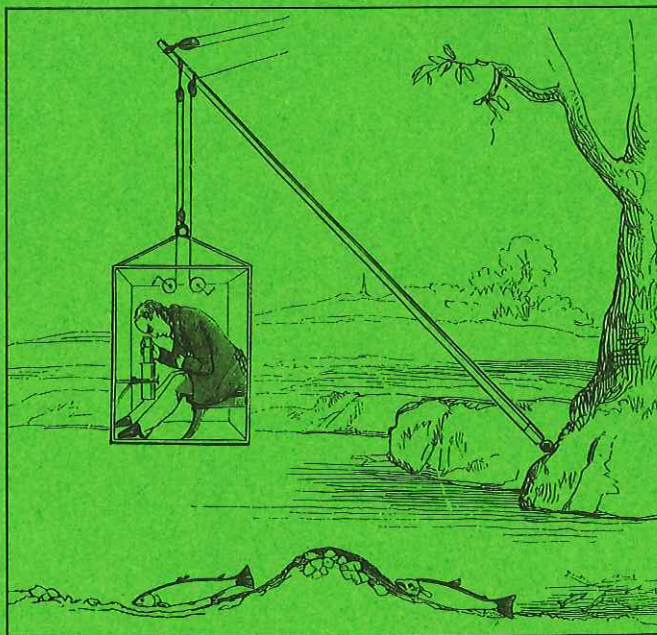


Information från

SÖTVATTENS- LABORATORIET

Drottningholm



HÅKAN WESTERBERG

Hammarforsens brus. Undervattensljud
från kraftverksanläggningar

HAMMARFORSSENS BRUS. UNDERVATTENSLJUD FRÅN KRAFTVERKSANLÄGGNINGAR

Håkan Westerberg

BAKGRUND	2
METODER	2
FISKARS HÖRSEL	3
RESULTAT	7
DISKUSSION	14
LITTERATUR	15
SUMMARY: UNDERWATER NOISE FROM HYDROELECTRIC POWER PLANTS	16

BAKGRUND

En angelägen insats för att öka de många kraftverksmagasinens värde som fiskevatten är utplantering av fisk. FAK; försöksgruppen för fiskevårdande åtgärder i kraftverksmagasin, har gjort ett flertal försök med utsättning av öring och kanadaröding (Gönczi 1978). Härvid har det visat sig att majoriteten av fiskarna söker sig ut ur magasinet. Detta är naturligtvis olyckligt för resultatet av utsättningen lokalt. Vid passagen av kraftverksturbinerna finns det dessutom anledning att misstänka att dödligheten är stor, eftersom återfångsterna vid försöken, inräknat dem som gjorts i magasinerna nedströms, endast är ca 10 %.

Vägar att minska öringens tendens till utvandring vore därför önskvärda. Vid telemetriförsök har det visat sig att kraftverksintaget är en stark källa för ultraljud. Med utgångspunkt från detta har laborator Lindström lagt fram idén att kraftverken även producerar för fiskar hörbara ljud, och att man i fiskodlingar skulle kunna lära utsättningsfisken att undvika detta ljud. Metoden skulle vara densamma som med framgång prövats på laxsmolt för att före utsättningen lära dem undvika predatorer (Larsson 1977).

Eftersom en kraftverksturbin körs med konstant varvtal finns det anledning att tro att den alstrar vibrationer med konstanta frekvenser, som är multipler av rotationsfrekvensen. För att undersöka om sådana karakteristiska toner sprids i vattnet runt kraftverksintag gjordes en kartläggning av undervattensljuden i två kraftverksmagasin i Indalsälven. Spektralanalyser på det inspelade undervattensljudet visade att brusnivån är hög, men att ljudenergin är relativt jämnt fördelad på alla frekvenser, och knappast har en sådan igenkännbar karaktär att ljudet skulle gå att använda för betingning.

METODER

I varje mätpunkt gjordes en minst 2 min. lång inspelning av undervattensbruset. Hydrofonen var en Brüel & Kjaer 8101, som hängdes ut från båt- sidan på cirka 1 m djup. I de flesta fall var mätförhållandena gynnsamma, utan vågskvalp och ryck i hydrofonkabeln. De mätningar som gjordes i starkt strömmande delar av kraftverksmagasinet kan dock innehålla brus som orsakas av vattenströmmen runt hydrofonen. Inspelningarna gjordes på en Uher Reporter bandspelare med bandhastigheten 19 tum/s. Hydrofon- signalen förstärktes vid behov 10-40 dB med en kalibrerad förstärkare. Mätssystemets totala frekvensrespons var nära konstant i intervallet 10-20.000 Hz.

Inspelningarna analyserades vid Institutionen för Byggnadsakustik vid CTH. Spektralanalys gjordes med en B & K digital frekvensanalysator typ 2131 kopplad till en B & K / Varian dator typ 7504. De spektra

som redovisas är medelvärden av 15 momentana spektralfördelningar, tagna med 2 s tidsintervall. Spektralmätningarna gjordes i 1/3 oktavband, men resultaten har omräknats till ekvivalenta brusspektra med 1 Hz bandbredd.

För att upptäcka eventuella svaga komponenter, som kunde ha jämrats ut vid analysen i 1/3 oktavband, användes en Tektronix smalbandsanalysator. För denna analys valdes den längsta obrutna inspelningen av kraftverksbruset, och spektralfördelningen i området 0 - 1.000 Hz sveptes med 1 Hz bandbredd.

Akustiska begrepp och enheter förklaras t.ex. i Westerberg 1977.

FISKARS HÖRSEL

För att avgöra om kraftverksbruset är hörbart för fiskar, och i så fall på vilket avstånd från intaget, måste man ha kvantitativa kunskaper om fiskarnas hörsel. Att fiskar har relativt god hörsel, speciellt vid låga frekvenser, är välkänt, men många av försöken att experimentellt bestämma olika arters hörseltrösklar är av tvivelaktigt värde, på grund av de svårkontrollerade och okända akustiska egenskaperna hos akvarier i vilka experimenten utförts. Dessa problem diskuteras i översiktsartiklar av t.ex. Hawkins 1973 och Fay 1978.

Generellt kan man urskilja tre kategorier bland fiskar när det gäller hörselförmåga:

- a) Fiskar utan simblåsa.
- b) Fiskar med simblåsa men utan förbindelse mellan denna och innerörat.
- c) Fiskar med förbindelse mellan simblåsan och innerörat.

