



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R32:1979**

**Bestämning av  
markimpedansen**

**Sven-Ingvar Thomasson**

**Byggforskningen**

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND  
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN  
BIBLIOTEKET

R32:1979

BESTÄMNING AV MARKIMPEDANSEN  
ESTIMATION OF THE GROUND IMPEDANCE

Sven-Ingvar Thomasson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 770077-0 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för byggnadsakustik, LTH, Lund.

---

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R32:1979

ISBN 91-540-2987-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1979 951897

## INNEHÅLL

BETECKNINGAR . . . . .	4
1 INTRODUCTION . . . . .	5
2 METOD . . . . .	7
2.1 Beskrivning . . . . .	7
2.2 Giltighetsområde . . . . .	9
2.3 Vindens inverkan – en första ordningens approximation .	15
2.4 Andra felkällor . . . . .	18
3 EXPERIMENT . . . . .	21
3.1 Uppläggnig . . . . .	21
3.2 Genomförande . . . . .	22
4 RESULTAT . . . . .	23
4.1 Inledning . . . . .	23
4.2 Beroendet av lokaliseringen i Sverige . . . . .	23
4.3 Olika årstider . . . . .	25
4.4 Olika marktyper . . . . .	28
4.5 Ytterligare kommentarer . . . . .	28
4.6 Modellmark – förslag till medelimpedanser . . . . .	30
<i>Tabell 1</i> . . . . .	34
REFERENSER . . . . .	35
APPENDIX . . . . .	36
<i>Tabell A1</i> . . . . .	37
ESTIMATION OF THE GROUND IMPEDANCE – ENGLISH SUMMARY . . . .	63
<i>Table E1</i> . . . . .	66
<i>Table E2</i> . . . . .	69

## BETECKNINGAR

a	Parameter i markmodell	
b	Parameter i markmodell	0
c	Parameter i markmodell	$s^{-1}$
$c_0$	Ljudhastighet (340 m/s)	m/s
d	Parameter i markmodell	$s^{-1}$
$k_0$	Vägtal	$m^{-1}$
K	Kompressibilitet	$m^2/N$
p	Tryck	$N/m^2$
$p_0$	Statiskt tryck	$N/m^2$
$\tilde{p}$	Tryckvariation	$N/m^2$
r	Avstånd källa-mottagare	m
t	Tid	s
$\bar{u}$	Hastighet	m/s
$\bar{u}_0$	Hastighetskomponent	m/s
$\tilde{u}$	Hastighetsvariation	m/s
x	Koordinat	m
y	Koordinat	m
z	Koordinat	m
$x_M$	Mottagarkoordinat	m
$y_M$	Mottagarkoordinat	m
$z_M$	Mottagarkoordinat	m
$z_1$	Tjockleken hos det porösa skiktet	m
Z	Impedans	
$\delta$	Diracs deltafunktion	
$\Delta\phi$	Fasförskjutning	
$\rho$	Täthet	$kg/m^3$
$\rho_0$	Statisk täthet	$kg/m^3$
$\tilde{\rho}$	Täthetsvariation	$kg/m^3$
$\rho_p$	Effektiv täthet	$kg/m^3$
$\sigma$	Strömningsmotstånd	$Ns/m^4$
$\omega$	Vinkelhastighet	$s^{-1}$
$\Omega$	Porositet	
$\nu$	Markadmittans = $1/Z$	
$\bar{\nabla}$	$(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$	
$\square$	$\partial/\partial t + u_0 \partial/\partial x$	

## 1 INTRODUKTION

Ett fundamentalt problem vid all ljudutbredning utomhus är markens akustiska egenskaper. Speciellt kan man se två stora problemområden då en beskrivning av marken är nödvändig: vid trafikbuller och bulleremission från industrier.

All mark har någon typ av dämpande inverkan. Denna beror på ytans beskaffenhet, ljudkällans spektrum samt ljudkällans och mottagarens placering. Om vi inte hade haft denna markdämpning skulle orimligt stora säkerhetsavstånd från t ex motorleder erhållas, 1000 m skulle inte vara omöjligt. Således kan vi ej använda teorin för ljudutbredning om denna inte tar hänsyn till markens akustiska egenskaper; då kommer vi att planera på tok för stora säkerhetsavstånd. Redan existerande trafikbullermodeller tar hänsyn till markdämpningen, men man tar av praktiska skäl aldrig hänsyn till markytans beskaffenhet. Söker man för någon viss marktyp dess inverkan ger dessa modeller inget svar. Vidare skiljer sig olika trafikbullermodeller något åt vad gäller markens inverkan, vilket skulle kunna ha en naturlig förklaring i att de är gjorda i olika delar av landet. Det finns således ett behov av att undersöka markens akustiska egenskaper mera detaljerat än vad som tidigare gjorts, och vi kommer att presentera resultat av hur marken uppför sig både beroende på marktyp, årstidsväxlingar och dess belägenhet i Sverige.

Resultaten är inte bara direkt tillämpliga praktiskt, utan också för den forskning som bedrivs avseende meteorologins inverkan på ljudutbredningen. Meteorologins inverkan ökar med ökande avstånd från källan, och tillräckligt långt från källan sätts markdämpningen eventuellt ur spel. Men för att kunna behandla detta problem måste man känna markens egenskaper. För närvarande bedrivs härvidlag forskning väsentligen avseende trafikbuller, men i skrivande stund initieras stora projekt avseende referensmätssystem för bulleremission från industrier. I båda dessa fall kan således detta projekt få direkt betydelse och därmed även indirekt praktisk betydelse.

Vi har ännu inte berört hur denna beskrivning av marken går till. En total mekanisk-fysikalisk beskrivning av hur marken reagerar

för ljudvågor är principiellt möjlig, men synes ligga långt bortom vad vi förmår idag. En enkel, men faktiskt också fullt tillräcklig, beskrivning är nämnd redan i titeln: "markimpedans". Denna anger förhållandet mellan tryck och hastighet vinkelrätt mot en yta för en viss frekvens. Vi bryr oss således inte alls om hur marken under denna tänkta yta fungerar, endast förmågan att påverka ljud som reflekteras mot den beaktas.

Vi skall i det följande beskriva den metod som kommer att användas och därvidlag även diskutera de felkällor som kan förekomma. Speciellt intressant är den approximativa uppskattningen av vindens inverkan. Vi kommer att ägna kap. 2 åt dessa problem.

I kap. 3 kommer vi att ta upp experimentseriens utförande. Alla relevanta primärdata finns behändigt samlade i ett appendix, som består av en tabell och ett antal figurer.

Bearbetningen av dessa primärdata är gjord i kap. 4, och i detta kapitel ges jämförelsen mellan olika delar av landet, beroendet av årstid samt marktyp. Vidare föreslås ett slags medelvärde ("medelmark") av de mätta impedanserna. Dessa resultat finns också samlade i en tabell (tabell 1, se avsnitt 4.6).



## 2 METOD

### 2.1 Beskrivning

Normalt när man mäter impedansen hos en yta studerar man någon typ av interferensmönster, söker upp maxima och minima och beräknar impedansen med hjälp av de uppmätta storheterna. Man är då inte intresserad av vad som genererar impedansen, om det är ett eller flera porösa skikt, om det är en gradvis övergång mellan olika media, om strukturen (skelettet) har någon inverkan osv. Däremot kan man vara intresserad av hur impedansen beror av den plana vågens infallsvinkel eller ej. Om den är oberoende talar vi om en punktimpedans.

Den mätmetod som kommer att föreslås följer inte vad som skulle kunna anses normalt och det har följande förklaring: Om man skall mäta impedansen måste avståndet från ytan beräknas, men normalt vet vi inte exakt var ytan ligger, i alla fall inte med en noggrannhet på några få millimeter, vilket stundtals kan vara nödvändigt.

Ett sätt att gå runt problematiken presenterades i början av 70-talet av Jonasson [1]. Han uppmätte impedansen genom att studera ljudtrycksnivåns beroende av höjden. Detta är attraktivt ur teoretisk synpunkt; vi behöver inte förutsätta något om markens inre egenskaper samtidigt som det nämnda kritiska beroendet av ytans läge blir litet. En nackdel är dock att det är svårt att bestämma impedansen vid låga frekvenser på grund av att ljudnivåns beroende av höjden är litet. Vidare är metoden ur praktisk synvinkel något otympligt, speciellt om många ytor skall undersökas. Man måste nämligen utföra och registrera höjdsvep för varje frekvens på en viss yta.

Ett sätt att undgå de två sista problemen presenterades av författaren i [2]. Man måste då göra avkall på generaliteten vid användningen. Utgångspunkten är att man betraktar marken som bestämd av ett ekvivalent poröst skikt med en viss tjocklek som i Fig. 1. Ur akustisk synvinkel skall detta skikt bete sig som marken från luften sett. Om det nu fanns ett sådant skikt kunde man teoretiskt tänka sig att mäta dess tjocklek, strömningsmot-

stånd, porositet osv, men det vore inte helt lätt att realisera i praktiken. Vi betraktar därför skiktet som bestående av ett antal okända parametrar som på något sätt skall bestämmas.

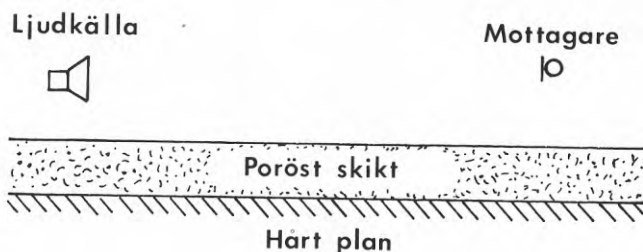


FIG. 1. Matematisk markmodell. Det porösa skiktet utgör en ekvivalent akustisk beskrivning av den mycket mer komplicerade marken utomhus.

FIG. 1. Mathematical model of the ground. The porous layer is an equivalent acoustic description of the much more complicated real ground.

Man kan eliminera onödiga kombinationer av de fysikaliska parametrarna (som ger samma impedans) och erhåller då fyra oberoende parametrar (modellen har fyra frihetsgrader). Den normaliserade punktadmittansen (luften har den normaliserade admittansen 1 och en hård yta har admittansen 0) blir då [med  $\exp(-i\omega t)$ ]

$$v = \frac{a \cdot e^{ib} \tan\left[e^{ib} \left(1 + \frac{ic}{\omega}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\omega}{2\pi d}\right]}{\left(1 + \frac{ic}{\omega}\right)^{\frac{1}{2}} i} = \frac{1}{Z} \quad (1)$$

där  $Z$  är impedansen och där konstanterna  $a$ ,  $b$ ,  $c$  och  $d$  är relaterade till fysikaliska parametrar via

$$a = c_0 |K \rho_0 \Omega|^{\frac{1}{2}} \rho_0 / \rho_p \quad (2a)$$

$$b = \arg\left[(K \rho_p)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (2b)$$

$$c = \sigma / \rho_p \quad (2c)$$

$$d = \left[|K \rho_0 \Omega|^{\frac{1}{2}} 2\pi z_1\right]^{-1} \quad (2d)$$

Vi har infört  $K$  = kompressibilitet,  $\Omega$  = porositet,  $\rho_p$  = effektiv

täthet för fluiden i porerna,  $\sigma$  = strömningsmotstånd och  $z_1$  = tjocklek hos det ekvivalenta skiktet.

Antages isoterma tillståndsförändringen,  $K = 10^{-5}$ , och 100 % porositet,  $\Omega = 1$ , får vi

$$\rho_p \approx \frac{1.4}{a} \quad (3a)$$

$$\sigma \approx \frac{1.4 c}{a} \quad (3b)$$

$$z_1 \approx \frac{45}{d} \quad (3c)$$

och man kan således få en uppfattning om hur skiktet fysikaliskt kan realiseras.

Problemet med impedansen kvarstår dock: Hur bestämmer man a, b, c och d? Det visar sig då att om man mäter med källan och mottagaren placerad nära marken, uppvisar teoretiska frekvenssvop samma karakteristika som uppmätta, och metoden består helt enkelt i en anpassning mellan uppmätta och teoretiska kurvor som i Fig. 2. Härvidlag använder man lämpligen kurvskarorna i [3] för en grovbestämning, och stordator för en noggrannare uppskattning av parametrarna.

I de följande avsnitten skall vi kort diskutera felkällor samt försöka ge en uppfattning om noggrannheten i bestämningen av impedansen.

## 2.2 Giltighetsområde

I detta avsnitt skall vi ta upp två aspekter på giltighetsområdet, nämligen inom vilket frekvensområde och på vilket avstånd från källan de bestämda impedanserna kan användas.

Av erfarenhet—vilket kommer att styrkas i nästa avsnitt—är det svårt att förutsäga ljudutbredningen utan att ta med vindens inverkan över t ex 1-2 kHz inom de avstånd som vi här tänker oss, 10-100 m från källan. Över dessa frekvenser ställs ganska höga krav på väderleken, speciellt vind- och temperaturgradienter.

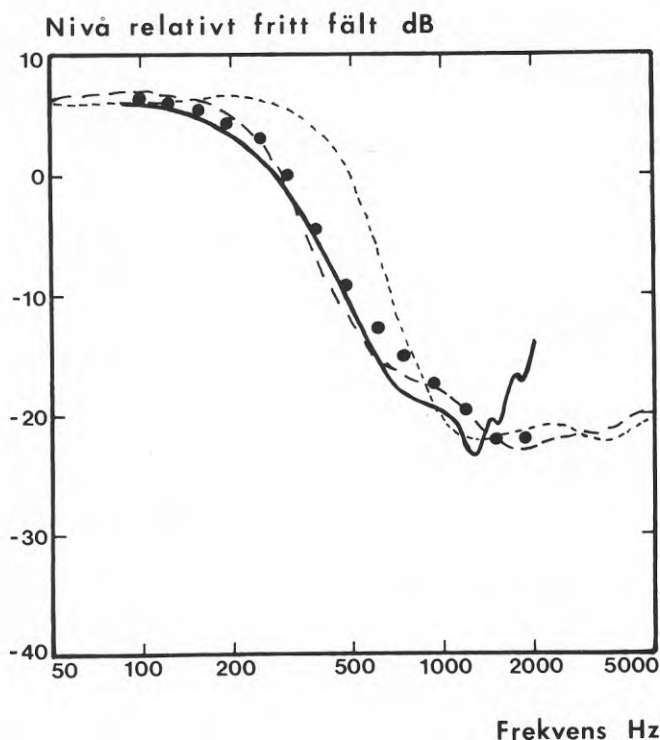


FIG. 2. Bestämning av markimpedansen. (i) Grov uppskattning av parametrarna  $a$ ,  $b$ ,  $c$  och  $d$  med hjälp av kurvskarorna i [3] (--- och - - - -). (ii) Finjustering i dator (● ● ●). Källhöjd = mottagarhöjd = 0.1 m. Avstånd källa-mottagare = 20 m.

— Uppmätt från en gräsmatta.

---  $a = 0.25$ ,  $b = 10^0$ ,  $c = 5000 \text{ s}^{-1}$ ,  $d = 400 \text{ s}^{-1}$ .

- - - -  $a = 0.25$ ,  $b = 10^0$ ,  $c = 10000 \text{ s}^{-1}$ ,  $d = 800 \text{ s}^{-1}$ .

● ● ●  $a = 0.25$ ,  $b = 10^0$ ,  $c = 7500 \text{ s}^{-1}$ ,  $d = 425 \text{ s}^{-1}$ .

FIG. 2. Estimation of the ground impedance. (i) Preliminary estimate of the parameters  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $d$  with the aid of the curves in [3] (--- and - - - -). (ii) Least squares fit with a computer (● ● ●). Source height = receiver height = 0.1 m. Distance source-receiver = 20 m.

— Grassland, measured.

---  $a = 0.25$ ,  $b = 10^0$ ,  $c = 5000 \text{ s}^{-1}$ ,  $d = 400 \text{ s}^{-1}$ .

- - - -  $a = 0.25$ ,  $b = 10^0$ ,  $c = 10000 \text{ s}^{-1}$ ,  $d = 800 \text{ s}^{-1}$ .

● ● ●  $a = 0.25$ ,  $b = 10^0$ ,  $c = 7500 \text{ s}^{-1}$ ,  $d = 425 \text{ s}^{-1}$ .

Följande mätning kan tjänstgöra som exempel. Den är tagen från en trumlad stubbåker vid LTH i Lund, en dag då vädret var utmärkt (vindstilla, låg molnhöjd) för studier av ljudutbredning utomhus. I Fig. 3 finns den uppmätta kurvan och i Fig. 4 de mätta impedanserna som är bestämda på avståndet 20 m från källan. Som synes varierar impedansen endast svagt med det utvalda frekvensområdet.



FIG. 3. Ljudutbredning över en trumlad stubbåker vid LTH i Lund. Avstånd källa-mottagare = 20 m. Källhöjd = mottagarhöjd = 0.1 m.

*FIG. 3. Levels relative free field versus frequency for a stubblefield in Lund. Distance source-receiver = 20 m. Source height = receiver height = 0.1 m.*

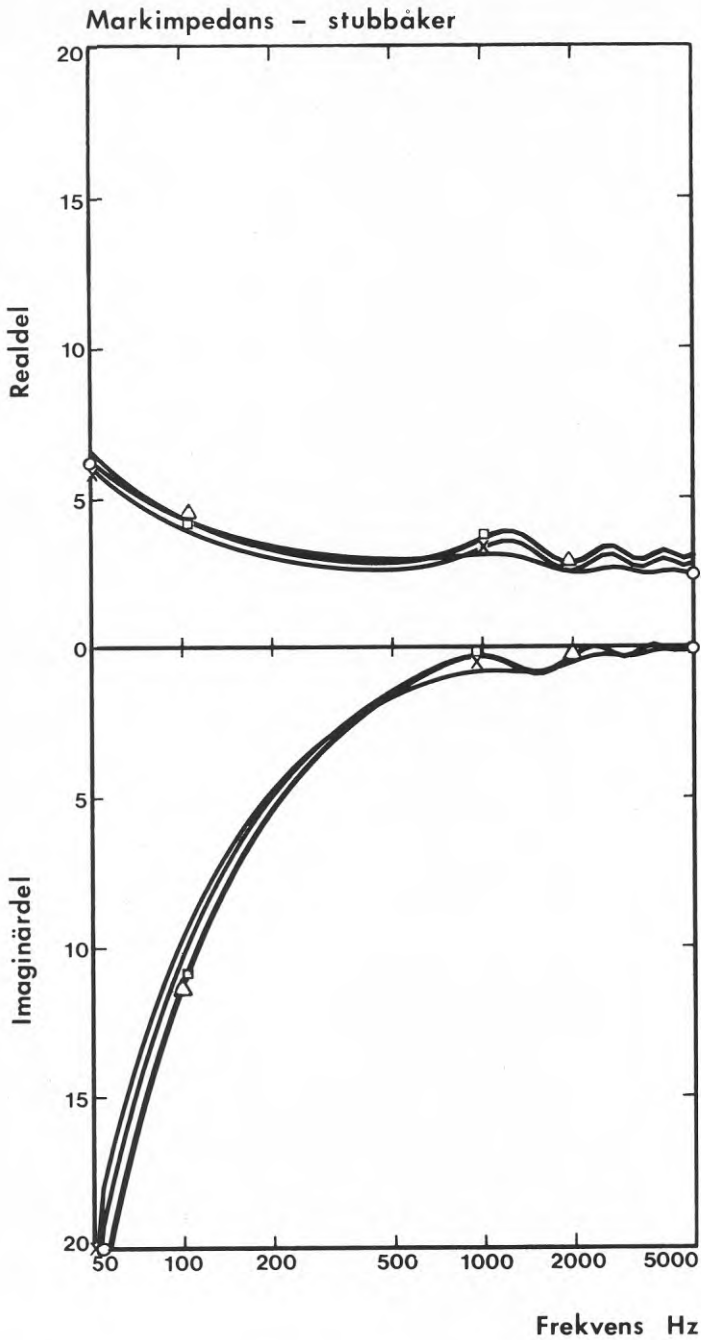


FIG. 4. Olika frekvensintervall. Impedanser hörande till Fig. 3. Impedanserna är bestämda genom kurvanpassning i följande frekvensintervall:

x — x 0.05 - 1 kHz; o — o 0.05 - 5 kHz;  
 □ — □ 0.1 - 1 kHz; Δ — Δ 0.1 - 2 kHz;



FIG. 4. The influence on the frequency range used for the least squares fit. The impedances correspond to Fig. 3. The following frequency ranges have been used:

x — x 0.05 - 1 kHz; o — o 0.05 - 5 kHz;  
 □ — □ 0.1 - 1 kHz; Δ — Δ 0.1 - 2 kHz;

Beroendet av mätavstånd från källan visas i figurerna 5 och 6.

