Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary,
volume 208

# The Halimba bauxite deposit

---

# A halimbai bauxit-előfordulás

*Written by — Írta*
**György BÁRDOSSY**

Budapest, 2007

© Copyright Geological Institute of Hungary (Magyar Állami Földtani Intézet), 2007
All rights reserved! Minden jog fenntartva!

*Serial editor — Sorozatszerkesztő*
GYULA MAROS

*Technikal editor — Műszaki szerkesztő*
OLGA PIROS, DEZSŐ SIMONYI

*DTP*
OLGA PIROS, DEZSŐ SIMONYI

*Cover design — Borítóterv*
DEZSŐ SIMONYI

Published by the Geological Institute of Hungary — Kiadja a Magyar Állami Földtani Intézet

*Responsible editor — Felelős kiadó*
LÁSZLÓ KORDOS
director — igazgató

This book has been subsidized by the Committee on Publishing Scientific Books and Periodicals of Hungarian Academy of Sciences

A könyv a Magyar Tudományos Akadémia Könyv- és Folyóiratkiadó Bizottságának támogatásával készült

ISBN 978-963-671-260-0

# Contents

**The Halimba bauxite deposit**


*Description of the scientific results* ..... 7
Introduction ..... 7
The methods of evaluation ..... 7
Footwall and hanging wall formations ..... 8
The footwall ..... 8
The cover ..... 9
Extent and thickness of the bauxite deposit ..... 10
Tectonic conditions ..... 16
Sedimentologic features of the deposit ..... 18
Petrographic composition of the bauxite sequence and its structure ..... 19
The main and accessory chemical components of the Halimba deposit ..... 24
The trace elements of the Halimba bauxite deposit ..... 45
The mineralogical composition of the deposit ..... 48
The origin of the Halimba bauxite ..... 49
*Applied geology* ..... 54
Experiences of the surface exploration ..... 54
Underground exploration of the deposit ..... 58
Resource estimations ..... 61
Geomathematical and informatical experiences ..... 67
Hydrogeologic experiences ..... 68
*Summarizing ideas and explanations* ..... 69


* * *

**A halimbai bauxit-előfordulás**


*Földtudományi rész* ..... 73
Bevezetés és célkitűzés ..... 73
A kiértékelés módszerei ..... 73
A fedő- és feküképződmények értékelése ..... 73
A feküképződmények ..... 73
Fedő képződmények ..... 74
A bauxitelőfordulás és a bauxittestek kiterjedése, vastagsága ..... 75
Tektonikai felépítés ..... 78
A bauxitösszlet szedimentológiai felépítése ..... 79
A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete ..... 80
A bauxitösszlet fő és járulékos kémiai komponensei ..... 84
A bauxitösszlet nyomelemei ..... 95
A bauxitösszlet ásványtani felépítése ..... 99
A bauxit-előfordulás kialakulása ..... 99

*Alkalmazott, gyakorlati rész* . . . . . 103
A felszíni bauxitkutatás módszertani tapasztalatai . . . . . 103
A föld alatti termelési kutatás tapasztalatai . . . . . 108
A készletszámítások tapasztalatai . . . . . 110
Geomatematikai, számítástechnikai és informatikai tapasztalatok . . . . . 114
Hidrogeológiai tapasztalatok . . . . . 115
*Összefoglaló értékelés* . . . . . 116
*Felhasznált irodalom* . . . . . 117

# The Halimba bauxite deposit

*Description of the scientific results* ..... 7
Introduction ..... 7
The methods of evaluation ..... 7
Footwall and hanging wall formations ..... 8
The footwall ..... 8
The cover ..... 9
Extent and thickness of the bauxite deposit ..... 10
Tectonic conditions ..... 16
Sedimentologic features of the deposit ..... 18
Petrographic composition of the bauxite sequence and its structure ..... 19
The main and accessory chemical components of the Halimba deposit ..... 24
The trace elements of the Halimba bauxite deposit ..... 45
The mineralogical composition of the deposit ..... 48
The origin of the Halimba bauxite ..... 49
*Applied geology* ..... 54
Experiences of the surface exploration ..... 54
Underground exploration of the deposit ..... 58
Resource estimations ..... 61
Geomathematical and informatical experiences ..... 67
Hydrogeologic experiences ..... 68
*Summarizing ideas and explanations* ..... 69

*The author of this monography participated in the geologic exploration and the evaluation of the Halimba deposit. His first goal is to present the scientific experiences of his researches on the deposit. His second goal is to outline the methods applied for the exploration, the resource estimation and the mining-geologic evaluation of the deposit. Some new methods developed by the author and his colleagues are described in more detail.*

*In the first part of the monography the author presents the deposit-model and describes its main properties. In the second part the exploration process and the resource estimation methods are described and the results of surface and underground exploration are compared.*

* * *

*The author wishes to express his sincere gratitude for the help he received from the mining engineers and the geologists of the Halimba mine and the former chief geologists F. Zenkovics, B. Bíró, T. Erdélyi and K. Mérai. He is particularly indebted to B. Jankovics, J. Tiszay, G. Varga and I. R. Szabó for their precious advises and proposals to the manuscript.*

*The visits of the mine and the discussions with I. Kis chief engineer and manager of the mine were very helpful for the author. The author is very thankful to J. Haas for his help in clarifying the stratigraphic position of the immediate footwall rocks.*

*The author is very thankful to O. Piros and D. Simonyi for the very precious editorial work. Finally he expresses his thanks to the presidency of the Hungarian Academy of Sciences for their financial help.*

# Description of the scientific results

## Introduction

The Halimba bauxite deposit is one of the largest in Europe. It is continuously mined by underground methods since 1951.The Halimba bauxite deposit is situated in the western part of Hungary called Transdanubia, more closely in the south-western part of the Bakony Mountains (Figure 1). It is a karst-type deposit with several particular features.

## The methods of evaluation

The content of the monography is based on several hundred visits of the mine, where the author carried out direct observations of the ore body and sampling for different laboratory measurements. The samples are stored in the Department of Mineralogy of the Museum of Earth Sciences, at Budapest.

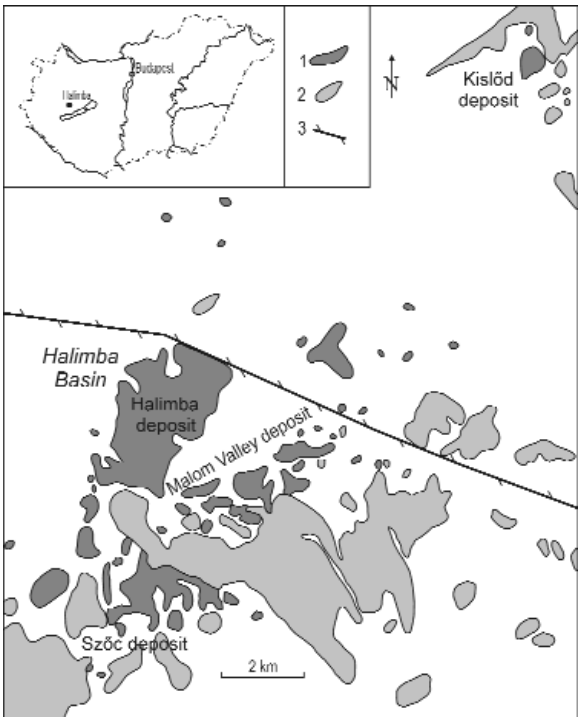


*Figure 1.* Geologic environment of the Halimba bauxite deposit
1 — bauxite sequence on the surface and buried, 2 — Late Triassic carbonate sediments on the surface, 3 — main fault line

***1. ábra.*** A halimbai bauxitelőfordulás földtani környezete
1 — bauxitösszlet a felszínen és felszín alatt, 2 — felsőtriász korú karbonátos képződmények a felszínen, 3 — fő törésvonal

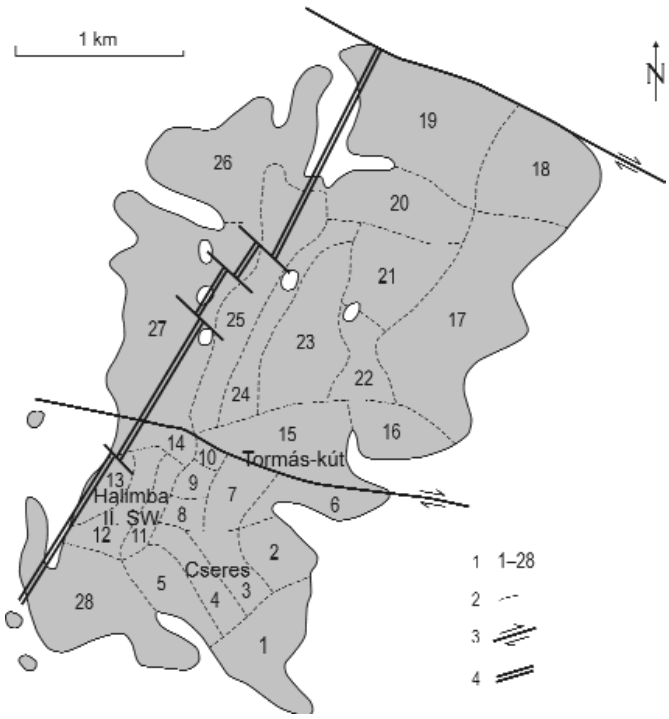


*Figure 2.* Sections of the Halimba deposit, distinguished by their geologic features
1 — number of the section, 2 — contour of the section, 3 — strike-slip faults, 4 — complex tectonic zone

***2. ábra.*** A halimbai bauxitelőfordulás teleptanilag megkülönböztethető részterületei
1 — a részterületek száma, 2 — a részterületek határai, 3 — oldalirányú töréses elmozdulások, 4 — összetett tektonikai zóna

More than 2200 surface boreholes were drilled on the deposit — 80 to 460 metres deep — so far. Co-ordinates of their locations, descriptions of the cores and chemical analyses of the bauxite were collected by the author and stored in a computerized data base. The SPSS statistical programme package was applied to carry out different one- and multivariate statistical calculations. A large number of variograms was calculated by the Variowin programme. The *possibility theory* was applied for the quantitative evaluation of uncertainties and transitions, particularly fuzzy arithmetic and fuzzy logic. The Bayes concept of probability has been applied to evaluate the completeness of exploration results.

Particular attention was paid to the *scale-factor,* as the variables evaluated were rather sensible to this effect. For this purpose the deposit was divided by the author into 28 *sectors* each characterized by different properties such as bauxite thickness, chemical composition and facies of deposition etc. (Figure 2). First the average properties of the sectors were determined, followed by an evaluation of the borehole results separately. Finally variations within the boreholes were evaluated.

## Footwall and hanging wall formations

### *The footwall*

The footwall of the Halimba deposit consists of carbonate rocks of Late Triassic and Early Jurassic formations. Their age and lithofacies was determined separately in each borehole and in the galleries of the underground mine. Based on these data MÁTÉFI (2002) constructed a map of the immediate footwall formations. He distinguished the Main Dolomite Formation, the Kössen Formation, the Dachstein Limestone Formation and the Lower Liassic Kardosrét Limestone Formation. The map of Mátéfi was recently modified and completed by the results of new boreholes and by stratigraphic studies (Figure 3).

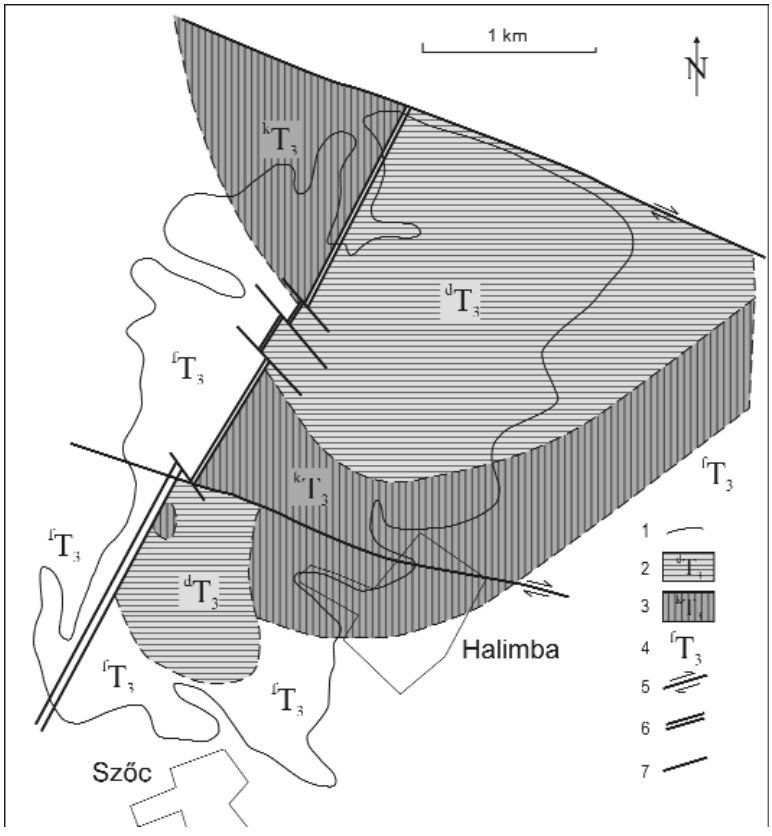


***Figure 3.*** Immediate foot-wall sediments of the Halimba deposit
1 — contour of the bauxite deposit, 2 — Rhaetian Dachstein Limestone Formation, on its top Hettangian Kardosrét Limestone Formation, 3 — Rhaetian–Norian Kössen Formation, limestone and marl, 4 — Norian Main Dolomite Formation, 5 — strike-slip faults, 6 — complex tectonic zone, 7 — transversal faults

***3. ábra.*** A halimbai bauxitelőfordulás közvetlen fekü képződményei
1 — a bauxitelőfordulás körvonala, 2 — rhaeti Dachsteini Mészkő Formáció, felső részén alsó-liász Kardosréti Mészkő Formáció, 3 — rhaeti–nori Kösseni Formáció, mészkő és márga, 4 — nori Fődolomit Formáció, 5 — oldalirányú törésvonalak, 6 — összetett tektonikai zóna, 7 — haránt törések

The basement of the Halimba basin consists of the Norian Main Dolomite Formation, having an estimated thickness of several hundred metres. It is the immediate footwall in the western and southern part of the deposit. The Norian–Rhaetian Kössen Formation consists of limestone and marl. It is the immediate footwall in the central and eastern part of the deposit, with a thickness of 30 m to 50 m. Its upper part is eroded. It is covered by the Rhaetian Dachstein Limestone Formation. The estimated thickness of the formation is 20 m to 200 m. The limestone is characterized by many cavities and some larger caverns filled by bauxitic clay and clayey bauxite.

The southern part of the deposit — called the Cseres ore body — was initially explored in the fifties and sixties. The immediate footwall was described as the Main Dolomite Formation. In 1996 several boreholes were drilled in this sector, between the older boreholes with the aim to find remaining ore. Surprisingly, in all these boreholes Dachstein Limestone was found to be the immediate footwall. To solve these contradictions microscopic studies were carried out by Haas J. He found that the limestone has a typical ooidal and oncoidal texture and its microfossils indicate its Lower Liassic age, the Kardosrét Limestone Formation. In the same time he observed a significant diagenetic dolomitization of the

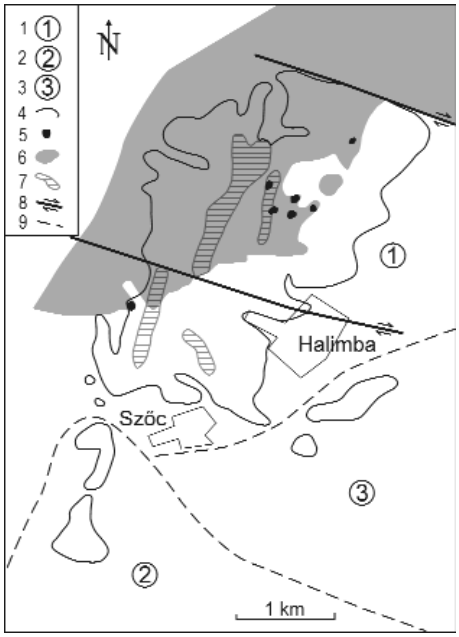


*Figure 4.* The Cretaceous cover of the Halimba deposit and main morphologic features of the footwall surface
1 — Halimba deposit, 2 — Szőc deposit, 3 — Malom Valley deposit, 4 — contours of the bauxite, 5 — karstic-tectonic "wells" filled by Cretaceous sediments, 6 — extent of the Late Cretaceous cover, 7 — karstic-erosional "valleys" of the footwall surface, 8 — strike slip faults, 9 — borders of the deposit-areas

***4. ábra.*** A halimbai bauxitelőfordulás kréta fedőjének elterjedése és a fekü morfológiája
1 — a halimbai bauxitelőfordulás, 2 — a szőci bauxitelőfordulás, 3 — a malom-völgyi bauxitelőfordulás, 4 — a bauxittelepek körvonala, 5 — felső-kréta rétegek karsztos-tektonikus beszakadásai, 6 — felső-kréta fedőrétegek elterjedése, 7 — a fekü felszínének karsztos-eróziós völgyformái, 8 — oldalirányú törésvonalak, 9 — az előfordulások határvonala

limestone (Haas personal communication 2007). It is very likely that this dolomitization led to the erroneous assumption that the footwall belongs here to the Main Dolomite Formation.

The findings of Prof. Haas were corroborated by two boreholes located in the central part of the deposit (Halimba H–1457, H–1460), were the Kardosrét Limestone was found to be the immediate footwall. Additional microscopic investigations were carried out by Haas on samples taken from the Halimba Hgh–11 hidrogeologic borehole, situated in the northern part of the deposit. He found that the upper 100 metres interval of the immediate footwall limestone belongs to the Kardosrét Formation and only the lower part can be accepted as Dachstein Limestone. Diagenetic dolomitization was observed by him in the samples. There is continuity between the Dachstein Limestone and the Kardosrét Limestone. These new findings changed our former assumptions concerning the footwall formations of the deposit. It looks alike that in many places instead of the Dachstein Limestone the Lower Liassic Kardosrét Limestone is the immediate footwall, underlain by the Dachstein Limestone.

