

德意志联邦共和国

工作文件

地震事件记录技术新发展的各方面情况

概要

自地震专家小组于 1978 年为裁军谈判委员会编写第一份报告 (CCD/558 号) 以来, 地震事件记录技术方面已出现了重大进展。本文着重论述过去五年中那些被认为能提高全球地震台网的检测和定位能力的发展情况。 CCD/558 号中提出的这样一个系统的最先进的模型称为地震台网 III (SRO)。 预计这个设想的系统能检测北半球体波震级 m_b 为 3.8 至 4.2 的地震事件以及南半球 m_b 为 4.0 至 4.6 的地震事件, 可能检测到的事件为 90%。 由于仪器制造学、电子学、计算机技术以及电信技术方面的发展, 地震台网 III 就不再是一个设想的概念而成为具体的东西了。就检测能力而言, 下述事态发展被认为是未来全球台网的主要组成部分:

- 高性能数据获取系统, 由具高分辨率和高灵敏度的宽频带地震检波器与大功率的 22 比特模拟数据转换器组成, 能提供地震信号中所包含的一切资料而不失精确性。
- 安置于洋底钻孔中的洋底地震检波器, 将缩短南、北半球检测能力之间的差距。
- 利用“低功率”技术的地震记录系统可用于结构最佳的全球台网, 这是因为供长时间运行的电力可从电池或太阳能电池获得。
- 卫星系统已被证明对于来自地球上任何地方的高 Q 值数字地震数据的联机传输是可靠而有效的。
- 散开设置小型台阵而不是单个的台站能大大改善对局部或区域范围内的地震事件的检测、定位和识别。

—— 数字地震记录和处理系统的费用由于采用微型信息处理机而降低，现在甚至低于模拟系统的费用。

在此方面，还有一点是通过在钻孔中安置地震检波器来提高处于不利噪声环境的地震台站的检测能力的可能性。在德意志联邦共和国东部——这是一片覆盖有厚冲积层沉积物的地区——新建立的由六个井下站组成的局部网获得的初步结果揭示出井底仪器的检测阈值和德意志联邦共和国台阵的一些台站的一样低，而这个台阵仍是我国最灵敏的地震台网。从这些初步结果看来，将小规模台阵中的井下台站作为全球台网的组成部分这种想法将能提供对感兴趣的地区的区域或局部事件的有效监测。这种新型的数字式台网将使用的技术代表着我国用于地震学方面的记录系统的最新发展阶段。由于记录和分析地震数据方面的高度自动化，这项技术也可在未来的全球台网中用于“黑盒”系统。

过去五年在技术方面的进步已改进了地震数据记录、传输、处理和分析的质量。由于这一发展的结果，应提出一个新的、经改善的全球台网的概念以表现监测今后的全面禁试的现代地震学方法的效率。

1. 导言

近年来，越来越多的国家报告在用于记录地震的地震仪器制造方面改进了技术能力。电子学、计算机技术以及电信技术方面的进步大大影响了这些方面的发展。

随着记录的地震信号从模拟型转换为数字型，地震学的新时代到来了。这就是说可将高速计算机用于处理和分析地震图。数字技术首次大规模使用是在六十年代中期美国蒙大拿州的大孔径地震台阵开始运转的时候。自那时以来，许多国家都研制并安装了数字系统以用于记录和分析地震数据。

在我国，“数字地震学”始于七十年代初，格雷芬贝格数字宽频带台阵项目开始进行的时期。这个项目的目的是要为地震学研究提供一种工具，通过宽频带记录与台阵能力相结合来利用地震信号的全部信息内容。由于对分辨率、动态范围、数据质量以及适应性的各种不同要求，有必要为该系统使用数字组成部分。共有19个宽频带仪器的13个台阵的安装工作在1980年初完成。该台阵系统的性能可由1980年7月举办的讨论会向地震专家小组展示(S. GSE/FRG/7)。GRF台阵的高Q值数据已被大量使用于研究各种各样的地震学问题(SEIDL & BER-

CKHEMER, 1982; RAEKERS & MOLLER, 1982)。另外, 几项研究已确认宽频带台阵数据可为检测目的进行最理想的滤波 (SEIDL, 1979; STAMMLER, 1981; FERBER, 1983) 并为揭示了识别地震事件的新的可能性 (HARJES, 1979; HANKA, 1982)。

今天, 格雷芬贝格系统已不再代表最新的技术标准, 但由于它在频带宽度、分辨率及动态范围方面记录的地震图的质量, 仍应算作目前在运行中的高性能记录系统之一。

在世界范围内, SRO (地震研究观测台) 台站就其技术标准、数据质量及记录能力而论属于和 GRF 系统相同的类型。目前正在全球不同国家运行的这 13 个台站都配备有 3 分向宽频带地震检波器装置。传感器的信号经过滤波产生出长周期和短周期数据。这个系统连续记录三个长周期数据通道, 每秒钟抽样一次, 而每秒钟以数字记录 20 次的垂直分向的短周期数据则仅在侦察到事件时作记录。

SRO 地震检波器仍是唯一的在井下运行的宽频带仪器。由于它们安置在约 100 米的深处, 长周期记录受风造成的噪声的影响较之靠近地面的普通地震检波器为小。由于一个地震研究观测台位于离 GRF 台阵的一个 3 分向台站仅 50 米的地方, 可对这两个系统的记录结果加以直接比较。由于风的条件, SRO 井下台站的长周期频带特别是水平分向中的噪声程度较低, 这是不奇怪的。另一方面, 对许多用途来说, 记录宽频带地震检波器结果而不是记录经过滤波的长、短周期信号是可取的。考虑到这两种系统为之而研制出来的不同用途以及在当时可利用的技术, 它们都应认作是最理想的。

2. 最近的技术发展

地震专家小组的第一份报告 (CCD/558 号) 提出了监督全面禁试的 4 种可能的全球台网, 该份报告系于 1978 年 3 月提交裁委会的。设想称作地震台网 III (SRO) 的最先进的系统由 SRO 类型的高 Q 值地震台站构成。图 1 表示 CCD/558 号中提出的全球台站分布情况。这个台站网能检测 90% 的地震事件, 估计其检测能力在北半球为 3.8 至 4.2 mb, 在南半球为 4.0 至 4.6 mb。地震网 III 的台站分布情况与现有的地震台站十分吻合, 就检测能力而言远非理想的。为进一步改

进，有必要

- 增加地震台站数目，尤其是在南半球增加台站数目；
- 安装新的洋底井下地震台站；
- 在检测能力方面使台站分布最佳化；
- 在可能有意义的地区内部和周围设立台阵而不是单个的台站；
- 在井下或矿井设置单个台站或台阵的地震检波器以达最佳噪声条件。