Fig. 1 visar schematiska audiogram för dessa tre fall.

Grupp a har den minsta hörselbandbredden, med en övre gränshfrekvens kring 200-250 Hz. Största känsligheten är vid cirka 100 Hz. Fysiologiskt sker stimuleringen genom direktverkan av ljudvågens partikelrörelser på sacculus och otolithen.

Grupp b visar en större bandbredd och cirka 20 dB lägre hörseltröskel i det känsligaste frekvensområdet. Stimuleringen av sacculus sker även i detta fall genom partikelrörelsernas direktverkan, men simblåsan påverkas av ljudvågornas tryckfluktuationer och återutsänder ljudet med förstärkta partikelrörelser i det akustiska närfältet, vilket förklarar den större känsligheten. Den övre gränshfrekvensen varierar mellan olika arter men ligger typiskt i intervallet 500-1.000 Hz. Absolutvärdet för hörseltröskeln i det känsliga området varierar sannolikt också mellan arter, men en stor del av den variation som redovisats förklaras av

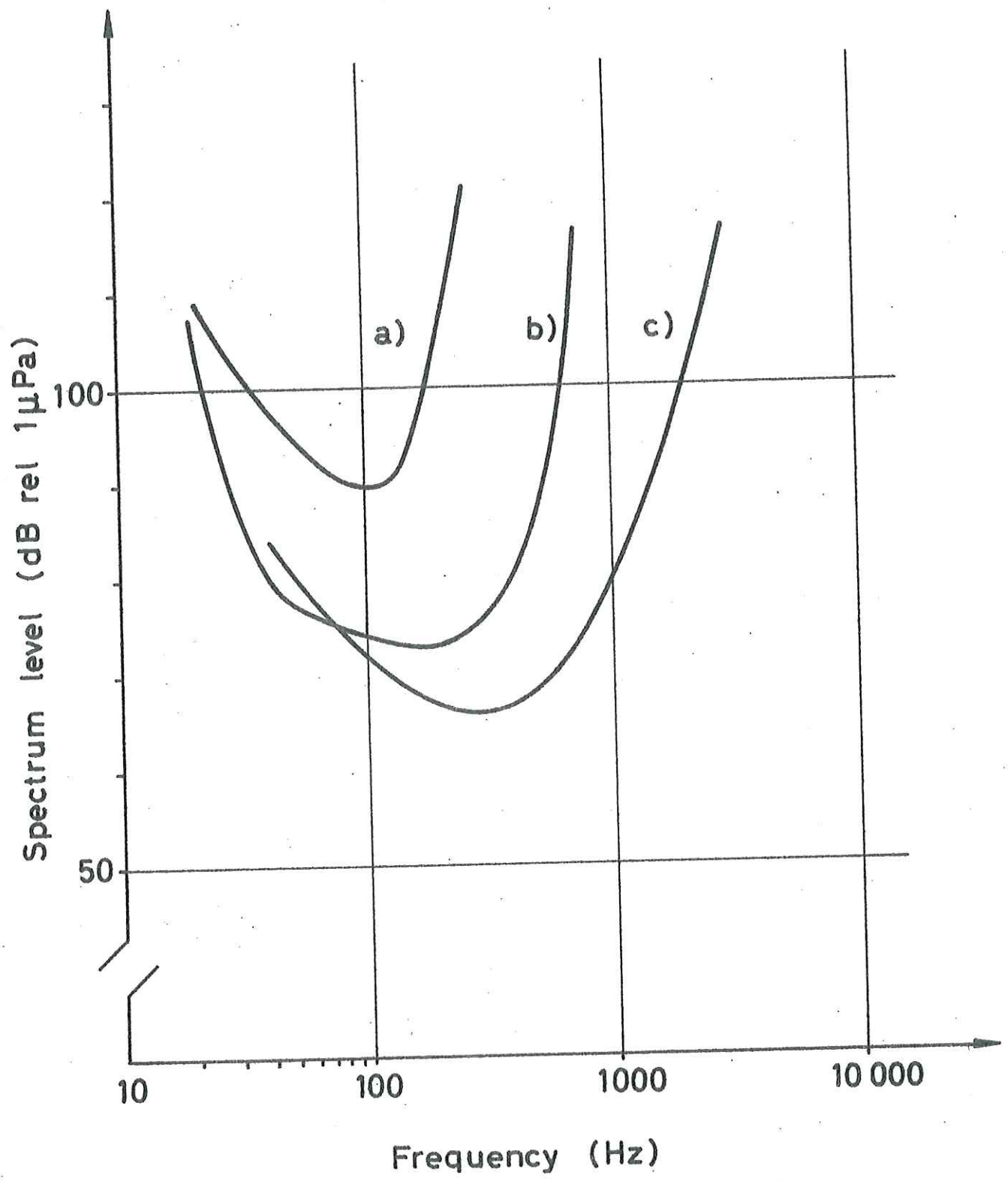


Fig. 1. Schematiska audiogram för fiskar.
a) Fiskar utan simblåsa.
b) Fiskar med simblåsa men utan förbindelse mellan innerörat och simblåsan.
c) Fiskar med förbindelse mellan innerörat och simblåsan.

att brusnivåerna vid försöken varit hög och okontrollerad. Hörseltröskeln har då ofta varit maskerad av bruset och de uppmätta värdena är för höga. Den nivå kring 75 dB re 1 μ Pa som använts i audiogrammet har tagits från mätningar på torsk, och är exempel på en omaskerad hörseltröskel (Chapman och Hawkins 1973).

Grupp c innefattar i första hand gruppen Ostariophysi; fiskar med en mekanisk koppling mellan simblåsan och innerörat, den s k Weberska apparaten. Hit hör t ex karp och malar. Också andra släkten, som Clupeidae, har genom luftkanaler nära förbindelse mellan simblåsan och innerörat, och visar liknande hörselprestanda. I denna grupp är den övre gränshörselns högre, cirka 1.000-5.000 Hz.

Ett audiogram visar den lägsta ljudintensitet som en ren ton måste ha för att vara hörbar i en i övrigt helt tyst miljö. Om stimuli i stället för en ton är brus med energin fördelad över flera frekvenser så gäller att örat summerar ljudintensiteten över ett bestämt frekvensområde, det s k kritiska frekvensbandet. Bandbredden för det kritiska bandet är approximativt 40 % av bandets centrumfrekvens, d v s högfrekvent brus summeras över ett bredare frekvensområde än lågfrekvent. Den minsta spektralnivån som krävs för att bredbandsbrus skall vara hörbart är på grund av detta väsentligt lägre än hörseltröskeln för en ren ton. Vid 500 Hz är den minsta hörbara brusnivån 23 dB lägre än hörseltröskeln och vid 50 Hz cirka 13 dB lägre.

