

LJUDTRYCKVÅGORS UTBREDNING VID DETONATION
AV LADDNINGAR PÅ MARKEN OCH DESS STÖRANDE
INVERKAN PÅ MÄNNISKOR OCH BEBYGGELSE.

Algot Persson och Lars-Åke Almgren

DS 1971:9

9.3.1971

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN — 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

LJUDTRYCKVÅGORS UTBREDNING VID DETONATION
AV LADDNINGAR PÅ MARKEN OCH DESS STÖRANDE
INVERKAN PÅ MÄNNISKOR OCH BEBYGGELSE.

Algot Persson och Lars-Åke Almgren

DS 1971:9

9.3.1971

Sammanfattning

Rapporten behandlar utbredningen av ljudvågor från en detonerande laddning på marken, samt den meteorologiska situationens inverkan på ljudtrycket.

En lång serie försök har utförts med sprängladdningar varierande från 20-500 kg varvid såväl ljudtryck som vibrationer (i byggnader) har uppmätts på avstånd från 1.5 till 15 km från detonationsplatsen. Av resultaten framgår att ändringar i väderlekssituationen inverkar betydligt mera på det maximala ljudtrycket än en variation i laddningsvikten.

De inrapporterade skadorna är av samma typ som observerats i samband med överljudsflygningar. Undersökningarna visar att även små ljudtryck förmår att sätta byggnadsdelar i svängning, och att dessa för byggnaden ofarliga vibrationer förstärker människans intryck av ljudvågspassagen. Något egentligt erfarenhetsmaterial för bedömning av skador saknas, men i likhet med de erfarenheter som gjorts på andra håll i världen kan ljudtryckvågor från detonerande laddningar liksom från överljudsplan i enstaka fall vara den utlösande faktorn för smärre byggnadsskador.

1. Inledning
2. Atmosfärens inverkan på ljudets utbredning från en detonerande laddning
3. Mätningarnas syfte och omfattning
4. Mätapparatur och mätresultatens presentation
5. Försök att med hjälp av vind och temperaturprognoser förutsäga ljudutbredningen
6. Ljudvågens trycktidförlopp och maximaltryck på olika avstånd från laddningen
7. Ljudvågens inverkan på byggnader
8. Byggnadsskador och bedömning av dessa
9. Hur människan upplever ljudtryckvågen
10. Vilka möjligheter finns att dämpa bullret ?

1. Inledning.

En detonerande laddning ger liksom flygplan i överljudsfart upphov till en ljudtryckvåg. Denna kan vara störande för människor som utsättes för den och i extrema fall kan den orsaka skador på byggnader. Stiftelsen Svensk Detonikforskning har under hösten 1970 utfört mätningar av ljudtryck och vibrationer i byggnader på orter mellan 1,5 - 15 km:s avstånd från Nitro Metalls skjutfält i Nyberget. Skador av mycket olika slag såsom spräckta glastrutor, putsfall, sprickor i skorstenar, nedfallande föremål, förskjutningar i jorden m.m. har här inrapporterats men i samband med mätningarna har dock inga byggnadsskador kunnat iakttas. Den gångna försöksperioden visar att de meteorologiska förhållandena i mycket hög grad bestämmer ljudets utbredning. De uppmätta ljudtrycken har inte stora amplituder (0.03 - 0.8 mbar) på avlägsna orter men vållar uppenbart irritation på människor som befinner sig inomhus. Vibrationsmätningarna visar att ljudtryck om 50 μ bar åstadkommer svängningsrörelser i byggnadsdelar.

Om laddningarnas storlek är 50 eller 500 kg tycks vara av underordnad betydelse jämfört med atmosfärens inverkan på det resulterande ljudtrycket runt skjutplatsen.

2. Atmosfärens inverkan på ljudets utbredning från en detonerande laddning.

Då en sprängladdning detonerar ger den upphov till en stötvåg med brant tryckfront och hög utbredningshastighet, (2000-7000 m/s). Men redan några hundra meter från laddningen har såväl stötvågens amplitud som hastighet avtagit kraftigt. Vid detonation av 1 ton trotyl t.ex. är på 200 meters avstånd maximala stöttrycket endast 45 mbar och stötvågens hastighet endast någon procent större än ljudhastigheten. Vartefter stötvågen utbreder sig genom luften försvinner den branta front som är karakteristisk för en stötvåg. På stort avstånd från laddningen kan man därför inte tala om en stötvåg utan om en ljudimpuls. Fig. 1 visar stötvågens respektive ljudvågens utseende på olika avstånd i skogsterräng.

Ljudets utbredning genom atmosfären har varit föremål för upprepat studium oftast i samband med artillerield, bombfällning eller demoleringssprängningar.

Avböjning och fokusering av ljudet till följd av de atmosfäriska förhållandena har behandlats av bl.a. Rothwell /1/, Cox /2/, Perkins /3/ och Rydgren /4/.

Om en laddning detonerar på marken och ljudvågen får utbreda sig i stillastående luft med konstant temperatur och fuktighet kommer ljudvågen att ha formen av en halvsfär som fig. 2a visar där ljudstrålarna anger riktningen för normalen till ljudtrycksfronten. Vid en sådan ostörd utbredning kan ljudtrycket på stora avstånd beräknas ur följande enkla samband som anses gälla för skogsterräng /5/.

$$p = 700 \frac{(0,6 Q)^{1/3}}{R} \text{ mbar} \quad (1)$$

där Q är laddningsvikten i kg, R är avståndet i m.

Ljudhastigheten varierar med såväl temperatur som fuktighet. Men enligt Rydgren /4/ kan inverkan av fuktigheten försummas då luftfuktigheten sällan överstiger värdet $30 \cdot 10^{-3}$ g vattenånga per g luft.

Ljudhastigheten vid temperaturen $t^{\circ}\text{C}$ kan då beräknas ur sambandet

$$c_t = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2)$$

där c_0 är ljudhastigheten vid 0°C och t temperaturen i $^{\circ}\text{C}$.

Om temperaturen ökar lineärt med höjden så ökar också ljudhastigheten lineärt (som i fig. 2b) och en avböjning av ljudstrålarna mot marken äger rum. Om en ljudstråle bildar vinkeln θ mot horisontalplanet kommer den enligt Perkins /3/ åter att träffa marken på avståndet

$$R = 2(c_1/K) \tan \theta \quad (3)$$

där c_1 är ljudhastigheten i markplanet och K är ljudhastighetsgradienten. Det ljud som träffar marken reflekteras upp i luften på nytt och kommer, givetvis efter viss dämpning, att nå marken igen. Sålunda kommer markplanet att mottaga ljudenergi från en större rymdvinkel och ljudtrycket förstärks som i fig. 2b. Omvänt kan praktiskt taget allt ljud avböjas uppåt om temperaturen avtar med höjden fig. 2c. Om ljudhastighetsgradienten är både positiv och negativ som i fig. 2e kan en zon med förstärkt ljudtryck uppstå.

Hittills har vi förutsatt att luftmassorna ligger stilla. Oftast är luften i rörelse och man måste då addera vindhastighetens komponent u till ljudhastigheten i den riktning som man är intresserad av. I ett vertikalplan parallellt med vindriktningen kan då utbredningen bli som fig. 2d. Den meteorologiska situation är dock sällan så enkel som i fig. 2a-d, vilket gör att man knappast kan göra någon manuell beräkning av ljudutbredningsförhållandena vid tidpunkten för avfyrning av en stor laddning. Perkins /3/ har visat att man med hjälp av en analogcomputer kan beräkna ljudutbredningen vid ett antal för orten karakteristiska ljudhastighetsgradienter. Computerns resultat kan sedan vid de flesta skjuttilfällen användas för att avgöra om skjutning bör tillåtas. En sådan metod bygger emellertid på en uppmätning av vindhastighet och lufttemperatur på upp till 5 km:s höjd med hjälp av radiosondballonger, vilket kräver en speciell instrumentering. Väderlekssituationen skiftar emellertid så snabbt att även en prognos baserad på noggranna mätningar kan vara giltig högst för någon eller några timmar.

3. Mätningarnas syfte och omfattning.

Syftet med mätningarna har varit att undersöka hur höga ljudtryck som detonationerna vid skjutplatsen ger upphov till på stora avstånd samt hur ljudtrycksvågen påverkar byggnader i dess väg. Kartorna i fig. 3 och 4 visar läget av de orter där mätningar utfördes. Mätningarna ägde rum vid några olika tillfällen under hösten 1970, men även kontinuerlig mätning av ljudtryck och vibrationer har utförts på en ort, Siggebohyttan, 11 km från skjutplatsen. Nitro Metalls kontorsbyggnad vid Svartbergsfallet är en av byggnaderna som ligger närmast skjutplatsen och maximalljudtryck om 2-5 mbar är på denna ort ofta förekommande. I denna byggnad gjordes försök att med ett flertal geofoner studera hur byggnaden beter sig när den utsättes för ljudtrycksvågen.

4. Mätapparatur och mätresultatens presentation.

Blockschemat i fig. 5 visar mätutrustningen för samtidig ljudtrycks- och vibrationsmätning. Kondensatormikrofonen, som är helt sluten, har tillsammans med bärfrekvensförstärkaren en rak frekvenskurva mellan 0.01 p/s - 7000 p/s $\pm$ 1,5 dB, UV-skrivarens galvanometrar begränsar emellertid den raka frekvenskurvan uppåt till 400 p/s, vilket dock är tillräckligt vid mätning på stora avstånd från laddningen. Mikrofonens placering bör beaktas. Vid alla mättillfällen var mikrofonen placerad fritt från byggnader och andra större föremål utom vid en försöksserie då de två mikrofonerna placerades 0.4 m från väggarna som fig. 6 visar.

Inverkan av en "skuggande" yta framgår vid jämförelse mellan de värden som uppmätts av de båda mikrofonerna (se tabell 1).

Geofonernas utsignal är proportionell mot svängningshastigheten och signalens polaritet beror av geofonens rörelseriktning. I skrivardiagrammen är sambandet mellan rörelseriktning och polaritet enligt fig. 7.

Frekvenskurvan för signalen från geofonen är rak mellan 10 och 400 p/s på någon % när. Vid 5 p/s har utsignalen sjunkit till 67% av värdet mellan 10 och 400 p/s. Geofonerna monterades i ett aluminiumblock, vilket skruvades fast mot någon byggnadsdel, företrädesvis någon del som var förbunden med byggnadens stomme. Vertikalt orienterade geofoner användes för att studera eventuella markvibrationer till följd av detonationen eller ljudvågens inverkan på markytan. Geofonerna monterades då på jordspett eller grundmur.

För långtidsregistrering av ljudtryckvågor användes en barograf tidigare beskriven i rapport DS 1970:10 /6/ med ett mätområde av 2-100 mbar. Barografen har under en tid av c:a 3 månader varit placerad på norra långväggen av Siggebohyttans huvudbyggnad. Under samma tid har en s.k. ampligraf för registrering av den maximala horisontella svängningsamplituden varit placerad i samma byggnad, dels på norra långväggen dels på västra skorstensstocken alldeles under takåsen. Både geofonerna och ampligrafen placerades i allmänhet så att deras rörelseriktning i möjligaste mån var parallell med normalen till ljudvågen.

Följande meteorologiska observationer på mätplatsen gjordes vid varje mätillfälle: lufttryck, lufttemperatur, vindriktning, vindhastighet och väder-typ.

Resultaten av ljudtrycksmätningarna redovisas i tabellerna 1 och 2. I tabell 1 finns förutom ljudtryckets maximalamplitud, laddningsvikt, avstånd till skjutplats, även de meteorologiska observationerna och gångtiden för ljudet. Härvid menas med gångtid, tiden från det laddningen avfyras till dess att den första ljudpulsen når mätplatsen. Tiden bestäms ur skrivardiagrammet, i vilket en markering gjorts vid avfyringsögonblicket, med en noggrannhet av ± 0.1 s. Tabell 2 är en sammanställning av de ljudtryck som återfinns i tabell 1 och de i tidigare rapport /5/ redovisade ljudtrycken. Man kan i tabell 2 jämföra de uppmätta trycken med de enligt sambandet (1) beräknade maximetrycken, vilka motsvarar en av vind- och temperaturgradienter opåverkad utbredning.

De vibrationsmätningar som utfördes samtidigt med ljudtrycksmätningarna i tabell 1 återfinns i tabell 3. Med hjälp av de ur diagrammen bestämda frekvenserna har amplituden A beräknats ur sambandet $A = \frac{v}{2\pi f}$ där v är svängningshastighet (mm/s) och f är frekvensen (p/s) och A amplituden (mm). Vibrationsmätningarna med ampligraf redovisas i stapeldiagrammen 1-4 (fig. 16-19). Staplarna till vänster om tidsaxeln anger maximalamplitud i μ (tusendels mm) avsatt vid den tidpunkt då värdet registrerades och staplarna åt höger anger laddningsvikten vid tidpunkten för detonationer vid skjutplatsen i Nyberget. Datum för mätningen anges till höger om diagrammet. Endast dagtimmarna (08⁰⁰-16⁰⁰) återges då vid andra tidpunkter på dygnet inga utslag kunde observeras.

Den långtidsregistrerande barografen hade under mätperioden inte givit något utslag. Då det minsta ljudtryck som kan avläsas är c:a 2 mbar kan man endast konstatera att ljudtrycket inte någon gång överstigit detta värde. Tabell 4 visar resultat av vibrationsmätningarna på kontorshuset i Svartbergsfallet. Tabellen visar max.svängningshastigheten, frekvensen och beräknad amplitud samt max.ljudtrycket vid norra och södra gaveln.

5. Försök att med hjälp av vind och temperaturprognoser förutsäga ljudutbredningen.

Från Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institution (SMHI) kan erhållas prognos om vindriktning, vindhastighet och lufttemperatur för olika höjd över en ort. Dessa uppgifter baserar sig på radiosondmätningar över ett antal orter i Sverige. Mätresultaten matas in i en datamaskin var 12:e timme. De höjder som SMHI lämnade prognos för var 1000, 1500, 3000 och 5000 m ö.h. Under 1000 m var man inte villig att göra någon prognos på grund av terrängens inverkan på luftströmningen. Den 21 och 22 oktober gjordes försök att med hjälp av en sådan prognos från SMHI förutsäga utbredningen av ljudet från Nyberget i riktning mot Siggebohyttan (bäring 172° från skjutplatsen). Prognosen som erhöles kl 7⁰⁰ på morgonen ansågs gälla för kl 12⁰⁰ och någon timme före och efter detta klockslag. Ljudhastigheten som funktion av höjden beräknades med hjälp av erhållna temperatur- och vinddata och för bäring 172° skulle hastighetsgradienten vara negativ från marken och uppåt som diagrammet fig. 8 visar. Detta borde ge till resultat en mycket liten ljudnivå på stora avstånd då ljudet i detta fall skulle böja av uppåt som i fig. 2c.

Mätningarna i Siggebohyttan gav ett helt annat resultat än vad denna prognos antydde. Vid två av skotten var maximala ljudtrycken större än det för ostörd utbredning beräknade.

Även utseendet på tryck-tidförloppet tydde klart på att en stor del av ljudet avböjts ned mot marken istället för uppåt som beräkningarna visade. Prognosens stora svaghet var att uppgifter för luftskiktet mellan 200 m.ö. havet (marknivå) och 1000 metersnivån saknades. Tillståndet i luftskiktet mellan 200-1000 m kan således inte förbises. Utbredningsförhållandena ändras emellertid snabbt varför en prognos knappast kan vara giltig mer än en eller två timmar. Som framgår av ljudtrycksmätningarna vid Svartbergs-fallet den 25 november visar registreringarna avtagande max.ljudtryck mot eftermiddagen för oförändrad laddningsstorlek (se tabell 1 och 2).

