

# The Glanerbrug revisited

L. Lindner<sup>1</sup> en K.C. Welten<sup>2</sup>

1. Naarden, The Netherlands [L.Lindner.Naarden@inter.NL.net]

2. Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720-7450, USA.  
[kcwelten@uclink4.berkeley.edu]

## English summary

On april 7, 1990 a stony object fell through the roof of a house in the township of Glanerbrug in The Netherlands (52°13'N, 6°57'E), near the border with Germany. The object was promptly recognised as being a chondrite and is best classified as an LL5 chondrite breccia. Gamma-ray measurements revealed cosmogenic longlived <sup>26</sup>Al as well as shortlived <sup>54</sup>Mn and <sup>22</sup>Na. The <sup>22</sup>Na/<sup>26</sup>Al ratio of ~1.2 is consistent with a low galactic cosmic ray-flux in the last few years, as would be expected for a meteorite which fell near the maximum in the 11-year sunspot cycle. The combination of cosmogenic <sup>26</sup>Al and <sup>10</sup>Be, measured by accelerator mass spectrometry (AMS), showed that the meteorite was exposed to cosmic-rays as a relatively small object (radius=10-20 cm), which is consistent with size estimates based on the luminosity of the fireball as well as with the virtual absence of short-lived <sup>60</sup>Co. Finally, we argue that despite the similarities in the trajectories and the exposure ages of the Glanerbrug (LL5) and the Pribram (H5) chondrites, it is unlikely that they came from a meteorite stream that originated on a single parent body, because: (i) they belong to different chemical groups, that originated on different parent bodies, (ii) the cosmic-ray exposure ages of ~20 million years are at least an order of magnitude higher than the expected survival times of meteorite streams and (iii) the meteorites were exposed to cosmic-rays as small bodies, not on the surface of a larger object.

## Inleiding

Na de geruchtmakende val onder vuurverschijnselen van de Glanerbrug in de vroege avond van 7 april 1990 waar de *Radiant* zelfs een speciaal nummer [1] aan wijdde, werd er in dit blad nog wel aandacht besteed aan de baanberekeningen [2], maar werd nooit meer gerapporteerd aangaande het onderzoek aan de meteoriet zelf. Met dit artikel wordt dit manco ingevuld. De directe aanleiding hiertoe vormt een recent artikel van Langbroek [3] met betrekking tot de overeenkomst tussen de banen van de Glanerbrug en de Pribram, een H-chondriet, die ook op de 7de april viel, maar ruim 30 jaar eerder, in 1959 in Tsjechië. Daar wordt later in meer detail op ingegaan.

Na het wereldkundig worden van het nieuws op 8 april over de val en de vondst van mogelijk buitenaards materiaal, volgde een pijlsnelle autorit van een onzer naar het laboratorium van het politiebureau in Enschede. Daar aangekomen werden twee dingen snel duidelijk. In de eerste plaats

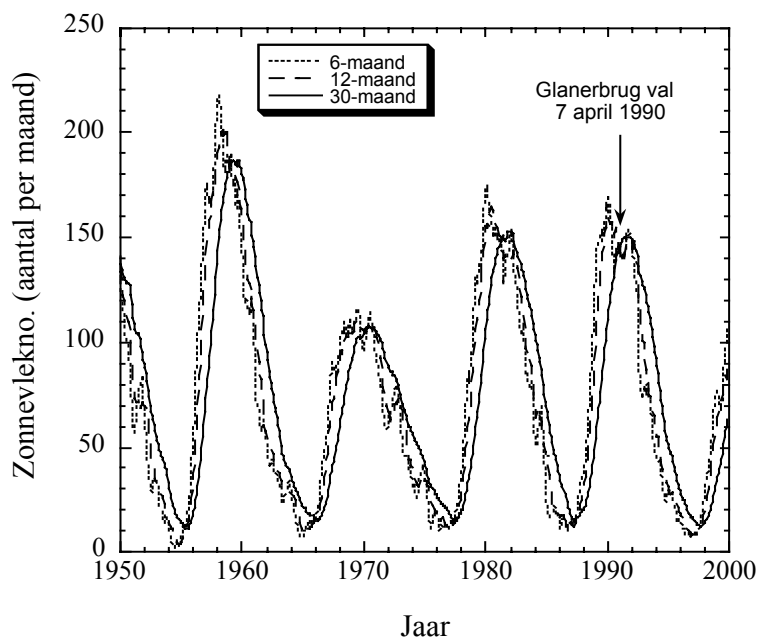
had de plaatselijke politie met een fijne neus voor het bijzondere, al het gevonden materiaal onmiddellijk geconfiscieerd en zodoende voor de wetenschap veilig gesteld. In de tweede plaats en niet minder belangrijk, kon er nauwelijks twijfel bestaan over de aard van het materiaal: op vele brokstukken was een smeltkorst zichtbaar en met een loep kon op de breukvlakken van de karakteristieke, grijze steenmatrix duidelijk glinsterend metallisch ijzer worden onderscheiden. Een en ander werd nog eens bevestigd door de licht magnetische eigenschappen die met een kleine magneet konden worden aangetoond. Dit alles wees erop dat we hier met een ongedifferentieerde steenmeteoriet, een chondriet, te maken hadden. De afwezigheid van duidelijk zichtbare chondrulen wees op een zekere mate van metamorfose in de kristallijne structuur.