Detta hänger samman med brusmaskering på så sätt, att en ton är detekterbar när den har ungefär samma ljudenergi som brusets summerade energi i det kritiska bandet, centrerat kring tonens frekvens. Tonen måste alltså vara från 13 dB till 23 dB starkare än bruset i intervallet 50-500 Hz för att den skall uppfattas som en ton. I akvatiska miljöer är ofta brusnivåerna höga jämfört med fiskarnas absoluta hörseltrösklar. För fiskar i grupp b och c torde hörseln alltid vara brusmaskerad i det känsligaste området vid normala situationer.

Laxfiskar hör till grupp b. Få försök har gjorts att undersöka salmonidernas hörsel. Strupsnittsöringen (*Salmo clarki*) har studerats av Stober (1969). I Fig. 2 återges resultaten från dessa försök. De hörseltrösklar som anges är observationer av vid vilken ljudnivå en speciellt känslig öring spontant reagerade för en utsänd ton. Vid jämförelse med data från torsk (Chapman och Hawkins 1973), som är den grupp b-fisk vars hörsel är bäst undersökt, ser man inga stora avvikelser. Den övre gränshörselns för strupsnittsöringen är densamma, cirka 600 Hz. Hörseltröskeln i det känsligaste området, 50-200 Hz, visar en 10-15 dB lägre nivå för öringen.

Abbott (1972) har gjort försök som visar att det går att betinga laxfiskar, i detta fall regnbåge (*Salmo gairdneri*), till ljudsignaler. Han tränade fiskarna i en odlingsbassäng att samlas vid en 150 Hz ljudkälla för utfodring. Dessa experiment visade också att fiskarna kunde höra från vilken riktning ljudet kom, en förmåga som är av viss betydelse för att den skisserade undflyendereaktionen från kraftverksbuller skall vara effektiv.

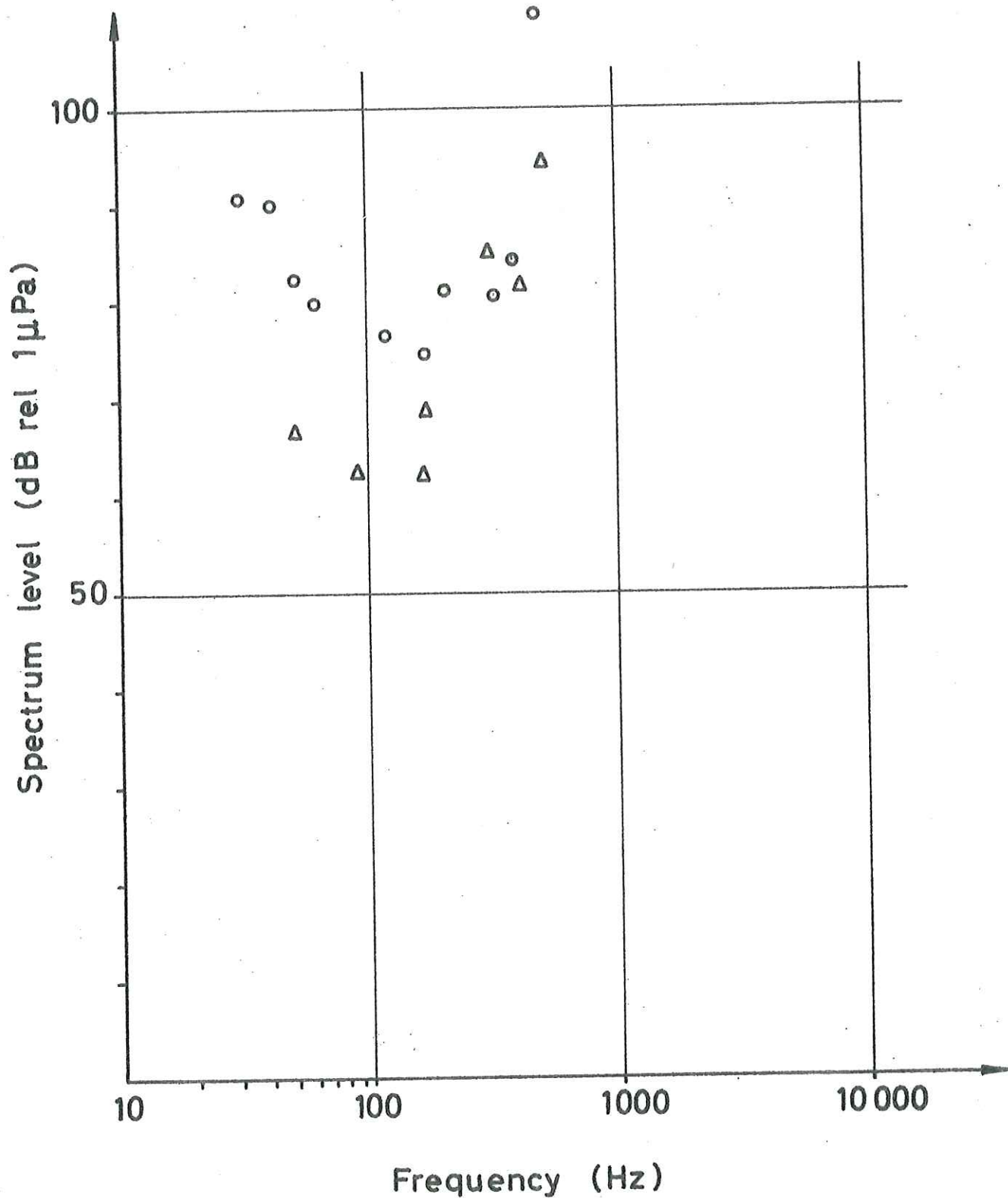


Fig. 2. Experimentellt bestämda audiogram för strupsnittsöring (trianglar, Stober 1969) och torsk (cirklar, Chapman och Hawkins 1973).