The surface of the footwall formations is karstified. Karstic-erosional valleys, elongated in north-east/south-west direction occur on the western side of the deposit (Figure 4), filled by bauxitic rocks. A further peculiar feature of the footwall surface is the presence of 20–60 m deep sinkholes, filled by bauxite. They have circular or oval contours, with an area of 1000 $m^2$ to 1700 $m^2$. They are situated in the northern part of the deposit, as indicated on the Figure 4.

## *The cover*

The western and northern part of the deposit is covered by Late Cretaceous (Santonian) marl and conglomerate of carbonate rock debris, called the Csehbánya Formation. It is of fluvial origin. Stratigraphic studies indicate that originally the entire bauxite deposit was covered by this formation, but has been entirely eroded in the south-eastern part of the deposit during the Palaeocene and Lower Eocene emersion. The actual contours of the remaining Santonian sediments are indicated on Figure 4. The estimated thickness of this formation is about 50 m.

In the north-western part of the deposit the Csehbánya Formation is overlain by the sediments of the Ajka Coal Formation, also of Santonian age. They contain brown coal beds, accompanied by clay, marl and sandstone. Because of the erosion of its upper part the original thickness of the formation is not known. Campanian limestones and sandstones were preserved in some tectonic grabens to the west of the Halimba deposit.

The area of the Halimba Basin was emerged during the Palaeocene and Lower Eocene. After the erosion mentioned above a flat abrasional surface was formed. Transgression of Middle Eocene sediments followed from the north-west. The transgression started with a rise of the groundwater level. Marshes were formed in small basins and creek-valleys, filled by grey to black pyritic-markasitic clay and clayey lignite of 1 m to 5 m thickness. At the beginning of the transgression clayey marl and marl were deposited, called the Darvastó Formation. It is followed by Nummulitic limestone of shallow marine facies, called the Szőc Limestone Formation (Kecskeméti 2005).

It was presumed by some geologists, that during the Palaeocene – Lower Eocene emersion bauxite was deposited on the surface of the Santonian sediments and was covered by the Middle Eocene transgression. This presumption was not confirmed by the borehole sequences and by the underground mining operations.

In the northern part of the deposit the Szőc Limestone Formation is overlain by the Padrag Marl Formation of Bartonian–Priabonian age. This formation is also partly eroded. The youngest sediments in the Halimba Basin are sand, clay and gravel of Pleistocene age.

## Extent and thickness of the bauxite deposit

The deposit has an 8 km² extent. It is 4 km long in north-eastern direction and perpendicularly 1.5 to 2.5 km wide. A main tectonic line closes the deposit on its north side. The deposit is divided into two parts by another tectonic line, having a west–north-west/ east–south-east direction (Figure 2).

One kilometre to the south-east of the deposit is the northern end of the *Malom Valley group of deposits* characterized by lenticular ore bodies. To the south of the Halimba deposit is situated the *Szőc group of deposits* with similar lenticular ore bodies (Figure 4). Their relationship to the Halimba deposit will be discussed in the genetic chapter (The origin of the Halimba bauxite).

The contour of the Halimba deposit is rather irregular, sinuous. Two deep embayments of the contour occur at the north-western edge of the deposit (Figure 2). Evaluation of the exploration data and construction of geologic profiles revealed that they are erosional valleys cut into the bauxite deposit. The valleys are 10 m to 20 m deep and they are filled by coarse grained fluvial sediments of the Santonian Csehbánya Formation. They were formed after the emersion of the Halimba Basin during the Santonian.

The boreholes and the mining operations revealed in the northern part of the deposit five spots of 50 m to 100 m diameter, where the bauxite sequence was entirely lacking. Their places are indicated on Figure 2. They correspond to local eminences of the footwall rocks. They should not be confounded with the small tectonic grabens occurring in other parts of the deposit, being also barren spots.

The determination of the surface of the deposit is simple where it is covered by Middle Eocene sediments. On the other hand, it is quite difficult at places where the Csehbánya Formation covers the deposit and where the top of the deposit consists of very similar coarse grained detritic carbonate rocks that are conglomerates or conglobreccias. In this case a right division can be made by the chemical composition of the rocks. The basic assumption is that the rocks of the bauxite sequence contain bauxite minerals, in our case boehmite or gibbsite. The $Al_2O_3/SiO_2$ ratio must be in this case more than 0.85. Thus the surface of the bauxite sequence can be traced were the ratio falls below 0.85. This distinction worked well in all places where the upper border of the bauxite sequence was uncertain.

The main bauxitic rock types have different extensions within the deposit. This is shown on Figure 5. Only the bauxitic clay extends over the entire area of the deposit. The clayey bauxite occupies a smaller area. It is continuous in the central part and forms isolated lenses within the bauxitic clay in the external parts of the deposit. The bauxite occupies only the central part of the deposit, where it is continuous. The contours of the bauxite are extremely sinuous, much more irregular than the external contours of the deposit. All these features are closely related to the origin of the deposit.

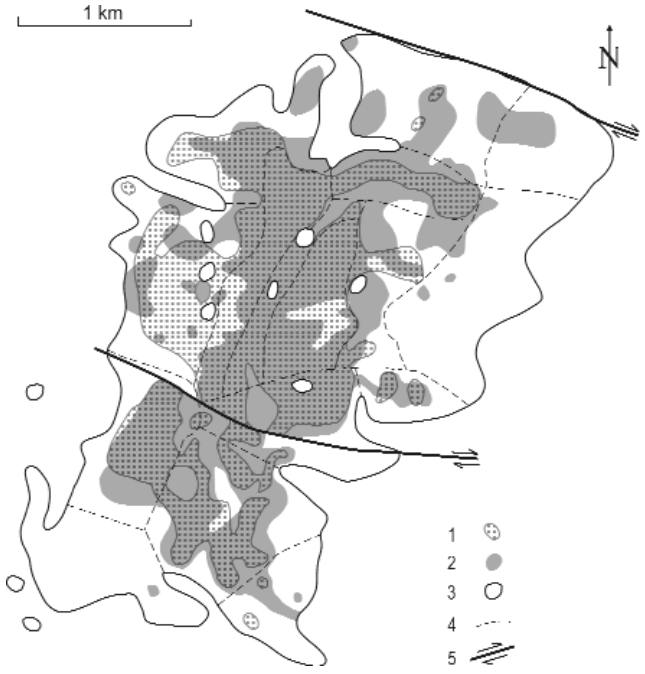


***Figure 5.*** The main bauxitic rock-types of the Halimba deposit
1 — bauxite, 2 — clayey bauxite, 3 — bauxitic clay, 4 — borders of the petrographic units, 5 — strike-slip faults

***5. ábra.*** A halimbai bauxitelőfordulás kőzettani felépítése
1 — szorosan vett bauxit, 2 — agyagos bauxit, 3 — bauxitos agyag , 4 — kőzettani egységek határai, 5 — oldalirányú törésvonalak

A characteristic feature of the deposit is the presence of detritic carbonate sediments in the south-western part of the deposit, called *Cseres Division.* They fill a south-west/north-east oriented valley of the footwall surface and they consist mainly of carbonate conglomerate, breccia and carbonate aleurite. Layers of high grade bauxite were found within this sequence. The spatial position of these layers being quite regular it was decided that the boreholes must not reach the footwall rocks; it is enough to sample the bauxite and to determine the position of the bauxite layers. For this reason it was not possible to determine the entire thickness of the bauxite sequence in this area (sector No. 13 on Figure 2). It is estimated by the author to be about 60 m to 100 m.

The total thickness of the bauxite sequence was determined in all other sectors of the deposit and the main statistical parameters of the thickness were calculated. The values of the first 14 sectors are shown on Table 1. The averages for the sectors vary from 7.2 m to 32.0 m, but in most sectors it is between 10 m and 20 m. The median and the "trimmed mean" (diminished by 5% external values) do not differ significantly from the mean. The most frequently occurring value — the mode — shows also similar values. This and the values of

***Table 1.*** Statistical parameters of the thickness of the bauxite-sequence in the sectors of the southern part of the Halimba deposit

| Sector | Mean | Median | Mode | Trimmed mean | Minimum | Maximum | Confidence interval | | Standard deviation | Relative st. deviation (%) | Skewness |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | minimum | maximum | | | |
| 1 | 7.2 | 8.2 | 8.0 | – | 2.8 | 9.5 | 2.4 | 12.0 | 3.0 | 41.7 | -1.76 |
| 2 | 15.2 | 13.5 | 12.0 | 14.9 | 10.5 | 24.7 | 12.3 | 18.1 | 4.3 | 28.3 | 1.26 |
| 3 | 16.8 | 16.9 | 18.5 | 16.4 | 10.2 | 31.0 | 14.6 | 18.9 | 5.6 | 31.9 | 1.10 |
| 4 | 15.5 | 14.4 | 20.5 | 15.3 | 5.3 | 30.0 | 13.1 | 17.9 | 6.7 | 43.0 | 0.48 |
| 5 | 10.1 | 9.9 | 8.5 | 9.7 | 3.0 | 25.7 | 8.2 | 12.0 | 5.0 | 42.9 | 1.10 |
| 6 | 11.6 | 11.4 | 12.0 | 11.3 | 4.9 | 27.5 | 10.1 | 13.1 | 4.0 | 34.3 | 2.17 |
| 7 | 21.2 | 20.6 | 21.5 | 20.7 | 5.8 | 46.0 | 19.8 | 22.2 | 7.0 | 33.0 | 0.75 |
| 8 | 13.5 | 12.6 | 13.0 | 13.4 | 7.7 | 20.5 | 11.4 | 15.7 | 3.6 | 26.4 | 0.30 |
| 9 | 15.0 | 15.2 | 15.5 | 14.9 | 9.3 | 22.0 | 11.2 | 18.9 | 4.6 | 30.1 | 0.21 |
| 10 | 14.7 | 16.0 | 15.0 | 14.5 | 7.2 | 26.4 | 10.6 | 18.9 | 6.1 | 41.8 | 0.41 |
| 11 | 17.1 | 15.4 | 14.0 | 16.9 | 6.4 | 31.0 | 14.6 | 19.6 | 7.1 | 41.5 | 0.51 |
| 12 | 32.0 | 28.2 | 27.0 | 30.7 | 21.6 | 77.0 | 29.2 | 34.9 | 10.7 | 33.4 | 2.15 |
| 13 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 14 | 22.6 | 22.1 | 10.0 | 21.6 | 4.7 | 69.4 | 19.2 | 26.1 | 12.2 | 54.2 | 1.43 |

the "skewness" show that the distribution of the thickness is only slightly asymmetric. The direction of the asymmetry is positive, that is towards the larger thicknesses. The maximum and minimum thicknesses, measured in the boreholes are also indicated on Table 1. The maximum thickness is 77.0 m in a borehole of the 12$^{th}$ sector. The minimum values vary between 3 m and 22 m.

The uncertainty of the average values for the sectors is expressed by confidence intervals, calculated on the 95% level of confidence. They are also indicated on Table 1. They are considered to be relatively short. The variability of the thickness is expressed by the standard deviation and by the coefficient of variation. The values of this coefficient vary from 26% to 54%, being smaller than the similar values of the bauxite (sensu stricto).

Similar statistical values were detected in the northern part of the deposit (sectors 16–27). Here again the largest mean thickness occurs in the "valleys" mentioned before.

An isoline map was constructed by the author for the southern part of the deposit taking into account the thickness of the bauxite sequence measured in the boreholes (Figure 6). The thickness is 5 m to 20 m over large part of this area. It increases to 60–100 m in the western part as a filling of the "valley" mentioned above. There is a much smaller and very sinuous area in the eastern part where the thickness increases to 30–40 m. How to interpret this distribution? The texture and the structure of the bauxite sequence indicate a fluvial origin. In the time of the arrival of the bauxitic material the Halimba Basin was a shallow trough. The filling of the above mentioned valley was also a fluvial process.

PATAKI et al. (2002) supposed that it was rather a talus. I do not agree with this opinion. First the morphology of the Halimba Basin in the time of bauxite accumulation was gentle, only low hills occurred on the rim of the basin. This morphology could not allow the accumulation of such a thick sedimentary sequence. The elongated form of the valley filling does not correspond to a talus cone. Thus I prefer the accumulation by a fluvial process, which was characterized by intermittent floods and longer breaks. The thicker sinuous bauxite sequence in the east accumulated in a different way. I presume that it is of alluvial origin, accumulated during short floods.

Let us evaluate now the thickness distribution of the *bauxite* (sensu stricto). As a first step no significant difference of thickness was found between the part of the deposit covered by Senonian sediments and the south-eastern part covered by Middle Eocene ones. All sedimentary features of the Senonian sediments indicate that they covered initially the entire deposit, but their south-eastern part was eroded during the Palaeocene – Lower Eocene emersion. It is surprising, but we must accept that the erosion did not touch significantly the bauxite sequence.

The author calculated the average bauxite thickness for all sectors of the deposit. As the bauxite does not cover the entire area of the sectors, only boreholes dissecting bauxite were included into the calculation. Figure 7 represents the extent of the *bauxite bodies* in the southern part of the deposit and their average bauxite thickness. Three large bauxite bodies occur in this area connected by narrow necks. In the south is the *Cseres* bauxite body. I distinguished in it four sectors characterized by slightly different facies-properties. The bauxite body called *Halimba II SW* is situated in the "valley" mentioned above several times. Here again four sectors could be distinguished. The third large bauxite body is situated in the north-eastern part of the area. It could not be subdivided into sectors. Three smaller bauxite bodies can be seen in the central part of the study area. Finally another smaller elongated bauxite body occurs at the eastern rim of the area. This is not a random distribution, but it is the consequence of the accumulation process of the bauxite. The northern part

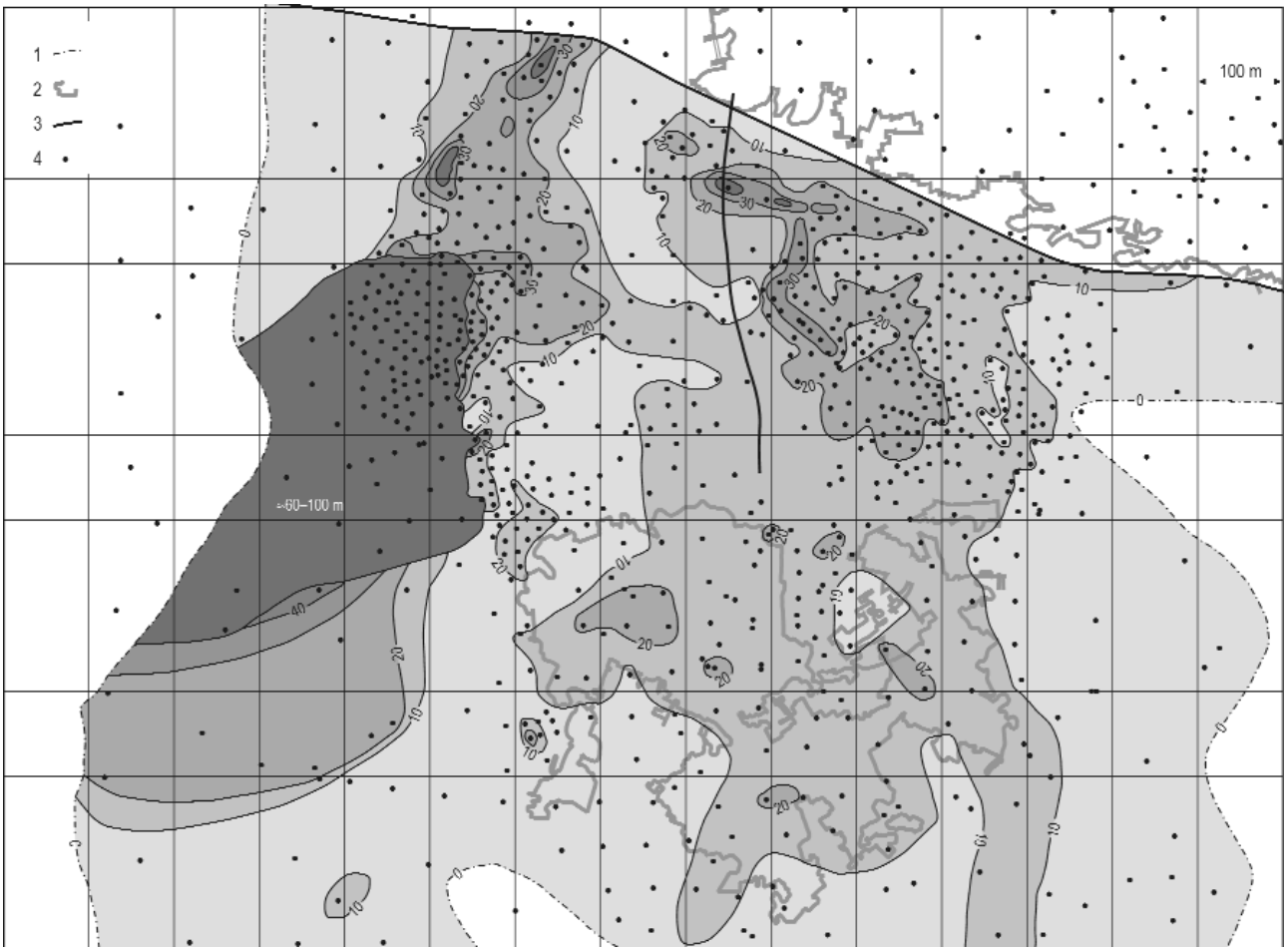


***Figure 6.*** Thickness of the bauxite sequence in the southern part of the Halimba deposit
1 — contour of the bauxite sequence, 2 — excavated bauxite bodies, 3 — fault lines, 4 — surface boreholes
***6. ábra.*** A bauxitösszlet vastagsága a halimbai előfordulás déli részén
1 — a bauxitösszlet határa, 2 — kitermelt bauxittestek, 3 — törésvonalak, 4 — felszíni fúrások

of the deposit is less dissected than the southern one. It forms one huge, single bauxite body, having very sinuous contours (Figure 5).