Ondertussen werd uit 200 ooggetuigenverklaringen de baan van de Glanerbrug bepaald [4]. De berekende baan heeft een gemiddelde afstand van 2.8 AU tot de zon, met een peri-

helium van 0.85 AU, een aphelium van 4.75 AU en een relatief hoge inclinatie van 23°. De baan van de Glanerbrug bevestigt een oorsprong in de planetoidengordel. Verder werd de oorspronkelijke massa van de Glanerbrug – op basis van de helderheid van de vuurbal – op 20-200 kg geschat [4].

## Kosmogene nucliden.

De ultieme test zou het aantonen van kosmogene radionucliden zijn, d.w.z. radioactieve isotopen gevormd door kosmische straling in de ruimte. In het kader van dateringsonderzoek aan meteorieten, was voor dat doel in het Van de Graaff Laboratorium van de Universiteit Utrecht zeer gevoelige detectie apparatuur voor gammastraling juist in bedrijf genomen en konden dergelijke metingen onmiddellijk gestart worden! In eerste instantie werd gekeken naar gammastraling, toebehorende aan een radioactief isotoop van aluminium, <sup>26</sup>Al, dat een halveringstijd heeft van 0,7 miljoen jaar en alleen door kosmische straling



**Figuur 1.** Zonnevlek cyclus voor de periode 1950-2000. De drie curves tonen 6-maand, 12-maand en 30-maand gemiddelden van het aantal zonnevlekken per maand. De Glanerbrug viel halverwege het laatste maximum in de 11-jarige zonnevlek cyclus, dat duurde van 1989-1991.

gevormd kan worden. De aanwezigheid van  $^{26}\text{Al}$  bevestigde een buitenaardse oorsprong. De gemeten  $^{26}\text{Al}$  activiteit van  $47 \pm 5$  dpm/kg was ongeveer 20% lager dan de gemiddelde verzadigingswaarde van 60 dpm/kg, wat mogelijk leek te wijzen op een korte 'exposure age' (1-2 miljoen jaar) [5]. Later moest echter op basis van metingen aan kosmogene stabiele edelgasisotopen ( $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ ) in Mainz geconcludeerd worden dat de bestralingsduur veel langer was [6]. Dit werd ook bevestigd door de concentratie van  $^{10}\text{Be}$  ( $t_{1/2}=1.5$  miljoen jaar), die gemeten werd met de AMS opstelling in Utrecht. De enigszins lage  $^{26}\text{Al}$  activiteit was dus niet te wijten aan een korte bestralingsduur, maar aan de relatief kleine omvang van de meteoriet in de ruimte, d.w.z. vóór ablatie in de aardse atmosfeer, die het object reduceerde tot ca. 1 kilogram. Op basis van  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  en de  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  verhouding kunnen we de pre-atmosferische straal van de Glanerbrug schatten op 10-20 cm, ofwel een massa van 15-120 kg. Dit komt redelijk overeen met de schatting van 20-200 kg op basis van de helderheid van de vuurbal [4].