RESULTAT

Inspelningarna gjordes under perioden 17-19.5.1978 i Gammelänge och Hammarforsens kraftverksmagasin i Indalsälven. Vid Gammelänge kraftverk var vattenföringen $430 \text{ m}^3/\text{s}$ och vid Hammarforsen $520 \text{ m}^3/\text{s}$. Dessutom gjordes inspelningar i en starkt strömmande del av Ammerån, där vattenföringen var cirka $90 \text{ m}^3/\text{s}$. Kartan i Fig. 3 visar var inspelningarna gjordes. Positionerna har betecknats med figurnumret för respektive spektra.

Fig. 4 b visar det ostörda bakgrundsbruset i en lugnt flytande del av Hammarforsmagasinet under vindstilla förhållanden. Vid 100 Hz ligger brusnivån cirka 10 dB under öringens hörseltröskel enligt Fig. 2. På grund av summeringseffekten är alltså även detta det lägsta uppmätta bruset i magasinet hörbart för öringen. Vid måttlig vind, 4-5 m/s, ökar brusnivån på alla frekvenser, se Fig. 4 a.

Fig. 5 och 6 visar brusspektra uppmätta på olika avstånd från kraftverksintagen vid Gammelänge respektive Hammarforsen. Fig. 7 är exempel på forsbrus, dels i en naturlig fors i Ammerån, dels i utsläppskanalen från Gammelänge kraftverk. Likheter är mycket stora och man kan dra slutsatsen att ljud från kraftverket inte sprids i vattnet nedströms verket. En trolig orsak är den stora bubbelhalten vid utloppet, som effektivt dämpar alla ljud i vattnet. Bruset i kanalen är alltså lokalt genererat. Till skillnad från kraftverksbruset fluktuerar forsbruset starkt både i total ljudnivå och spektralsammansättning. Variationer med 10-20 dB över några sekunder är typiska.

Spektralanalyserna i Fig. 5 och 6 visar att undervattensljudet från kraftverksintagen saknar tonkomponenter. Detta är förvånande eftersom de i kraftverksbyggnaden dominerande hörbara ljuden är strukturvibrationer med tydliga toninslag. Den detaljerade spektraluppdelningen i Fig. 8 visar att även svaga spektraltoppar saknas och att analysen i tersband ger en rättvisande bild. Den dominerande källan för undervattensljudet är tydligen vibrationer och hydrodynamiskt brus vid intagsgallret. Den enda observation, som kan tydas som en ton som genererats av turbinerna, är den topp vid 50 Hz som finns i spektra 5 a och b från Gammelänge. Den är dock mindre än 10 dB över medelspektralnivån och kan alltså inte uppfattas i det allmänna bruset.

Jämförelse av förhållandena nära Gammelänge respektive Hammarforsen (5 a och 6 a) visar att brusets styrka kan variera starkt mellan olika kraftverk. Avståndet från intagsgallret är ungefär lika stort vid båda tillfällena men ljudintensiteten i intervallet 100-500 Hz är cirka 20 dB, d v s 100 gånger större vid Gammelänge, trots att vattenföringen här var 20 % lägre. Vid lägre frekvenser var intensiteterna ungefär lika stora.

Ljudintensiteten varierar i tiden. Speciellt vid låga frekvenser är fluktuationerna stora. I frekvensområdet 1-10 kHz är spektra nära likformiga och om man antar att källstyrkan varit approximativt konstant under mätningarna kan man använda spektralnivåerna vid dessa frekvenser för att beräkna attenuationen. Över de första 1.000 m från intaget minskar ljudintensiteten cirka 25 dB i Gammelänge och 50 dB i Hammarforsmagasinet.

