på å kartlegge den menneskelige følsomhet overfor rystelser kan føres tilbake til århundreskiftet, men de første undersøkelser av betydning ble foretatt i 1931 av Reiher og Meister. Deres forsøk gikk ut på å utsette en gruppe mennesker for harmoniske svingninger ved etter tur å plassere de enkelte personer på et svingebord. Det ubehag forsøkspersonene følte ved denne behandling avhengig av svingeamplitydenes størrelse og svingefrekvens ble delt inn i følgende grupper: Ikke følbart, såvidt følbart, klart følbart, irriterende, ubehagelig, smertefullt.

Hvis en betrakter det menneskelige legeme som bygd opp av en serie masseenheter forbundet med fjær- og dempe-komponenter, er det klart at rystelsenes innvirkning på kroppen er avhengig av svingeretning og hvilken stilling vedkommende person inntar (stående,

sittende, liggende). Reiher og Meister undersøkte også disse forhold og fant at forsøkspersonene var mest følsomme overfor vertikale svingninger i stående stilling, mens horisontale svingninger var mest følbare i liggende stilling.

Senere er det blitt utført en rekke tilsvarende forsøk av forskjellige forskere. Forsøksbetingelsene har imidlertid vært noe forskjellig og resultatene har også variert. I 1948 foretok Goldman en statistisk sammenligning av tilgjengelige data fra slike undersøkelser. På dette grunnlag kom han frem til gjennomsnittlige grensekurver for følbart, ubehagelig og utholdelig nivå. Fig. 33 viser resultatet av Reiher og Meisters undersøkelser for vertikale svingninger sammen med Goldmans gjennomsnittskurver. Det bør i denne sammenheng understrekes at Goldmans data er hentet fra undersøkelser med forsøkspersonene i både stående, sittende og liggende stilling.

En må ellers være oppmerksom på at et menneskes oppfattelse av rystelsesnivå ikke er konstant, men varierer med miljø og sinnstemning. Hvorvidt andre fenomen knyttet til rystelsene kan sees eller høres, og eventuelt det forhold at rystelse er ventet, kan således ofte totalt forandre den enkelte persons reaksjon. Likeledes vil den interesse den enkelte har av rystelsene ubevisst kunne spille inn.

### 5.03 S k a d e p å h u s

Det kan her skilles mellom to typer skade; skade på bygningskonstruksjonen og arkitektoniske skader (skade på puss og kledning etc.). Det er de arkitektoniske skader som dominerer, mens direkte konstruksjons-skader er mer sjeldne.

Ved en teoretisk vurdering av mulige skadegrenser vil flere faktorer komme inn i bildet, først og fremst de tilleggsspenninger som rystelsene forårsaker, men også utmattingsfenomen. Det siste er avhengig av de byggematerialer som anvendes mens det første har sammenheng med bygningens form, størrelse og stivhet. Selv om det for et relativt enkelt hus er mulig å foreta en statisk spenningsanalyse for forskjellige lastkombinasjoner, vil det imidlertid være en nesten umulig oppgave å foreta en tilsvarende analyse av dynamiske påkjenninger i de enkelte konstruksjonsdeler. Ved forenklete regnemodeller skulle det imidlertid være mulig tilnærmet å vurdere den dynamiske spenningsfordeling, fortrinnsvis med støtte i paralelle målinger av spenning og rystelser i forskjellige bygningskonstruksjoner. Det siste har bare vært utført i et fåtall til-

feller, men indirekte er det mulig å få tilsvarende informasjon fra hus hvor det er målt rystelser og hvor skade har oppstått. Tilfeller hvor skade har oppstått, kan også bidra til å belyse forholdene. Av undersøkelser en kjenner fra litteraturen, er de fleste knyttet til sprengningsarbeider, men en del målinger i forbindelse med jordskjelv, tunge anleggsmaskiner, vegtrafikk og industriell installasjon er også foretatt.

For å kunne angi styrkegraden av målte rystelser har det av forskjellige forskere utenom størrelsene deformasjon (A), hastighet (v), akselerasjon (a) og frekvens (f) vært foreslått en rekke forskjellige måleenheter. Av disse kan nevnes

Zellers tall

$$Z = 16 \pi^4 A^2 f^3 \text{ cm}^2/\text{sek}^3$$

Zellers tall kan også uttrykkes i vibrarenheter

$$1 \text{ vibrar} = 10 \log_{10} Z/Z_0$$

hvor  $Z_0 = 0,1 \text{ cm}^2/\text{sek}^3$

Av andre enheter kan nevnes Crandells energiforhold definert ved

$$E_r = 16 \pi^4 A^2 f^2 \text{ cm}^2/\text{sek}^2$$

Denne serie med referanseenheter har gitt opphavet til en rekke skadekriterier definert og presentert på forskjellig måte. Sior (32) foretok i 1961 en sammenligning av forskjellige kriterier. På dette grunnlag kom han frem til fire vibrasjonsklasser med avgrensninger som vist på fig. 34. Faren for skade innen de enkelte klasser er definert på følgende måte.

klasse I : Ingen registrerte skader

klasse II : Mindre skader, så som riss i puss. Riss i bærende konstruksjonsdeler også mulig.

klasse III: Skade på bærende konstruksjonsdeler sannsynlig.

klasse IV : Skade på bærende konstruksjonsdeler, total ødeleggelse av bygget.

For klasse II er det imidlertid tatt det forbehold at skade vanligvis ikke oppstår uten at konstruksjonsdelen på forhånd er utsatt for spenningskonsentrasjoner nær opp til materialets bruddspenning.

Tendensen fra senere undersøkelser er at registrerte svingningshastigheter alene legges til grunn for vurdering av mulige skader. Fra forsøk i USA, Sverige og Canada (14, 21 og 27) i forbindelse med sprengningsarbeider er det således foreslått en nedre sikker grense på  $v = 50$  mm/sek under hvilken det ikke skulle være fare for skade. Undersøkelsene fra USA og Canada omfatter to- og tre etasjes hus både i mur og reisverk fundamentert på løsavleiringer, mens undersøkelsen fra Sverige i alt vesentlig gjelder bygninger fundamentert på fjell (sikker grense  $v = 70$  mm/sek). Russiske kilder (24) gir omtrent tilsvarende verdier basert på observasjoner fra jordskjelv og sprengningsarbeider. Grensen for eldre bygninger i dårlig stand er imidlertid satt til  $v = 25-50$  mm/sek målt på husets konstruksjonsdeler.

Som Siors og de russiske kriterier antyder, er det ellers klart at en vurdering av mulige skader på grunn av rystelser i et hus, også må omfatte en vurdering av husets bygningsmessige tilstand. Hvis de enkelte konstruksjonsdeler på grunn av feildimensjonering, forvitring og annen forringelse av byggematerialene, eller på grunn av setninger, utsettes for spenninger nær opp mot materialets bruddgrense, er det klart at selv små tilleggsstresser kan utløse brudd.

Når det gjelder tretthetsbrudd på grunn av gjentatte rystelser, må dette også sees i sammenheng med konstruksjonsdelens normale arbeidsspenning. Hvis denne er stor i forhold til bruddgrensen vil tretthetsbrudd lettere oppstå enn om materialet har liten normalbelastning. Generelt sett vil en tro at tretthetsbrudd vanligvis ikke vil oppstå i bygningskonstruksjoner av stål, armert og forspent betong og tre. I uarmert betong og i teglkonstruksjoner er det en viss mulighet for at strekkspenninger forårsaket av rystelser kan gi tretthetsbrudd avhengig av konstruksjonens påkjenning forøvrig.

Faren for skade i forbindelse med rystelser fra en tilfeldig kilde må ellers sees i sammenheng med de rystelser huset eller konstruksjonsdelen utsettes for



ved normal bruk. Det tenkes her blant annet på rystelser i gulv. Tregulv i normale bolighus vil f. eks. utsettes for til dels store svingninger ved vanlig gang på gulvet.

I tyske normer for rystelser i hus synes det å være lagt noe større vekt på virkningen av de ovennevnte forhold. I forslag til nye DIN normaler (sept. 1969) er det således foreslått følgende grenseverdier for transiente rystelser i frekvensområdet 1-100 hz målt på husets fundamenter under terrengnivå.

	Tillatt svingningshast $V_{r_{maks}}$ mm/sek
I Ruiner, og skadede bygninger av stor antikvarisk verdi.	2
II Bygninger med synlige skader, riss i mur.	5
III Bygninger uten skade i bygningsmessig god stand (også med riss i puss).	10
IV Godt avstivede bygninger (f.eks. industribygg i stål og betong)	10 - 40

Verdiene angir største vektorsum av målte svingningshastigheter i vertikal, lateral og transversal retning  $V_r = \sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t) + V_z^2(t)}$ . Ved stadige rystelser foreslås de angitte verdier redusert med 2/3. For gulv inne i bygninger er det videre foreslått en maksimal svingningshastighet i vertikal retning på  $v \leq 20$  mm/sek.

Det synes vanskelig å foreta en avveining mellom de ovennevnte kriterier. For samtlige kriterier er det imidlertid klart at en overskridelse av de angitte grenser ikke nødvendigvis vil forårsake skader. Det tyske forslag er ellers mer detaljert i beskrivelsen av hvor og hvorledes svingningshastigheten skal måles, og det skilles både mellom forskjellige bygningsdeler og bygningsmessig tilstand.

## 6. KONKLUSJON

Det er i det ovenstående gitt en beskrivelse av de bølgeformer som en kan vente vil opptre ved vibrasjon i løsavleiringer. Av størst betydning for resulterende bevegelser nær terrengoverflaten er de såkalte overflate- eller Rayleigh-bølger. Variasjoner i R-bølgens amplitude med økende avstand fra kilden er beskrevet ved ligning (71).

Forsøkene med fall-lodd viser at transiente svingninger fra slag eller støt mot terreng tilnærmet har et teoretisk forløp. Observert dempning synes imidlertid å være noe større nær kilden under de gitte forsøksbetingelser. Fall-lodd forsøkene viser ellers at de resulterende bølgebevegelser i løsavleiringer er meget nær identiske for like forsøksbetingelser.

Ut fra dette tyder resultatene fra vegtrafikkmålingene på at forsøksbetingelsene ikke har vært helt like under forutsatt like forhold. Dette gir seg utslag i en del innbyrdes variasjoner i resultatene for forskjellig kjørehastighet og forskjellige ujevnheter i vegbanen. Kurvene over varierende amplitude med varierende avstand fra vegen er også noe mer uregelmessige enn det forsøkene med fall-lodd gir grunn til å vente.

Tendensen fra vegtrafikkmålingene er imidlertid klar. Resulterende svingningsamplituder avtar raskt med økende avstand fra vegen, og kurvenes forløp kan tilnærmet passe med teoretisk dempning nær vegen. Dempningen synes imidlertid å avta noe for små amplituder i stor avstand fra vegen. For veger med relativt lik overbygning er de største rystelser registrert der vegen ligger på bløte leirmasser. Måling på veg over grusmasser ga de minste verdier. Som en kunne vente viser også målingene at ujevn veg gir større rystelser enn en veg med jevn kjørebane. Økningen i registrerte rystelser synes imidlertid å avta med økende høyde av ujevnheter. Ellers gir største kjørehastighet de største rystelser men virkningen av økt kjørehastighet er relativt beskjedent med de kjørehastigheter som ble benyttet.

Målingene som er utført på veg med tele, gir mindre rystelser enn målinger på telefri veg. Forskjellen er spesielt markant for svingninger i transversal og lateral retning. Dempningen synes imidlertid å være noe mindre med tele enn uten tele, men denne tendens er ikke like klar på alle målesteder.

Variasjonsområdet for registrerte svingingshastigheter med største kjørehastighet under forskjellige grunnforhold er vist i form av omhyldningskurver på fig. 24. Utførte målinger er for få til at kurvene kan antyde absolutte grenseverdier for mulige rystelser fra vegtrafikk. Det kan likevel være interessant å sammenligne kurvene med nivået for generende og skadelige rystelser i forskjellig avstand fra vegen.

Ut fra kurvene i fig. 24 synes det således lite sannsynlig at det ved normal overbygningstykkelse og jevn vegbane vil kunne oppstå skade på hus i over 5 m avstand fra vegkant. Selv hus som står enda nærmere vil ikke være særlig utsatt. For sterkt ujevn og hullet veg og bløte masser i undergrunnen synes det å være en viss mulighet for at skade kan oppstå på hus nær vegen hvis en legger forslaget til tyske normer til grunn for vurderingen. En må imidlertid da regne med en viss demping i overføringen av rystelsene fra løsavleiringene til husets fundamenter, og videre at maksimale svingningshastigheter ikke vil opptre samtidig i alle tre svingeplan. Det er da rimelig å sammenligne de angitte kriterier med største registrerte svingningshastighet i en svingeretning. Under denne forutsetning synes i ugunstigste fall en avstand på inntil 10 m fra vegkant å representere en mulig faresone for vanlige hus i god stand. Den tilsvarende grense for hus i dårlig forfatning går opp mot 15 m ved stadige rystelser.

Det er ellers klart at beboere i hus nær veg vil kunne føle rystelser i huset selv om rystelsene ligger langt under det skadelige nivå. Dette skyldes både at det menneskelige legemet er meget følsomt overfor rystelser, og at rystelser i husets fundamenter vil kunne forsterkes ved overføring til gulvkonstruksjonene. Denne konstruksjonsdel er imidlertid mindre utsatt for skade.

Det skulle ellers ikke være noen fare for at rystelser fra vegtrafikk kan forårsake resonansfenomen i nærliggende bygningskonstruksjoner. For rystelser fra peleramming er dette mulig hvis slagtakten er høy. Ved bruk av fall-lodd vil imidlertid normal slagtakt ikke være større enn at bølgetogene dør ut mellom hvert slag.

Forsøksresultatene fra peleramming synes forøvrig å indikere at de største rystelsene på terreng oppstår under den første del av rammingen, og at en har de ugunstigste rammeforhold der pelen må rammes gjennom et fast topplag over bløte masser. I slike tilfeller hender det at forboring foretas for ikke å skade pelen. Der det er fare for at skadelige rystelser kan oppstå, vil det også kunne være aktuelt å foreta forboring for å redusere rystelsene. Virkningen fra pelespiss synes ellers ikke å representere noen fare for større rystelser nær terreng ved meisling av fjellfeste.

Når det gjelder rystelsenes størrelse ved peleramming vil disse være avhengig av tilført energi, rammemotstand og løsavleiringenes elastiske egenskaper. Så vidt en vet foreligger det ikke noe teoretisk behandling av relasjonen mellom de ovennevnte faktorer. Ut fra observasjonsdata er det imidlertid utarbeidet kurver (fig. 28) som angir mulige maksimalverdier for resulterende svingningshastighet i forskjellig avstand fra pelen med varierende rammeenergi. I et gitt tilfelle kan en således ut fra kurvene vurdere mulig maksimal rammeenergi i forhold til grenser for skadelige rystelser i en gitt avstand fra pelen. Verdien av slike empiriske diagrammer ville imidlertid øke hvis også variasjoner i rammemotstanden kom til uttrykk i kurvene.

LITTERATURLISTE

- 1) Alpan, I & Meidav, T. (1963): "The effect of pile driving on adjacent buildings, a case history". RILEM symposium on "Measurement of dynamic effects and vibrations of constructions", Budapest.
- 2) Andersson, R., Rasmusson, J. & Svensson, I. (1964): "Mätningar av skakningar, hörhörande från tung lastbilstrafik på motorvägen Göteborg - Kungälv vid Bäckeboismotet samt vissa jämförande mätningar" Eks. arb. CTH, Göteborg.
- 3) Barkan, D.D. (1962): "Dynamics of bases and foundations" M<sup>c</sup> Graw Hill Book Co, N.Y. 434 s.
- 4) Barkan, D.D. (1967): "Trends in the development of Soil Dynamics". Soil Mech. and Found.Eng. No. 5, side 310-318.
- 5) Bendel, H. (1968): "Sprengershütterungen". Strasse u. Verkehr. Nr. 12, s. 621-5.
- 6) Bendel, L & Zadorlaky-Stettner, N. von (1964): "Erschütterungsmessungen bei einer Baugrubensprengung". Der Bauingenieur 39, heft 10, s. 414-6.
- 7) Bergfelt, A. & Høvik J. (1967): "Skakningars inverkan på bygnadsverk" Väg- och Vattenbyggaren Nr. 10, s. 415-22.
- 8) Crandell, F.J. (1949): "Ground vibrations due to blasting and its effect upon structures" Jour. Boston Soc. Civ.Eng. Vol 36, s. 206-229.
- 9) Crockett, J.H.A. (1965): "Some practical aspects of vibration in Civil Engineering". Symposium on Vibration in Civil Engineering, Imperial College, s. 253-71.
- 10) Crockett, J.H.A. (1959): "Vibration control in piling and blasting" Reinforced Concrete Review. Vol V, No 2, s. 99 - 137.

- 11) Dalmatov, B.I., Ershov, K.A. & Kovalevsky, E.D. (1967): "Some cases of foundation settlement in driving sheeting and piles" International symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials, Albuquerque, New Mexico, s. 607-13.
- 12) Dawance, G. & Seguin, M. (1965): "Effects of vibration on buildings" Symposium on vibration in Civil Engineering, Imperial College, s. 31-34.
- 13) Deusen, B.D. von (1968): "Human response to vehicle vibration" SAE, New York, No 680090, s. 1-17.
- 14) Duvall, W.I. & Fogelson, D.E. (1962): "Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations" U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines. Rept. of Inv. 5968, 19 s.
- 15) Hall, J.R. & Richart, F.E. jr. (1963) "Dissipation of elastic wave energy in granular soils" ASCE, SM 6, pap. no. 3698, s. 27-57.
- 16) Heukelom, W (1961): "Analysis of dynamic deflections in soils and pavements" Geotechnique II, side 224-43.
- 17) Hopkins, H.G. (1965): "Propagation of non-elastic stress waves in soils". Symposium on vibration in Civil Engineering, Imperial College, s. 141-148.
- 18) Horn, A. (1968): "Gebäudeschäden durch Rammerschütterungen" Baumasch, u. Bautechn. 15, heft 2, s. 55-6.
- 19) Jackson, M.W. (1967): "Thresholds of damage due to ground motion" International symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials Albuquerque, New Mexico, s. 961-9.
- 20) Krizek, R.J. & Franklin, A.G. (1967) "Energy dissipation in soft clay" International symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials, Albuquerque, New Mexico, s. 797-807.

- 21) Langefors, U & Khilström, B. (1963): "The modern technique of rock blasting" Almqvist & Wiksell, Stockholm, Göteborg, Uppsala. John Wiley & Sons Inc, New York, London, Sidney.
- 22) Larsson, G & Svenningsson, G. (1963): "En utredning angående markvibrationers skadeverkningar, utförd i form av intervjuundersökningar och litteraturstudier" Eks.arb. CTH Göteborg.
- 23) Leonard, D.R. (1966): "Human tolerance levels for bridge vibrations" Road Research Laboratory, Harmondsworth, Report No 34, 28 s.
- 24) Medvedev, S.V. (1967): "Assessing seismic hazard during blasting". Soil Mech. and Found. Eng. No 5, side 343-347.
- 25) Mittelmann, G. (1962): "Gebäudeerschütterungen in der Nähe von Bauarbeiten". Der Bauingenieur 37, heft 6, s. 217-20.
- 26) Morris, S.A.H. & Galloway, J.W. (1968): "Effect of road surface irregularities and structural variability on dynamic pressures under flexible roads" Road Research Laboratory, Crowthorne, Report LR 215, 31 s.
- 27) Northwood, T.D., Crawford, R. & Edwards A.T. (1963): "Further studies of blasting near buildings". Ontario Hydro Research Quarterly, s. 1 - 10.
- 28) Potter, J.F.(1968): "Dynamic impact pressures generated under roads by sprung and unsprung vehicles". Road Research Laboratory, Crowthorne, Report LR 137, 13 s.
- 29) Richart, F.E. jr., Hall, J.R. jr. & Woods, R.D. (1968): "Vibrations of soils and foundations" Engineering summer conference at the University of Michigan.
- 30) Scheelhaase, K. (1962): "Ergebnisse von Probenrammungen unter Verwendung eines Vibrationsbären und eines Freifallbären". Baumasch u. Bautechn. 9, heft 11, s. 453-8.

- 31) Schenk, W & Fink, E (1958): "Beobachtung von Rammerschütterungen unter besonderer Berücksichtigung des U-Bahnbaues in der Innenstadt von Hamburg". Baumasch. u Bautechn. H 6-8, s. 177-183 og 273-279.
- 32) Sior, G. (1961): "Die Schadenswirkungen von Rammerschütterungen". Bautechnik 38, heft 6, s. 181-5.
- 33) Steffens, R.J. (1965): "Some aspects of structural vibration" Symposium on vibration in Civil Engineering, Imperial College, s. 1-30.
- 34) Sutherland, H.B. (1950): "A study of the vibrations produced in structures by heavy vehicles". Highway Research Board, Proceedings 30th annual meeting, s. 406-19.
- 35) Süsstrunk, A.E. von (1959): "Schwingungsmessungen, Untersuchungen über das dynamische Verhalten des strassendamms bei ungünstigen Baugrundverhältnissen" Strasse u. Verkehr., No 4, s. 150-153.
- 36) Thompson, W.E. (1963): "Analysis of dynamic behaviour of roads subject to longitudinally moving Loads". Highway Research Record No 39, s. 1-24.
- 37) Whiffin, A.C., Morris, S.A.H. & Galloway, J.W. (1957): "Second interim report on the measurement of dynamic stresses in flexible roads". Road Research Laboratory, Research Note No RN/3104, Harmondsworth.
- 38) Whitman, R.V. (1969): "The Current status of Soil Dynamics" Applied Mechanics Review, Vol 22, No 1, side 1-8.
- 39) Wiss, J.F. (1967): "Damage effects of pile driving vibration" Highway Research Record, No 155, s. 14-20.
- 40) Wiss, J.F. (1968): "Effects of blasting vibrations on buildings and people". Civil Engineering. ASCE, Vol. 38, No 7, s. 46-8.