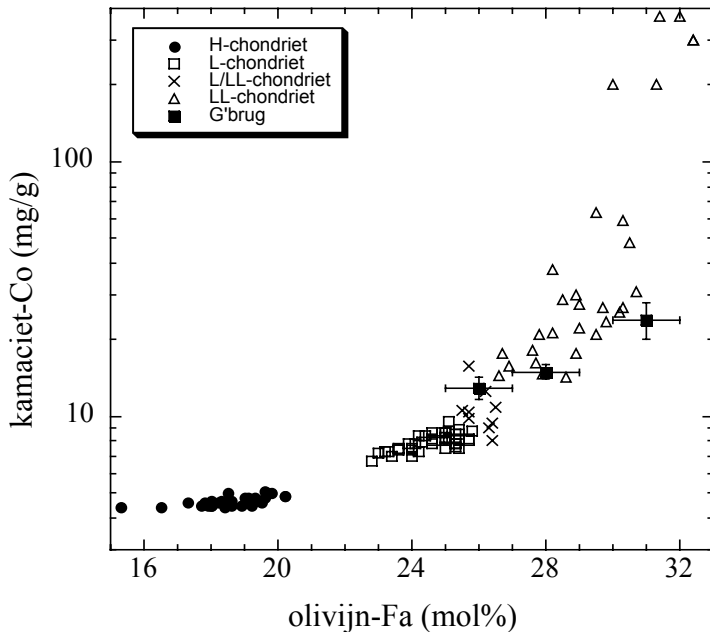
De belangstelling ging eigenlijk nog meer uit naar de mogelijke aanwezigheid van gammastralers met een veel kortere halveringstijd. Ook deze, met name  $^{22}\text{Na}$ (2,6j) en  $^{54}\text{Mn}$ (312d) konden worden aangetoond. Gezien de kleine omvang van de Glanerbrug meteoroïde is het niet verassend dat we  $^{60}\text{Co}$  (5.3 j) niet konden aantonen, aangezien dit nuclide gevormd wordt uit  $^{59}\text{Co}$  door invangst van secundaire thermische neutronen, die alleen in significante hoeveelheden door kernreacties vrijkomen in objecten met een straal van minimaal 20 cm. Samenvattend vormden deze waarnemingen het sluitende bewijs dat het hier een relatief klein buitenaards object, een meteoriet, betrof die gelet de aanwezigheid van de betrekkelijk kortlevende radionucliden, nog heel recent onderhevig was geweest aan kosmische straling. In samenwerking met G. Heusser in Heidelberg in Duitsland (prive communicatie), waar op dat moment een beter geijkt apparaat ter beschikking stond, werd verder duidelijk uit de naar verhouding lage intensiteiten van de twee kortlevers, dat de Glanerbrug betrekkelijk kort voor de val op aarde onderhevig was geweest

aan het maximum in de zonneactiviteit in de periode 1989-1991 (Figuur 1).

De hoge zonneactiviteit resulteert in een lagere intensiteit van de galactische kosmische straling ten gevolge van de afscherpende werking van het magnetisch veld van de zon. Een betere maat voor de afscherping van de galactische kosmische straling onder invloed van de zonneactiviteit is de  $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$  activeitsverhouding, omdat deze redelijk onafhankelijk is van shielding effecten binnenin een meteoriet, terwijl  $^{22}\text{Na}$  dankzij z'n korte halveringstijd wel gevoelig is voor de 11-jarige cyclus in kosmische straling en  $^{26}\text{Al}$  niet. De  $^{22}\text{Na}/^{26}\text{Al}$  activeits verhouding van  $1.17 \pm 0.16$  in de Glanerbrug is aanzienlijk lager dan de gemiddelde waarde van 1.5 en komt goed overeen met de berekende waarde voor een meteorietval in 1990 [7].

#### **Classificatie: L, L/LL of LL chondriet ?**

Na te hebben vastgesteld dat het hier een steenmeteoriet betrof en naar alle waarschijnlijkheid een gewone chondriet, kon begonnen worden aan een meer nauwkeurige classificatie. Aan de Faculteit der Aardwetenschappen in Utrecht werd vastgesteld dat de Glanerbrug een breccie (dwz gevormd uit fragmenten van eerder gevormde gesteenten) was, met duidelijk gescheiden lichtgrijze en donkergrijze gesteenten met zwarte insluitsels. Minerale analyses met behulp van een electron microprobe toonden aan dat de samenstelling van olivijn en pyroxeen (Fe,Mg-silikaten) in het lichtgrijze gedeelte het meest overeenkwamen met die van een L-chondriet (Laag in ijzer), terwijl die in het donkergrijze gedeelte overkwamen met die van een LL-chondriet (Laag in totaal ijzer, Laag in metallisch ijzer). Op basis van petrologische eigenschappen werd de metamorfose graad (op een schaal van 1 tot 7) vastgesteld op 5, wat overeenkomt met piektemperaturen van 700-750 °C tijdens metamorfose. Al in september 1990 werd hierover gerapporteerd in Perth,



