

## REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE

Document de travailAspects de la modernisation des techniques d'enregistrement  
des événements sismiquesRésumé

D'importants progrès ont été signalés dans les techniques d'enregistrement des événements sismiques depuis 1978, date à laquelle le Groupe d'experts sismologiques a établi son premier rapport (CCD/558) pour le Comité du désarmement. Le présent document passe en revue plus spécialement les progrès des cinq dernières années dont on considère qu'ils améliorent la capacité de détection et de localisation d'un réseau sismologique mondial. Le modèle le plus avancé d'un tel système présenté dans le CCD/558 était appelé Réseau III (SRO). On estimait que ce système hypothétique était capable de détecter avec une probabilité de 90 %, des événements sismiques d'une magnitude déduite des ondes de volume mb allant de 3,8 à 4,2 dans l'hémisphère Nord et de 4,0 à 4,6 dans l'hémisphère Sud. Grâce aux progrès de l'instrumentation, de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications, le Réseau III représente un concept non plus hypothétique, mais concret. En ce qui concerne la capacité de détection, on considère que les progrès qui suivent formeront les principaux éléments d'un futur réseau mondial :

- Des systèmes d'acquisition de données à haute performance consistant en sismomètres à large bande et à résolution et sensibilité élevées, combinés à de puissants convertisseurs analogique-numérique de 22 bits, restituent toute l'information contenue dans les signaux sismiques sans perte de précision.
- Des sismomètres de fond océanique installés dans des forages au fond de l'océan promettent de combler l'écart, en ce qui concerne la capacité de détection, entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud.
- Des systèmes d'enregistrement sismologique faisant appel à des techniques "basse puissance" peuvent être utilisés pour une configuration optimale d'un réseau mondial, du fait que la puissance électrique nécessaire à une exploitation à long terme peut provenir de batteries ou de panneaux solaires.
- Les systèmes à satellites se sont révélés fiables et efficaces pour une transmission en ligne de données sismologiques numériques de haute qualité à partir de n'importe quel endroit du globe.

- La détection, la localisation et l'identification d'événements sismiques à l'échelle locale ou régionale peuvent être améliorées considérablement en déployant de petites stations complexes au lieu de stations simples.
- Le coût des systèmes d'enregistrement et de traitement numériques des signaux sismiques a diminué grâce à la technologie des microprocesseurs et est même inférieur à celui des systèmes analogiques.

Dans ce contexte, un autre aspect est la possibilité d'améliorer la capacité de détection des stations sismologiques dans les régions où les conditions de bruit sont défavorables, en installant les sismomètres dans des forages. Les premiers résultats obtenus avec un nouveau réseau local constitué de six stations en forage dans le nord de la République fédérale d'Allemagne, dans une région couverte d'épais sédiments alluviaux, montrent que le seuil de détection des appareils en fond de forage est aussi bas que celui de certains éléments de la station complexe GRF, qui est encore le réseau le plus sensible dans notre pays. Selon ces premiers résultats, le concept de stations en forage dans des installations complexes faisant partie d'un réseau mondial promet une surveillance efficace des événements régionaux et locaux dans les zones potentiellement intéressantes. La technologie que ce nouveau réseau numérique utiliserait représente la phase la plus récente dans le développement des systèmes d'enregistrement à des fins sismologiques dans notre pays. Elle pourrait aussi être utilisée pour un système du type "boîte noire" dans un futur système mondial, grâce à un degré élevé d'automatisation de l'enregistrement et de l'analyse des données sismologiques.

Les progrès de la technologie ces cinq dernières années ont amélioré la qualité de l'enregistrement, de la transmission, du traitement et de l'analyse des données sismologiques. De ce fait, un nouveau concept amélioré de réseau mondial devrait être élaboré pour démontrer l'efficacité des méthodes sismologiques modernes de surveillance d'une future interdiction complète des essais nucléaires.

## 1. Introduction

Ces dernières années, un nombre croissant de pays ont signalé des capacités techniques améliorées en matière d'instrumentation sismologique servant à l'enregistrement des séismes. Cette évolution a été fortement influencée par des progrès réalisés dans les domaines de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications.

Une ère nouvelle en sismologie a commencé avec la conversion des signaux sismiques enregistrés du format analogique au format numérique. Cela a permis d'utiliser des ordinateurs très rapides pour traiter et analyser les sismogrammes. C'est vers le milieu des années 60 que les techniques numériques ont été appliquées pour la première fois à grande échelle, avec l'entrée en service de la station complexe à grande ouverture LASA au Montana (Etats-Unis). Depuis lors, divers pays ont mis au point et installé des systèmes numériques pour enregistrer et analyser des données sismologiques.

Dans notre pays la "sismologie numérique" remonte au début des années 1970, époque à laquelle a été entrepris le projet de la station complexe numérique à large bande de Graefenberg (GRF). Le but de ce concept était de mettre à la disposition de la recherche sismologique un instrument qui utiliserait l'intégralité de l'information contenue dans les signaux sismiques, en faisant appel à l'enregistrement sur large bande combiné aux possibilités d'une station complexe. A cause de diverses exigences concernant la résolution, la dynamique, la qualité des données et la souplesse, il a

fallu utiliser pour le système des composants numériques. L'installation de 13 stations complexes comportant un total de 19 appareils à large bande a été achevée au début de 1980. Les possibilités du système ont pu être présentées au Groupe d'experts sismologues à une réunion de travail qui s'est tenue en juillet 1980 (voir GSE/FRG/7). Les données de haute qualité fournies par la station GRF ont été largement utilisées pour étudier une grande diversité de problèmes sismologiques (SEIDL et BERCKHEMER, 1982; RAEKERS et MÜLLER, 1982). En outre, plusieurs études ont permis d'établir que les données provenant d'une station complexe à large bande peuvent faire l'objet d'un filtrage optimal à des fins de détection (SEIDL, 1979; STAMMLER, 1981, FERBER, 1983) et mis en lumière de nouvelles possibilités pour identifier des événements sismiques (HARJES, 1979; HANKA, 1982).

Aujourd'hui, le système Graefenberg ne représente plus la toute dernière norme technologique, mais grâce à la qualité des sismogrammes enregistrés en ce qui concerne la largeur de bande, la résolution et la dynamique, il convient encore de le compter au nombre des systèmes enregistreurs à haute performance actuellement en service.

A l'échelle mondiale, les stations SRO (observatoires de recherche sismologique) appartiennent à la même catégorie que le système GRF du point de vue des normes techniques, de la qualité des données et de la capacité d'enregistrement. Chacune de ces 13 stations, qui sont actuellement exploitées dans divers pays autour du globe, est équipée d'un ensemble de sismomètres à large bande à trois composants. Les signaux des capteurs sont filtrés pour produire à la sortie des données de longue période et de courte période. Le système enregistre en continu les trois canaux de données de longue période, avec un échantillonnage toutes les secondes, alors que les données de courte période de la composante verticale, qui sont numérisées 20 fois par seconde, ne sont enregistrées que lorsqu'un événement est détecté.