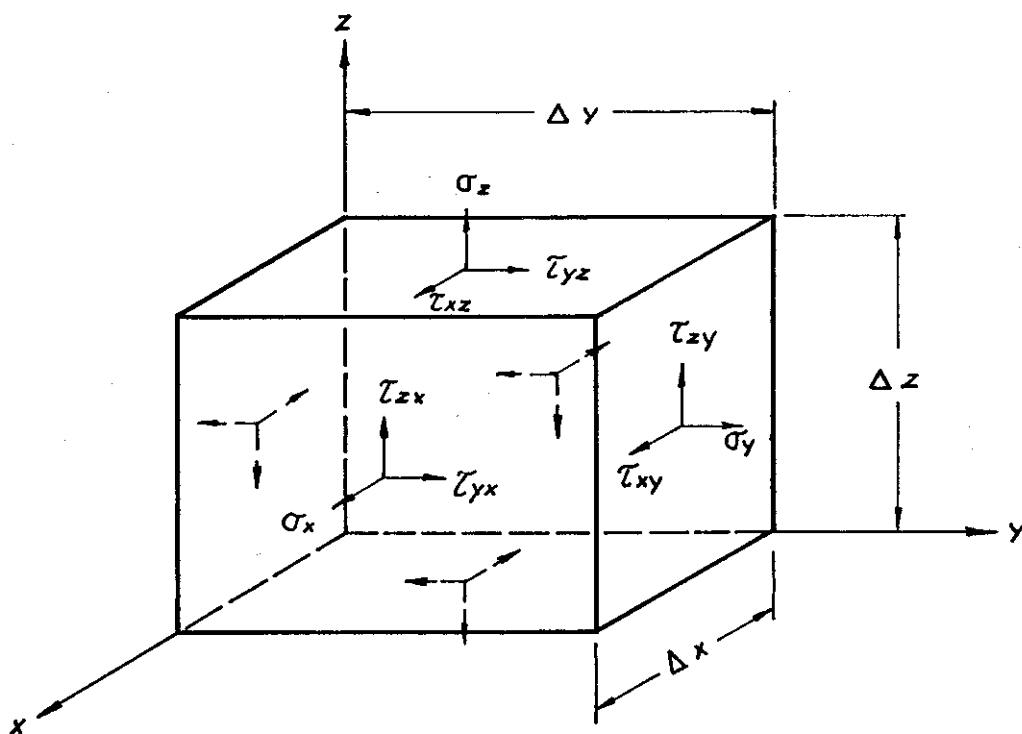


FIG. 1  
 SPENNINGSPÅKJENNINGER PÅ ET LITE ELEMENT I ET UENDELIG STORT ELASTISK LEGEME.

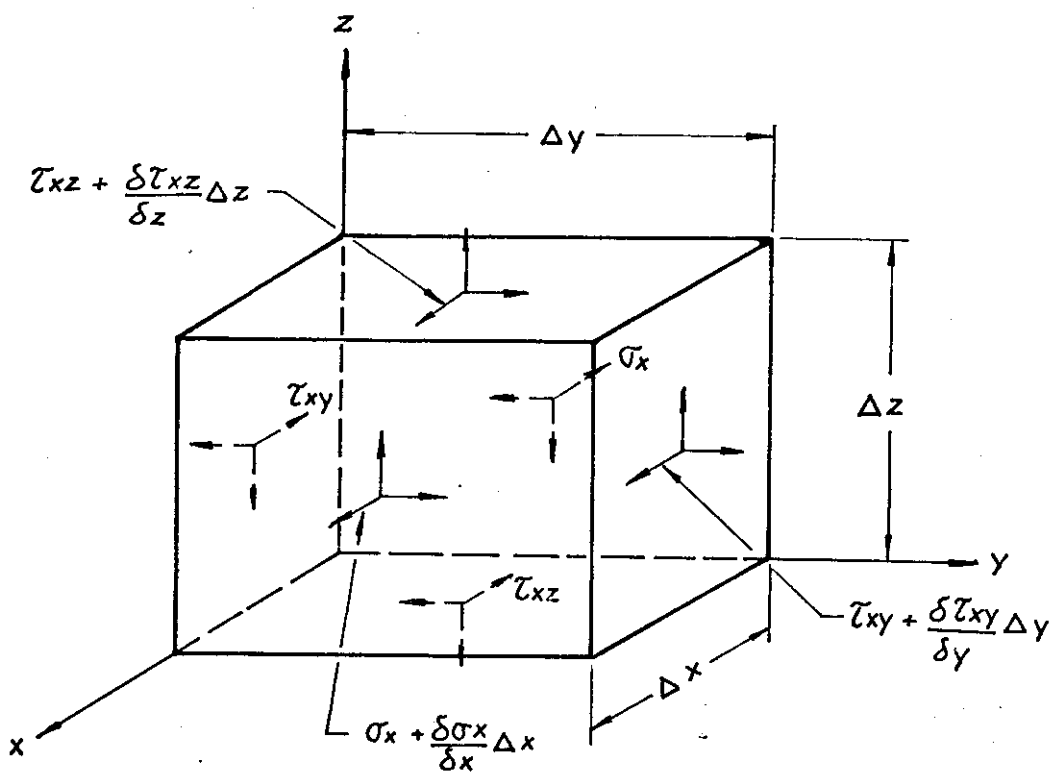


FIG. 2  
 SPENNINGSPÅKJENNINGER PÅ ET LITE ELEMENT I ET SVINGENDE ELASTISK LEGEME.

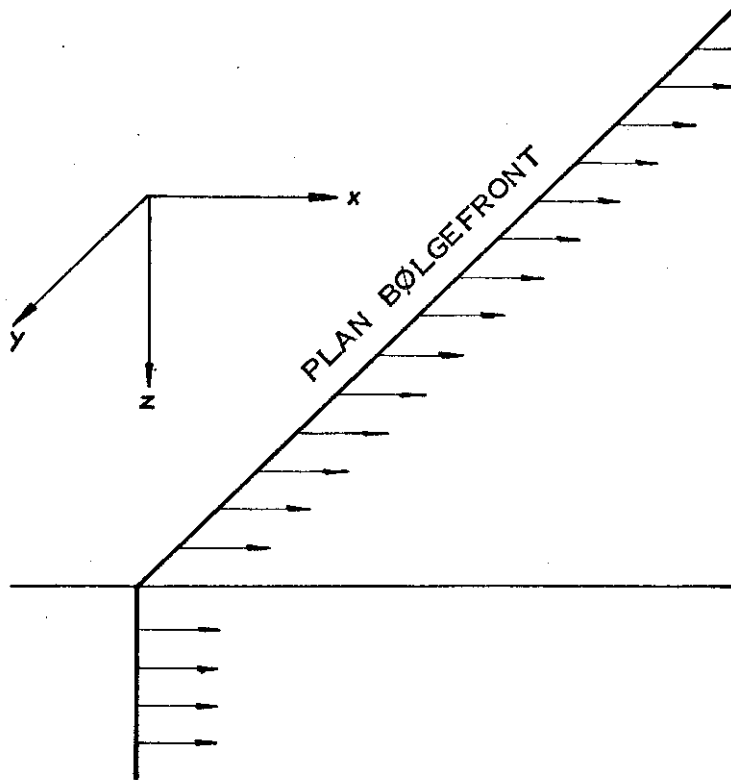


FIG. 3

PLAN BØLGEFRONT I ET ELASTISK HALVRUM

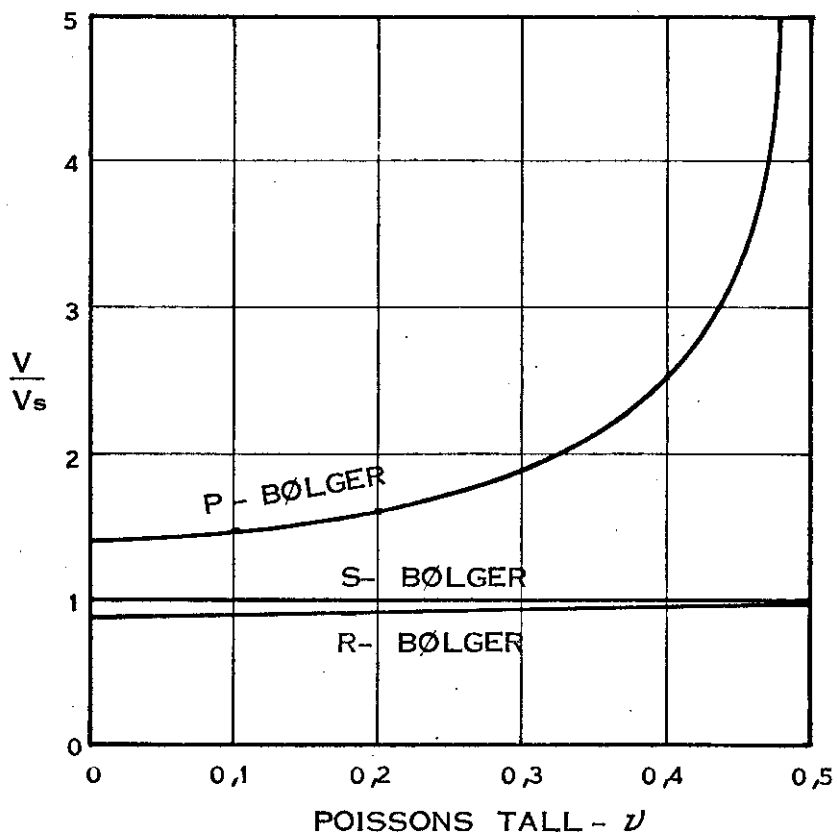


FIG. 4

FORHOLDET MELLOM P, S OG R - BØLGERS  
FORPLANTNINGSHASTIGHET I ET ELASTISK HALVRUM  
FOR VARIERENDE VERDIER AV POISSONS TALL ( ETTER WOODS

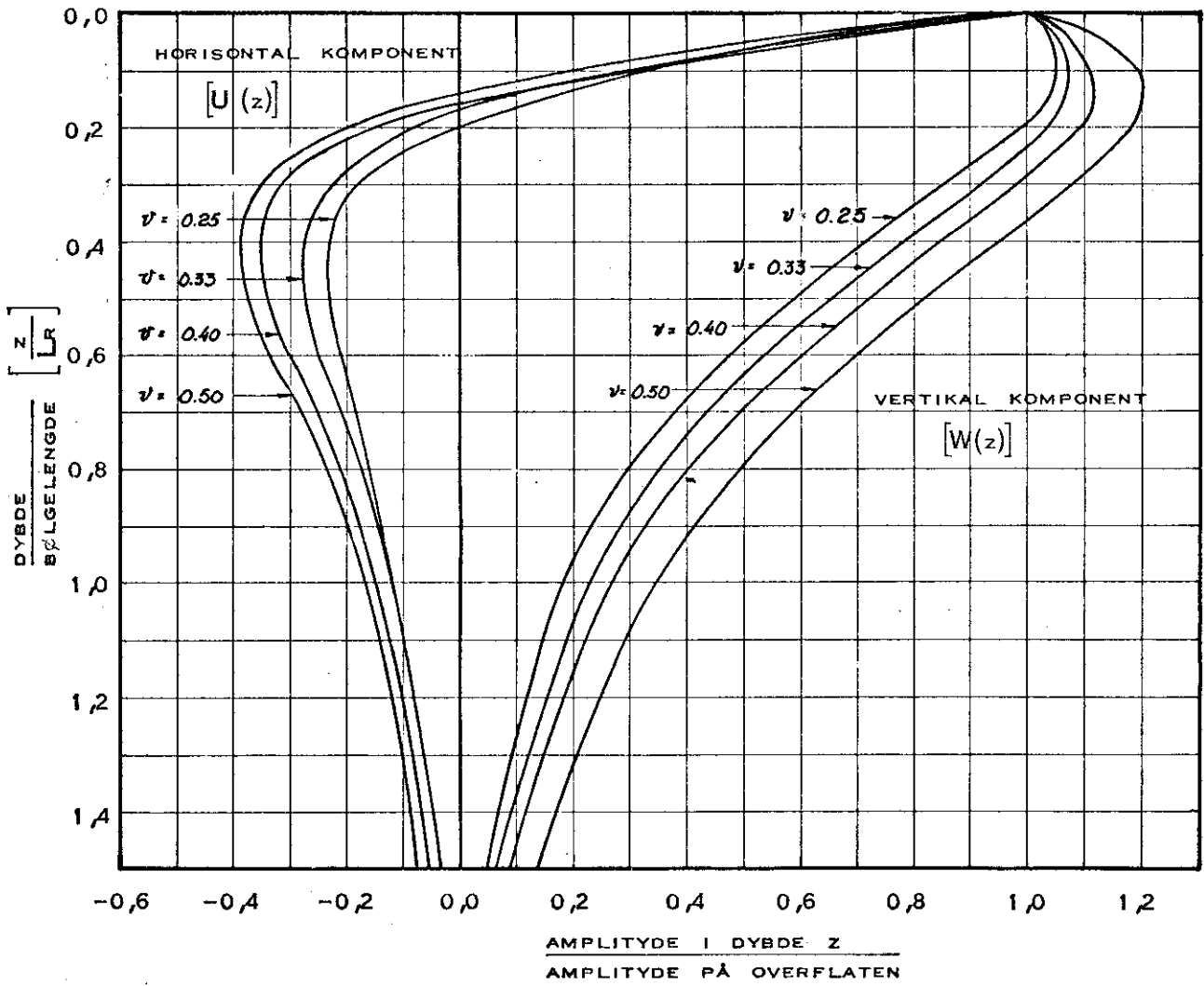


FIG. 5

VARIASJONER I RAYLEIGH BØLGENES AMPLITYDE MED DYBDEN  
(ETTER WOODS, 29)

FIG. 6

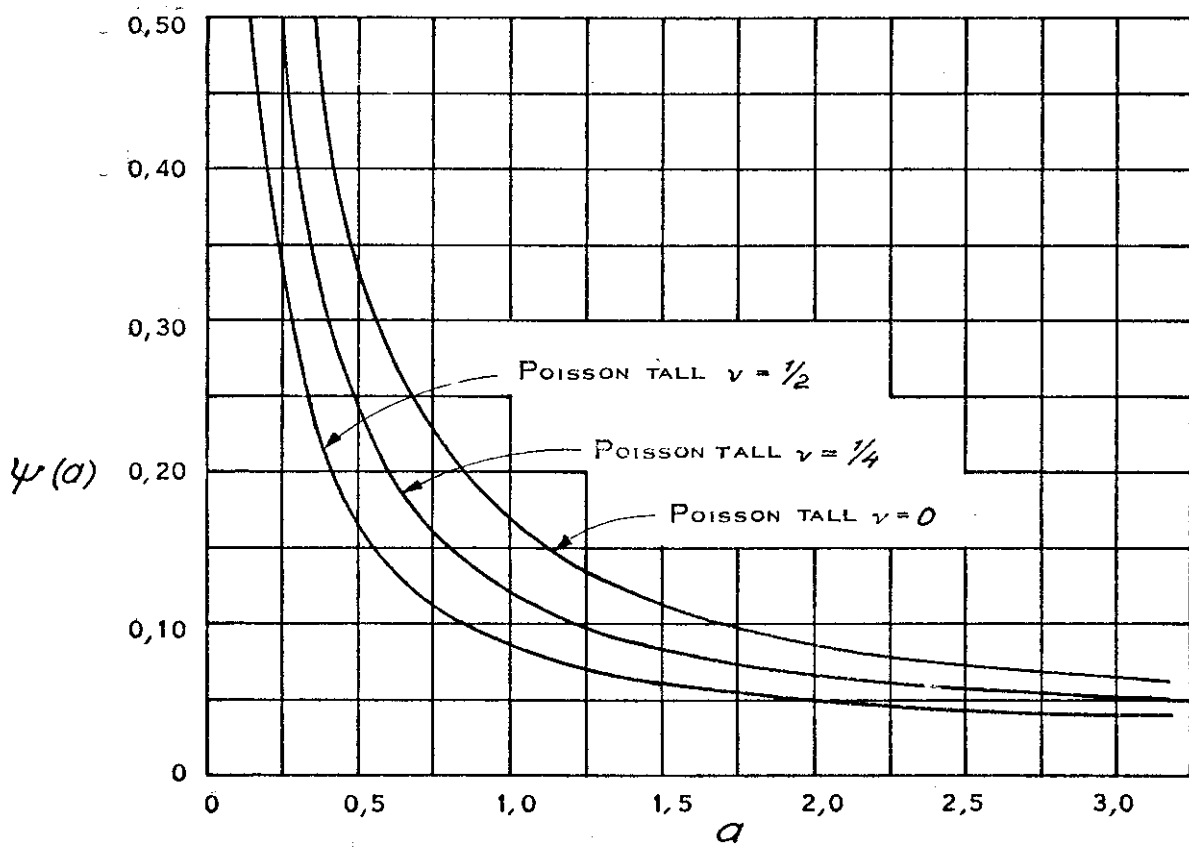
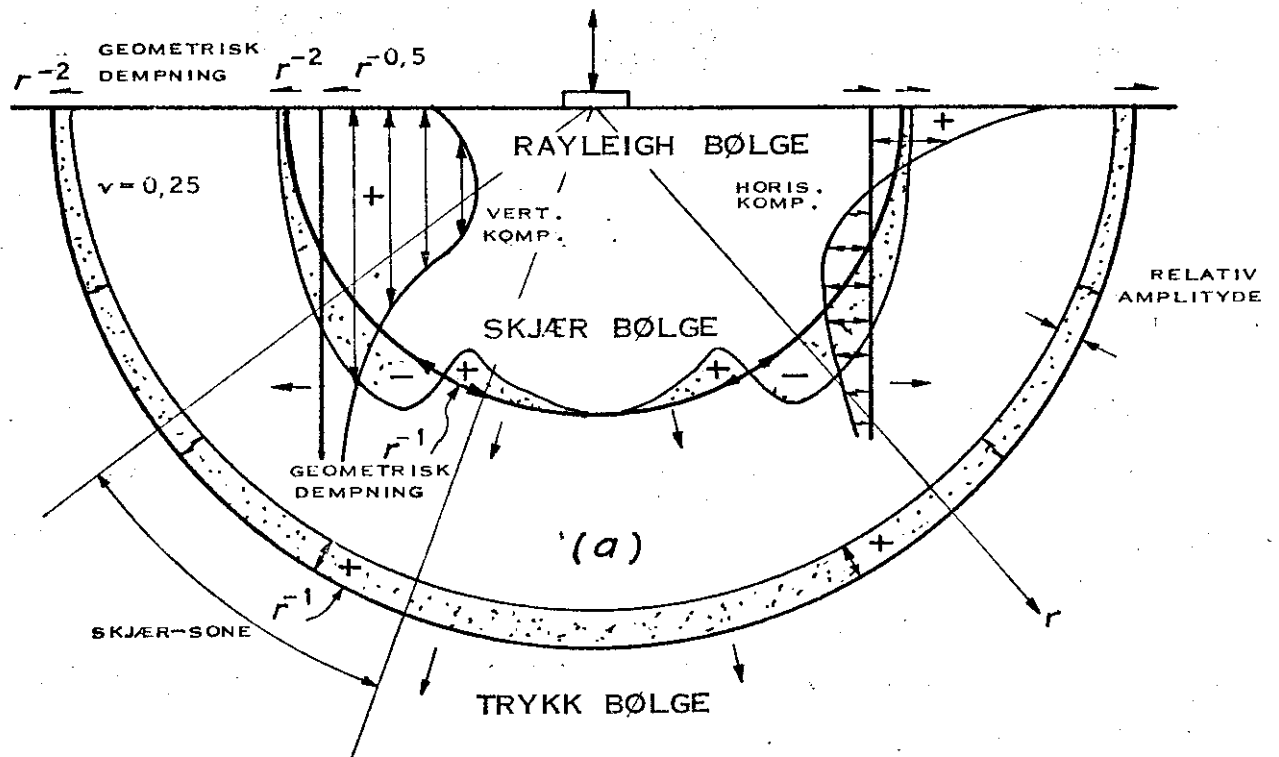


FIG. 6

KURVESETT FOR FORENKLET BRUK AV LIGNING (55)

(EFTER BARKAN, 3)

FUNDAMENT AV SIRKULÆR FORM



(a)

(b)

BØLGE TYPE	PROSENT AV TOTAL ENERGI
RAYLEIGH	67
SKJÆR	26
TRYKK	7

FIG. 7

RESULTERENDE BØLGEFORPLANTNING FRA ET SIRKULÆRT FUNDAMENT UTSATT FOR PULSERENDE BELASTNING I ET HOMOGENT ISOTROPT ELASTISK HALVROM

(ETTER WOODS 29)