The statistical parameters of the bauxite have been calculated in the same way as for the entire bauxite sequence (Table 2): The average thickness of the bauxite varies from 1.5 m to 12.3 m. It is largest in the elongated central sector of the western bauxite body and in its northern continuation (Figure 7). Relatively large is the thickness of the central sector too in the Cseres bauxite body. This thickness configuration has a similar-

***Table 2.*** Statistical parameters of the bauxite thickness in the sectors of the southern part of the Halimba deposit

| Sector | Mean | Median | Mode | Trimmed mean | Minimum | Maximum | Confidence interval | | Standard deviation | Relative st. deviation (%) | Skewness |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | minimum | maximum | | | |
| 1 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | – | 0.3 | 3.5 | 0.0 | 3.8 | 1.4 | 93.3 | 1.32 |
| 2 | 3.3 | 2.3 | 2.0 | 3.1 | 1.5 | 7.5 | 1.8 | 4.7 | 2.1 | 65.5 | 1.66 |
| 3 | 5.0 | 4.0 | 10.5 | 4.7 | 0.5 | 15.5 | 3.4 | 6.6 | 4.0 | 80.5 | 1.08 |
| 4 | 6.1 | 5.3 | 9.5 | 5.7 | 1.0 | 19.5 | 4.4 | 7.8 | 4.7 | 76.6 | 1.45 |
| 5 | 4.0 | 3.7 | 1.5 | 3.7 | 0.5 | 12.5 | 2.9 | 5.1 | 2.9 | 73.3 | 1.26 |
| 6 | 3.8 | 2.0 | 2.5 | 3.3 | 0.6 | 17.0 | 2.3 | 5.3 | 4.0 | 104.7 | 1.94 |
| 7 | 5.0 | 3.0 | 1.5 | 4.8 | 0.5 | 22.1 | 4.5 | 6.4 | 5.5 | 102.0 | 2.06 |
| 8 | 3.2 | 3.1 | 2.5 | 3.2 | 1.0 | 5.9 | 2.2 | 3.2 | 1.7 | 52.5 | 0.32 |
| 9 | 3.0 | 2.4 | 2.0 | 2.9 | 1.5 | 6.0 | 1.7 | 4.2 | 1.5 | 49.7 | 1.32 |
| 10 | 3.6 | 2.5 | 5.0 | 3.2 | 1.0 | 12.0 | 1.4 | 5.7 | 3.2 | 91.0 | 1.99 |
| 11 | 3.5 | 3.0 | 2.0 | 3.3 | 0.5 | 12.5 | 2.7 | 4.4 | 2.5 | 70.3 | 1.85 |
| 12 | 12.3 | 10.5 | 20.0 | 12.0 | 0.8 | 31.0 | 10.4 | 14.1 | 8.3 | 67.8 | 0.49 |
| 13 | 3.7 | 3.5 | 4.0 | 3.6 | 0.3 | 6.6 | 3.2 | 4.2 | 2.1 | 57.3 | 0.78 |
| 14 | 7.1 | 5.3 | 2.0 | 6.3 | 0.5 | 36.1 | 5.2 | 9.1 | 7.0 | 98.3 | 2.01 |

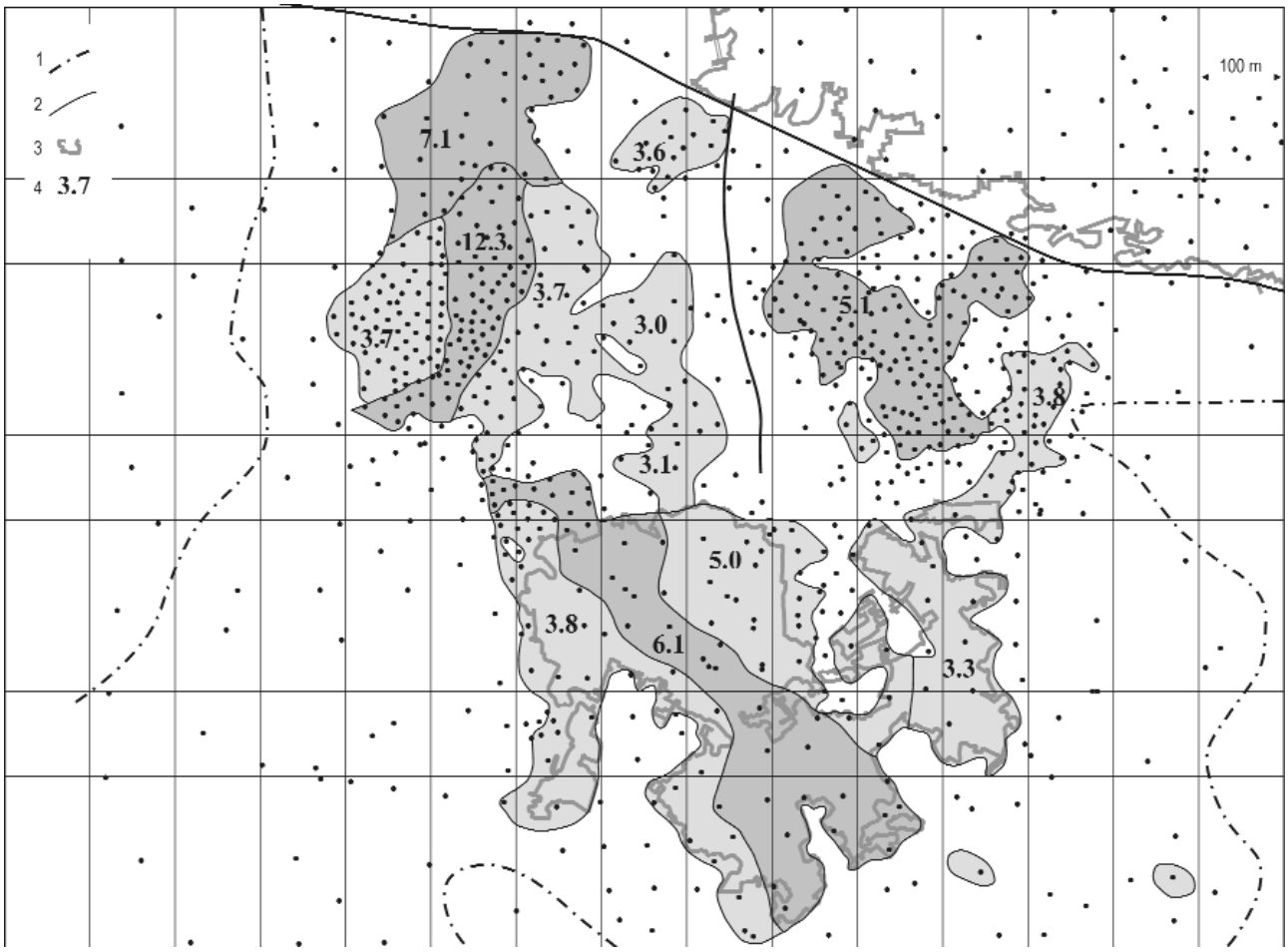


*Figure 7.* Average bauxite thickness of the sections in the southern part of the Halimba deposit
1 — contour of the bauxite sequence, 2 — fault lines, 3 — excavated bauxite bodies, 4 — average bauxite thickness (metre)
*7. ábra.* A részterületek átlagos bauxitvastagsága a halimbai előfordulás déli részén
1 — a bauxitösszlet határa, 2 — törésvonalak, 3 — kitermelt bauxittestek, 4 — átlagos bauxitvastagság (méter)

ity with the western bauxite body. In both cases the central sector is interpreted as a river-bed facies, flanked on both sides by levee facies of the river bank, characterized by smaller thickness. It is not clear whether these two facies configurations were initially connected or not. It is quite possible that they were connected to the west, but the bauxite layer was destroyed by the coarse carbonate sediments arriving from the south-west. We will return to this problem in the following chapters.

It is very likely that the two elongated sectors at the eastern part of the study area (sectors 2, and 6) are fillings of a narrow creek cut in the underlying clayey bauxite and bauxitic clay. The thin bauxite lenses in the central part of the study area are interpreted as very shallow valleys cut into the underlying clayey bauxite layer. The third large bauxite body in the north-east has a medium average thickness (see Figure 7). It is interpreted as an alluvial – flood basin accumulation. Recent observations in the galleries of this bauxite body confirmed this assumption, the bauxite having a coarse detrital structure.

In most sectors there is only a small difference between the mean, the trimmed mean and the median (Table 2). This is valid for the mode also, except for the central sector in the western part of the area, where the most frequent thickness — the mode — is round 20 m. Similarly a higher mode was found in the central sectors of the Cseres deposit. It is interpreted as a particular feature of the river-bed facies. The maximum values of the bauxite thickness are 36.1 m and 31.0 m. They correspond to local depressions of the footwall surface. The statistical skewness is positive in all sectors. The asymmetry is only weak as the skewness values vary between 0.49 and 2.06.

The variability of the bauxite thickness has been expressed by the standard deviation and by the coefficient of variation (Table 2). Here again the latter one is more suitable for a comparison of the sectors. The variability of the bauxite is two to three times higher than for the entire bauxite sequence (see Tables 1 and 2), it varies from ±49.7% to 104.7%. The spatial distribution of the coefficient of variation is presented on Figure 8. It is highest in the north-eastern part of the study area. This is in good correspondence with the facies of accumulation of these two bauxite bodies, outlined above. The variability of the bauxite thickness diminishes from the

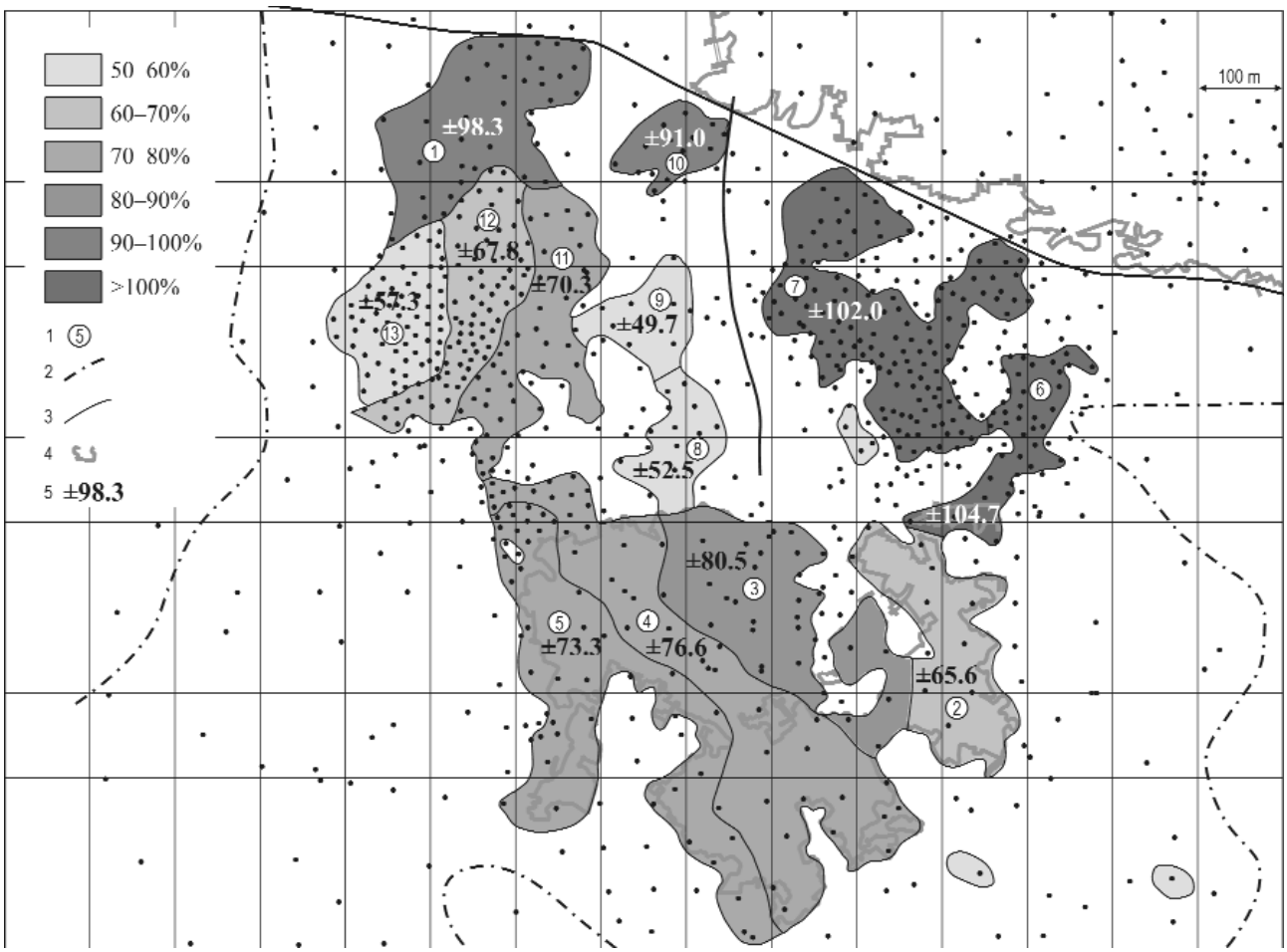


*Figure 8.* Coefficient of variation of the bauxite thickness in the southern part of the Halimba deposit
1 — numbers of the sectors, 2 — contour of the bauxite sequence, 3 — fault lines, 4 — excavated bauxite bodies, 5 — coefficient of variation of the bauxite thickness (%)

***8. ábra.*** A bauxitvastagság relatív szórása a halimbai előfordulás déli részén
1 — a részterületek száma, 2 — a bauxitösszlet határa, 3 — törésvonalak, 4 — kitermelt bauxittestek, 5 — a bauxitvastagság relatív szórása (%)

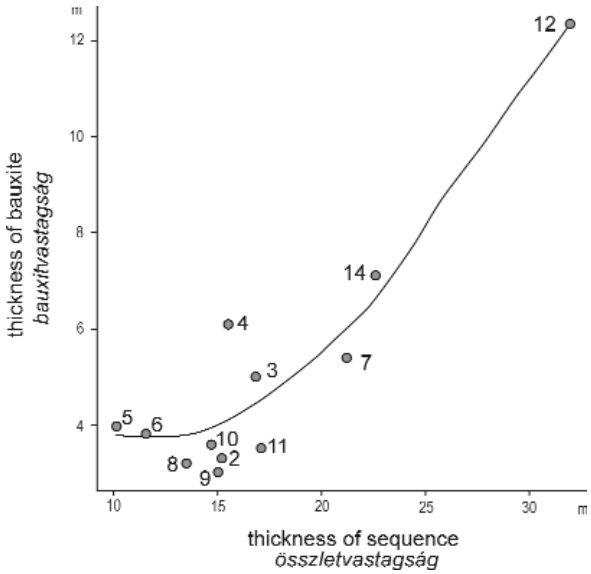


*Figure 9.* Correlation of the sequence thickness and of the bauxite thickness (calculated from the sector averages). The numbers indicate the sectors

***9. ábra.*** Az összletvastagság és a bauxitvastagság korrelációja (a részterületátlagokból számolva). A számok a részterületeknek felelnek meg

east to the west in both the Cseres and the Halimba II SW bauxite bodies. The smallest variability was found in the central part of the study area with ±49.7% to 52.5%, corresponding to the quiet conditions of bauxite accumulation at these places.

The uncertainty of the mean values is expressed by the confidence intervals at 95% level of confidence (Table 2). The length of the confidence interval is 2% to 4%. These values express acceptable reliability of the means, taking into account the very high variability of the bauxite thickness.

Surface exploration and mining experiences indicated that there is a certain correlation between the thickness of the bauxite and of the entire bauxite sequence. To clarify this assumption a scatter plot was constructed for the mean values of the sectors (Figure 9).There exists a non-linear correlation that is closest where the average bauxite thickness is more than 5 m. Below this value the correlation diminishes and finally vanishes.

A further scatter plot was constructed to study the correlation between the average bauxite thickness of the sectors and the standard deviation (Figure 10). The

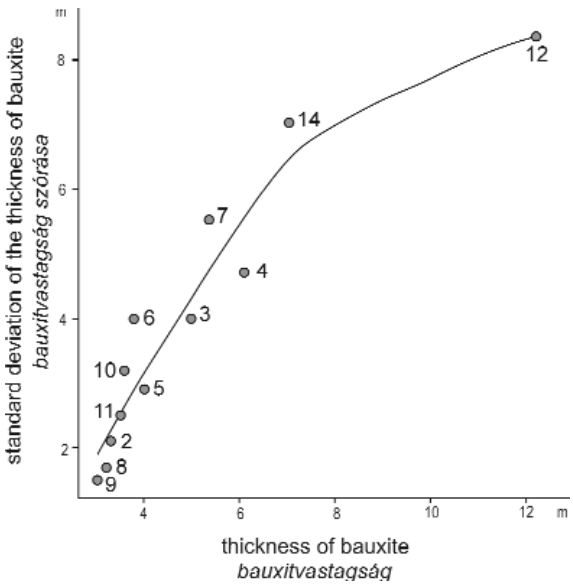


***Figure 10.*** Correlation of the bauxite thickness with its standard deviation (calculated from the sector averages). The numbers indicate the sectors

***10. ábra.*** A bauxitvastagság és szórásának korrelációja (a részterület átlagokból számolva). A számok a részterületeknek felelnek meg.

positive correlation is clear, but is again of non-linear type. The correlation can be modelled by a logarithmic function. In this case the correlation is closest in the interval of small bauxite thickness.

Further scatter plots were constructed to study the correlation of the bauxite thickness and bauxite sequence thickness on the level of individual boreholes. The correlation is much less close than for the sector averages, but it can be recognized by the "LLR-smoother curves", constructed additionally. The borehole values of three selected sectors are shown on Figure 11. The reliability of these scatter plots depends on the number of the boreholes, indicated on the figures. The very loose and non-linear type of these correlations can be well recognized.