Les sismomètres des stations SRO sont encore les seuls appareils à large bande exploités dans des forages. Comme ces sismomètres sont installés à une profondeur d'environ 100 m, les enregistrements longue période sont moins affectés par le bruit causé par le vent que ceux provenant de sismomètres classiques voisins de la surface. Comme l'une des stations SRO ne se trouve qu'à 50 m d'une station à trois composants de l'ensemble GRF, il est possible de comparer directement la capacité d'enregistrement des deux systèmes. Il n'est pas surprenant de constater que, suivant les conditions de vent, les stations SRO installées dans des forages ont un niveau de bruit moindre dans la bande des longues périodes, en particulier pour les composantes horizontales. Par ailleurs, il serait souhaitable à bien des égards d'enregistrer les sorties du sismomètre à large bande au lieu des signaux filtrés de courte et longue période. Les deux systèmes peuvent être considérés comme optimaux si l'on tient compte des différents objectifs pour lesquels ils ont été mis au point et de la technologie dont on disposait au moment où ils ont été conçus.

## 2. Progrès techniques récents

Le Groupe d'experts sismologues a présenté, dans son premier rapport (CCD/558) soumis au Comité du désarmement en mars 1978, quatre exemples de réseaux mondiaux possibles pour surveiller une interdiction complète des essais nucléaires. Le système le plus perfectionné, appelé Réseau III (SRO), devait être constitué de stations sismographiques de haute qualité du type SRO. La figure 1 représente la répartition mondiale des stations telle qu'elle figure dans le rapport CCD/558.

La capacité de détection des événements sismiques de ce réseau avec une probabilité de 90 % a été estimée comme se situant entre 3,8 et 4,2 mb dans l'hémisphère Nord et entre 4,0 et 4,6 mb dans l'hémisphère Sud. La répartition des stations du Réseau III coïncide assez bien avec les stations sismographiques existantes, mais elle est loin d'être optimale en ce qui concerne la capacité de détection. Pour obtenir de nouvelles améliorations, il faudrait :

- accroître le nombre de stations sismographiques, en particulier dans l'hémisphère Sud;
- installer dans des forages de nouvelles stations sismographiques de fond océanique;
- optimiser la répartition des stations en ce qui concerne la capacité de détection;
- installer des stations complexes au lieu de stations simples dans et autour des zones potentiellement intéressantes;
- installer les sismomètres des stations simples ou complexes dans des forages ou des mines pour obtenir des conditions de bruit optimales.

Des études de capacité sur des modèles contenant certains de ces éléments ont été effectuées par HANNON (1983); ces études indiquent la mesure dans laquelle les résultats consignés dans le document CCD/558 peuvent être améliorés. En outre, les exigences technologiques relatives à un réseau mondial englobant tous les aspects mentionnés viennent tout juste d'être satisfaites au cours des dernières années. Les principaux facteurs et éléments nouveaux dont il faut tenir compte en concevant un futur réseau mondial et en évaluant ses possibilités sont exposés dans les paragraphes ci-après :

1. Les nouveaux systèmes d'acquisition de données sismologiques, particulièrement les sismomètres et les convertisseurs analogique-numérique, ont une résolution et une sensibilité améliorées. Des sismomètres tels que le TG 44000 peuvent être exploités à l'endroit le plus calme et ne sont plus limités dans leur résolution par les parasites électroniques. La combinaison d'un tel appareil avec un nouveau convertisseur analogique-numérique de 22 bits que les Etats-Unis mettent actuellement au point permettra d'enregistrer la sortie large bande avec la même précision que par l'enregistrement multibande actuellement utilisé.
2. Des améliorations importantes ont été réalisées sur les sismomètres de fond océanique depuis qu'un système à large bande à trois composants a été déployé par les Etats-Unis dans un forage au fond de l'océan. Le niveau de bruit ambiant est considérablement réduit lorsqu'on utilise cette technologie. Avec de tels systèmes, la capacité de détection dans les régions côtières et insulaires peut être encore améliorée, particulièrement dans l'hémisphère Sud.
3. Les nouveaux modules "basse puissance" à microprocesseur (CMOS) ont une consommation d'énergie extrêmement faible. Les stations sismologiques utilisant cette technologie peuvent être placées presque n'importe où, car l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement à long terme peut provenir de batteries ou de panneaux solaires. Il est possible d'optimiser le site des stations d'un réseau de ce type en fonction des tâches pour lesquelles le réseau est conçu.

4. L'utilisation efficace et fiable des systèmes à satellites pour la transmission de données sismologiques de haute qualité sur plusieurs milliers de kilomètres a été démontrée par le "Regional Seismic Test Network" (RSTN) des Etats-Unis. L'intégration dans ce système de techniques de micro-processeur et de télécommunication marque une nouvelle étape dans l'évolution des installations d'enregistrement sismologique. Cette technologie peut être considérée comme une norme pour un système mondial futur.
  5. On a obtenu des résultats encourageants en matière de détection, d'identification et de localisation d'événements locaux et régionaux au moyen d'une station sismologique complexe de faible ouverture, encore appelée "mini-station complexe" (NORESS), actuellement exploitée par la Norvège. Des systèmes comme celui-ci, combinés avec des stations à large bande du type RSTN, pourraient devenir les principaux éléments d'un Réseau IV.
  6. Le coût des systèmes d'enregistrement numérique et d'analyse a été considérablement réduit par la technologie des microprocesseurs. Même des institutions ne disposant que de petits budgets pourront maintenant se permettre de posséder des stations sismographiques numériques de haute qualité. Des systèmes à bas prix sont offerts commercialement pour des applications diverses et il n'est donc plus nécessaire d'exploiter des stations analogiques dans un système mondial futur.
3. Nouvelles installations sismologiques en République fédérale d'Allemagne

Un aspect qu'il faut envisager, vu son importance pour la capacité d'un système mondial, concerne l'amélioration du rapport signal/bruit apportée par l'installation de sismomètres dans des forages à plusieurs centaines de mètres de profondeur, ou éventuellement dans des mines abandonnées. Dans les pays à forte densité démographique et industrielle ou à circulation intense, l'une des principales difficultés rencontrées pour pouvoir enregistrer des signaux sismiques avec une grande sensibilité consiste à trouver un emplacement non perturbé pour y implanter la station sismographique. Ce problème du bruit sismique élevé se pose également dans les zones éloignées couvertes d'épaisses couches de sédiments. Dans ces zones, le concept des forages permet d'améliorer la capacité de détection d'une station sismologique. Les premiers résultats d'un nouveau réseau sismologique local numérique de stations installées dans des forages, réalisé récemment dans le nord de l'Allemagne (Basse-Saxe), dans une région complètement recouverte de sédiments alluviaux épais, montrent dans quelle mesure ces espoirs pourraient se concrétiser.

Ce réseau sismologique local a été créé au titre d'un projet lancé en 1981 dans le cadre d'un programme général de recherche géologique et géophysique visant à déterminer si un diapir de sel pourrait être utilisé pour l'entreposage de déchets fortement radioactifs. La sismicité du site surveillé par un réseau local devrait fournir des renseignements sur d'éventuelles zones tectoniques actives dans cette région. Le principal obstacle à l'enregistrement des petits séismes locaux de magnitude aussi faible que  $ML = 0$  était le niveau élevé de bruit sismique. Les amplitudes de bruit mesurées à la surface équivalaient à un séisme de magnitude locale  $ML = 3,3$  en prenant pour hypothèse une distance épacentrale de 100 km.