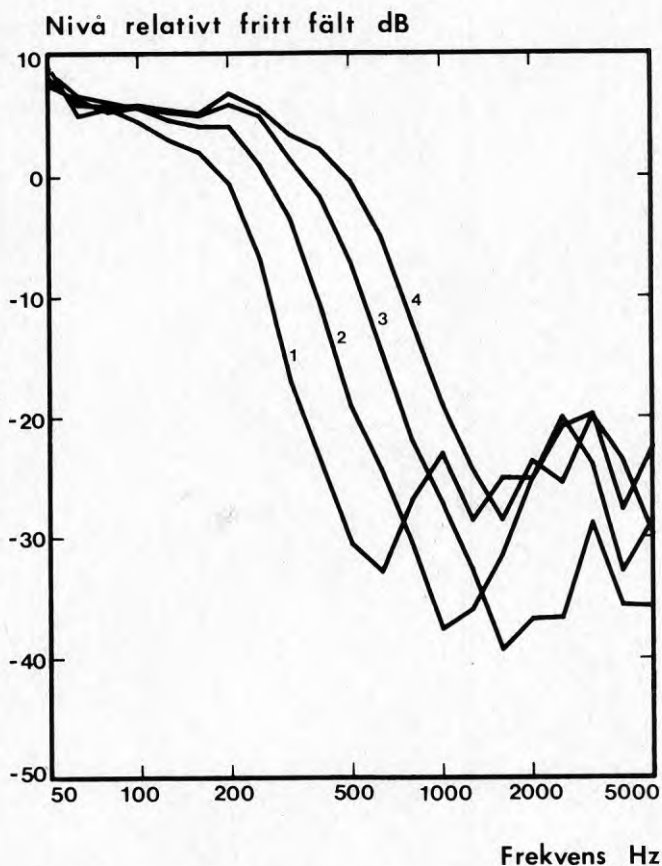


FIG. 5. Ljudutbredning över en klöveräng vid Martaobservatoriet, Uppsala. Avstånd källa-mottagare enligt:

	<u>Avstånd källa-mottagare</u>	<u>Mottagarhöjd</u>	<u>Källhöjd</u>
1.	10 m	0.1 m	0.1 m
2.	20 m	0.1 m	0.1 m
3.	40 m	0.2 m	0.2 m
4.	80 m	0.4 m	0.4 m

FIG. 5. Levels relative free field versus frequency for a cloverfield near Uppsala. The following notation is used:

	<u>Distance source-receiver</u>	<u>Receiver height</u>	<u>Source height</u>
1.	10 m	0.1 m	0.1 m
2.	20 m	0.1 m	0.1 m
3.	40 m	0.2 m	0.2 m
4.	80 m	0.4 m	0.4 m

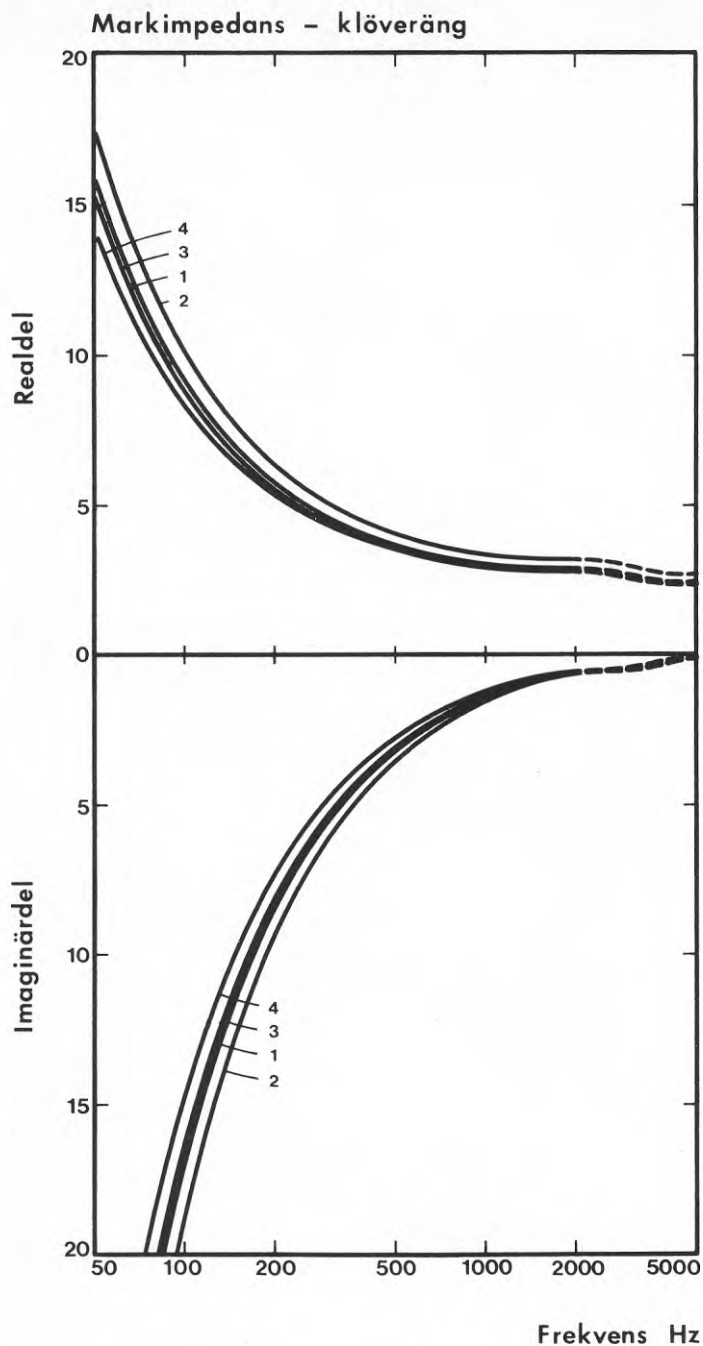


FIG. 6. Olika mätpositioner: Impedanser hörande till Fig. 5. Impedanserna är bestämda genom kurvanpassning i samma frekvensintervall (0.05-2 kHz) men i olika mätpunkter enligt:

	<u>Avstånd källa-mottagare</u>	<u>Mottagarhöjd</u>	<u>Källhöjd</u>
1.	10 m	0.1 m	0.1 m
2.	20 m	0.1 m	0.1 m
3.	40 m	0.2 m	0.2 m
4.	80 m	0.4 m	0.4 m



FIG. 6. The influence of different positions of source and receiver on the impedance. The impedance is estimated for the four frequency sweeps in Fig. 5 in the frequency range 0.05-2 kHz. The following notation is used:

	<u>Distance source-receiver</u>	<u>Receiver height</u>	<u>Source height</u>
1.	10 m	0.1 m	0.1 m
2.	20 m	0.1 m	0.1 m
3.	40 m	0.2 m	0.2 m
4.	80 m	0.4 m	0.4 m

Denna mätning är tagen från Martaobservatoriet vid Uppsala under goda meteorologiska betingelser (men inte perfekta). Problemen med vind börjar som synes i Fig. 5, frekvensområdet 1-2 kHz. Vindhastigheten var vid detta tillfälle ca 1 m/s (på 10 m höjd över marken). Detta ger en uppfattning om varför ett material, vad avser mätning av impedans, svårigen kan bli talrikt, det är sällsynt med de gynnsamma betingelser som är nödvändiga. Detta verkar vara den enda svårigheten med metoden i fråga. Vad övrigt gäller denna mätning (Fig. 6), notera återigen att impedanserna är mycket snarlika inom det uppmätta frekvensområdet.

### 2.3 Vindens inverkan – en första ordningens approximation

Ett speciellt problem utgör rörelser i lufthavet. I detta avsnitt skall vi endast i en första approximation försöka belysa storleksordningen av denna inverkan. Man måste då gå tillbaka till grundekvationerna – de icke lineariserade ekvationerna – för ljudutbredning i luft. De är

$$\dot{\rho} + \rho(\bar{\nabla} \cdot \bar{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \dot{\bar{u}} + \bar{\nabla} p = 0 \quad (5)$$

$\rho$ ,  $p$  och  $\bar{u}$  är som brukligt täthet, tryck och hastighetsvektor, och vi avser här de totala kvantiteterna, statisk plus en överlagrad förändring. Tidsderivatan "dot" är den materiella derivatan  $\frac{d}{dt}$  och den kan uttryckas som

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \bar{\nabla}) \quad (6)$$

där  $\frac{\partial}{\partial t}$  är lokal tidsderivata.

Inför de statistiska storheterna  $\rho_0$ ,  $p_0$  och  $u_0\hat{x}$ :

$$\rho = \rho_0 + \tilde{\rho} \quad (7a)$$

$$p = p_0 + \tilde{p} \quad (7b)$$

$$\bar{u} = u_0\hat{x} + \tilde{u} \quad (7c)$$

Vi antar nu att mediet (lufthavet) rör sig homogent med hastigheten  $u_0$  i x-riktningen som i Fig. 7. Ljudhastigheten  $c_0^2$  infö-

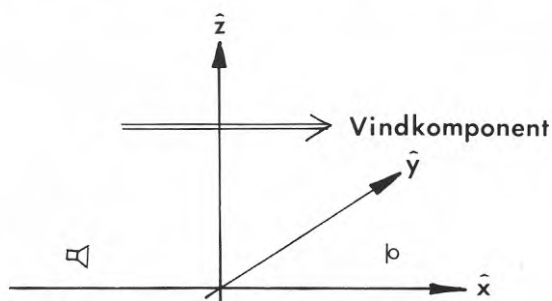


FIG. 7. Vindmodellen. Vindkomponenten är parallell med x-axeln och har beloppet  $u_0$ .

FIG. 7. The model of wind. The wind component is parallel with the x-axis and has the magnitude  $u_0$ .

res som

$$c_0^2 = \tilde{p}/\tilde{\rho} \quad (8)$$

Sätt in Ekv. (6)-(7) i Ekv. (4)-(5) och tag endast med termer av högst första ordning (således strykes termer av typen  $\tilde{\rho}\tilde{p}$ ,  $\tilde{\rho}\tilde{u}$ ,  $\tilde{u}\tilde{\rho}$ ). Vi får då

$$\square\tilde{\rho} + \rho_0 \bar{\nabla} \cdot \tilde{u} = 0 \quad (9)$$

$$\bar{\nabla}\tilde{p} + \rho_0 \square\tilde{u} = 0 \quad (10)$$

där vi infört operatorn

$$\square = \frac{\partial}{\partial t} + u_0 \frac{\partial}{\partial x} \quad (11)$$

Elimination av  $\tilde{u}$  och  $\tilde{p}$  i Ekv. (8), (9) och (10) ger

$$\bar{\nabla}^2 \tilde{p} = \square^2 \tilde{p} / c_0^2 \quad (12)$$

Genom koordinattransformationen

$$x' = x - u_0 t \quad (13a)$$

$$y' = y \quad (13b)$$

$$z' = z \quad (13c)$$

$$t' = t \quad (13d)$$

övergår Ekv. (12) i

$$\bar{\nabla}'^2 \tilde{p} = \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t'^2} \quad (14)$$

som för en punktkälla i fri rymd har den välkända lösningen

$$\tilde{p} = \frac{\delta(R'/c_0 - t')}{R'} \quad (15a)$$

$$R' = \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2} \quad (15b)$$

och genom att gå tillbaka till ursprungliga koordinatsystemet

$$\tilde{p} = \frac{\delta(R_t/c_0 - t)}{R_t} \quad (16a)$$

$$R_t = \sqrt{(x - u_0 t)^2 + y^2 + z^2} \quad (16b)$$

Ljudet når således mottagaren  $(x_M, y_M, z_M)$  efter tiden  $(t_1 = R_{t_1}/c_0)$

$$t_1 = \frac{1}{c_0^2 - u_0^2} \left[ -u_0 x_M + \sqrt{R_M^2 c_0^2 + u_0^2 (x_M^2 - R_M^2)} \right] \quad (17a)$$

$$R_M = \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2} \quad (17b)$$

Vindhastigheten antages liten i förhållande till ljudhastighe-

ten ( $u_0 \ll c_0$ ). Då blir tiden för ljudpulsens ankomst till mottagaren

$$t_1 \cong \frac{R_M}{c_0} - \frac{u_0 x_M}{c_0^2} \quad (18)$$

Vi gör nu följande grova betraktelse. Den sista termen i Ekv. (18) antages ge en uppfattning om vindens inverkan. Säg att lufthavet har en hastighetskomponent som kan vara i storleksordningen  $u_0$  (från markyta och uppåt). Vi kan då råka ut för tidsförskjutningar mellan direkt och reflekterad våg upp till storleksordningen  $u_0 x_M / c_0^2$ . Interferensen störs av ett fasfel i storleksordningen

$$\Delta\phi \sim \omega u_0 x_M / c_0^2 \quad (19)$$

I standardfallet,  $x_M = 20$  m,  $f \leq 2000$  Hz, blir villkoret på vindhastigheten (fasfel  $\Delta\phi \ll 2\pi$ )

$$u_0 \ll \frac{2\pi(340)^2}{20 \cdot 2\pi \cdot 2000} = 3 \text{ m/s} \quad (20)$$

vilket utgör ett ganska starkt villkor och stämmer grovt överens med praktisk erfarenhet, se exempelvis Fig. 5. Det måste vara i det närmaste vindstilla för att man skall kunna använda mätresultaten upp till 2 kHz.

#### 2.4 Andra felkällor

Här borde kommit några rader om alla de tänkbara felkällor som metoden kan vara behäftad med, men vi nöjer oss här med ett mycket illustrativt exempel.

För ungefär tre år sedan (1975) gjordes mätningar enligt den skisserade metoden, och hela mätkedjan, från mikrofon till högtalare, bestod av en helt annan utrustning. Mätningen gjordes på en gräsmatta, vilken bör ha ungefär samma impedans två somrar senare, då mätningar med den nya uppsättningen instrument gjordes, en mätkedja som även var kraftigt automatiserad. Resultatet visas i Fig. 8 och 9. Som synes är impedanserna täm-

ligen lika i de båda fallen, och det kan alltså anses troligt att själva mätförfarandet har en rimlig noggrannhet.

Den enda anmärkning som egentligen kan fällas mot metoden efter denna genomgång är att vi "egentligen" inte mäter impedans, utan "bara" förklarar mätta frekvenssvop. Hur som helst, vi kommer i fortsättningen att visa att man lätt finner parameterkombinationer av a, b, c och d som förklarar uppmätta data.

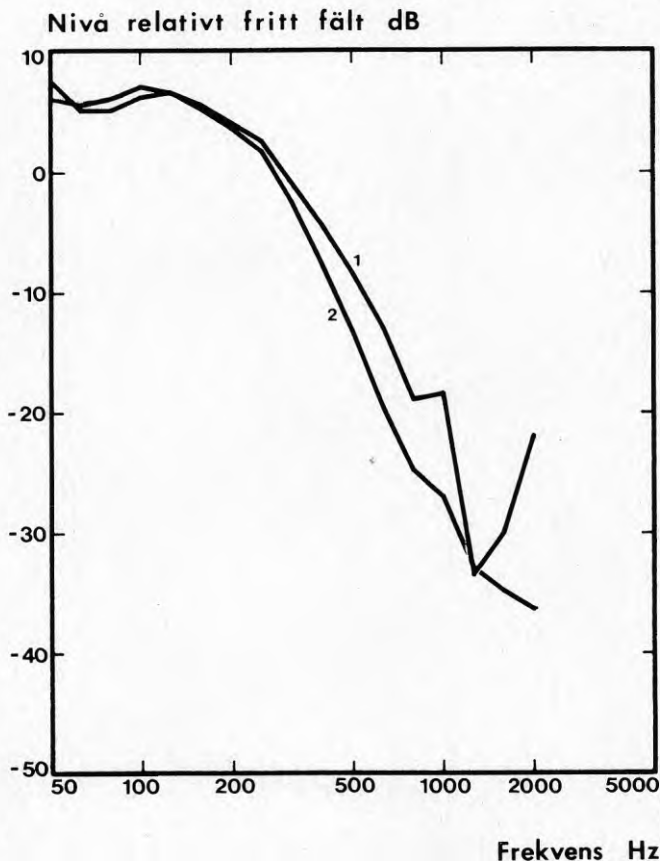


FIG. 8. Mätkedjans inverkan och långtidsvariation på en gräsmatta vid LTH i Lund. Vid de två tillfällena användes helt olika mätkedjor. Avstånd källa-mottagare = 20 m. Mottagarhöjd = källhöjd = 0.1 m.

1. Mätt sommaren 1975. 2. Mätt sommaren 1977.

FIG. 8. The influence of the measurement equipment and long time variation of the levels relative free field for a grassland in Lund. At the two occasions two different measurement equipments were used. Distance source-receiver = 20 m. Receiver height = source height = 0.1 m.