A further way to study and to express the spatial variability of the bauxite thickness is furnished by the construction of *variograms* and particularly by the variogram models expressing the ranges of influence of the bauxite thickness. Several hundred variograms were constructed by the author, by applying the matheronian method. Principally isotropic variograms were calculated, based on the values of 509 boreholes. The results are presented on Figure 12. Let me stress that shorter ranges of influence express higher variability in the given sector. The most important finding was that the ranges of influence are very different, even within one bauxite body. This is a confirmation for the necessity and usefulness of the distinction of sectors within the bauxite bodies. But even these values are averages! Local ranges of influence may significantly deviate from these average values. This was confirmed in many places of the recent mining operations. The longest ranges of influence reach 50–65 m and the shortest ones are shorter than 10 m (exact values could not been determined). In other bauxite deposits of

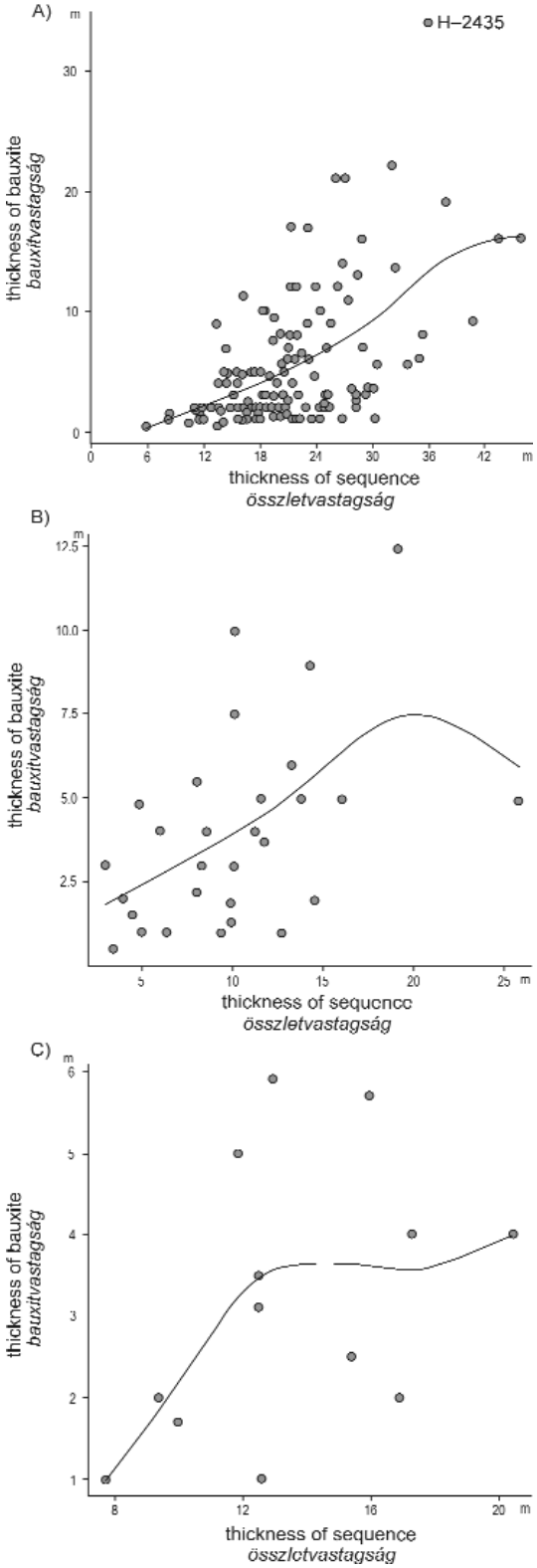


***Figure 11.*** Correlation of the sequence thickness and of the bauxite thickness in three sectors

A = eastern main bauxite body (sector No. 7, 133 boreholes), B = western edge of the Cseres bauxite body (sector No. 5, 29 boreholes), C = central bauxite body (sector No. 8, 13 boreholes). The points indicate boreholes

***11. ábra.*** Az összletvastagság és a bauxitvastagság korrelációja három részterületen.

A = keleti főtelep (7. részterület, 133 fúrás), B = Cseres nyugati széle (5. részterület, 29 fúrás), C = középső telep (8. részterület, 13 fúrás). A pontok fúrásoknak felelnek meg

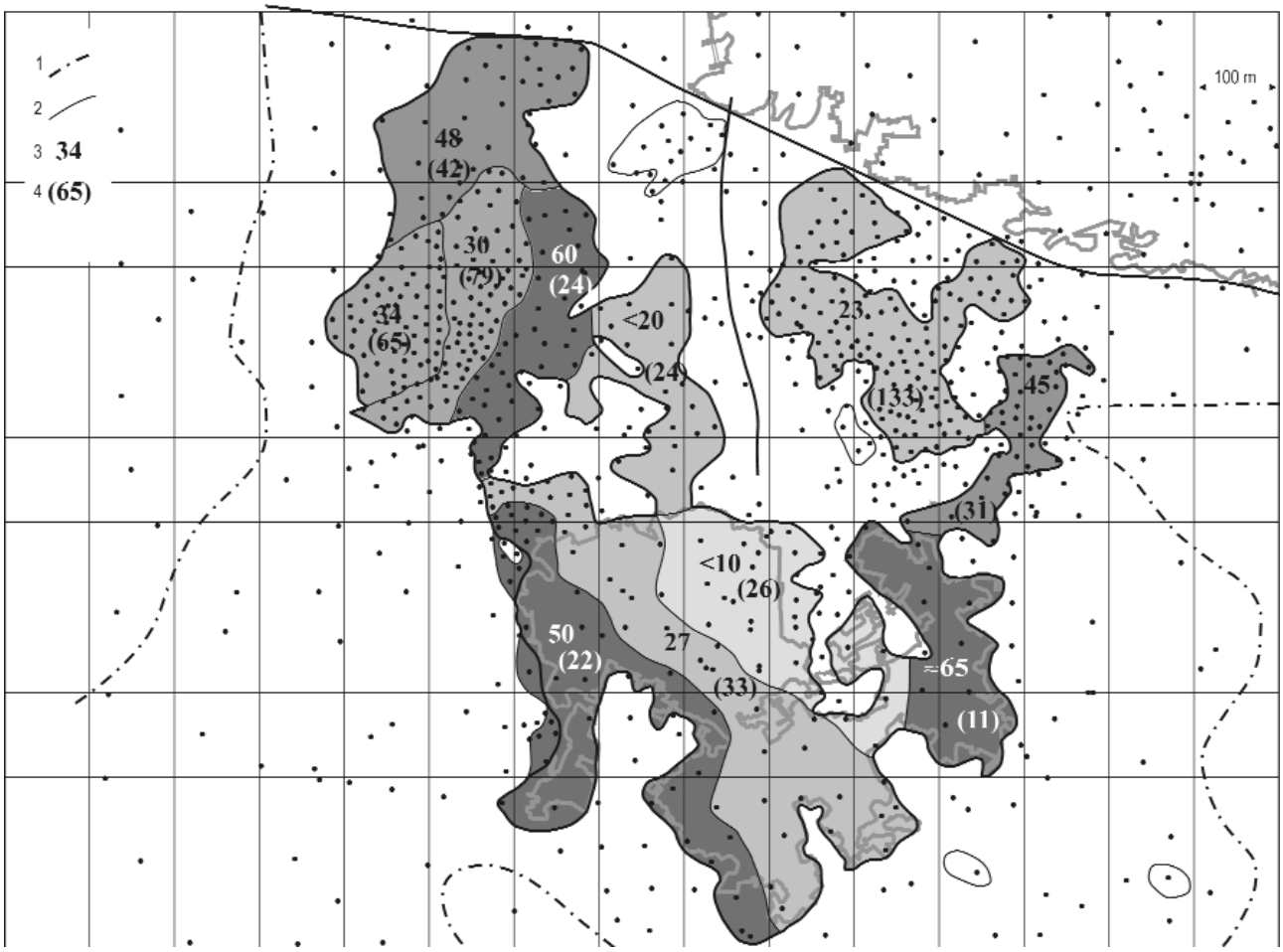


***Figure 12.*** Ranges of influence of the bauxite thickness calculated from the variograms in the southern part of the Halimba deposit
1 — contour of the bauxite sequence, 2 — contours of the sectors, 3 — ranges of influence (metre), 4 — number of boreholes involved into the calculation

***12. ábra.*** A bauxitvastagság variogramokból számított hatástávolságai a halimbai előfordulás déli részén
1 — a bauxitösszlet határa, 2 — a részterületek határai, 3 — hatástávolság (méter), 4 — a számításba bevont fúrások száma

Hungary 50 m to 100 m long ranges of influence were determined, that is longer ones, than in the Halimba deposit.

A further aspect of spatial variability is the *contour of the bauxite bodies*. Sinuous, complicated contours indicate a higher areal variability of the bauxite bodies. The contours in the eastern part of the study area are more sinuous than in the western part (Figure 12). This is only an empiric opinion. It can be quantified by measuring the surface of the different bauxite bodies. The outlines of the corresponding squares can be easily calculated. Than the length of the corresponding bauxite contour is calculated. Dividing this value by the outline of the square gives a ratio, being obligatory more than one. The larger the ratio the higher is the areal variability of the given bauxite body.

Summarizing our experiences, the *bauxite bodies* are the basic units of our investigation. Differences in the facies of accumulation and in some properties were the base for subdividing the bauxite bodies into *sectors*. The results outlined above confirmed this assumption. A further distinct step of the investigation is the scale of the boreholes, evaluated separately. The final step is the study of the bauxite and of the entire bauxite sequence within one selected borehole. This principle will be followed in the further evaluations of this monography.

## Tectonic conditions

All exploration reports of the Halimba deposit contain the chapter of the Tectonic conditions. The authors of these reports agreed that the main tectonic elements in the Halimba Basin are *fracture lines*. They are mostly normal faults, but some reversed faults were also detected.. The most frequent directions of the tectonic lines are NNW/SSE and NNE/SSW.

ERDÉLYI M. (1965) when evaluating the tectonic structure of the deposit started from the assumption that the base of the Middle Eocene formations was a flat, nearly horizontal abrasional surface. All tectonic movements were related by him to this base-surface. The author of this monography applied also this concept with a small modification. He assumed that the base-surface had a slight (2–4°) dip in north-west direction. A large number of so-called tectonic and palaeogeographic profiles were constructed by him, related to the above mentioned base-surface. The profiles were very suitable to detect tectonic movements that occurred before the formation of the base-surface. Several older fault lines were detected together with the general north-western dip (5–10°) of the Senonian cover. Erdélyi found also some additional fault lines of east/west and north/south direction.

The most important tectonic line in the Halimba Basin cuts the bauxite deposit on its northern side. MÉSZÁROS (1982) detected that a lateral movement of about 2 km occurred along this line. This right-side movement pushed the rocks in east–south-east direction. The displacement occurred after the Eocene, according to Mészáros. In a later publication (MÉSZÁROS1983) he assigned an intra Sarmatian (Late Miocene) age for the tectonic movement. According to MÁTÉFI (2002) the displaced Triassic and Creatceous formations can be found — together with the bauxite sequence to the south-east of Padragkút village.

A second fault-line, almost parallel to the above mentioned one cuts the deposit into a northern and southern part (see Figure 2). A right-side horizontal displacement of about 200 m to 300 m occurred along this fault line. It seems to be older than the northern one, as the Middle Eocene cover was not involved into the displacement. Another older fault line was detected during the exporation of the last years, starting in the south at the Cseres bauxite body and ending by reaching the above mentioned second fault line. It certainly had an important morphologic role during the accumulation of the bauxite sequence, as it clearly separates the baux-

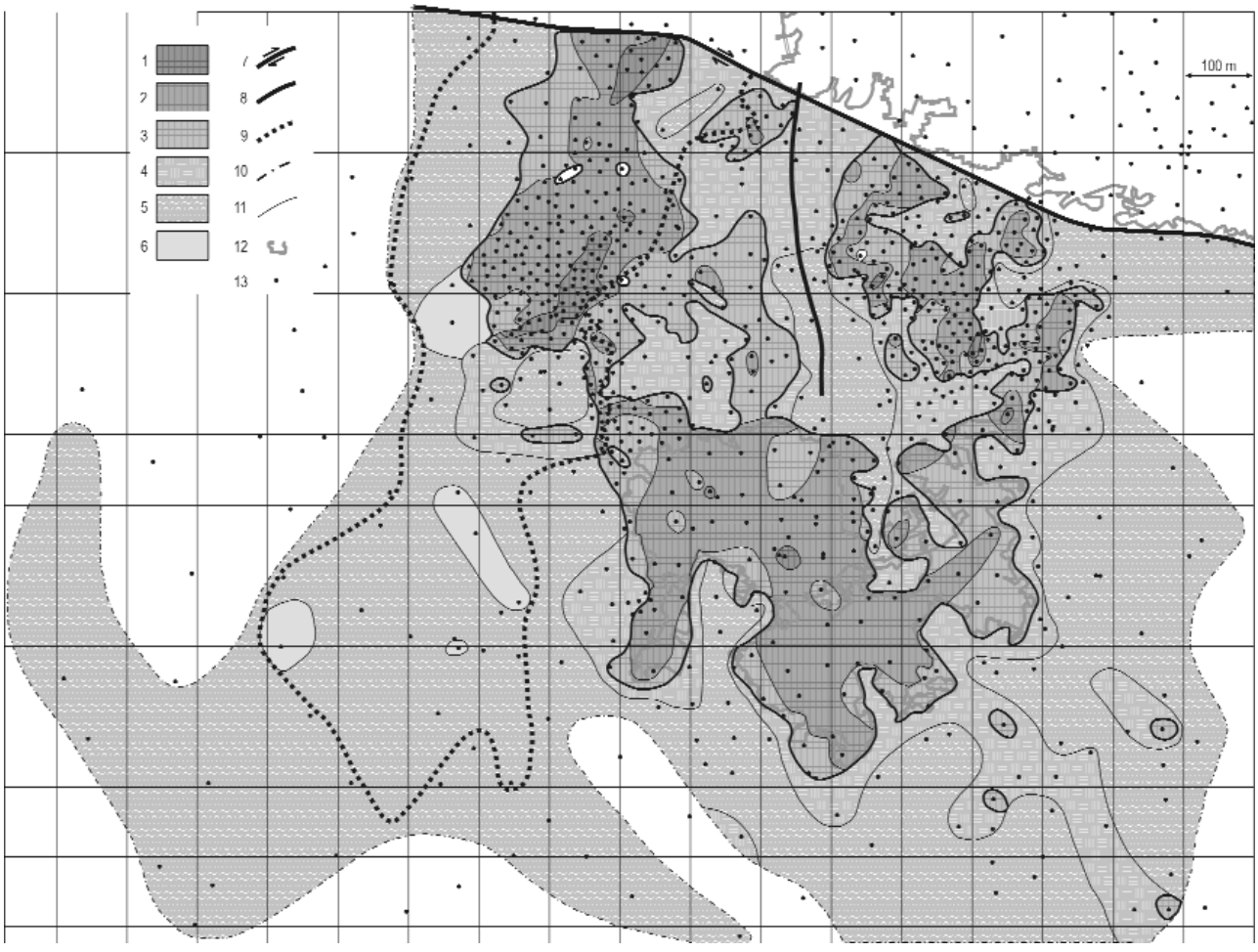


***Figure 13.*** Areal distribution of the rock types in the southern part of the Halimba deposit
1 — bauxite $SiO_2$ <4%, thickness >10 metres, 2 — bauxite $SiO_2$ <4%, thickness <10 metres, 3 — bauxite $SiO_2$ 4–10%, 4 — clayey bauxite, 5 — bauxitic clay, 6 — detritic carbonate rocks, 7 — main fault lines, 8 — older fault line, 9 — contour of the extent of detritic carbonate rocks, 10 — contour of the bauxite sequence, 11 — contour of the bauxite bodies, 12 — excavated bauxite bodies, 13 — surface boreholes

***13. ábra.*** A bauxitösszlet kőzetfajtáinak elterjedése a halimbai előfordulás déli részén
1 — bauxit, $SiO_2$ <4%, vastagság >10 méter, 2 — $SiO_2$ <4%, vastagság <10 méter, 3 — bauxit $SiO_2$ 4-10%, 4 — agyagos bauxit, 5 — bauxitos agyag, 6 — karbonáttörmelékes kőzetek, 7 — fő törésvonalak, 8 — idősebb törésvonal, 9 — a karbonáttörmelékes kőzetek elterjedésének határa, 10 — a bauxitösszlet határa, 11 — a bauxittestek körvonala, 12 — lefejtett terület, 13 — fúrás

ite bodies of the eastern side, from those of the western side. Mainly bauxitic clay and clayey bauxite occur along this fault line in a strip of 100 m to 150 m width (see Figure 13 and chapter Petrographic composition of the bauxite…).

An important tectonic line was detected by mining exploration and the mining operations along the western side of the deposit, having a NNE/SSW direction (Figure 2). It is supposed to be of late Kimmeridgian age. Compressional movements occurred along it. The displacement continued during the Laramian orogeny and a several metres broad tectonic zone was formed, filled by a fault breccia, consisting of bauxite debris, cemented by bauxitic clay. The main reverse fault line is dissected by a number of normal faults of north-west/south-east direction. 10 m to 40 m of horizontal displacement occurred along these fault lines. They were formed probably during the Pyrenean orogenic phase, but the displacement could continue up to the Miocene age. PATAKI et al. (2002) studied the geometry and formation of this tectonic zone. They found that a dolomitization of the Dachstein Limestone took place along the tectonic line in a strip of 50 m to 200 m width. On the other hand, the Main Dolomite Formation occurs to the west of the tectonic zone.

Several small-scale normal faults were detected all over the deposit during the mining operations. Having only local extent they are not indicated on the maps of the monography.

Peculiar deep "wells" of circular or oval outline were detected at some places by the surface exploration and were confirmed by the subsequent mining operations. They are 50 m to 150 m deep and are filled by Cretaceous sediments. They are of 40 m to 80 m in diameter. Their walls are almost vertical. No or only very few bauxite was found in these wells. Their location is indicated on Figure 4. MÉSZÁROS (1981) explained their formation by collapse of the rocks, generated by tectonic spreading. He assumed that the process took place during the Laramian orogenic phase. However the circular and oval outlines of the wells are not in concordance with this explanation. It is more likely that at crossings of fault lines the dissolution of the carbonate rocks became more intense, finally resulting in collapse of the rocks. At any rate, the problem is not resolved and needs further investigations.

## Sedimentologic features of the deposit

The earlier published evaluations were limited to the recoverable part of the bauxite. The evaluations of this monography are extended to the entire bauxite sequence, as the origin of the deposit can be better understood if the entire deposit is evaluated.

According to the descriptions of the borehole cores and the observations made by the author in the mine, the deposit consists of *layers* of different composition. The stratification is generally obscure, but it is recognizable be naked eye. A faint stratification occurs also within the layers. The layers of the detritic carbonate rocks have generally clear cut contacts with the layers of bauxite. It is an important feature of the deposit, that the layers have significantly different composition, however transitions may also occur. The number of layers and the differences of their composition express the amount of variability of the sedimentary process when the deposit was formed. For this reason the number of layers in each surface borehole was determined by the author.