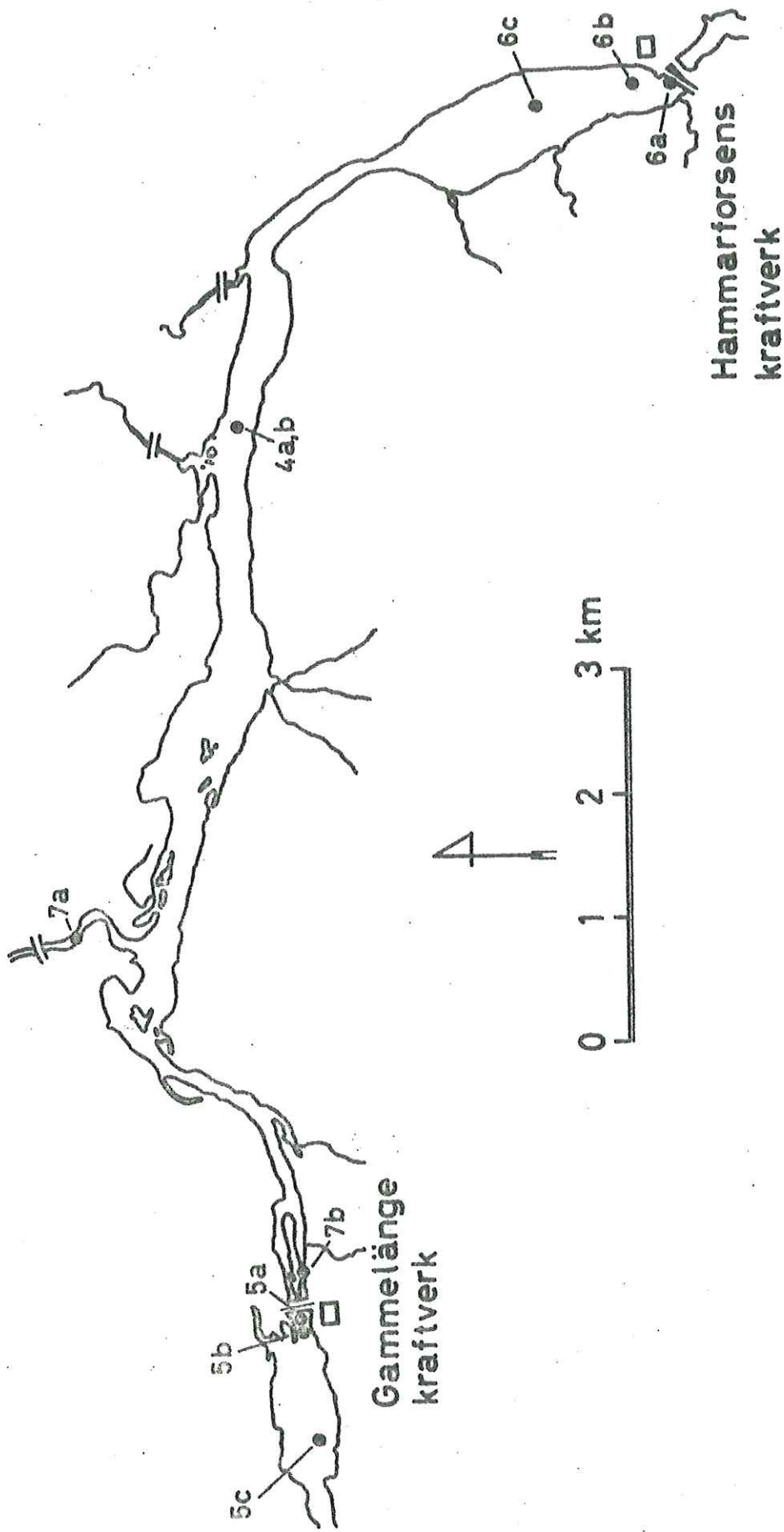


Fig. 3. Mätpunkter i kraftverksmagasinen. Beteckningarna är figurnumren på motsvarande spektralfördelning.

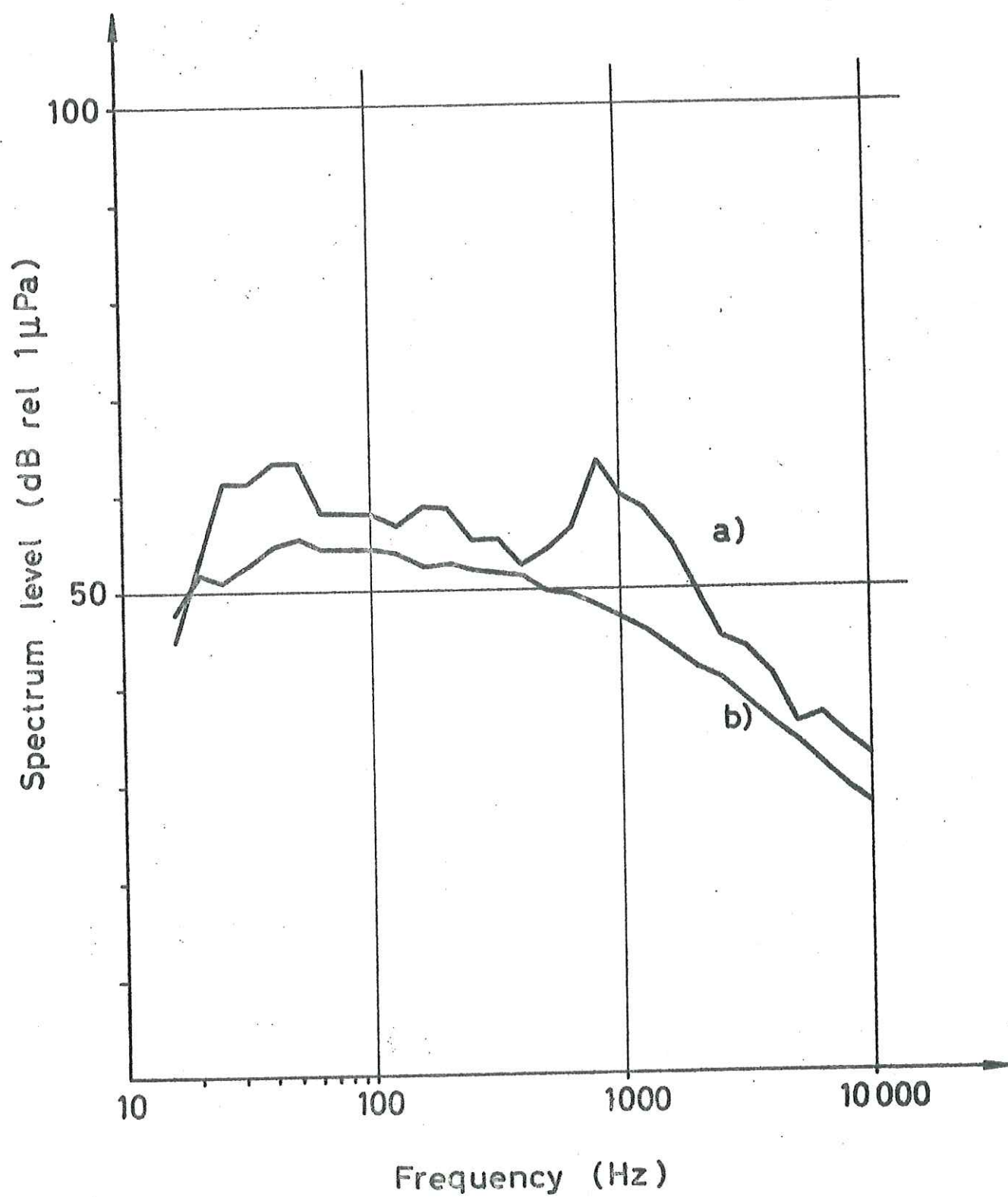


Fig. 4. Brusspektra i de centrala delarna av Hammarforsmagasinet
a) vid måttlig vind, 4-5 m/s.
b) vid vindstill.