I detta fall berodde ändringen i ljudnivå sannolikt mest på den avtagande vinden. Vid mätningarna i Siggebohyttan 21 oktober erhöles kl 10⁰⁰ 0.56 mbar och kl 10⁴⁰ 0.35 mbar max.ljudtryck från samma laddningsvikt, 260 kg, d.v.s. en minskning med 38% bara efter en halv timme. En prognos för ljudutbredningen bör således baseras på noggranna mätningar av lufttemperatur och vinddata med små höjdintervaller upp till minst 3000 meters höjd och bör göras så nära tidpunkten för detonation som möjligt.

6. Ljudvågens trycktidförlopp och maximaltryck på olika avstånd från skjutplatsen.

Registreringarna av ljudvågornas trycktidförlopp som gjorts på olika orter visar hur ljudutbredningen genom atmosfären påverkar detta. På ett avstånd av någon km från skjutplatsen (se fig. 1b) har ljudpulsen fortfarande utseendet av ett N åtföljt endast av några mindre svängningar härrörande från reflexioner i terrängen. Av örat uppfattas denna ljudpuls som en skarp knall. På större avstånd däremot har ljudet genom reflexion eller genom avböjning i atmosfären nått fram till mätpunkten på olika vägar och ljudpulsen är sammansatt av ett antal N-vågor som mer eller mindre interferera med varandra och ger till resultat en utdragen ljudpuls bestående av flera svängningar, (fig. 1c). Örat uppfattar denna som ett mullrande ljud likt åska.

På de orter där den ljudvåg som fortplantats utmed marken ligger i fas med den som avböjts ned genom atmosfären kommer en förstärkning av ljudtrycket att observeras. Trycktiddiagrammen på avståndet 7-11 km börjar med trycksvängningar av låg amplitud. Därefter följer några kraftiga trycksvängningar. Det totala förloppet har en varaktighet av en halv till en sekund.

Ofta kan man konstatera att de negativa svängningarna har den största amplituden. Därför har i tabellen på några orter angivits även den negativa amplituden, då den varit störst. Atmosfärens inverkan på ljudutbredningen avspeglar sig även i de uppmätta gångtiderna som kan variera från timme till timme, vilket framgår av tabell 1, (Siggebohyttan 21/10). I detta fall är det den avtagande vinden som påverkat ljudhastigheten. Skillnaden i gångtid mellan mätningarna den 21/10 och 22/10 däremot beror på att man bytt skjutplats. Avståndet mellan skjutplatserna är c:a 500 m vilket också framgår av tabellen.

Ett exempel på hur trycket kommer att fördela sig över ett hus i något ögonblick då tryckvågen passerar ges i fig. 9. Detta är trycktidförloppet M_1 i fig. 10 men uppritat med trycket som funktion av vägen. Figuren är en skalenlig skiss av den fastighet vid Svartbergsfallet som varit föremål för mätningar. Tryckvågen åstadkoms genom detonation av 90 kg sprängämne på 1.6 km:s avstånd. Ljudvågens längd vid denna laddningsstorlek är av samma storleksordning som husets, vilket medför att man på ena sidan av huset kan ha ett övertryck medan man på den andra har ett undertryck. Detta framgår av fig. 10 som visar trycktidförloppet för de två mikrofoner som i fig. 6 betecknats med M_1 och M_2 . Om vi jämför den positiva och negativa delen av N-vågen i fig. 10 ser vi att den positiva har kortare varaktighet än den negativa. Jämför vi den positiva pulslängden framför och bakom huset finner vi att bakom huset (M_2) är den positiva pulsen något längre. Man brukar som frekvens f för en tryckpuls av N-typ ange $f = \frac{1}{2t_+}$ där t_+ är längden på den positiva delen av pulsen. I tabell 5 finns en sammanställning av frekvenser beräknade ur positiva pulslängden och svängningstiden för den kompletta N-vågen i de olika försöken.

Av sammanställningstabellen över samtliga mätningar (tabell 2) framgår att i endast 33% av mättillfällena maximala ljudtrycket överskridit det ur sambandet (1) beräknade värdet. Vid samtliga dessa mätningar var vindriktningen från skjutplats mot mätplats. Då stark medvind rådde har ljudtrycken överstigit de beräknade med mer än en tvåfaktor. I ungefär 43% av mätningarna har värdena varit lägre än det beräknade och i 25% betydligt lägre. I dessa fall har vinden antingen varit motsatt riktad ljudet eller vinkelrätt mot riktningen mellan ljudkälla och mätplats. Även om vinden i alla dessa mättillfällen tycks haft en avgörande verkan på ljudutbredningen kan ej inverkan av temperaturgradienter försummas. Inverkan av temperaturen kan genom dessa försök inte verifieras då någon temperatursondering av luftskikten över marken inte kunnat utföras.

Den kontinuerliga mätningen av ljudtrycket med barograf vid Siggebohyttan visar att maximitrycket inte någon gång överstigit 2 mbar på platsen. Maximala storleken av de laddningar som avfyrats har varit 500 kg. Enligt det använda sambandet skulle detta ge ett maximitryck av 0.42 mbar. Förstärkningen av ljudet genom avböjning i atmosfären har således inte någon gång under mätperioden varit så stor som en 5-faktor. Maximitrycken som registrerats av de båda mikrofonerna vid huset i Svartbergsfallet förhåller sig som ungefär 2:1. Härav kan man dock inte dra den slutsatsen att mikrofonen vid den vägg som först träffas av tryckvågen visade ett reflexionstryck lika med dubbla trycket i fri luft, då man inte vet hur mycket vågen dämpas vid passage av huset.

Om man bortser från de amplituder som uppmätts vid Svartbergsfallet är maximitrycken måttliga och inte större än vad man kan vänta sig i en ljudbang från ett flygplan i överljudsfart på 10 km:s höjd (c:a 1 mbar). Ljudbangens trycktidförlopp är likartat ljudvågens vid små avstånd från laddningen (fig. 1a).

7. Ljudtryckvågens inverkan på byggnader.

När ljudtryckvågen passerar en byggnad i dess väg kommer tak, väggar och fönster att sättas i svängning. Hur stora tryck-amplituder som erfordras för att få ett byggnadselement i svängning beror givetvis på konstruktionen, men vid en amplitud om 50 μ bar har svängningar i väggar och skorstenar registrerats i trähus, se tabell 3, mätplats Stubbre, och /7/.

Bästa sättet att bedöma skaderiskerna är givetvis att studera vad varje enskilt byggnadselement får för acceleration, svängningshastighet och amplitud. Detta skulle emellertid medföra en mycket stor mätutrustning med ett stort antal mätpunkter. Mätresultaten skulle dessutom till mycket stor del vara representativa endast för den studerade byggnaden. Med ett mindre antal givare till förfogande uppstår då frågan var man skall placera ut givarna för att få en så god bild som möjligt av husets rörelse när tryckvågen anländer. Om vi betraktar en vägg som ett membran kommer den största rörelsen givetvis att uppstå mitt på väggelementet som fig. 12a visar. Det är alltså lämpligt att sätta en givare på denna plats för att studera väggens intryckning. För att avgöra om huset skjuvasbör någon givare placeras i stömmen så högt som möjligt (fig. 12b) t.ex. i en gavelspets, i en knut eller i skorstenen om denna är så fast förbunden med huset att den kan förväntas följa med i en skjuvningsrörelse.

En givare med rörelseriktning parallellt med en vägg bör också kunna visa om skjuvning uppstår. Vid de samtidiga tryck och vibrationsmätningarna har vi placerat givarna efter dessa principer, dessutom så att givarnas rörelseriktning bildat minsta vinkel med stötvågens infallsriktning. Av resultaten framgår att skorstenar kommer i svängning redan vid små tryckamplituder. Då den yta skorstenen projicerar mot tryckvågen är liten jämfört med byggnadens övriga ytor är det uppenbart att det är byggnadens rörelse, som sätter skorstenen i svängning. Mätningarna vid Siggebohyttan där ampligraf och geofon placerats alternativt på husväggen och i skorstenen visade att den kraftiga timmerväggen gav små rörelser jämfört med övre delen av den kraftiga skorstenen. Stapeldiagrammen 1-4 (fig. 16-19) visar maximala svängningsamplituderna som avlästs vid olika tidpunkter, jämförda med anteckningarna om laddningsvikt och tid för detonationerna i Nyberget enligt skjutjournalen. Som framgår av diagrammen är max.-amplituderna genomgående mindre på väggen än i skorstenen för lika stora laddningsvikter. Samtidig mätning med geofon på vägg och i skorsten bekräftar detta förhållande, (tabell 3). Trots vissa avvikelser i tidpunkterna visar diagrammen att större delen av de registrerade max.-amplituderna beror på ljudtryckvågor från detonationerna vid Nyberget. Variationerna i amplitud vid samma laddningsvikt beror givetvis på att den meteorologiska situationen växlat. De största amplituderna har med all sannolikhet registrerats vid nordliga vindar.

En god bild av hur ett hus rör sig får man av mätningarna på Nitro Metalls kontorshus i Svartbergsfallet. Sju stycken geofoner var utplacerade i enlighet med fig. 6, därav tre stycken mitt på och vinkelrätt mot väggytor. Monteringsblocken fästades i fönsterfodren som var spikade mot stommen. En geofon var placerad på södra gaveln horisontellt och parallellt väggytan. Tre geofoner, en vertikal, två horisontella, placerades i skorstensstocken tätt under taket. Geofonerna har numrerats 1-7 och svängningsförloppen i fig. 10 och 11 har försetts med samma nummer. Trycktidförloppet för ljudvågen som orsakat svängningarna har markerats M_1 , M_2 . Laddningen på 90 kg avfyrares på 1.6 km:s avstånd som tidigare nämnts. Som man ser av fig. 10 svänger vägarna med någon grundfrekvens överlagrad med en eller flera andra frekvenser härrörande från konstruktionen. I tabell 5 har de ur diagrammen bestämda frekvenserna och svängningshastigheterna sammanställts. Amplituden A har beräknats dels ur $A = \frac{v}{2\pi f}$ där v är svängningshastigheten och f frekvensen, dels i några fall genom ytberäkning av den största halvperioden. Avvikelsen mellan de beräknade värdena är i de flesta fall stor då förloppen inte är sinusfunktioner utan sammansatta av flera frekvenser.

Av tabellen ser vi att nästan alla väggelement svängde med en frekvens nära ljudtrycksvågen, d.v.s. en större laddning fick väggarna att svänga med lägre frekvens. Svängningsförloppen innehöll dessutom ett antal svängningar av högre frekvens som har sitt samband med konstruktion och svängningsmoder. Svängningarna i skorstenen (givarna 5 och 6) var likaledes beroende av ljudtrycksvågens frekvens men tycktes ligga närmare skorstenens egenfrekvens på 7.7 p/s som återfinnes i samtliga registreringar. Det torde vara helt klart att med ett trycktidförlopp som det i fig. 1 c kan resonansfenomen uppstå i en vägg eller en skorsten med stora svängningsamplituder som följde.

Svängningshastigheterna varierar med ljudvågens amplitud. I diagrammet i fig. 13 har horisontella svängningshastigheten i nord-sydled i södra gaveln avsatts mot det i mikrofon 1 registrerade maximala ljudtrycket. Södra gavlen som först träffas av ljudvågen uppvisar de största svängningshastigheterna (100 mm/s vid ett ljudtryck av 5.1 mbar). Därefter svänger den östra långväggen kraftigast, som likaledes träffas direkt av stöt-vågen. Även i skorstenen uppmättes höga värden på de horisontella svängningarna. Om vi utgår från den tidpunkt då stötvågen når mikrofon 1 vid södra gaveln och beräknar tiden till den första rörelsen som observeras i de olika mätpunkterna samt rörelseriktning (se tabell 6) kan man avgöra hur huset rör sig under det att ljudvågen passerar förbi. Noggrannheten i tidsberäkningen är inte särskilt stor men det framgår tydligt att när östra väggen (givare 4) börjar röra sig börjar gaveln i söder (givare 3) och skorstenen (givare 6) att röra sig i samma riktning. Huset förefaller att pressas undan (skjuvas) av ljudvågen. Rörelsen i nord-sydled i skorstenen kommer först långt senare då ljudvågen passerat över skorstenen. Skorstenens rörelse uppvisar då även en vertikal komponent.

Det torde vara helt säkert att huset varit utsatt för liknande och större påkänningar åtskilliga gånger under den tid då verksamheten bedrivits på Nitro Metalls skjutplats. Enligt uppgift har inga fönsterrutor skadats. Vid takvinklar, i hörn och plattskarvar har tapeterna spruckit. Södra gaveln svänger med stora amplituder och föremål placerade i fönsterkarmen förflyttas och ramlar ned. Skorstensstocken är fullt oskadd och användbar (en oljepanna är ansluten till densamma). Att vistas inne i huset måste dock medföra irritation för en person som ej är förtrogen med de svängningsfenomen som ljudvågen åstadkommer då den träffar byggnaden.

8. Byggnadsskador och bedömning av dessa.

Om man studerar klagomålen från kringboende personer är det oftast obehag av typen huset gungar, fönsterklirr, sot- och bruknedfall ur skorsten, dörrar som svänger upp m.m. som anges. I flera fall har emellertid även gjorts gällande att ljudvågen förorsakat skador på byggnadselement, t.ex. spruckna glasrutor har inrapporterats från 1.8 km:s avstånd vid ett tillfälle och från 7.2 km:s avstånd (Storå) vid upprepade tillfällen. Sprickor i skorstenar påstås ha uppkommit på flera håll vid omkring 10 km:s avstånd. I två fall har man påstått att jordförskjutningar till följd av ljudvågen orsakat skador dels på en mycket gammal jordkällare dels på en reningsbrunn med tillhörande ledningssystem. Skadebilden är i stort analog med den som erhållits vid en undersökning av ett stort antal klagomål i samband med överljudsflygningar över Småland i februari och mars 1969 och som utförts av A.M. Wilhelmsen /8/. När det gäller att bedöma skador av denna typ saknar vi för närvarande ett sådant erfarenhetsmaterial som man t.ex. skaffat för bedömning av skador i fastigheter till följd av markskakningar /9/. Det vore oriktigt att tillämpa skadekriterierna för markskakning på vibrationer i olika byggnadselement då de svängningshastigheter som här ligger till grund för skadegränserna uppmäts i husgrunderna utan att man därvid tagit hänsyn till hur enstaka delar i byggnadens övre del har rört sig. Larsson, Kiessling och Wilhelmsen/10/ hävdar att i de flesta fall påstådda bangskador av samma typ orsakats av byggnaden själv d.v.s. genom spänningar till följd av sättningar eller till följd av olika fuktighetsgrad i material som ingår i byggnaden, men att i vissa fall ljudbangen kan ha varit den utlösande faktorn. Detsamma gäller för byggnader som träffas av ljudtryckvågen från en detonation.

I det här sammanhanget är det viktigt att påpeka att en dörr som stängs hastigt med en smäll, t.ex. vid korsdrag, ger upphov till tryck och vibrationer av samma storleksordning. Vid försök i vårt laboratorium visade det sig inte alls svårt att uppnå ett övertryck av 1 mbar i rummet genom att hastigt stänga dörren. Tryckförändringar och vibrationer av den storlek som ljudvågen orsakar är således ett icke ovanligt fenomen.

De inrapporterade fönsterskadorna bekräftar att skadan sannolikt uppstått till följd av att rutan stått under spänning /5/. Vad beträffar jordförskjutningar till följd av ljudtryckvågen måste dessa anses osannolika. Vid mätningar av markvibrationer på de två orter där jordförskjutning inrapporterats har man inte kunnat konstatera någon rörelse i marken i samband med detonationerna.

Några skador som äventyrar byggnadernas fortbestånd kan ljudvågen knappast vara upphov till på avstånd större än 2 km från skjutplatsen att döma av mätningarna på Nitro Metalls kontorsbyggnad.