1. Measured in summer 1975. 2. Measured in summer 1977.

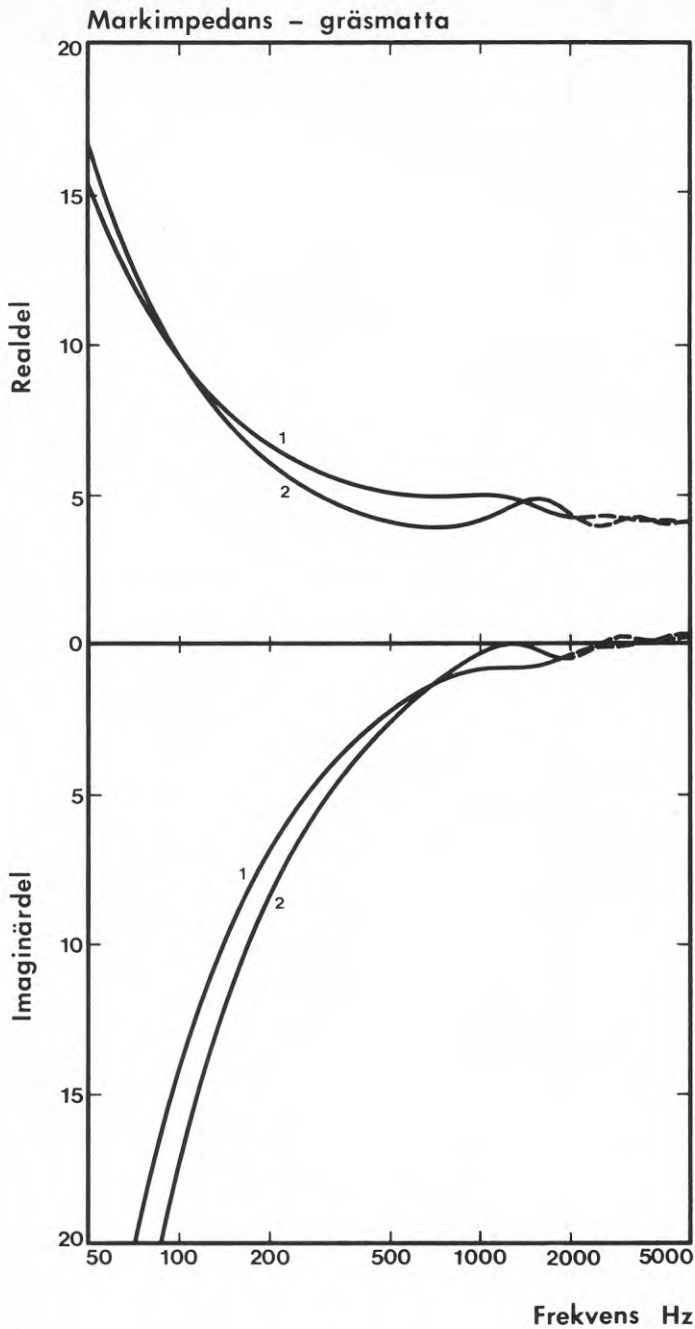


FIG. 9. Mätkedjans inverkan och långtidsvariation. Impedanser svarande mot Fig. 8; använt frekvensintervall 0.05-2 kHz (se vidare Fig. 8).

1. Mätt sommaren 1975. 2. Mätt sommaren 1977.

FIG. 9. Influence of measurement equipment and long time variation. Impedances corresponding to Fig. 8; frequency range used for the least squares fit 0.05-2 kHz.

1. Measured in summer 1975. 2. Measured in summer 1977.

### 3 EXPERIMENT

#### 3.1 Uppläggnig

Den utrustning som krävs för att genomföra en mätning av impedansen är – även om den till stor del består av standardutrustning – relativt otymplig. Det är därför knappast rimligt att man skulle kunna skaffa sig en detaljerad kännedom om marken, så att impedansen kunde bestämmas för praktiskt taget varje yta. Normalt är vi inte heller intresserade av en så detaljerad beskrivning av marken. Vidare ger meteorologin – främst vind, men även temperaturgradienter – begränsningar vid användandet av metoden. Man bör då notera att det i sådana fall inte bara är metoden som inte fungerar tillfredsställande, utan även vår ljudutbredningsmodell. Även om vi kände impedansen så finns en annan komponent, rörelser eller inhomogeniteter i lufthavet, som gör våra normala modeller obrukbara.

Detta kan sägas bilda en ram kring projektet. Projektet kom därför att formuleras som en studie av markimpedansen

- (i) i olika delar av landet; södra och mellersta Sverige,
- (ii) vid olika årstider,
- (iii) för olika marktyper,

och målet var som sagt inte ett detaljstudium, utan en för praktiskt bruk tillräckligt noggrant genomförd studie med förslag till något slags medelimpedans eller medelimpedanser för olika ytor och årstider.

Vad gäller valet av mätplatser koncentrerade vi oss på tre områden:

- Uppsala; Marta Observatorium på Uppsalaslätten ca 9 km norr om Uppsala vid Europaväg 4.
- Borås; I skogstrakterna ca 10 km norr om Borås.
- Lund; Vid Tekniska Högskolan i Lund samt österut, väsentligen på Romeleåsen.



Grovt sett har vi, förutom att platserna ligger i olika delar av landet, fått både skogsmark (Borås) och slättmark (Uppsala och Lund).

Årstiderna har varit svårare att täcka tillfredsställande. Man kan bara genomföra mätningen vid mycket god väderlek, vilket gör att det är svårt att planera mättdagen, speciellt på de platser som ligger långt från Lund.

Valet av marktyp är också styrt av praktiska betingelser, man måste ha tillgång till en slät yta, helst ej i närheten av vägar eller dylika bullerkällor och markytan får inte vara upptagen för andra ändamål (sådd, bete).

### 3.2 Genomförande

Totalt uppmättes 175 frekvenssvep för olika avstånd källa-mottagare och vid olika tillfällen. Antalet mättillfällen var 40 och antalet olika marktyper i storleksordningen 10 stycken. Uppsala besöktes två gånger (augusti 1977 och juni 1978), liksom Borås vid två tillfällen (maj 1978 och juli 1978). Från Lund är mätserien tämligen jämnt fördelad över hela året.

Det omfattande primärmaterialet behandlades på det sätt som beskrevs i avsnitt 2 och vi har valt att presentera de sålunda erhållna impedanserna i ett appendix. Detta består av en tabell, Tabell A1, som kort ger mätplats, datum, marktyp, konstanterna (a, b, c, d), vilka mätpositioner som använts vid bestämningen av impedansen, samt en figurhänvisning där impedansen är plottad som funktion av frekvensen. Då vi mätt på ett speciellt ställe (= "mätobjekt") flera gånger är dessa mätningar sammanförda i en figur så att årsvariationen automatiskt framgår av figurerna. Vidare visade det sig att positionen med mottagaravstånd 10, 20 och 40 m från källan (med respektive käll = mottagarhöjd 0.1, 0.1 och 0.2 m) var tillräckliga för att bestämma impedansen, det övriga primärmaterialet användes för kontroll i tveksamma fall.

Därmed återstår en ytterligare analys av hur impedansen, grovt, beror av de yttre betingelserna. I nästa avsnitt tar vi upp detta.



## 4 RESULTAT

### 4.1 Inledning

Att ge en generell bild av markimpedansens variation i Sverige under året synes vara en mycket svår uppgift, i alla fall om vi vill beskriva den enskilda ytan väl, akustiskt sett. Det framgår klart av sammanställningen av hela mätserien i Tab. A1 i Appendix. Ser man närmare i denna tabell upptäcker man att t ex gräsmatta inte är ett entydigt begrepp ens om man har så lika ytor som den typ som finns i sportanläggningar, vi har här att göra med ett beroende av lokaliseringen. Än diffusare begrepp som "åkermark" får ännu större spridning i impedansen. Så ifall man är intresserad av en specifik ytas impedans vid en viss tidpunkt, får man använda Tab. A1 i Appendix på bästa möjliga sätt.

I det följande kommer vi att gå igenom några allmänna aspekter på impedansen. Vi börjar med beroendet av lokaliseringen i Sverige.

### 4.2 Beroendet av lokaliseringen i Sverige

Som ett någorlunda representativt urval av mätningarna skall vi här använda oss av mätningar gjorda under sommarhalvåret, maj-augusti. Vi har valt att ta medelvärden av impedanser över de mätningar som gjorts under denna tid och resultatet presenteras i Fig. 10.

Som synes i denna figur varierar impedansen i olika delar av landet för tämligen typiska marktyper. Att direkt översätta denna figur till markdämpning är dock svårt. Generellt gäller att mjuka marktyper dämpar mera än hårda.

Grovt kan vi definiera en mjuk respektive hård yta som

$$A^2 \begin{cases} \gg 1 & \text{mjuk} \\ \ll 1 & \text{hård} \end{cases}$$

där

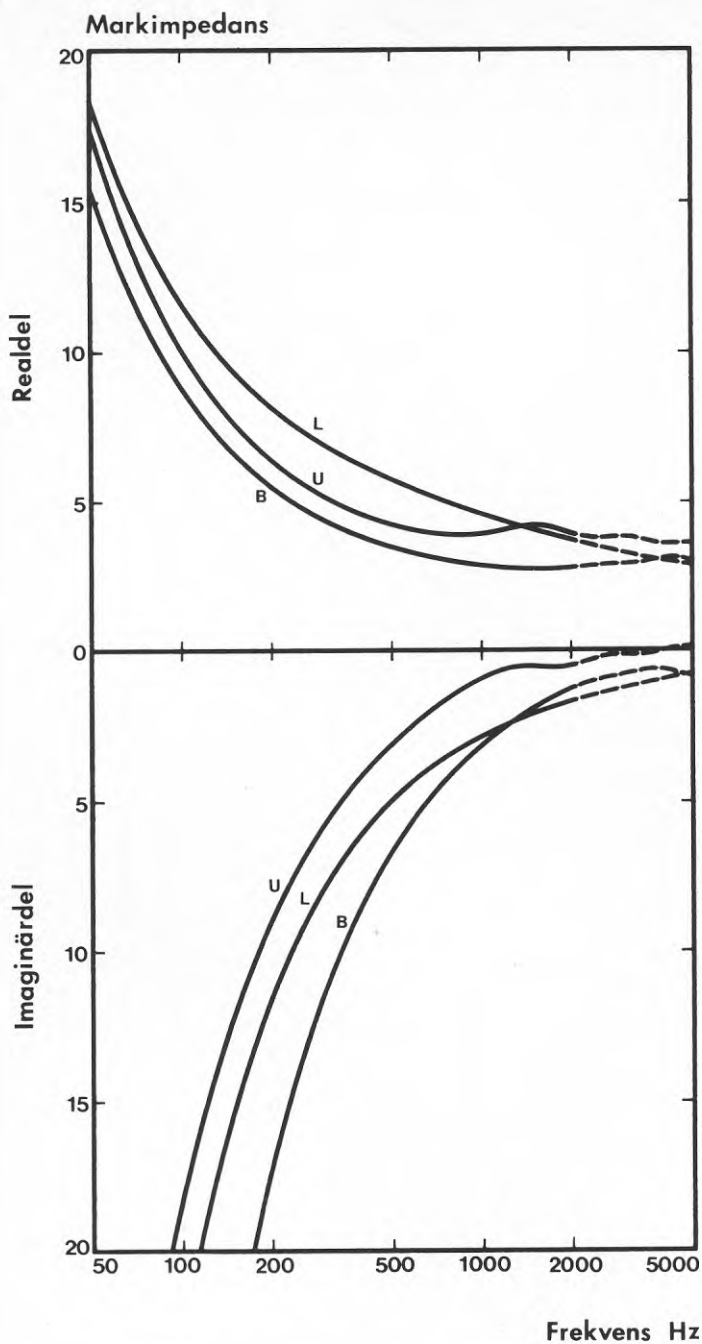


FIG. 10. Medelvärden av markimpedansen under maj-augusti i Uppsala (U), Borås (B) och Lund (L). Se även Tab. 1 i avsnitt 4.6.

FIG. 10. Mean values of the ground impedance in May-August in Uppsala (U), Borås (B) and Lund (L). See also Table E2.

$$A = \sqrt{k_0 r} / |Z|$$

och

$$k_0 = \text{vågta}l (\omega/c_0)$$

$r$  = avstånd källa-mottagare

$$Z = \text{impedans}, Z = \text{Re}(Z) + i \text{Im}(Z)$$

Vi har då förutsatt att källan och mottagaren är nära marken, och att  $\text{Im}(Z)$  inte är så stor ( $\text{Im}(Z) \gg \text{Re}(Z)$ ) att ytvågor dominerar.

För att ge en mera precis uppfattning om hur stor markdämpningen kan vara i ett praktiskt fall har vi i Fig. 11 gett den dämpning relativt vad vi får i fritt fält för de tre fallen. Som vi ser är det inte oväsentliga skillnader vi får. De kommer dessutom att öka då vi har än snedare ljudinfall, antingen beroende på att vi ökar avståndet källa-mottagare eller på att vi sänker källan eller mottagaren.

#### 4.3 Olika årstider

En föreställning om markimpedansens variation under olika årstider kan man utläsa ur figurerna A18 och A19 i Appendix (se även Tab. A1 i Appendix). Vad gäller A18 – en gräsmatta – är variationen relativt liten. Detta verkar rimligt, ytans beskaffenhet ändras endast i ringa utsträckning under året, förutom då den är täckt av ett snölager.

Däremot är variationen mycket stor för den åker vars impedans visas i Fig. A19. Detta är naturligt, eftersom denna under mätperioden utsatts för stor bearbetning och växtligheten har varierat starkt. Den stora spridningen får ett allvarligt inflytande på ljudutbredningen, se två uppmätta exempel i Fig. 12.

Man kan också jämföra spridningen på de två ytorna gräs och åker (A18 och A19) med Fig. 10, som visar spridningen i landet. Mätdata tyder således på att variationen i impedansen för en viss yta under året kan vara mindre (gräs) eller större (åker) än spridningen vid en viss tidpunkt på året i landet.

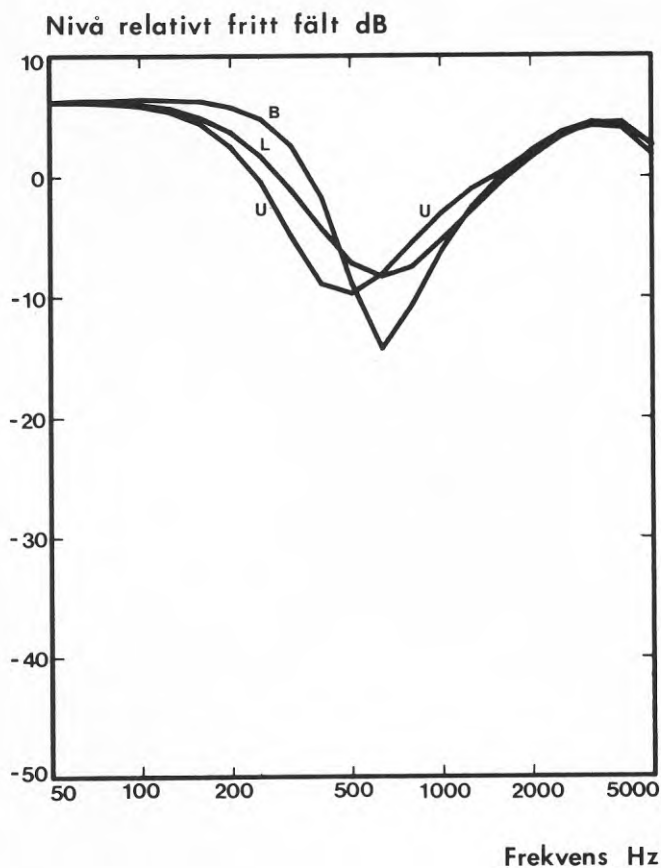


FIG. 11. Nivå relativt fritt fält för de tre impedansfallen i Fig. 10, vilka är medelvärden från tidsperioden maj-augusti; Uppsala (U), Borås (B) och Lund (L). Källhöjd = 0.5 m, mottagarhöjd = 2 m och avstånd källa-mottagare = 40 m.

FIG. 11. Levels relative free field for the three ground impedances in Fig. 10. These are mean values of the impedance in May-August. Uppsala (U), Borås (B) and Lund (L). Source height = 0.5 m, receiver height = 2 m and distance source-receiver = 40 m.

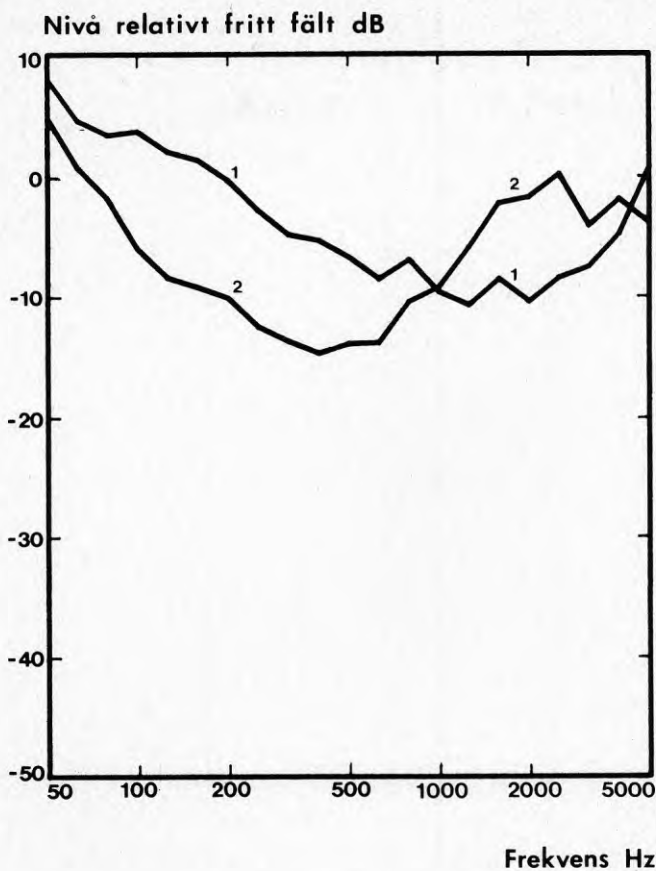


FIG. 12. Uppmätt nivå relativt fritt fält för en åker.  
 (1) Stubbåker (se Fig. A19, kurva 2). (2) Plöjd åker (se Fig. A19, kurva 5). Avstånd källa-mottagare = 40 m. Källhöjd = 0.1 m. Mottagarhöjd = 2.0 m.

FIG. 12. Measured levels relative free field for a cultivated soil. (1) Stubblefield (see Fig. A19, curve 2). (2) Ploughed field (see Fig. A19, curve 5). Distance source-receiver = 40 m. Source height = 0.1 m. Receiver height = 2.0 m.

#### 4.4 Olika marktyper

Mätmaterialiet är inte så omfattande att man via någon typ av beskrivning av marken kan få impedansen. Däremot kan man ur Tab. A1 i Appendix få en viss uppfattning av impedansen om man använder den på ett vettigt sätt.