HANNON 已对包括有其中的某些成份的模型的能力进行了研究（1983）；这些研究指出了 CCD/558 号的结果可以改善的程度。包括所有上述一些方面的全球台网的技术要求也仅在过去几年中才得到满足。下述各点指出了在设计未来的全球台网并估价其能力时须要考虑到的主要因素和发展情况。

1. 新的地震数据获得系统特别是地震检波器和模拟—数字转换器已提高了分辨率和灵敏度。如 TG44000 一类的地震检波器可以在最安静的地方操作，分辨率不再受电子噪声的限制。将此种仪器与当前美国正在研制的 22 比特模拟—数字转换器相结合，就有可能记录到与目前使用的多频带记录方式精确度相同的宽频带结果。
2. 自美国在洋底的井下安装三分向宽频带系统以来，洋底地震仪器已有了重大改进。使用这项技术以后，环境噪声级降低了相当多。有了这样的系统，在沿海地区和海岛地区尤其是南半球的这些地区的检测能力就将进一步提高。
3. 新的“低功率”微型信息处理机（CMOS）组件消耗电力极少。采用这种技术的地震台站几乎到处可设立，这是由于供长期使用的电力可从电池或太阳能电池获得。这种台网内的各台站可根据这个台网预定的任务而选定最适当的位置。
4. 美国的“区域地震试验网”（RSTIN）已证明利用卫星系统将高 Q 值的地震数据传输数千公里是有效而可靠的。将微型信息处理机和电信技术结合进这个系统标志着地震记录设施发展的新阶段。可将这项技术作为未来全球系统的标准。
5. 目前在挪威设立的小孔径地震台阵即所谓的小型台阵（NORESS）在局部和区域事件的检测、识别和定位方面已获得了令人鼓舞的结果。将这种系统与

RSTN 类型的宽频带台站相结合便可作为地震台网 IV 的主要组成部分。

6. 由于采用微型信息处理机技术，数字记录和分析系统的费用已大为降低。即使预算低的机构现在也能设立高 Q 值数字地震台站。现在有供各种用途的低费用系统出售，因而未来的全球系统就不再需要设立模拟台站了。

3. 德意志联邦共和国的新型地震设施

通过在几百米深的钻孔或如果可能在废弃的矿井中设置地震检波器以提高信噪比，由于其对全球系统的能力的重要性是应加以考虑的一个方面。在人口多、工业和交通密集的国家，对地震信号作高度敏感记录的主要困难之一是寻找安装地震台站的安静地点。在覆盖有厚层沉积物的遥远地区也有地震噪声大的问题。在这些地区采用钻孔的办法可以提高地震台站的检测能力。最近，在德国北部（下萨克森）这片完全为厚冲积层所覆盖的地区中建立的一些井下台站组成的局部地震台网得到的新结果表明了预期的结果能实现的程度。

这个局部地震台网是在 1981 年开始的一个项目中建立的。这个项目是作为确定地下盐窟是否适应用作辐射性强的放射性废料存放地的地质和地球物理综合研究计划的一部分。以局部网监测的地震活动应能提供该地区可能的活动构造带的情报。记录震级低至 $ML = 0$ 的小型局部地震的主要障碍是高强度的地震噪声。在地面测得的噪声振幅相当于震中距为 100 公里时地方震震级 $ML = 3.3$ 的地震。

为在三个不同的钻孔中确定噪声振幅随深度减小的量，利用一种专门的地震检波器进行了短周期噪声测量。如从几名作者（DOUZE, 1964；BATH, 1966；TAKANO & HAGIWAR, 1966；HARWARD, 1970）发表的著述所得知的，噪声特点作为深度的函数遵循一种普遍的趋势。振幅随频率和深度的增加而减小。但是，发现各种结果互相不一致，这可能是由于各调查地点的地质条件不同。

在进行测量的三个钻孔中，在 50 至 400 米的深度范围内每隔 50 米作 15 分钟的地震噪声取样记录。同时安装在地面的仪器也对噪声加以记录。对抽样记录的噪声计算功率谱并将三个地点的结果加以比较，在相同深度的记录中没有发现

重大区别。如所预料的，噪声振幅随深度的增加而减小。在400米的深度，10赫兹的衰减与地面相比为-40分贝。噪声与深度成反比的更详细的情况见图2的例子。

在300米深度的噪声级传出的地方震震级相当于震中距为100公里时 $ML = 1.9 \pm 0.5$ 的地震。假设信号振幅为平均噪声振幅的两倍，则对该值加上0.3单位就可容易地得出检测阈值。因此，在震中距为200、300及500公里时，在井下300米的台站预计能检测地方震震级各为2.7、3.2及3.9的地震事件。如果信一噪比增加的程度与噪声级减小的程度相等，则地面台站的相应的值将约高1.4个震级单位。

此处应补充指出，台站的检测能力一般是以体波震级 m_b 来估算的，这是对远震范围中地震事件的强度的量度。但是对于局部和区域震中距，只确立了基于面波的地方震震级。震级的这两种单位不相一致，因此不可能直接将 ML 与 m_b 相比较。但是NUTTLI（1973年）报告了一种经修改的地方震震级，叫作 m_{blg} ，可在能获得适当的区域衰减函数的情况下，用于将远震 m_b ； M_s 的关系扩大至 $m_b = 3.0$ 。

在测量噪声所获结果的基础上提出了局部井下网的设想。这个台网最后的形式是将五个台站排列成五角形，并在中心另设一个台站。这6个地震检波器安置在300米的深度。这个网计划覆盖 20×20 公里的面积，所以各台站之间的平均距离为10公里。

图3的地图表示地震检波器的布局。在中央的台站设有3分向装置，其余的台站配有垂直方向仪器。各个台站都装有固有频率为1赫兹的短周期MARK L4仪器。网内记录系统则采用现代化的微型信息处理机组件。

图4的方框图表示井下台站数据获取系统的组成。地震检波器的结果以120赫兹的频率取样。12-比特的模拟-数字转换器具66dB的分辨率。增益变化范围提供的动态范围为120dB。使用“低功率”组件，一个台站可依靠电池运转近4个月的时间。各台站的数字数据直接通过2400波特的商业电话线传送至靠近地震台网中心台站的记录中心。

这个中央记录系统的主要目的是控制地震台网并使其同步、从井下台站收集数据、检测地震事件并将其暂时储存于磁盘内。图5表示这种新发展起来的多个微

处理机系统的方框图。记录的数据每日一次或在需要时根据要求通过4800波特的数据线输往汉诺威的BGR（联邦地球科学和自然资源研究所）的地震数据分析中心。在原则上该系统能通过遍布全球的这些电信渠道传播记录的事件。如国际电信卫星系统这样的现代卫星系统的能力甚至可以作联机传输。