**Figuur 2 :** Kamaciet-Co gehalte en olivijn-fayaliet gehalte in drie fragmen-ten van de Glanerbrug in vergelijking met analyses aan ~120 gewone chondrieten [8]. De H-chondrieten zijn duidelijk van de L en LL-chondrieten gescheiden, maar de grens tussen L en LL chondrieten is arbitrair, zodat voorlopig ca. 10 chondrieten als L/LL worden aangeduid.

hierover gerapporteerd in Perth, tijdens de jaarlijkse conferentie van de Meteoritical Society [5].

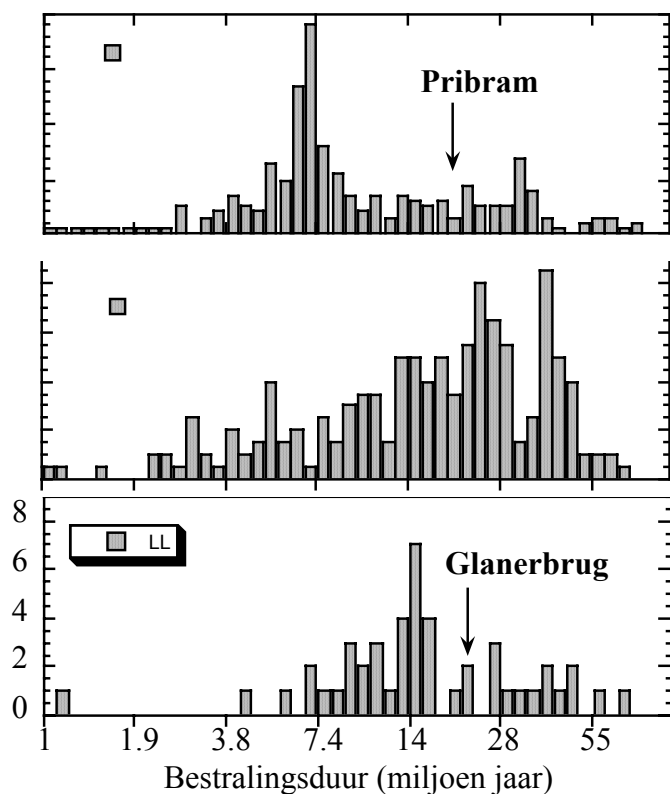
Het belang van het feit dat de classificatie van de Glanerbrug tussen die van de L-groep en de LL-groep leek in te liggen, werd onderkend door J. Wasson, omdat zijn groep aan de UCLA toevallig net ook een aantal meteorieten had geanalyseerd, die tussen de L en LL groep in leken te liggen, en die voorlopig als L/LL aangeduid werden [8]. Tot dan toe werd algemeen aangenomen dat de gewone chondrieten van (minimaal) drie moederlichamen afkomstig zijn, een H-chondritisch, een L-chondritisch en een LL-chondritisch. De vraag was dan ook of de L/LL chondrieten nu bij de L of de LL groep behoren of wellicht van een apart moederlichaam komen. Om deze vraag te kunnen beantwoorden, was het belangrijk om eerst de mineraal en bulk samenstelling van deze L/LL chondrieten zo goed mogelijk te karakteriseren en vervolgens te evalueren of de L/LL chondrieten ook in andere eigenschappen verschillen van de L en LL chondrieten.

Omdat de Glanerbrug in de L/LL groep leek te vallen, werd een van de auteurs (KCW) door Professor Wasson uitgenodigd om de Glanerbrug nader te analyseren in Los Angeles. Aangezien metallische mineralen (zoals de FeNi mineralen kamaciet en taeniet) sneller en bij lagere temperaturen equilibreren (een homogene samenstelling geven) dan olivijn en pyroxeen, vormen ze in principe een betere parameter voor classificatie. Daarom werd in Los Angeles naast de silikaatsamenstelling, ook de Co concentratie in kamaciet korrels bepaald. De resultaten van deze analyses (Figuur 2) bevestigden dat het donkergrijze deel van de Glanerbrug als een LL chondriet geïdentificeerd moest worden, terwijl het lichtgrijze deel in de L/LL groep leek te vallen [9]. Verder werd vastgesteld dat de Glanerbrug niet alleen op een cm-schaal inhomogeen is, maar dat vooral het donkergrijze deel ook op een mm-schaal inhomogeen is, met systematische variaties in olivijn en kamaciet samenstellingen en met een klein insluitsel (0.10x0.14 mm<sup>2</sup>) met H-chondritische samenstelling [9]. Het