En intressant aspekt är årsmedelvärdet för en viss yta, och om detta skiljer sig för olika mätobjekt. I Fig. 13 har vi tagit årsmedelvärden för två olika typer av ytor, en gräsmatta och en åker. Man ser att medelvärdet för en yta vars impedans varierar starkt (åkern, se Fig. A19) inte nödvändigtvis är lika med det för en yta som har liten variation (gräsmattan, se Fig. A18).

De resulterande variationerna avseende markdämpningen visas för ett representativt fall i Fig. 14. Kurvorna för 40 m avstånd källa-mottagare i denna figur kan jämföras med Fig. 11 och 12, och variationerna mellan olika ytor kan således ha praktiska konsekvenser, beroende på källspektrum.

#### 4.5 Ytterligare kommentarer

Vi ser i Tab. A1 att inte ens en så relativt väldefinierad yta som en gräsmatta (av den typ som används i sportsammanhang) har samma impedans i olika delar av landet (jfr Fig. A5 med Fig. A17 och A18 i Appendix). Däremot verkar det lokalt sett inte vara någon större skillnad (jfr Fig. A17 och A18). Förklaringen till skillnaden mellan Borås (Fig. A5) och Lund (Fig. A17 och A18) kan dock vara att gräsmattan i Borås var mera nedsliten, med hårdare markfäste, än den i Lund. Detta stämmer överens med parametervälet. Tjockleken på det ekvivalenta skikt som vi får om porositeten är 100 % blir (se Ekv. (3c) och Tab. A1) ungefär dubbelt så stor i Lund som i Borås. Gräshöjden verkar också ha viss betydelse, jämför de två fallen i Fig. A5.

Hård lera och grus är tämligen hårda (har stor impedans) även akustiskt sett. Grus är så akustiskt hård att vi ej kunnat anpassa den porösa skiktmodellen, vi kan med god approximation anta att impedansen är oändlig för frekvenser under 1-2 kHz någorlunda "nära" källan, ca 40 m; se Fig. A9 och A14 i Appendix.

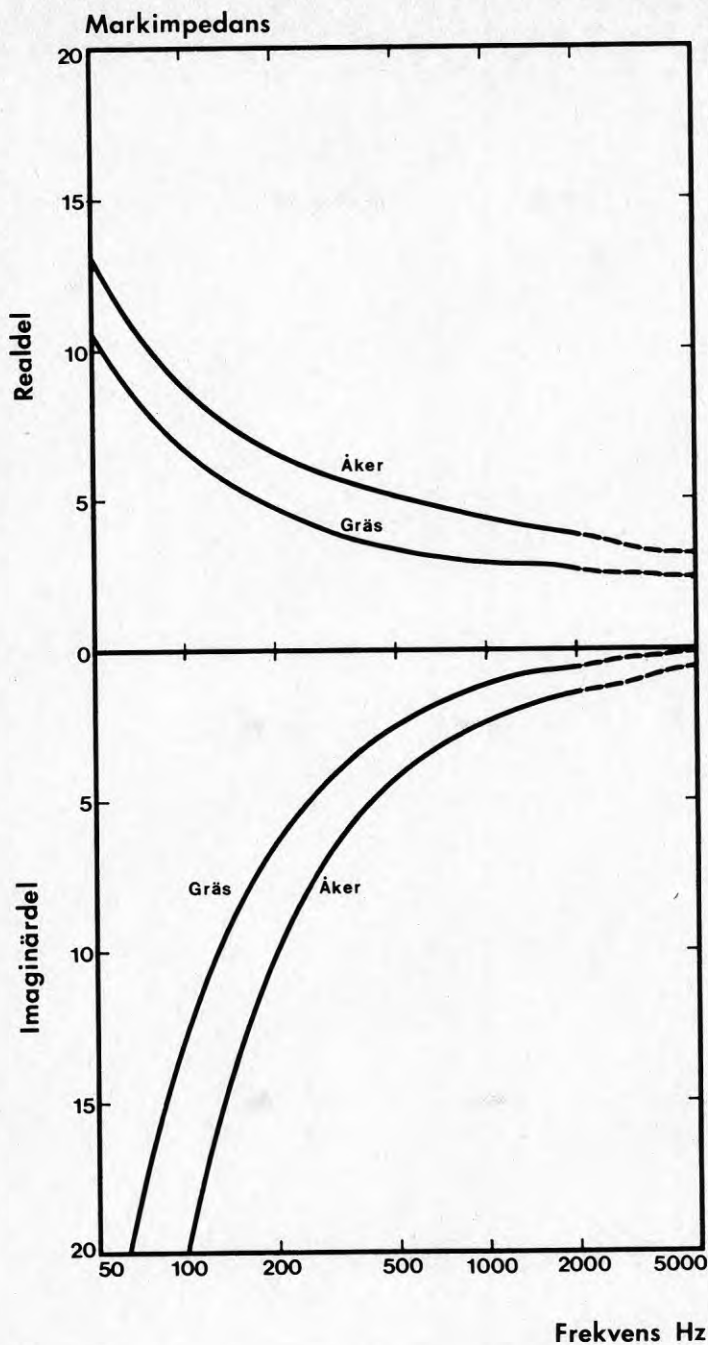


FIG. 13. Årsmedelvärden för impedans på en gräsmatta (se Fig. A18) och en åker (se Fig. A19). Se även Tab. 1 i avsnitt 4.6.

FIG. 13. Mean values over one year for the impedance of a grassland ("gräs") and a cultivated soil ("åker"), see Figs. A18 and A19 respectively. See also Table E2.



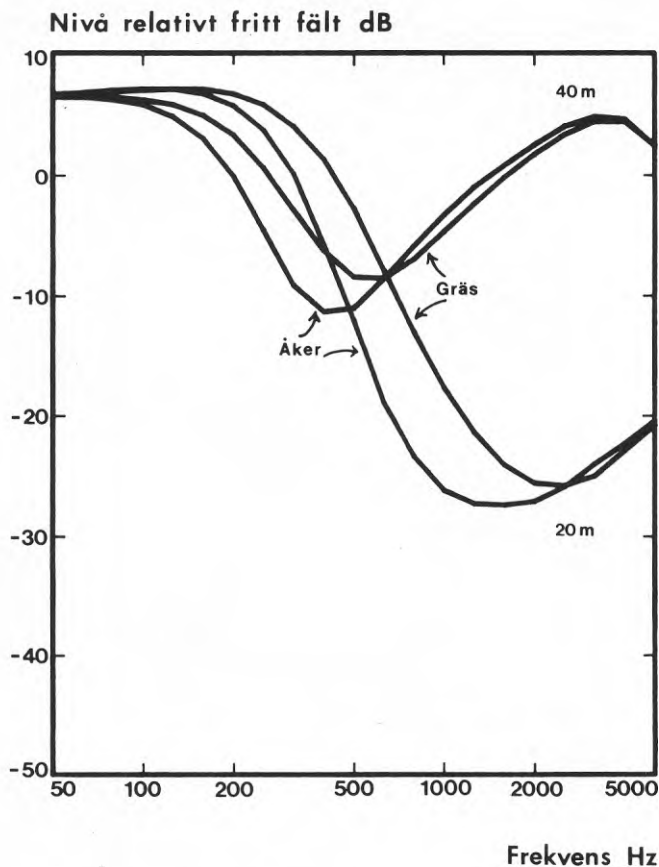


FIG. 14. Markimpedansens inflytande på ljudnivån relativt fritt fält. Impedanserna är tagna från Fig. 13 och vi har:

<u>Avstånd källa-mottagare</u>	<u>Källhöjd</u>	<u>Mottagarhöjd</u>
20 m	0.1 m	0.1 m
40 m	0.5 m	2.0 m

FIG. 14. The influence of impedance on the levels relative free field versus frequency. The impedances are taken from Fig. 13 and we have:

<u>Distance source-receiver</u>	<u>Source height</u>	<u>Receiver height</u>
20 m	0.1 m	0.1 m
40 m	0.5 m	2.0 m

#### 4.6 Modellmark – förslag till medelimpedanser

En intressant fråga som dyker upp är om det går att enkelt realisera utomhusmarken i en fysisk modell, kanske i skala 1:10 eller ännu större? En lämplig realisering av marken indikeras



direkt av den matematiska markmodellen, som ju är ett poröst skikt på en hård yta.

Om vi därför börjar med den relativt stora inskränknigen att porositeten är 100 % hos det porösa skiktet, kan vi direkt ur Ekv. (3a)-(3c) och Tab. A1 i Appendix få den spännvidd i parametrar som det ekvivalenta skiktet i fullskala bör ha. Vi får

$$1.3 \lesssim \rho_p \lesssim 10 \text{ kg/m}^3$$

$$10 \lesssim \sigma \lesssim 100 \text{ kNs/m}^4$$

$$1 \lesssim z_1 \lesssim 60 \text{ cm}$$

Om man gör en fysisk modell måste skärningsmotståndet,  $\sigma$ , och tjockleken hos skiktet,  $z_1$ , ökas respektive minskas i proportion till skalningen, medan detta ej gäller effektiv täthet,  $\rho_p$ . Det verkar således som om redan tillgängliga material av typen mineralull och stenudd skulle kunna fungera som modellmaterial.

Valet av marktyp, och därmed impedans, kommer att bero på målsättningen. Därvid kan man använda sig av de medelvärden som gjorts. Som ett ytterligare alternativ presenterar vi här även medelvärdet över alla mätningar, som någon slags "medelimpedans" för riket under året. Spridningen från denna kan då vara stor i enskilda fall, men bör i medeltal fungera bra och kan således allvarligt beaktas om man ej kan göra modeller för specialfall.

Medelkurvan är presenterad i Fig. 15. De resulterande ljudnivåerna relativt fritt fält i några punkter presenteras i Fig. 16. Man kan då antingen välja ett eller flera material (ett eller flera porösa skikt i den fysiska markmodellen) som ger samma impedans som medelimpedansen, Fig. 15, eller som ger samma dämpning som medelmarken, Fig. 16.

För att möjliggöra en enkel hantering av de medelimpedanser som presenterats ovan, följer sist en översikt, Tab. 1. I denna har vi tagit fram parametrarna för den matematiska markmodellen genom anpassning mellan medelimpedanskurvan och kurvor från den matematiska markmodellen med olika parametrar, a, b, c och d.

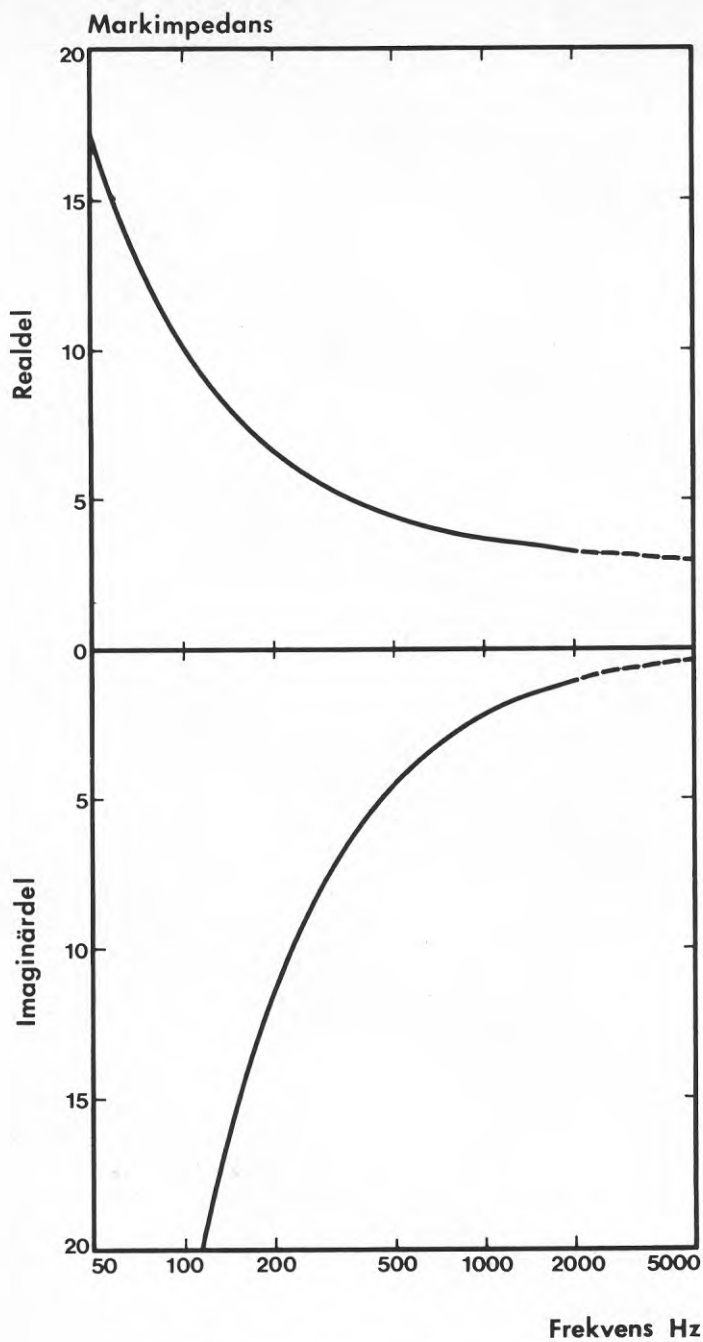


FIG. 15. Medelimpedans. Kombinerat års- och mätplatsmedelvärde för hela mätserien. Se även Tab. 1 i avsnitt 4.6.

FIG. 15. Typical impedance for Sweden. Combined mean value over year and spot for all measured data. See also Table E2.

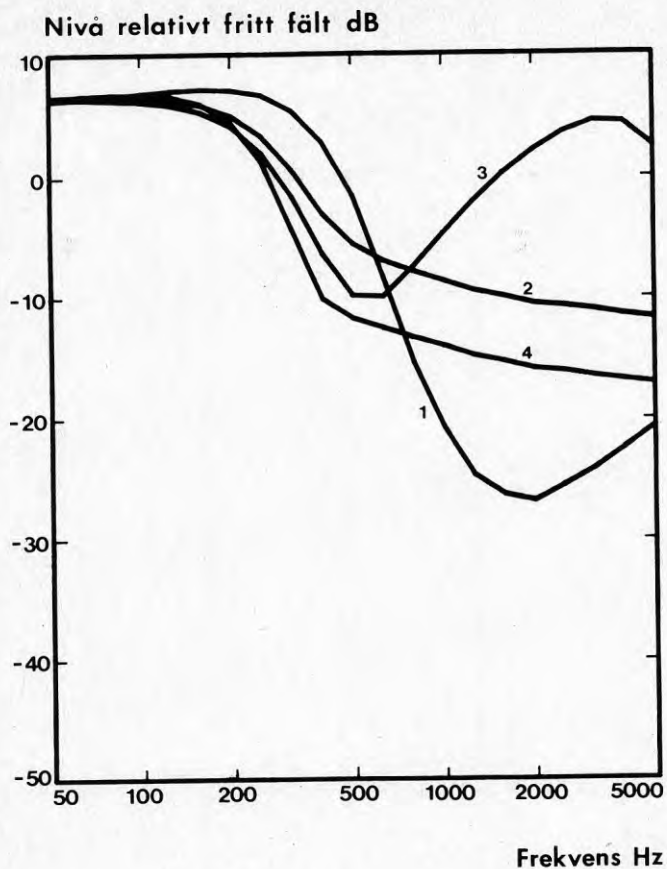


FIG. 16. Några frekvenssvop för medelmarken i Fig. 15.

	<u>Avstånd källa-mottagare</u>	<u>Källhöjd</u>	<u>Mottagarhöjd</u>
1.	20 m	0.1 m	0.1 m
2.	40 m	0.0 m	2.0 m
3.	40 m	0.5 m	2.0 m
4.	80 m	0.0 m	2.0 m

FIG. 16. Some levels relative free field for the typical ground in Fig. 15.

	<u>Distance source-receiver</u>	<u>Source height</u>	<u>Receiver height</u>
1.	20 m	0.1 m	0.1 m
2.	40 m	0.0 m	2.0 m
3.	40 m	0.5 m	2.0 m
4.	80 m	0.0 m	2.0 m

TAB. 1. Medelvärden för markimpedansen.

Medelvärde över	Markparametrar				Använda marktyper	Resultat i figur
	a	b (°)	c (s <sup>-1</sup> )	d (s <sup>-1</sup> )		
Uppsala: Jun-aug	0.25	10	7000	540	A1-A3	10
Borås: maj	0.32	5	17280	1320	A5/1, A6/1, A7/1, A8/1	10
Lund/Veberöd: maj, juli, augusti	0.44	10	36000	1155	A10/1-2, A12/2, A18/5	10
Gräs: Lund (ett år)	0.28	5	16000	630	A18	13
Aker: Lund (ett år)	0.54	10	16000	800	A19	13
Totalt, alla mätningar	0.44	10	19400	1090	A1-A8, A10-A13, A15-A19	15

TAB. 1. Sammanställning av olika medelvärden av mätta impedanser. Markparametrarna har bestämts genom anpassning mellan medelimpedans och teoretiska kurvor. Det anges också vilka marktyper som använts i medelvärdet genom hänvisning till Appendix, se Tab. A1 eller figurerna A1-A19. Vidare finns hänvisning till de figurer i vilka medelimpedansen svarande mot markparametrarna är upptitade.

## REFERENSER

- [1] Jonasson, H., 1971, "The propagation of sound over ground with and without barriers". Report 18, Division of Building Technology, Lund.
- [2] Thomasson, S-I, 1977, "Sound propagation above a porous layer with a large refraction index". J. Acoust. Soc. Am. 61, p. 659-674.
- [3] Thomasson, S-I, 1977, "Theory and experiments on sound propagation above an impedance boundary". Report 75, Department of Building Acoustics, Lund.

## APPENDIX

Detta appendix är en sammanställning av de uppmätta impedanserna i en behändig tabell, som innehåller all nödvändig information, och ur vilken impedansen kan fås via parametrarna a, b, c och d samt Ekv. (1). För att lättare kunna överblicka variationen har de uppmätta impedanserna plottats i figurerna A1-A19. Vi har sammanfört materialet i figurerna så att för en viss mätplats (syftar på ett visst mätobjekt, t ex i Uppsala) presenteras materialet i en figur. En figur anger således årsvariationer på det speciella mätobjekt som åsyftas. Det underförstådda tidsberoendet i dessa figurer är  $\exp(-i\omega t)$ . Vid all bestämning har använts frekvensområdet 0.1-2 kHz, frekvenser över 2 kHz anses som osäkra och har därför streckprickats i figurerna. I övrigt kräver endast mätpositionerna sin förklaring. 10, 20 eller 40 syftar på följande tre fall.

	<u>Avstånd källa-mottagare</u>	<u>Källhöjd</u>	<u>Mottagarhöjd</u>
10:	10 m	0.1 m	0.1 m
20:	20 m	0.1 m	0.1 m
40:	40 m	0.2 m	0.2 m

Sist i denna sammanställning finns några foton som exemplifierar våra studerade ytor.