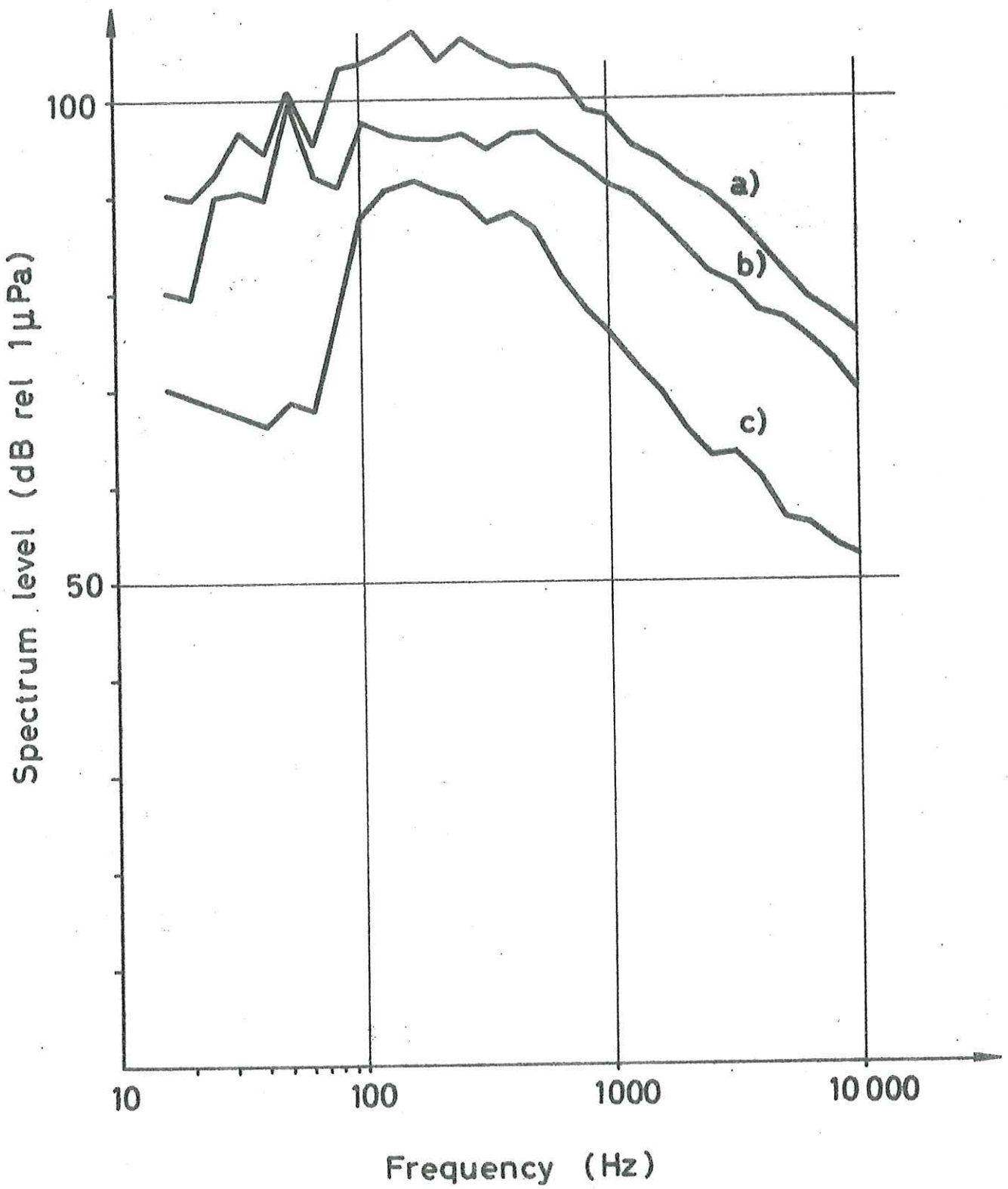


Fig. 5. Gammelänge kraftverk
a) ca 75 m från intaget
b) ca 175 m från intaget
c) ca 1000 m från intaget

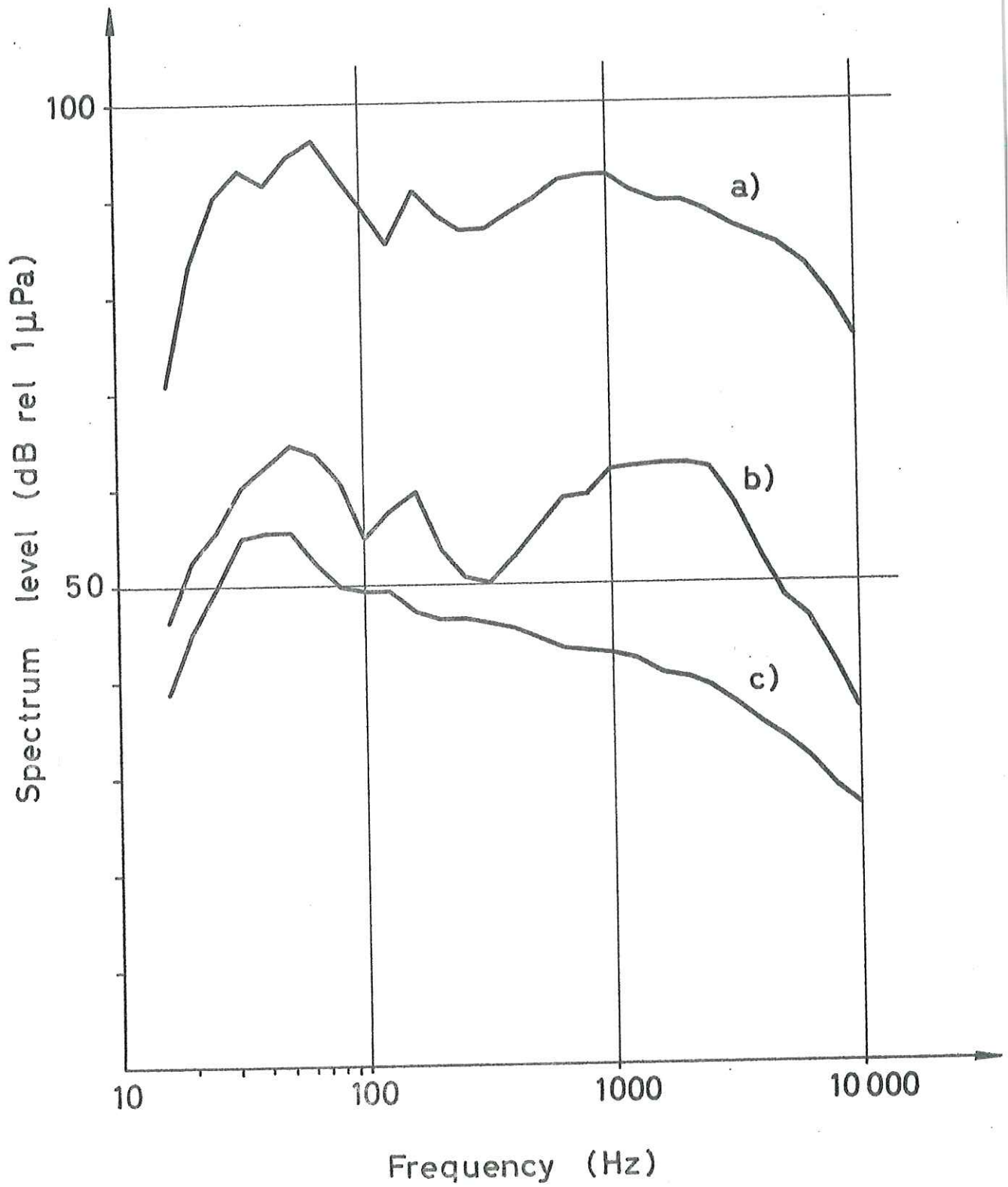


Fig. 6. Hammarforsens kraftverk
a) ca 75 m från intaget
b) ca 400 m från intaget
c) ca 1200 m från intaget.