9. Hur människan reagerar för ljudtryckvågen.

Människors förmåga att uthärda impulsbuller varierar och beror säkert av ett flertal psykologiska faktorer, men även på det grundbrus eller buller som finns i deras omgivning. Om jag befinner mig i en tyst omgivning och plötsligt hör ljudet av ett sprängskott så reagerar jag kraftigt medan jag kanske inte reagerar alls om jag befinner mig i en omgivning med en kontinuerlig hög ljudnivå. Fig. 14a och b visar en sammanställning enligt Lundborg /12/ av störnings- och skadefrekvenser vid olika maximala ljudtryck i mbar hämtade från olika källor /13/, /14/ och /15/. Som framgår av figuren reagerar människan för buller vid nivåer långt under de som förorsakar byggnadsskador. Det framgår likaledes att vissa människor är lättare irriterade än andra. Vid våra mätningar har de personer som stått utomhus bredvid mätapparaterna, då en laddning avfyrats, ansett att bullret varit obetydligt och inte störande medan de personer som samtidigt befunnit sig inomhus påstått sig ha känt huset skaka och hört fönsterrutorna klirra samt ansett sig störda av ljudvågen. Det är således helt klart att de vibrationer som uppstår i husen i samband med ljudvågspassagen förstärker intrycket. Om man dessutom som fastighetsägare känner sig oroad för skador på huset så är man definitivt mer irriterad. Människans subjektiva upplevelse av vibrationer har undersökts av Reiher och Meister /11/. Av dessa undersökningar framgår att människan är ungefär dubbelt så känslig för vertikala som för horisontella förflyttningar i upprättstående ställning. För de låga frekvenser som oftast uppmätts (5-20 p/s) kan människan känna så små förflyttningar som 2-10 μ i vertikal led. Diagram i fig. 15 efter Reiher och Meister visar vid vilken amplitud, 1. förflyttningen är märkbar, 2. irriterande, 3. obehaglig, då man utsätts för vertikala respektive horisontella vibrationer i de underlag man står på. Vibrationens frekvens är av största betydelse. Ju högre frekvens desto mera märkbar är förflyttningen. Man ser av diagrammet att vid 10 p/s är redan 40 μ i vertikallied irriterande på försökspersoner. Läger man därtill de psykologiska faktorerna så kan tröskeln för irritation vara ändå lägre.

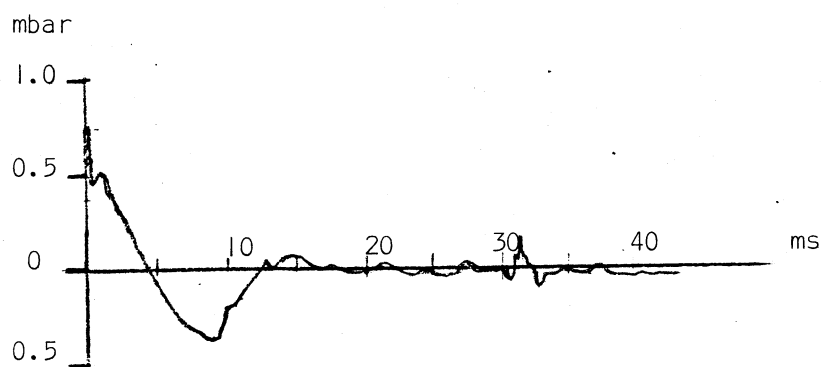
10. Vilka möjligheter finns att dämpa bullret ?

Erfarenheter från olika skjutplatser runt om i världen ger vid handen att bullerstörningarnas nivå till största delen beror på rådande väderlek. Försöksresultaten visar likaledes att en laddning om 40-50 kg kan ge större tryckamplituder på stora avstånd än en 500 kg:s laddning vid en annan väderlekstyp. Möjligheten att begränsa störningarna genom att endast utföra skjutningar vid vissa väderlekstyper och vindförhållanden är mycket små, då snabba skiftningar i utbredningsförhållandena för ljudet har observerats, och då de vind och temperaturprognoser som kan erhållas ej är tillräckligt detaljerade. Den enda möjlighet som då tycks återstå är att dämpa ljudkällan, d.v.s. dämpa stötvågen från laddningen. Det gäller då att finna ett dämpande material. Snö dämpar effektivt knallen från en laddning liksom övertäckning med torr sand. Svårigheten att åstadkomma snö i tillräckliga mängder under den varma årstiden och de tekniska svårigheter som sandtäckning medför för verksamheten vid skjutfältet begränsar möjligheterna. En styrning av stötvågen mot ett dämpande material eller skjutning under jord kan möjligen vara andra utvägar. Då laddningsvikten till vissa gränser spelar mindre roll för bullret än väderleken förefaller en dämpning av ljudtrycket med minst 90% vara nödvändig för att helt eliminera klagomålen.

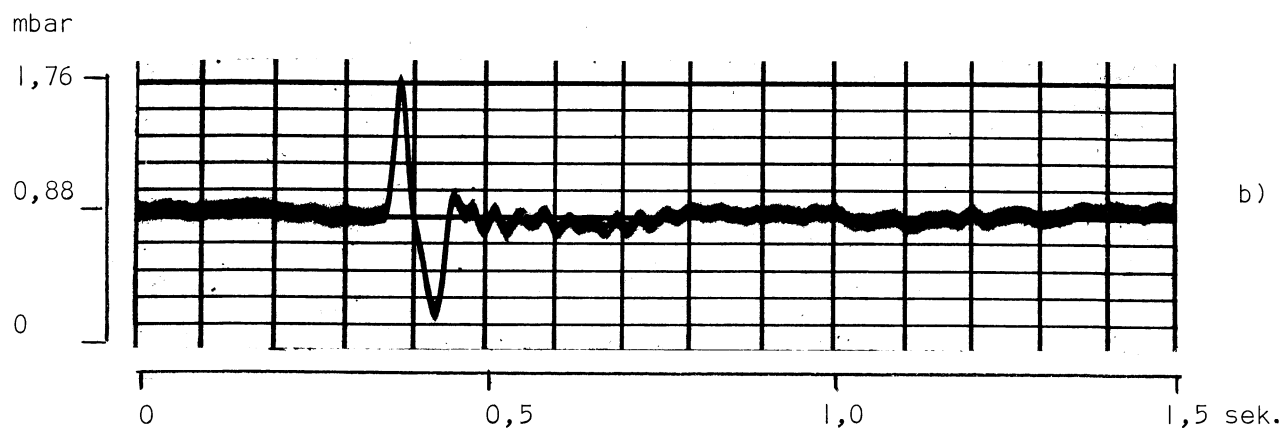
LITTERATURREFERENSER

1. Rothwell, D. Calculation of Sound Rays in the Atmosphere.-
Journal Acos. Soc. of Am. Vol 19
pp 205-221 (1947).
2. Cox, E.F., m.fl. Meteorology Directs Where Blast
Will Strike.-
Bulletin of the Am. Meteorological Soc.
Vol 35 No 3 pp 95-103 (1954).
3. Perkins, B., m.fl. Forecasting the Focus of Air Blasts
due to Meteorological Conditions in
the Lower Atmosphere.-
Ballistic Research Laboratories Report
No 1118 oct. 1960.
4. Rydgren, B. Atmosfärens inverkan på ljudvågors
utbredning.- Orientering för väderleks-
tjänsten, från Militära Väderlektjän-
stens Centralorgan. Nr 2, 1963.
5. Persson, A. Luftstötvmåtmåningar i omgivningarna av
Nitro Metalls skjutplats vid Nyberget.-
Stiftelsen Svensk Detonikforskning,
Stockholm, rapport DS 1970:30 (1970).
6. Sternhoff, L. Barograf för mätning av stötvågor i
luft.-
Stiftelsen Svensk Detonikforskning,
Stockholm, rapport DS 1970:10 (1970).
7. Persson, A. Mätning av luftstötvågor och markskak-
ning i samband med skutsprängning och
storsalva i dagbrottet vid Aitik den 24
och 25 april 1970.-
Stiftelsen Svensk Detonikforskning,
Stockholm, rapport DS 1970:23 (1970).
8. Wilhelmsen, A.M. Investigation of 121 Sonic Bang Damage
Claims in Sweden.-
(Report presented at the OECD Conference
on Sonic Boom Research, februari 1970).
Immissionsforskningen, Inst. för husbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg (1970)
9. Langefors U, Kihlström, B. The Modern Technique of Rock Blasting.-
Almqvist och Wiksells förlag, Uppsala 1963.
10. Larsson, B., Kiessling, W.,
Wilhelmsen, A.M. Ljudbangar - Bangskador.-
Kompendium för besiktningsförrättare,
Immissionsforskningen, Inst. för husbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg (1970)
11. Reiher, H., Meister, F.J. Die Empfindlichkeit des Menschen gegen
Erschütterungen.-
Forschung auf dem Gebiet des Ingenieur-
wesens, 2, p. 381-386, 1931.

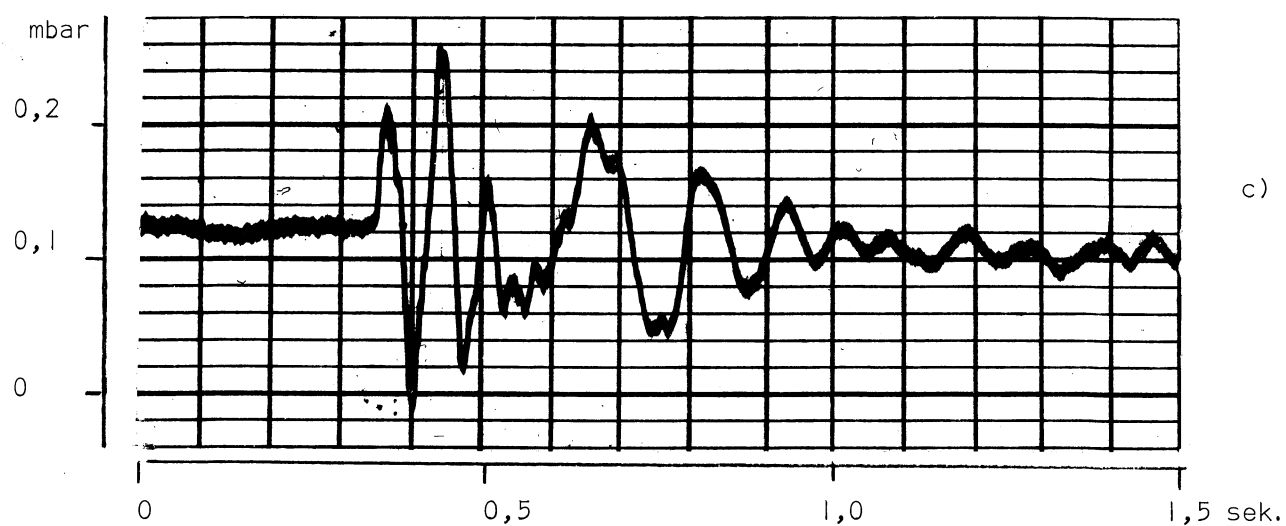
12. Lundborg, N. Något om luftstöt vågor, ljudbangar och buller.-
Stiftelsen Svensk Detonikforskning,
Stockholm, rapport DS 1970:11 (1970).
13. Ljungström, O. Överljudsflygets dilemma. Referat av
B. Lundbergs rapport till Kommunikations-
departementet, mars 1970.-
Teknisk Tidskrift nr 11 (1970) s. 32
14. Rylander, R., Kajland, A.,
Sörensen, S. Medicinsk hygienisk värdering av ljud-
bangar.-
Statens Institut för Folkhälsan, Omgiv-
ningshyg.avd. Rapport (1970).
15. - Rapport om japanska försök med detonationer
i stor skala på Hokkaido.
Ministeriet för industri och handel i
Japan (5 häften), japanska, (1962-1965).
16. Maglieri, D.J., m.fl. Ground Measurements of Shock Wave Pressure
for Fighter Airplanes Flying at Very Low
Altitude. -
Nasa Technical Note, Nasa TND 3443, 1966.



a)



b)



c)

Fig. 1.

Ljudvågens trycktidsförlopp

- a) 125 m från en 0,5 kg:s laddning
- b) 1.6 km från en 90 kg:s laddning
- c) 11.2 km från en 40 kg:s laddning

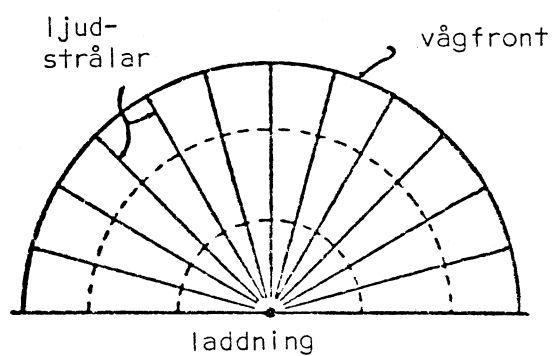
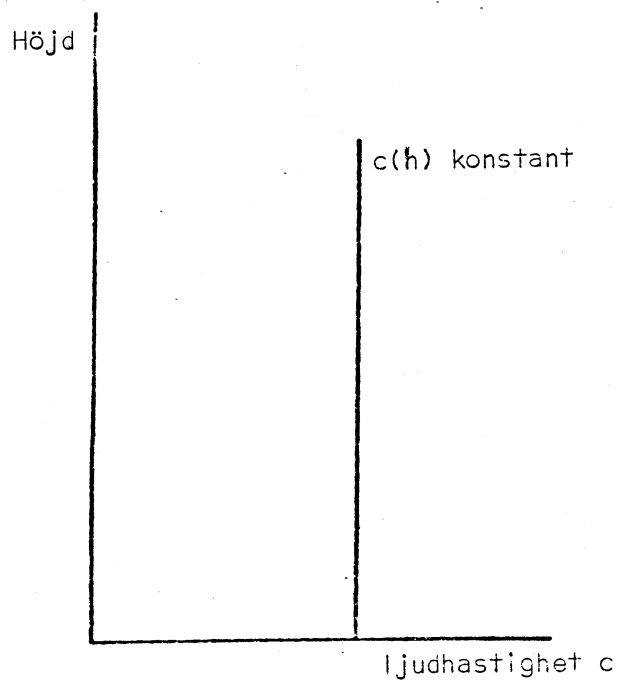


Fig. 2a.