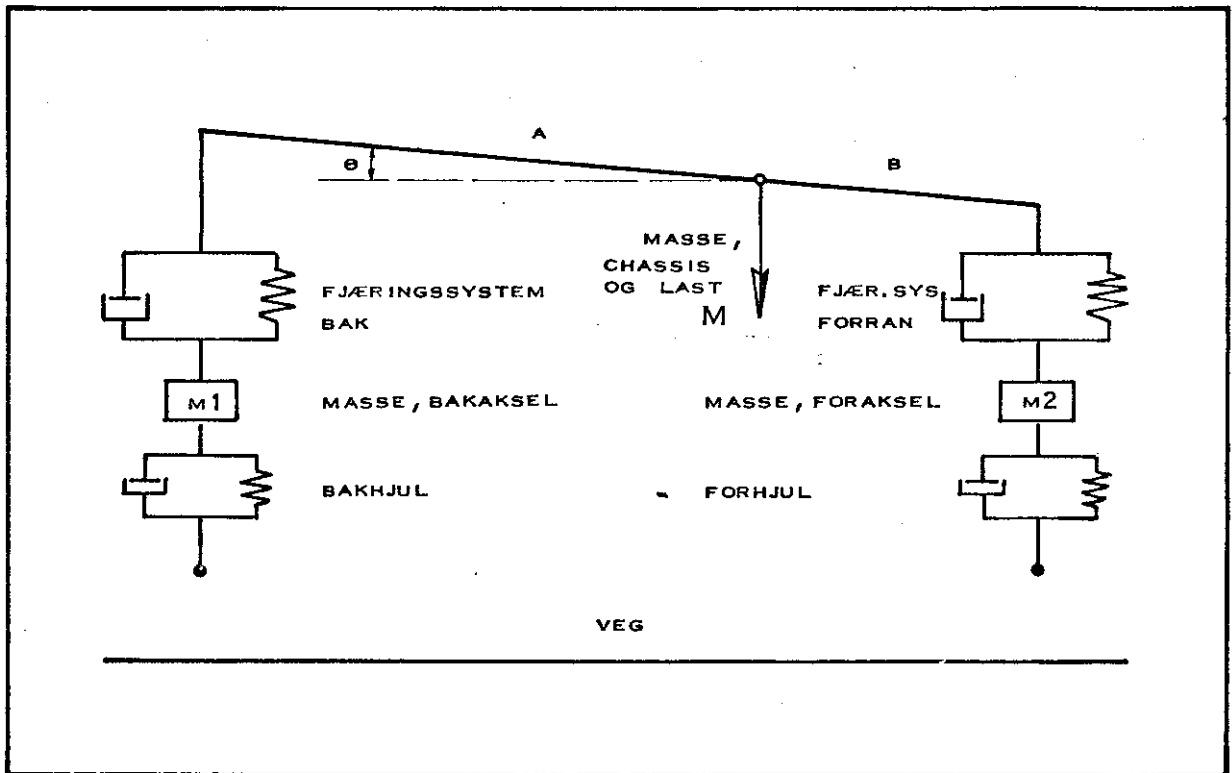
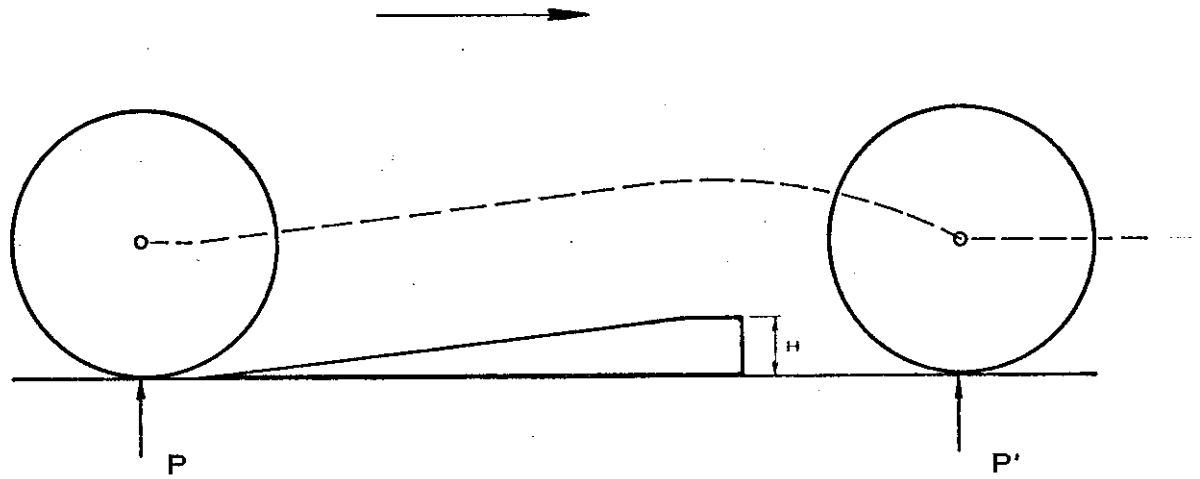
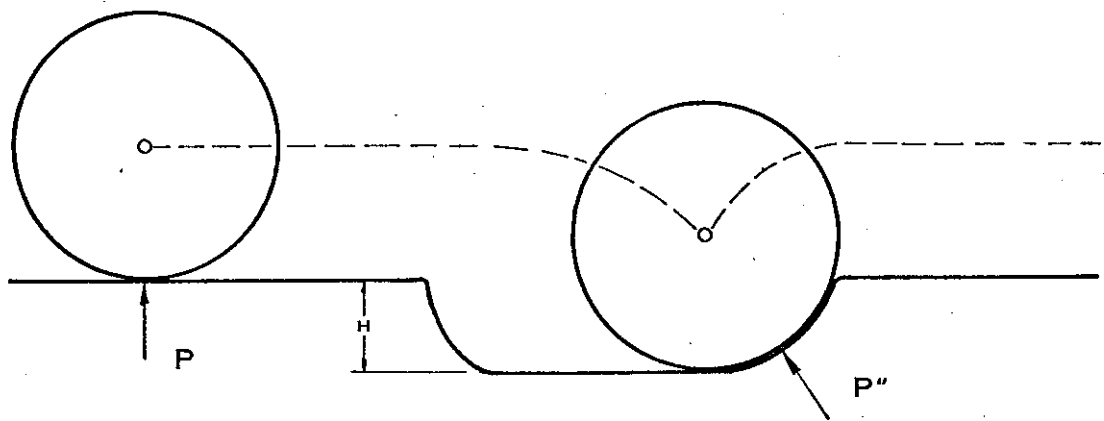


FIG. 8

SKJEMATISK BILDE AV FJÆRINGSSYSTEMET I ET KJØRETØY



A)



B)

FIG. 9

VIRKNING AV FORSKJELLIGE UJAMNHETER I VEGBANEN

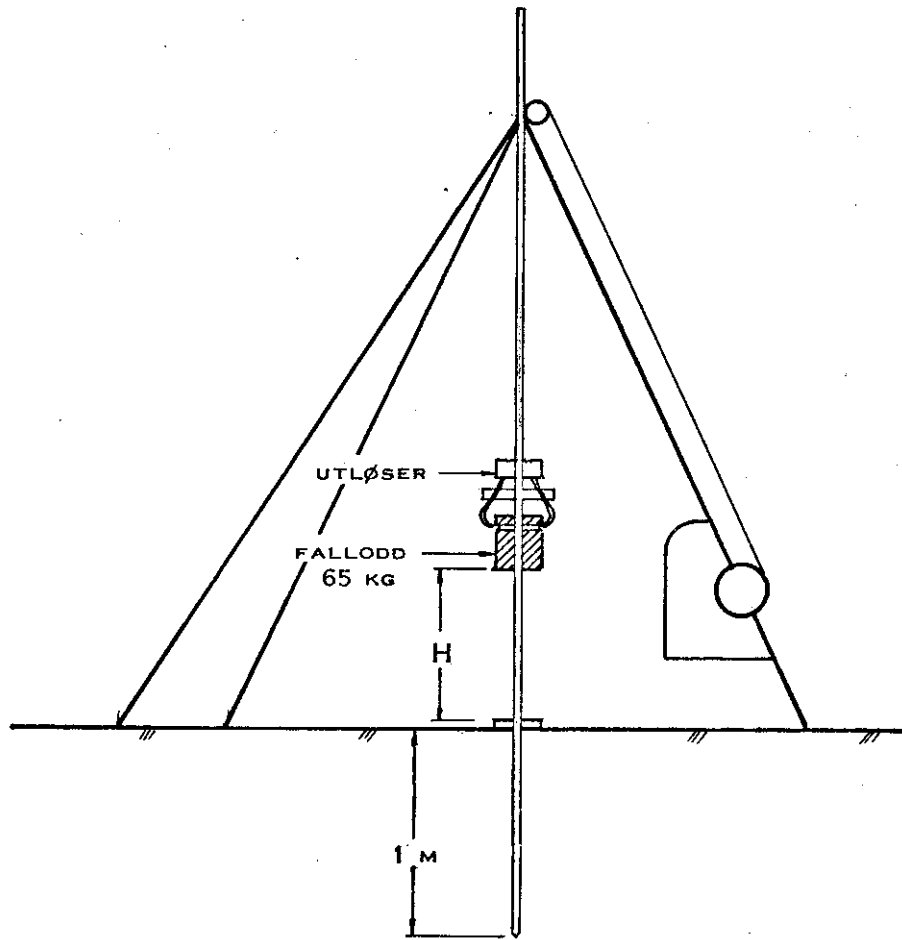
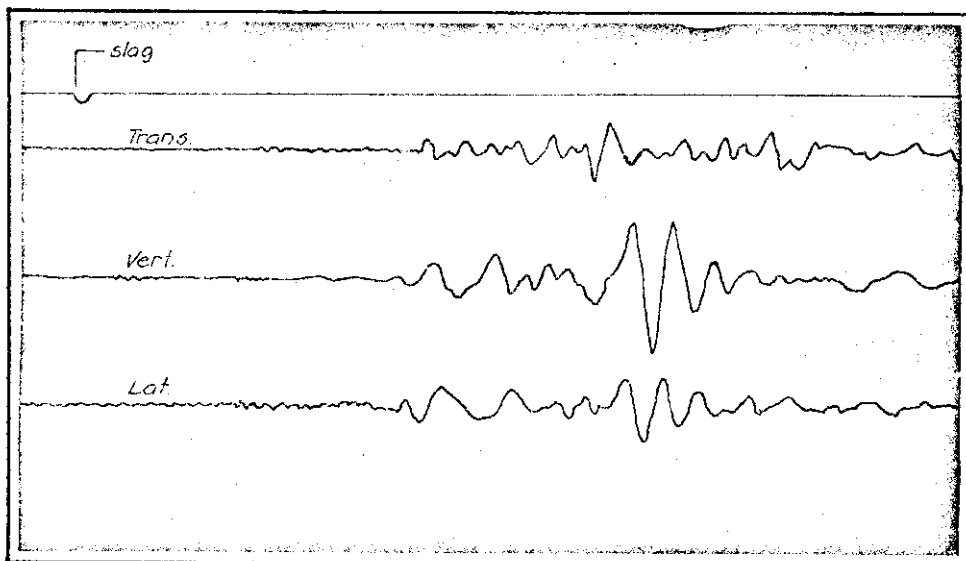


FIG. 10

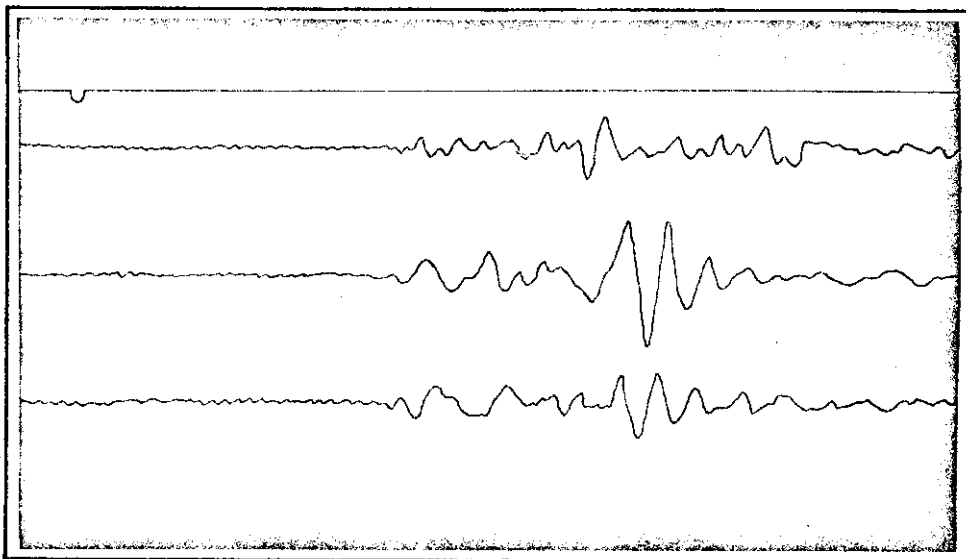
FORSØK MED FALLODD



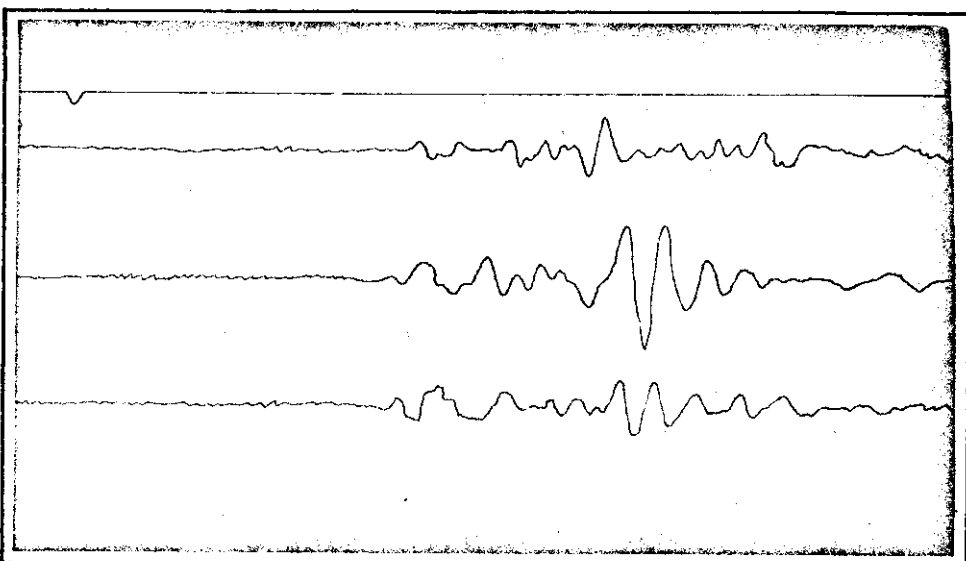
STED : SLEPENDEN  
 KILDE : FALLODD ( 65 KG )  
 FALLHØYDE : 75 CM  
 MÅLEPUNKT : 6 AVSTAND FRA KILDE 50 M



1. GANG



2. GANG



3. GANG

FIG. 11

EKSEMPLER PÅ REGISTRERINGSOPPTAK MED FALLODD

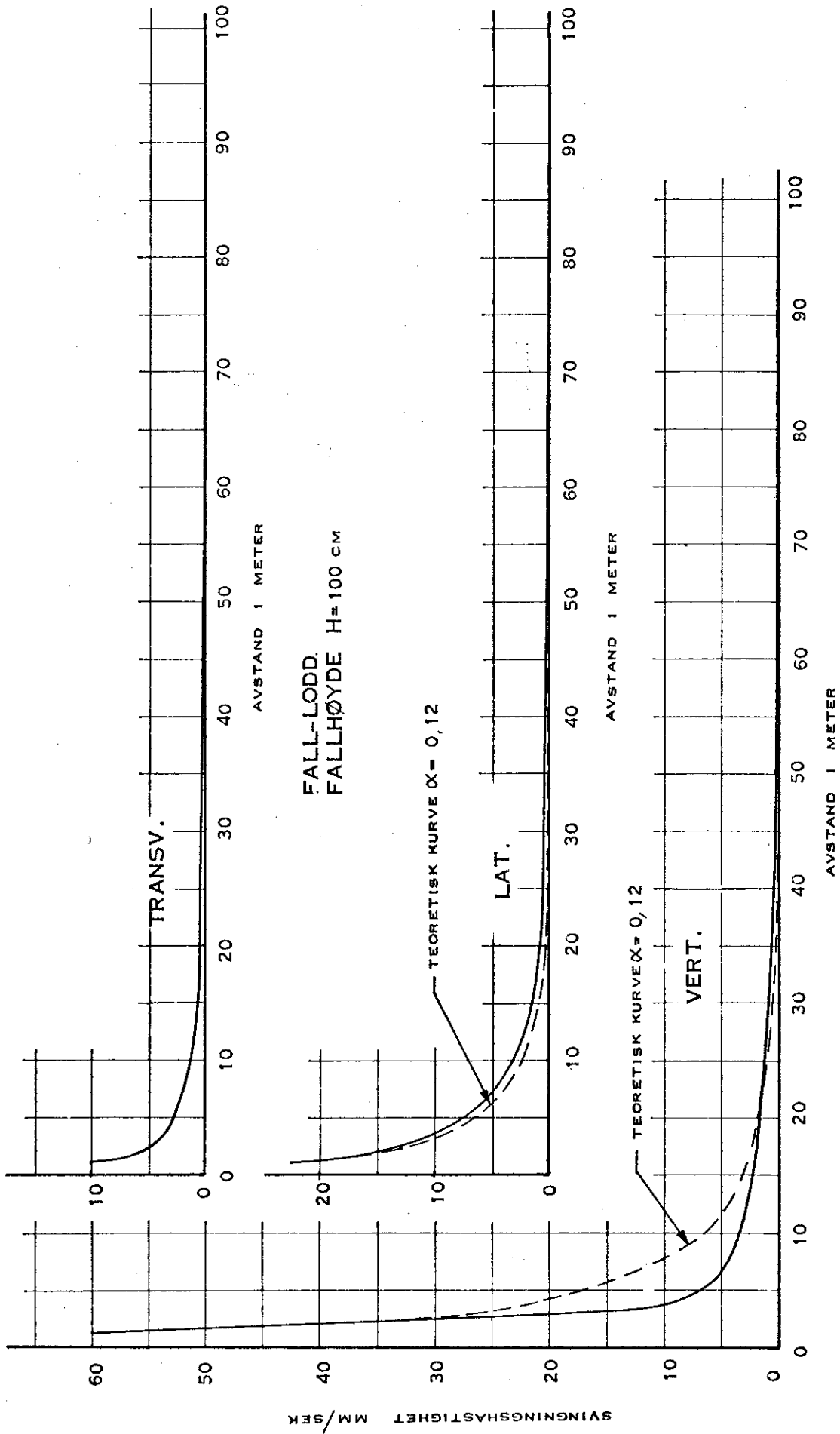


FIG. 12  
 VARIASJON I SVINGNINGSHASTIGHET MED ØKENDE AVSTAND FRA KILDEN.  
 SLEPENDEN.