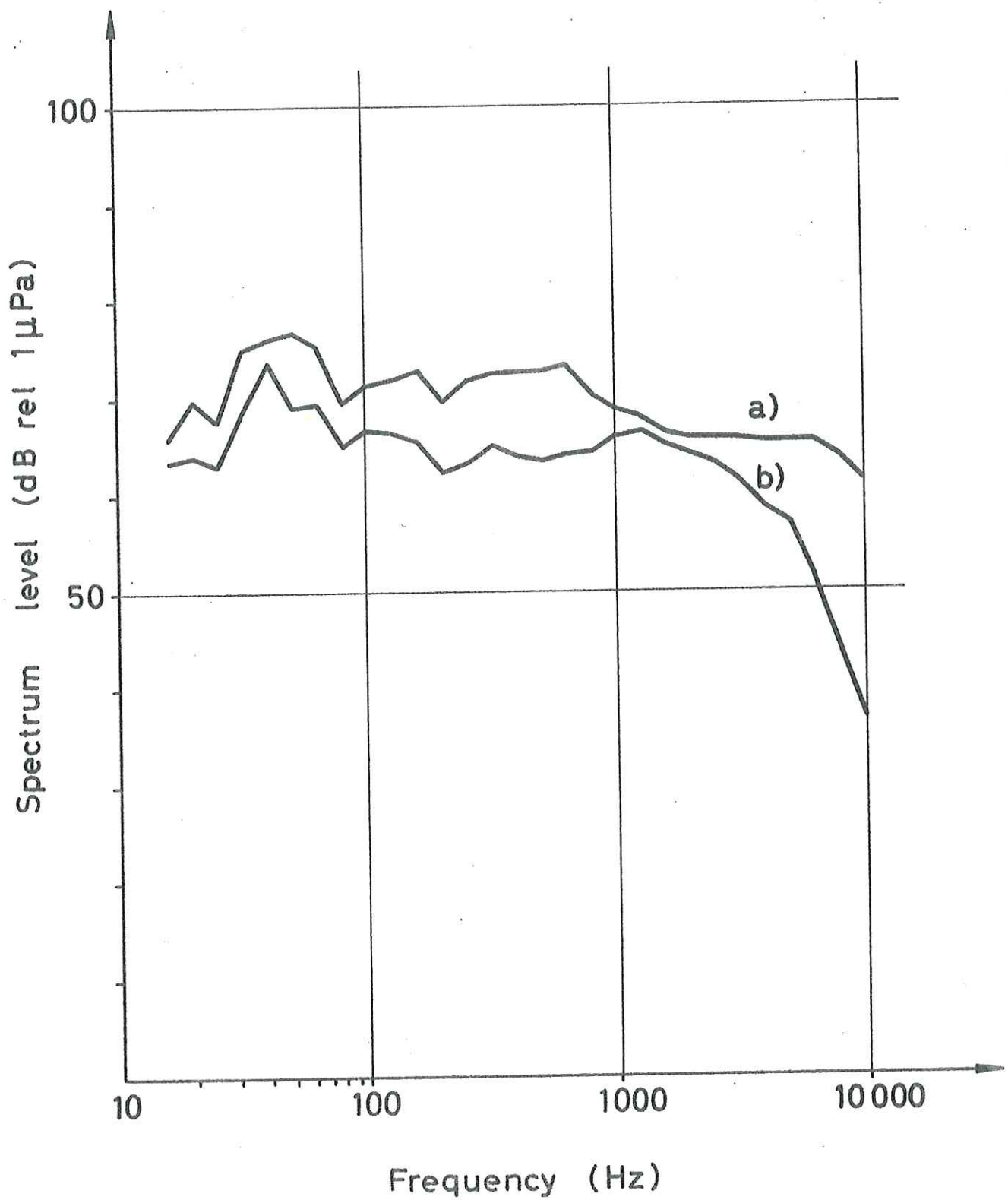


Fig. 7. Brusspektra i strömmande vatten
a) Ammerån
b) utloppskanalen vid Gammelänge.

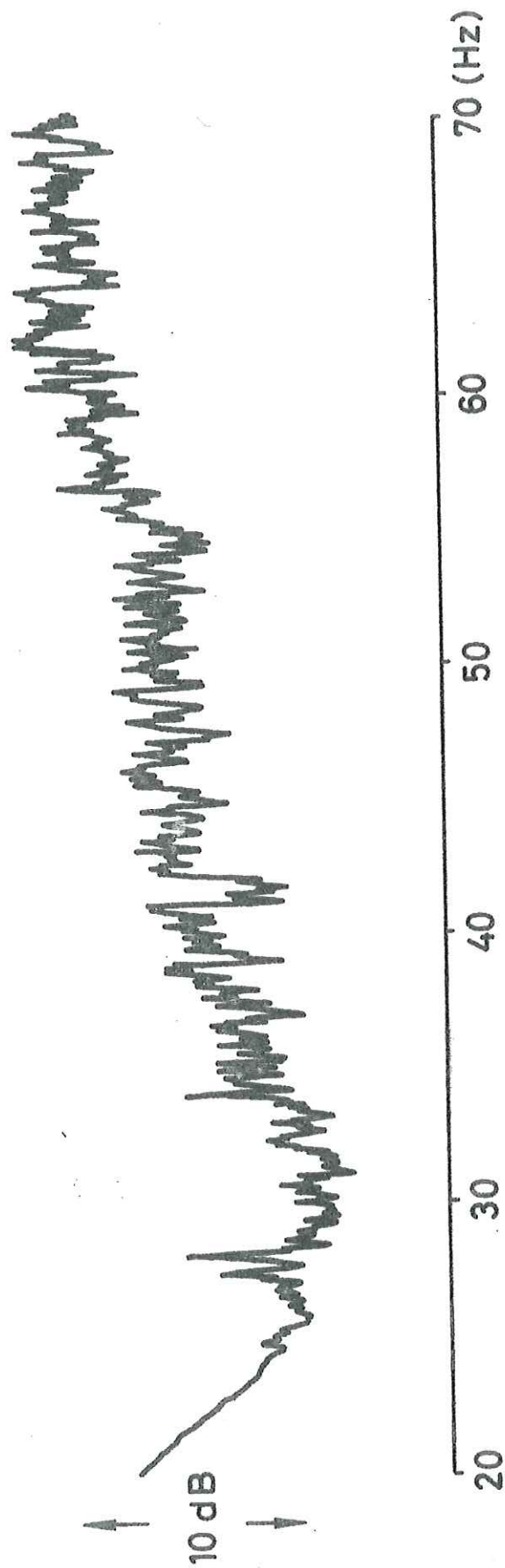


Fig. 8. Del av spektrat 6 b, uppmätt med 1 Hz bandbredd. Arbiträr referensnivå.