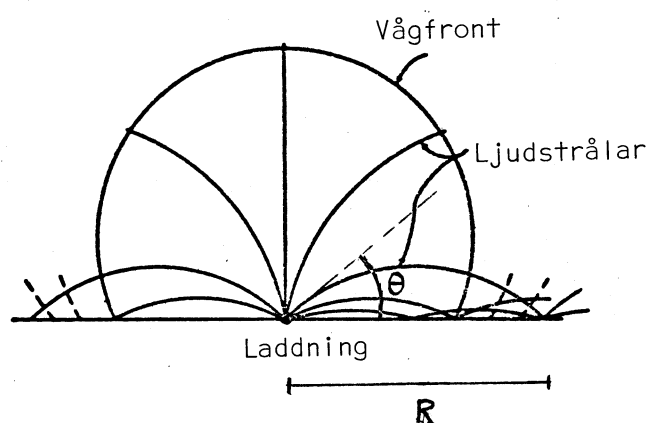
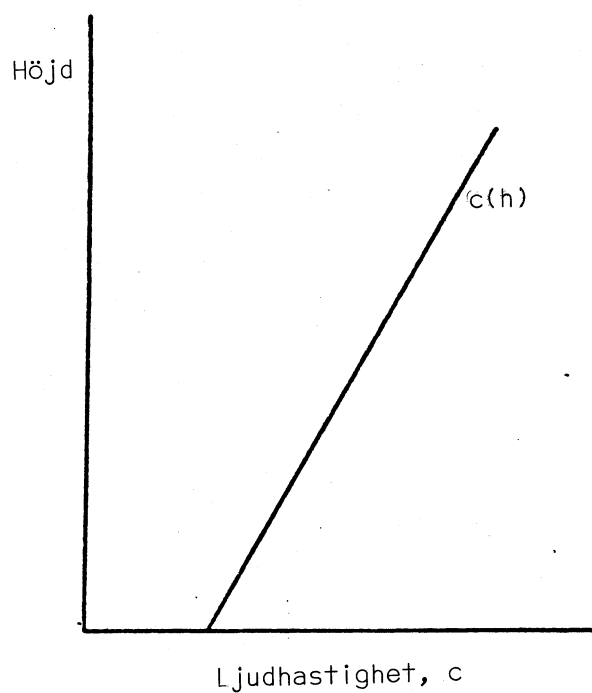
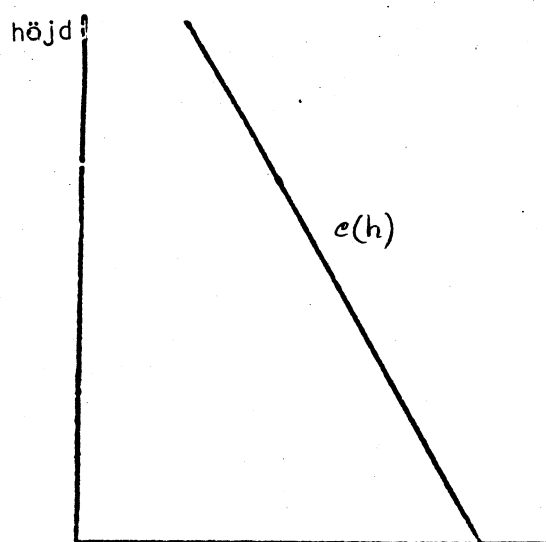


Fig. 2b



ljudhastighet, c

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$$

c_0 = ljudhastigheten vid 0°C

t = temperatur $^\circ \text{C}$

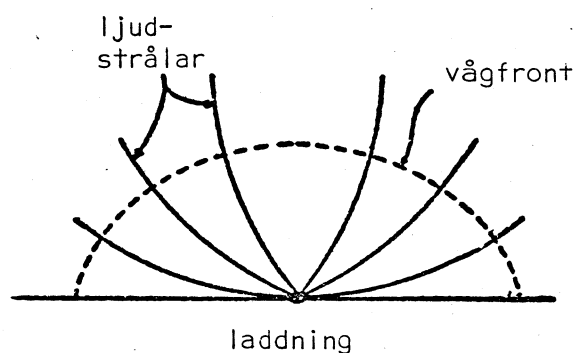
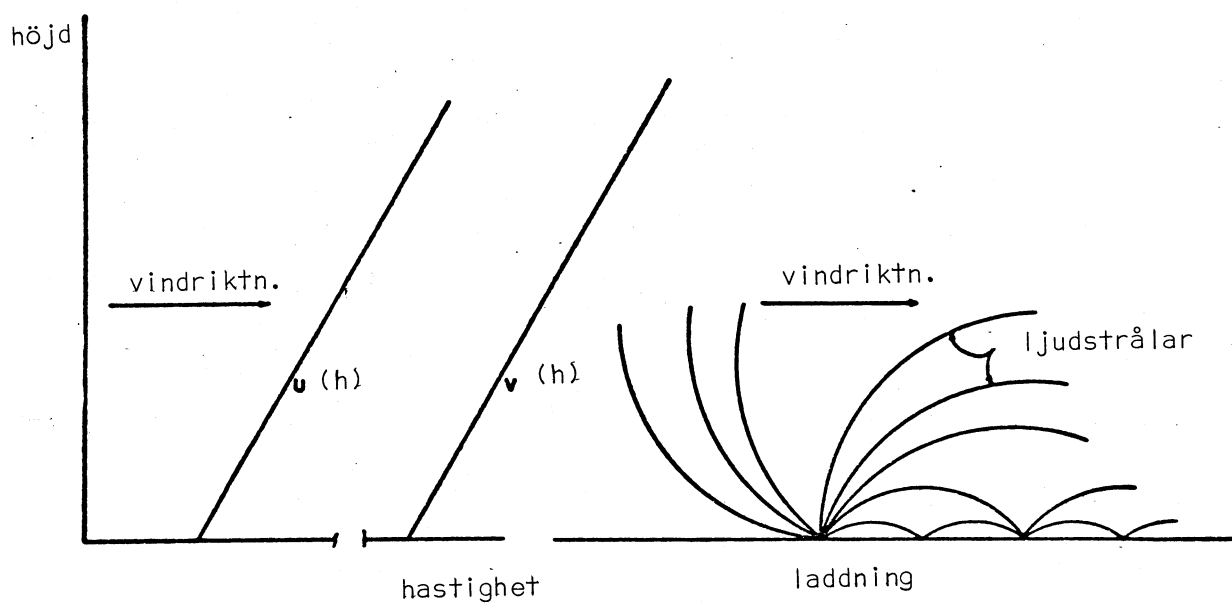