First the number of layers was recalculated into percentages, allowing the comparison of the different sectors, as presented in the Table 3. The distribution of the frequency of the layers is close to normal with a slight right tailed asymmetry. In the southern part of the deposit, were the evaluation was more complete the bauxite sequence consists of one to 18 layers. In most cases (52.7%) 3 to 5 layers were distinguished in the cores of the boreholes. Six to ten layers were found in 31.0%, one to two layers in 12.8% and finally 11 to 18 layers in 3.6% of the boreholes.

The number of layers is rather different in the sectors. The highest number of layers was found in the western bauxite body, in the sectors No.12 and 14. It is very likely that even more layers occur in the sector No.13, but as mentioned before, most boreholes did not reach the footwall formations, so we do not know their exact number. The interlayering of bauxitic and detritic carbonate layers (conglobreccias) explain this spatial distribution.

The number of the bauxite layers was also calculated by the author, and recalculated into percentages. The results are presented on the right side of Table 3. The most important feature is that in 71.6% of all productive boreholes bauxite occurs in one single layer. The percentage quickly diminishes with the number of layers. Five layers are the maximum observed in the southern part of the Halimba deposit. Three to five layers were found in the western ore body, where the detritic carbonate layers separate the bauxite layers. Similar conditions were found in the northern part of the deposit in a former study (BÁRDOSSY et al. 1998a, b). It seems alike that there was a relatively long period of bauxite accumulation in the Halimba Basin, interrupted several times by the arrival of detritic carbonate rocks in the south-western part of the deposit. This problem will be discussed in more detail in the chapter: The origin of the Halimba bauxite.

The bauxite (sensu stricto) is situated generally in the upper part of the deposit. Only in the western part of the Cseres bauxite body was found bauxite on the bottom of the bauxite sequence.

*Table 3.* Number of layers in the boreholes in the sectors of the southern part of the Halimba deposit

| Sector | Number of lyers in the bauxite sequence | | | | | | | | | | | | | | | | | | Number of boreholes | Bauxite layers | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 12 | 12 | 5 | 2 | – | – | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 32 | 4 | – | – | – | – | – |
| 2 | – | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 11 | 10 | – | 1 | – | – | – |
| 3 | – | 4 | 6 | 6 | 3 | 4 | 3 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 26 | 18 | 8 | – | – | – | – |
| 4 | – | 4 | 10 | 6 | 8 | 4 | – | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 33 | 25 | 8 | – | – | – | – |
| 5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 22 | 15 | 7 | – | – | – | – |
| 6 | – | 3 | 8 | 11 | 6 | 3 | 2 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 33 | 31 | 2 | – | – | – | – |
| 7 | – | 1 | 21 | 40 | 30 | 19 | 13 | 8 | – | 1 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | 134 | 117 | 15 | 2 | – | – | – |
| 8 | – | 1 | 1 | 5 | 6 | – | 1 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 15 | 14 | 1 | – | – | – | – |
| 9 | – | 1 | – | 4 | 2 | 1 | – | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 9 | 7 | 2 | – | – | – | – |
| 10 | – | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | – | – | 2 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | 12 | 9 | 3 | – | – | – | – |
| 11 | – | – | 1 | 8 | 10 | 4 | 6 | 2 | 1 | | 2 | – | – | – | – | – | – | – | 34 | 24 | 9 | 1 | – | – | – |
| 12 | – | – | 7 | 9 | 7 | 13 | 13 | 6 | 6 | 6 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 79 | 28 | 30 | 17 | 1 | 3 | – |
| 14 | – | – | 4 | 6 | 7 | 8 | 7 | 5 | 6 | 4 | 1 | 1 | – | 1 | – | – | – | – | 50 | 29 | 15 | 4 | 2 | – | – |
| 28 | 10 | 11 | – | 7 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 28 | – | – | – | – | – | – |
| Sum | 24 | 42 | 72 | 116 | 86 | 62 | 47 | 24 | 15 | 12 | 7 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | – | 2 | 518 | 331 | 100 | – | – | – | – |
| % | 4.7 | 8.1 | 13.8 | 22.1 | 16.8 | 12.9 | 9.1 | 4.6 | 2.9 | 2.3 | 1.4 | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | | 0.4 | | 71.6 | 21.6 | 5.6 | 0.6 | 0.6 | – |

## Petrographic composition of the bauxite sequence and its structure

In the former years mainly the bauxite sensu stricto was studied by the different authors. The author of this monography tried to evaluate all rock types of the bauxite sequence and to understand their relationships. The following rock types were distinguished by him in the Halimba deposit:

*1. Bauxite* sensu stricto — $SiO_2$ content less than 9.9%, $Al_2O_3$ more than 46%, carbonate minerals less than 10%.

*2. Clayey bauxite* — $SiO_2$ content 10–19.9%.

*3. Bauxitic clay* — $SiO_2$ content more than 20%.

*4. Red, kaolinitic clay* — $Al_2O_3/SiO_2$ less than 0.85, does not contain bauxite minerals.

*5. Bauxite and clayey bauxite containing 10% to 50% limestone and dolomite debris.*

*6. Limestone and dolomite conglomerate* — carbonate content more than 50%.

*7. Limestone and dolomite siltstone (aleurolite)* — grain size less than 2 mm, carbonate content more than 50%.

*8. Bauxite and clayey bauxite* — containing more than 10% secondary calcite

*9. Grey pyritic-marcasitic bauxite, clayey bauxite and bauxitic clay* — S content more than 0.6%.

The rock types listed above form in the bauxite sequence independent layers. Symmetric frequency distribution of their main chemical components is a confirmation of their separate existence. The areal distribution of the rock types is illustrated on Figure 13. Separate signs indicate the contours of the bauxite bodies. They are extremely sinuous, deep embayments and long narrow bulges occur quite frequently. Separate studies of the author revealed that they correspond to shallow channels, filled by bauxite or clayey bauxite.

In the southern part of the deposit, on the western and eastern side of the bauxite bodies the entire bauxite sequence consists of bauxitic clay. On the western rim it alternates with detritic carbonate rocks layers. The extent of the bauxitic clay is largest and in most places it furnishes the contour of the deposit. In the southern edge of the deposit layers of red kaolinitic clay occur between the clayey bauxite layers.

A stripe of bauxitic clay and clayey bauxite was located by the boreholes in the central part of the deposit, starting from the WNW/ESE striking main fault line and ending in the Cseres bauxite body. It is about 400 m long and 50 m to 100 m wide, separating the main bauxite bodies in the west and the east (Figure 13). It is interpreted by us as a flat hill, where no bauxite could be sedimented. An older fault line follows this zone in north/south direction.

The large western bauxite body is flanked directly by bauxitic clay, whereas in all other cases clayey bauxite occurs around the bauxite bodies. Bauxitic clay and clayey bauxite occur also in the area of the bauxite bodies, below and above the bauxite layers.

Within the bauxite itself a high-grade ($SiO_2$ less than 4%) and medium-grade ($SiO_2$ 4% to 9.9%) bauxite type can be distinguished. They are spatially separated. The high-grade type is mainly limited to the central, channel-bed facies of accumulation in the western and the Cseres bauxite body (Figure 13). It forms in the large eastern bauxite body a very irregular stripe of sinuous contours. The medium-grade bauxite occurs on both sides of the high-grade one and it is interpreted by us as levee (channel-rim) sediment. The high-grade bauxite is concentrated in the thickest parts of the bauxite layer. Only small packages of high-grade bauxite were found outside these thick layers. These features are valid also for the northern part of the deposit.

Based on these observations the author of the monography tried a quantitative evaluation of the above outlined features. He divided the nine, above described petrographic types into three genetic groups as follows:

— Rock types derived from the sedimentary accumulation of lateritic weathering products: bauxite, clayey bauxite, bauxitic clay and red kaolinitic clay.

— Rocks consisting of detritic material of carbonate rocks: limestone and dolomite conglomerate, siltstone and their transition into bauxitic rocks

— Rock types of secondary origin: bauxite containing secondary calcite, grey pyrite and marcasite containing bauxite

The thickness of the rock types was determined in all boreholes and recalculated into percentages (Table 4). The sector No.13 was excluded from the table, as in most of its boreholes the total thickness of the bauxite sequence is unknown. The table shows a rather regular pattern. The proportion of the laterite derived rock types reaches 95–99% in the eastern part of the deposit, as shown on Figure 14. It diminishes to 84–95% in the Cseres bauxite body and in the central part of the deposit. A further decrease was found in the western bauxite body from 57%, down to 35%.

The proportion of the bauxite sensu stricto within this first group shows also a characteristic areal pattern (Figure 14). It is smallest in the eastern part of the Cseres bauxite body (23%) and it grows gradually to 45% in its western part. It reaches 36% in the northern part of the western bauxite body and 38% in its central part despite the fact that the total proportion of the lateritic group strongly decreased in this bauxite body. This seems to be a regular areal trend, confirmed by the large number of the evaluated boreholes.

***Table 4.*** Proportion of rock-types in the sectors of the southern part of the Halimba deposit

| Sector | Proportion of rock types | | | | | | | | | | Mean thickness | | Number of boreholes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | bauxite | clayey bauxite | bauxitic clay | red clay | bauxite with detritic carbonate | conglobreccia | carb. aleurolite | bauxite with secondary calcite | grey bauxite on top | grey bauxite on bottom | bauxite sequence (m) | bauxite (m) | |
| 1 | 3.6 | 17.3 | 63.7 | 4.0 | 2.4 | 1.5 | - | - | 7.5 | - | 5.3 | 1.5 | 32 |
| 2 | 23.1 | 24.5 | 51.8 | - | - | - | - | - | 0.1 | - | 14.9 | 3.4 | 11 |
| 3 | 30.3 | 19.4 | 46.5 | - | 1.1 | - | - | - | 2.7 | - | 17.2 | 5.2 | 26 |
| 4 | 39.0 | 29.4 | 20.2 | - | 1.0 | 7.9 | - | - | 2.6 | - | 15.2 | 5.9 | 33 |
| 5 | 45.4 | 26.5 | 14.3 | - | 2.9 | 7.5 | - | 1.0 | 2.5 | - | 9.4 | 4.3 | 22 |
| 6 | 33.1 | 37.2 | 25.0 | - | - | 0.5 | - | 0.2 | 4.0 | - | 11.4 | 3.8 | 33 |
| 7 | 25.5 | 48.4 | 15.2 | 0.1 | 0.2 | 1.7 | 0.5 | 1.9 | 6.5 | - | 21.1 | 5.4 | 134 |
| 8 | 24.1 | 30.2 | 40.2 | - | 1.0 | 2.1 | - | 0.5 | 1.8 | - | 12.6 | 3.0 | 15 |
| 9 | 27.1 | 34.7 | 33.7 | - | - | - | - | - | 4.4 | - | 15.7 | 4.3 | 9 |
| 10 | 25.4 | 48.2 | 10.2 | - | 6.5 | 4.3 | 0.6 | - | 4.7 | - | 14.8 | 3.8 | 12 |
| 11 | 23.3 | 41.9 | 18.4 | - | 1.2 | 11.0 | 0.5 | 0.2 | 3.5 | - | 17.2 | 4.0 | 34 |
| 12 | 37.7 | 12.3 | 4.8 | - | 7.7 | 28.8 | 8.3 | - | 0.4 | - | 37.4 | 14.1 | 79 |
| 14 | 36.2 | 10.3 | 10.6 | - | 16.2 | 11.8 | 10.9 | - | 0.2 | 3.9 | 21.7 | 7.8 | 50 |
| 28 | - | 0.2 | 60.4 | 13.9 | 0.4 | 6.9 | - | - | 18.2 | - | 4.4 | - | 28 |

Some years ago, when evaluating the deposits of the Szőc bauxite occurrence I found an areal segregation of the bauxite, clayey bauxite and bauxitic clay. It could be explained by the fluvial transportation and accumulation of the lateritic weathering products. The clayey material transported in the form of colloidal solutions accumulated mainly in the farther parts of the occurrence, under more quiet facies conditions. On the other hand, the harder, more detritic bauxitic material accumulated preferably in areas of channel-bed facies. The clayey bauxite accumulated as a transition between these two areas. A similar areal pattern can be seen on Figure 13 for the Halimba bauxite deposit.

If only the proportion of the clayey bauxite and the bauxitic clay is evaluated than a SE/NW directed belt, enriched with bauxitic clay can be distinguished. The proportion of bauxitic clay gradually decreases from the southeast to the northwest: 52–46%, 40–24%, 10%. This can be seen on Figure 14. On both sides of this belt the proportion of bauxitic clay is smaller. This pattern is interpreted by us as a characteristic fluvial facies pattern.

***Figure 14.*** Percentage of the bauxitic rock types within the bauxite sequence in the southern part of the Halimba deposit
1 — Bauxite %, 2 — clayey bauxite %, 3 — bauxitic clay %, 4 — contour of the bauxite sequence, 5 — contours os the sectors, 6 — excavated bauxite
***14. ábra.*** A bauxitos kőzetek vastagságának százalékaránya a bauxitösszletben a halimbai előfordulás déli részén
1 — bauxit %, 2 — agyagos bauxit %, 3 — bauxitos agyag %, 4 — a bauxitösszlet határa, 5 — a részterületek határai, 6 — kitermelt bauxit

It has been already mentioned before, that layers of *red kaolinitic clay* occur in the south-western rim of the deposit, thus the role of the red kaolinitic clay was very limited in the Halimba bauxite deposit. Let us stress that kaolinitic clay occurs in the lower part of most lateritic bauxite deposits. Thus the presence of kaolinitic clay layers in the Halimba bauxite deposit cannot be considered as an exceptional feature.

The second large group of rocks — distinguished above — is that of the *detritic carbonate rocks.* They are called the "Cseres Member of the Halimba Bauxite Formation" and are considered as an independent lithostratigraphic unit. It consists of rock debris of different size, ranging from one millimetre up to 30 cm. The grain size diminishes from the south to the north. They are angular or slightly rounded and are cemented by bauxite, clayey bauxite or bauxitic clay. An important feature of this group is that the debris consists exclusively of carbonate rocks, mainly limestone and dolomite of Mesozoic age. No quartz or silicate rocks were found so far. The proportion of the cementing material diminishes downward.

The areal distribution of this group is very characteristic, as seen on Figure 15. The rocks of this group do not occur in the eastern rim of the Cseres bauxite body. They represent only 1% in the neighbouring levee sector. They reach 9% in the central channel-bed sector and finally reach 11% in the western rim of this bauxite body. They form generally thin layers in the lower part of the bauxite sequence.

A similar pattern is found when going to the north: In the sector of the eastern rim (sector No. 6) only 0.5% of the bauxite sequence consists of this rock group. The large eastern bauxite body contains 3% of them. 12% is reached in the central part of the area. Finally, in the western bauxite body an abrupt increase can be observed: First 12.5% in its eastern sector, followed by 39% in the northern sector. The central sector contains 45%. The amount in the western sector can be only estimated to 60% or even more. The thickness of the individual detritic carbonate rock layers varies from half metre to more than 10 m and it may change significantly within a short distance.

The distribution of the detritic carbonate rocks was considered before to be completely irregular. BÁRDOSSY et al. (1998a, b) first found that these rocks preferably filled the western valley. This areal filling changed grad-

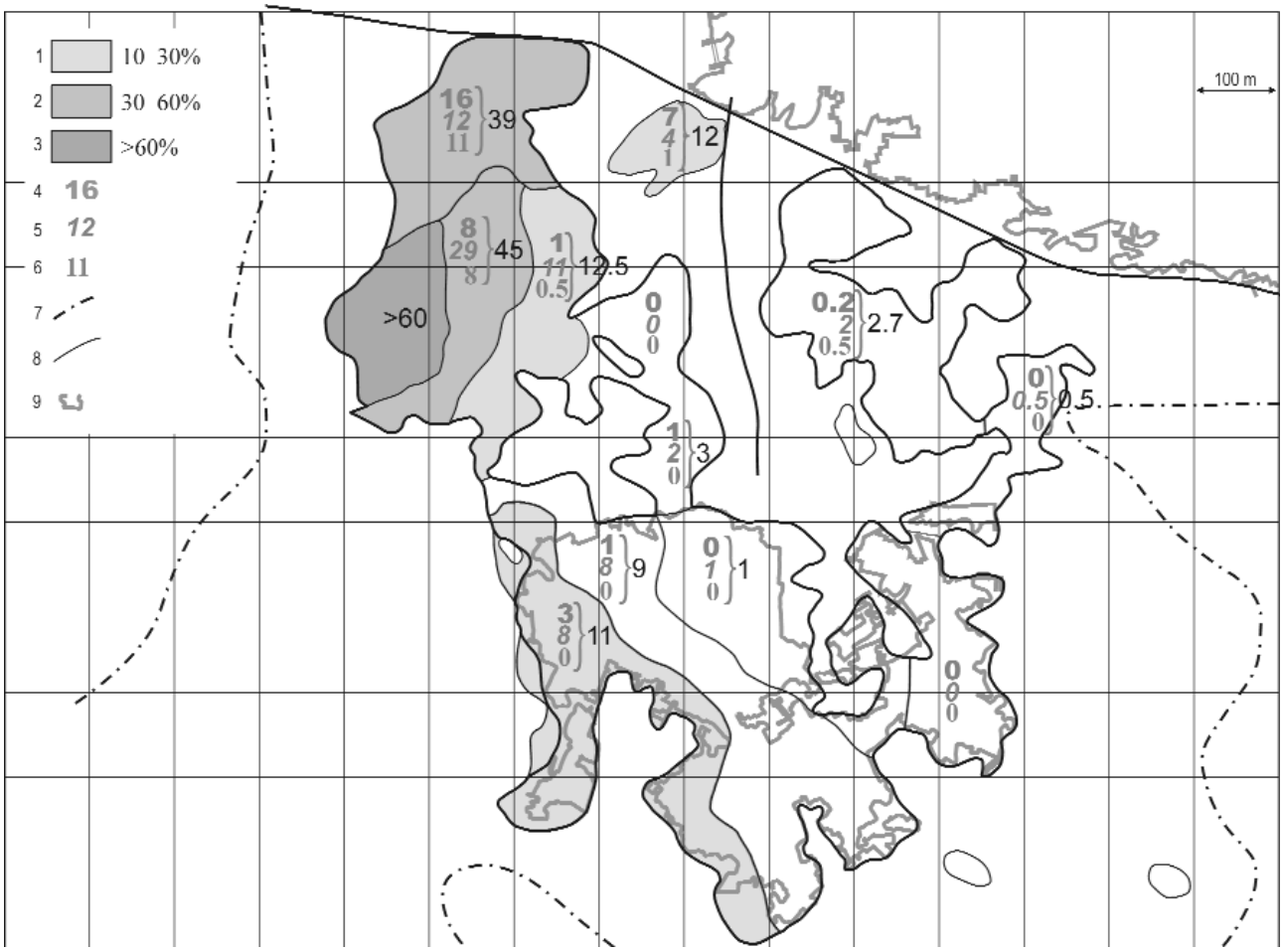


***Figure 15.*** Percentage of detritic carbonate rocks within the bauxite sequence in the southern part of the Halimba deposit
1 — percentage 10–30, 2 — percentage 30–60, 3 — percentage more than 60, 4 — bauxite containing dolomite and limestone debris, 5 — conglobreccia, 6 — aleurolite consisting of dolomite and limestone debris, 7 — contour of the bauxite sequence, 8 — contours of the sectors, 9 — excavated bauxite

***15. ábra.*** A karbonáttörmelékes kőzetek vastagságának százalékaránya a bauxit összletben a halimbai előfordulás déli részén
1 — 10–30%, 2 — 30–60%, 3 — 60%-nál nagyobb, 4 — dolomit- és mészkőtörmelékes bauxit, 5 — konglobreccsa, 6 — dolomit- és mészkőaleurolit, 7 — a bauxitösszlet határa, 8 — a részterületek határai, 9 — kitermelt bauxit

ually to the north into sinuous stripes of some tenths of metres width (Figure 13). They are considered as creeks cut into the bauxite sequence. Finally, in the north only isolated spots of detritic carbonate rock layers occur. This pattern was confirmed by the later mining activities.