Pour préciser la diminution des amplitudes de bruit en fonction de la profondeur dans trois forages différents, des mesures de bruit de courte période ont été effectuées à l'aide d'une sonde sismométrique spéciale. Ainsi qu'il ressort des publications de plusieurs auteurs (DOUZE, 1964; BATH, 1966; TAKANO et HAGIWARA, 1966; HARWARD, 1970), le comportement du bruit en fonction de la profondeur suit une tendance générale.

Les amplitudes diminuent quand la fréquence et la profondeur augmentent. Mais il est apparu que les résultats étaient incompatibles entre eux, probablement en raison des différences de conditions géologiques entre les sites examinés. Dans les trois forages utilisés pour les mesures, des échantillons de bruit sismique ont été enregistrés entre 50 et 400 m, par intervalles de 50 m, sur une durée d'environ 15 minutes à chaque niveau. En même temps, on a enregistré le bruit au moyen d'un appareil installé à la surface. En calculant le spectre de puissance des échantillons enregistrés et en comparant les résultats obtenus sur ces trois sites, on n'a constaté aucune différence importante entre les enregistrements effectués à une même profondeur. Comme prévu, les amplitudes de bruit ont diminué au fur et à mesure que la profondeur augmentait. A 400 m, cet affaiblissement, pour une fréquence de 10 Hz, s'est élevé à - 40 dB par rapport à la surface. L'exemple fourni sur la figure 2 donne des détails supplémentaires sur le comportement en fonction de la profondeur.

La magnitude locale équivalente obtenue à partir du niveau de bruit à une profondeur de 300 m correspond à un séisme de  $ML = 1,9 \pm 0,5$  en prenant pour hypothèse une distance épacentrale de 100 km. Le seuil de détection peut facilement être calculé à partir de cette valeur en lui ajoutant 0,3 unité, en admettant que l'amplitude du signal est deux fois plus élevée que les amplitudes moyennes de bruit. En conséquence, à des distances de 200, 300 et 500 km de l'épicentre, une station installée à 300 m en fond de forage devrait pouvoir détecter des événements sismiques de magnitude locale égale, respectivement, à 2,7, 3,2 et 3,9. Les valeurs correspondantes pour une station en surface seraient plus élevées d'environ 1,4 unité de magnitude, en admettant que le rapport signal/bruit augmente dans la même proportion que le niveau de bruit diminue.

Dans ce contexte, il faudrait ajouter que les capacités de détection d'une station sont généralement évaluées en termes de magnitude de l'onde de volume  $m_b$ , qui mesure la force d'un événement sismique dans la gamme télé-sismique. Mais à des distances épacentrales ne dépassant pas le niveau local ou régional, on ne connaît que la magnitude locale  $ML$ , obtenue à partir des ondes de surface. Ces deux échelles de magnitude sont incompatibles entre elles et il n'est donc pas possible de comparer directement  $ML$  et  $m_b$ . Cependant, NUTTLI (1973) a fait état d'une magnitude locale modifiée, désignée par  $m_{bLg}$ , qui peut servir à ramener le rapport télé-sismique  $m_b:M_s$  à  $m_b = 3,0$ , si l'on dispose de fonctions d'affaiblissement régional appropriées.

Le concept d'un réseau de forages local a été élaboré sur la base des résultats obtenus à partir des mesures de bruit. Dans la version définitive de ce réseau, cinq stations ont été installées au centre d'un pentagone, avec une station supplémentaire au centre. Ces six sismomètres ont été installés à 300 m de profondeur. Le réseau a été conçu de façon à couvrir une zone de 20 x 20 km, de telle sorte que la distance moyenne entre stations soit de l'ordre de 10 km.

La carte de la figure 3 montre l'emplacement des sites de sismomètres. La station centrale comporte un ensemble à trois composants, tandis que les autres stations sont équipées d'appareils verticaux. Toutes les stations disposent d'appareils MARK L4, de courte période, avec une fréquence naturelle de 1 Hz. Le système d'enregistrement du réseau est équipé de modules à microprocesseurs modernes.

Le schéma de la figure 4 montre les éléments du système d'acquisition de données d'une station installée dans un forage. La sortie du sismomètre est échantillonnée à

une fréquence de 120 Hz. Le convertisseur analogique-numérique de 12 bits a une résolution de 66 dB. La variation de gain offre une gamme dynamique de 120 dB. Au moyen de modules "basse puissance", une station peut être exploitée à l'aide de batteries pendant quatre mois environ. Les données numériques obtenues par chaque station sont transmises en permanence par des lignes téléphoniques commerciales à 2 400 Bauds jusqu'au centre d'enregistrement situé près de la station centrale du réseau.

Ce système d'enregistrement central a pour principale raison d'être de commander et synchroniser le réseau, collecter les données des stations installées dans des forages, détecter et mémoriser temporairement sur disque magnétique les événements sismiques. Un schéma de ce système multimicroprocesseur récemment mis au point est représenté dans la figure 5. Une fois par jour, ou si nécessaire sur demande, les données enregistrées sont envoyées par une ligne de données à 4 800 Bauds (DATEX-P) au centre d'analyse de données sismologiques de l'Institut fédéral pour les sciences de la Terre et les ressources naturelles (BGR) de Hanovre. En principe, ce système pourrait diffuser dans le monde entier par ces canaux de télécommunication les événements enregistrés. La capacité des systèmes modernes à satellites tels qu'INTELSAT devrait même permettre une transmission en ligne.

Dans l'ensemble, ce réseau représente la phase technologique la plus récente dans le développement des systèmes d'enregistrement à des fins sismologiques dans notre pays.

Immédiatement après la mise en fonctionnement du système, on a effectué une expérience pour déterminer l'accroissement du rapport signal/bruit obtenu avec les appareils en fond de forage par rapport à celui des stations de surface. Un sismomètre vertical supplémentaire a été installé à cette fin près de la surface à la station centrale en forage. La figure 6 représente des enregistrements typiques des appareils, tous deux présentés avec un agrandissement identique. Le signal sismique, qui n'est visible que sur l'enregistrement du sismomètre en fond de forage (tracé inférieur) a été produit par une explosion chimique : 0,002 t (2 kg) de TNT que l'on a fait exploser à 10 km des appareils.

La figure 7 contient des preuves supplémentaires des bonnes performances des sismomètres en fond de forage dans les zones où le niveau de bruit est élevé. Les signaux enregistrés provenaient d'un événement télésismique dans les îles Kouriles de magnitude  $m_b = 5,2$  (GRF). Les deux tracés supérieurs sont des enregistrements simulés de courte période du Réseau mondial de sismographes normalisés obtenus par un filtrage approprié de la sortie des sismomètres à large bande de deux stations complexes GRF. Les canaux choisis représentent le plus mauvais et le meilleur enregistrement de la station complexe du point de vue du rapport signal/bruit. En outre, la figure contient les sorties des filtres passe-bas des sismomètres de surface et de fond de forage rééchantillonnés à 20 Hz. Comme dans l'exemple précédent, le signal dans l'enregistrement du sismomètre de surface ne peut pas être séparé du bruit, ni dans le temps, ni dans les fréquences. Malheureusement, pendant l'expérience, il n'y a pas eu d'événements télésismiques ou régionaux suffisamment puissants pour déterminer quantitativement l'amélioration du rapport signal/bruit entre les canaux de surface et de fond de forage. Toutefois, une comparaison avec les enregistrements GRF révèle que le seuil de détection du sismomètre placé en fond de forage est aussi bas que celui de certains éléments de la station complexe GRF. C'est là un résultat prometteur, car la station complexe est encore l'instrument d'enregistrement sismologique le plus sensible dans notre pays.