TAB. A1. Markimpedans.

Mätplats	Datum	Marktyp	a	b( $^{\circ}$ )	c( $s^{-1}$ )	d( $s^{-1}$ )	Mätpos.	Fig/kurva nr
Uppsala	15-17 aug 1977	Klöveräng/ogräs	0.42	10	16800	880	10, 20	A1/1
	15-17 jun 1978	Klöveräng/ogräs	0.33	10	6600	560	10, 20	A1/2
	15-17 aug 1977	Sädesfält, ca 60 cm högt	0.32	10	11300	860	20	A2/1
	15-17 jun 1978	Sädesfält, ca 40 cm högt	0.19	10	4500	480	20, 40	A2/2
	18 jun 1978	Nysådd, ca 15 cm hög	0.27	10	10400	480	10, 20	A3/1
Nyköping	18 jun 1978	Betäker, 10 cm höga, glost i hård lera	0.14	5	10700	350	10, 20	A4/1
Borås	17 maj 1978	Gräsmatta, 3-4 cm högt gräs	0.21	5	14000	1440	20, 40	A5/1
	25 jul 1978	Gräsmatta, 10 cm högt gräs	0.38	10	7300	1440	20	A5/2
	18 maj 1978	Äng, fjolårets växtlighet	0.44	5	11100	870	20, 40	A6/1
	17 maj 1978	Äng, fjolårets växtlighet	0.85	5	11300	2880	20	A7/1
	25 jul 1978	Nyslagen äng	0.50	10	20300	3100	20, 40	A7/2
	18 maj 1978	Äng, fjolårets växtlighet	1.06	5	135000	3300	20, 40	A8/1
	26 jul 1978	Nyslagen äng	0.73	10	73000	5340	10, 20	A8/2
	26 jul 1978	Grusplan	-	-	-	-	20	A9/1
			-	-	-	-	40	A9/2



TAB. A1 (forts). Markimpedans.

Mätplats	Datum	Marktyp	a	b(°)	c(s <sup>-1</sup> )	d(s <sup>-1</sup> )	Mätpos.	Fig/kurva nr	
Veberöd	6-12 jul 1977	Odlad mark, 30 cm gräs	0.24	10	29000	579	10	A10/1	
	1 jun 1978	Odlad mark, 15 cm gräs	0.73	10	48000	2100	20, 40	A10/2	
	22 aug 1978	Stubbåker + nyttillväxt	1.10	10	88000	2600	20, 40	A10/3	
	17 okt 1977	Klöveräng, 10 cm gräs	0.20	5	10200	1020	10, 20	A11/1	
	22 aug 1978	Klöveräng, 10 cm gräs	0.63	10	110000	2620	20, 40	A11/2	
	12 okt 1977	Ljung	0.52	10	33000	1550	10, 20	A12/1	
Lund	20 jul 1978	Ljung	0.79	5	54000	1450	10, 20	A12/2	
	10 okt 1978	Harvad åker	0.76	2	69600	1860	10, 20	A13/1	
	12 okt 1977	Grusplan	-	-	-	-	20	A14/1	
Lund	3 sep 1975	Stubbåker	0.60	10	12000	500	20	A15/1	
	10 aug 1977	Stubbåker	0.34	5	6700	450	20, 40	A16/1	
	2 sep 1975	Gräsmatta, några cm hög	0.25	10	7500	430	20	A17/1	
	10 aug 1977	Gräsmatta, några cm hög	0.37	10	16000	560	10, 20	A17/2	



TAB. A1 (forts.) Markimpedans.

Mätplats	Datum	Marktyp	a	b(°)	c(s <sup>-1</sup> )	d(s <sup>-1</sup> )	Mätpos.	Fig/kurva nr
Lund (forts.)	1 sep 1977	Gräsmatta, fuktig	0.30	10	18500	590	10, 20	A18/1
	22 sep 1977	Gräsmatta, torr	0.32	10	17600	870	10	A18/2
	7 feb 1978	Gräsmatta, med 4 cm snö	0.49	0	17400	830	20	A18/3
	7 feb 1978	Gräsmatta, med 4-8 cm snö	0.30	0	18230	480	20	A18/4
	18 maj 1978	Gräsmatta, torr	0.37	5	38000	1180	10, 20	A18/5
	3 sep 1975	Nysådd, mycket gles växtlighet	0.60	10	30000	1000	20	A19/1
1 sep 1977	Stubbåker	0.51	10	28900	810	20, 40	A19/2	
22 sep 1977	Plöjd stubbåker	0.29	10	1400	76	10, 20	A19/3	
31 jan 1978	Plöjd åker, mycket fuktig	0.30	10	3600	110	10, 20	A19/4	
7 feb 1978	Plöjd åker, 7 cm snö	0.60	10	3800	520	10, 20	A19/5	
10 okt 1978	Plöjd åker, mycket fuktig	0.81	5	82000	3250	10, 20	A19/6	

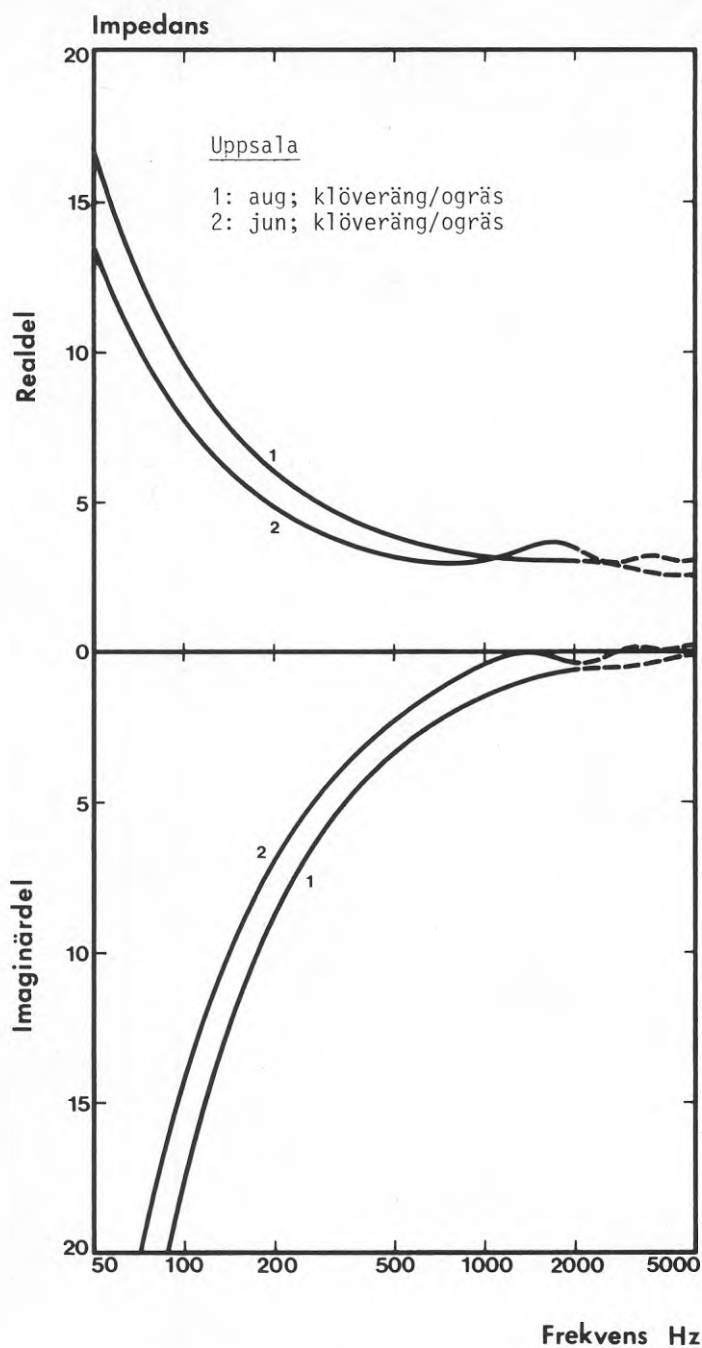


FIG. A1. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A1. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

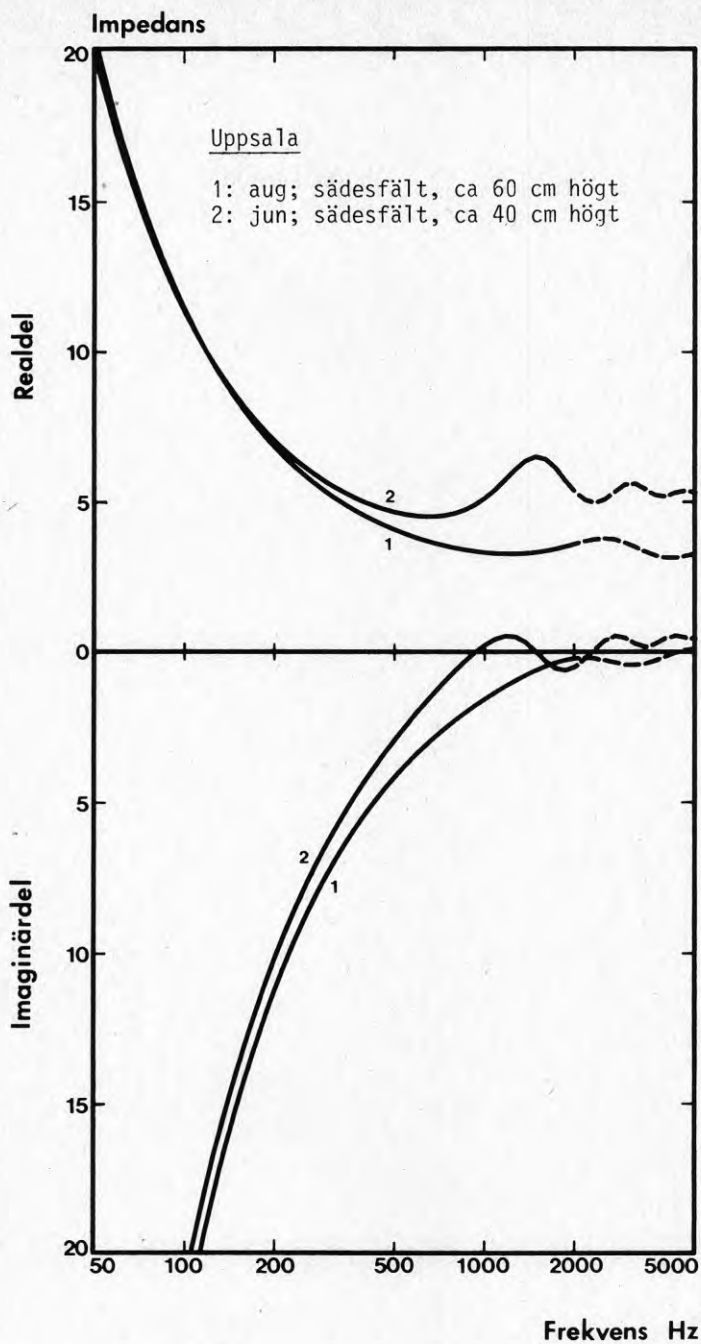


FIG. A2. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss markttyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A2. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

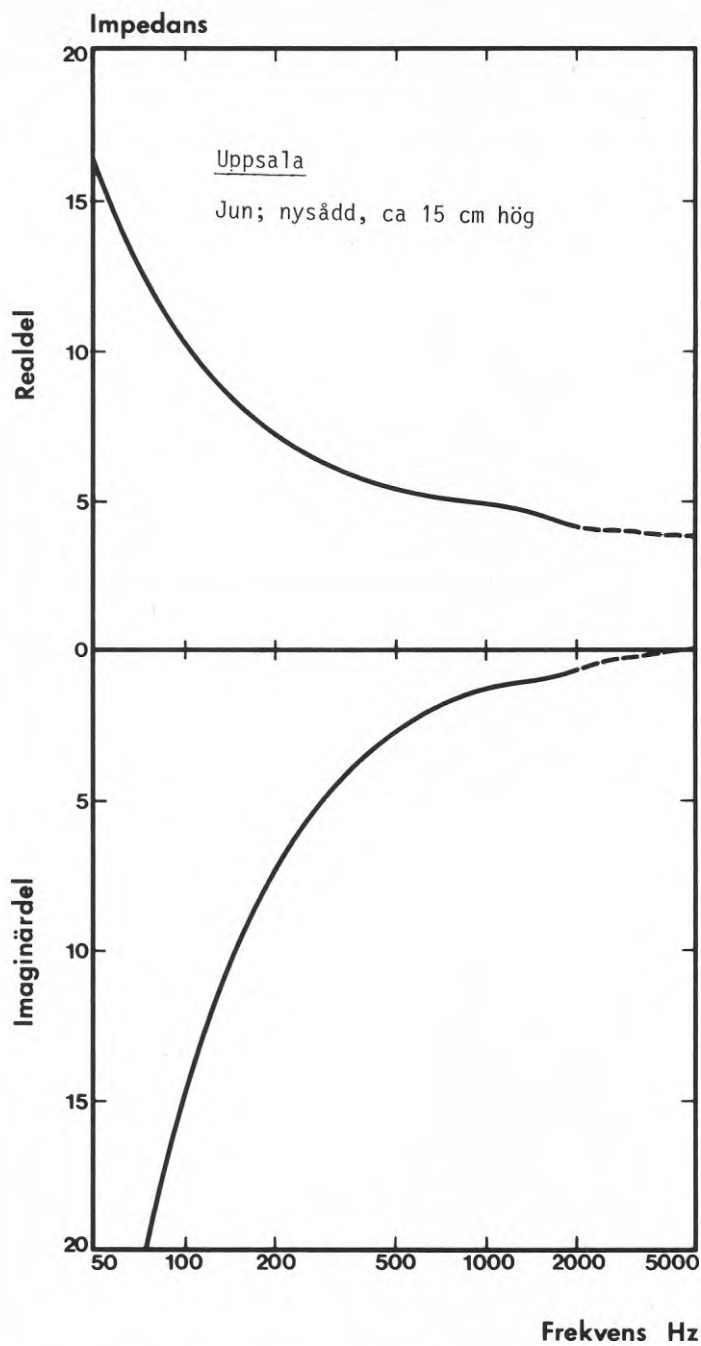


FIG. A3. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A3. The figure corresponds to a specific spot, "object". See further Table E1.

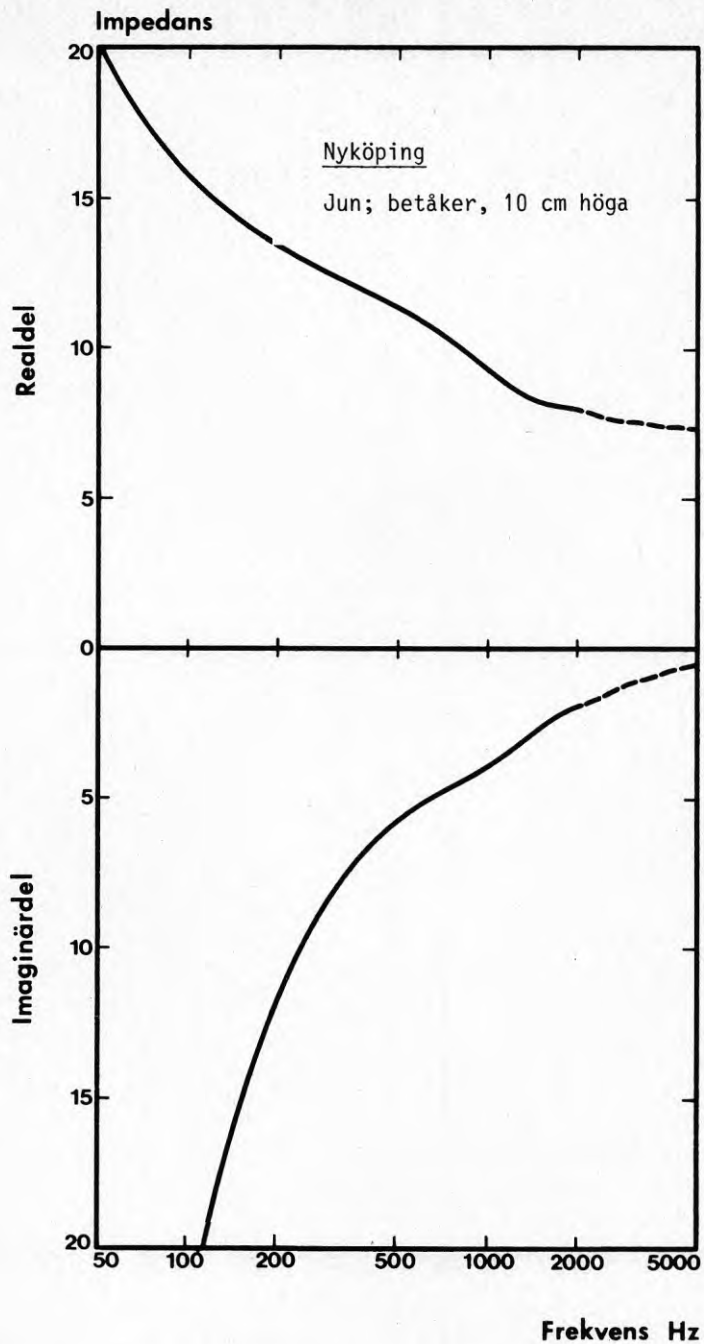


FIG. A4. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A4. The figure corresponds to a specific spot, "object". See further Table E1.