There is an important trend within the distribution of this group of rocks: conglobreccia being dominant in the south-western sectors of the deposit, and its proportion diminishing in north-eastern direction (Figure 15). It is gradually replaced by carbonate aleurolite and by the transitional bauxitic and detritic carbonate rocks. This again confirms our assumption that the detritic carbonate material was transported to the Halimba Basin from the south-west, from a relatively short distance.

Chemical analyses were carried out for many detritic carbonate rock samples of the boreholes. They furnished important information that will be discussed in the chapter: The main and accessory chemical components of the Halimba deposit.

The proportion of the detrital carbonate rocks is very variable in the bauxite sequence of the deposit. For this reason a special evaluation was carried out recalculating the total amount of the lateritic group to 100%. The results of this evaluation are presented on Figure 16. The belt of bauxitic clay separating the western and the eastern bauxite bodies became clearly visible by this evaluation. The proportion of bauxitic clay is highest in the south-east (53%) and it diminishes gradually to 48%, 43%, 35% and finally to 12%. In the same time an increase of the clayey bauxite can be observed from 24% to 32%, 36% and finally to 58% (Figure 16). It is interpreted as a process of segregation occurring during the accumulation of the bauxite sequence.

As mentioned above, the third group consists of secondarily altered bauxite and clayey bauxite. Their proportion within the bauxite sequence is shown in Table 4. The bauxite containing secondary precipitations of *calcite* is most frequent in the eastern bauxite body (sector No.7) where it reaches 1.9%. It was detected only in four other sectors in even smaller amount. It occurs always on the top of the bauxite layer and quickly diminishes down-

ward. Its thickness is generally less than 2 m. There is only one borehole (Halimba H–2494) where its thickness reached 3.4 m. At places where two or more bauxite layers were detected, only the upper one contains these secondary precipitations. There are several boreholes where secondary calcitic bauxite was observed in the bauxite, but its amount did not reach the 10% cut-off value. They were not included into the above listed averages.

The *grey pyritic-marcasitic bauxite* is much more frequent than the calcitic one. It occurs on the top of the bauxite sequence where the immediate cover is marshy clay of Middle Eocene age. A reducing process transformed the originally red bauxite into the grey one. As shown on Table 4, this secondary rock-type is present in all sectors of the southern part of the deposit. Its proportion is generally 1% to 8%, but it reaches 18.2% in the south-western edge of the deposit (sector No. 28). Its thickness varies mostly from 0.5 m to 3 m. Its maximum thickness was found in borehole Halimba H–2512 with 7.9 m. No pyritic-marcasitic bauxite occurs below the Senonian cover.

Grey pyritic-marcasitic bauxite was found in 9 boreholes on the bottom of the bauxite sequence in the north-western side of the western bauxite body (sector No. 14). Its average thickness is 4.7 m, with a maximum value of 14.4 m in the borehole Halimba H–2233. It forms a strip, elongated in north-east/south-west direction, following the down faulted side of an ancient fault line that existed already when the bauxite accumulated in the Halimba Basin. It was met recently also in a gallery of the mine to the south-west of the above mentioned strip. This peculiar occurrence of the pyritic-marcasitic bauxite is interpreted by us as the product of a secondary, reducing process. Marshy conditions developed on the down faulted side of the fault line leading to the reduction of the originally normal, red bauxite. There is no indication that the grey bauxite was formed directly during the accumulation of the deposit.

Special investigation was carried out by the author to detect any regularity in the sequence of the different layers of the deposit. The method of *Markov-chains* was applied for this evaluation. Let us remind that those sedimentary processes are called Markov-chains, where the presence or absence of a feature in a layer depends partially from the preceding layer and partially from not detected stochastic processes.

***Figure 16.*** Percentage of the thickness of the three bauxitic rock types in the southern part of the Halimba deposit.
1 — bauxite in %, 2 — clayey bauxite in %, 3 — bauxitic clay in %, 4 — contour of the bauxite sequence, 5 — contours of the sectors, 6 — excavated bauxite, 7 — bauxitic clay 100%, 8 — the highest percentage of bauxitic clay within the bauxite bodies

***16. ábra.*** A három bauxitos kőzetfajta vastagságának százalékos aránya a halimbai előfordulás déli részén
1 — bauxit aránya %-ban, 2 — agyagos bauxit aránya %-ban, 3 — bauxitos agyag aránya%-ban, 4 — a bauxitösszlet határa, 5 — a részterületek határa, 6 — kitermelt bauxit, 7 — bauxitos agyag 100%, 8 — a legnagyobb bauxitos agyag arány a bauxittesteken belül

For the evaluation the bauxite sequence was divided from the bottom to the top into intervals of one meter thickness. "Transition frequency matrices" and "transition probability matrices" were calculated according to the method described in the book of DAVIS (1986). Eight profiles were selected, containing 70 boreholes. They were directed in south-east/ north-west direction following the assumed direction of bauxite accumulation.

The main results of these evaluations are as follows: The succession of the layers is very similar in all sectors of the deposit. Only the south-western part of the deposit has particular sedimentologic features because of the arrival of the detritic carbonate material. It is a general trend that in this part of the deposit bauxite layers directly overlay the layers of the detritic carbonate rocks. On the other hand, in the eastern and northern part of the deposit bauxitic clay is generally followed by clayey bauxite and finally by bauxite. Characteristic is the quick variation of different detritic carbonate rock layers in the western part of the deposit. This feature indicates an intense, highly variable process of accumulation of these rock types. The results of these investigations were applied to the genetic evaluation of the deposit, discussed in chapter: The origin of the Halimba bauxite.

The *structure* and *texture* of the Halimba bauxite was studied by several authors. A detailed macroscopic and microscopic study was carried out by MINDSZENTY (1983, 1984). She distinguished primary, early diagenetic and late diagenetic processes producing different textural elements in the bauxite. Based on these studies she distinguished bauxites of "vadose" facies, accumulated at higher places, and "saturated" bauxites, accumulated close to the groundwater level — at lower places. The bauxites of the Malom Valley occurrence are of vadose facies, those of the Halimba Basin of saturated facies.

JUHÁSZ (1988) carried out detailed macroscopic and microscopic investigations on borehole samples of the Halimba deposit. She found that the grain size of the textural elements increases from the bottom to the top of the deposit. She distinguished a set of local facies types within a fluvial environment: channel bar, channel load, flood plain, flood basin and marshy facies types. These facies types occur in the form of layers, being in good agreement with the author's former assumptions. The most frequent types of structures are micro and macro detritic. Rarely bauxite-conglomerate also occurs. Detritic "roundgrains" are also frequent — not to be confounded with ooids and pisoids of diagenetic origin. Pelitomorphic structures are relatively rare. Similar results were obtained by BÁRDOSSY et al. (2000). The new mining operations in the Halimba II mine allowed new detailed observations in the galleries confirming our former findings. It can be concluded that the Halimba bauxite types are mainly of detritic texture with quickly varying grain sizes.

BÁRDOSSY et al. (1978) studied the Halimba bauxite by *scanning electron microscope*. They found that the grain-size of the bauxite is generally between 0.1 $\mu$m and 0.3 $\mu$m. The secondary minerals, e.g. pyrite, calcite have a much larger grain size. They observed that the "space filling" of the bauxite is the same in the shallow parts of the deposit and in the deeper ones, with a cover reaching 300 m.

The *colour of the bauxite* is mainly brick-red, with white spots and veins in its upper part. Violet bauxite occurs only on the top of the bauxite bodies. As mentioned before, grey bauxite occurs mainly on the top of the deposit and on one place only over the footwall surface. The clayey bauxite and the bauxitic clay are also brick-red, but generally more light coloured.

The bauxite is generally medium hard, rarely hard with conchoidal fracture. The detritic carbonate rock types are harder than the bauxite. On the other hand, the clayey bauxite and the bauxitic clay are less hard than the bauxite and they have an earthy fracture.

In 1990 in the Halimba III mine grey marl, clayey marl and lignitic clay was found below high-grade bauxite. The marl contained bauxite pebbles. It was 2 m to 4 m thick, directly underlain by Triassic Dachstein Limestone. Micropalaeontologic study of this layer found fossils of Albian age. It is considered by GÓCZÁN et al. (2002) that it belongs to the Albian Tés Clay Formation. The genetic significance of this important finding is discussed in the genetic chapter (The origin of the Halimba bauxite).

## The main and accessory chemical components of the Halimba deposit

During the exploration systematic sampling was carried out from the bauxite sequence in each borehole. The sampling intervals were 0.5 m and 1.0 m. In the case of special bauxite types, e.g. grey pyritic bauxite, the sampling intervals were diminished to 0.1–0.5 m. The samples were analysed for the main chemical components. Until the end of the nineties the entire bauxite deposit was analysed, including the detritic carbonate rock layers. After that time — for economic reasons — these rock samples were excluded from the chemical analyses. Considerable economy was achieved this way, but in the same time important geochemical information, were lost.

The bauxite samples were analysed for $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$ and $TiO_2$ and ignition loss by traditional wet analytical methods. Since 2004 only the $Al_2O_3$ and $SiO_2$ contents are analysed by neutron activation. Determination of CaO, MgO, $CO_2$, S, $P_2O_5$ and $MnO_2$ occurred on selected samples, and not over the entire

deposit. Finally a limited number of "composit samples" was prepared from a number of single samples for the determination of their technological properties.

Copies of all available analytical documents were collected by the author and a computerized *data base* was established with the technical help of the Hungarian Academy of Sciences. More than 20 000 records were fixed in this data base, containing more than 350 000 numerical data. The statistical evaluation of these data occurred on a Windows XP computer. To check the validity of the analyses the sum of the components was computed for each record. Only sums being between 95.0–101.0% were accepted for the statistical evaluation. In all other cases the source of the error was searched. This way the results could be corrected in many cases. The remaining records were excluded from further evaluations.

The author published in 1961 a monography on the geochemistry of Hungarian bauxites. The Cseres and Tormás-kút (sector No. 15) bauxite bodies of the Halimba deposit were included in this evaluation. The evaluation was limited to the entire bauxite sequence that is the layers of different composition — discussed in the foregoing chapter — were not evaluated separately. This approach can be considered as a general overview of the deposits. In the present monography all rock types of the deposit were evaluated separately, allowing a more detailed understanding of the deposit.

JOCHÁNÉ EDELÉNYI (1981) was the first to evaluate the entire Halimba deposit for $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$ and $TiO_2$. This evaluation did not distinguish the different rock types of the deposit. MÁTÉFI (2002) performed a similar geochemical evaluation for the northern rim of the Halimba deposit, again for the entire bauxite sequence. He published also a number of histograms of the main chemical components. Both publications contained important information about the geochemistry of the deposit.

BÁRDOSSY et al. published in 2000 new geochemical evaluations on the Halimba deposit. Since that time a large number of chemical analyses were carried out in the southern part of the deposit for the preparation of the new mine. This allowed me to investigate in more detail the geochemistry of the southern area. Special attention was paid to the *scaling-effect.*

The first step of the geochemical evaluation was the calculation of the weighted averages of the bauxite layers in all productive boreholes. These are 530 in the southern 320 in the northern part of the deposit. The bauxite, clayey bauxite and bauxitic clay layers were calculated separately. The second step was the calcula-

***Table 5.*** Weighted averages of the main chemical components of the Halimba bauxite

| Sector | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | $+H_2O$ | CaO | MgO | $P_2O_5$ | $SO_3$ | $MnO_2$ | Boreholes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 52.6 | 7.5 | 22.1 | 2.0 | 12.9 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 4 |
| 2 | 54.5 | 4.4 | 25.4 | 2.6 | 11.9 | 0.80 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 10 |
| 3 | 55.3 | 3.9 | 22.3 | 2.6 | 12.4 | 2.5 | 0.18 | n.m. | n.m. | n.m. | 26 |
| 4 | 56.0 | 3.1 | 23.8 | 2.5 | 11.8 | 1.09* | 0.17 | n.m. | n.m. | 0.14 | 34 |
| 5 | 54.2 | 5.7 | 22.6 | 2.5 | 12.2 | 0.63* | 0.20 | n.m. | n.m. | 0.30 | 29 |
| 6 | 52.0 | 5.4 | 25.8* | 2.6 | 12.4 | 1.12 | 0.32 | n.m. | n.m. | 0.15 | 33 |
| 7 | 52.3 | 5.1 | 24.8 | 2.7 | 12.3 | 0.42* | 0.26 | 0.20 | n.m. | 0.15 | 133 |
| 8 | 53.5 | 5.5 | 24.2* | 2.4 | 13.0 | 0.91 | 0.20 | n.m. | n.m. | n.m. | 13 |
| 9 | 52.8 | 6.9 | 20.9 | 2.5 | 13.2 | 0.85 | 0.30 | n.m. | n.m. | n.m. | 8 |
| 10 | 55.0 | 6.8 | 21.2 | 2.3 | 13.0 | 0.60 | 0.24 | n.m. | n.m. | n.m. | 11 |
| 11 | 53.5 | 6.3 | 22.6 | 2.6 | 12.4 | 0.29* | 0.18 | 0.22 | n.m. | 0.15 | 34 |
| 12 | 55.2 | 2.6 | 24.2 | 3.0 | 12.4 | 0.28* | 0.19 | 0.29 | n.m. | 0.28 | 79 |
| 13 | 55.8* | 3.5 | 22.6 | 3.1 | 12.6 | 0.50* | 0.33 | n.m. | n.m. | 0.10 | 65 |
| 14 | 54.0 | 4.1 | 23.8 | 2.9 | 12.2 | 0.39* | 0.20 | 0.26 | ? | 0.09 | 54 |
| 15 | 53.4 | 5.7 | 25.4 | 2.2 | 12.2 | 0.70 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | n.m. | 72 |
| 16 | 54.0 | 6.0 | 22.9 | 2.5 | 12.5 | 0.60 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | n.m. | 11 |
| 17 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 18 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 19 | 53.1 | 8.6 | 21.7 | 2.1 | 12.7 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 2 |
| 20 | 52.4 | 5.8 | 25.4 | 2.1 | 12.3 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.30 | n.m. | 19 |
| 21 | 51.1 | 6.4 | 26.9 | 2.3 | 12.1 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 11 |
| 22 | 47.7 | 4.7 | 31.5 | 2.5 | 12.1 | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.20 | n.m. | 3 |
| 23 | 53.1 | 3.9 | 28.0 | 2.2 | 11.9 | 0.40 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | n.m. | 53 |
| 24 | 54.6 | 5.0 | 24.2 | 2.2 | 12.4 | 0.60 | 0.26 | 0.10 | 0.10 | n.m. | 25 |
| 25 | 55.6 | 3.3 | 24.4 | 2.5 | 12.6 | 0.60 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | n.m. | 57 |
| 26 | 54.8 | 5.9 | 22.7 | 2.4 | 12.6 | 0.50 | <0.05 | 0.10 | <0.05 | n.m. | 21 |
| 27 | 55.0 | 5.5 | 22.1 | 2.4 | 12.8 | 1.00 | 0.20 | 0.10 | <0.05 | n.m. | 43 |
| 28 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| $\Sigma$ | | | | | | | | | | | 850 |

* Tukey's estimator, n.m.= not analysed

tion of weighted averages for all the 28 sectors, discussed in the foregoing chapters. Furthermore the main statistical parameters, e.g. standard deviation, confidence intervals, skewness etc. were calculated for every sector. Histograms and box-plots were constructed for each chemical component in each sector. This was followed by a spatial evaluation, based on the boreholes — separately. The final step was the study of the distribution of the chemical components within one borehole.

Special attention was paid to the *outlayers.* As the printing errors were detected already, geochemical sources of these anomalies were searched for, often with success. *Chemical transitions* are frequent in the Halimba deposit. Fuzzy numbers were applied quantifying the rate of transition. In the following all the above listed properties will be discussed separately for the main chemical components.

**$Al_2O_3$** is the main chemical component of all bauxites. The weighted average for the bauxite of the entire deposit is 54.5%. This is a relatively high value in comparison with other Hungarian bauxite deposits. It is due to the monohydratic (boehmitic) mineral composition, plus the relatively low $SiO_2$ content of the bauxite.