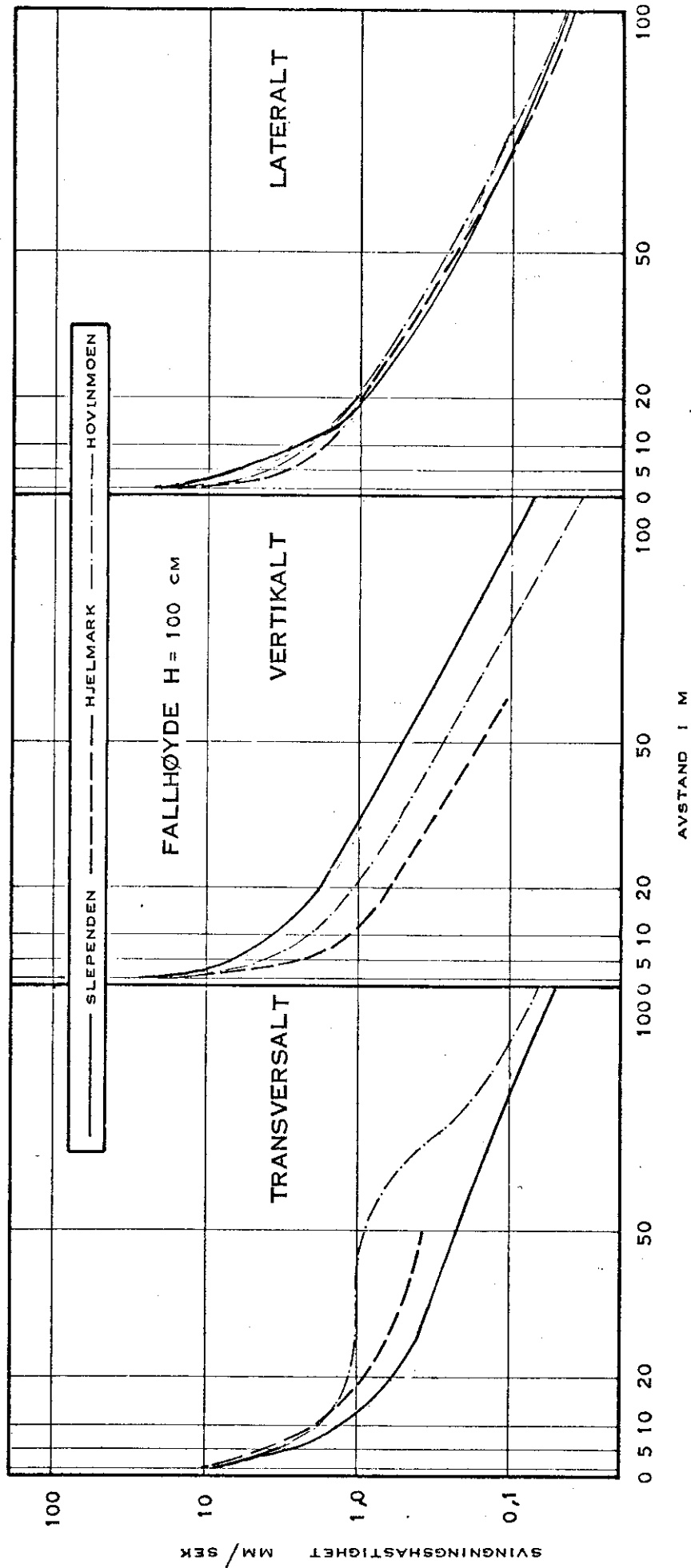


FIG. 13  
 SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
 FOR SLEPENDINGEN, HJELMARK OG HOVINMOEN

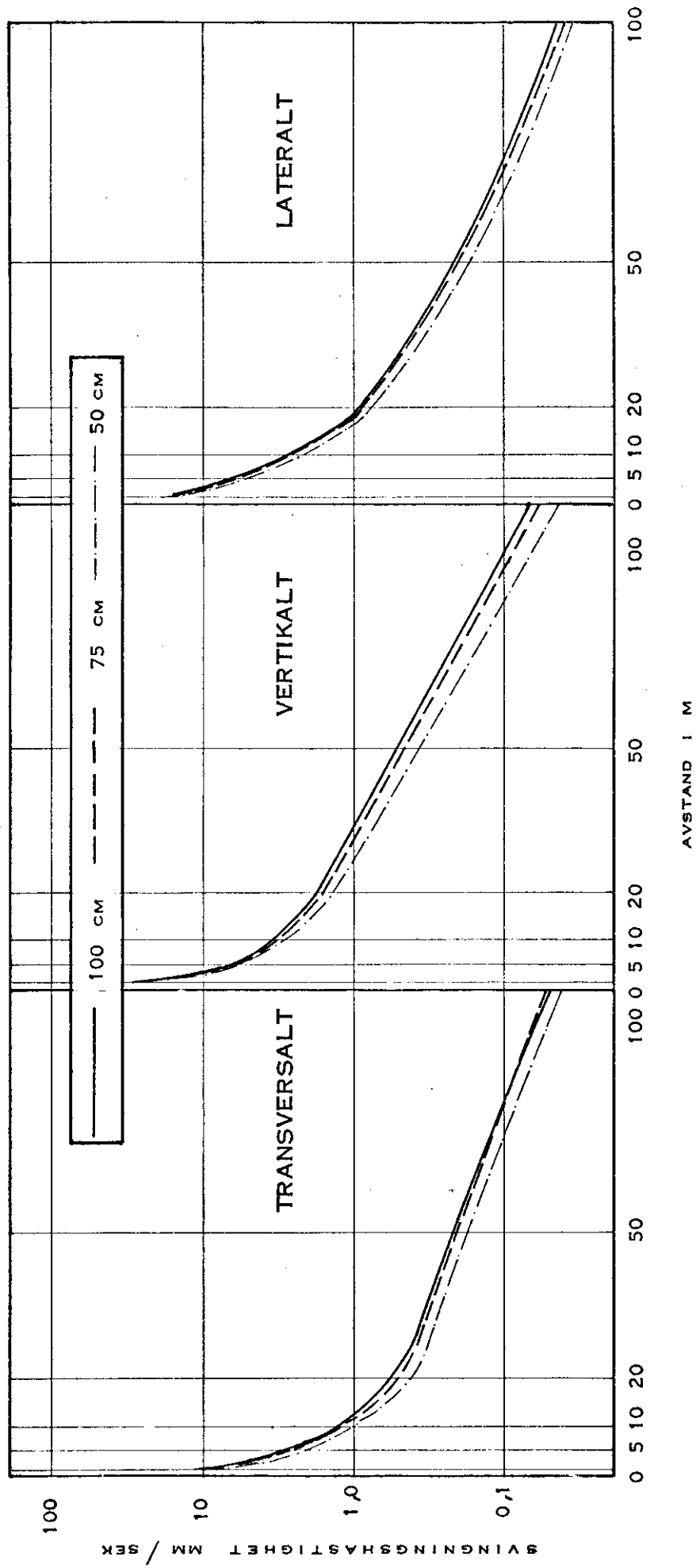


FIG. 14  
SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER FOR  
VARIERENDE FALLHØYDER, SLEPENDE

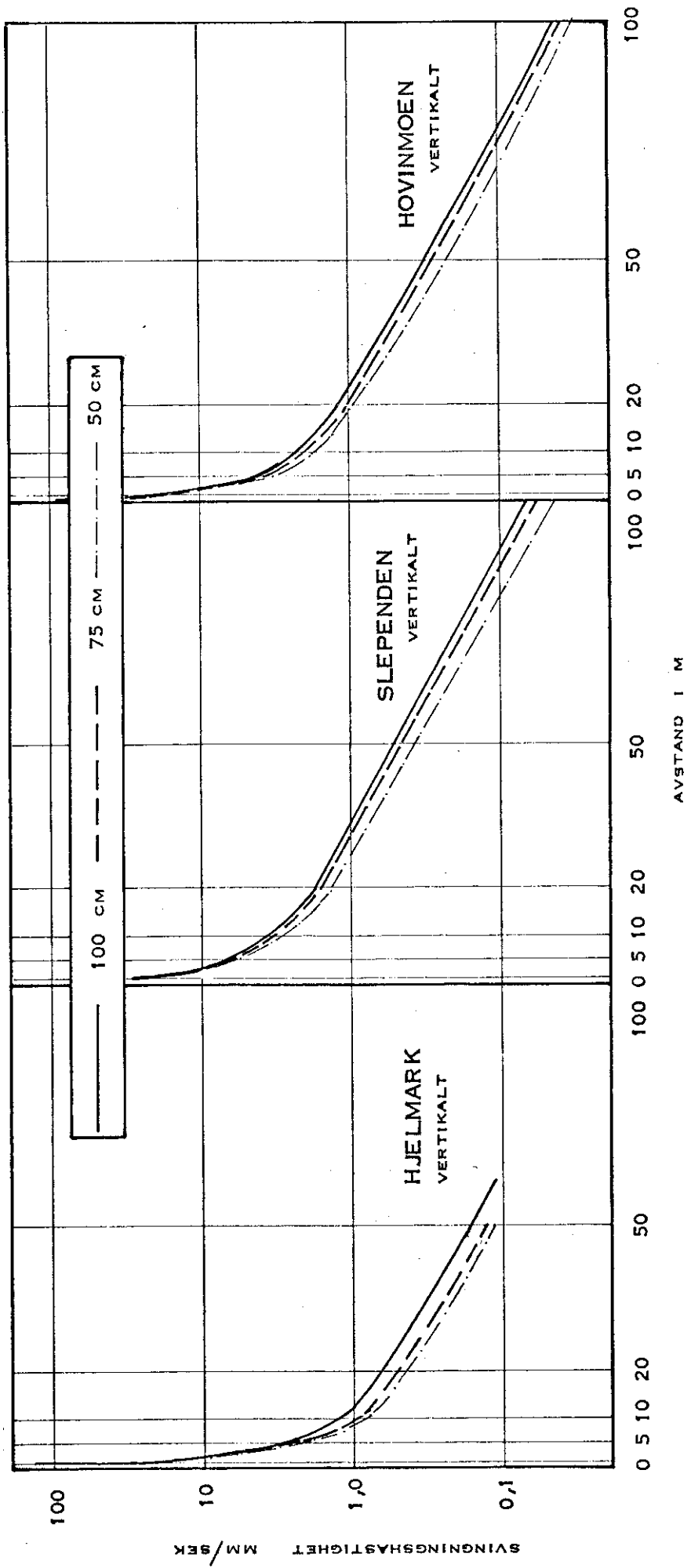


FIG. 15  
SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
FOR VARIERENDE FALLHØYDER, VERTIKALT

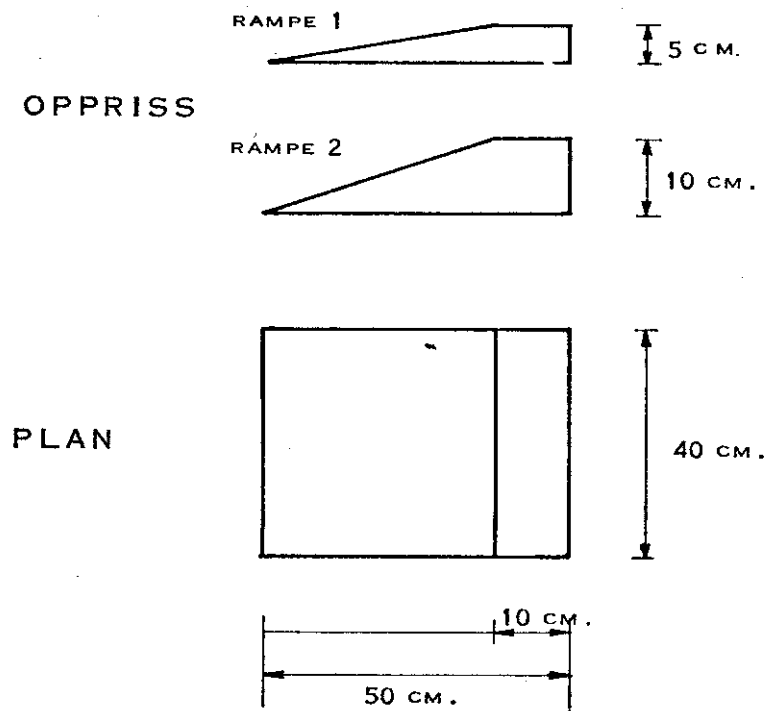


FIG. 16 SKISSE AV RAMPER.

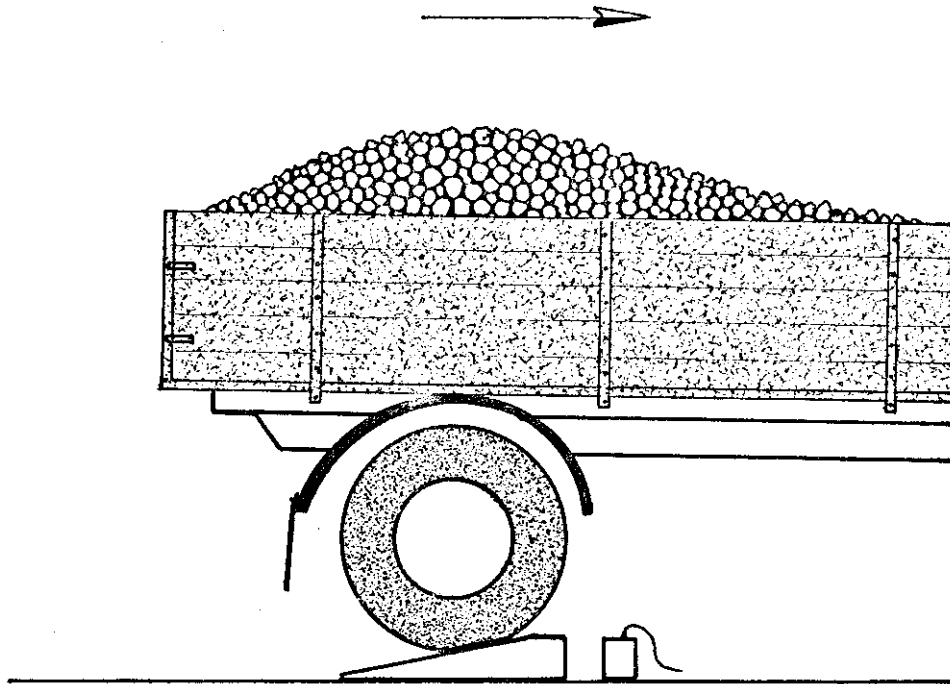


FIG. 17

FORSØKSOPPSTILLING VED REGISTRERING AV VEGTRAFIKK

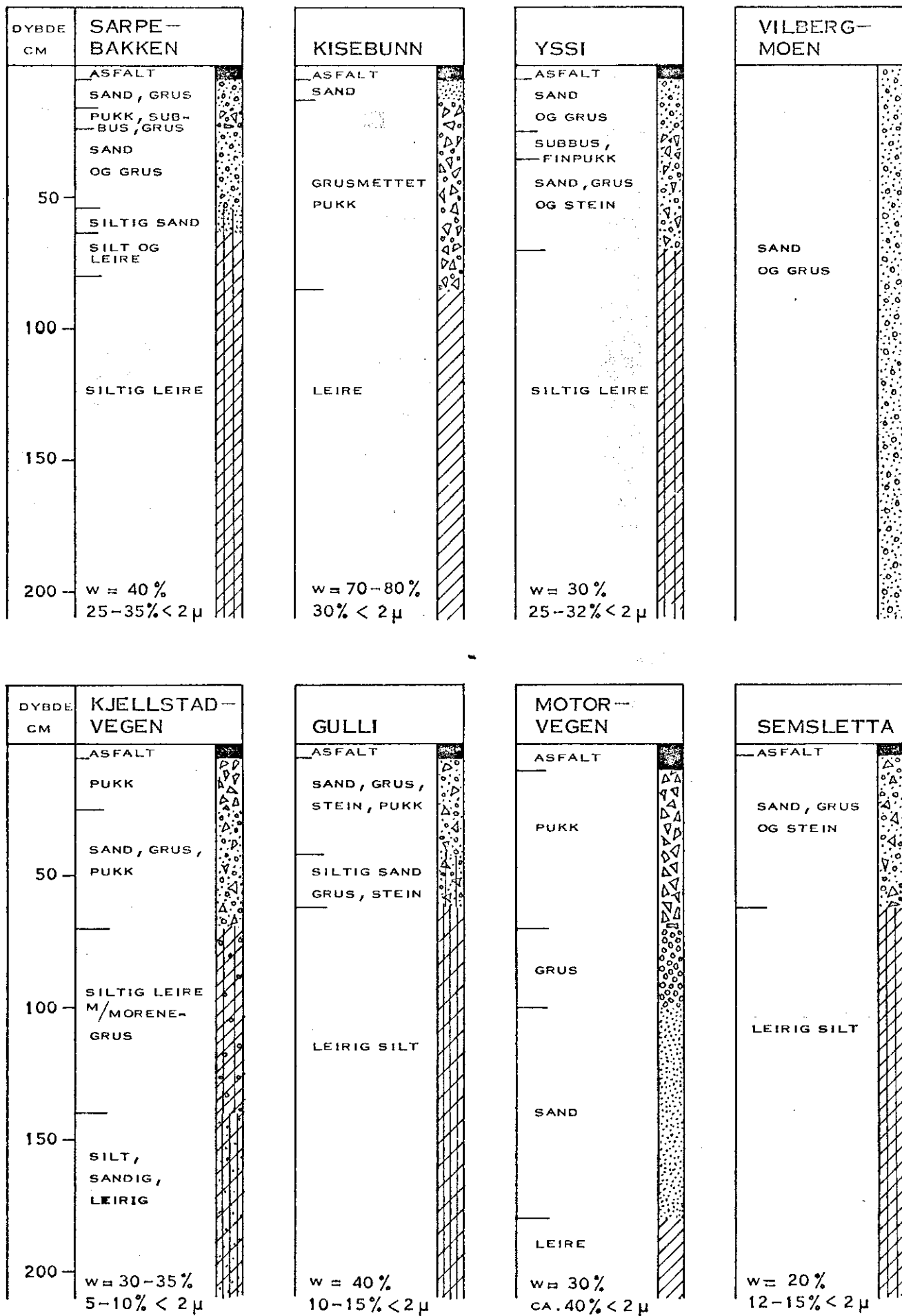
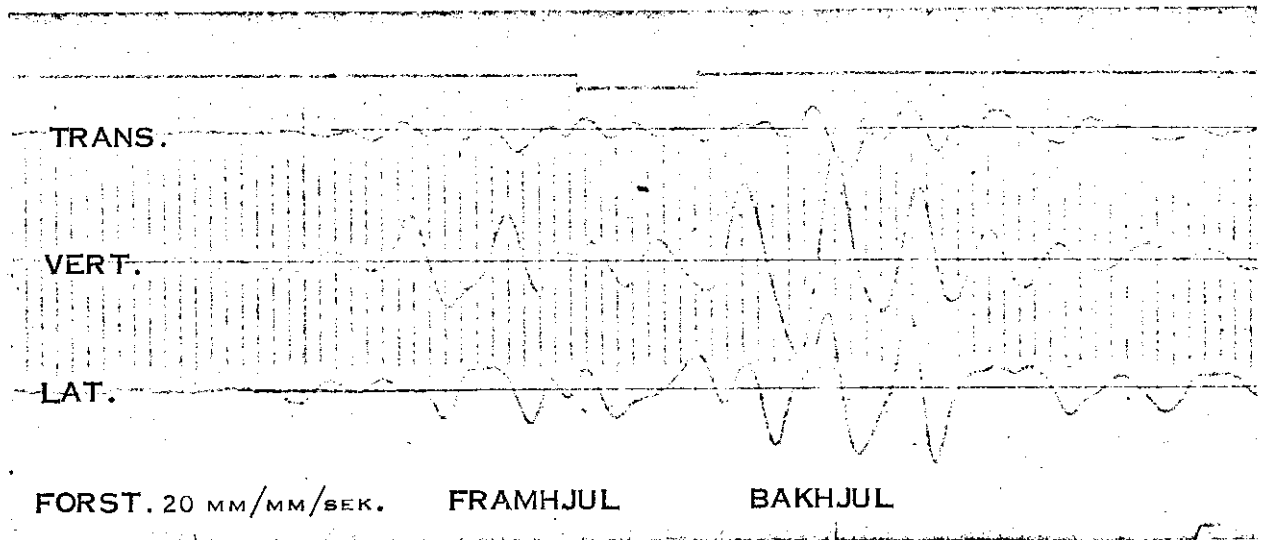


FIG.18 OVERSIKT OVER VEGOVERBYGNING OG GRUNNFORHOLD



FIGUR 19.



STED: SARPEBAKKEN DATO: 2/10-69 RAMPE: 2 HASTIGHET: 50 KM/T AVST: 50 M

FIG. 19. EKSEMPEL PÅ REGISTRERING AV VEGTRAFIKK.

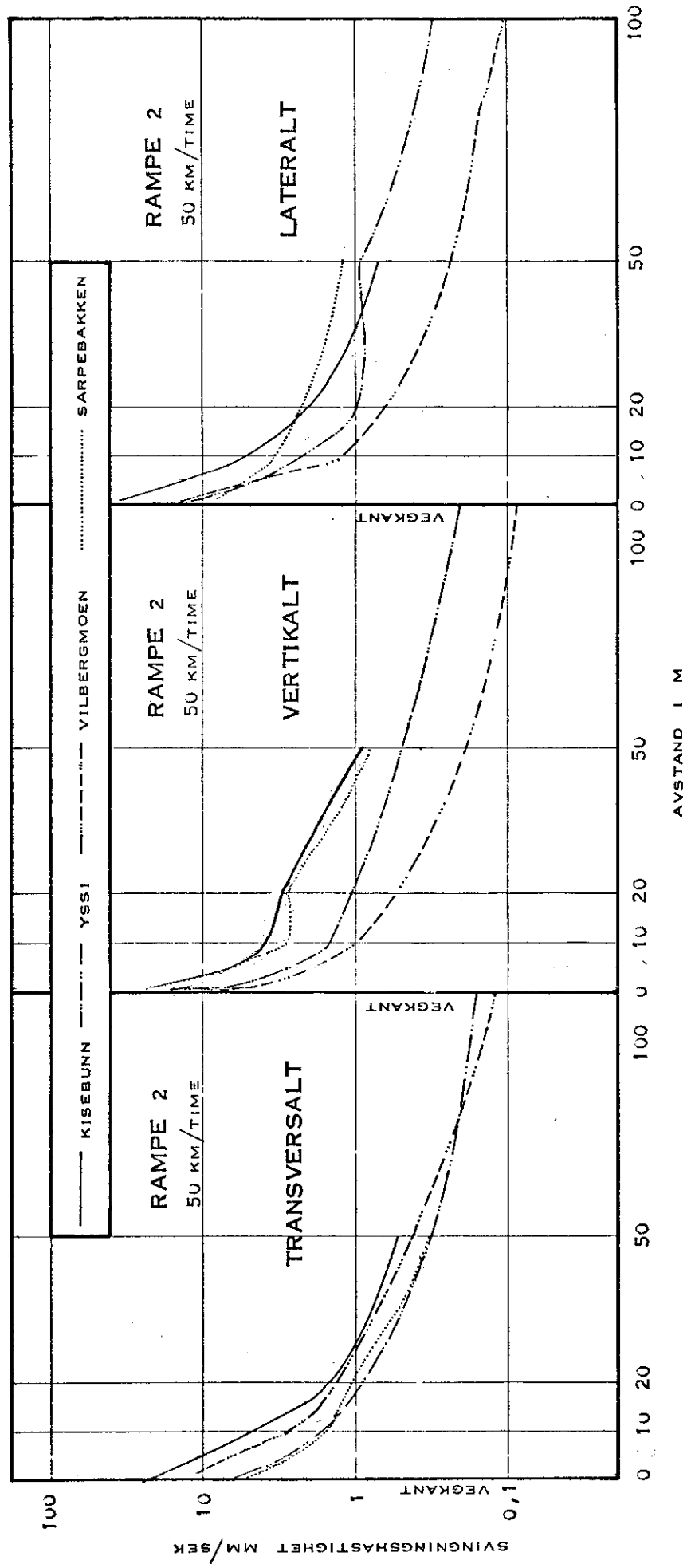


FIG. 20  
 SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
 PÅ MARK UTEN TELE

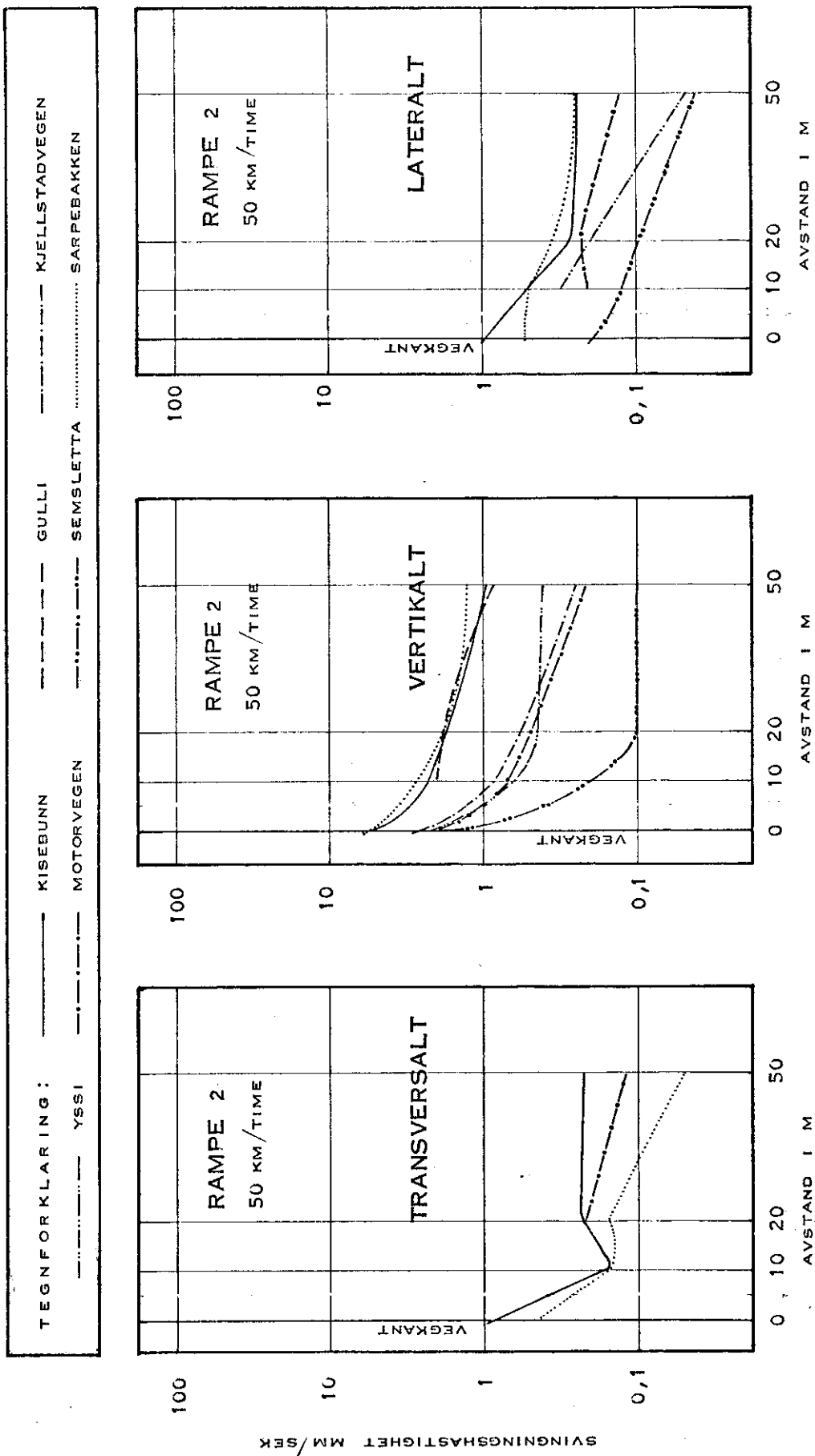


FIG. 21  
 SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
 PÅ MARK MED TELE