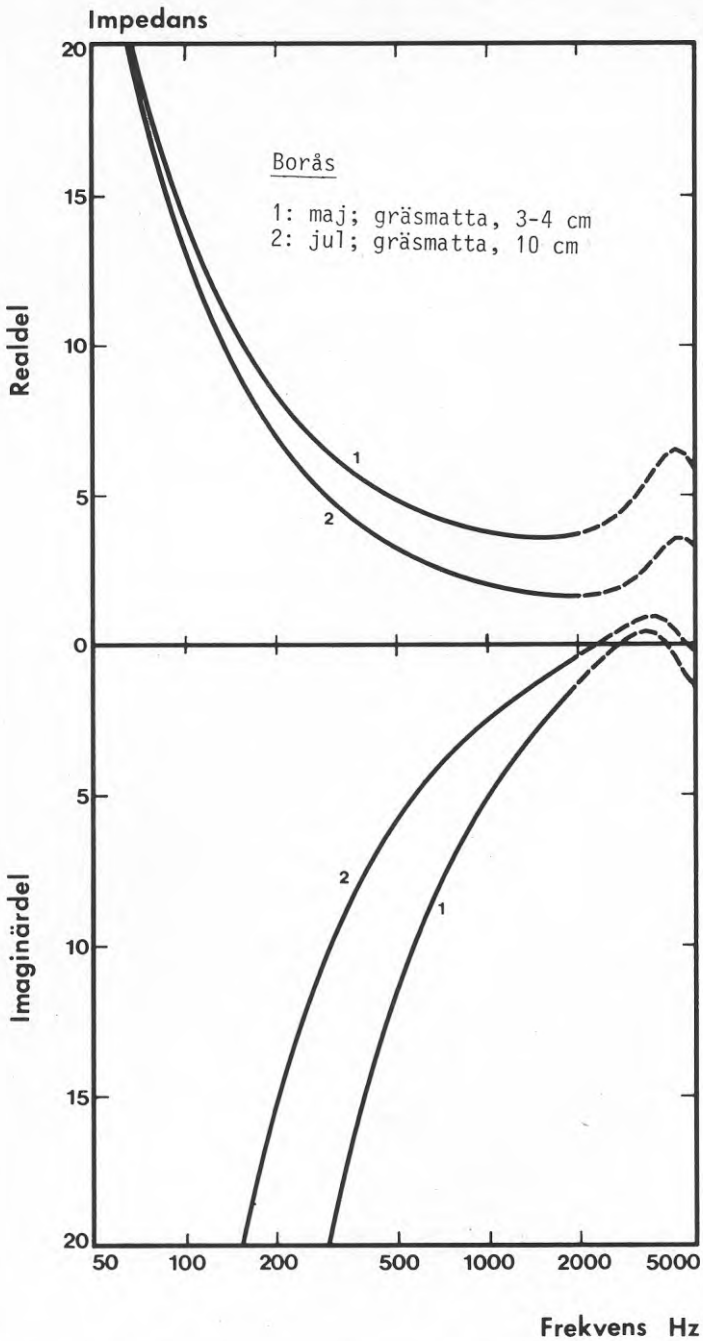


FIG. A5. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A5. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

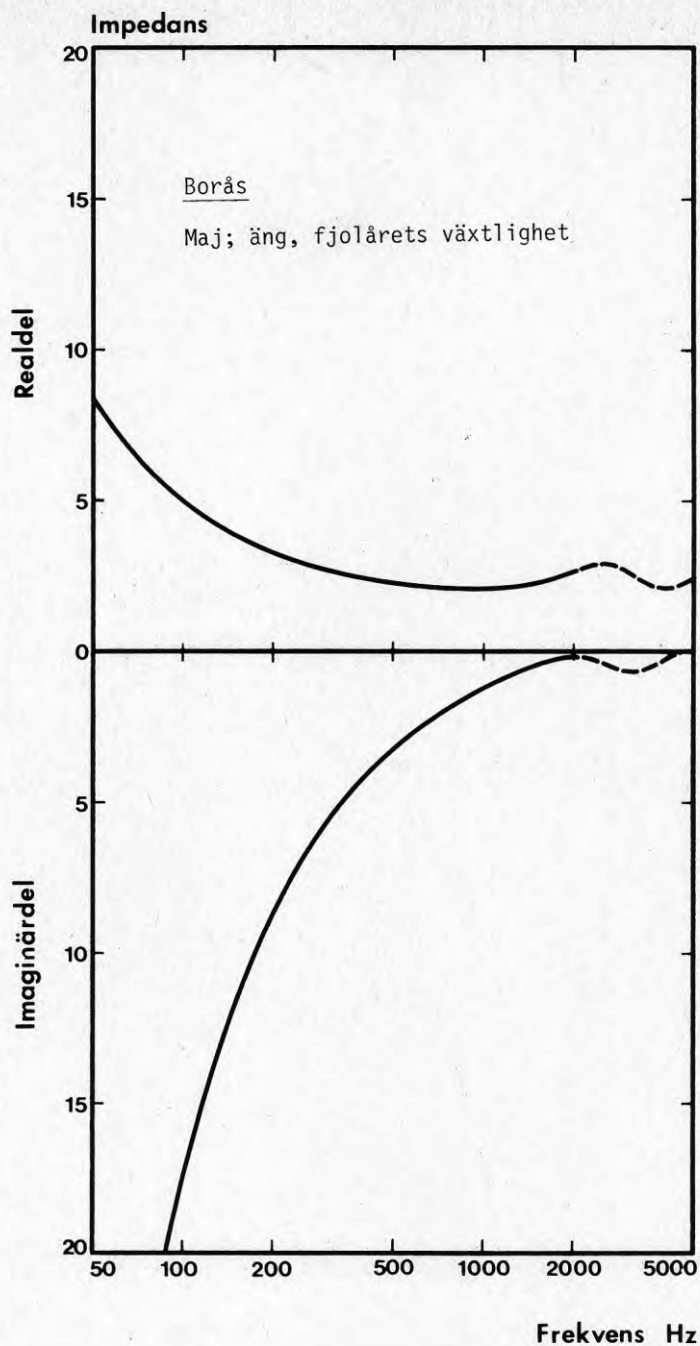


FIG. A6. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A6. The figure corresponds to a specific spot, "object". See further Table E1.



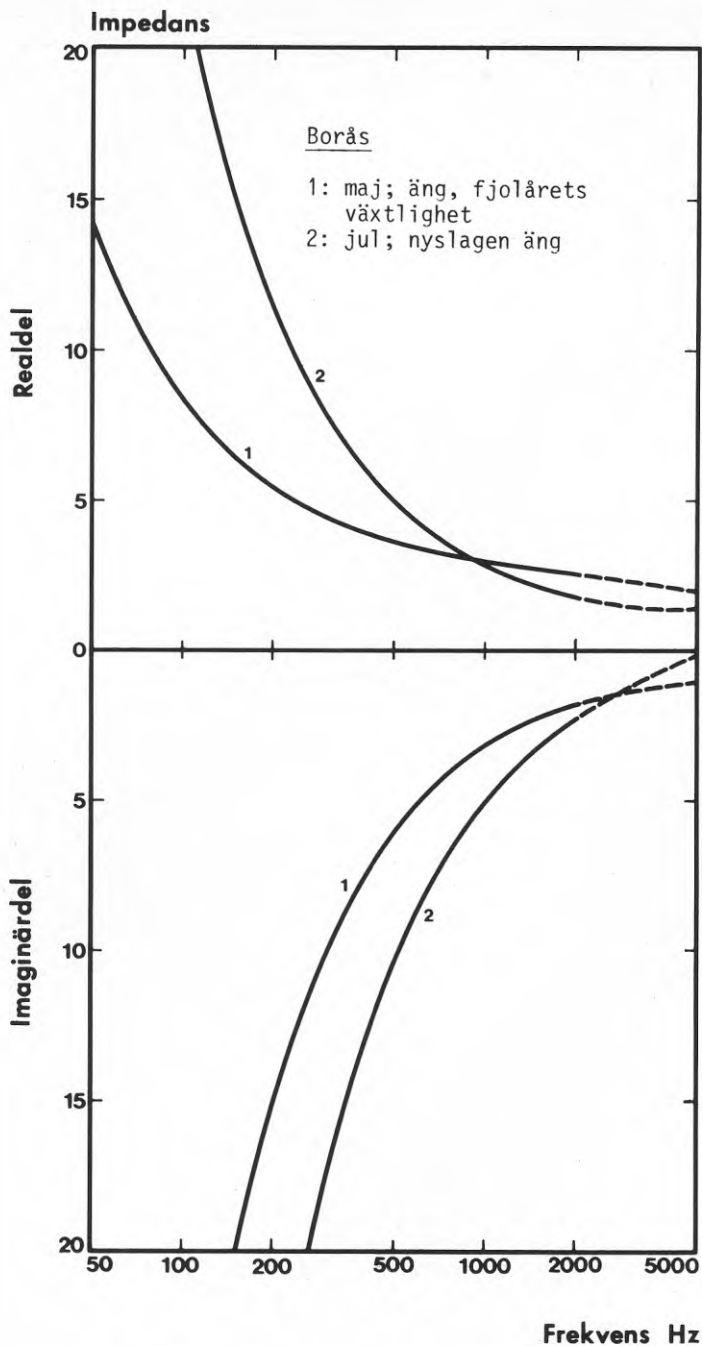


FIG. A7. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A7. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

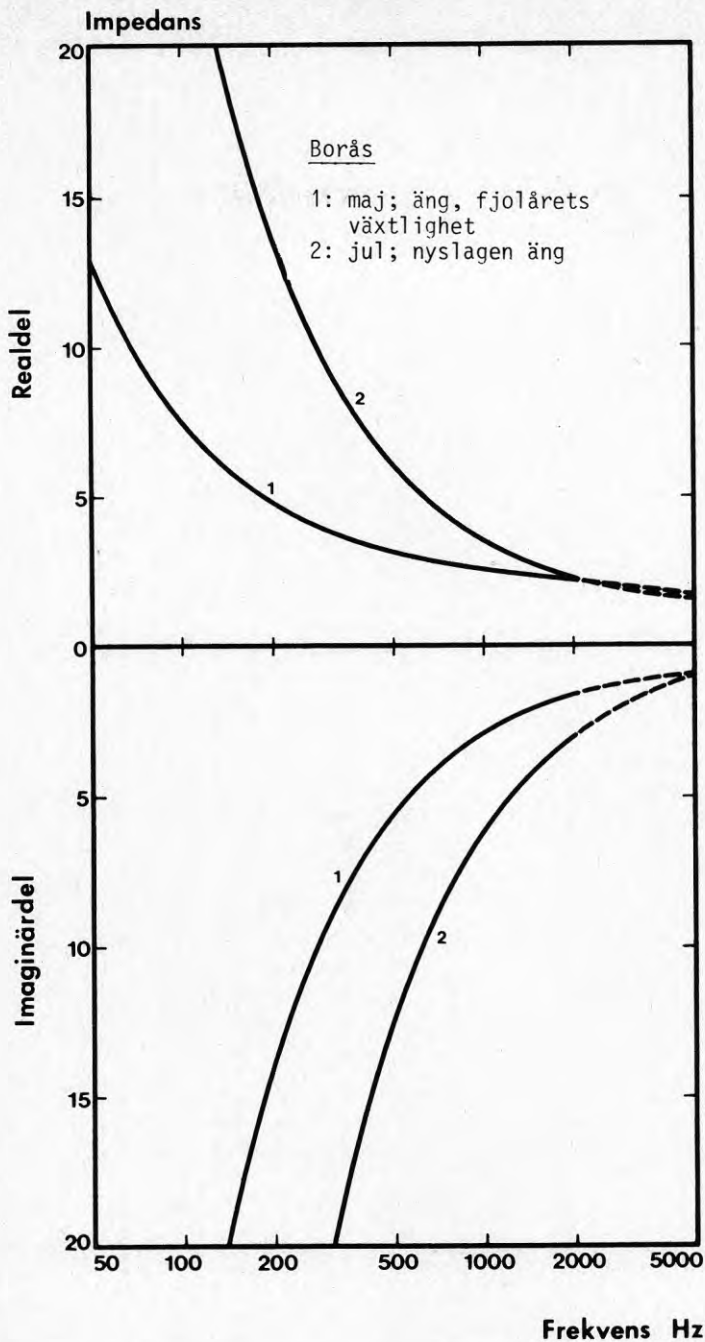


FIG. A8. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

*FIG. A8. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.*

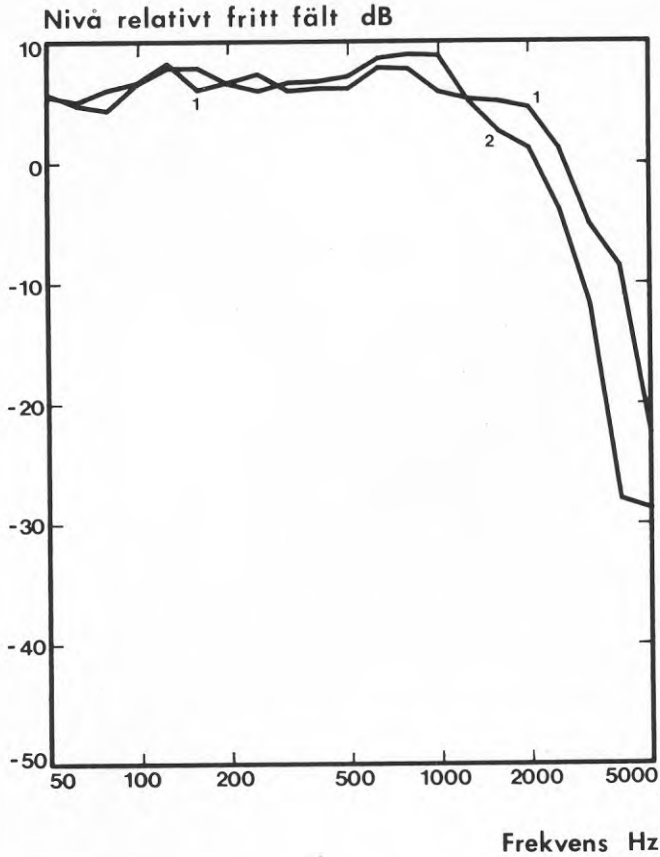


FIG. A9. Ljudutbredning över en grusplan. Markytan är mycket hård för medelhöga frekvenser, varför impedansen enligt porös markmodell ej utförts. Markytan har i stort sett oändlig impedans. Se Tab. A1 i början av appendix.

FIG. A9. Sound propagation above a gravel ground. The ground surface is very hard for middle frequencies, so the impedance according to the porous ground model is not performed. To a large extent the ground has infinite impedance. See further Table E1.

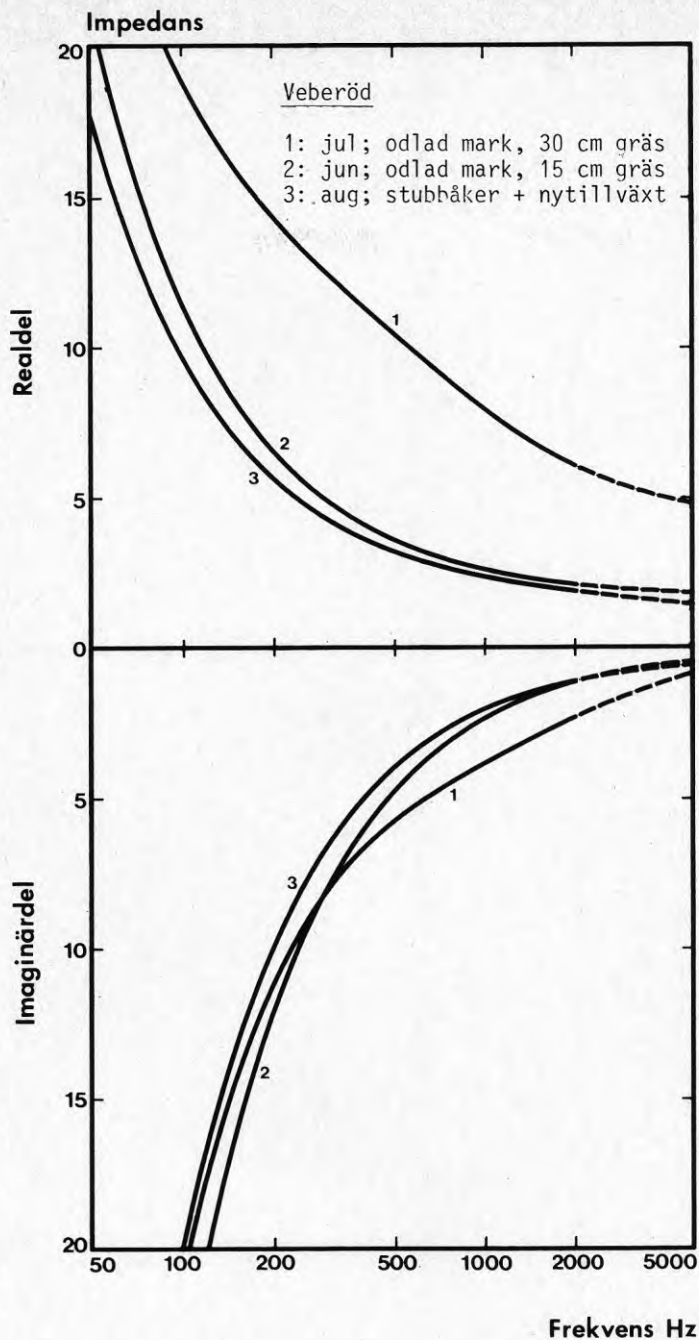


FIG. A10. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika måttillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A10. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

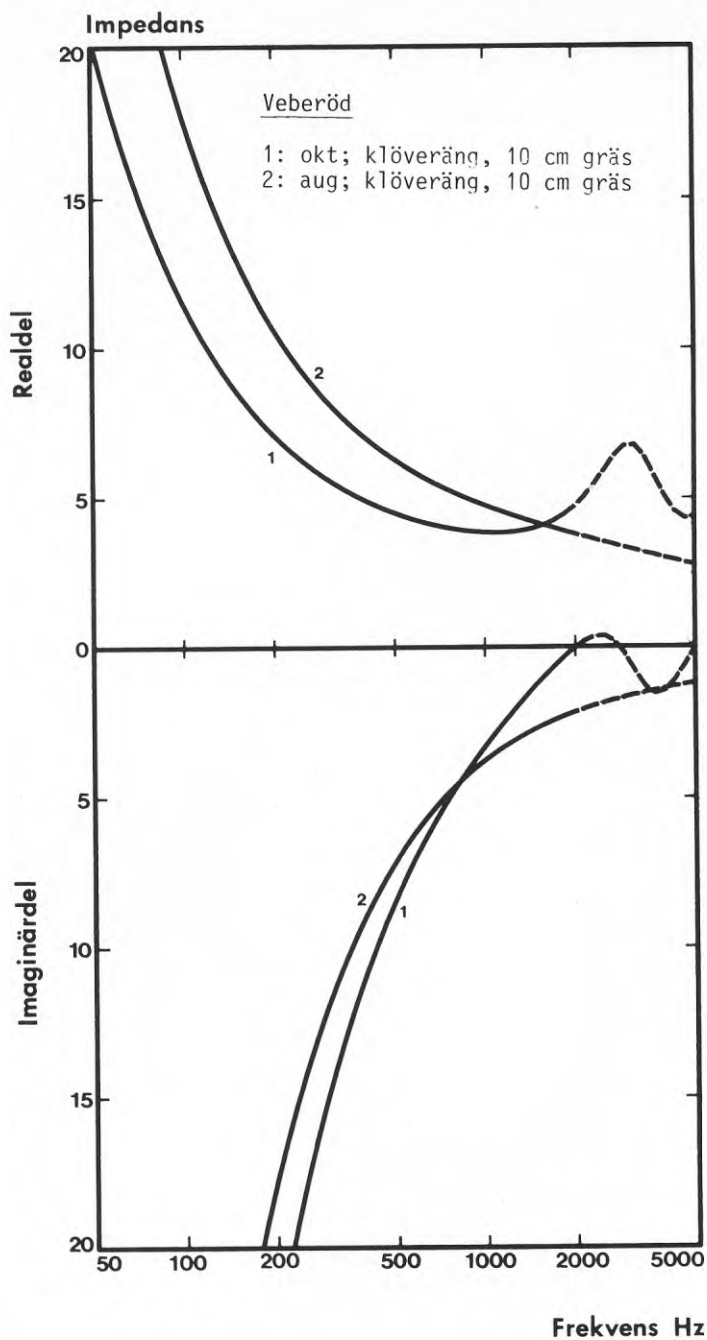


FIG. A11. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A11. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