The weighted average $Al_2O_3$ contents of all the 28 sectors are presented on Table 5. Let us emphasize that these are mathematical statements, each number having a different degree of reliability, or in other words *uncertainty.* The first component of it is the analytical error of the chemical analyses. In the case of $Al_2O_3$ this is ±0.5%, if wet chemical methods were applied. The second component is the standard error of the mean, depending on the number of data and on their variability. In our case it varies from ±0.1% to 0.4%. A further important source of error is the symmetry or asymmetry of the distribution of the data. It is well known that the averages are "unbiased" only if the distribution is symmetric or close to it. The statistical *skewness* is a good measure to evaluate the degree of asymmetry. The distribution is generally considered unbiased if the skewness is between –1.0 and +1.0 units. If the skewness was outside this interval, maximum likelihood estimators were applied. I found that in our case Tukey's estimator furnished the best results. It has been calculated by the SPSS programme. It is indicated on Table 5 where Tukey's estimator was applied instead of the weighted average.

The weighted averages of the sectors vary from 47.7% to 56.0%. There is only one sector (No. 22) where the average is below 51%. Even this value is highly uncertain because of the small number of boreholes. However, it is clear that the extremely high average $Fe_2O_3$ content (31.5%) is the reason for the low $Al_2O_3$ content. The highest values occur in the sectors No. 13 and 25, both representing the filling of the erosional valleys.

In the following the areal evaluation of the southern area is presented (Figure 17). Two trends can be observed: first there is an increase of the averages from east to the west, second the fillings of the erosional

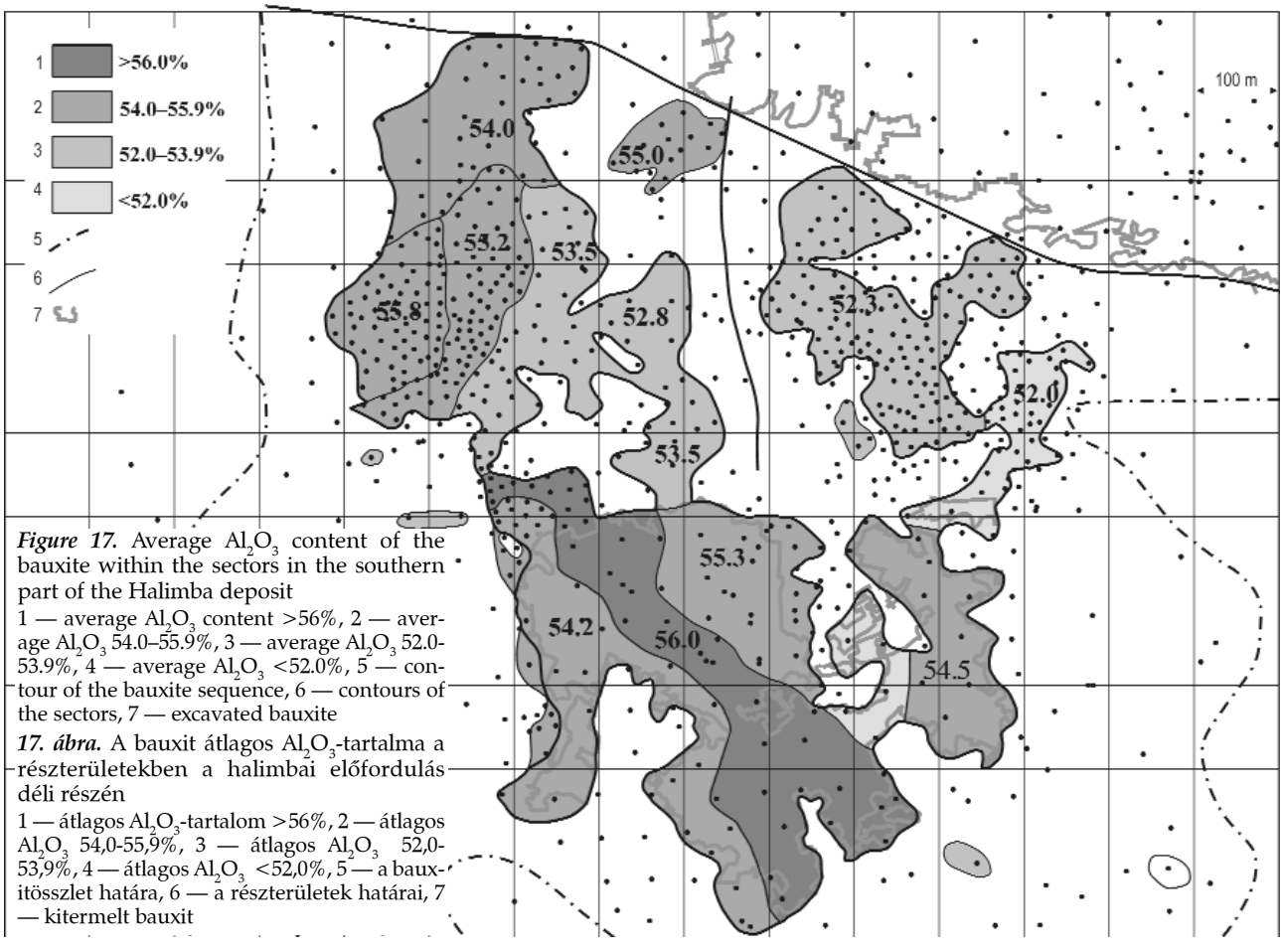


***Figure 17.*** Average $Al_2O_3$ content of the bauxite within the sectors in the southern part of the Halimba deposit
1 — average $Al_2O_3$ content >56%, 2 — average $Al_2O_3$ 54.0–55.9%, 3 — average $Al_2O_3$ 52.0-53.9%, 4 — average $Al_2O_3$ <52.0%, 5 — contour of the bauxite sequence, 6 — contours of the sectors, 7 — excavated bauxite

***17. ábra.*** A bauxit átlagos $Al_2O_3$-tartalma a részterületekben a halimbai előfordulás déli részén
1 — átlagos $Al_2O_3$-tartalom >56%, 2 — átlagos $Al_2O_3$ 54,0-55,9%, 3 — átlagos $Al_2O_3$ 52,0-53,9%, 4 — átlagos $Al_2O_3$ <52,0%, 5 — a bauxitösszlet határa, 6 — a részterületek határai, 7 — kitermelt bauxit

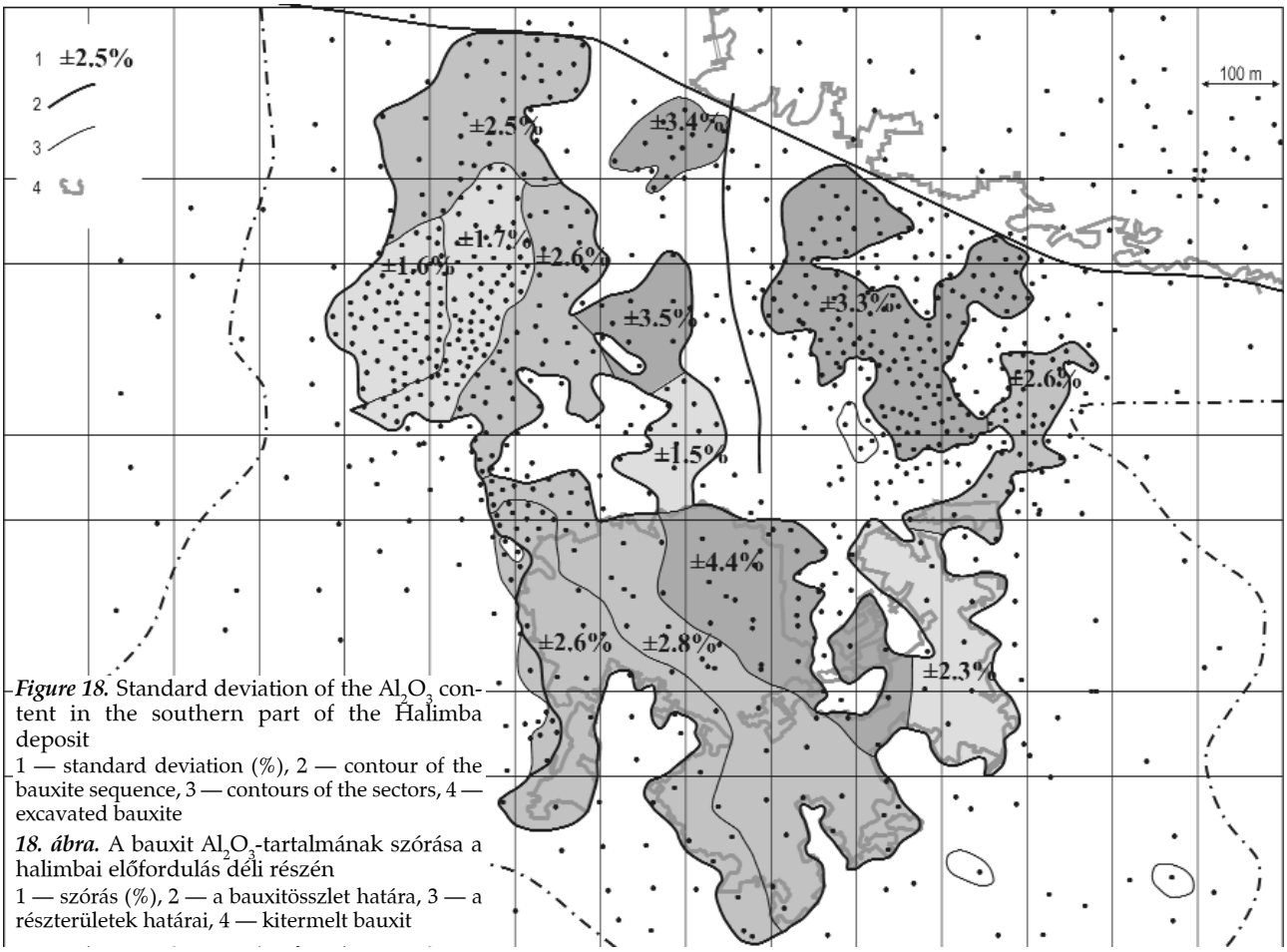


***Figure 18.*** Standard deviation of the $Al_2O_3$ content in the southern part of the Halimba deposit
1 — standard deviation (%), 2 — contour of the bauxite sequence, 3 — contours of the sectors, 4 — excavated bauxite

***18. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$-tartalmának szórása a halimbai előfordulás déli részén
1 — szórás (%), 2 — a bauxitösszlet határa, 3 — a részterületek határai, 4 — kitermelt bauxit

valleys (channel bar facies) contain more alumina than the neighbouring sectors. The reason for it is the natural separation of the bauxitic material into high grade and low grade according to the facies of sedimentation.

The skewness of the distribution varies from 0.03 to 1.17 in the sectors. Thus the distribution is close to symmetric, that is, the sector-averages are unbiased. The only exception the sector no. 13, here the distribution has a negative skewness of 3.60. When checking the chemical analyses of each borehole it was found that in some boreholes the alumina content strongly decreased because of the increased carbonate content of the bauxite.

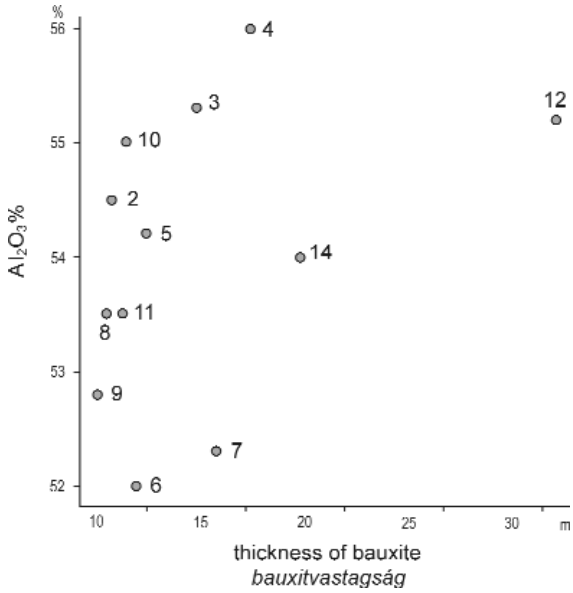


***Figure 19.*** Relationship of the average $Al_2O_3$ content of the sectors with the average bauxite thickness

***19. ábra.*** A bauxitvastagság és a részterületek átlagos $Al_2O_3$-tartalmának összefüggése

The *variability* of the $Al_2O_3$ content was evaluated by the standard deviation and by the min/max range. The standard deviation is small relative to the high alumina content of the bauxite. It varies from ±1.6% to 4.4%. The areal distribution of the standard deviation is presented on Figure 18. Scatter-plots were constructed to investigate the possible relationship between the sector averages and standard deviations. No correlation was detected between these parameters. The min/max range varies from 4.7% to 23.5%. It is largest in the eastern main bauxite body (sector No. 7). This is in good agreement with the experiences of the mining in this sector, namely here is highest the variability of the alumina content.

Scatter plots were constructed to study a possible correlation between the bauxite thickness and the average alumina contents (Figure 19). All scatter plots had a typical "cloudy" pattern, indicating that there is no significant correlation between these two parameters.

All the above outlined results are referred to sector-averages. A further study was carried out on the level of borehole averages with the aim to find the effect a possible scaling factor. The borehole averages vary in the southern part of the deposit from 40.6% to 65.5%. Thus the borehole averages have a much longer range than the sector averages. The highest values were found in the eastern main bauxite body in the boreholes Halimba H–2243 and H–2553. The highest alumina contents are characterized by a low (10–11%), $Fe_2O_3$ content.

An isoline map of the borehole-averages was constructed for the western main bauxite body (sectors No. 11–14) Figure 20. The high areal variability of the $Al_2O_3$ content is characteristic. An areal trend can be distinguished: the central zone, corresponding to the channel bar facies has higher alumina values than the levee facies to the east and west of it.

As a next step of the scaling factor the sampling intervals of the boreholes were studied separately. Several intervals contain more than 60% alumina. The highest values were found in the borehole Halimba H–2435 (sec-

***Figure 20.*** $Al_2O_3$ content of the bauxite body Halimba II SW (sectors 11-14)
***20. ábra***. A Halimba II. DNy bauxittest bauxitjának $Al_2O_3$-tartalma (11-14. részterületek)

tor No. 7) in the upper part of the bauxite layer (71.7% and 70.5% $Al_2O_3$). These are the highest alumina values ever found in Hungarian bauxite. A further important feature of the alumina content is as follows: Where the bauxite layer is very thick (15–25 m) there is very little variability in the $Al_2O_3$ content of the successive sampling intervals. Only at the lower and upper contact of the layer diminishes the alumina content with some percents.

***Table 6.*** Weighted averages of the main chemical components of the Halimba clayey bauxite

| Sector | 1 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 45.6 | 47.2 | 46.2 | 38.8 | 47.7 | 45.2 | 45.7 | 46.2 | 46.2 | 47.7 | 48.2 | 46.6 | 46.2 | 47.3 | 46.1 |
| $SiO_2$ | 17.2 | 15.0 | 15.2 | 17.1 | 15.2 | 15.0 | 14.6 | 15.3 | 14.9 | 14.0 | 15.0 | 14.5 | 15.2 | 14.2 | 20.0 |
| $Fe_2O_3$ | 20.7 | 21.8 | 22.2 | 28.1 | 20.2 | 23.1 | 23.9 | 24.2 | 23.2 | 22.8 | 21.1 | 21.6 | 21.2 | 20.5 | 13.6 |
| $TiO_2$ | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 2.3 | 1.7 |
| $+H_2O$ | 12.6 | 12.3 | 12.4 | 11.5 | 12.3 | 12.5 | 12.1 | 12.1 | 12.2 | 12.3 | 12.6 | 12.8 | 12.8 | 12.9 | 13.8 |
| CaO | n.m. | 1.0 | 0.6 | 1.0 | n.m. | 1.0 | 0.2 | n.m. | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | 0.7 | 1.4 | 0.5 |
| MgO | n.m. | 0.2 | 0.1 | n.m. | n.m. | 0.1 | 0.1 | n.m. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | n.m. |
| $P_2O_5$ | n.m. | n.m. | 0.1 | n.m. | n.m. | 0.1 | 0.1 | n.m. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| $SO_3$ | n.m. | n.m. | 0.005 | n.m. | n.m. | 0.005 | 0.005 | n.m. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0.05 | 0.1 |
| Sum | 98.1 | 99.4 | 98.8 | 98.1 | 97.1 | 98.7 | 98.4 | 98.4 | 99.0 | 99.3 | 99.5 | 98.7 | 98.1 | 99.0 | 95.9 |

n.m. = not analysed

The *clayey bauxite* contains less alumina than the bauxite. The sector averages are presented on Table 6. They vary from 38.8% to 48.2%. The alumina content is smallest on the eastern rim of the deposit and largest in the central part of it (sectors No. 23, 24, 25). In this respect there is no significant difference between the northern and the southern part of the deposit. The variability of the $Al_2O_3$ content is smaller than that of the bauxite.

The sector averages of the *bauxitic clay* can be seen on Table 7. The averages are smaller than those of the clayey bauxite, varying from 35.1% to 41.2%. They are smallest on the eastern rim of the deposit (sectors No.

*Table 7*. Weighted averages of the main chemical components of the Halimba bauxitic clay

| Sector | 1 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 36.0 | 41.2 | 38.5 | 35.8 | 37.4 | 38.5 | 39.3 | 38.4 | 38.2 | 40.0 | 40.0 | 39.7 | 37.4 | 40.3 | 35.1 |
| $SiO_2$ | 29.6 | 25.2 | 26.5 | 28.7 | 27.7 | 24.4 | 24.5 | 25.0 | 26.8 | 24.1 | 25.5 | 25.4 | 27.1 | 26.1 | 35.2 |
| $Fe_2O_3$ | 18.4 | 18.2 | 18.6 | 18.7 | 17.1 | 19.1 | 19.5 | 20.7 | 19.6 | 20.7 | 18.5 | 18.6 | 17.6 | 15.9 | 14.9 |
| $TiO_2$ | 1.4 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 1.8 | 1.5 | 1.9 | 1.4 |
| $+H_2O$ | 12.1 | 12.3 | 12.5 | 12.8 | 12.9 | 13.1 | 12.5 | 12.4 | 12.4 | 12.4 | 12.5 | 12.6 | 13.2 | 13.4 | 12.7 |
| CaO | n.m. | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 1.5 | 1.5 | 0.05 | 0.05 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | 1.5 | n.m. |
| MgO | n.m. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | n.m. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | n.m. |
| $P_2O_5$ | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | n.m. |
| $SO_3$ | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.1 | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0.05 | n.m. |
| Sum | 97.5 | 99.3 | 98.6 | 97.9 | 98.5 | 98.6 | 97.3 | 98.1 | 99.2 | 99.5 | 98.8 | 98.8 | 97.9 | 99.8 | 99.3 |

n.m. = not analysed

17, 18) and largest in its central and western parts. The variability of $Al_2O_3$ is even smaller than that of the clayey bauxite.