Les seuls signaux observés pendant les essais de mesure sur les deux canaux provenaient de secousses locales. Dans l'exemple donné à la figure 8, le rapport entre les facteurs d'échelle appliqués aux sorties des appareils de fond de forage et de surface est de 5. En tenant compte des amplifications différentes, le signal enregistré dans le forage a des amplitudes plus faibles, mais le premier début n'est pas couvert par le bruit comme c'est le cas sur le tracé de surface. L'amélioration du rapport signal/bruit pour le canal de fond de forage s'avère être égale à 0,5 unité de magnitude lorsqu'on analyse des intervalles de temps de 0,5 s avant et après le début du signal.

Les résultats obtenus dans cette première phase d'exploitation du réseau indiquent que la capacité de détection dans les zones où les conditions de bruit sismique sont défavorables peut être améliorée en installant les sismomètres dans des forages. Pour achever le projet, les études seront poursuivies pour obtenir plus d'informations sur le seuil de magnitude de ce réseau, particulièrement en ce qui concerne les signaux sismiques locaux et régionaux.

L'intégration du concept des forages dans un modèle perfectionné futur d'un réseau mondial est certainement un point important à prendre en considération, en plus des éléments fournis par les récents progrès technologiques des installations d'enregistrement sismologique. En ce qui concerne la technologie du réseau décrit, le système, conçu pour un fonctionnement sans personnel et une analyse automatique, pourrait être utilisé comme une "boîte noire" commandée par les centres internationaux de données. L'accès aux données pourrait être obtenu par des canaux modernes de télécommunications. Comme l'intervention humaine n'est nécessaire que pour l'entretien ou les réparations, il est possible d'éliminer des facteurs subjectifs dans l'extraction des paramètres sismiques. Cela pourrait être fait dans les centres internationaux de données en suivant des procédures convenues. C'est l'une des grandes perspectives offertes par la technologie moderne en ce qui concerne l'exploitation d'un réseau mondial futur.

#### 4. Conclusions

Lorsque le Groupe d'experts sismologues établissait en 1978 son premier rapport (CCD/558), les possibilités de détection et de localisation de deux types différents de réseaux mondiaux ont été estimées quantitativement. Le premier système, appelé Réseau I, était constitué de six stations sismographiques existantes, alors que le deuxième, appelé Réseau III (SRO), définissait un réseau numérique hypothétique composé de stations pour lesquelles on supposait l'emploi de la norme SRO. Entre-temps le troisième rapport a été achevé. Il contient des informations importantes sur les réalisations de nombreux pays dans le domaine des stations et des réseaux sismographiques.

Avec les progrès des cinq dernières années, le Réseau III (SRO) s'est partiellement transformé d'un système hypothétique en système opérationnel. Toutefois, de nouvelles perspectives pour un réseau futur n'ont pas encore été élaborées par le Groupe d'experts sismologues, bien que les éléments techniques d'un tel réseau moderne soient déjà disponibles, comme indiqué dans le présent document. Nous estimons qu'il est nécessaire de mettre au point, dès que possible, un nouveau modèle de système mondial pour lequel on adopterait comme norme l'état actuel de la technologie, et aussi d'estimer quantitativement la capacité de détection et de localisation de ce réseau pour pouvoir documenter l'efficacité de la surveillance d'une future interdiction complète des essais nucléaires à l'aide des méthodes sismologiques d'aujourd'hui.



Références

- 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 Générale 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

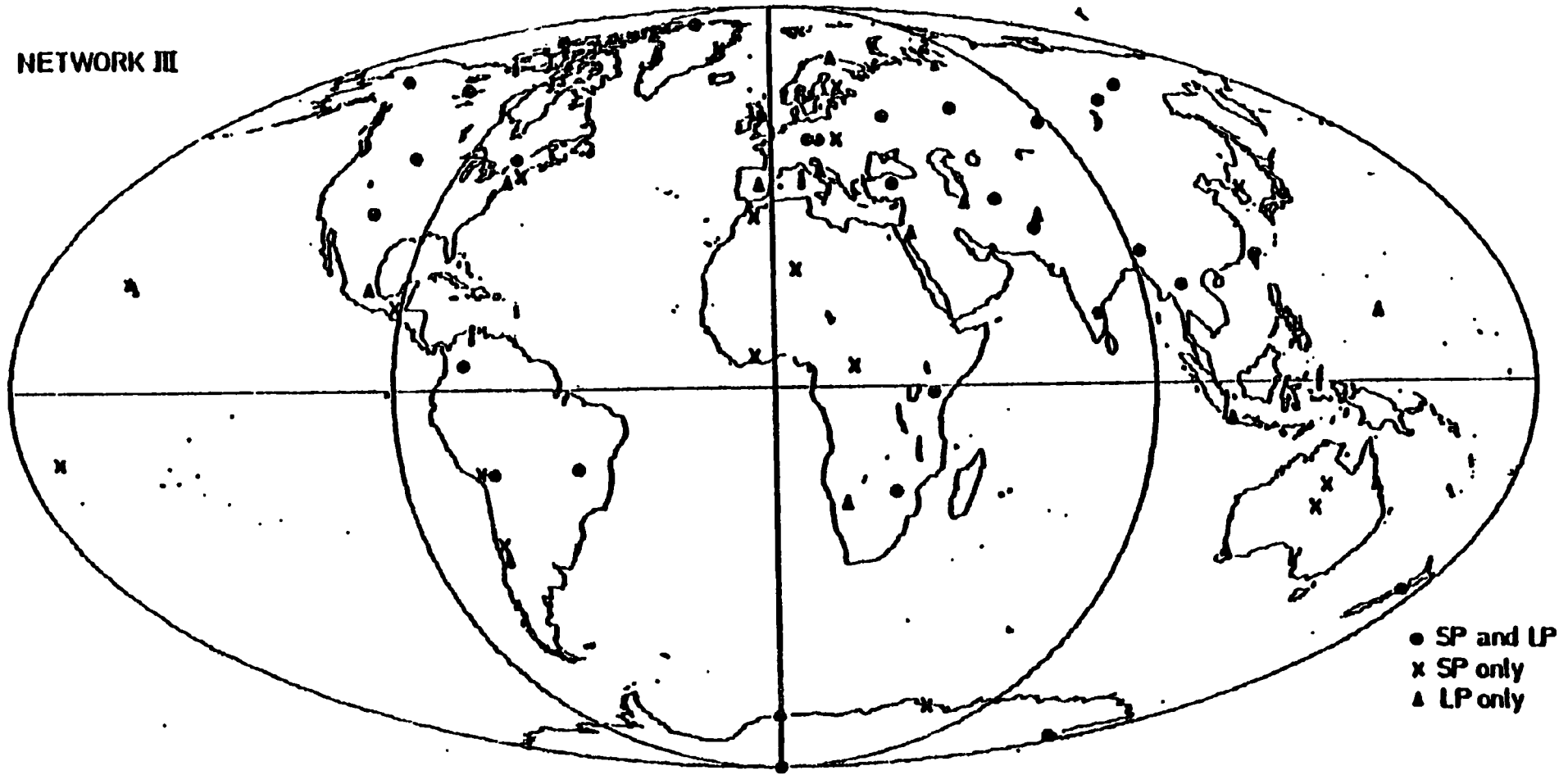


Fig. 1 : Map showing the location of stations in Network III and Network III (SRO) (CCD/558)