fig. 2c



u = vindhastighet

v = ljudhastighet relativt marken

c = ljudhastigheten vid temperaturen $t^\circ \text{C}$

$\check{c} = c + u$ i vindriktningen

fig. 2d

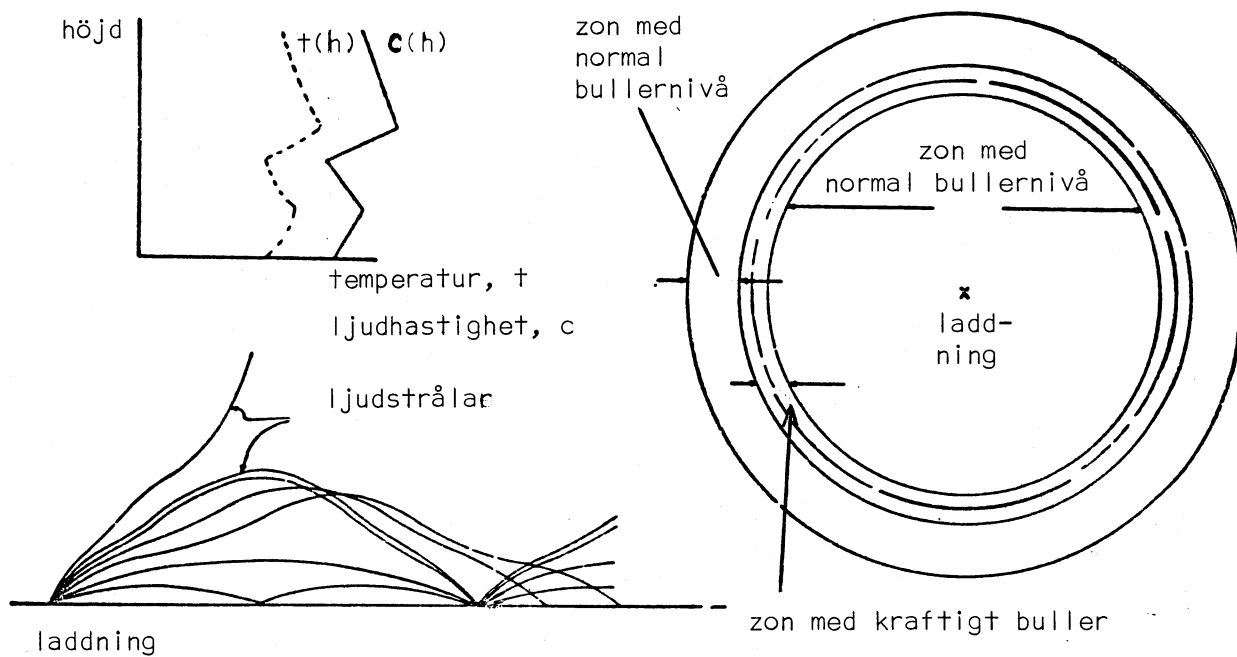


fig. 2e

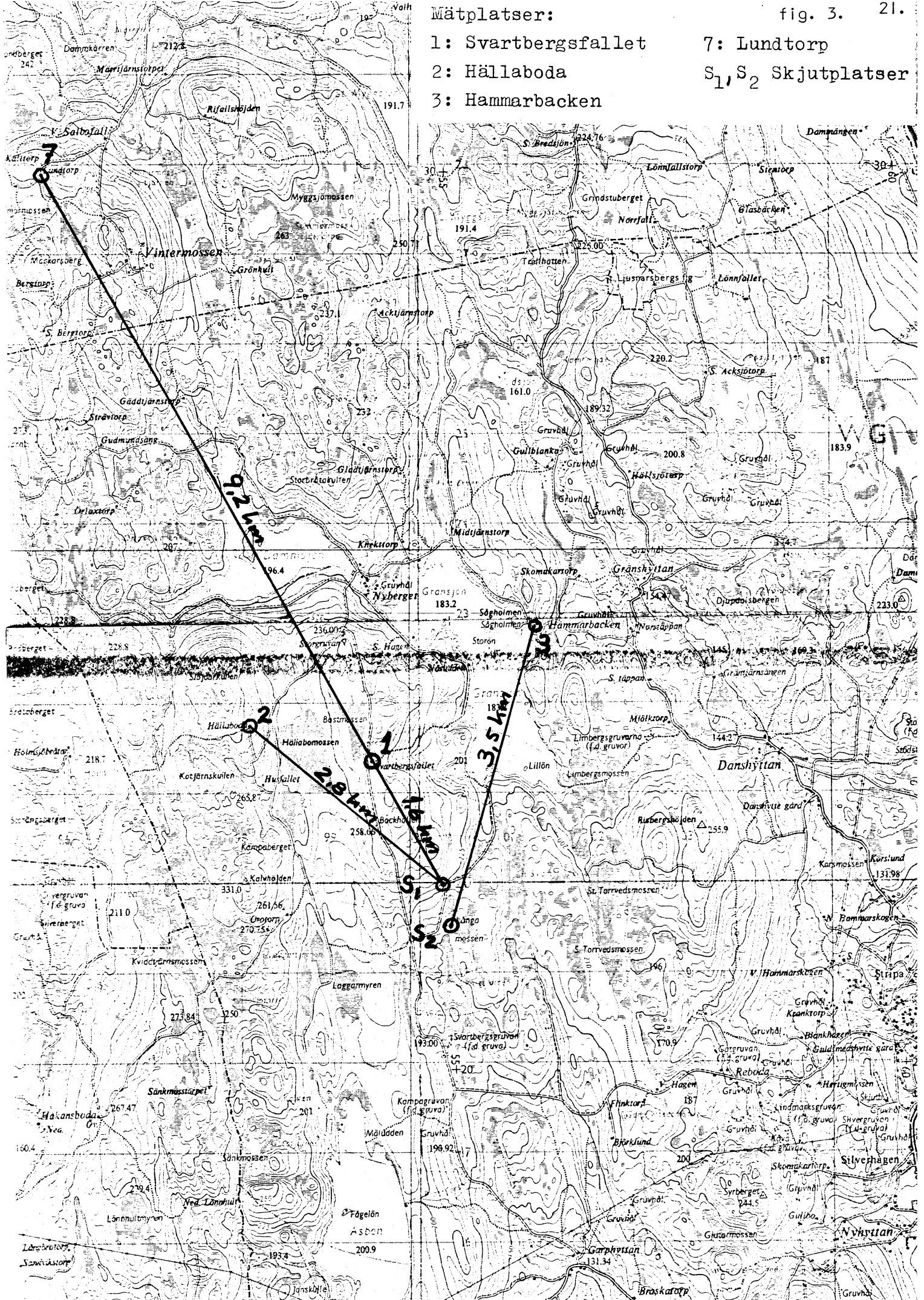
1: Svartbergsfallet

7: Lundtorp

2: Hällaboda

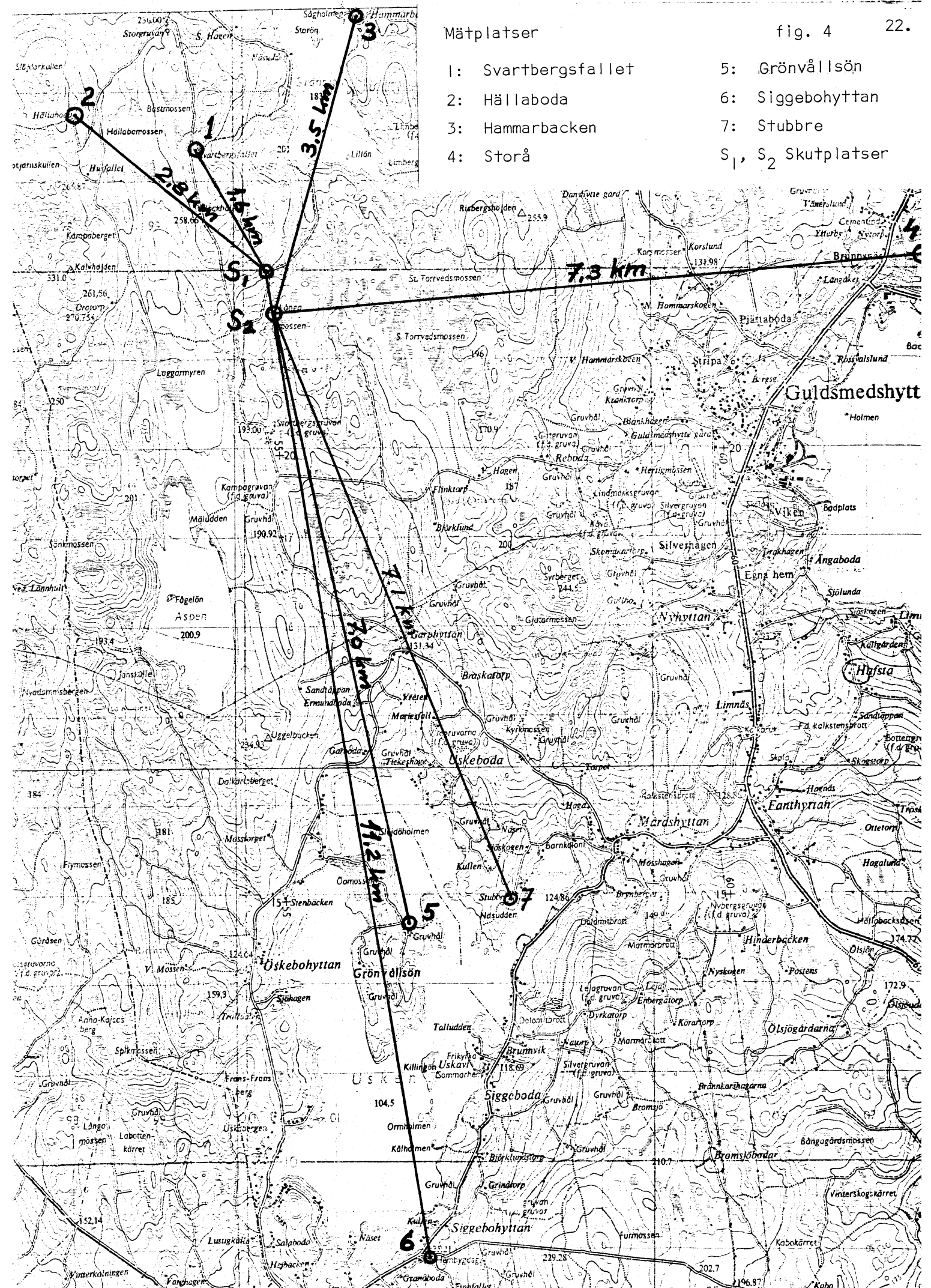
S₁, S₂ Skjutplatser

3: Hammarbacken



- 1: Svartbergsfallet
 2: Hällaboda
 3: Hammarbacken
 4: Storå

- 5: Grönvällsön
 6: Siggebohyttan
 7: Stubbre
 S₁, S₂ Skutplatser



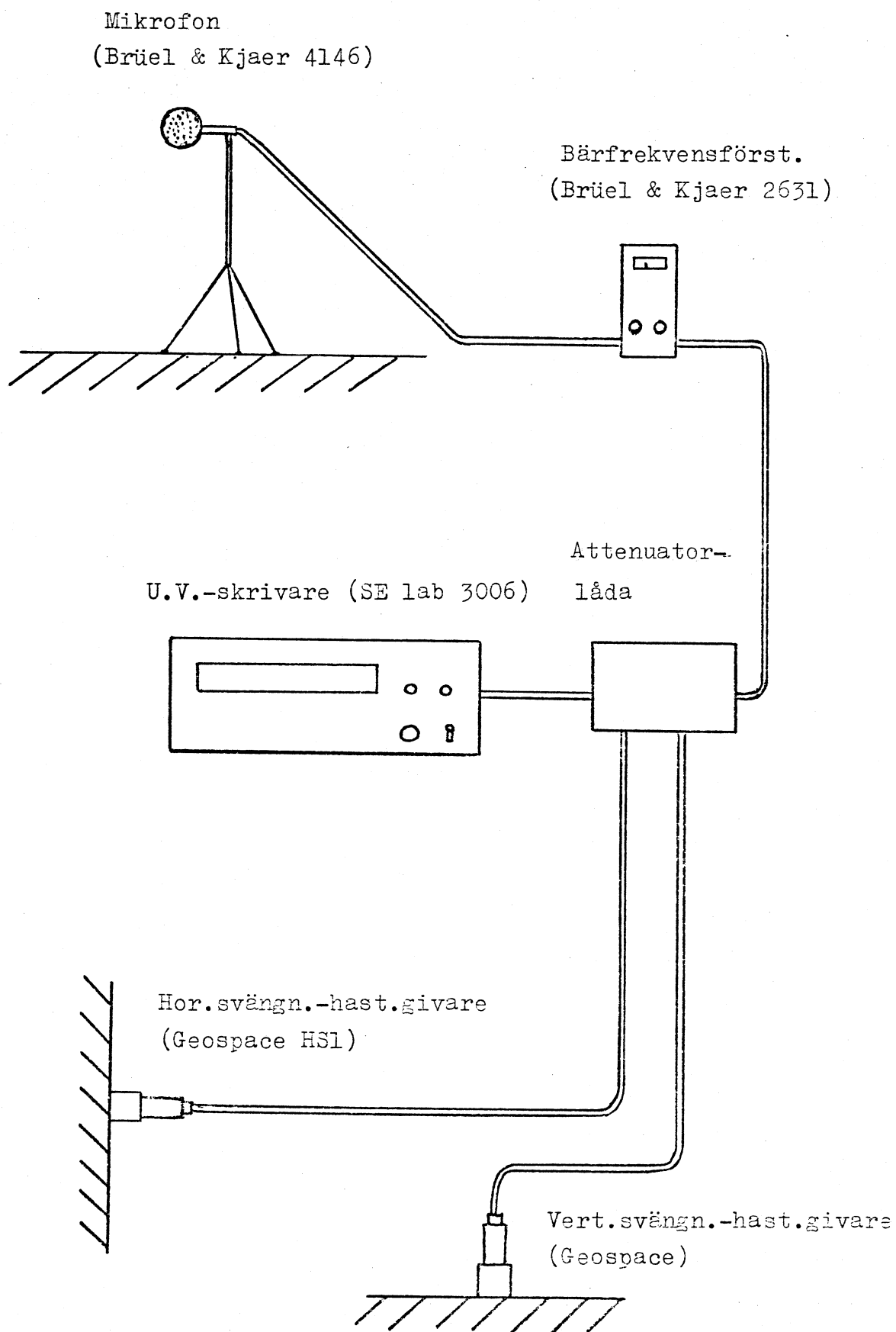


Fig. 5 Blockschema av apparatur för samtidig registrering av ljudtryck och vibrationer.

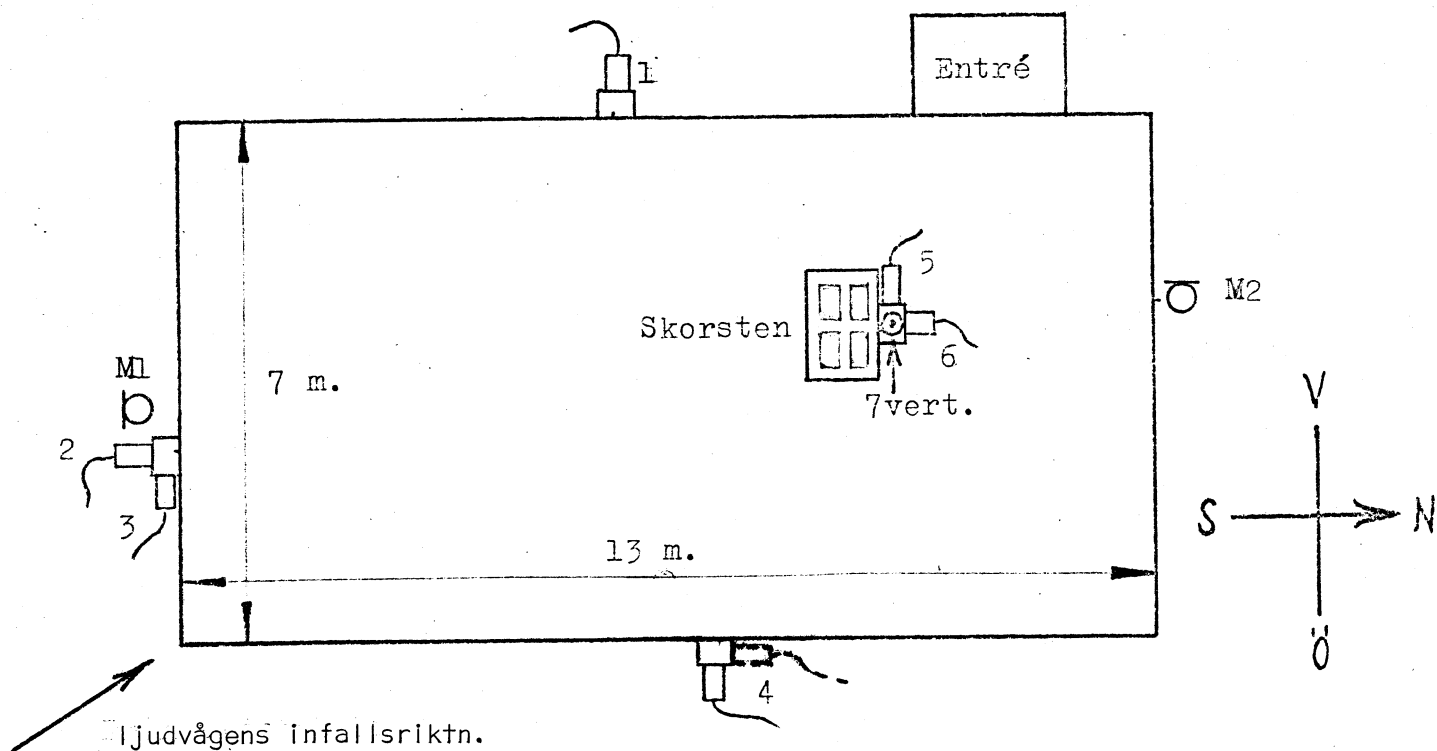


fig. 6 Placering av geofoner och mikrofoner på Kontorshuset vid Svartbergfallet
1-6 horisontellt, 7 vertikalt.

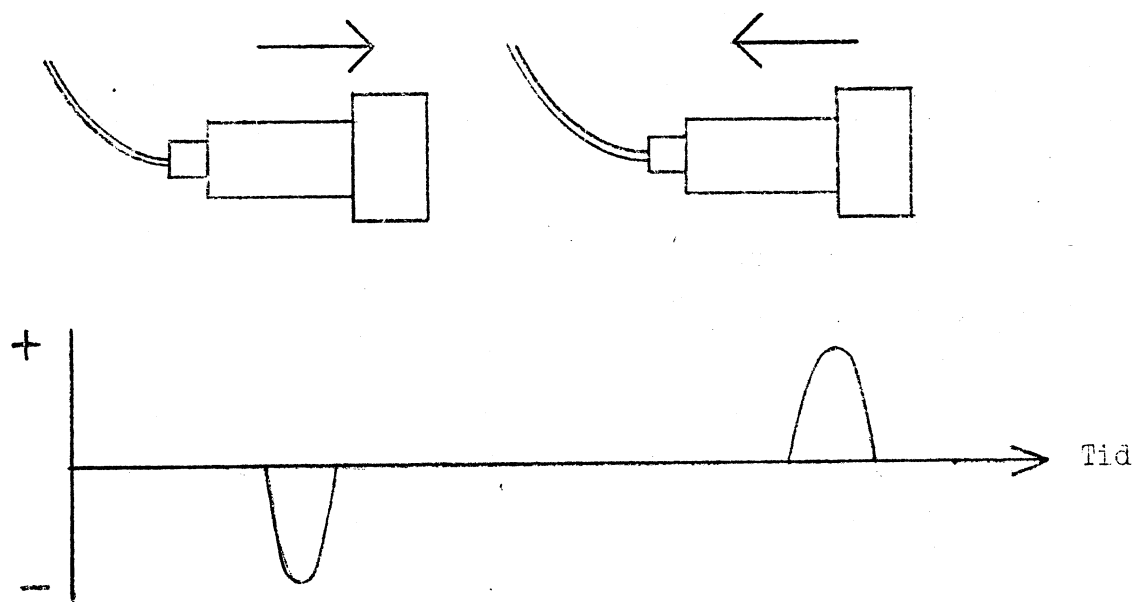


fig. 7 Utspänningens polaritet vid olika rörelseriktning hos geofonen.

höjd ö, h.

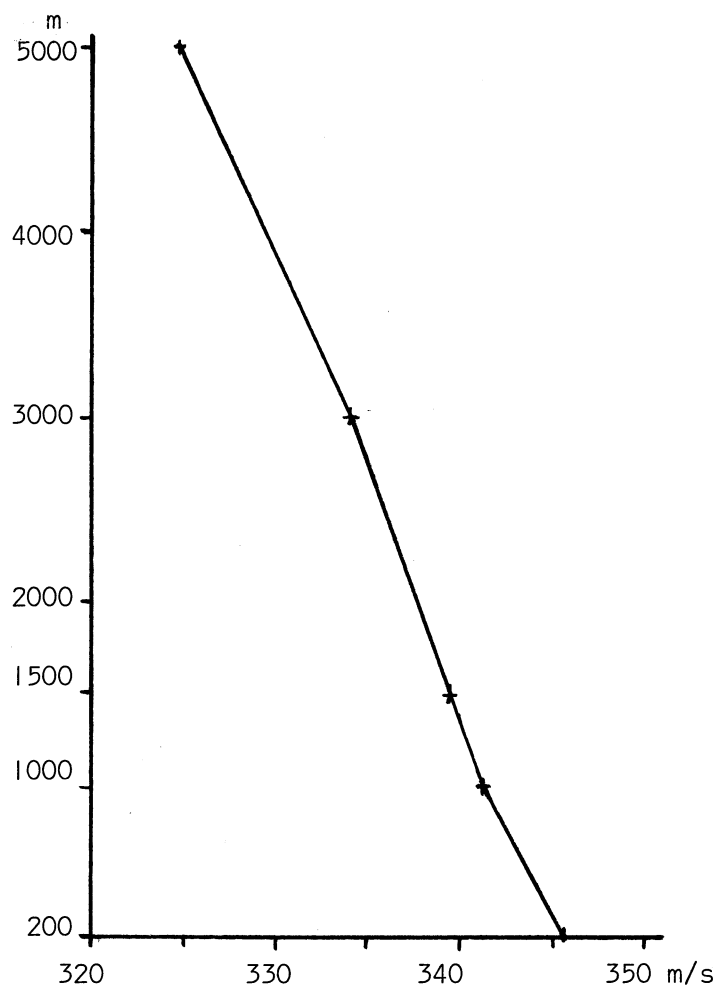


Fig. 8. Beräknad ljudhastighet som funktion av höjden i bäring 172° från Svartbergsfallet.

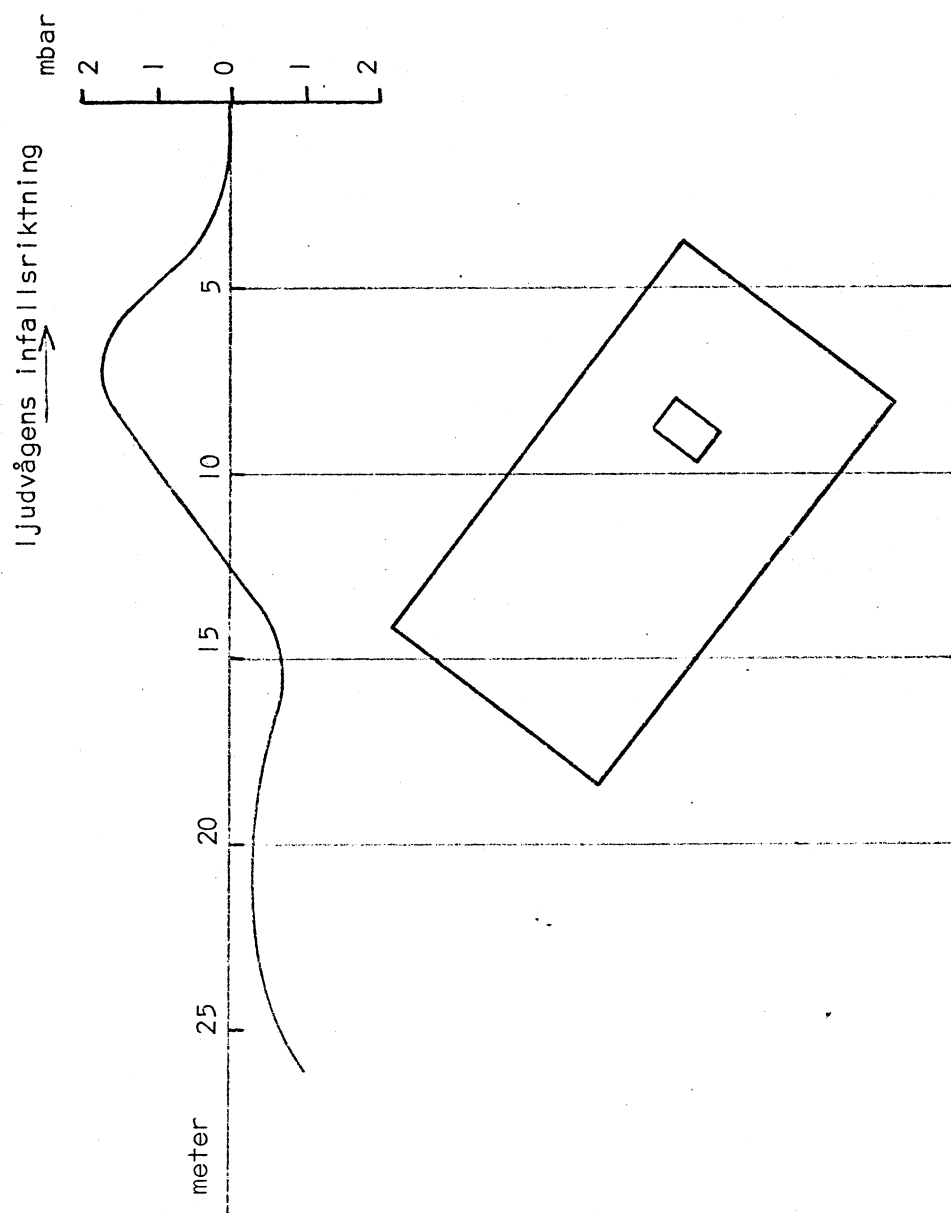


fig. 9 Ljudtryckets fördelning över byggnaden i Svartbergsfallet vid passage av ljudvågen i fig. 10.