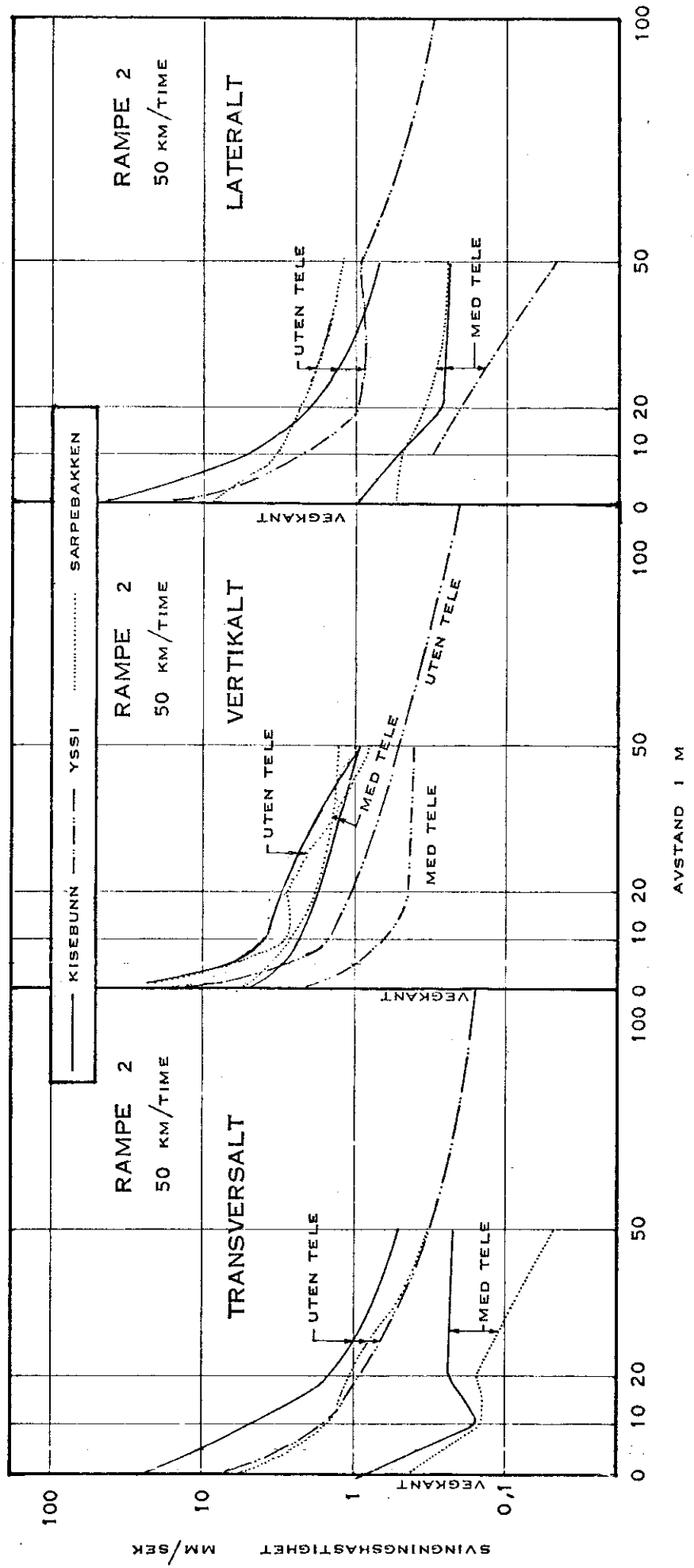


FIG. 22  
 SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
 PÅ MARK, MED - OG UTEN TELE

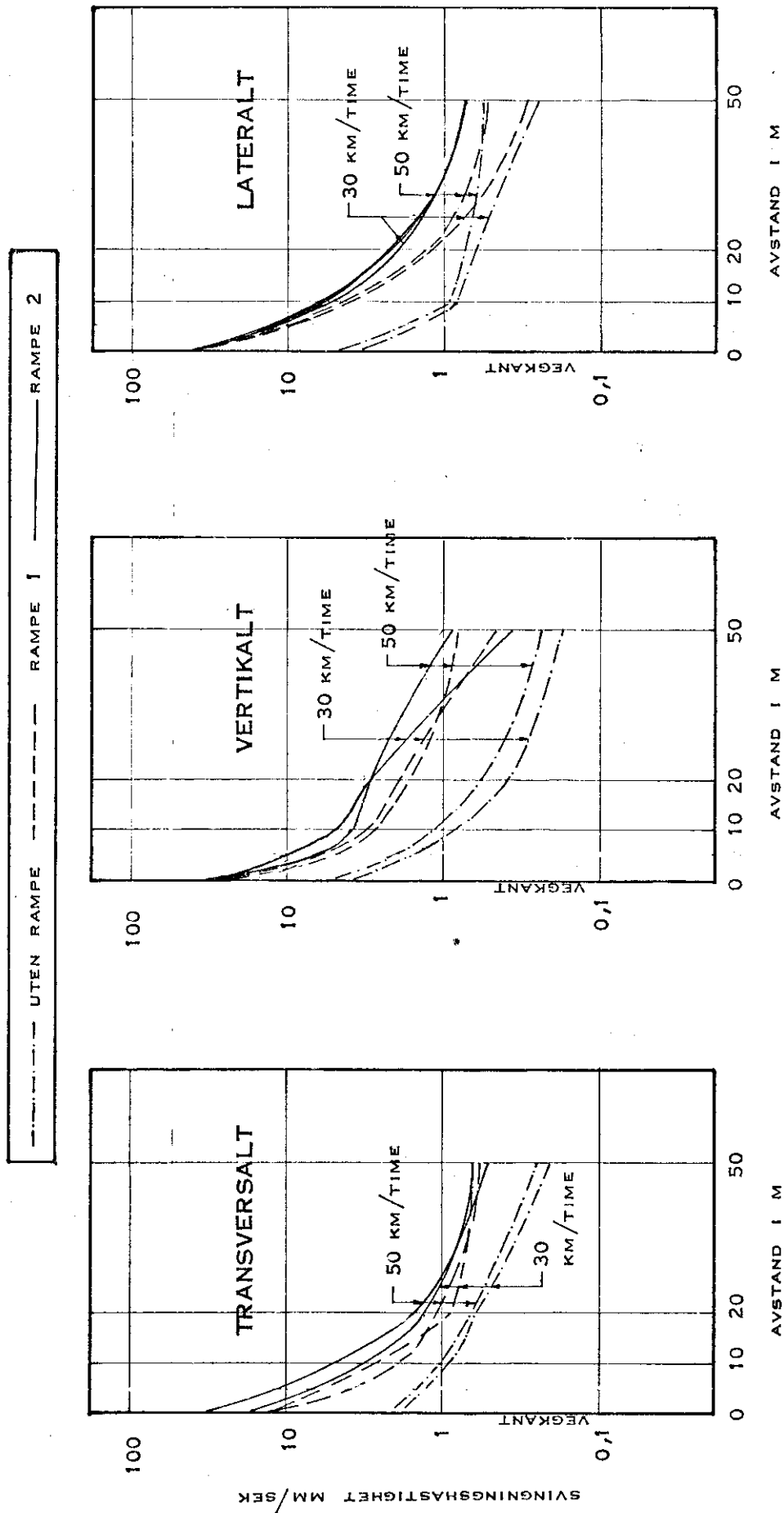


FIG. 23  
 REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER KISEBUNN,  
 UTEN TELE

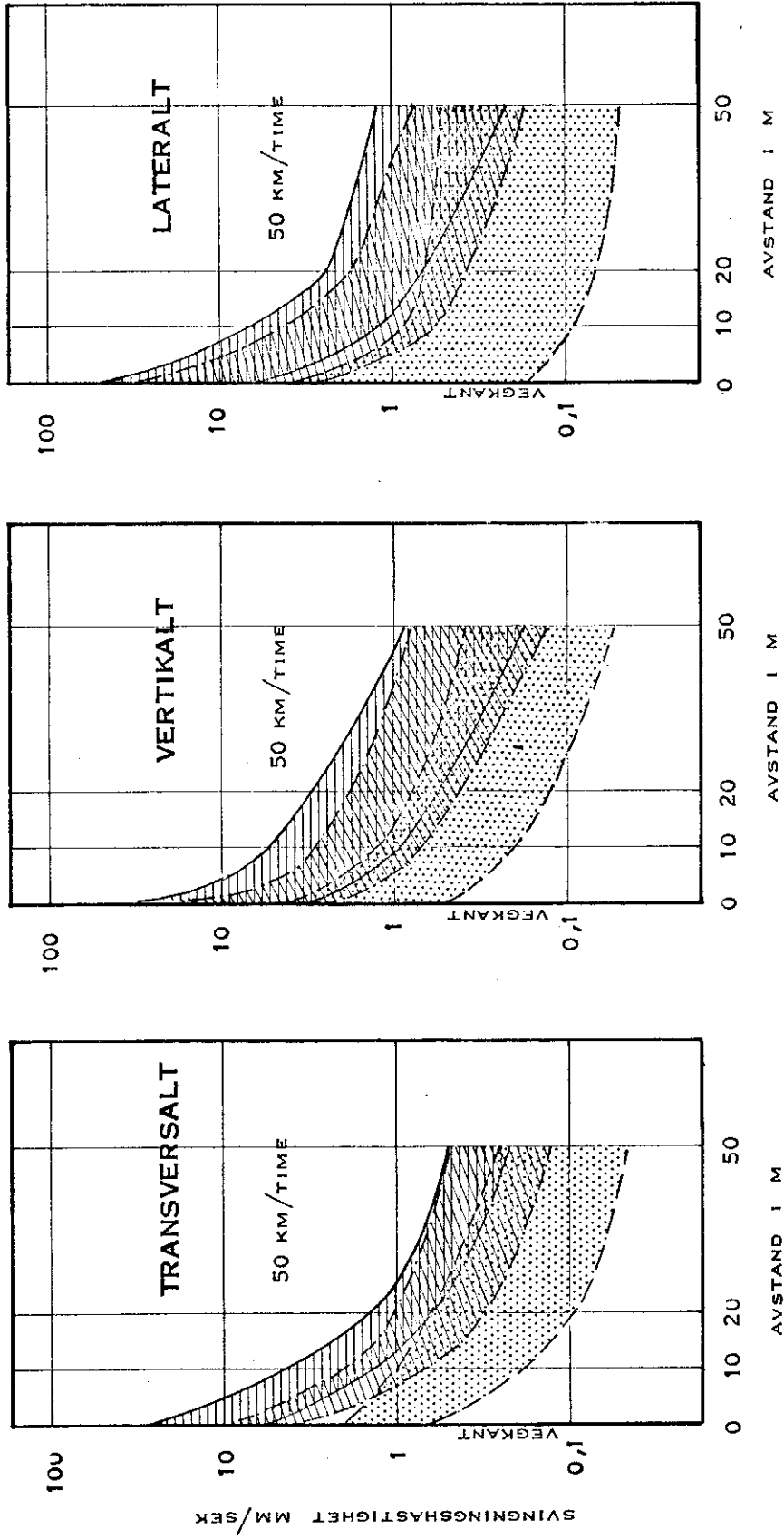


FIG. 24  
 OMHYLDNINGSKURVER FOR REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
 UNDER ULIKE GRUNNFORHOLD, UTEN TELE

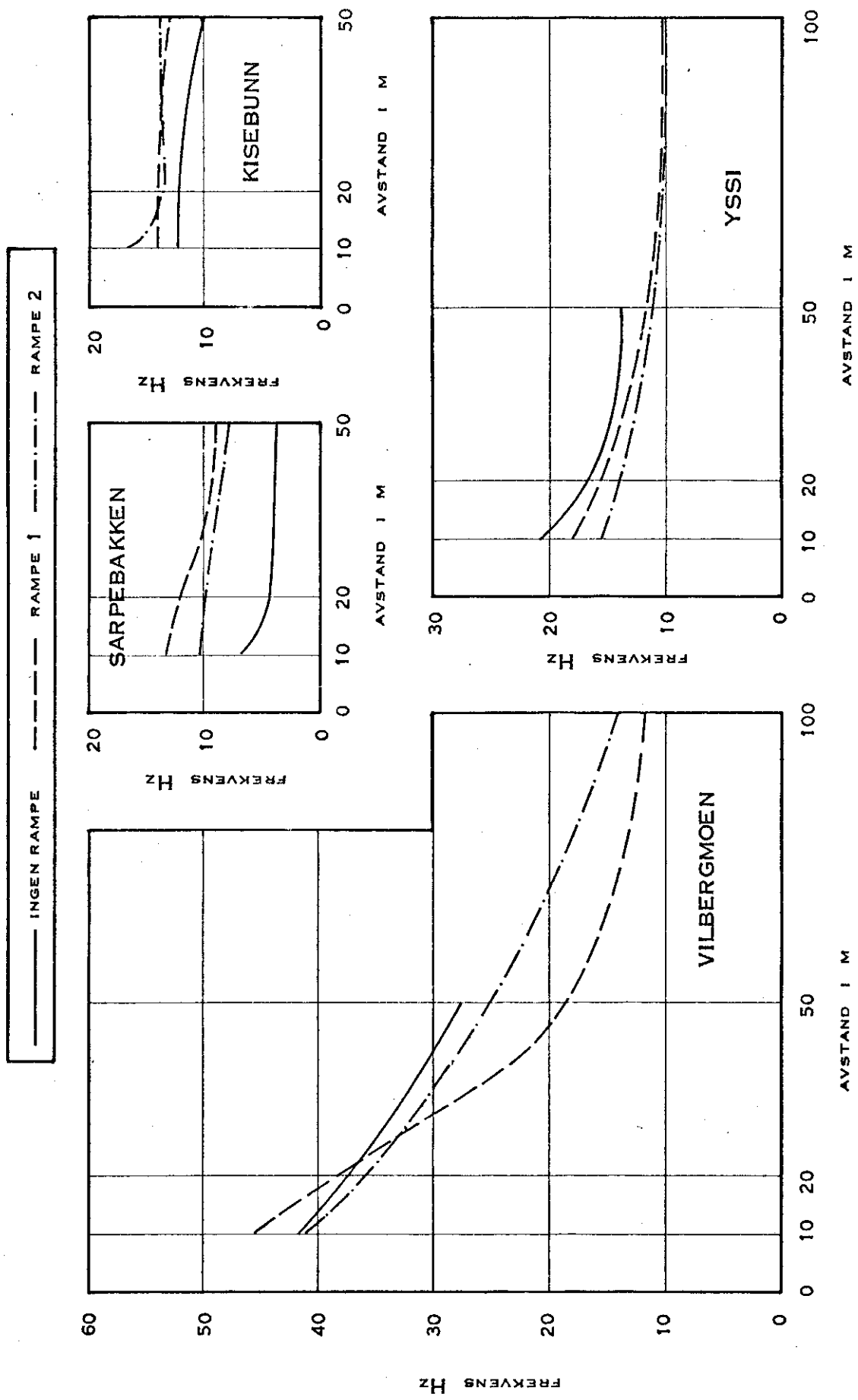


FIG. 25  
 VARIASJON I REGISTRERT SVINGFREKVENNS MED ØKENDE  
 AVSTAND FRA KILDEN

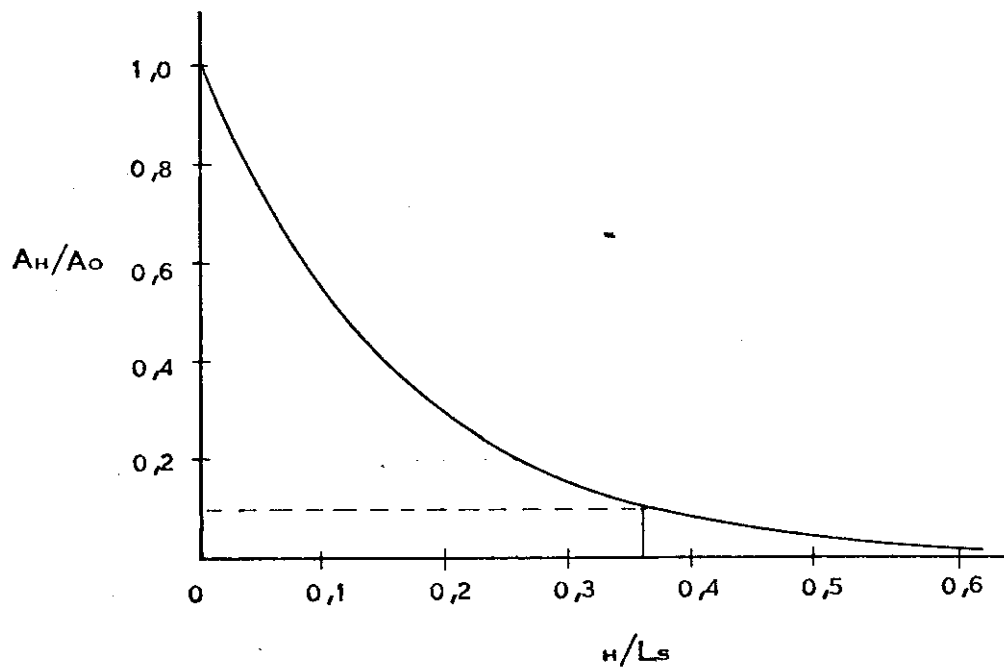
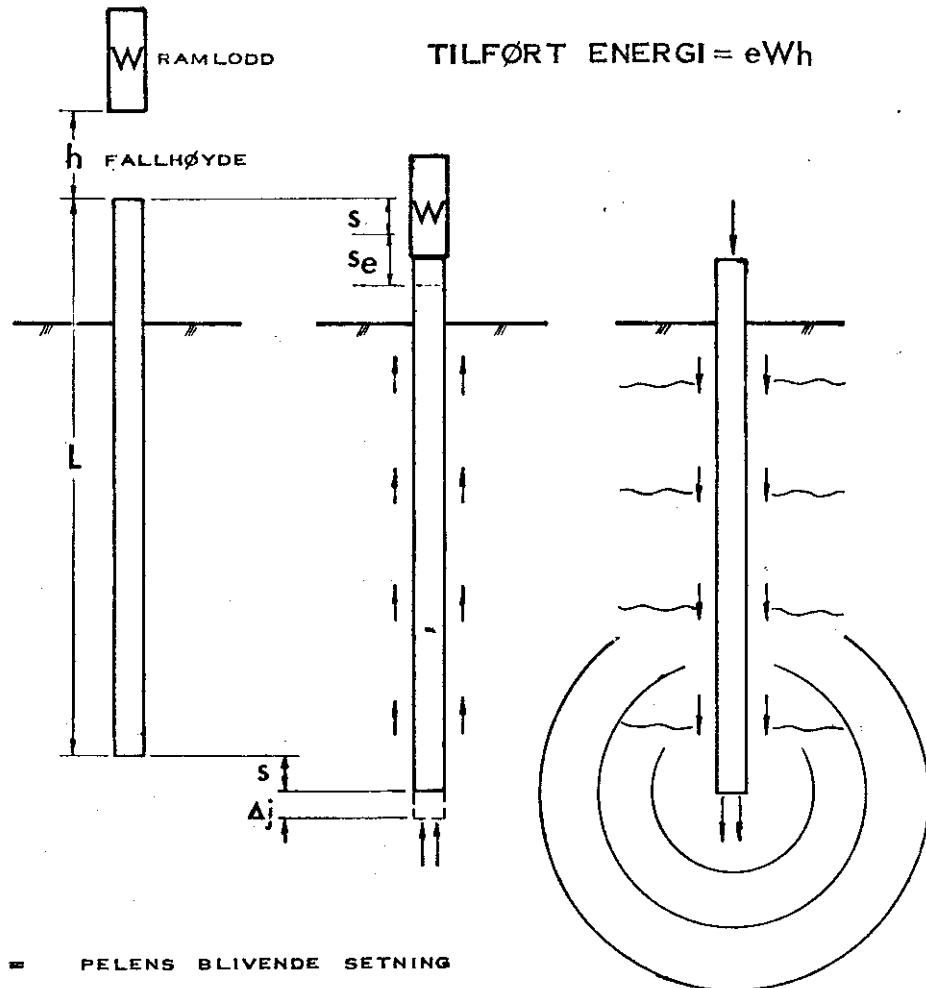


FIG. 26 VARIASJON I RESULTERENDE SVINGNINGS-  
 AMPLITYDER PÅ TERRENG MED VARIERENDE  
 FUNDAMENTERINGSDYBDE.