总的来说，这个地震台网标志着我国地震记录系统的最新技术发展阶段。在该系统开始运转后，立即进行了一次实验以确定得自井下仪器的信噪比与地面站相比较的增量。在中心井下台站的地面附近为此目的增设了一个垂直地震检波器。图6表示这些仪器的典型记录，两项记录的放大倍数相同。仅在井下地震检波器的记录中发现的地震信号（下面一条迹线）是由距仪器位置10公里处的一次0.002吨（2公斤）TNT能量级的炸药爆炸产生的。

图7进一步证明高噪声地区井下地震检波器的良好性能这些信号是从千岛群岛爆发的一次震级为 $m_b 5.2$ （GRF）的遥震事件录得的。上面两条迹线是通过两个GRF台阵站的宽频带地震检波器结果加以适当滤波获得的模拟的短周期世界标准化地震仪网（WWSSN）记录。选择的渠道代表得自台阵的对于信噪比来说最好和最差的记录。另外，该图包括对地面和井下地震检波器按20赫兹重新取样的经过低通滤波的结果。如在前例中一样，地面地震检波器记录的信号在时间上和频率上都不能与噪音区分开。遗憾的是，在实验期间没有足够强的远震或区域事件以使能从数量上确定地面渠道和井下渠道之间信噪比的改进。但是，与GRF的记录的比较表明，井下的地震检波器的检测阈值和GRF台阵中某些台站的阈值一样低。这是很有希望的结果，因为这个台阵仍是我国最灵敏的地震记录仪器。

在试验性的测量期间两种渠道观测到的唯一的信号都是来自局部地震。在图8所示的例子中，应用于井下和地面仪器的结果的定标因素之间的比是5。考虑到不同的放大倍数，井下记录的信号振幅较低，但是第一个初动不象地面迹线那样被噪声所覆盖。当对信号初动之前和之后的0.5秒的时间间隔加以分析时，井下仪器得到的信噪比提高0.5个震级单位。

在地震台网运转的最初阶段获得的结果表明在地震噪声条件不利的地区，可通过在井下安装地震检波器来提高检测能力。为完成这一项目，研究要继续进行以获得关于这个网的临界震级的更多的资料，尤其是局部和区域地震信号方面的临界

震级的资料。

除最近在地震记录设施方面的技术进步的成份外，将井下仪器的概念纳入全球台网未来的先进模式无疑是应加以考虑的重要之点。就上面叙述的地震台网的技术而论，这个设计来进行无人操作和自动分析的系统，可被用作由国际数据中心控制的“黑盒”。可通过现代电信渠道获取数据。由于只在维护或修理时需要人的介入，所以就有可能在地震参数提取方面消除主观的因素。这可以在国际数据中心按商定的程序办到。这是现代技术为未来的全球台网的运转提供的-一个主要前景。

4. 结论

当地震专家小组在1978年编制第一份报告CCD/558号文件时，对两种不同类型的全球台网的检测和定位能力作了定量的估计的。第一个系统称作地震台网I，由现有的地震台站组成。第二个系统，地震台网III（SRO）提出了一个设想的数字台网，由采取SRO的标准的台站组成。这时第三份报告的编制工作已完成。其中载有关于许多国家在地震台站和地震台网方面的成就的重要消息。从过去5年来的发展情况来看，地震台网III（SRO）已部分地从假想的系统变成了运转着的系统。但是尽管如本文所指出的这样一个先进台网的技术成份已经能够获得，地震专家小组却尚未为未来的地震台网规划新的远景。我们认为有必要尽早地以目前的技术发展阶段为标准制定出全球系统的新模型，并对这个台网的检测和定位能力作定量的估计以便表现出以今天的地震技术监测未来的全面禁试公约的有效性。

参考书目

- Bath, M.: Underground measurements of short-period seismic noise. - *Annali di Geofisica*, 19, no. 1, 107-117, 1966.
- Douze, E.J.: Signal and noise in deep wells. - *Geophysics*, Vol. 24, 721-732, 1964.
- Ferber, R.: Robust detection of earthquake signals. - In *Signal Processing II: Theories and Applications*, H.W. Schüssler (ed.), Elsevier, 685-687, 1983.
- Hanka, W.: Analysis of broadband Rayleigh waves: A possibility for seismic discrimination. - *J. Geophys.*, 51, 165-179, 1982.
- Hannon, W.J.: Seismic verification of a Comprehensive Test Ban. - *Energy and Techn. Rev., Lawr. Liv. Nat. Lab.*, 50-65, May 1983.
- Harjes, H.-P.: Spectral interpretation of seismic measurements. - *Geol. Jb.*, E17, 1979 (Germ. text with engl. abstr.).
- Harwardt, H.: Mikroseismikbeobachtungen in einer norddeutschen Tiefbohrung. - *Obs. Roy. Belgique, Comm. Ser. A-13, Nr. 101* (1971). *Assemblée Generale de la Comm. Seism. Europ.*, Luxemburg 21-29 Sept., 1970.
- Nuttli, O.W.: Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America. - *J. Geophys. Res.* 78, 876-885, 1973.
- Raekers, E., Müller, G.: The Romanian Earthquake of March 4, 1977 - III. Improved focal model and moment determination. - *J. Geophys.*, 50, 143-150, 1982.
- Seidl, D.: The simulation problem for broadband seismograms. - *J. Geophys.*, 48, 84-93, 1979.

Seidl, D., Berckhemer, H.: Determination of source moment and radiated seismic energy from broadband recordings. -

Stammler, W.: Application of prediction error filters for the detection of weak seismic events. -

IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, GE-19, no. 4, 222-230, 1981.

Stammler, W.: Design of matched filters and relevant frequency selective filters for the detection of teleseismic events. -

IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing, GE-21, no. 2, 133-140, 1983.

Takano, K., Hagiwara, H.: Preliminary observation of microearthquakes with a deep well seismometer. -

Bul. Earthq. Res. Inst., 44, 1135-1148, 1966.