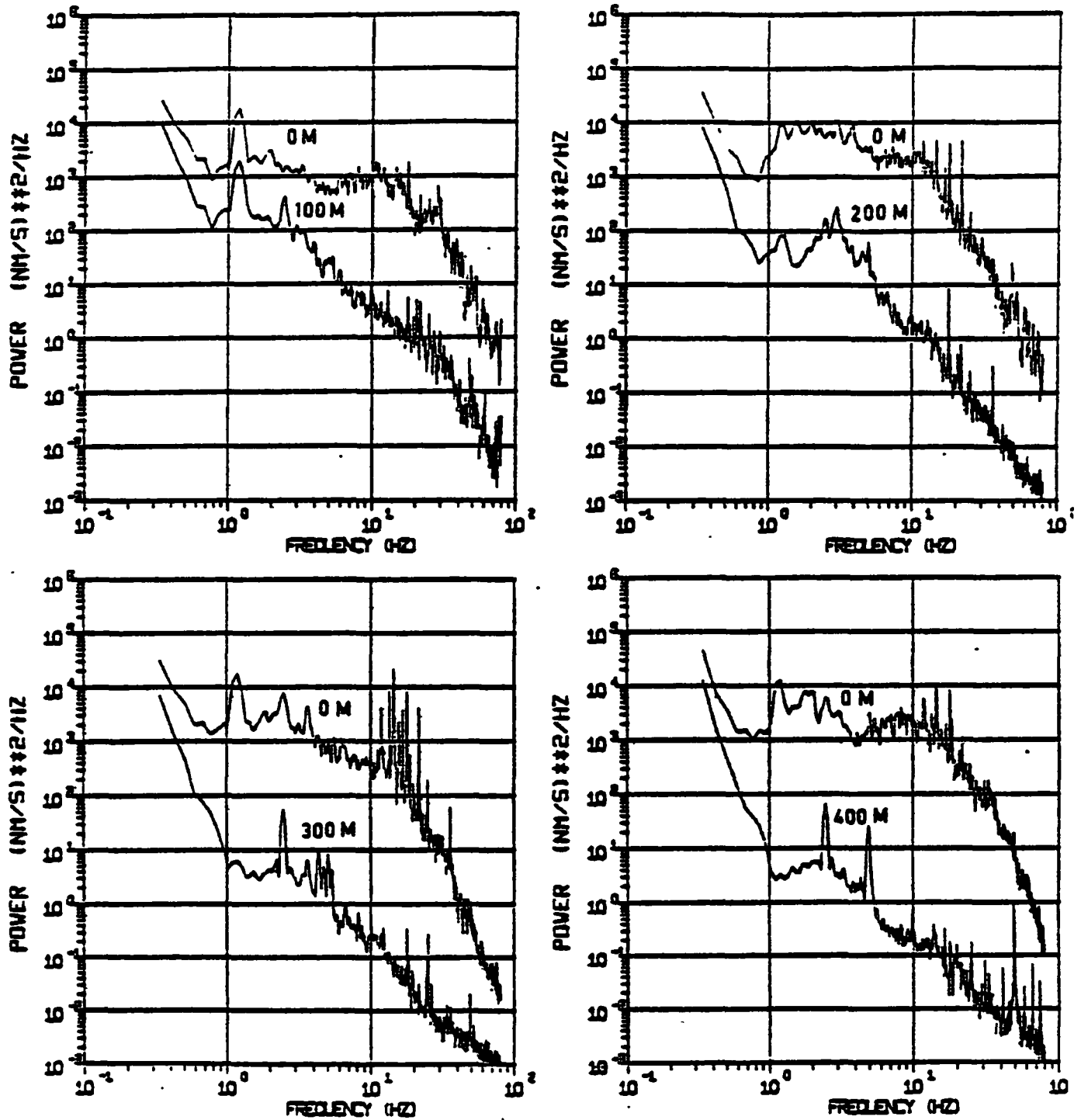


Fig. 2: Power density spectra of seismic noise recorded on the surface and in a borehole at a depth of 100, 200, 300 and 400 m