$s$  = PELENS BLIVENDE SETNING

$s_e = \Delta L + \Delta_j$  HVOR  $\Delta L$  = PELENS ELASTISKE DEFORMASJON

$\Delta_j$  = ELASTISK DEFORMASJON I LØSAVLEIRINGENE

FIG. 27

RESULTERENDE DEFORMASJONER VED PELE RAMMING

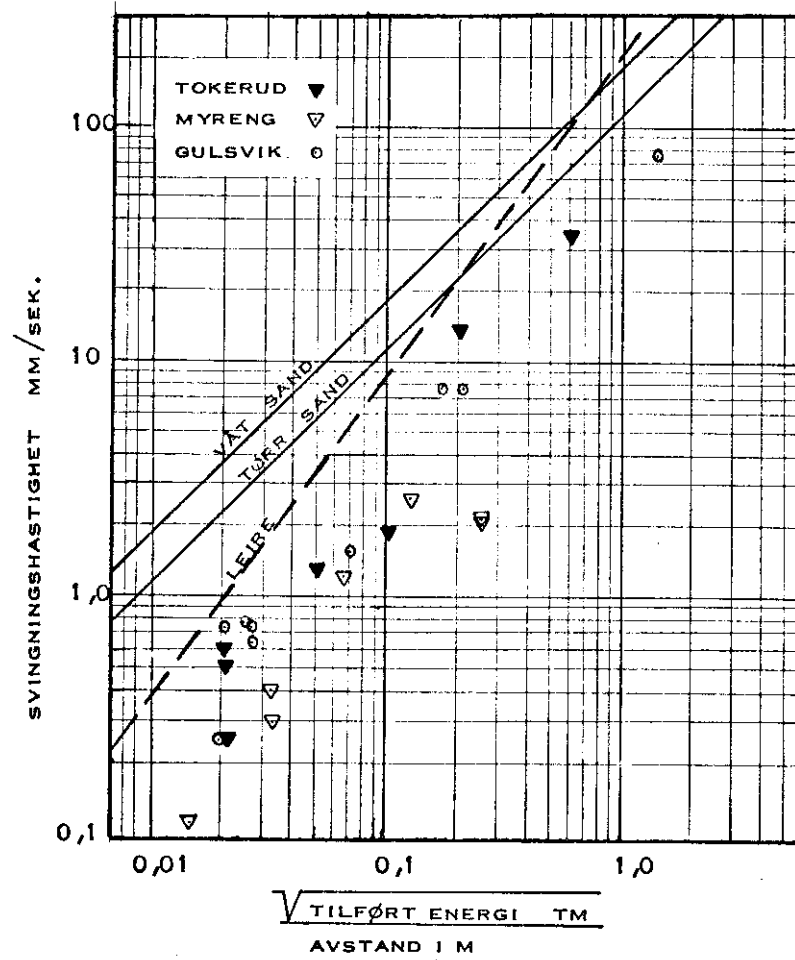
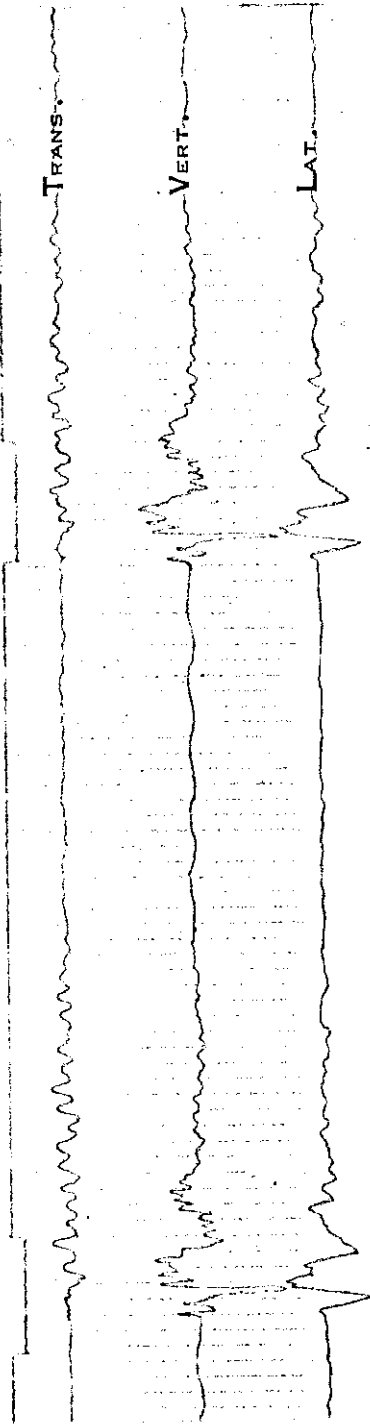


FIG. 28

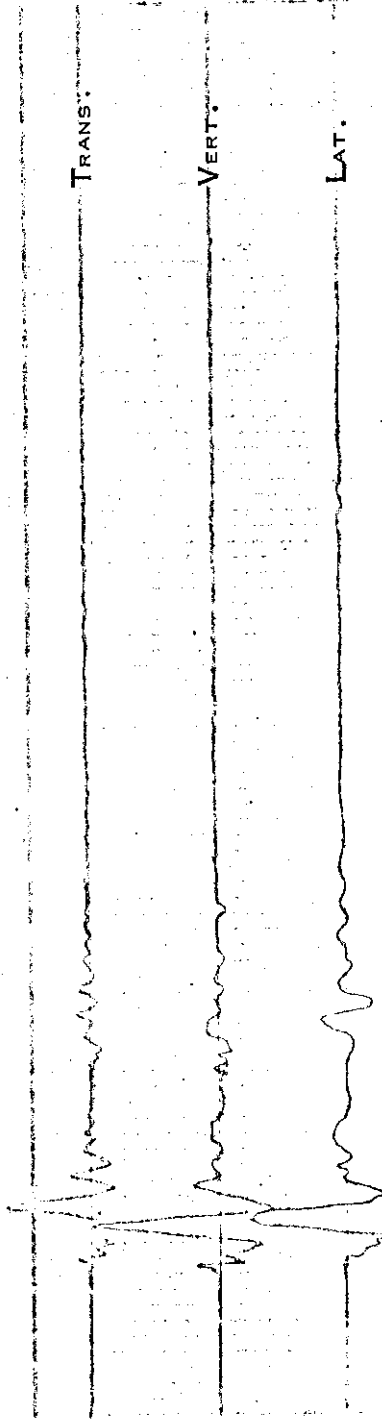
MAKSIMALE SVINGNINGSHASTIGHETER VED PELERAMMING I VÅT OG TØRR SAND OG LEIRE (ETTER WISS,39)

STED: TOKERUD DATO: 10/10-69: MÅLEPUNKT: 3C



FORST. 1 MM/MM/SEK.

STED: GULSVIK DATO: 3/11-69 MÅLEPUNKT: 1



FORST. 0,2 MM/MM/SEK.

FIG. 29. EKSEMPEL PÅ REGISTRERING AV PELERAMMING.

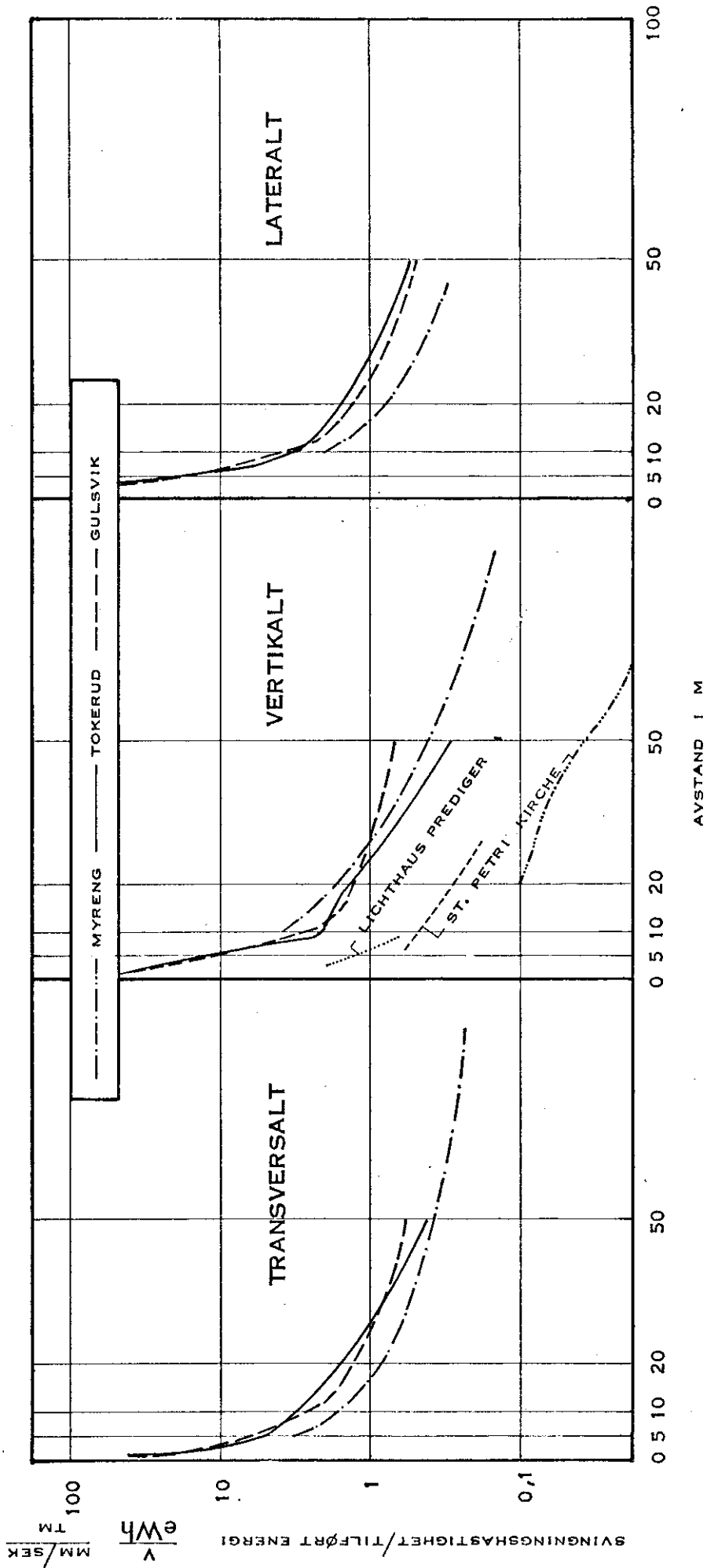


FIG. 30  
 SAMMENLIGNING AV REGISTRERTE SVINGNINGSHASTIGHETER  
 VED PELERAMMING

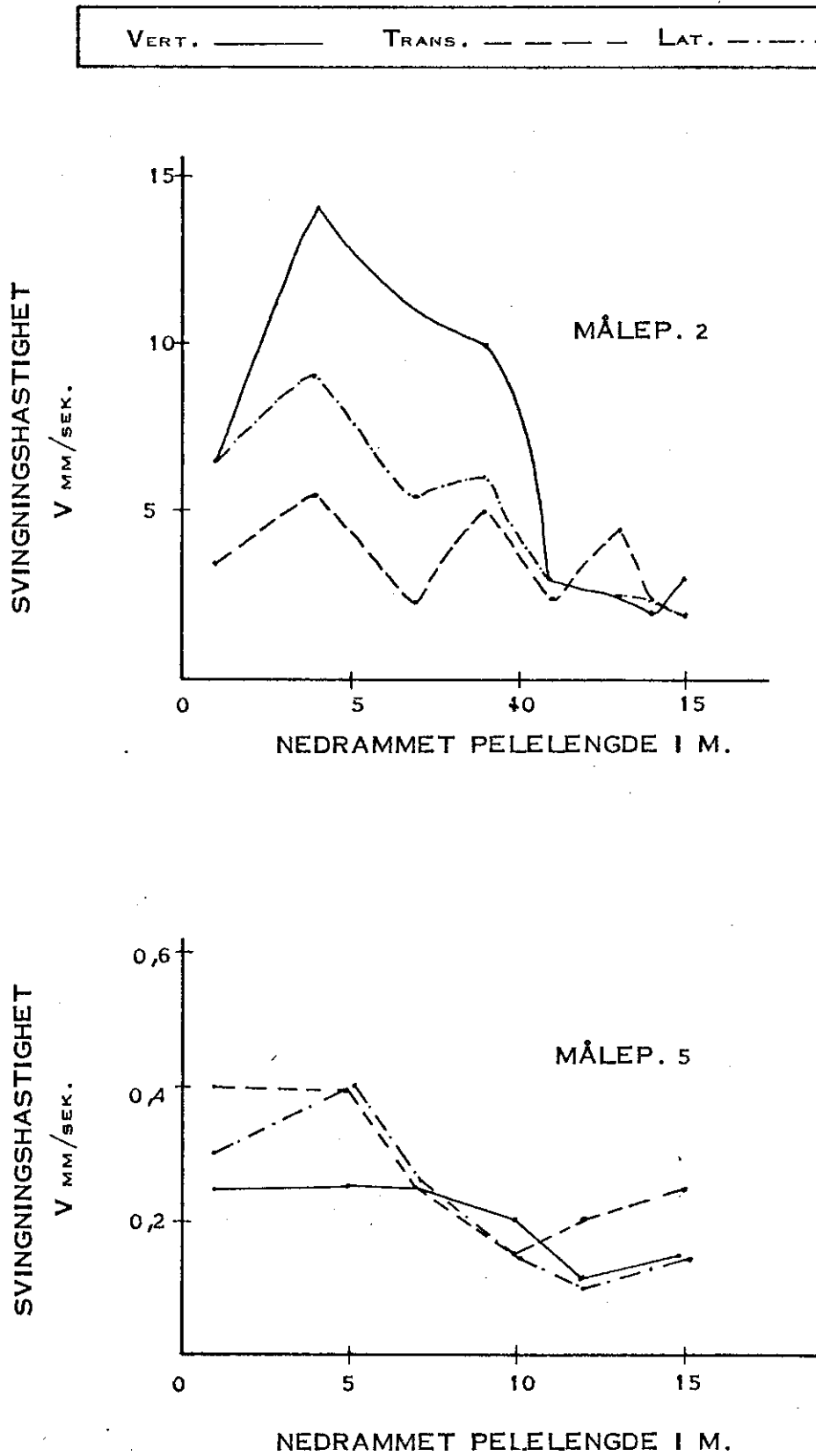


FIG. 31. VARIASJON I MÅLTE SVINGNINGSHASTIGHETER MED NEDRAMMET PELELENGDE, TOKERUD 13/10-69.

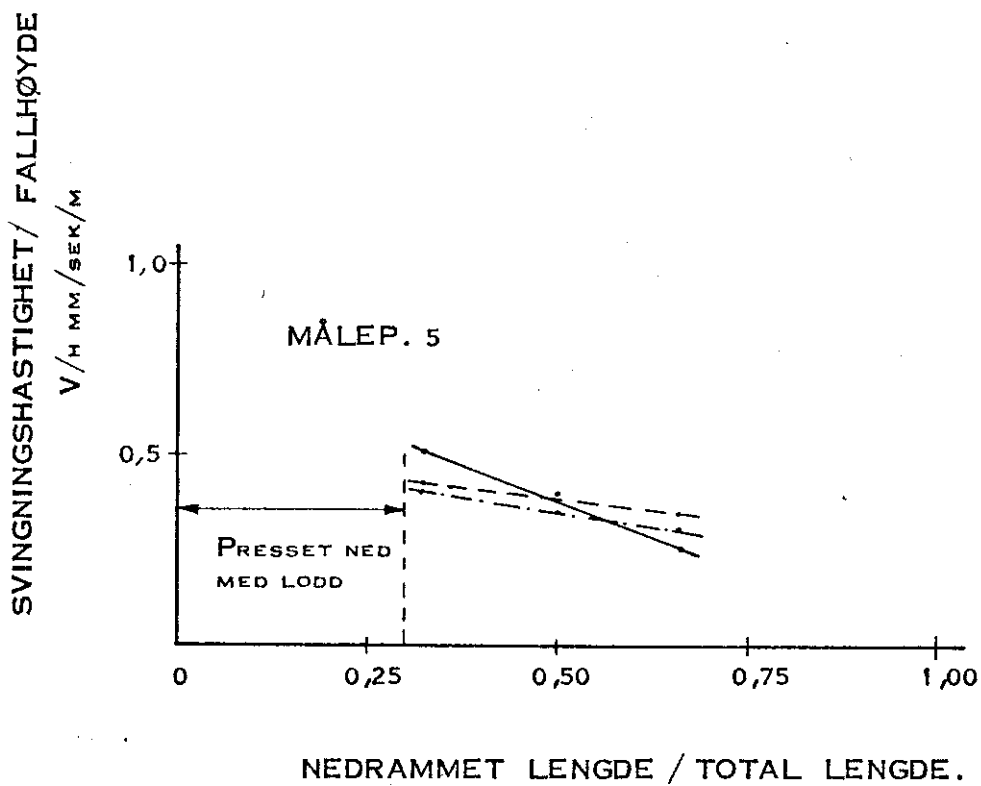
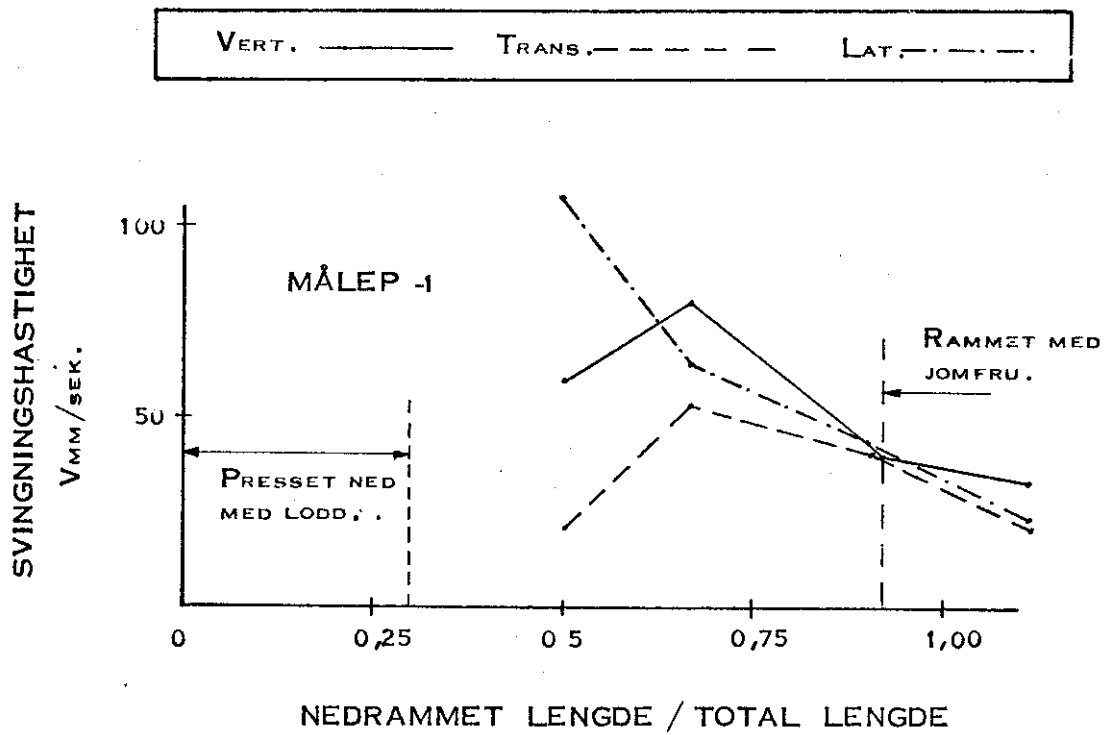


FIG. 32. VARIASJONER I MÅLTE SVINGNINGSHASTIGHETER MED NEDRAMMET PELELENGDE, GULSVIK.