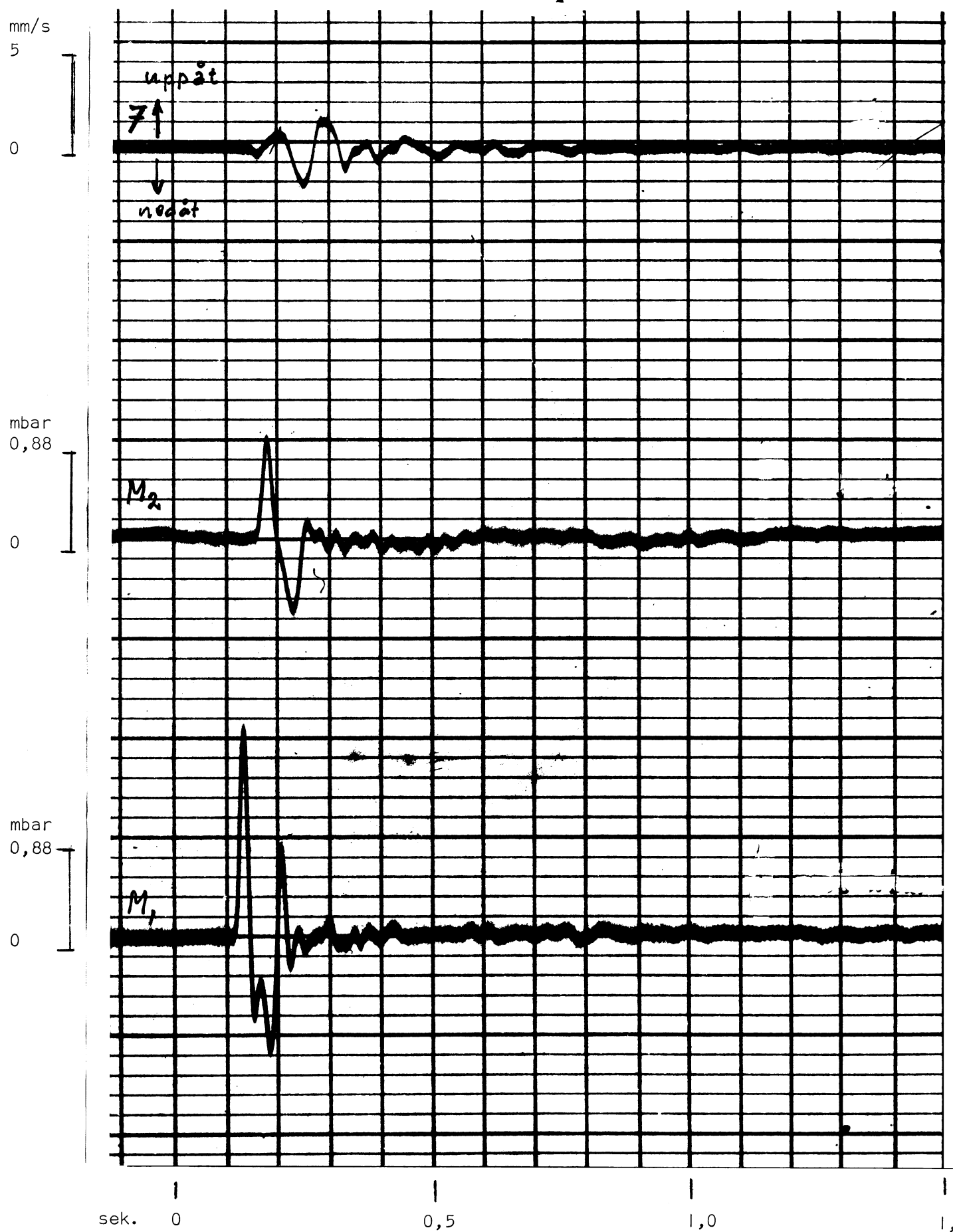


fig. 10. Skrivardiagram av ljudtryck och vibrationer i fastigheten vid Svartbergsfallet.

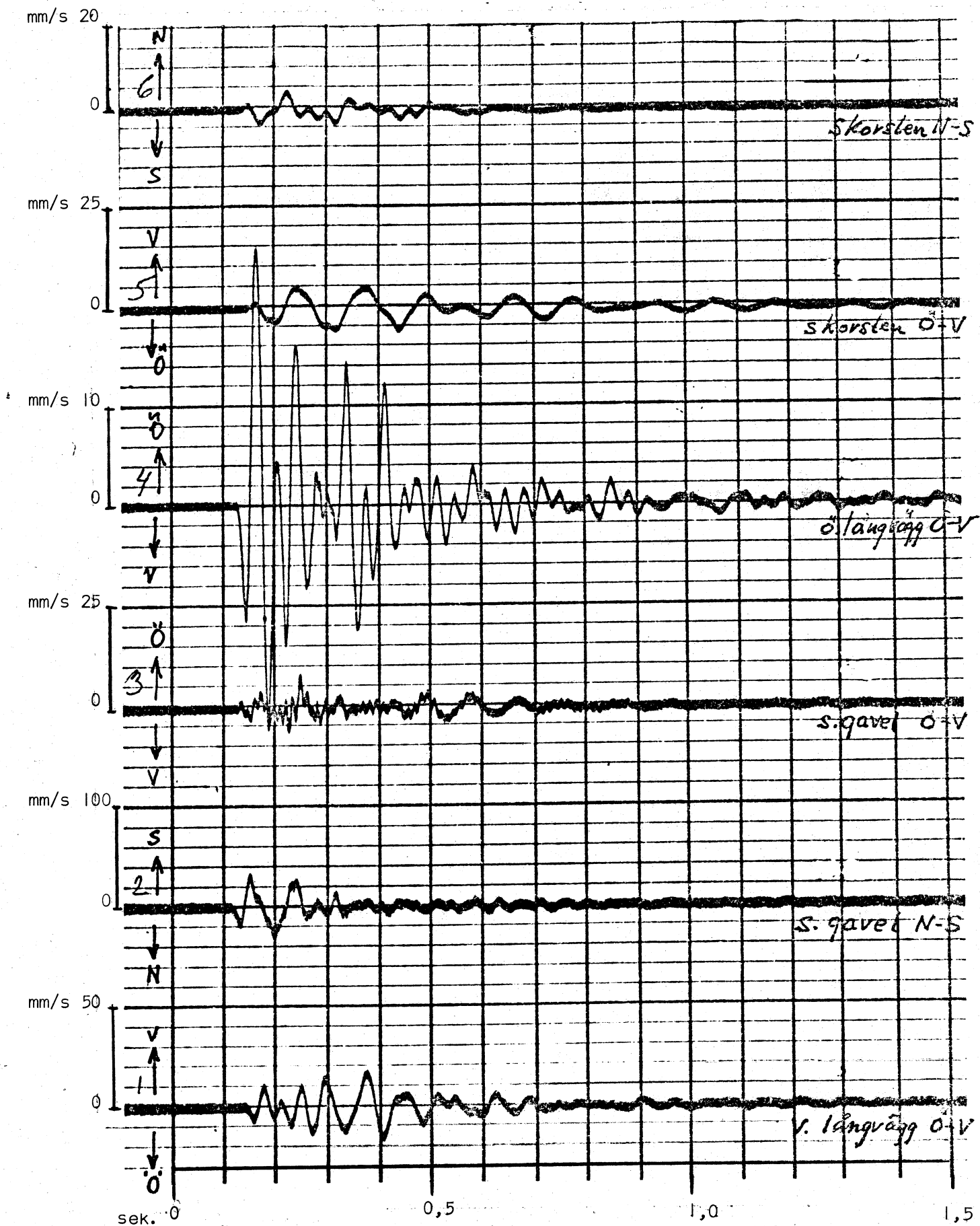


fig. II. Skrivardigram av vibrationer i fastigheten vid Svartbergsfallet.

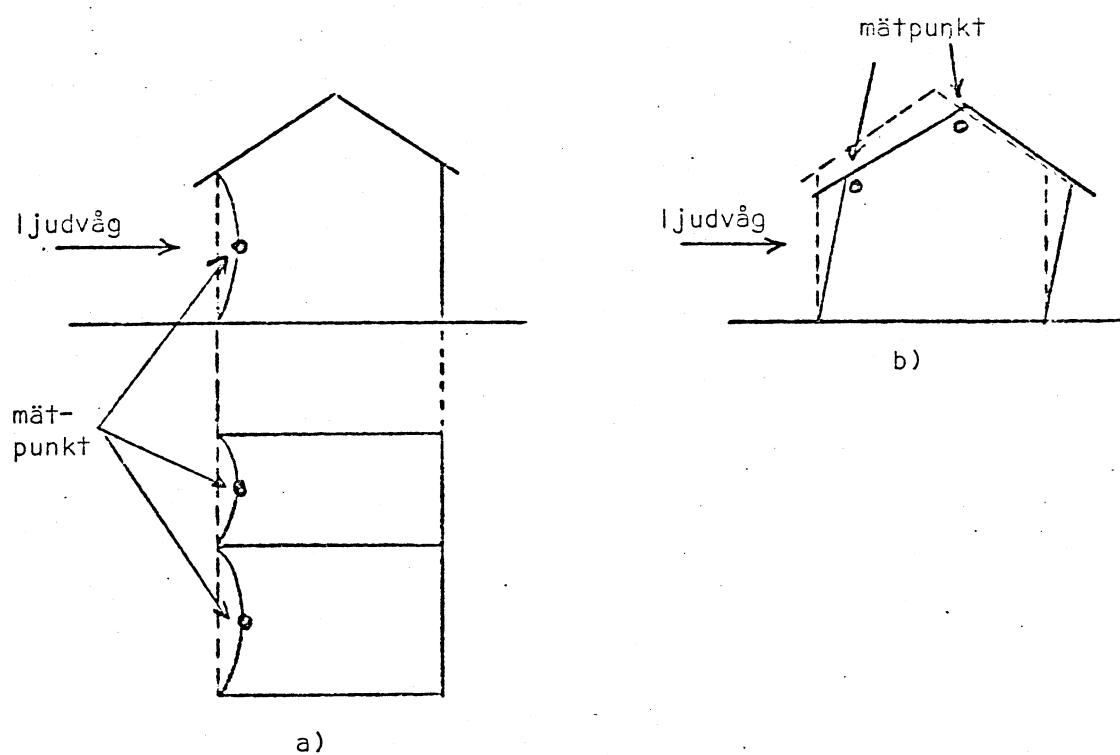


fig. 12 Lämpliga mätpunkter för att studera
a) rörelse i väggar b) skjuvning av stomme.

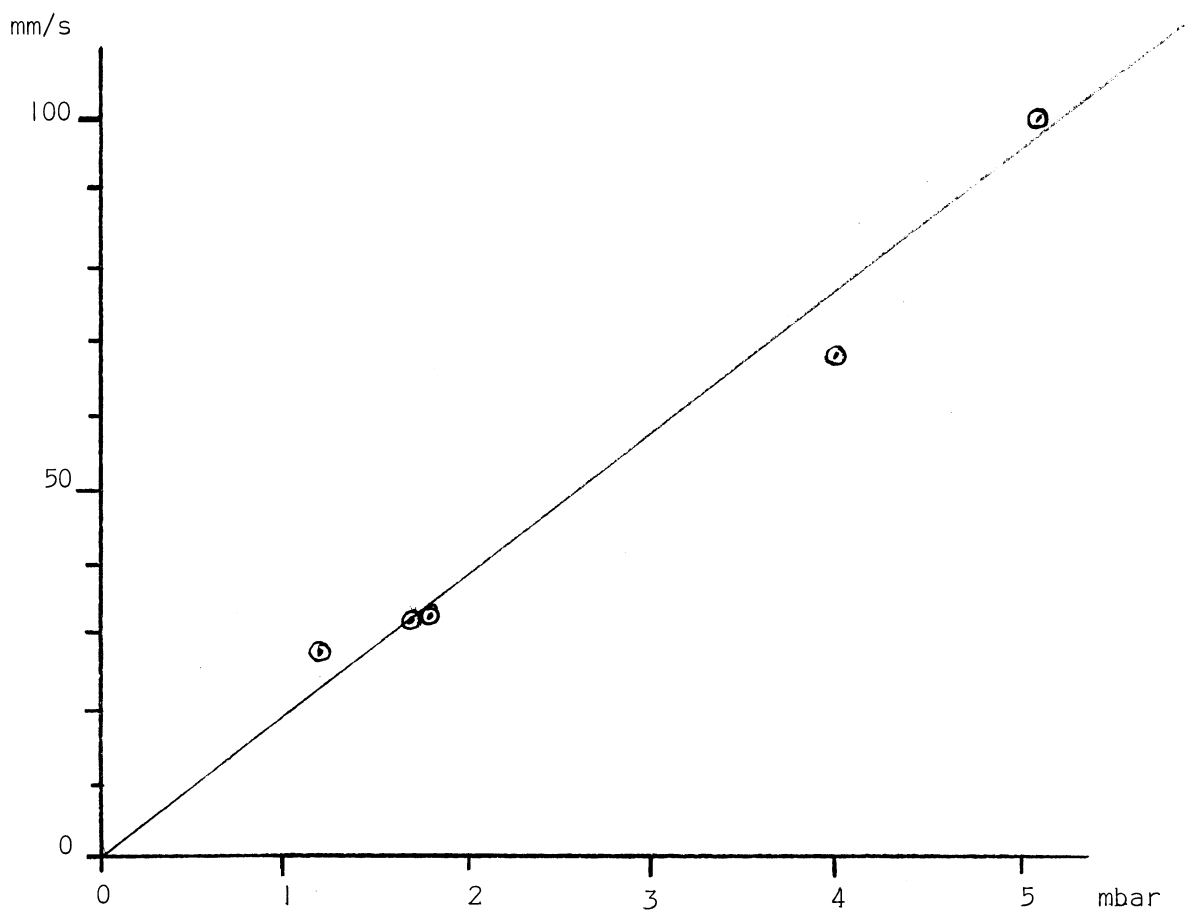
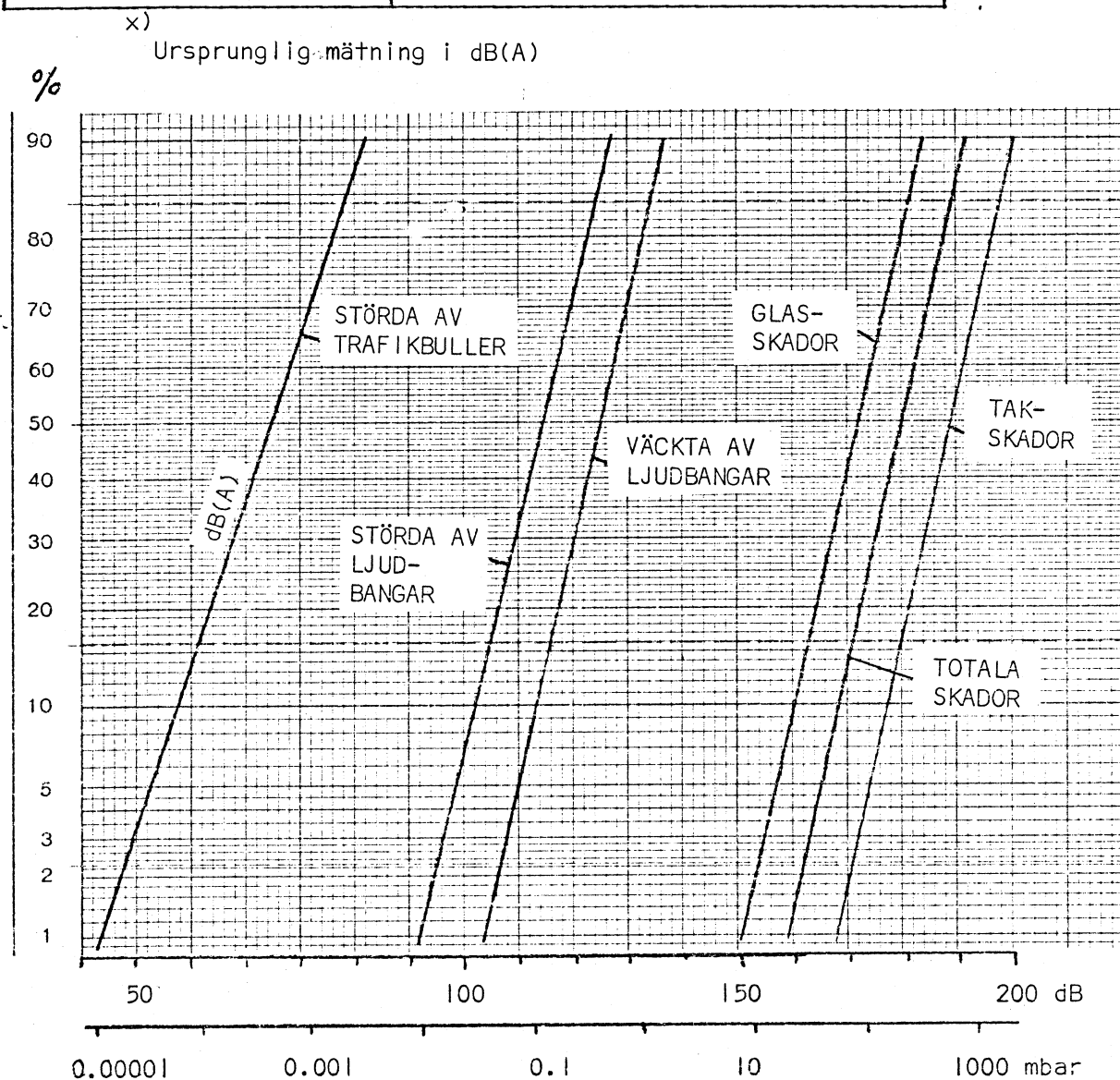


Fig. 13. Svängningshastigheten i södra gavelväggen som funktion av det 0,4 m från väggen uppmätta ljudtrycket.