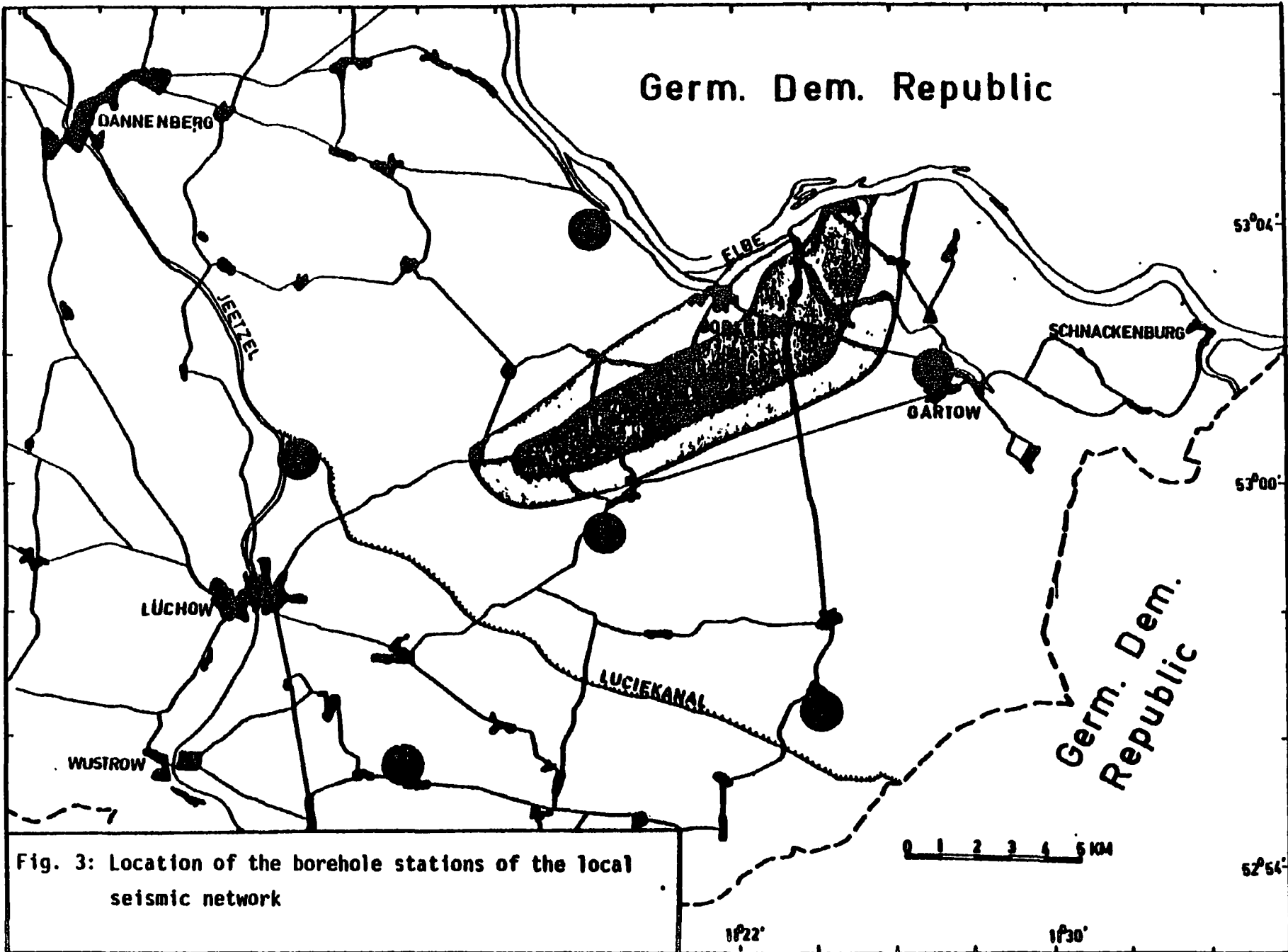


Fig. 3: Location of the borehole stations of the local seismic network

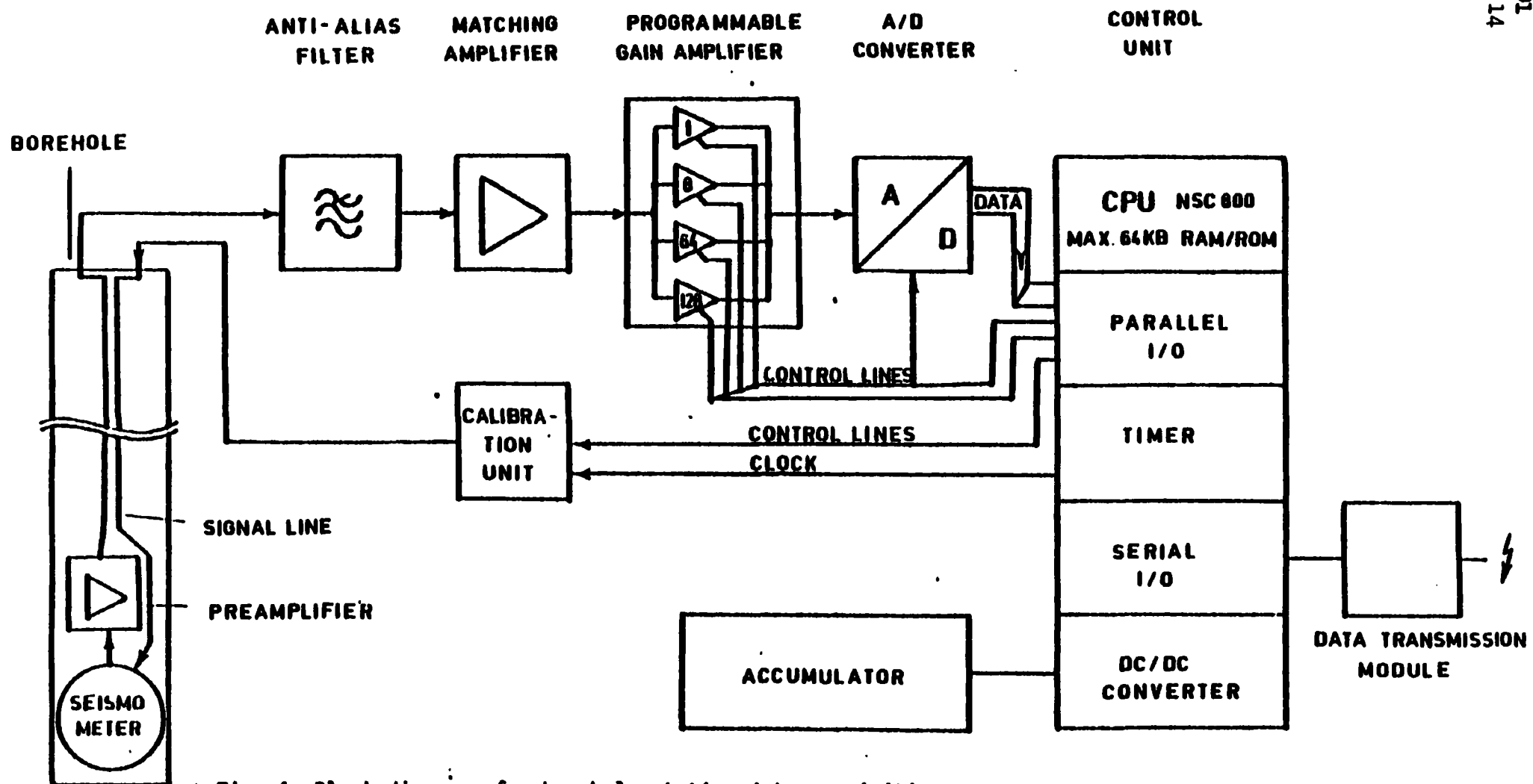
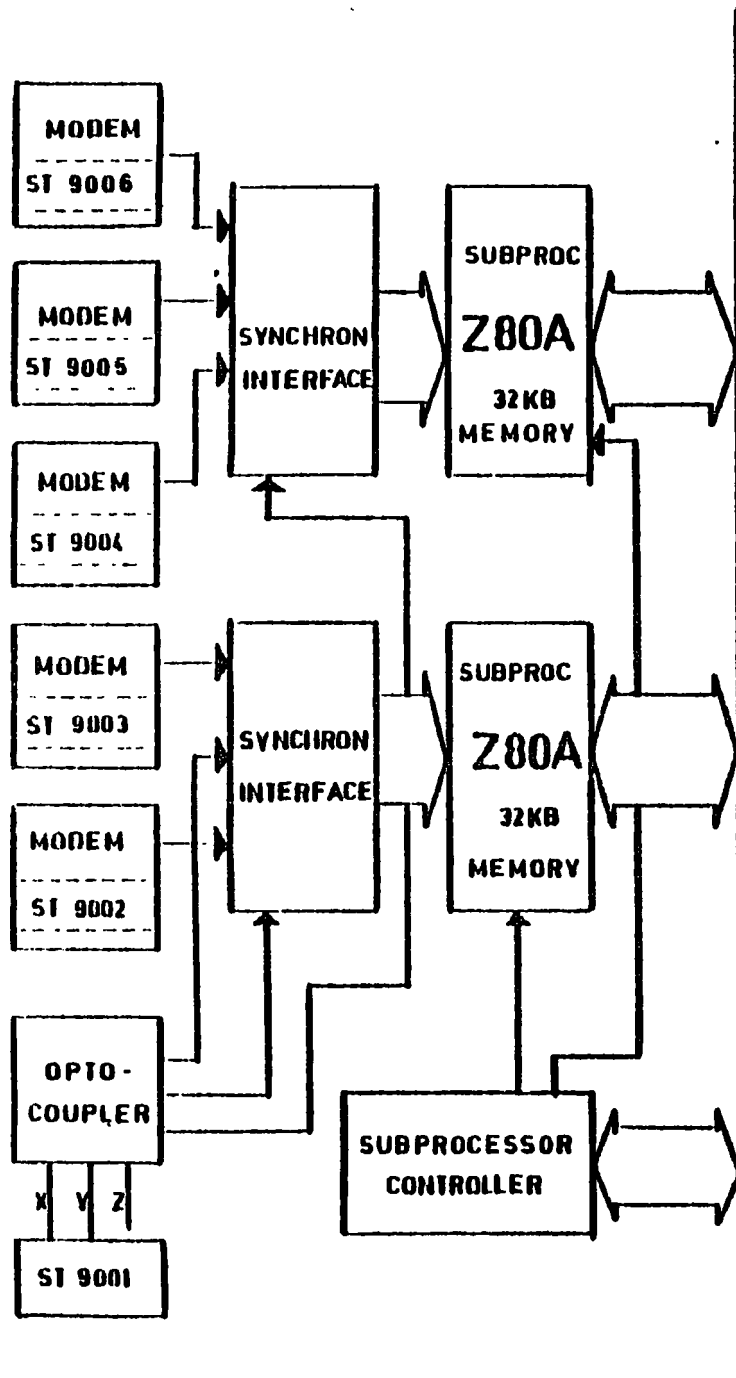