cm-grote zwarte insluitsel dat op de foto (Figuur 1) te zien is, werd niet geanalyseerd, maar is mogelijk een fragment dat tijdens een flinke meteoriet inslag op het moederlichaam schokeffecten en verhitting heeft ondergaan.

Hoewel we niet kunnen uitsluiten dat het lichtgrijze deel van de Glanerbrug een exotisch fragment is (van een moederlichaam met L/LL chondritische samenstelling) in een donkergrijs gast-gesteente van LL chondritische samenstelling, is het voorlopig aannemelijker dat de Glanerbrug een LL chondriet breccie is met een relatief grote spreiding in silikaatsamenstellingen. Het lijkt er dan ook op te wijzen dat de olivijnen in chondrieten van de LL groep een grotere spreiding in fayaliet gehalte vertonen dan tot nu toe werd aangenomen en dat er mogelijk zelfs overlap is tussen de L en LL chondrieten. Een andere aanwijzing hiervoor is de mogelijke onjuiste classificatie van een groot aantal L5 chondrieten bij de Queen Alexandra Range op Antarctica (QUE 90201 'shower'), met fayaliet gehalten van 25-26 mol%. Op basis van cosmogene nucliden concentraties en bulk metaal gehalten is het echter zeer waarschijnlijk dat de meeste van deze L5 chondrieten, in feite tot een LL5 shower behoren, waarvan inmiddels meer dan 1000 fragmenten zijn gevonden. Dit bevestigt nog eens dat de scheiding tussen L en LL chondrieten niet zo duidelijk is als die tussen de H en L chondrieten.

Wasson and Wang [10] suggereren op basis van radiogene U/Th-<sup>4</sup>He leeftijden dat de L/LL's niet verwant zijn aan de L-chondrieten, terwijl Graf and Marti [11] concluderen dat de exposure ages van 13 L/LL chondrieten duidelijk verschillen van die van de LL chondrieten. Ondanks bovenstaande conclusies en in tegenstelling tot enkele andere nieuwe chondriet groepen is het bestaan van een aparte L/LL groep in de afgelopen tien jaar echter niet duidelijk bevestigd.



**Figuur 4 :** Bestralingsduur van 262 H-, 218 L- en 47 LL-chondrieten, gebaseerd op  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  en  $^{38}\text{Ar}$  concentraties [18]. De x-as is logaritmisch met een resolutie van 10%. De bestralingsduur van 19 miljoen jaar voor Pribram en 22 miljoen jaar voor Glanerbrug vallen niet in de voornaamste clusters van 7 miljoen jaar voor H-chondrieten en 15 miljoen jaar voor LL chondrieten.

### Bestralingsduur (exposure age) van Pribram en Glanerbrug

Tot slot willen we nog commentaar leveren op het recente artikel van Langbroek in het september nummer van Radiant [3]. Daarin komt hij tot de conclusie dat de Pribram en Glanerbrug meteorieten nagenoeg dezelfde banen vertonen en dus wellicht van hetzelfde moederlichaam afkomstig zijn. Omdat exposure ages een belangrijke clue zouden kunnen geven, zijn die nog eens nader bekeken.

**Glanerbrug.** De exposure age van Glanerbrug is door Loeken et al. [6] op basis van kosmogene edelgassen ( $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  en  $^{38}\text{Ar}$ ) bepaald op  $22.5 \pm 3.0$  miljoen jaar, vergelijkbaar met exposure ages van 10-30 miljoen jaar voor de andere Nederlandse steenmeteorieten, Ellemeet (diogeniet), Uden (LL6) en Utrecht (L6) (Tabel 1).