NETWORK III

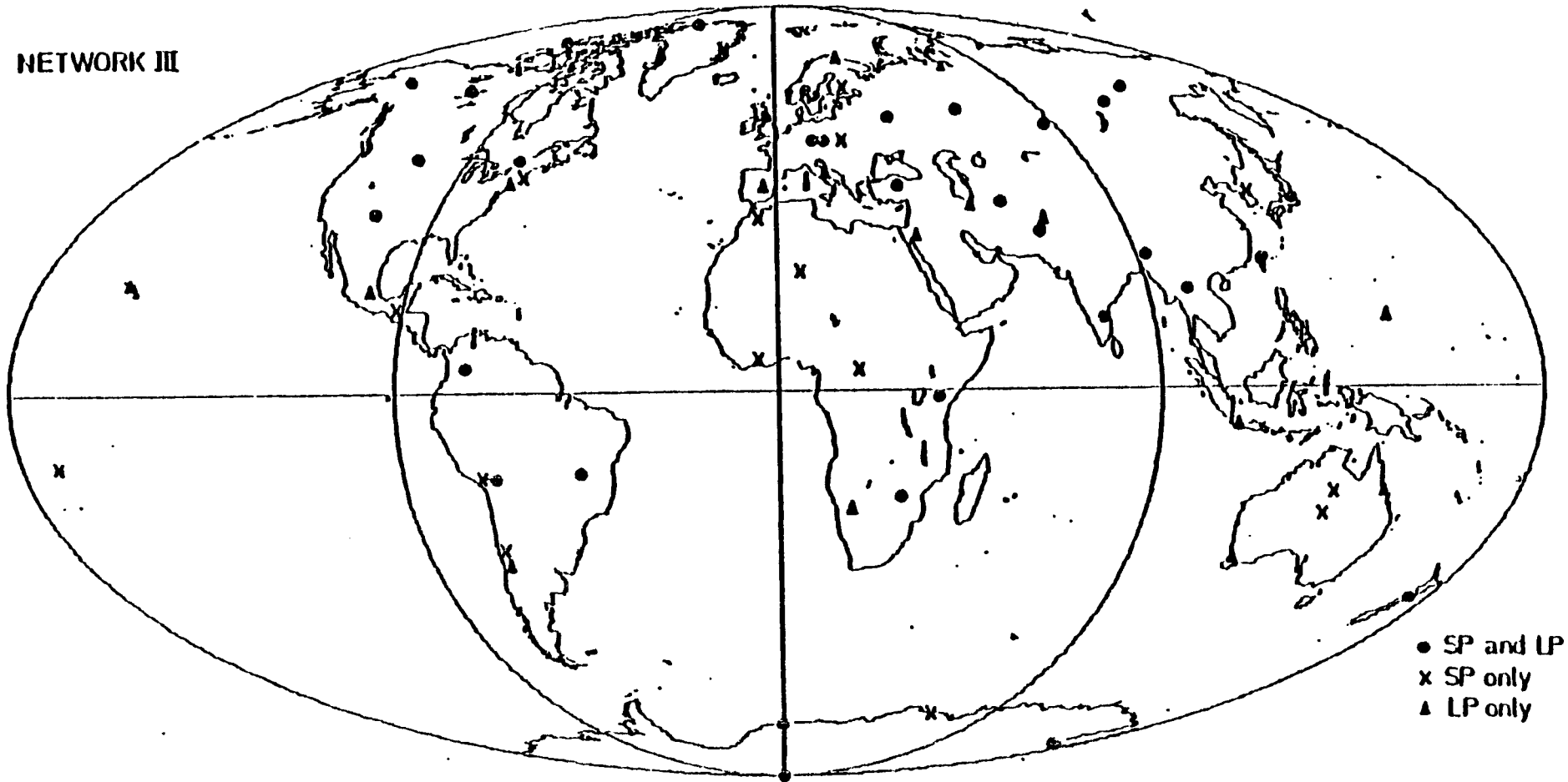


Fig. 1 : Map showing the location of stations in Network III and Network III (SRO) (CCD/558)

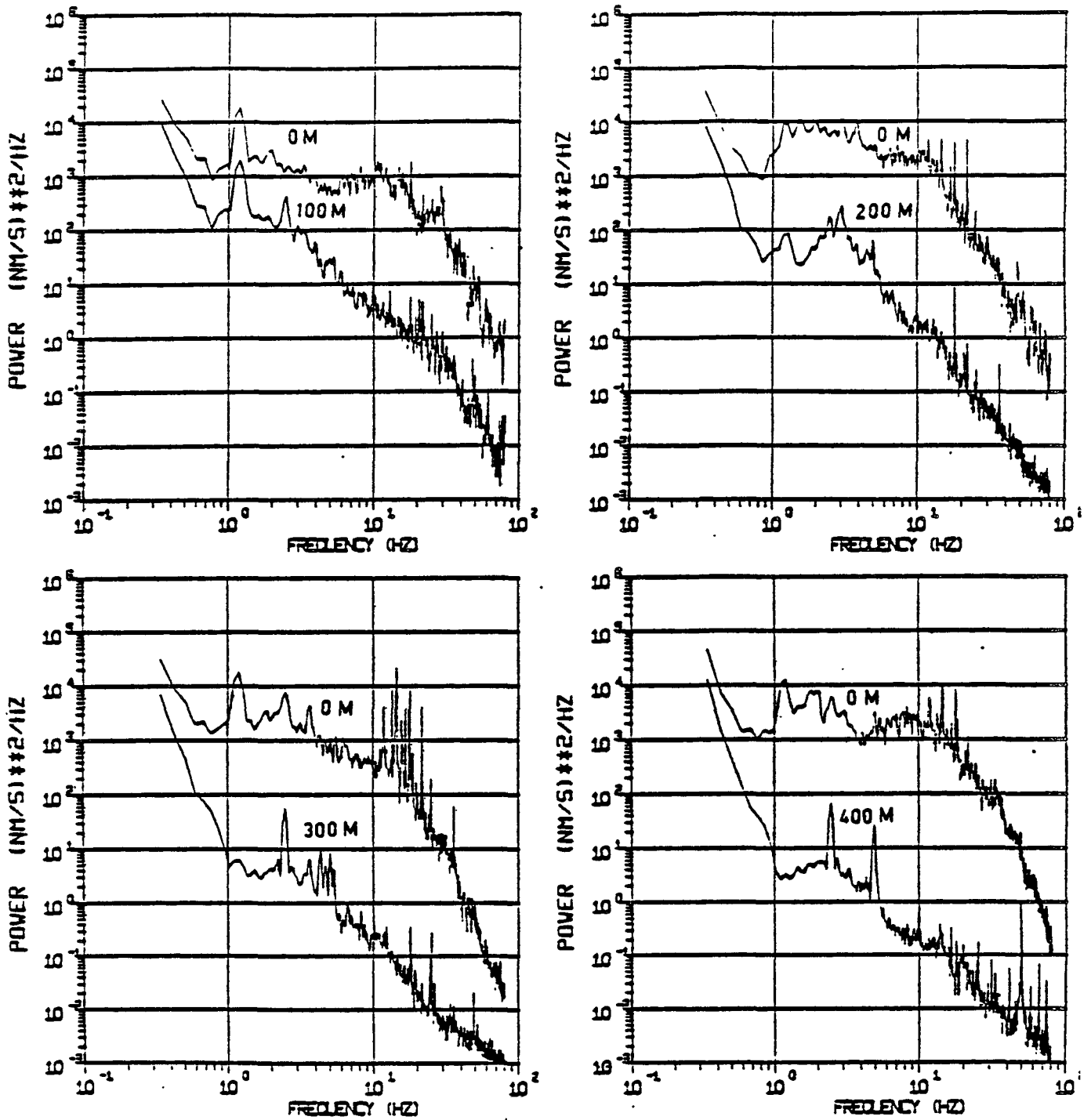


Fig. 2: Power density spectra of seismic noise recorded on the surface and in a borehole at a depth of 100, 200, 300 and 400 m