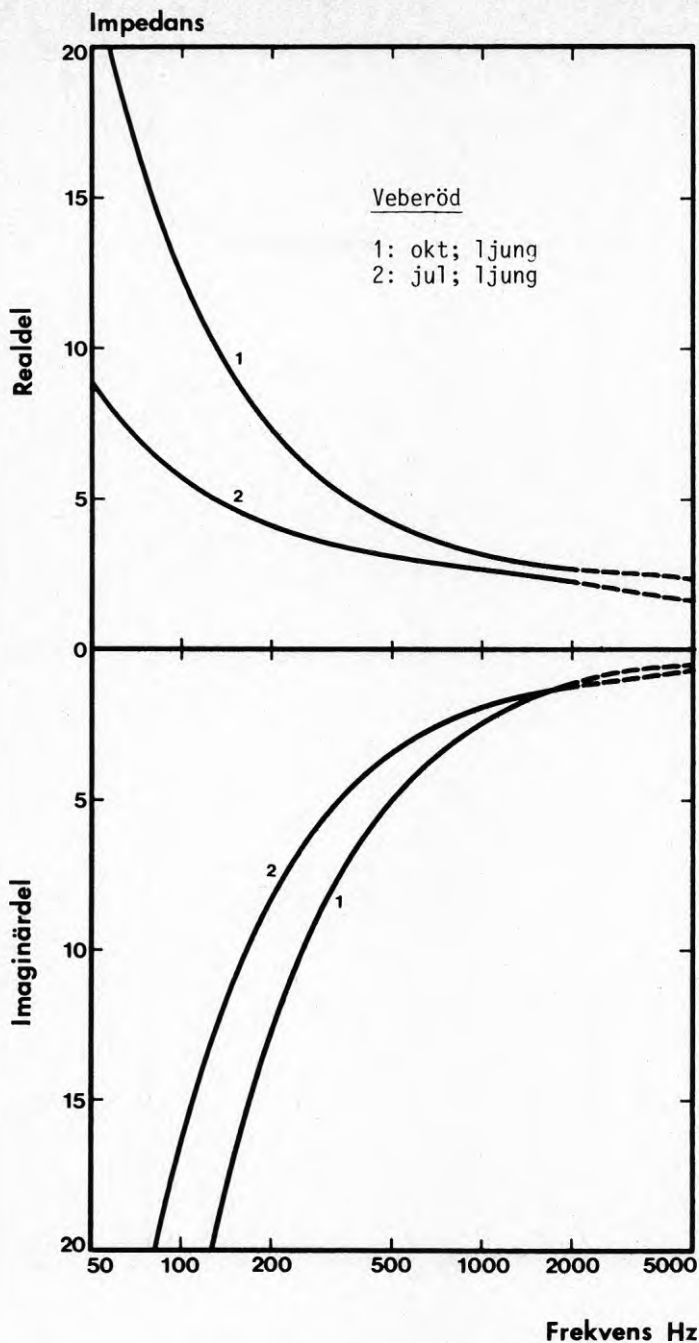


FIG. A12. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A12. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

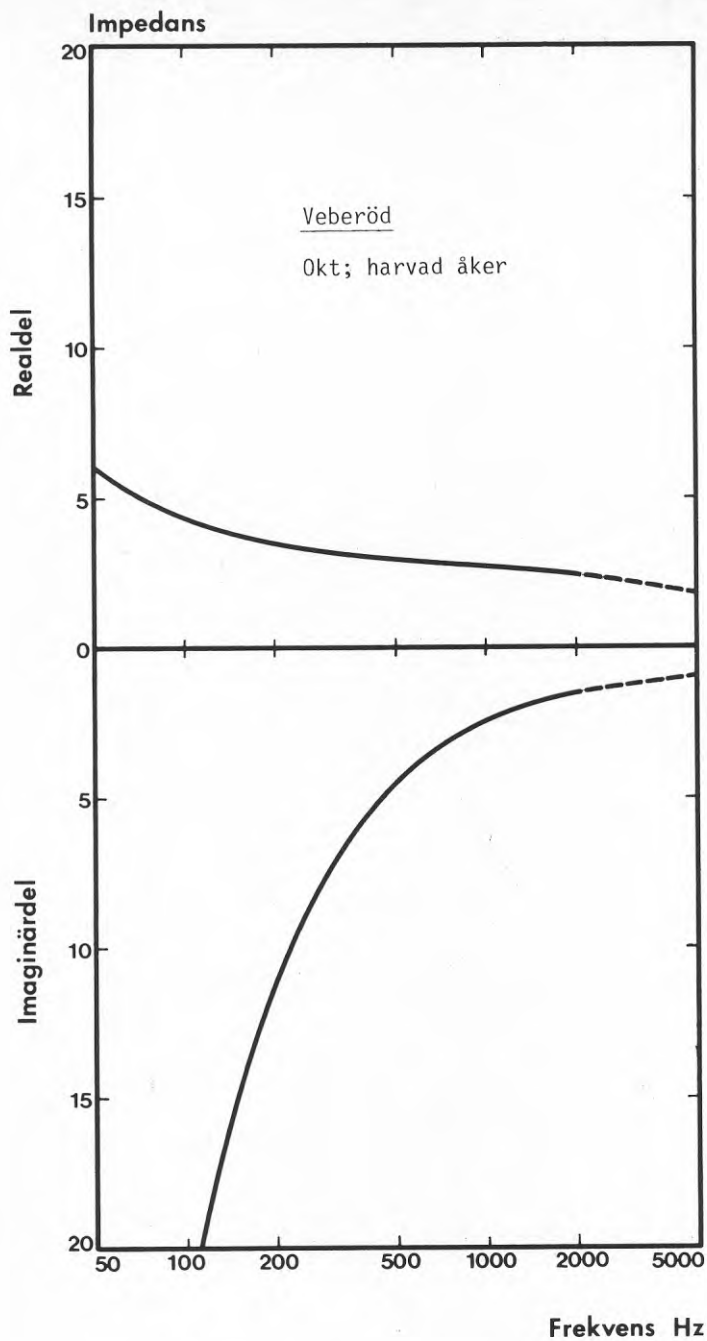


FIG. A13. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

*FIG. A13. The figure corresponds to a specific spot, "object". See further Table E1.*



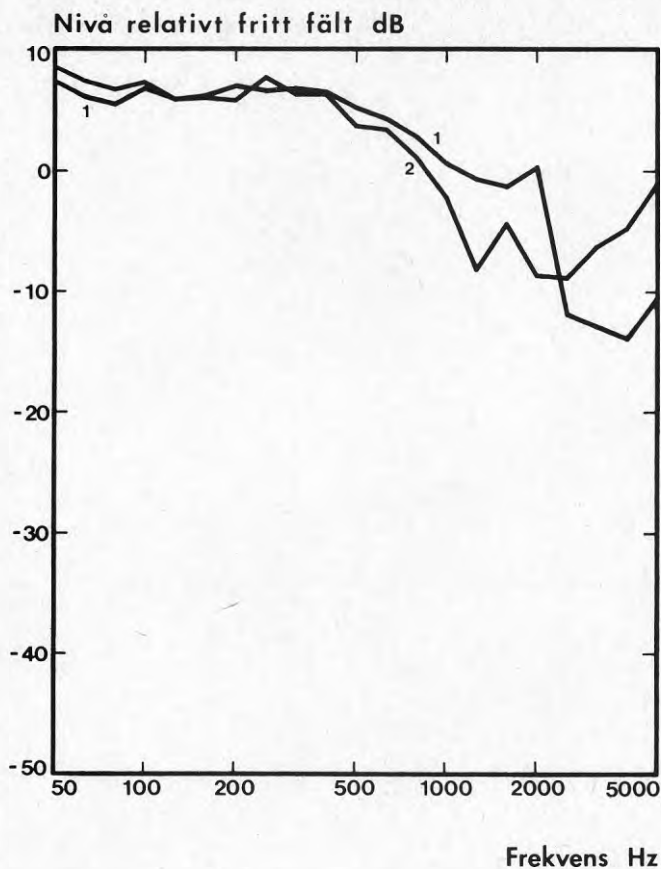


FIG. A14. Ljudutbredning över en grusplan. Markytan är mycket hård för medelhöga frekvenser, varför impedansen enligt porös markmodell ej utförts. Markytan har i stort sett oändlig impedans. Se Tab. A1 i början av appendix.

FIG. A14. Sound propagation above a gravel ground. The ground surface is very hard for middle frequencies, so the impedance according to the porous ground model is not performed. To a large extent the ground has infinite impedance. See further Table E1.

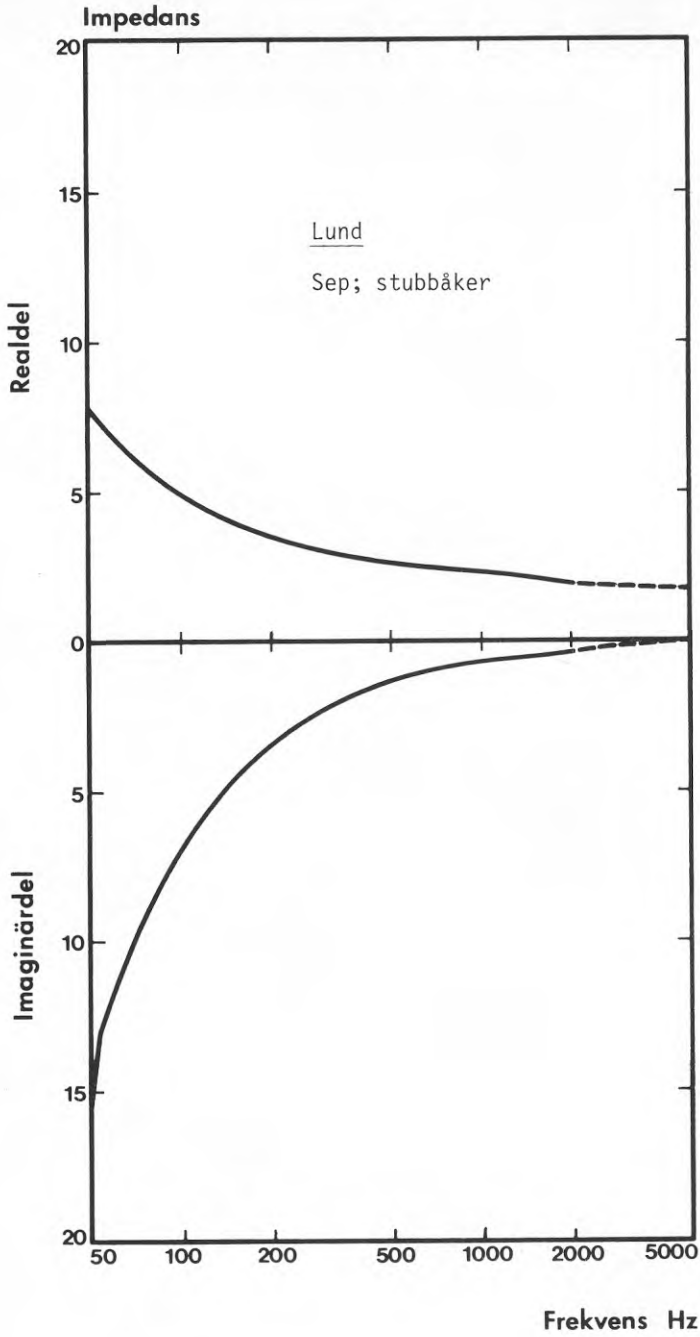


FIG. A15. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A15. The figure corresponds to a specific spot, "object". See further Table E1.

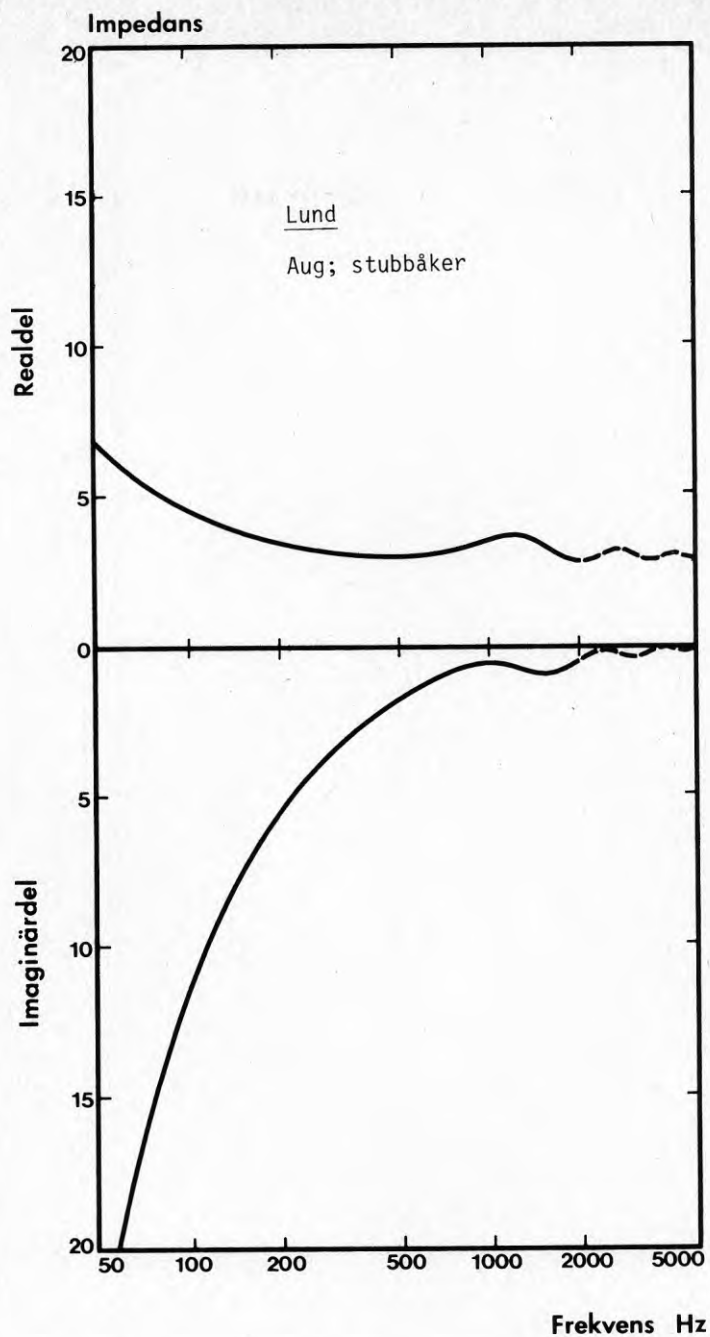


FIG. A16. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A16. The figure corresponds to a specific spot, "object". See further Table E1.

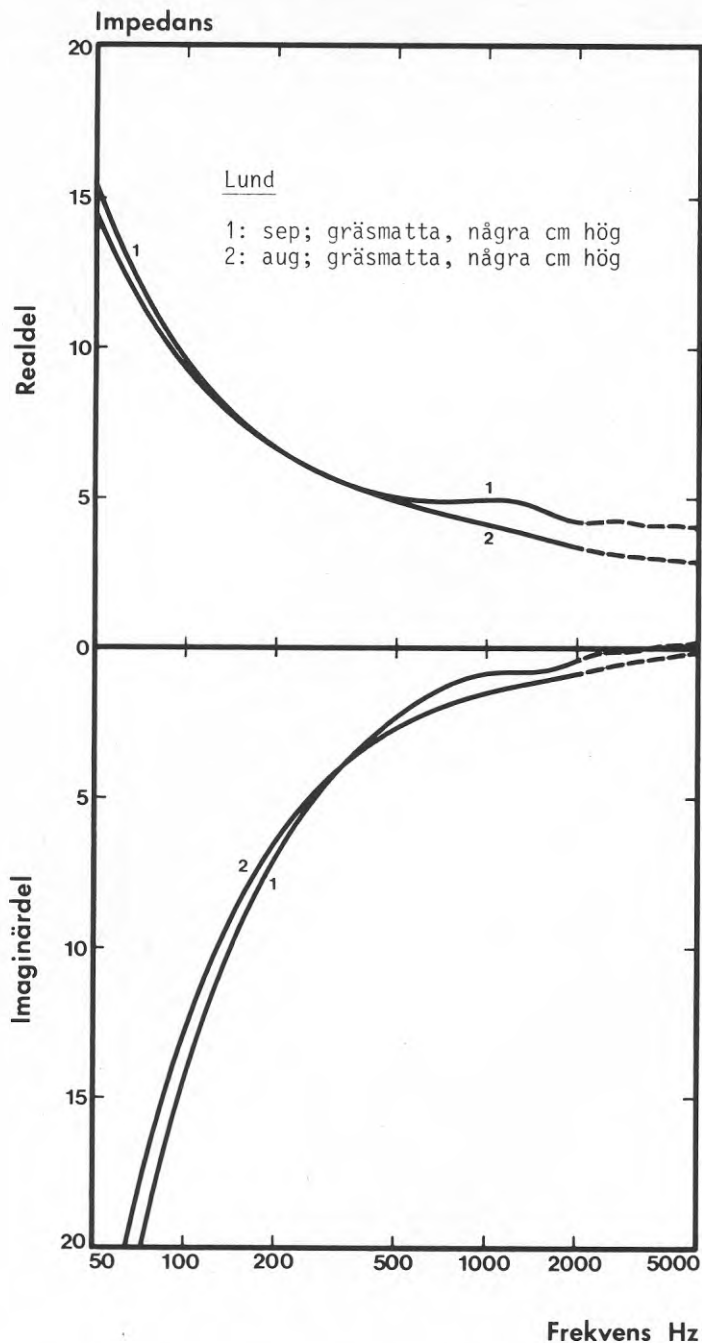


FIG. A17. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A17. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

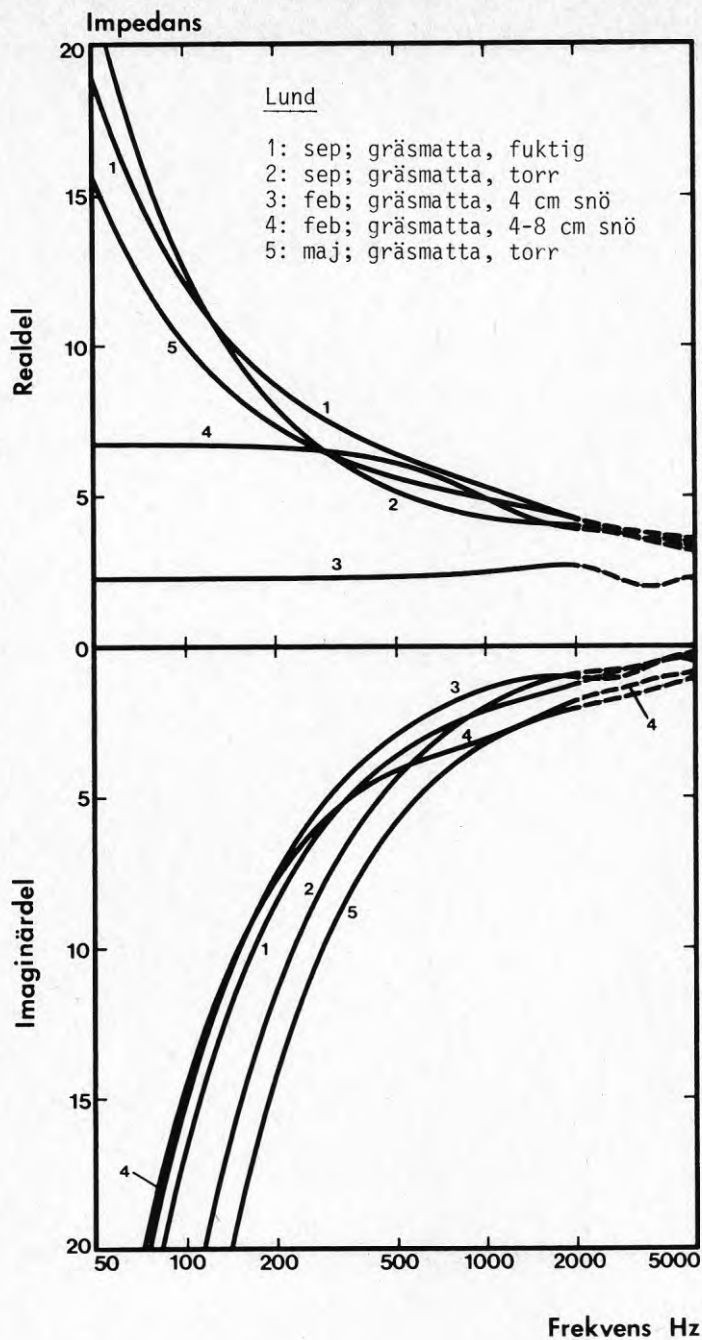


FIG. A18. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A18. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.