**Pribram.** De oorspronkelijke literatuurwaarde van 12 miljoen jaar [4] voor de bestralingsduur van Pribram is gebaseerd op verouderde productiesnelheden. Ten eerste is de productiesnelheid van  $^{21}\text{Ne}$  sinds 1980 met ongeveer 20% verlaagd [12,13] en ten tweede kunnen we op basis van de lage  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  verhouding (1.08) concluderen dat de Pribram een vrij groot object is geweest, waarvoor de formules van Eugster [13] de  $^{21}\text{Ne}$  productiesnelheid enigszins overschatten. Het is daarom beter om het semi-empirische model van Graf et al. [14] te gebruiken. Gebruik makend van gepubliceerde  $^{26}\text{Al}$  en  $^{21}\text{Ne}$  concentraties [15], levert de methode van Graf een bestralingsduur op van  $19 \pm 2$  miljoen jaar voor de Pribram meteoriet en dat komt -gezien de onzekerheden- redelijk overeen met die van de Glanerbrug.

Wel is een bestralingsduur van ca. 20 miljoen jaar, zoals Langbroek [3] terecht opmerkt, veel langer dan de verwachte overlevingsduur van een intacte meteoriet zwerm [16]. De suggestie dat de Pribram en Glanerbrug recent losgekomen brokstukken zouden kunnen zijn van het oppervlak van een veel groter (vele meters in doorsnede) brokstuk is niet consistent met de  $^{26}\text{Al}$  activiteit van  $\sim 50$  dpm/kg in Glanerbrug en 52-59 dpm/kg in Pribram, wat wijst op een maximale straal van 20 cm resp. 1 m [17].

### Gezamenlijke oorsprong van Pribram en Glanerbrug ?

Ondanks de overeenkomst tussen de banen en de exposure ages van de twee meteorieten lijkt het onwaarschijnlijk dat ze van hetzelfde moederlichaam afkomstig zijn en wel voornamelijk omdat Pribram een H-chondriet is en Glanerbrug een LL (of L/LL) chondriet. Er vindt weliswaar enigszins mixing plaats tussen de chondritische moederlichamen, wat onder andere blijkt uit de aanwezigheid van een H-chondritisch fragment in de Glanerbrug [11], maar de exposure age verdeling van H-chondrieten is bovendien zo verschillend (Figuur 3) van die van L en LL chondrieten [18], dat men een gezamenlijk moederlichaam uit kan sluiten. De ad-hoc modellen van Langbroek [3] zijn in principe mogelijk, al is het in het eerste model zeer onwaarschijnlijk dat zich op een H-chondritisch moederlichaam een regoliet vormt met meer dan 99% L/LL chondritisch materiaal. Het 'rubble-pile' model voor een planeetoïde [19] lijkt iets minder onwaarschijnlijk, al blijft het de vraag of men zo'n verregaande conclusie kan trekken uit de - mogelijk toevallige - overeenkomst tussen de banen van slechts twee meteorieten. Hopelijk worden er in de nabije toekomst meer meteoriet-inslagen met behulp van videocamera's of cameranetwerken geregistreerd, zodat onze kennis en de statistiek van meteorietbanen toeneemt en we dus meer te weten komen over mogelijke meteorietzwer-

men en de oorsprong van gewone chondrieten in de planetoiden gordel!!!

### Conclusies

De samenstelling van olivijnmineralen in verschillende fragmenten van de Glanerbrug varieert van 26 tot 31 mol% fayaliet. De Co concentraties in het kamaciet van de Glanerbrug variëren van 13 mg/g tot 24 mg/g en zijn gecorreleerd met de olivijn-Fa gehalten. Terwijl de olivijn en kamaciet samenstellingen in het lichtgrijze deel tussen de algemeen aanvaarde waarden voor L en LL chondrieten invallen, komen de mineraalsamenstellingen in het donkergrijze gedeelte duidelijk overeen met de LL groep. Aangezien de tussenliggende L/LL groep niet echt bevestigd is, en er andere aanwijzingen zijn dat de LL groep een grotere spreiding vertoont in eigenschappen dan tot nu toe werd aangenomen, kan de Glanerbrug voorlopig het best geklassificeerd worden als een LL6 chondriet breccia.

De concentraties van edelgas isotopen en langlevend  $^{26}\text{Al}$  en  $^{10}\text{Be}$  tonen aan dat de Glanerbrug ongeveer 22 miljoen jaar als een vrij klein object ( $R=10\text{-}20$  cm) aan kosmische straling heeft blootgestaan. Een straal van 10-20 cm komt overeen met een massa van 15-120 kg, hetgeen schattingen van de massa uit vuurbalverschijnselen bevestigt. Verder komen de relatief lage concentraties aan kortlevende kosmogene radionucliden overeen met de maximale modulatie van de kosmische straling tijdens maximale zonne-activiteit in 1990, dat wil zeggen kort vóór de val de Glanerbrug.