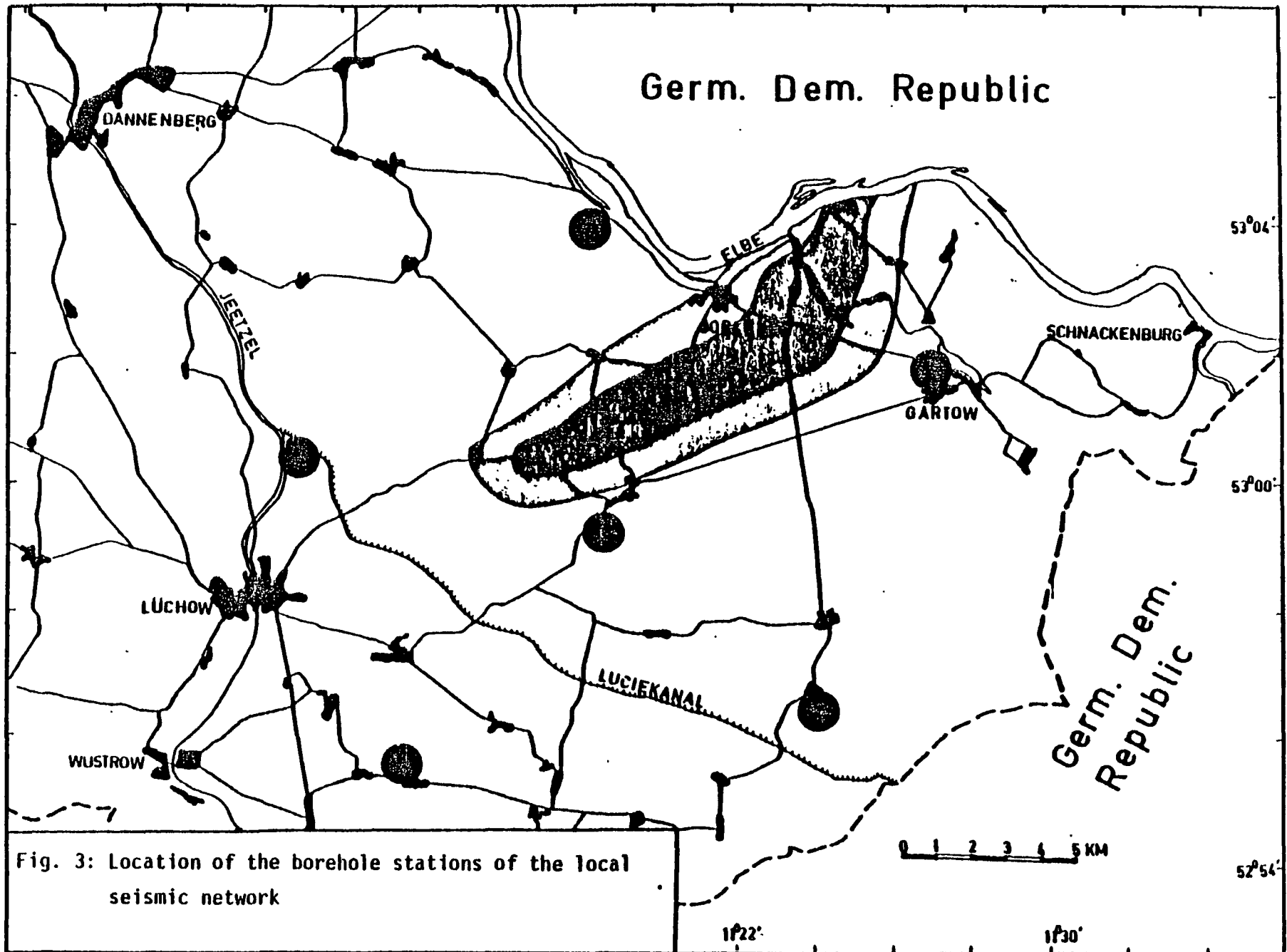


Fig. 3: Location of the borehole stations of the local