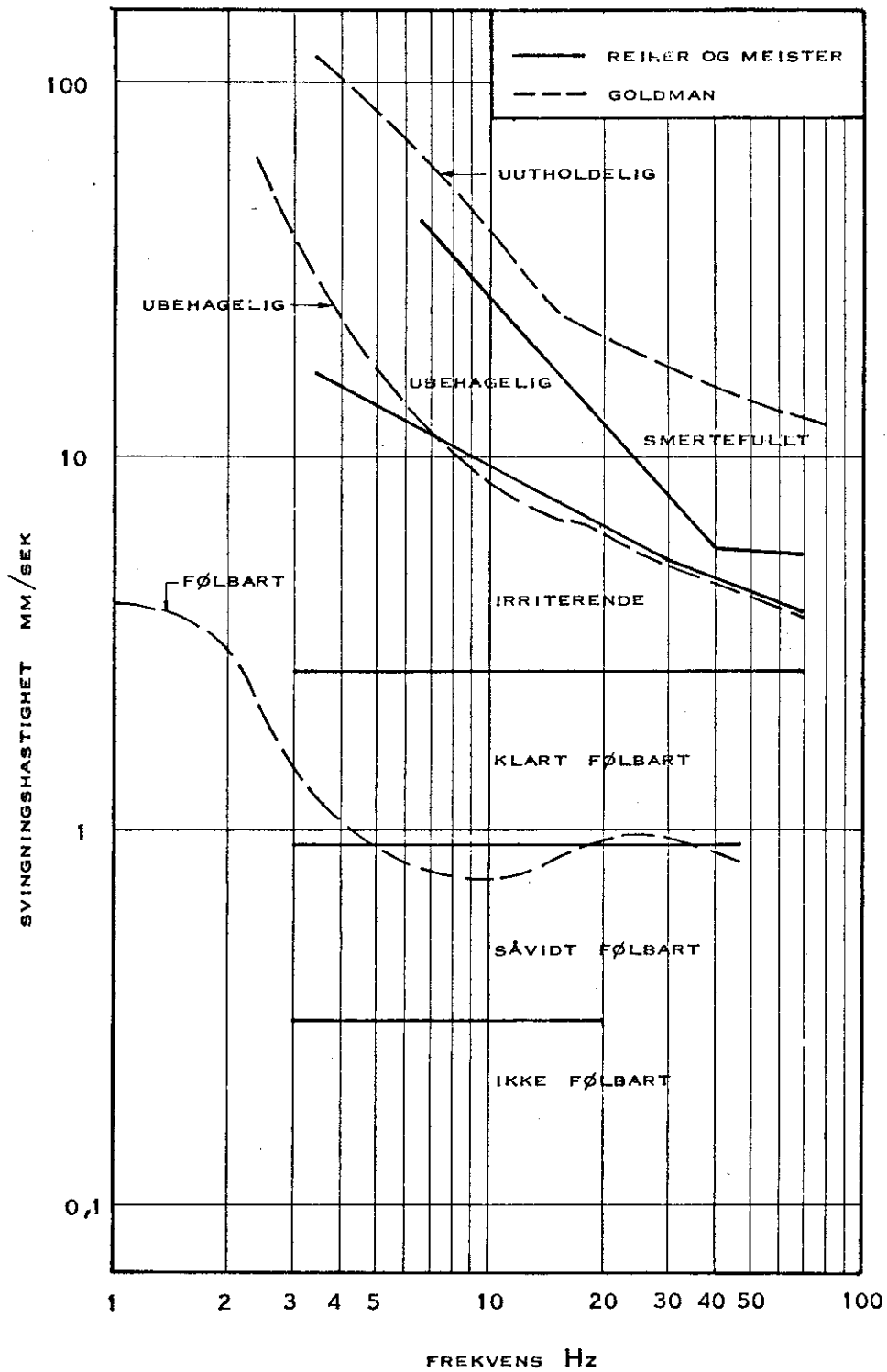


FIG. 33

OVERSIKT OVER GRENSEVERDIER FOR FØLBARE RYSTELSER AV FORSKJELLIG STYRKEGRAD

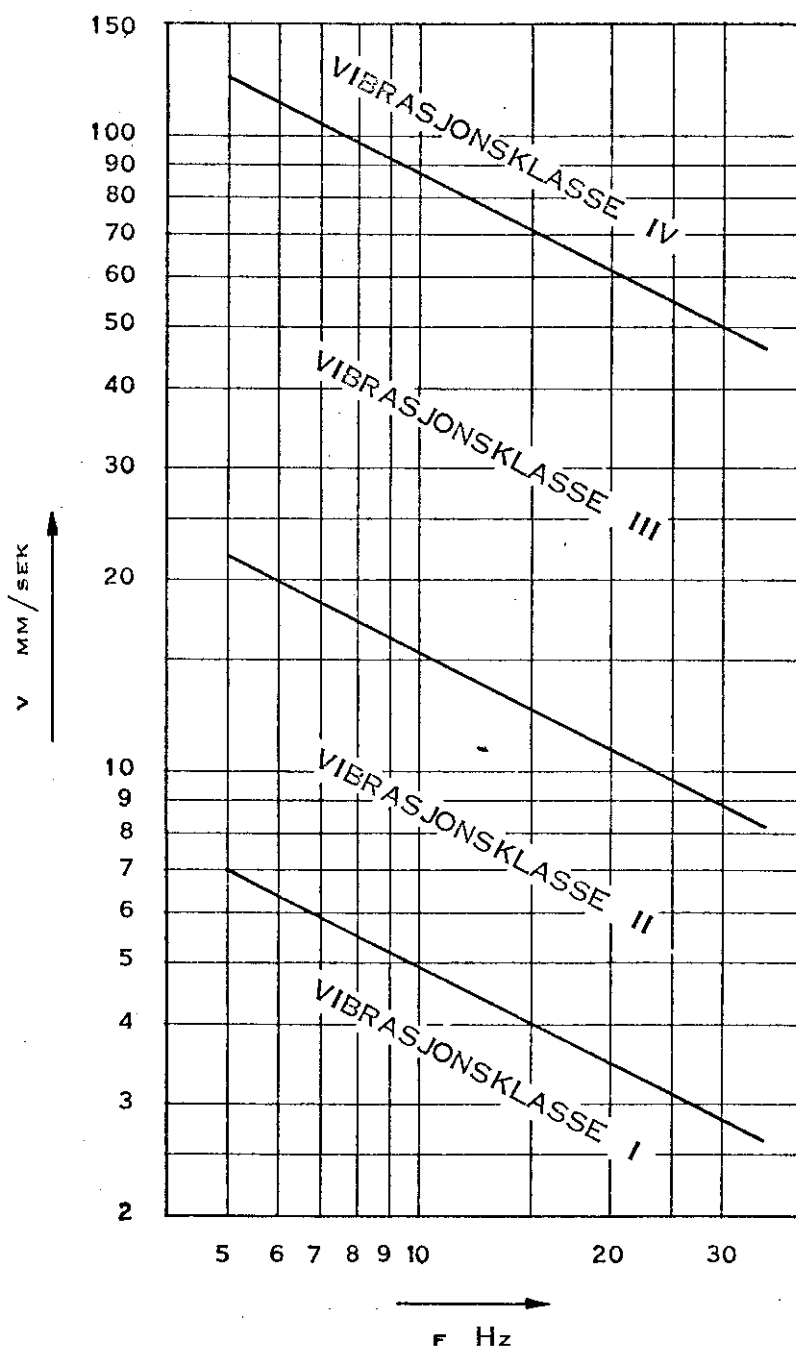


FIG. 34 SIORS VIBRASJONSKLASSE  
 ( OMREGNET FRA SVINGNINGSDEFORMASJONER )  
 ( ETTER SIOR, 32 )



MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENNS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
1	0,2	50	0,2	22	33	25	10,0	87,5	17,5
			"	25	40	50	7,5	80,0	12,5
			"	17	25	50	7,5	80,0	12,5
		75	"	25	40	50	12,5	80,5	22,5
			"	33	40	50	10,0	80,5	22,5
			"	20	30	20	12,5	80,0	26,0
100	"	25	33	25	12,5	100,0	25,0		
	"	20	33	25	12,5	100,0	25,0		
	"	25	50	50	6,3	45,0	25,0		
2	1,0	50	"	25	50	50	6,3	45,0	25,0
			"	25	50	50	6,3	45,0	25,0
			"	33	50	50	6,3	45,0	25,0
		75	"	33	50	50	6,3	50,0	30,0
			"	33	50	50	6,3	47,5	27,5
			"	33	50	50	6,3	50,0	27,5
100	"	25	50	50	6,3	52,5	30,0		
	"	25	50	50	6,3	52,5	30,0		
	"	33	50	50	6,3	52,5	30,0		
3	5	50	1,0	33	50	50	3,0	3,5	2,0
			"	33	50	50	3,0	3,5	2,0
			"	33	50	50	3,0	3,5	2,0
		75	"	33	50	50	3,5	4,0	2,5
			"	33	50	50	3,5	4,0	2,5
			"	33	50	50	3,5	4,0	2,5
100	"	33	65	40	3,8	3,8	2,5		
	"	33	50	50	3,5	4,5	3,0		
	"	33	50	50	4,0	4,5	2,5		
4	10	50	"	50	40	40	0,8	1,5	0,8
			"	33	33	50	1,0	1,6	1,1
			"	33	33	50	1,1	1,5	1,1
		75	"	33	50	50	1,3	1,9	1,3
			"	33	50	55	1,4	1,9	1,1
			"	33	33	50	1,4	1,8	1,3
100	0,2	33	50	50	1,5	2,2	1,4		
	1,0	33	33	50	1,7	2,0	1,5		
	"	33	33	50	1,6	2,0	1,5		

MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENNS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
5	20	50	1,0	33	33	33	0,9	0,3	0,7
			"	33	50	33	0,7	0,2	
			"	33	33	50	0,8	0,3	0,7
		75	"	33	50	50	1,0	0,3	0,9
			"	33	33	33	1,0	0,3	0,8
			"	33	50	33	0,9	0,3	0,8
100	"	33	50	50	1,2	0,3	1,0		
	"	33	33	33	1,1	0,3	1,0		
	"	33	50	33	1,1	0,3	1,0		
6	50	50	20	33	33	33	0,7	0,2	0,2
			"	33	33	33	0,6	0,2	0,2
			"	20	33	33	33	0,7	0,3
		75	"	33	33	33	0,8	0,3	0,3
			"	33	33	33	0,8	0,2	0,3
			"	33	33	33	0,8	0,3	0,3
100	"	33	33	33	0,9	0,3	0,2		
	"	33	33	33	1,0	0,3	0,2		
	"	33	33	33	0,9	0,3	0,2		
7	100	50	20	33	33	33	0,05	0,3	
			"	33	33	33	0,05	0,3	
			"	33	33	33	0,05	0,3	
		75	"	33	33	33	0,05	0,04	0,04
			"	33	33	33	0,06	0,03	0,04
			"	33	33	33	0,06	0,04	0,03
100	"	33	33	33	0,06	0,04	0,04		
	"	33	33	33	0,06	0,04	0,04		
	"	33	33	33	0,06	0,04	0,04		

STED: HOVINMOEN

DATE: 28-10-69

TAB. 1A

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED FALLODD - FORSØK

MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
1	0,2	50	0,2	20	30	50	17,5	90,0	27,5
			"	17	30	50	20,0	100,0	27,5
			"	17	30	50	20,0	90,0	25,0
		75	"	25	30	30	20,0	118,0	85,0
			"	17	25	30	22,5	115,0	83,0
			"	17	25	30	26,0	118,0	85,0
100	"	25	25	25	27,5	120,0	83,0		
	"	25	20	20	25,0	152,0	60,0		
	"	12	17	17	30,0	168,0	65,0		
2	1,0	50	"	50	50	50	10,0	20,0	16,0
			"	50	50	50	10,0	22,5	12,5
			"	50	50	50	10,0	22,5	17,5
		75	"	50	50	50	12,5	22,5	17,5
			"	50	50	50	12,5	27,5	20,0
			"	50	50	50	12,5	27,5	17,5
		100	"	50	50	50	7,5	27,5	17,5
			"	50	50	50	10,0	27,5	17,5
			"	50	50	50	12,5	27,5	20,0
3	5	50	1,0	50	50	50	3,5	3,0	3,0
			"	50	50	50	4,0	2,5	3,0
			"	50	50	50	4,0	2,0	3,0
		75	"	30	50	30	4,0	2,5	3,5
			"	30	50	50	4,0	2,5	3,5
			"	30	50	30	4,5	2,5	3,5
		100	"	30	50	30	4,5	3,0	4,0
			"	30	50	30	4,5	2,5	3,5
			"	30	50	50	4,5	3,0	4,0
4	10	50	5	50	50	30	1,2	0,8	0,8
			"	30	50	50	1,4	0,9	0,9
			"	30	50	20	1,4	0,9	0,9
		75	"	30	50	30	1,6	1,0	1,1
			"	30	50	30	1,6	1,1	1,1
			"	30	50	30	1,6	1,0	1,1
		100	1,0	30	50	50	1,5	1,0	1,1
			5	50	50	30	1,9	1,2	1,3
			"	30	50	30	2,1	1,3	1,3

MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENS Hz			SVINGEHAST. MM/S				
				T	V	L	T	V	L		
5	20	50	5	30	30	25	0,7	0,3	0,4		
			"	30	50	30	0,7	0,3	0,5		
			"	30	40	30	0,7	0,3	0,4		
		75									
			<i>Lysparen g8H</i>								
6	50	50	20	30	28	30	0,3	0,1	0,2		
			"	30	30	28	0,3	0,1	0,2		
			"	30	30	28	0,3	0,1	0,2		
		75	"	30	30	30	0,3	0,2	0,2		
			"	28	28	25	0,3	0,2	0,2		
			"	28	30	28	0,3	0,2	0,2		
		100	"	28	30	25	0,4	0,2	0,2		
			"	20	50	50	0,4	0,2	0,2		
			"	28	30	28	0,4	0,2	0,2		
7	100	50				30		0,03			
						30		0,03			
						30		0,03			
		75				30		0,03			
						30		0,03			
						30		0,03			
100				25		0,03					
				25		0,03					
				25		0,03					

STED: HJELMARK

---

DATO: 31-10-69

TAB. 1 B

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED FALLODD - FORSØK

MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENNS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
1	0,2	50	0,2	25	25	25	32,5	135,0	50,0
			"	17	25	17	35,0	150,0	70,0
			"	17	25	13	32,5	150,0	60,0
		75	"	14	25	10	40,0	170,0	60,0
			"	13	25	11	35,0	170,0	75,0
			"	11	25	12	45,0	170,0	75,0
		100	"	13	25	10	32,5	170,0	97,0
			"	13	25	13	35,5	170,0	93,0
			"						
2	1,0	50	"	30	30	60	10,0	47,5	15,0
			"	30	30	50	10,0	45,0	16,0
			"	30	50	50	10,0	50,0	17,5
		75	"	30	50	50	10,0	55,0	20,0
			"	30	60	50	10,0	55,0	22,5
			"	30	20	50	10,0	57,5	22,5
		100	"	26	25	50	7,5	57,5	17,5
			"	30	28	50	7,5	60,0	25,0
			"	30	30	50	10,0	62,5	25,0
3	5	50	"	20	20	20	2,5	5,0	5,0
			1,0	50	25	28	2,5	5,5	6,0
			"	50	25	30	2,5	5,5	6,0
		75	"	50	25	25	3,0	6,0	7,0
			"	40	25	25	2,5	6,0	7,0
			"	40	25	28	3,0	6,0	6,5
		100	"	40	25	28	3,0	3,5	7,0
			"	30	25	25	3,0	7,0	8,0
			"	40	25	25	2,5	6,5	7,5
4	10	50	"	30	25	25	1,5	3,0	3,0
			"	50	25	25	1,0	3,0	2,5
			"	50	25	30	1,0	3,0	2,5
		75	"	30	25	25	1,5	3,5	3,0
			"	50	25	25	1,5	3,0	3,0
			"	40	25	25	1,5	3,0	3,0
		100	"	30	25	25	1,5	3,0	3,0
			"	40	25	30	1,5	3,5	3,0
			"	30	25	28	1,5	3,5	3,5

MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENNS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
5	20	50	5	25	20	20	0,4	1,3	0,8
			"	25	20	25	0,4	1,3	0,7
			"	25	26	20	0,4	1,3	0,8
		75	"	20	20	25	0,5	1,6	0,8
			"	20	20	25	0,5	1,6	0,9
			"	20	20	25	0,5	1,5	0,8
		100	"	25	20	25	0,6	1,7	0,9
			"	20	20	25	0,5	1,7	0,9
			"	20	20	25	0,5	1,7	0,9
6	50	50	20	25	20	20	0,2	0,4	0,2
			"	20	20	25	0,2	0,4	0,2
			"	20	20	25	0,2	0,4	0,2
		75	"	20	20	20	0,2	0,5	0,3
			"	25	20	20	0,2	0,4	0,3
			"	20	20	20	0,2	0,4	0,2
		100	"	20	20	20	0,2	0,5	0,3
			"	20	20	20	0,2	0,5	0,3
			"	20	20	20	0,2	0,5	0,2
7	100	50	"	17	14	17	0,04	0,04	0,03
			"	25	14	14	0,04	0,05	0,04
			"	20	20	20	0,04	0,05	0,04
		75	"	15	20	17	0,03	0,05	0,04
			"	20	20	17	0,05	0,08	0,03
			"	20	17	20	0,08	0,08	0,05
		100	"	20	13	13	0,05	0,05	0,05
			"	20	17	12	0,05	0,08	0,05
			"	20	17	12	0,05	0,08	0,05

STED: <u>SLEPENDEN</u>
DATO: <u>29-10-69</u>

TAB. 1C

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED FALLODD - FORSØK

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	PAS-HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1	-0,5	1	30	20	30	10	30	0,05	0,55	0,05
			50	"	—	8	12	—	0,45	0,12
		2	30	5	100	12	20	0,10	1,75	0,10
			50	"	—	10	—	—	2,20	—
		2	30	10	—	17	—	—	3,50	—
			50	"	—	13	—	—	3,00	—
2	10	1	30	20	—	13	30	—	0,08	0,03
			50	"	—	—	—	—	—	—
		2	30	"	—	11	14	0,03	0,35	0,15
			50	"	13	14	13	0,03	0,35	0,05
		2	30	5	—	14	14	—	0,70	0,30
			50	"	—	13	13	—	0,60	0,30
3	20	1	30	20	—	20	—	—	0,04	—
			50	"	—	11	13	—	0,10	0,03
		2	30	"	10	11	13	0,05	0,28	0,08
			50	"	8	11	11	0,03	0,23	0,18
		2	30	"	14	10	10	0,08	0,43	0,20
			50	"	—	—	—	—	—	—
4	50	1	30	"	—	17	100	—	0,04	0,02
			50	"	—	11	100	—	0,10	0,03
		2	30	"	25	10	—	0,04	0,23	—
			50	"	30	10	50	0,03	0,20	0,03
		2	30	"	25	10	30	0,05	0,35	0,03
			50	"	25	10	10	0,05	0,40	0,05
5	100	1	30							
			50							
		2	30							
			50							

VEGDEKKE Jevnt snøpitt dekke kl4. Asfaltlapper  
 FROSTDYBDE 14m ivog  
 SNØDYBDE

STED YSS1  
 DATO 7-3-69

TAB. 2A

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	PAS-HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1	-0,5	1	30							
			50							
		2	30	1,0	25	13	18	7,00	30	13
			50	"	25	20	17	5,00	40	15
		2	30	0,2	15	17	12	7,50	58	20
			50	"	15	25	25	10	48	15
2	10	1	30	2,0	30	17	17	0,30	0,15	0,15
			50	2,0	30	25	17	0,38	0,38	1,61
		2	30	5	30	25	17	0,70	0,60	1,90
			50	"	30	16	16	0,50	0,60	1,90
		2	30	1,0	25	10	20	0,75	0,75	2,00
			50	"	30	10	20	1,50	1,50	2,50
3	20	1	30	20	25	17	25	0,13	0,16	0,23
			50	"	25	17	25	0,23	0,27	0,27
		2	30	5	25	14	17	0,30	0,40	0,40
			50	"	20	17	20	0,50	0,50	0,80
		2	30	"	25	14	14	0,70	0,90	1,20
			50	1,0	30	20	25	1,00	1,00	1,00
4	50	1	30	2,0	50	12	14	0,08	0,05	0,23
			50	"	20	17	20	0,08	0,08	0,15
		2	30	"	12	11	10	0,15	0,35	0,55
			50	"	30	12	12	0,23	0,33	0,60
		2	30	1,0	30	10	12	0,30	0,50	0,60
			50	"	25	10	14	0,30	0,50	0,90
5	100	1	30	2,0	14	10	20	0,13	0,15	0,15
			50	"	12	10	12	0,13	0,11	0,10
		2	30	5	16	10	16	0,15	0,25	0,30
			50	"	16	10	13	0,15	0,20	0,25

VEGDEKKE Jevnt, tendens til sporing kl3-4. Asfaltlapper  
 FROSTDYBDE  
 SNØDYBDE

STED YSS1  
 DATO 22-10-69

TAB. 2B

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED VEGTRAFIKK-FORSØK

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	FAS. HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1	-0,5	1	30	20	4	4	4	0,05	0,58	0,05
			50	"	4	4	4	0,10	1,20	0,10
		2	30	5	12	12	12	0,20	3,80	0,40
			50	"	11	11	11	0,30	4,00	0,40
		2	30	10	—	11	11	—	6,00	0,50
			50	"	10	10	10	0,50	6,50	0,50
2	10	1	30	20	4	4	4	0,04	0,23	0,03
			50	"	4	4	4	0,05	0,30	0,05
		2	30	5	12	11	12	0,08	1,65	0,40
			50	"	12	11	12	0,10	1,60	0,38
		2	30	5	11	9	11	0,45	2,30	0,45
			50	"	10	9	11	0,15	2,70	0,50
3	20	1	30	20	4	4	4	0,03	0,20	0,03
			50	"	5	5	5	0,03	0,33	0,05
		2	30	5	10	10	10	0,05	0,90	0,20
			50	"	11	11	11	0,10	1,08	0,23
		2	30	5	9	9	9	0,10	1,58	0,23
			50	"	9	9	9	0,15	1,62	0,33
4	50	1	30	"	—	4	—	0,14	—	
			50	"	—	5	4	—	0,28	0,18
		2	30	5	11	11	11	0,06	0,76	0,13
			50	"	10	10	10	0,05	0,63	0,10
		2	30	5	8	10	9	0,08	1,30	0,23
			50	"	8	10	9	0,13	1,32	0,25
5	100	1	30							
			50							
		2	30							
			50							

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	FAS. HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST				
					Hz			MM/S				
					T	V	L	T	V	L		
1	-0,5	1	30	10	50	25	10	8,00	3,5	7,00		
			50	"	30	10	17	7,00	3,5	15		
		2	30	"	45	17	13	5,00	3,5	12		
			50	0,2	30	17	20	7,50	3,8	10		
		2	10	1	30	20	17	8	10	0,35	0,33	0,27
					50	"	10	5	8	0,50	0,45	0,35
2	30			5	14	14	13	1,40	2,50	3,40		
	50			"	25	13	13	1,00	3,00	2,80		
2	30			10	25	11	11	1,50	3,50	5,00		
	50			"	20	10	11	1,50	2,75	3,50		
3	20	1	30	20	4	4	5	0,15	0,25	0,18		
			50	"	8	4	13	0,22	0,35	0,22		
		2	30	5	14	10	8	0,25	1,15	1,30		
			50	"	17	13	10	0,30	1,25	1,25		
		2	30	5	10	10	13	1,00	2,80	1,90		
			50	"	9	10	8	1,20	2,80	2,40		
4	50	1	30	20	20	4	5	0,05	0,11	0,08		
			50	"	3	4	4	0,08	0,40	0,13		
		2	30	5	13	8	10	0,18	0,58	0,82		
			50	"	11	9	10	0,22	0,40	0,80		
		2	30	5	7	8	9	0,30	0,67	1,20		
			50	5	25	8	10	0,30	0,80	1,30		
5	100	1	30									
			50									
		2	30									
			50									