Fig. 14. Störnings- och skadefrekvens vid olika max. tryck i mbar.

Störningsart	Procenttal			
	1 %	10 %	50 %	90 %
Irritation trafik, ^{x)}	0.00001	0.00006	0.0003	0.002
Irritation, bangar	0.01	0.03	0.1	0.5
Väckning, bangar	0.04	0.1	0.4	1.5
Fönsterskador, stötvåg	8	20	80	250
Takskador, stötvåg	50	150	500	2000

a)

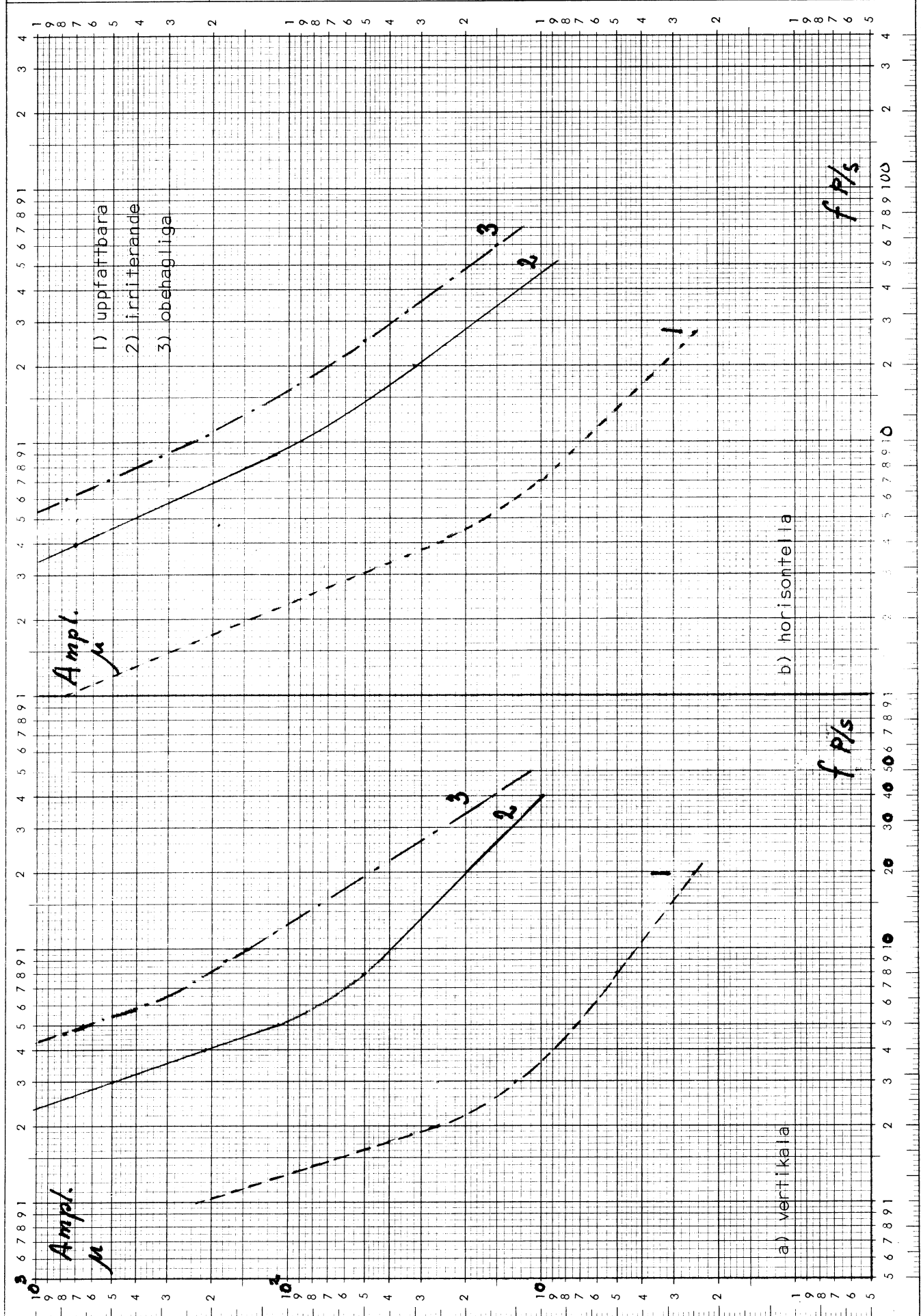


b)

Fig. 14. STÖRNINGS- OCH SKADEFREKVENNS VID OLIKA BULLERNIVÅ.

Människans förmåga att i upprättstående ställning uppfatta a) vertikala och b) horisontella förflyttningar.

fig. 15. 32.



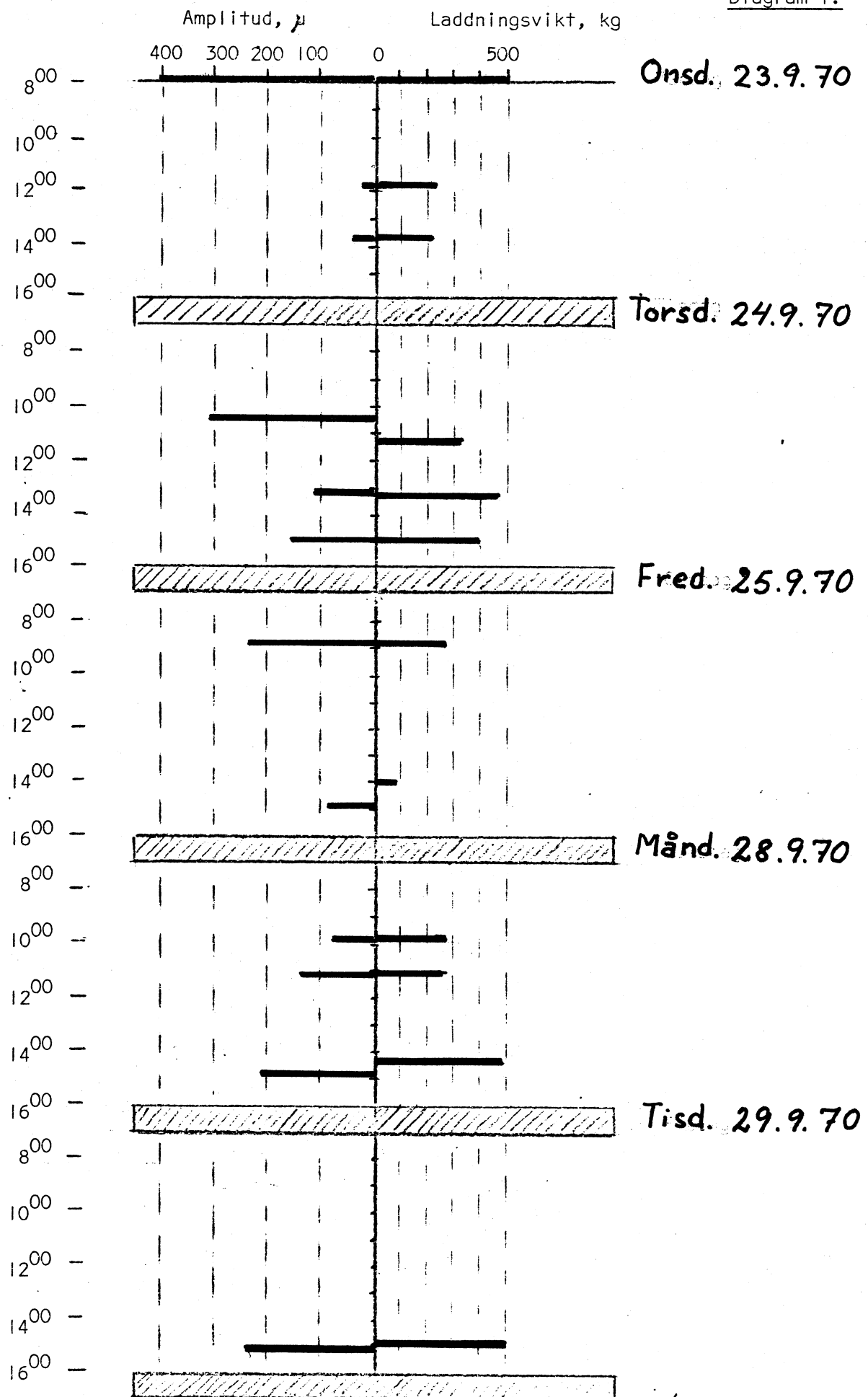


fig. 16. Amplitrasmätning i skorstenen, Siggebohyttan, horisontellt.

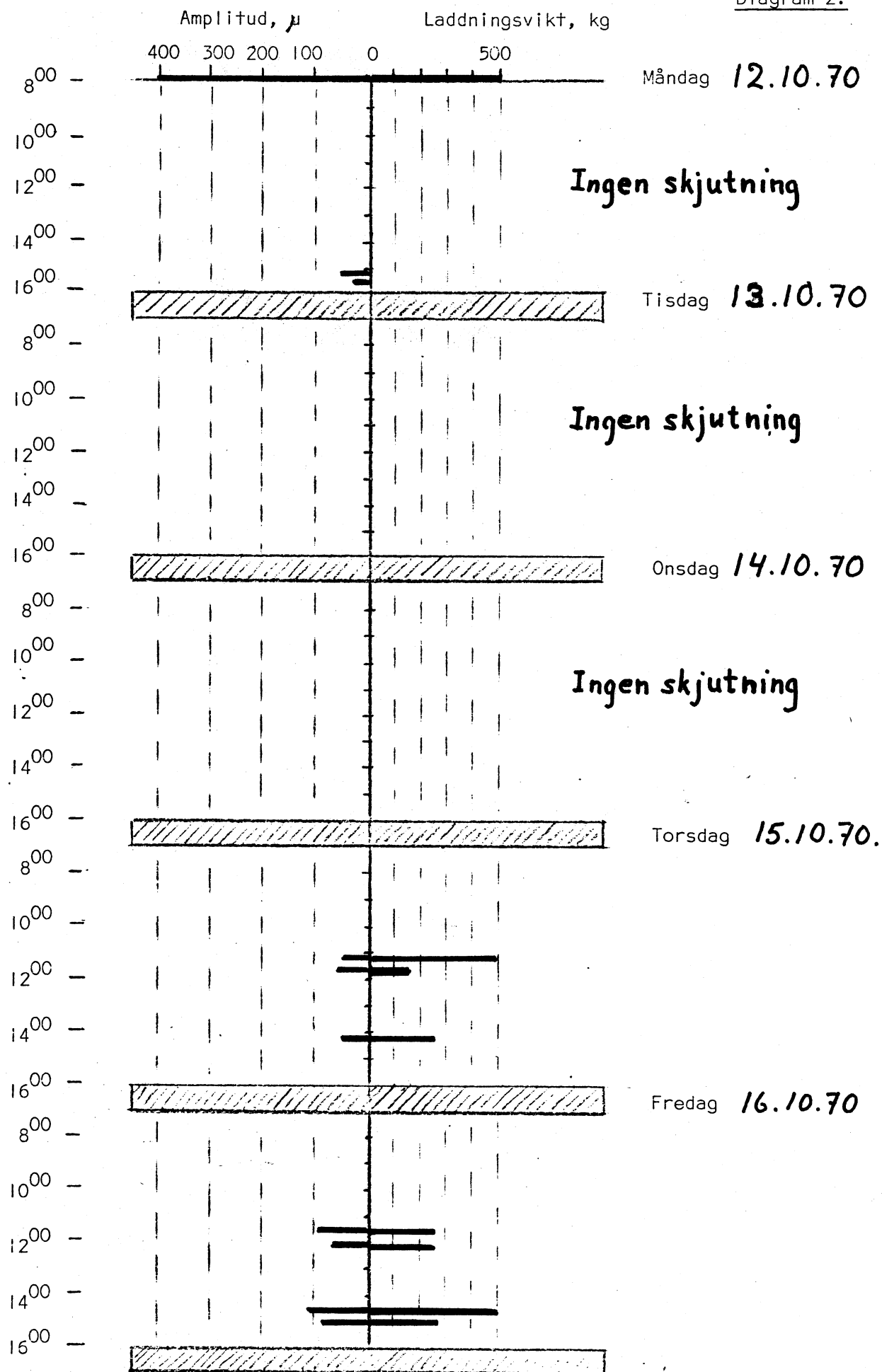


fig. 17. Amplitrasmätning på norra långväggen,
Siggebohyttan, horisontellt.