Tenslotte concluderen we dat het ondanks de overeenkomst in de banen en de bestralingsduur van de LL5 chondriet Glanerbrug en de H5 chondriet Pribram onwaarschijnlijk is dat deze twee meteorieten een zwerm vormden die van een gezamenlijk moederlichaam afkomstig zijn, omdat (i) er geen andere aanwijzingen zijn dat H en LL chondrieten van hetzelfde moederlichaam komen en (ii) de bestralingsduur minimaal een orde van

grootte langer is dan de verwachte overlevensduur van een meteorieten-zwerm in de planetoidengordel.

### Referenties.

- [1] *Radiant* **12** nr 3, 1990: Special Issue
- [2] *Radiant* **12** nr 4, 1990.
- [3] Langbroek M. (2001) Pribram en Glanerbrug. *Radiant* **23**, 76-78.
- [4] Jenniskens P. et al.. (1992) Orbits of meteorite producing fireballs. The Glanerbrug - a case study. *Astron. Astrophys.* **255**, 373-376.
- [5] Lindner L. et al. (1990) Glanerbrug: A new stony meteorite, *Meteoritics* **25**, 379
- [6] Loeken T. et al. (1992) Noble gases in eighteen stone meteorites. *Chem. Erde* **52**, 249-259.
- [7] Bhandari N. et al. (1993) Depth and size dependence of cosmogenic nuclide production rates in stony meteoroids. *GCA* **57**, 2361-2375.
- [8] Kallemeyn G. W. et al. (1989) Ordinary chondrites: bulk compositions, classification, lithophile-element fractionations, and composition-petrographic type relationships. *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 2747-2767; Rubin A. E. (1990) Olivine and kamacite compositions in chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 1217-1232.
- [9] Welten K.C. et al. (1992) The Glanerbrug breccia: evidence for a separate L/LL chondritic parent body? *Meteoritics* **27**, 307
- [10] Wasson J. T. and Wang D. (1991) The histories of ordinary chondrite parent bodies: U,Th-He age distributions. *Meteoritics* **26**, 161-167.
- [11] Graf T. and Marti K. (1994) Collisional records in LL-chondrites. *Meteoritics* **29**, 643-648
- [12] Nishiizumi K. et al. (1980) Cosmic-ray exposure ages of chondrites, pre-irradiation and constancy of cosmic ray flux in the past. *Earth Planet. Sci. Lett.* **50**, 156-170.
- [13] Eugster O. (1988) Cosmic-ray production rates of  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ ,  $^{83}\text{Kr}$  and  $^{126}\text{Xe}$  in chondrites based on  $^{81}\text{Kr}$ -Kr exposure ages. *Geochim. Cosmochim. Acta* **52**, 1649-1662.
- [14] Graf T. et al. (1990) A model for the production of cosmogenic nuclides in chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 2521-2534.
- [15] Nishiizumi K. (1987)  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{10}\text{Be}$  and  $^{36}\text{Cl}$  in meteorites: Data compilation. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **13**, 209-273.
- [16] Wetherill G. W. (1986) Unexpected Antarctic chemistry. *Nature* **319**, 357-358.
- [17] Welten K. C. et al. (2001) Cosmic-ray exposure history of two Frontier Mountain H-chondrite showers from spallation and neutron-capture products. *Meteorit. Planet. Sci.* **36**, 301-317.
- [18] Marti K. and Graf T. (1992) Cosmic-ray exposure history of ordinary chondrites. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **20**, 221-243.
- [19] Scott E. R. D. and Rajan R. S. (1981) Metallic minerals, thermal histories, and parent bodies of some xenolithic, ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**, 53-67.
- [20] Welten K. C. et al. (1997) Cosmic-ray exposure ages of diogenites and the recent collisional history of the howardite, eucrite and diogenite parent body/bodies. *Meteorit. Planet. Sci.* **32**, 891-902.
- [21] Schultz L. and Kruse H. (1989) Helium, neon and argon in meteorites - A data compilation. *Meteoritics* **24**, 155-172.