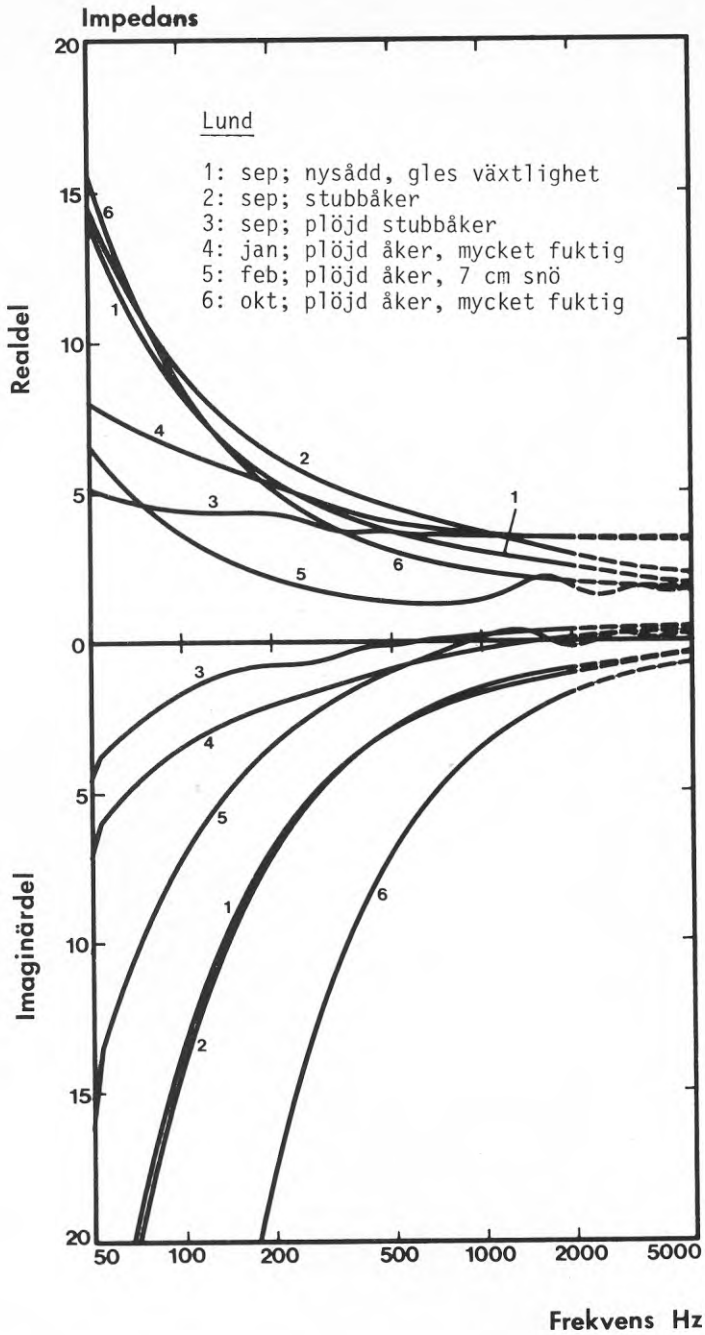


FIG. A19. Figuren avser ett visst mätobjekt; en viss marktyp. Olika kurvor är resultat från olika mättillfällen på detta objekt. Se vidare inledningen till detta appendix och Tab. A1.

FIG. A19. The figure corresponds to a specific spot, "object". Different curves are results from different occasions at this spot. See further Table E1.



FIG. A20. Klöveräng i trakten av Uppsala. Se mätning A1/1 i Tab. A1.

*FIG. A20. Cloverfield in the vicinity of Uppsala. From measurement A1/1, see Table E1.*



FIG. A21. Sädesfält i trakten av Uppsala. Se mätning A2/1 i Tab. A1.

*FIG. A21. Cornfield in the vicinity of Uppsala. From measurement A2/1, see Table E1.*





FIG. A22. Betåker i trakten av Nyköping. Se mätning A4/1 i Tab. A1.

*FIG. A22. Beets in clay in the vicinity of Nyköping. From measurement A4/1, see Table E1.*

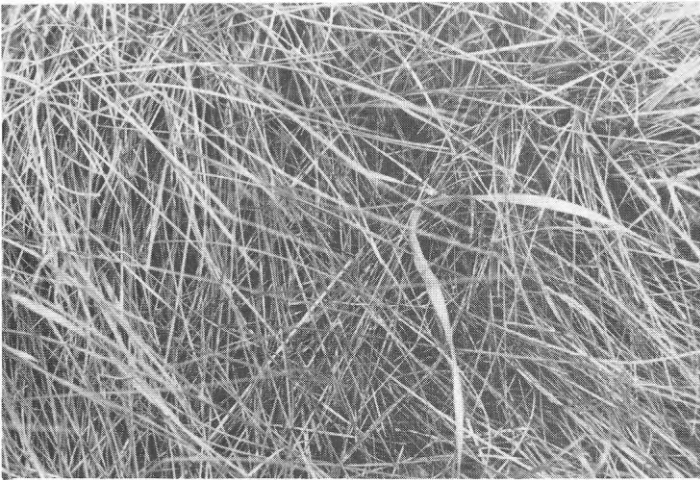


FIG. A23. Gräsmatta i trakten av Veberöd (Skåne). Se mätning A10/2 i Tab. A1.

*FIG. A23. Grassland in the vicinity of Veberöd (near Lund). From measurement A10/2, see Table E1.*



FIG. A24. Klöveräng i trakten av Veberöd (Skåne). Se mätning A11/2 i Tab. A1.

*FIG. A24. Cloverfield in the vicinity of Veberöd (near Lund). From measurement A11/2, see Table E1.*



FIG. A25. Ljung i trakten av Veberöd (Skåne). Se mätning A12/2 i Tab. A1.

*FIG. A25. Heather in the vicinity of Veberöd (near Lund). From measurement A12/2, see Table E1.*

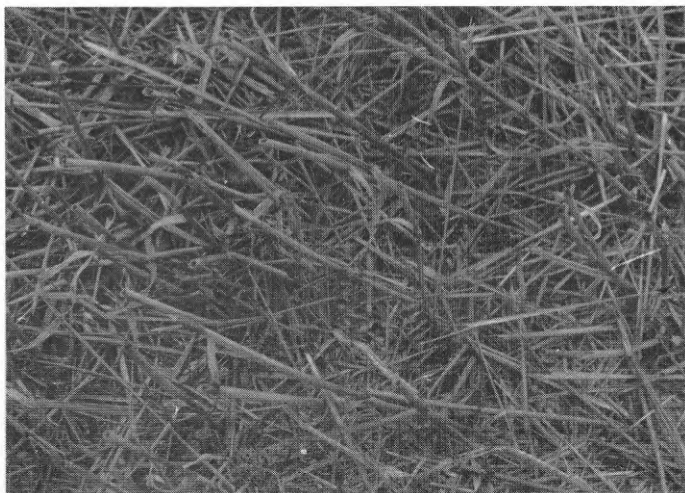


FIG. A26. Stubbåker i trakten av Lund. Se mätning A16/1 i Tab. A1.

*FIG. A26. Stubblefield in the vicinity of Lund. From measurement A16/1, see Table E1.*



FIG. A27. Gräsmatta i trakten av Lund. Se mätning A18/5 i Tab. A1.

*FIG. A27. Grassland in the vicinity of Lund. From measurement A18/5, see Table E1.*

## ESTIMATION OF THE GROUND IMPEDANCE — ENGLISH SUMMARY

In this summary we will only give the main results in a short form, since they may only be of limited interest to other countries than Sweden.

The aim of the study was to estimate the ground impedance in Sweden in order to get a hint of the dependence on

- (i) location in Sweden
- (ii) time of the year
- (iii) different types of ground

Three measurement places in Sweden were examined:

Lund, in the southern part of Sweden  
Borås, near Gothenburg  
Uppsala, near Stockholm

The method used is described thoroughly in [2]. Essentially it consists of an adjustment of four parameters to measured frequency sweeps. The parameters are denoted  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , and are related to such quantities as the thickness of the equivalent porous layer and the flow resistance of this layer, see Fig. 1. When these parameters have been estimated the impedance may be evaluated with Eq. (1). This means that we may put together a large amount of impedances in a very comprehensive form. In fact, all data of this report is presented in two tables. These two tables have been translated into English and are given below.

#### Table E1

In Table E1 the primary data is presented. The table is divided into sections containing the different measurement places in Sweden. These, in their turn, are divided into subsections, each containing a specific measurement spot. So the surface on the spot may vary during the year due to e.g. agricultural treatment. The table also gives a reference to a figure, in which the impedance corresponding to the ground parameters is plotted. These figures are placed in the appendix, which also contains

some photos of the surfaces. The captions of these figures give a direct reference to the measurement spot as defined in Table E1. In the table we have also given reference to the mutual location of the source, the receiver and the ground surface according to:

	<u>Distance source-receiver</u>	<u>Source height</u>	<u>Receiver height</u>
10:	10 m	0.1 m	0.1 m
20:	20 m	0.1 m	0.1 m
40:	40 m	0.2 m	0.2 m

Table E2

The material in Table E1 is far from complete in the sense that one can get the impedance by some kind of description of it and comparison with Table E1. When making comparisons for different cases some kind of mean values of the impedances are needed. This is done in Table E2. The first three lines are mean values for the three measurement places mentioned, and the primary data is from the period May to August. The fourth and fifth lines are mean values for two measurement spots (a grassland and a cultivated soil) for a period over one year. The last line is some kind of "typical impedance" for Sweden, it is a mean value over both year and all the measurement spots. The table also gives reference to a figure (in the main text), in which the impedance corresponding to the ground parameters is plotted, and to the measurement spots actually used for the mean values in Table E1.

Some comments

The dependence on measurement place in Sweden in Fig. 10 gives a spread for the level relative free field as showed in Fig. 11. As can be seen in the last-mentioned figure this dependence is not negligible.

The variation of the ground impedance at different times of the year is shown in Fig. A18 and A19. One notes that the variation with the time of the year for the grassland is much smaller than for the cultivated soil. This is quite natural since cult-



ivated soil changes quite drastically depending on the degree of vegetation, if it is ploughed etc., whereas the grassland changes very little during the year, except when it is covered with a layer of snow.

The dependence on the type of surface is illuminated by comparing the mean values over one year for the grassland and the cultivated soil as in Figs. 13 and 14. Again the results indicate that the differences of the corresponding impedances may lead to considerable differences of the levels relative free field too, as shown in Fig. 14.

As a final suggestion we have included the mean value of all the primary data in Figs. 15 and 16 (except for gravel, which was too hard to make a use of the method of measuring the impedance possible). These values might be of some use when making a physical model of the ground, a scale model. Then one can either use the impedances in Fig. 15 or the levels relative free field in Fig. 16 to adjust a single or multi-layer model to data. The range of the parameters for the primary data, if one assumes 100 % porosity, is: the thickness of the layer, 1-60 cm; the flow resistance, 10-100 kNs/m<sup>4</sup>; The effective density, 1.3-10 kg/m<sup>3</sup>. This indicates that it ought to be possible to find porous materials that could work in a scale model.

TABLE E1. Ground impedance.

Measurement place	Date	Type of ground	Ground parameters			Positions	Fig/curve No.	
			a	b(deg)	c(s <sup>-1</sup> )			d(s <sup>-1</sup> )
Uppsala	15-17 Aug 1977	Cloverfield/weed	0.42	10	16800	880	10, 20	A1/1
	15-17 Jun 1978	Cloverfield/weed	0.33	10	6600	560	10, 20	A1/2
	15-17 Aug 1977	Cornfield, app. 60 cm high	0.32	10	11300	860	20	A2/1
	15-17 Jun 1978	Cornfield, app. 40 cm high	0.19	10	4500	480	20, 40	A2/2
	18 Jun 1978	Newsown, app. 15 cm high	0.27	10	10400	480	10, 20	A3/1
Nyköping	18 Jun 1978	Beets in hard clay, 10 cm high, thinly planted	0.14	5	10700	350	10, 20	A4/1
Borås	17 May 1978	Grassland, 3-4 cm high grass	0.21	5	14000	1440	20, 40	A5/1
	25 Jul 1978	Grassland, 10 cm high grass	0.38	10	7300	1440	20	A5/2
	18 May 1978	Meadow, one-year old vegetation	0.44	5	11100	870	20, 40	A6/1
	17 May 1978	Meadow, one-year old vegetation	0.85	5	11300	2880	20	A7/1
	25 Jul 1978	Meadow, newcut	0.50	10	20300	3100	20, 40	A7/2



TABLE E1 (cont.). Ground impedance.

Measurement place	Date	Type of ground	a	b(deg)	c(s <sup>-1</sup> )	d(s <sup>-1</sup> )	Positions	Fig/curve No.
Borås (cont.)	18 May 1978	Meadow, one-year old vegetation	1.06	5	135000	3300	20, 40	A8/1
	26 Jul 1978	Meadow, newcut	0.73	10	73000	5340	10, 20	A8/2
	26 Jul 1978	Gravel ground	-	-	-	-	20 40	A9/1 A9/2
Veberöd	6-12 Jul 1977	Cultivated soil, 30 cm grass	0.24	10	29000	579	10	A10/1
	1 Jun 1978	Cultivated soil, 15 cm grass	0.73	10	48000	2100	20, 40	A10/2
	22 Aug 1978	Stubblefield + new vegetation	1.10	10	88000	2600	20, 40	A10/3
	17 Oct 1977	Cloverfield, 10 cm grass	0.20	5	10200	1020	10, 20	A11/1
	22 Aug 1978	Cloverfield, 10 cm grass	0.63	10	110000	2620	20, 40	A11/2
	12 Oct 1977	Heather	0.52	10	33000	1550	10, 20	A12/1
	20 Jul 1978	Heather	0.79	5	54000	1450	10, 20	A12/2
	10 Oct 1978	Harrowed field	0.76	2	69600	1860	10, 20	A13/1
	12 Oct 1977	Gravel ground	-	-	-	-	20	A14/1
			-	-	-	-	40	A14/2

TABLE E1 (cont.). Ground impedance.

Measurement place	Date	Type of ground	Ground parameters				Positions	Fig/curve No.
			a	b(deg)	c(s <sup>-1</sup> )	d(s <sup>-1</sup> )		
Lund	3 Sep 1975	Stubblefield	0.60	10	12000	500	20	A15/1
	10 Aug 1977	Stubblefield	0.34	5	6700	450	20, 40	A16/1
	2 Sep 1975	Grassland, a few cm high	0.25	10	7500	430	20	A17/1
	10 Aug 1977	Grassland, a few cm high	0.37	10	16000	560	10, 20	A17/2
	1 Sep 1977	Grassland, damp	0.30	10	18500	590	10, 20	A18/1
	22 Sep 1977	Grassland, dry	0.32	10	17600	870	10	A18/2
	7 Feb 1978	Grassland, with 4 cm snow	0.49	0	17400	830	20	A18/3
	7 Feb 1978	Grassland, with 4-8 cm snow	0.30	0	18230	480	20	A18/4
	18 May 1978	Grassland, dry	0.37	5	38000	1180	10, 20	A18/5
	3 Sep 1975	Newsown, very sparse vegetation	0.60	10	30000	1000	20	A19/1
	1 Sep 1977	Stubblefield	0.51	10	28900	810	20, 40	A19/2
	22 Sep 1977	Ploughed stubblefield	0.29	10	1400	76	10, 20	A19/3
	31 Jan 1978	Ploughed field, very damp	0.30	10	3600	110	10, 20	A19/4
	7 Feb 1978	Ploughed field, 7 cm snow	0.60	10	3800	520	10, 20	A19/5
10 Oct 1978	Ploughed field, very damp	0.81	5	82000	3250	10, 20	A19/6	

TABLE E2. Mean values for the ground impedance.

Mean over	Ground parameters				Types of ground used	Result in figure
	a	b(°)	c(s <sup>-1</sup> )	d(s <sup>-1</sup> )		
Uppsala: Jun-Aug	0.25	10	7000	540	A1-A3	10
Borås: May	0.32	5	17280	1320	A5/1, A6/1, A7/1, A8/1	10
Lund: May, July, August	0.44	10	36000	1155	A10/1-2, A12/2, A18/5	10
Grassland: Lund (one year)	0.28	5	16000	630	A18	13
Cultivated soil: Lund (one year)	0.54	10	16000	800	A19	13
Total mean, all measurements	0.44	10	19400	1090	A1-A8, A10-A13, A15-A19	15







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 770077-0 från  
Statens råd för byggnadsforskning till Avd. för byggnads-  
akustik, LTH, Lund.**

**R32:1979**

**ISBN 91-540-2987-2**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6600932**

**Abonnemangsgrupp:  
V. Anläggningsteknik**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 1403  
111 84 Stockholm**

**Cirkapris: 30 kr exkl moms**