seismic network

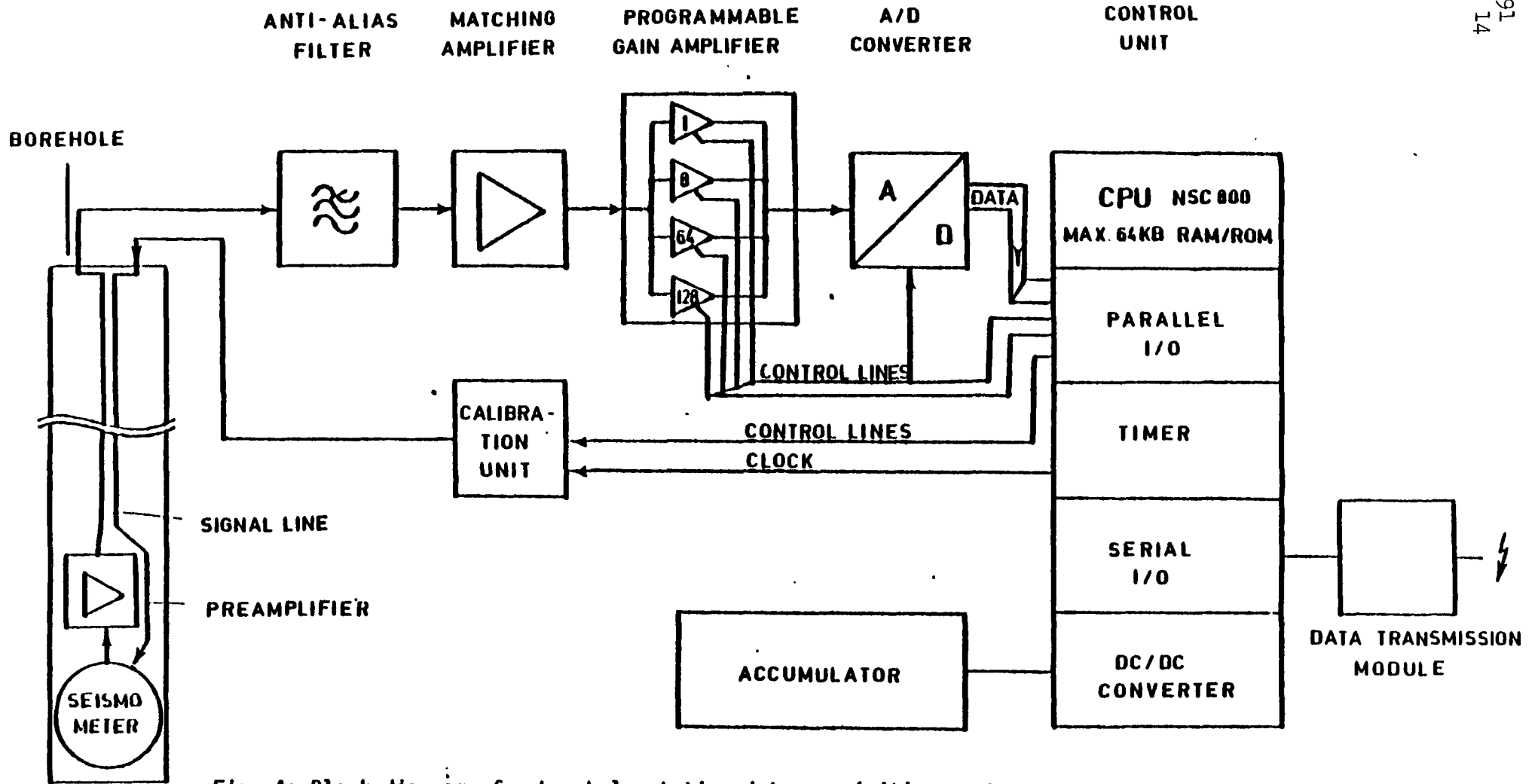
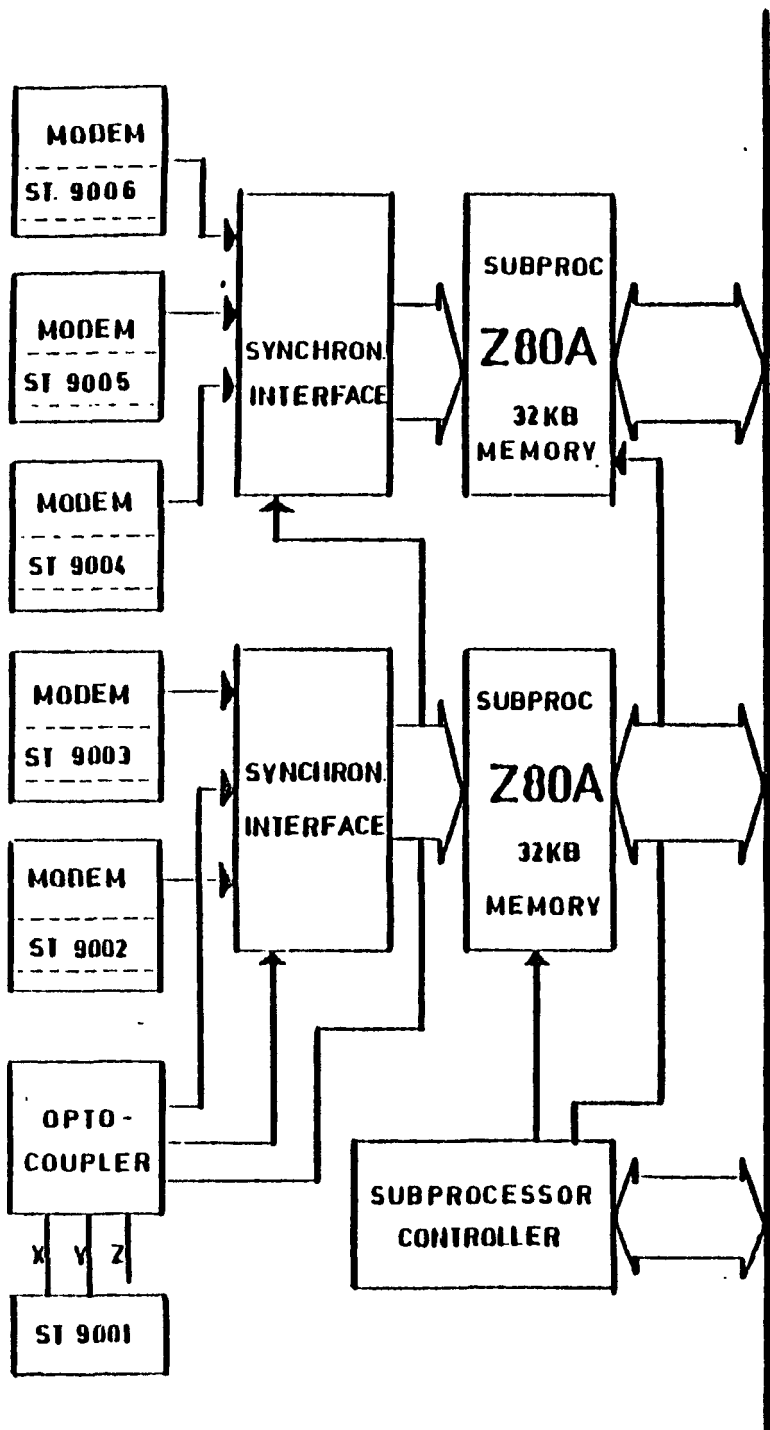