VEGDEKKE Overflatejevnhet kl 4  
 FROSTDYBDE 1,35m i veg 0,25m 20m fra veg  
 SNØDYBDE 0,20m 20m fra veg

VEGDEKKE Overflatejevnhet kl 4  
 FROSTDYBDE  
 SNØDYBDE

STED SARPEBAKKEN  
 DATO 18-3-69

STED SARPEBAKKEN  
 DATO 2-10-69

TAB. 2 C

TAB. 2 D

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	PAS.HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST.		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1	-0.5	1	30	20	100	4	100	0,03	0,38	0,03
			50	"	14	5	9	0,08	0,40	0,13
		2	30	5	13	13	10	0,20	5,00	0,90
			50	"	11	10	11	0,30	3,80	0,40
		2	30	10	8	13	17	0,50	6,50	1,00
			50	"	20	13	10	1,00	6,50	1,00
2	10	1	30	20	5	8	4	0,08	0,20	0,05
			50	"	20	7	30	0,05	0,38	0,05
		2	30	"	13	—	10	0,13	1,50	0,25
			50	"	10	10	9	0,10	1,50	0,33
		2	30	5	10	8	9	0,20	2,00	0,40
			50	"	10	8	10	0,15	2,30	0,50
3	20	1	30	20	5	8	5	0,03	0,13	0,05
			50	"	20	10	14	0,05	0,38	0,05
		2	30	"	13	10	11	0,08	1,30	0,13
			50	"	9	13	13	0,05	1,20	0,20
		2	30	"	8	10	7	0,23	1,70	0,25
			50	"						
4	50	1	30	"	7	7	5	0,04	0,03	0,08
			50	"	—	10	5	—	0,05	0,05
		2	30	"	11	10	10	0,05	0,50	0,10
			50	"	13	10	11	0,10	0,40	0,10
		2	30	"	10	8	10	0,20	0,85	0,20
			50	"	16	8	8	0,23	0,95	0,25
5	100	1	30							
			50							
		2	30							
			50							

VEGDEKKE overflatejevnhet kl 0,5-1,0  
 FROSTDYBDE 0,25m 20m fra veg  
 SNØDYBDE 0,60m 20m fra veg

STED KISEBUNN  
 DATO 18-3-69

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	PAS.HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST.		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1	-0.5	1	30	5	50	—	4	1,60	4,60	3,80
			50	"	50	8	5	1,80	5,80	4,80
		2	30	10	25	14	14	10	35	35
			50	"	25	13	13	9	40	34
		2	30	"	20	10	13	13	40	40
			50	0,2	20	11	10	33	105	62
2	10	1	30	20	20	9	20	0,85	0,85	0,83
			50	"	20	14	20	1,00	1,12	0,90
		2	30	5	25	17	12	2,80	3,20	5,20
			50	"	25	14	10	1,90	2,80	4,80
		2	30	10	20	17	11	3,00	6,00	6,00
			50	"	13	17	14	5,00	4,00	7,00
3	20	1	30	20	11	17	11	0,62	0,40	0,65
			50	"	11	14	13	0,65	0,60	0,70
		2	30	20	10	14	17	0,85	2,00	1,20
			50							
		2	30	5	9	13	10	1,20	3,00	2,00
			50	"	9	13	10	1,40	3,20	2,20
4	50	1	30	20	13	10	14	0,20	0,18	0,25
			50	"	16	10	14	0,25	0,25	0,35
		2	30	"	14	14	14	0,55	0,30	0,50
			50	"	14	13	14	0,60	0,85	0,28
		2	30	5	13	14	13	0,60	0,40	0,70
			50	"	17	14	14	0,50	0,90	0,70
5	100	1	30							
			50							
		2	30							
			50							

VEGDEKKE overflatejevnhet kl 0,5-1,0  
 FROSTDYBDE  
 SNØDYBDE

STED KISEBUNN  
 DATO 2-10-69

TAB. 2 E

TAB. 2 F

MÅLEPKT.	AVSTAND VEKANT/M	UJEVNHET	PAS-HAST KM/H.	FORST.	FREKVENB			SVINGEHAST			
					Hz			MM/S			
					T	V	L	T	V	L	
1	0.5	1	30	20	100	9	100	0,01	0,20	0,01	
			50	"	100	5	100	0,01	0,13	0,01	
		2	30								
			50	5	40	13	25	0,30	2,00	0,20	
			30	1,0	—	10	—	—	2,50	—	
			50	11	—	11	—	—	3,0	—	
2	10	1	30	20	70	10	70	0,01	0,05	0,01	
			50	"	—	14	25	—	0,06	0,03	
		2	30	"	11	11	10	0,20	0,53	0,10	
			50	"	11	11	17	0,08	0,65	0,15	
			30	5	10	10	10	0,20	0,70	0,20	
			50	"	10	11	10	0,10	0,60	0,20	
3	20	1	30	20	12	11	11	0,03	0,13	0,05	
			50	"	—	20	13	—	0,05	0,03	
		2	30	"	9	30	10	0,05	0,38	0,30	
			50	"	17	13	13	0,08	0,38	0,28	
			30	"	30	10	10	0,10	0,45	0,63	
			50	"	15	11	11	0,23	0,55	0,23	
4	50	1	30	"	—	—	—	—	—	—	
			50	"	50	14	50	—	0,03	0,01	
		2	30	"	11	10	11	0,06	0,16	0,08	
			50	"	11	13	10	0,05	0,10	0,06	
			30	"	11	9	10	0,08	0,25	0,13	
			50	"	10	10	11	0,13	0,20	0,15	
5	100	1	30								
			50								
		2	30								
			50								

VEGDEKKE *Noen Langsgående ujevnheter 143-4*  
 FROSTDYBDE *1,0 r.s. 1,23 h.s. i veien*  
 SNØDYBDE *0,50 m*

STED *MOTORVEGEN*  
 DATO *7-3-69*

MÅLEPKT.	AVSTAND VEKANT/M	UJEVNHET	PAS-HAST KM/H.	FORST.	FREKVENB			SVINGEHAST		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1	0.5	1	30							
			50	20	100	100	100	0,75	0,50	0,75
		2	30	5	25	25	25	4,00	8,00	8,00
			50	1,0	25	50	30	8,50	17	12
			30	0,2	30	50	17	10	25	12,5
			50	"	20	50	20	15	25	17,5
2	10	1	30	20	30	50	30	0,25	0,03	0,08
			50	"	30	30	30	0,35	0,20	0,23
		2	30	5	30	60	30	0,90	0,50	0,60
			50	"	30	30	50	1,20	0,70	0,60
			30	"	30	30	25	1,30	0,50	0,60
			50	1,0	30	50	30	2,50	1,00	1,25
3	20	1	30	20	30	—	—	0,08	—	—
			50	"	30	6	—	0,10	0,03	0,03
		2	30	"	30	30	30	0,28	0,16	0,13
			50	"	50	60	60	0,35	0,08	0,08
			30	5	30	50	50	0,40	0,10	0,10
			50	"	100	17	50	0,25	0,15	0,10
4	50	1	30	20	25	25	25	0,13	0,03	0,03
			50	"	30	30	25	0,11	0,05	0,05
		2	30	"	25	20	16	0,23	0,13	0,13
			50	"	30	17	25	0,20	0,13	0,18
			30	"	30	25	30	0,48	0,13	0,18
			50	"	30	25	25	0,23	0,17	0,23
5	100	1	30							
			50	"	17	12	13	0,08	0,05	0,08
		2	30	"	25	12	14	0,10	0,08	0,08
			50	"	30	17	17	0,13	0,08	0,10

VEGDEKKE *Sernt grasdekke 1-14*  
 FROSTDYBDE  
 SNØDYBDE

STED *VILBERGMOEN*  
 DATO *22-10-69*

TAB. 26

TAB. 2 H

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	PAS. HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST			
					Hz			MM/S			
					T	V	L	T	V	L	
1	12	1	30	20	100	6	—	0,45	0,50	—	
			50	4	100	10	—	0,08	0,65	—	
		2	30	5	12	12	—	0,10	2,20	—	
			50	4	12	12	—	0,15	2,60	—	
		2	30	4	11	11	—	0,15	3,00	—	
			50	4	12	12	—	0,20	2,30	—	
2	10	1	30	20	5	6	5	0,05	0,15	0,05	
			50	4	8	10	8	0,05	0,23	—	
		2	30	4	12	9	12	0,04	0,58	—	
			50	4	12	9	12	0,08	0,63	—	
		2	30	4	5	8	12	0,05	0,70	—	
			50	5	13	9	12	0,15	2,00	0,10	
3	20	1	30	20	—	11	—	0,03	0,15	—	
			50	4	5	11	—	0,05	0,23	—	
		2	30	4	8	12	9	0,04	0,85	—	
			50	4	12	12	8	0,05	0,90	—	
		2	30	4	7	11	8	0,08	1,30	—	
			50	4	8	10	10	0,10	1,75	—	
4	50	1	30	4	—	10	—	—	0,09	—	
			50	4	—	—	8	—	—	0,05	—
		2	30	4	8	12	—	0,05	0,35	—	
			50	4	—	11	—	—	0,40	—	
		2	30	4	—	9	—	—	0,65	—	
			50	4	—	9	—	—	0,90	—	
5	100	1	30								
			50								
		2	30								
			50								

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	PAS. HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST			
					Hz			MM/S			
					T	V	L	T	V	L	
1	15	1	30	20	—	3	—	—	0,23	—	
			50	4	—	3	—	—	0,15	—	
		2	30	5	—	14	—	—	0,50	—	
			50	4	—	13	11	—	1,00	0,20	
		2	30	4	20	14	16	0,10	1,20	0,20	
			50	4	8	13	50	0,10	2,00	0,20	
2	10	1	30	4	—	—	—	—	—	—	
			50	20	—	13	100	—	0,03	0,03	
		2	30	4	—	10	10	—	0,15	0,05	
			50	4	—	17	17	—	0,10	0,08	
		2	30	4	10	10	11	0,05	0,23	0,11	
			50	4	17	12	20	0,03	0,19	0,08	
3	20	1	30	4	—	—	100	—	—	0,03	
			50	4	—	17	—	—	0,03	—	
		2	30	4	—	13	10	—	0,08	0,05	
			50	4	—	13	13	—	0,10	0,08	
		2	30	4	—	10	10	—	0,20	0,09	
			50	4	—	14	17	—	0,10	0,08	
4	50	1	30	4	—	20	—	—	—	—	
			50	4	—	—	—	—	—	—	
		2	30	4	—	10	—	—	0,05	—	
			50	4	—	7	8	—	0,04	0,03	
		2	30	4	—	9	14	—	0,06	0,04	
			50	4	—	10	11	10	0,03	0,10	0,04
5	100	1	30								
			50								
		2	30								
			50								

VEGDEKKE Ujernet dekke kl 2  
 FROSTDYBDE 1,28 m i veg 0,15 m 20 m ut  
 SNØDYBDE 0,9 m

VEGDEKKE Overflatejevnhet R12  
 FROSTDYBDE 1,33 m i veg 0,2 m 20 m ut  
 SNØDYBDE 0,95 m 20 m ut

STED GULLI  
 DATO 20-3-69

STED SEMSLETTA  
 DATO 6-3-69

TAB. 2 I

TAB. 2 J

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED VEGTRAFIKK-FORSØK



MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	FAS HAST KM/H.	FORST.	FREKVENB			SVINGEHAST			
					Hz			MM/S			
					T	V	L	T	V	L	
1	0.5	1	30	20	100	20	20	0,03	0,33	0,05	
			50	"	17	6	17	0,10	0,55	0,08	
			30	5	-	10	14	-	1,20	0,40	
			50	"	17	14	11	0,10	2,60	0,30	
			30	1,0	-	9	-	-	2,00	-	
			50	"	-	10	-	-	3,00	-	
2	10	1	30	20	-	5	-	-	0,08	-	
			50	"	14	10	14	0,03	0,20	0,05	
			30	5	-	10	10	-	0,40	0,10	
			50	"	-	11	14	-	0,50	0,20	
			30	"	-	11	7	-	0,40	0,20	
			50	"	-	11	14	-	0,80	0,20	
3	20	1	30	20	-	10	100	-	0,15	0,03	
			50	"	-	13	50	-	0,13	0,03	
			30	"	-	8	10	-	0,30	0,08	
			50	"	-	11	11	-	0,35	0,10	
			30	"	-	8	10	-	0,40	0,08	
			50	"	-	10	9	-	0,55	0,18	
4	50	1	30	"	-	14	100	-	0,05	0,03	
			50	"	-	10	100	-	0,08	0,03	
			30	"	-	9	9	-	0,20	0,04	
			50	"	-	8	10	-	0,25	0,04	
			30	"	-	8	-	-	0,35	-	
			50	"	-	10	-	-	0,25	-	
5	100	2	30								
			50								
			30								
			50								

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	FAS HAST KM/H.	FORST.	FREKVENB			SVINGEHAST		
					Hz			MM/S		
					T	V	L	T	V	L
1			30							
			50							
			30	1						
			50	"						
			30	2						
			50	"						
2	10	1	30							
			50							
			30	1						
			50	"						
			30	2						
			50	"						
3	20	1	30							
			50							
			30	1						
			50	"						
			30	2						
			50	"						
4	50	1	30							
			50							
			30	1						
			50	"						
			30	2						
			50	"						
5	100	2	30							
			50							
			30							
			50							

VEGDEKKE *Nee 15 i målekjørebane. Mindre hull i isen* *subtle*  
 FROSTDYBDE *1,25 i veg 0,42 m 20 m fra veg*  
 SNØDYBDE *0,3 m 20 m fra veg*

VEGDEKKE \_\_\_\_\_  
 FROSTDYBDE \_\_\_\_\_  
 SNØDYBDE \_\_\_\_\_

STED *KJELLSTADVEGEN*  
 DATO *6-3-69*

STED \_\_\_\_\_  
 DATO \_\_\_\_\_

TAB. 2 K

TAB. 2

MÅLEPKT.	AVSTAND M	PEL NR.	PELENGDE M	FALLH. CM	NEDF.L. M	FORST.	FREKVENNS Hz			SVINGEH. MM/S		
							T	V	L	T	V	L
	2	8	13	50	2	10	30	25	20	10,0	25,0	38,0
				"	5	"	25	30	16	22,5	37,5	50,5
				"	8	"	30	30	25	40,0	12,5	17,5
				"	10	"	12	17	30	7,5	5,0	6,3
				"	11	0,2	30	50	30	11,5	8,5	6,5
				"	12	"	30	50	25	7,0	14,5	13,0
				"	13	"	30	-	50	8,0	12,5	12,5
				x100	13	10	30	50	50	11,0	7,0	6,5
	5	9	15	50	1	"	50	-	30	3,5	6,5	6,5
				"	4	"	30	50	20	3,5	14,0	9,0
				"	7	"	30	50	50	2,3	11,0	5,5
				"	9	"	30	50	40	5,0	10,0	6,0
				"	11	"	30	50	50	2,5	3,0	3,0
				"	13	"	50	30	30	4,5	2,5	2,5
				"	14	"	30	50	30	2,5	2,0	2,5
				"	15	"	50	50	30	2,0	3,0	2,0
				x100	15	"	25	50	30	1,5	3,0	2,5
	10	10	15	50	4	5	-	5	25	-	1,9	2,7
				"	7	"	-	20	30	-	0,7	2,1
				"	11	"	25	14	25	3,1	1,9	1,9
				"	13	"	18	50	16	4,0	1,2	2,6
				"	14	1,0	33	30	50	0,7	0,4	0,5
				x100	15	"	40	25	25	0,7	0,4	0,7
	20	11	15	50	1	5	50	50	33	1,0	1,2	1,0
				"	3	"	40	25	-	1,5	1,3	0,9
				"	5	"	-	11	-	2,0	1,7	1,4
				"	9	"	33	50	-	0,7	0,6	0,6
				"	11	"	67	-	-	1,0	0,7	0,5
				"	13	"	67	50	50	1,4	0,7	0,6
				"	15	"	50	50	50	2,6	1,2	1,1
	50	12	18	"	1	5	17	39	13	0,4	0,3	0,3
				"	5	"	20	25	13	0,4	0,3	0,5
				"	7	"	26	25	25	0,3	0,3	0,3
				"	10	20	26	-	-	0,2	0,2	0,2
				"	12	"	20	29	29	0,2	0,1	0,1
				"	15	"	18	25	-	0,3	0,2	0,2

LODDVEKT 3t  
 ANTATT VIRKN.GRAD 0,6  
 PELDIAM. 23cm pelnr 8 28cm  
 X ANGIR MEISLING

STED TOKERUD  
 DATO 13-10-69

TABELL 3A

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED PELERAMMING

MÅLEPKT.	AVSTAND M	PEL NR.	PELLENGDE M	FALLH. CM	NEBR.L. M	FORST.	FREKVENNS Hz			SVINGEH. MM/S		
							T	V	L	T	V	L
	2	10	12 x	25	12	5	50	50	50	3,4	2,4	3,8
	5	6	12 x	25	"	"	100	100	100	3,0	1,4	2,8
			12 x	70	"	"	100	100	100	3,0	3,6	4,0
	10	4	12 x	25	"	"	50	50	50	3,4	3,2	2,0
			12 x	40	"	"	50	50	50	3,4	2,3	2,0
			12 x	70	"	"	100	50	50	3,4	2,3	1,7
	20	5	12 x	40	"	"	100	50	50	2,2	1,6	1,6
			12 x	80	"	"	100	50	60	1,7	1,5	1,5
	50	2	12 x	40	"	"	50	50	50	0,7	0,5	0,7
			12 x	"	"	"	50	50	50	0,5	0,4	0,4
				60	1	"	40	50	50	0,6	0,5	0,8
				60	3	"	40	30	40	0,7	0,7	1,0
				50	6	"	30	20	40	0,7	0,6	1,0
				"	7	"	100	75	50	0,7	0,5	0,7
	50	x	13	"	9	"	100	25	30	0,4	0,4	0,9
				"	10	"	30	25	25	0,4	0,2	0,3
				"	11	"	50	30	30	0,2	0,2	0,2
				"	12	"	50	50	50	0,3	0,2	0,2
			x	"	13	"	50	50	50	0,4	0,2	0,2

LODDVEKT 3t  
 ANTATT VIRKN. GRAD 0,6  
 PELDIAM. 23cm pel nr 6 28cm  
 X ANGIR MEISLING

STED TOKERUD  
 DATO 10-10-69

TABELL 3 B

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED PELERAMMING

MÅLREKT.	AVSTAND M	PEL NR.	PELLENGDE M	FALLH. CM	NEDR.L. M	FORST.	FREKVENNS Hz			SVINGEH. MM/S		
							T	V	L	T	V	L
1	5	14	14	150-200	1/2L	0,2	9	20	8	17,5	30,0	45,0
							25	5	13	20,0	60,0	107
							14	25	17	52,5	80,0	62,5
							20	17	20	40,0	40,0	42,5
							20	65	20	25,0	35,0	25,0
5	6	14	14	150	1/3L	1,0	25	50	13	5	7,0	5,0
							30	13	25	5,5	8,0	9,0
							30	14	25	4,5	8,0	13,0
15	6	14	14	150	1/2L	5	17	13	14	1,8	1,6	1,7
26	6	14	14	150	1/3L	20	50	11	20	1,8	1,0	2,3
							20	20	25	1,0	0,9	0,8
50	7	14	14	150	1/3L	20	13	10	30	0,3	0,3	0,2
							11	10	14	0,7	0,8	0,6
							14	10	17	0,8	0,8	0,8
							13	10	10	0,8	0,8	0,7
							16	10	20	0,6	0,7	0,8
							20	9	13	0,7	0,5	0,6

LODDVEKT 1,754  
 ANIATT VIRKN.GRAD 0,4  
 PELDIAM. \_\_\_\_\_  
 X ANGIR MEISLING

STED GULSVIK BRU  
 DATO 3-11-69

TABELL 3C

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED PELERAMMING



MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENNS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
1	0,2	50							
		75							
		100							
2	1,0	50							
		75							
		100							
3	5	50							
		75							
		100							
4	10	50							
		75							
		100							

MÅLEPKT.	AVSTAND I M	FALLHØYDE I CM	FORSTERKN.	FREKVENNS Hz			SVINGEHAST. MM/S		
				T	V	L	T	V	L
5	20	50							
		75							
		100							
6	50	50							
		75							
		100							
7	100	50							
		75							
		100							

STED: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 DATO : \_\_\_\_\_

TAB. 1

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED FALLODD - FORSØK

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	FAS. HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST								
					Hz			MM/S								
					T	V	L	T	V	L						
1			30													
			50													
			1	30												
				50												
			2	30												
				50												
2	10		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													
3	20		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													
4	50		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													
5	100		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													

MÅLEPKT.	AVSTAND VEGKANT M	UJEVNHET	FAS. HAST KM/H.	FORST.	FREKVENNS			SVINGEHAST								
					Hz			MM/S								
					T	V	L	T	V	L						
1			30													
			50													
			1	30												
				50												
			2	30												
				50												
2	10		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													
3	20		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													
4	50		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													
5	100		30													
			50													
		1	30													
			50													
		2	30													
			50													

VEGDEKKE \_\_\_\_\_  
 FROSTDYBDE \_\_\_\_\_  
 SNØDYBDE \_\_\_\_\_

VEGDEKKE \_\_\_\_\_  
 FROSTDYBDE \_\_\_\_\_  
 SNØDYBDE \_\_\_\_\_

STED \_\_\_\_\_  
 DATO \_\_\_\_\_

STED \_\_\_\_\_  
 DATO \_\_\_\_\_

TAB. 2

TAB. 2

TABELL FOR REGISTRERTE MÅLINGER VED VEGTRAFIKK-FORSØK