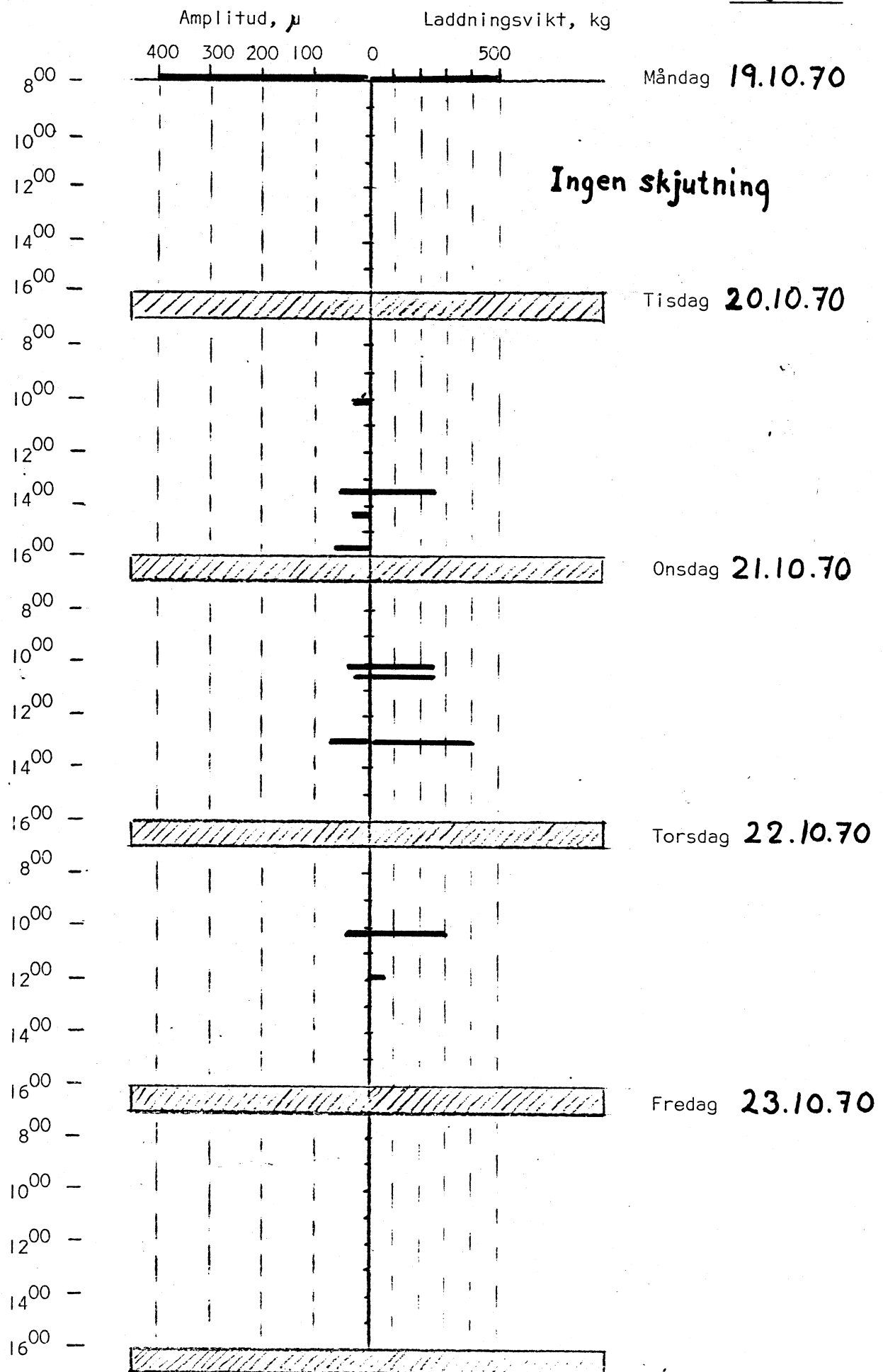


fig. 18. Amplitrafmätning på norra långväggen, Siggebohyttan, horisontellt.

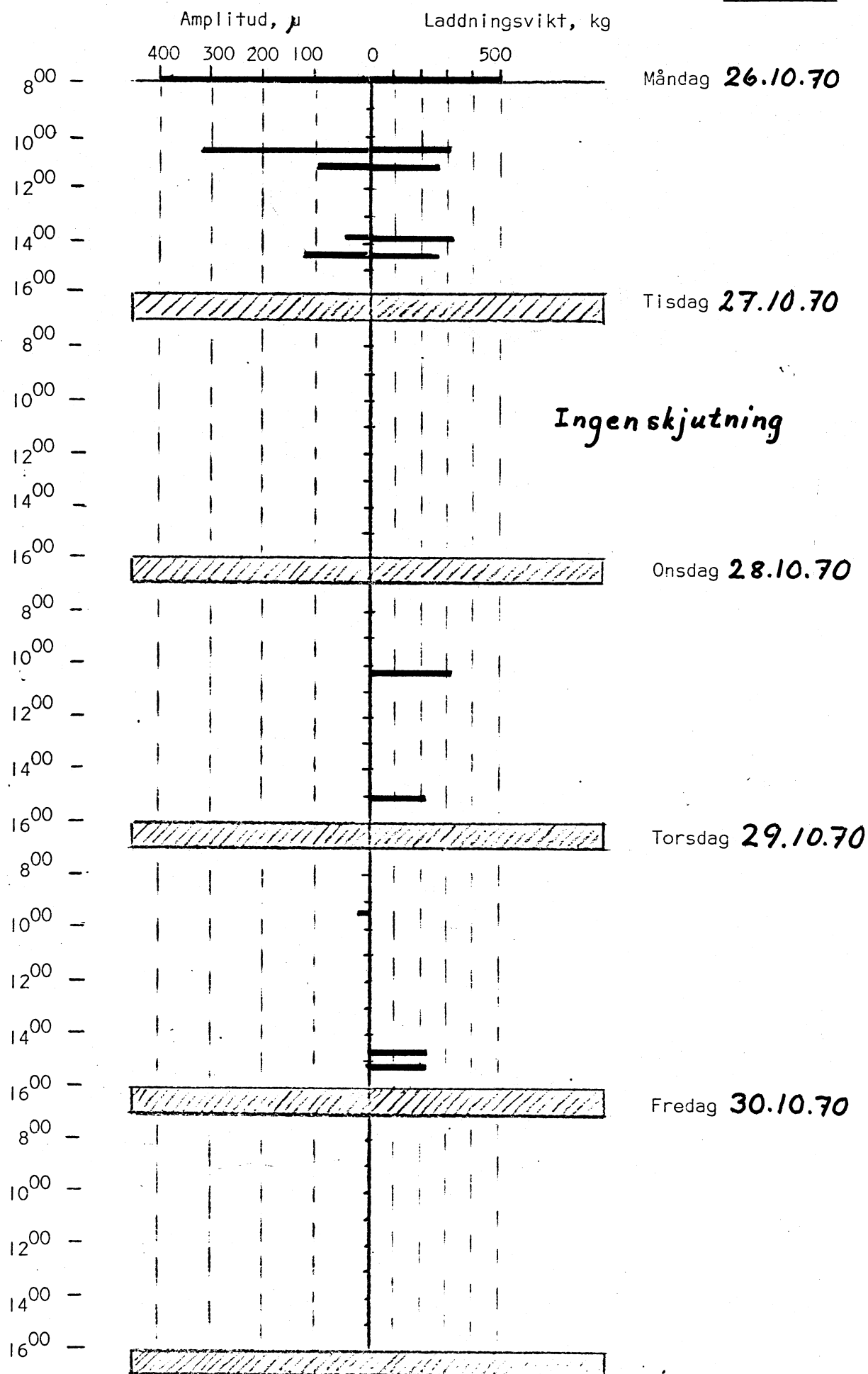


fig. 19. Amplitrafmätning i skorstenen, Siggebohyttan, horisontellt.

Tabell 1.

Resultat av ljudtrycksmätningar och väderleksobservationer.

Datum	Tid	Mätplats	Avst. km	Laddn. vikt kg	Max. tryck mbar	Ljudv. gång sek.	Luftens temp. °C	Luftens tryck	Vind riktn. hast. m/s	Väderleks typ	Anm.
10/9	13 ¹³	Svartbergsfallet	1.6	308	2.9	4.5	+ 15	720	SV 2-4	mulet, disigt	
24/11	12 ⁰⁵	- " -	1.6	300	1) 2) 4.0 2.5	4.6	+ 4	735	SS0 0-1	disigt, regn, snö	Två mikrofoner
"	12 ⁴⁰	- " -	1.6	400	5.1 3.2		+ 4	735	SS0 0-1	- " -	1) vid gavel mot skjut- platsen
25/11	11 ⁴⁵	- " -	1.6	100	1.8 0.84		+ 4	735	VSV 5-10	halvklart	2) vid motsatt gavel
"	14 ²⁶	- " -	1.6	90	1.7 0.80	4.6	+ 5	735	VSV 5	"	- " -
"	15 ⁰⁸	- " -	1.6	90	1.2 0.55		+ 5	735	VSV 5	"	- " -
2/10	13 ¹⁷	Stubbe	7.1	340	0.035	20.8	+ 11	735	SO 0-2	"	
10/9	10 ⁴⁵	Lundtorp	9.2	325	+0.20 -0.23	26.5	+ 12	720	SV 0-2	regn	
9/9	11 ⁵³	Siggebohyttan	11.2	435	<0.005	-	+ 15	730	SS0 0-2	regn, dis	Ljudtrycket ej uppmät- bart
"	13 ³⁵	- " -	11.2	240	<0.005	-	+ 15	730	SS0 0-2	" "	- " -
21/10	10 ¹⁰	- " -	11.2	260	0.56	31.2	+ 9	738	N 4-6	mulet	
"	10 ⁴⁰	- " -	11.2	260	+0.29 -0.35	31.2	+ 9	738	N 4-6	"	
"	13 ⁰³	- " -	11.2	400	0.87	31.7	+ 8	740	N 2-4	"	
22/10	10 ²⁰	- " -	11.7	300	0.74	33.0	+ 5	746	N 5-6	halvklart	
"	12 ⁰⁰	- " -	11.7	40	0.15	33.0	+ 5	746	N 6-8	"	

Tabell 2.

Sammanställning av tryckmätningar utförda mellan 1/5 - 30/11 1970 runt Nitro Metalls skjutplats i Nyberget. Ordning efter avstånd och datum.

Ortsnamn	Datum	Tid	Laddn.st. kg	Avst. km	Beräknat tryck ^{x)} m bar	Uppmätt tryck m bar	Anm.
Svartbergsfallet	20/5		240	1.6	2.30	1.8	
"	"		20	"	1.0	0.45	
"	10/9	13 ¹³	308	"	2.5	2.9	
"	24/11	12 ⁰⁵	300	"	2.5	4.0(2.5)	uppmätt nära vägg
"	"	12 ⁴⁰	400	"	2.7	5.1(3.2)	"
"	25/11	11 ⁴⁵	100	"	1.71	1.8(0.84)	"
"	"	14 ²⁶	90	"	1.66	1.7(0.80)	"
"	"	15 ⁰⁸	90	"	1.66	1.2(0.55)	"
Hällaboda	21/5		240	2.82	1.29	1.4	
Hammarbacken	3/6	10 ³⁰	400	3.5	1.24	0.23	
Grönvålsön	2/6	14 ⁰⁵	480	7.0	0.66	+0.58 -0.70	
Stubbre	2/10	13 ¹⁷	340	7.1	0.60	0.035	
Storå	2/6	10 ⁵⁵	480	7.3	0.63	0.20	
Lundtorp	10/9	10 ⁴⁵	325	9	0.45	+0.20 -0.23	
Siggebohyttan	9/9	11 ⁵³	435	11.2	0.40	<0.005	ej uppmättb.
"	"	13 ³⁵	240	11.2	0.33	<0.005	- " -
"	21/10	10 ¹⁰	260	"	0.34	0.56	
"	21/10	10 ⁴⁰	260	"	0.34	+0.29 -0.35	
"	"	13 ⁰³	400	"	0.39	0.87	
"	22/10	10 ²⁰	300	11.7	0.34	0.74	
"	"	12 ⁰⁰	40	"	0.17	0.15	

x) enl. $p = 700 \frac{(0.6 Q)^{1/3}}{R}$

Tabell 3.

Vibrationsmätningar utförda i samband med ljudtrycksmätningar.

Ortsnamn	Laddn. vikt kg	Max. tryck mbar	Mätplats	Giv. orien- tering	Max. sv.hast. mm/s	Frekvens p/s	Amplitud μ
Storå	480	0.20	gavel i st.växthuset	hor. ö.v.	1	8	20
"			grund - " -	vert.	0	-	
Hammarbacken	400	0.23	gavel i söder	hor. n.s.	0.8	5	25
Lundtorp	325	+0.20 -0.23	knut i sydväst	hor. n.s.	1.5	10.5	22
Stubbre	340	0.035	långvägg i nordväst	hor. n.o.	< 0.1	-	-
"			- " -	n.v.	< 0.1	-	-
"			jordspett vid jordk.	vert.	0	-	-
Siggebohyttan	260	0.56	skorsten, västra	hor. n.s.	3.8	10	55
"		"	långvägg i norr	hor. n.s.	0.8	-	-
"	260	0.29	skorsten, västra	hor. n.s.	1.8	10	32
"	400	0.87	" "	hor. n.s.	3.3	10	50
"		"	planka på norra gavel av loftbod	hor. n.s.	13.8	16	120
"	40	0.15	- " -	- " -	4.0	15	42
"		"	skorsten, västra	- " -	1.3	10	20

Tabell 4.

Vibrationsmätningar i kontorshuset vid Svartbergfallet.

id	Laddn. vikt kg	p mbar M_1 M_2	Givare 1 V. långväggen horisontell ö-v			Givare 2 Södra gaveln horisontell N-S			Givare 3 Södra gaveln horisontell ö-v			Givare 4 Ö. långväggen horisontell ö-v		
			v mm/s	f p/s	$A = \frac{v}{2\pi f} \mu$	$A = \int v dt \mu$	v mm/s	f p/s	$A = \frac{v}{2\pi f} \mu$	$A = \int v dt \mu$	v mm/s	f p/s	$A = \frac{v}{2\pi f} \mu$	$A = \int v dt \mu$
508	90	1.2	16.9	14.7	184.	153	28.3	13.3	338	300	6.3	14.2	70	
264	90	1.7	18.8	14.3	210	164	32.5	13.3	389		8.8	12.5	112	
145	100	1.8	17.7	14.7	192	150	32.8	12.3	424	357	8.1	13.1	99	
205	300	4.0	32	12.5	408		68	10.9	993		11.0	8.3	211	
240	400	5.1	40	8.7	732		100	13.3	1197		12.0	8.3	230	

M_1 , M_2 Mikrofon 1 respektive mikrofon 2.

x) givarnas orientering N-S

Tabell 4. (forts.)
Vibrationsmätningar i kontorshuset vid Svartbergfallet.

Tid	Laddn. vikt kg	p mbar M ₁ M ₂	Givare 5 Skorsten horisontell ö-v				Givare 6 Skorsten horisontell N-S				Givare 7 Skorsten vertikal			
			v mm/2	f p/s	$A = \frac{v}{2\pi f}$ μ	$A = \int v dt$ μ	v mm/s	f p/s	$A = \frac{v}{2\pi f}$ μ	$A = \int v dt$ μ	v mm/s	f p/s	$A = \frac{v}{2\pi f}$ μ	$A = \int v dt$ μ
15 ⁰⁸	90	1.2 0.55	4.4	8.3	84	87.5	3.8	10	60		1.3	10.5	20	
14 ²⁶	90	1.7 0.8	6.0	8.3	115	116	4.1	10	65		2	10.9	29	
11 ⁴⁵	100	1.8 0.84	6.4	8.2	127	107	4.8	10	76		2	10.7	32	
12 ⁰⁵	300	40 2.5	23	7.2	508		10.5	6.6	253		7.4	10	118	
12 ⁴⁰	400	5.1 3.2	33	7.2	730		14.2	6.4	353		7.6	8.1	149	

M₁, M₂ Mikrofon 1 respektive mikrofon 2.

Tabell 5.

Ljudtryckvågornas frekvens vid Svartbergsfallet den 24/11 och 25/11.

Tid	Laddn. vikt kg	M_1		M_2	
		frekvens av pos. puls p/s	frekvens hel N-våg p/s	frekvens av pos. puls p/s	frekvens hel N-våg p/s
15 ⁰⁸	90	17.9	13.0	12.7	11.9
14 ²⁶	90	16.7	11.1	11.5	10.6
11 ⁴⁵	100	15.9	11.9	12.1	10.9
12 ⁰⁵	300	10	8.1	8.8	7.9
12 ⁴⁵	400	10	8.0	8.1	7.7

Tabell 6.

Tidsdifferens mellan tryckvågens ankomst till Mikrofon I och registrering i respektive givare,
samt rörelseriktning.

Laddn. vikt	t ₁ ms	riktn.	t ₂ ms	riktn.	t ₃ ms	riktn.	t ₄ ms	riktn.	t ₅ ms	riktn.	t ₆ ms	riktn.	t ₇ ms	riktn.
90	32	ö	1	N	13	V	13	V	37	V	15	N	37	ned
90	31	"	1	"	13	"	13	"	35	"	18	"	33	"
100	30	"	2	"	17	"	16	"	39	"	19	"	37	"
300	15	"	1	"	1	"	1	"	27	"	13	"	24	"
400	17	"	2	"	2	"	5	-	37	"	12	"	24	"