Fig. 4: Block diagram of a borehole station data acquisition system



SYSTEM BUS

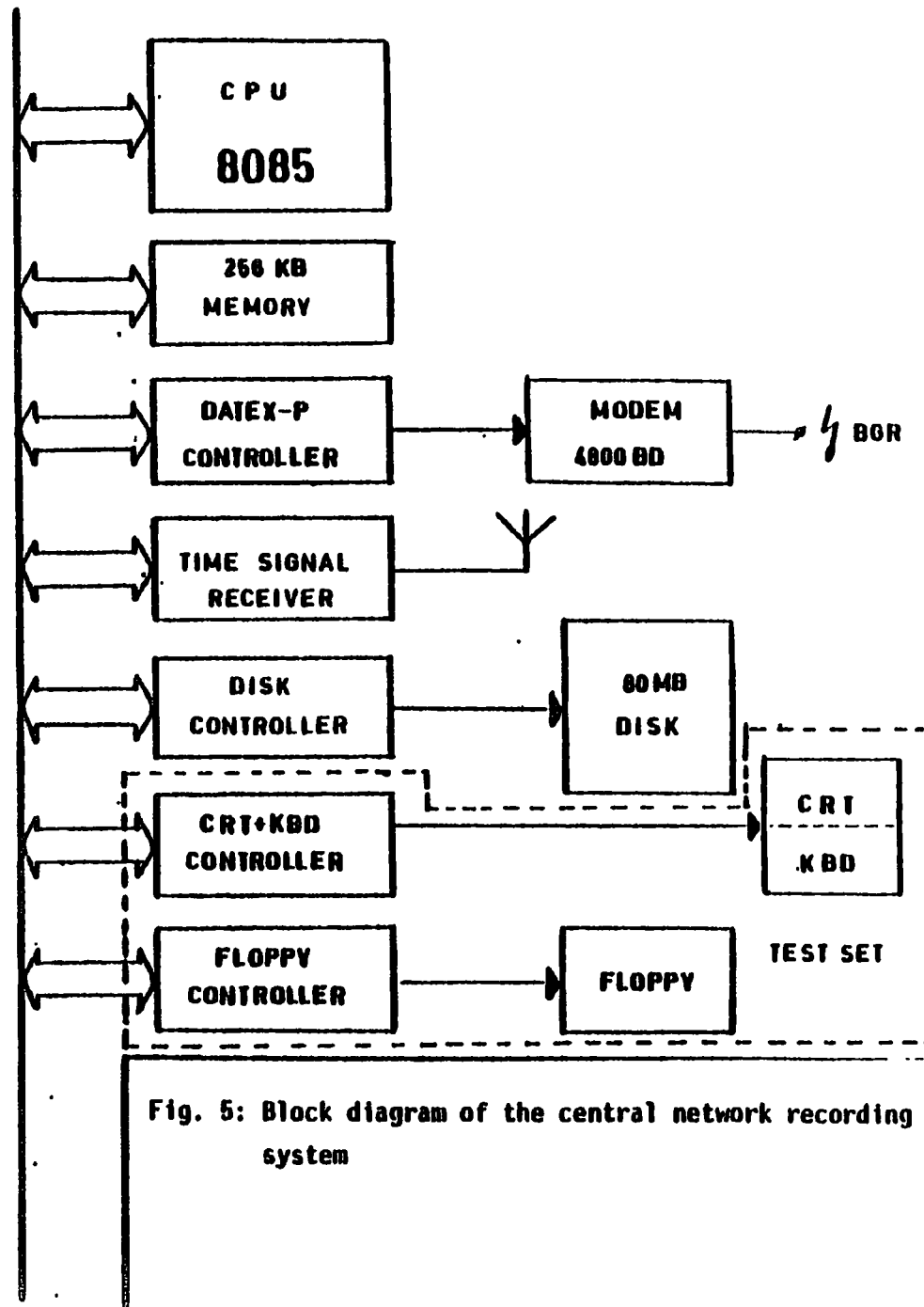
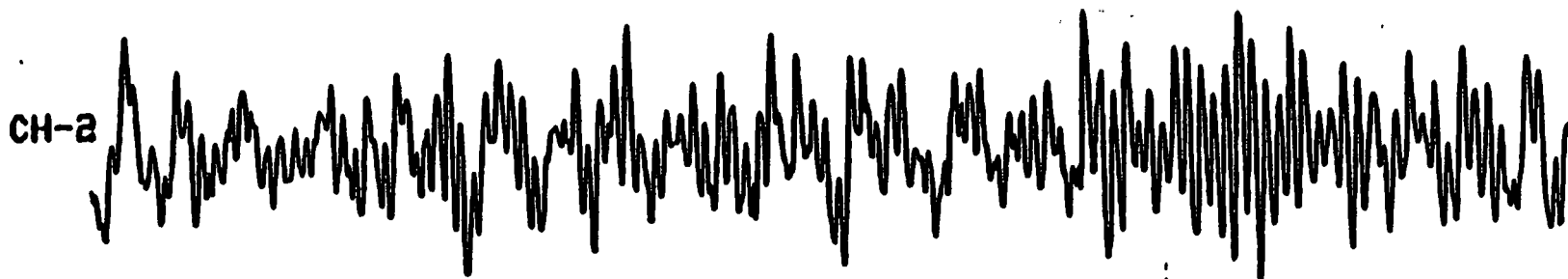