Den stora skillnaden beror på skillnader i topografi. Gammelängemagasinet nedre del är en djup och nästan rak kanal. Mätpunkterna ligger längs kanalen med fri siktlinje till turbinintaget. Attenuationen genom cylindrisk spridning skulle ge en teoretisk intensitetsminskning av 30 dB. Att minskningen är mindre förklaras av att ljudet reflekteras i kanalens sidor och adderas till direktljudet. Ljudintensiteten avtar väsentligen logaritmiskt med avståndet och om vi antar att magasinet hade samma raka sträckning längre uppströms skulle det behövas en sträcka av storleksordningen 100 km innan kraftverksbruset minskat till samma styrka som det naturliga bakgrundsbruset.

I praktiken kommer alltså alltid ljudets avskärmning vid krökar och andra barriärer att bestämma räckvidden för bruset från kraftverket. Hammarforsen är ett exempel på detta förhållande. Intaget ligger vid dammens norra del och en udde skymmer mätpunkterna 6 b och c från intaget, dessutom sträcker sig en grundbank från magasinet västra strand mot samma udde. Dessa förhållanden gör att initialdämpningen är 25 dB, d v s 300 gånger större än i Gammelängemagasinet.

DISKUSSION

Det är uppenbart från dessa mätningar att det lågfrekventa buller, som produceras vid ett kraftverksintag, är väl hörbart för laxfiskar i alla delar av kraftverksmagasinet som har direkt sikt till intaget. Hörbarheten därutöver bestäms av topografin och kan inte beräknas på något enkelt sätt.

Vidare kan man konstatera att kraftverksbruset till sin karaktär inte på något avgörande vis skiljer sig från naturligt förekommande brus i forsar. Den skillnad som finns är att ljudnivån är lägre och mer fluktuerande från en fors.

Frånvaron av karakteristiska toner i kraftverksbruset torde göra det omöjligt att med framgång använda bruset som betingat stimuli för inläring av en undvikandereaktion. Ett praktiskt skäl är att den akustiska miljön i odlingsbassänger är ett konstant brus från in- och utströmningen, som det finns all anledning att tro är mycket likt bruset från ett kraftverksintag, eftersom genereringsmekanismerna är desamma.

Abbotts försök med regnbåge (Abbott 1972) visar dock att laxfiskar kan betingas till en ren ton. Det ligger då nära till hands, att tänka sig att placera en ljudkälla vid kraftverksintaget och använda en intermittent eller kontinuerlig artificiell ton som stimuli vid inläring. Med kännedom om brusnivån är det lätt att räkna ut hur stark en sådan ljudkälla behöver vara för att fiskarna skall kunna höra signalen över bakgrundsbruset från turbinintaget. I frekvensområdet 100-400 Hz, där fiskarna hör bäst, krävs ett signal - brus förhållande av minimum 20-25 dB för att signalen skall detekteras. Vid en brusnivå av 110 dB, som den som uppmättes vid Gammelänge, skulle då en signalnivå av ungefär 140 dB vara

tillräcklig. För att erhålla denna signalnivå på ett avstånd av 200 m från ljudkällan, vilket kan vara en realistisk förutsättning om man vill täcka närzonen kring intaget, behövs en ljudkälla med källstyrkan 185 dB re 1 MPa, 1 m. Omräknat till akustisk uteffekt motsvarar detta cirka 30 W. De tekniska förutsättningarna för att använda ljudsignaler är alltså goda.

LITTERATUR

- Abbott, R.R. 1972. Induced aggregation of pond-reared rainbow trout through acoustic conditioning. *Trans.Amer.Fish.Soc.* 101(1):35-43.
- Chapman, C.J. och A.D. Hawkins. 1973. A field study of hearing in the cod. *J.Comp.Physiol.* 85:147-167.
- Fay, R.R. 1978. Sound detection and sensory coding by the auditory systems of fishes. p. 197-236. Ur *The behavior of fish and other aquatic animals*. Red.: D.I. Mostofsky. Academic Press, New York.
- Gönczi, A.P. 1978. Utvärdering av öring- och kanadarödingutsättningar 1975-1977. FÅK informerar nr 7:1-13.
- Hawkins, A.D. 1973. The sensitivity of fish to sounds. p. 291-340. Ur *Oceanography and marine biology*. Vol. 11. Red.: H. Barnes. George Allen and Unwin Ltd, London.
- Larsson, H-O. 1977. Evaluation of characters within different stocks of salmon and sea trout, and the influence of different factors on the result of plantings - based on tagging experiments. STU-report 76-4659.
- Stober, Q.J. 1969. Underwater noise spectra, fish sounds and response to low frequencies of cutthroat trout with reference to orientation and homing in Yellowstone lake. *Trans.Amer.Fish.Soc.* 98(4):652-663.
- Westerberg, H. 1977. Ultraljudsteleometri. Information från Sötvattenslaboratoriet, Drottningholm (15). 39 p.

SUMMARY: UNDERWATER NOISE FROM HYDROELECTRIC POWER PLANTS.

The underwater noise was measured in two barrages on River Indalsälven. The objective was to investigate if the sound from a hydroelectric power plant could be used as a conditioned stimulus for training hatchery-reared fishes to avoid the intake to the water turbines.

The noise level close to the intake was approximately 50 dB above the auditory threshold of trout and 30 dB above the noise level in a rapid. Spectral analysis shows that the noise is free of tonal components. There are large differences both in noise level and spectral composition between different power plants. The possibility to use this rather unspecific noise in a conditioning experiment thus seems to be small.

The required acoustic power of a sound projector capable of producing a tone signal, which is audible in the observed back-ground noise, was calculated to be approximately 30 W.