Fig. 4: Block diagram of a borehole station data acquisition system



SYSTEM BUS

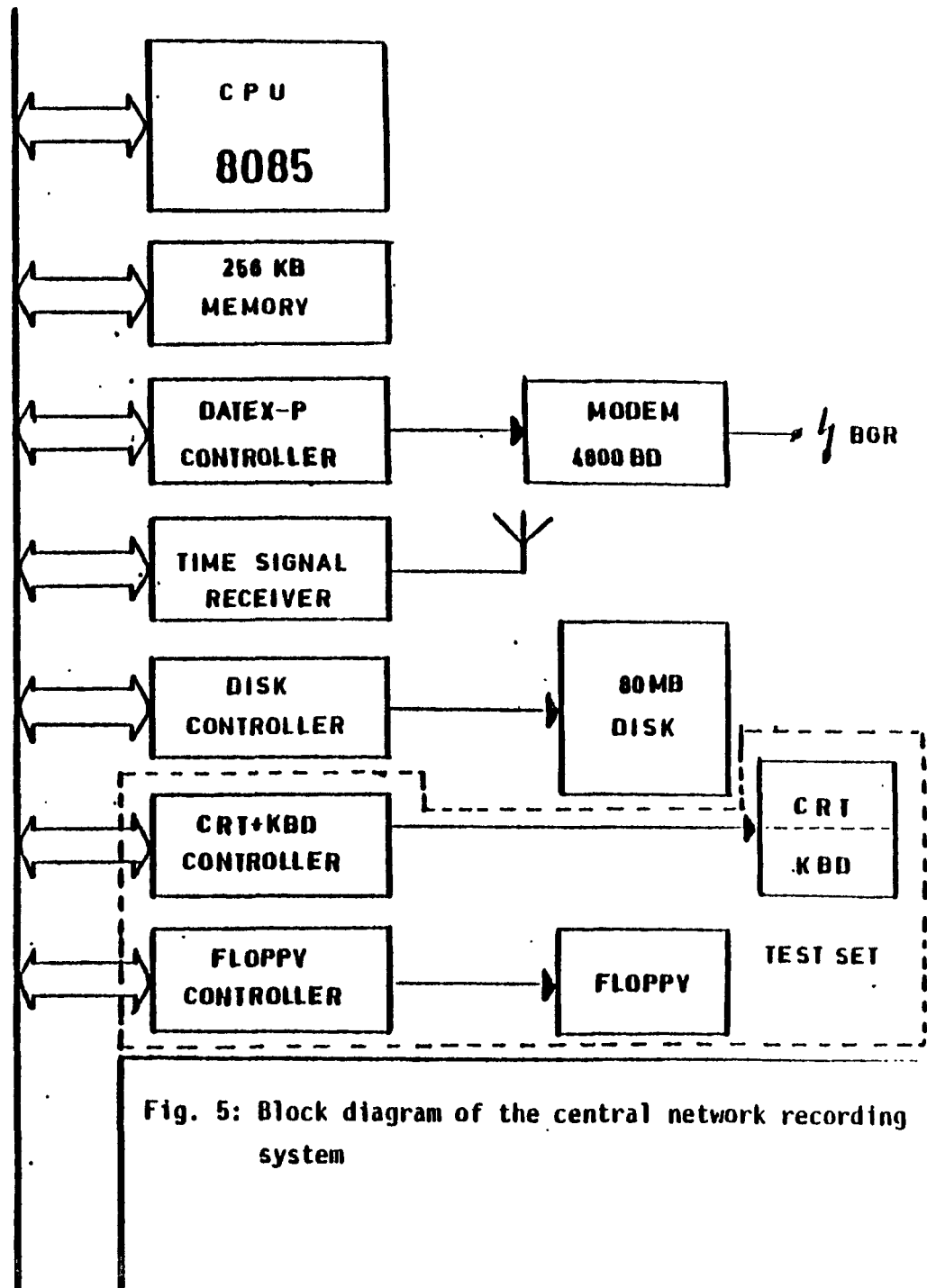
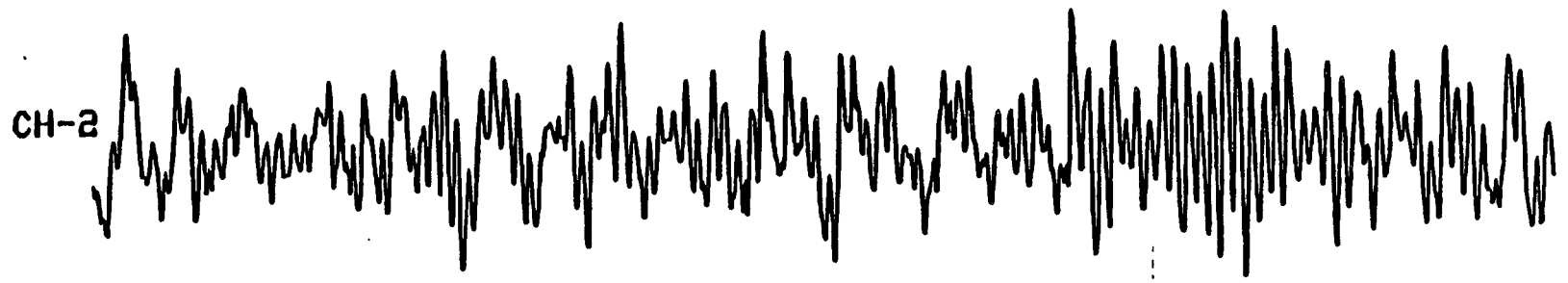
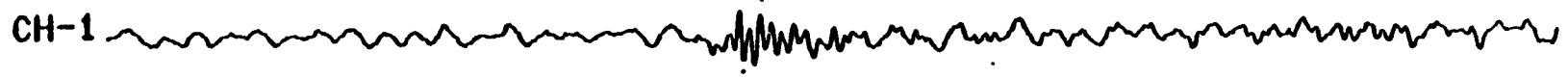


Fig. 5: Block diagram of the central network recording system

surface



downhole



16. 3.20 16. 3.21 16. 3.22 16. 3.23 16. 3.24 16. 3.25 16. 3.26 16. 3.27

Fig. 6: Seismograms of a 2 kg explosion 10 km from the center borehole station of the local network recorded with MARK L4 vertical seismometers installed downhole and at the surface