Fig. 5: Block diagram of the central network recording system

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

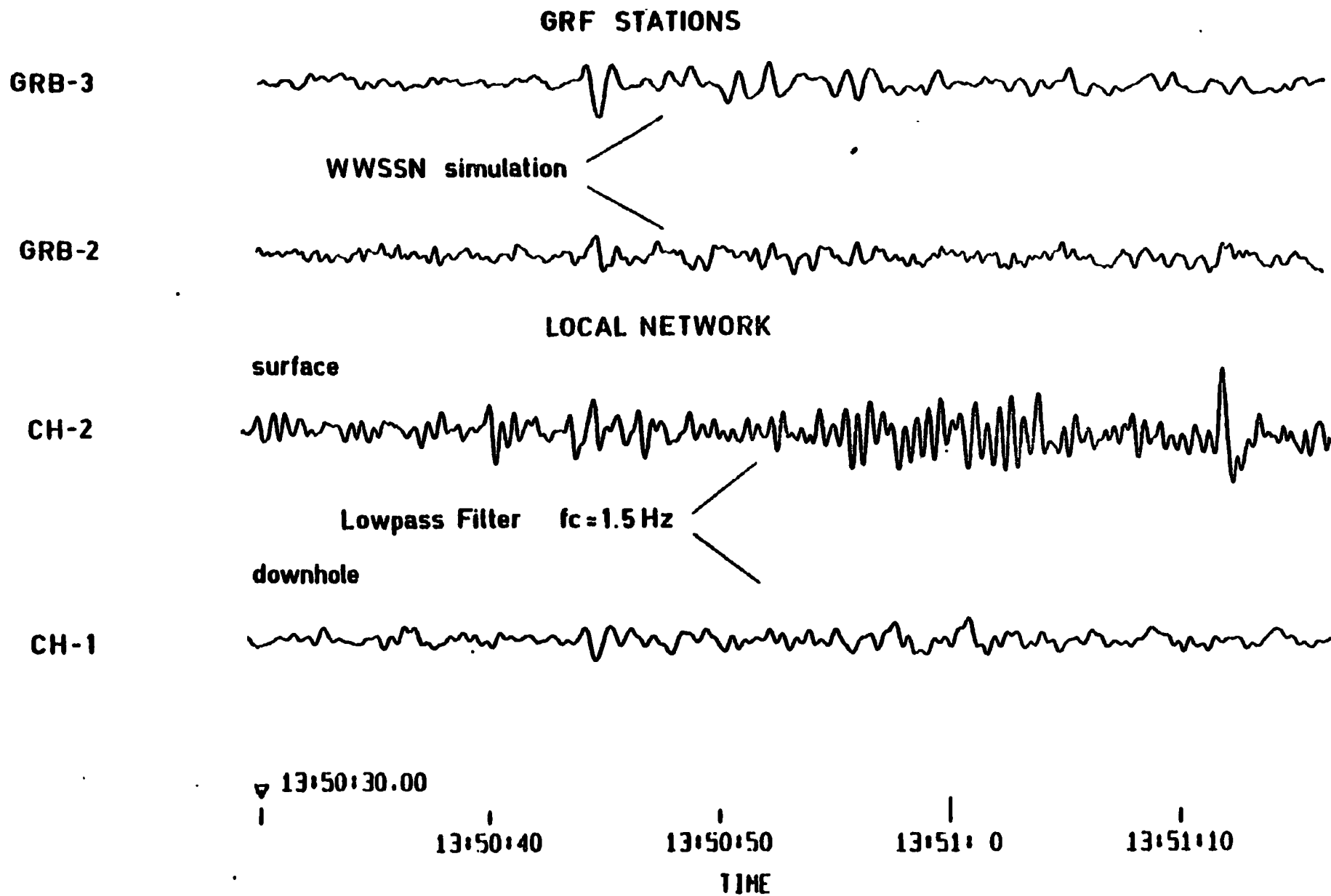


Fig. 7: Seismograms of a Kurile Islands event ( $m_b = 5.2$ ) recorded at two stations of the GRF array and at the center station of the local network with seismometers installed downhole and at the surface



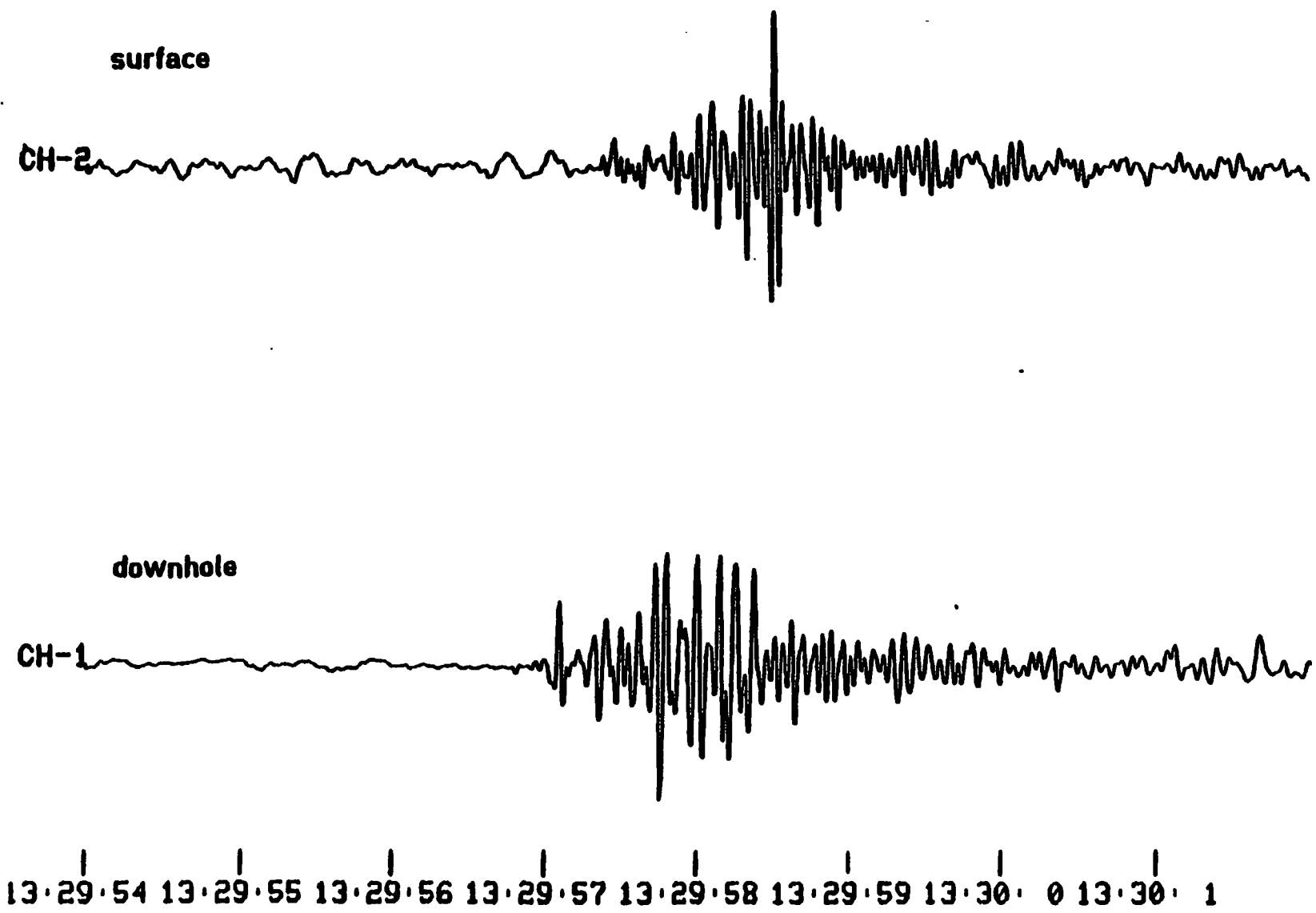


Fig. 8: Local shock recorded at the center station of the local network with seismometers installed downhole and at the surface