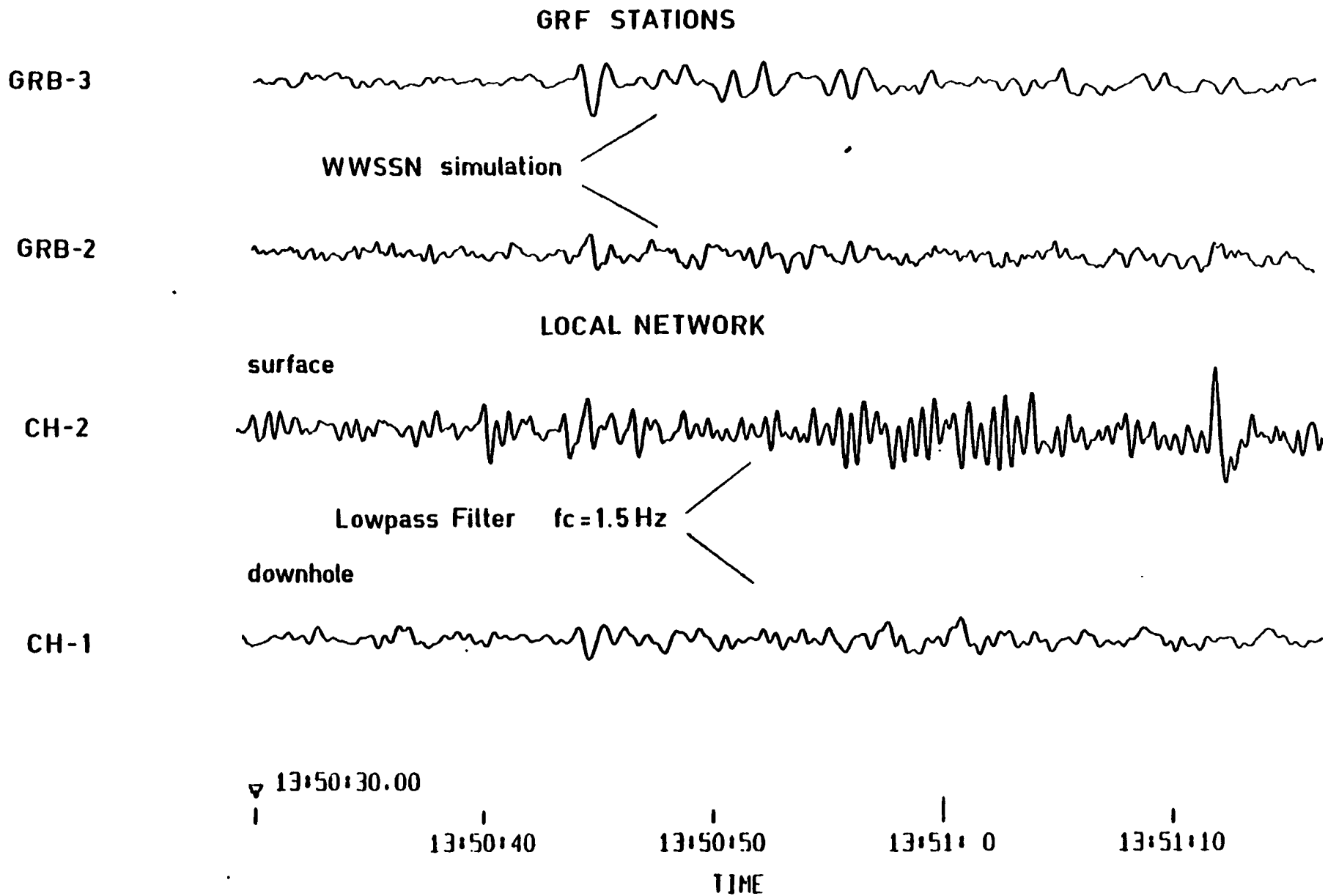


Fig. 7: Seismograms of a Kurile Islands event ($m_b = 5.2$) recorded at two stations of the GRF array and at the center station of the local network with seismometers installed downhole and at the surface

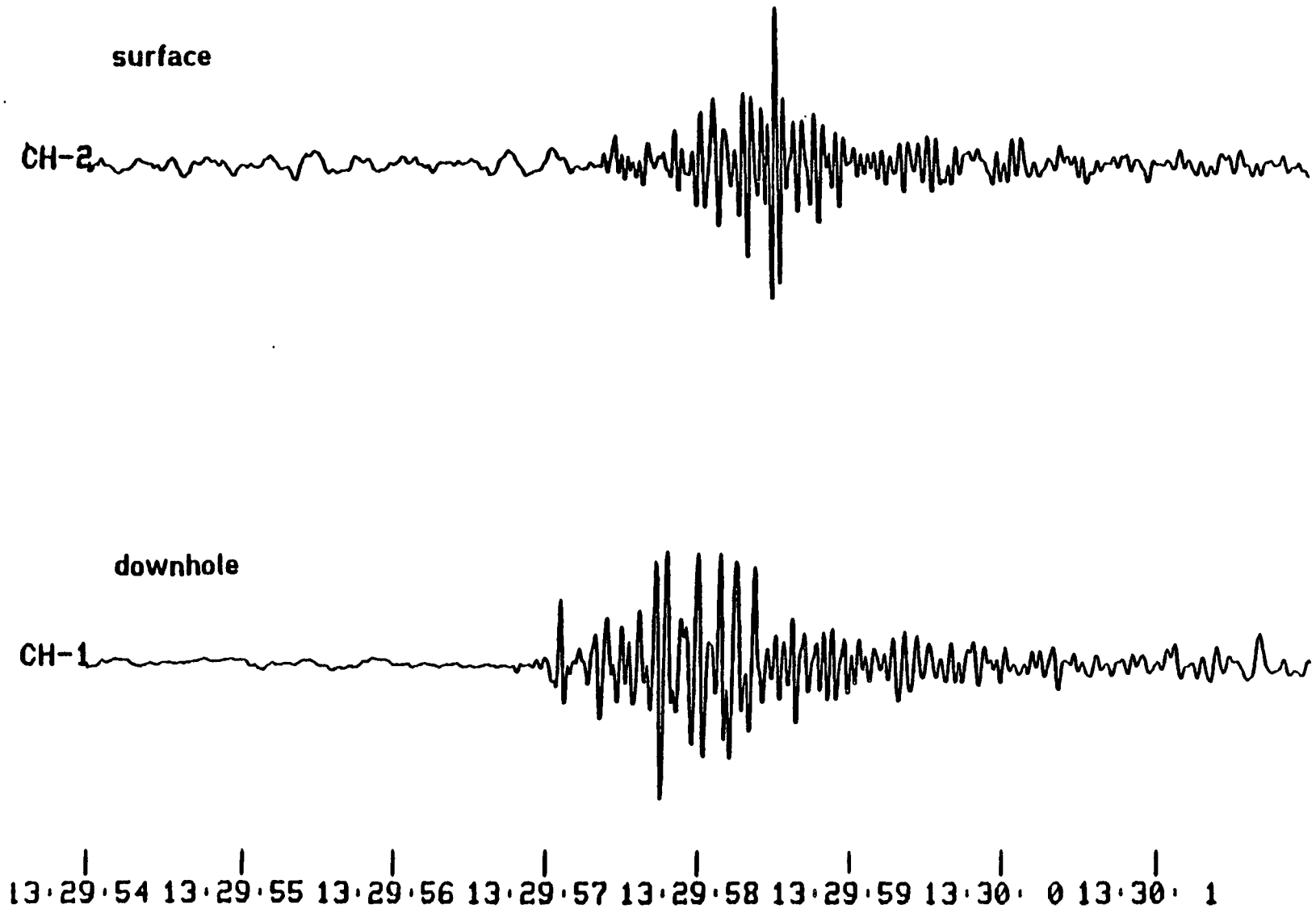


Fig. 8: Local shock recorded at the center station of the local network with seismometers installed downhole and at the surface