The average **$SiO_2$** content of the Halimba bauxite is 4.2%. This value is smaller than those of the Malom Valley deposit (5.0%) and of the Szőc deposit (5.1%). The sector averages of the bauxite are presented on Table 5. There is no significant difference between the bauxite covered by Senonian or by Middle Eocene sediments. This is a very important finding indicating that there are no bauxite layers of Eocene age in the deposit, a subject that has been strongly disputed in the last time.

The smallest sector averages occur in the channel bar facies of both the southern and northern areas of the deposit. The areal distribution of the sector averages can be seen on Figure 21. It is clear that this is not a random distribution, but it follows a trend corresponding to the facies distribution of the bauxite. There is generally less silica in the channel facies than in the neighbouring rim (levee) facies. The $SiO_2$ averages of the northern area are slightly higher than those of the southern area.

The analytical error of the traditional wet silica analyses is ±0.3%. The standard error of the sector means is small, varying from ±0.05% to 0.2%. The standard deviation varies from ±1.5% to 2.6%. Its areal distribution is presented on Figure 22. The sectors of the channel facies are characterized by a smaller standard deviation than the neighbouring sectors. The $SiO_2$ content is most variable in the south-eastern rim of the Cseres bauxite body.

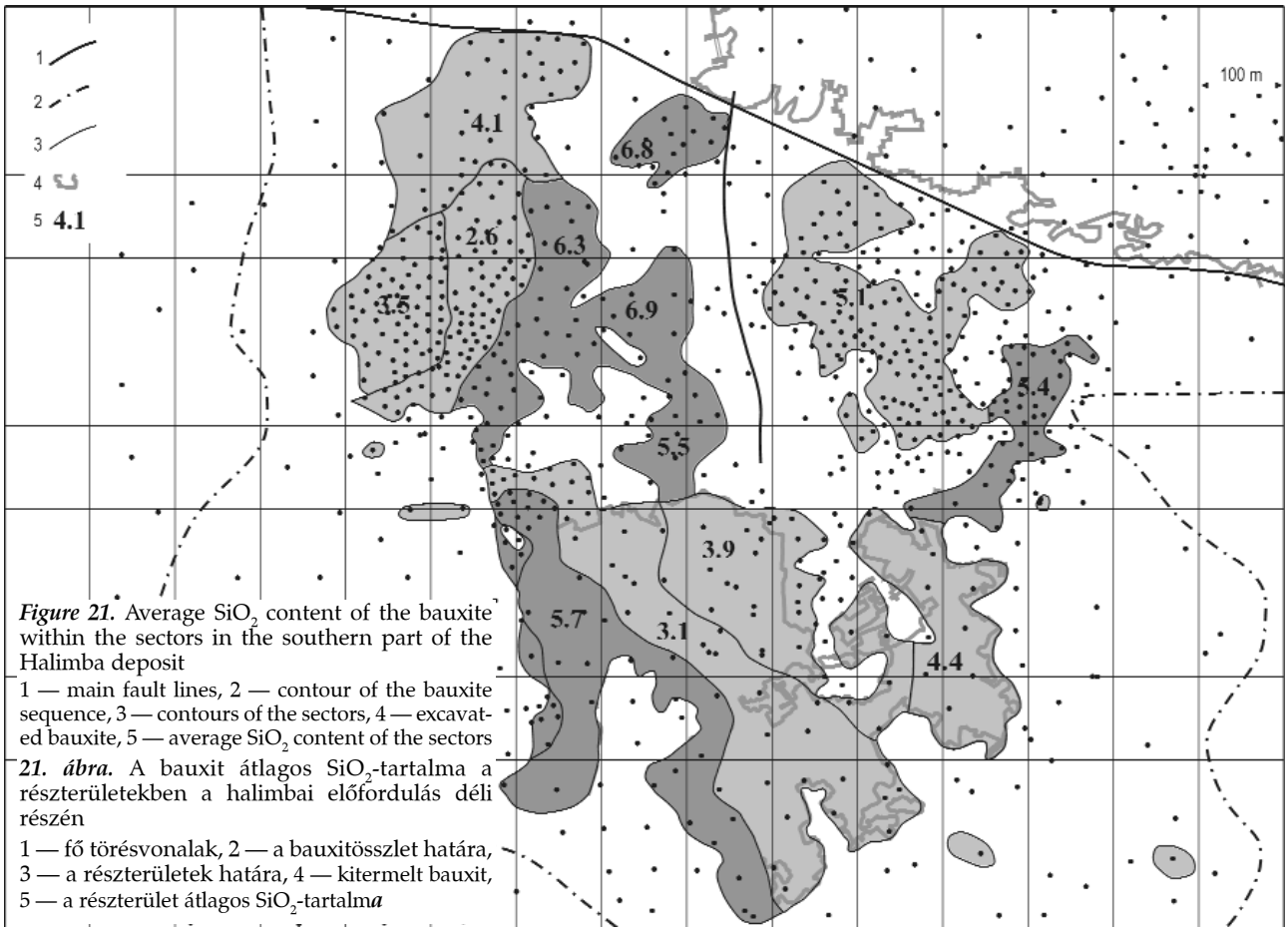


***Figure 21.*** Average $SiO_2$ content of the bauxite within the sectors in the southern part of the Halimba deposit

1 — main fault lines, 2 — contour of the bauxite sequence, 3 — contours of the sectors, 4 — excavated bauxite, 5 — average $SiO_2$ content of the sectors

***21. ábra.*** A bauxit átlagos $SiO_2$-tartalma a részterületekben a halimbai előfordulás déli részén

1 — fő törésvonalak, 2 — a bauxitösszlet határa, 3 — a részterületek határa, 4 — kitermelt bauxit, 5 — a részterület átlagos $SiO_2$-tartalm*a*

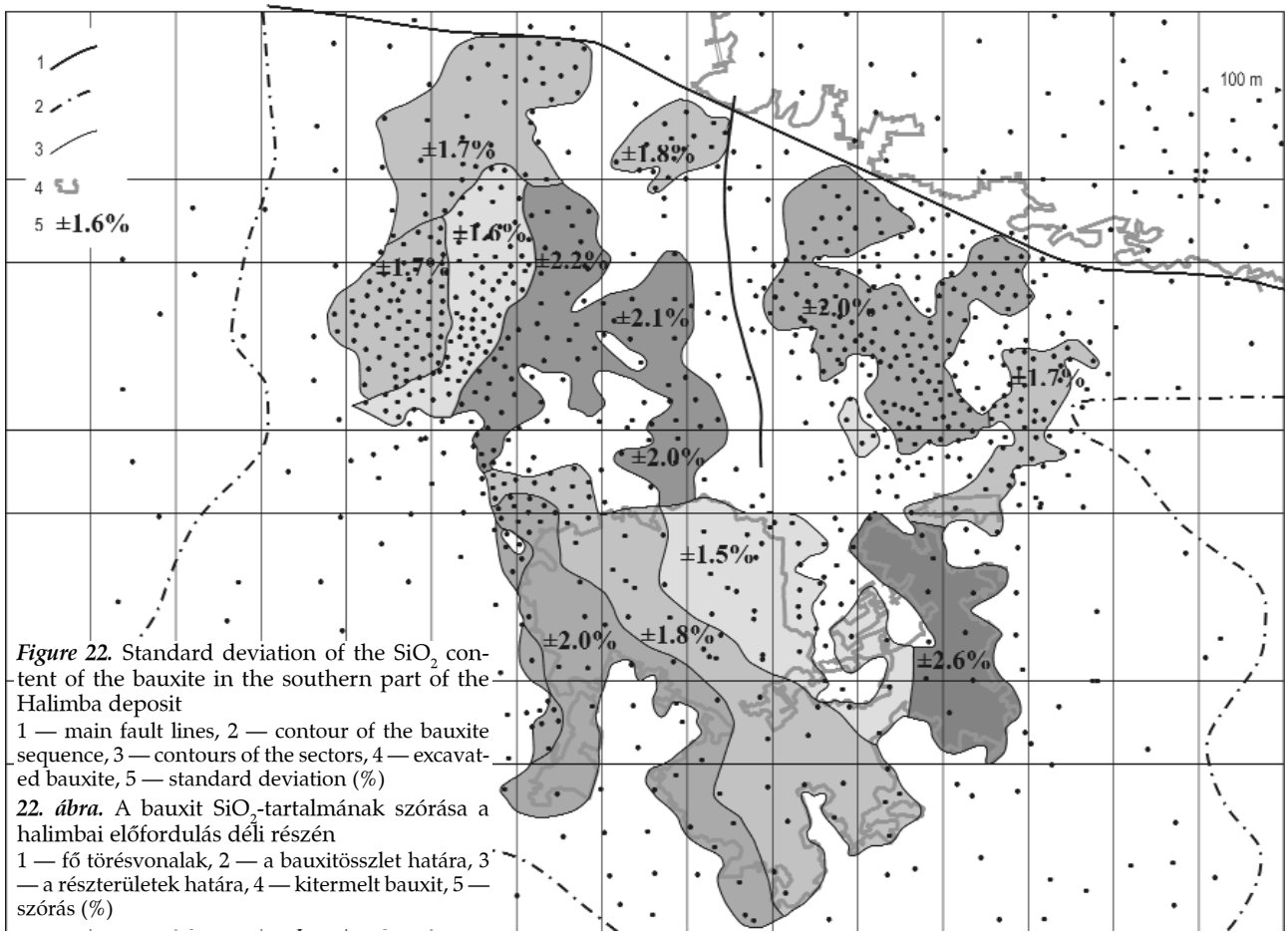


***Figure 22.*** Standard deviation of the $SiO_2$ content of the bauxite in the southern part of the Halimba deposit

1 — main fault lines, 2 — contour of the bauxite sequence, 3 — contours of the sectors, 4 — excavated bauxite, 5 — standard deviation (%)

***22. ábra.*** A bauxit $SiO_2$-tartalmának szórása a halimbai előfordulás déli részén

1 — fő törésvonalak, 2 — a bauxitösszlet határa, 3 — a részterületek határa, 4 — kitermelt bauxit, 5 — szórás (%)

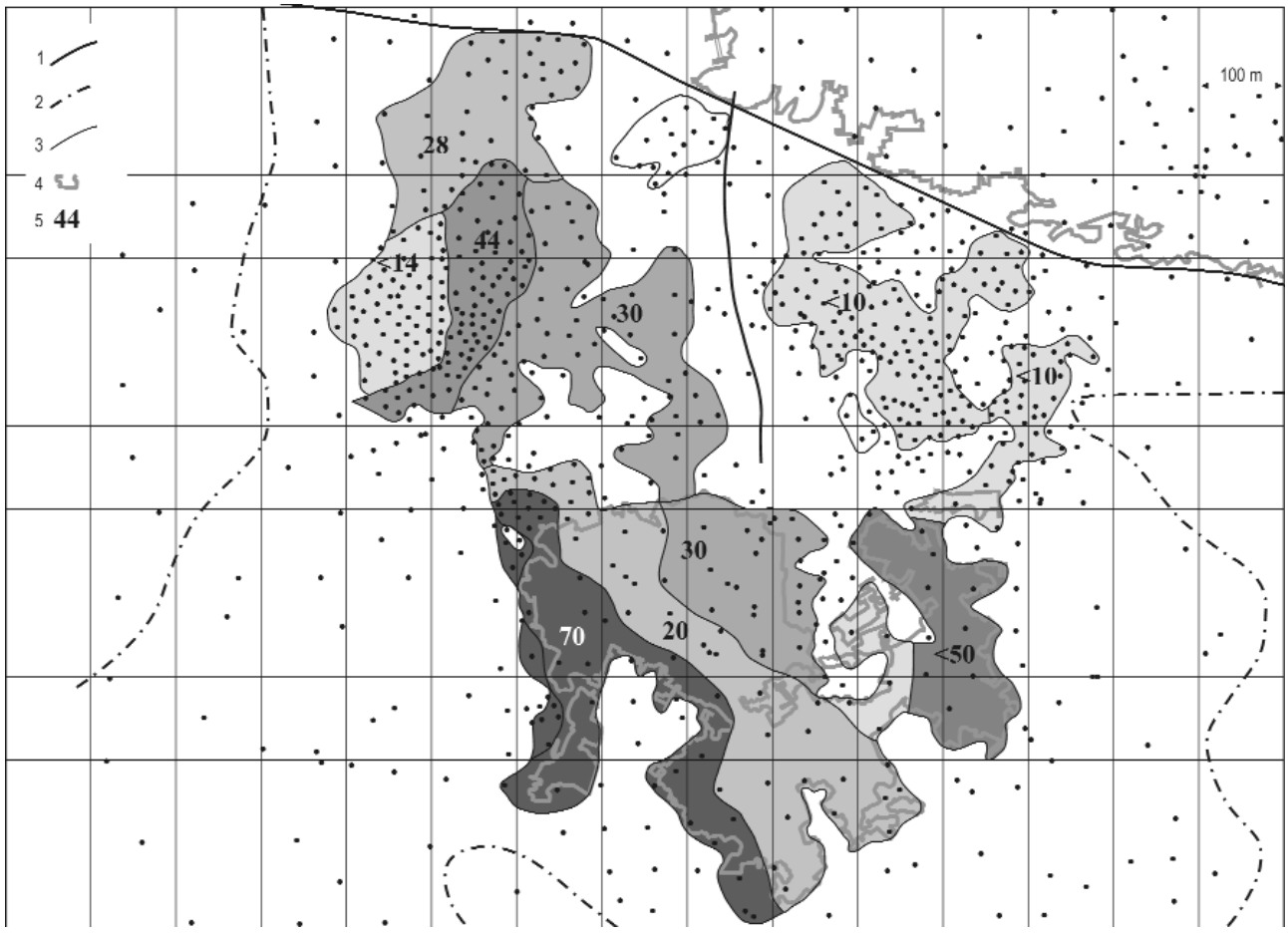


***Figure 23.*** Ranges of influence of the $SiO_2$ content of the bauxite, calculated from the variograms in the southern part of the Halimba deposit

1 — main fault lines, 2 — contour of the bauxite sequence, 3 — contours of the sectors, 4 — excavated bauxite, 5 — range of influence of the $SiO_2$ content of bauxite within a sector

***23. ábra.*** A bauxit $SiO_2$-tartalmának variogramokból számított hatástávolságai a halimbai előfordulás déli részén

1 — fő törésvonalak, 2 — a bauxitösszlet határa, 3 — a részterületek határai, 4 — kitermelt bauxit, 5 — a $SiO_2$-tartalom hatástávolsága egy-egy részterületen belül

*Isotropic variograms* were calculated separately for each sector. The resulting ranges of influence for the $SiO_2$ content are shown of Figure 23. The most important result is that the sectors are characterized by quite different ranges of influence. The shortest ranges correspond to the highest areal variability. This was found in the sectors No. 6 and 7, where the ranges are less than 10 m. The mining activities fully approved these results, see chapter: Underground exploration of the deposit. This is in good agreement with the facies distribution of these sectors. The longest range of influence was found on the western rim of the Cseres bauxite body.

The statistical skewness of the silica content is very little, being less than 1.0. The highest positive skewness was found in the sectors of channel facies. On the other hand, negative skewness is characteristic for sectors with relatively higher $SiO_2$ content. It can be interpreted as a sign of slight diagenetic and epigenetic resilification.

Scatter plots were constructed to study the correlation between the sector averages of bauxite thickness and $SiO_2$ content (Figure 24). The correlation is quite loose and it is non-linear, but it can be seen clearly that the average $SiO_2$ content diminishes with increasing bauxite thickness.

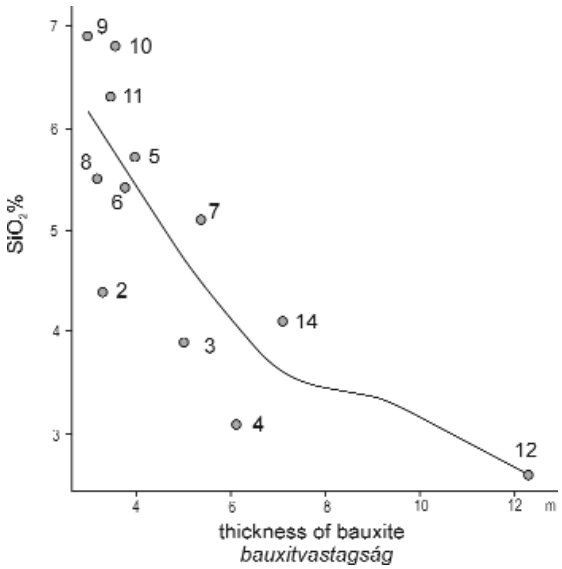


***Figure 24.*** Correlation of the bauxite thickness with the average $SiO_2$ content of the bauxite (the numbers correspond to the numbering of the sectors)

***24. ábra.*** A bauxitvastagság és a bauxit átlagos $SiO_2$-tartalmának összefüggése (a számok a részterületek sorszámának felelnek meg)

The scale-factor discussed in the foregoing chapters exists also for the $SiO_2$ content. This is shown on Figure 25 representing the borehole averages of the bauxite in the large western bauxite body (sectors No. 11–14). The $SiO_2$ averages vary from 0.6% to 9.9%, the upper limit being predetermined. The smallest $SiO_2$ averages occur in the south/north oriented central zone of the bauxite body and the highest values can be found on both sides of it. This pattern corresponds to the central channel facies of bauxite sedimentation and the levee facies on both sides. This south/north oriented pattern is cut in the north by the main east/west oriented fault line. On the other hand, no similar tectonic line was detected on the southern end of the bauxite body. It is presumably the arrival of carbonate rock debris that limited in the south the extent of the bauxite body.

In the thickest layers of bauxite the $SiO_2$ content of the sampling intervals is often less than 1.0%, and the variability is very limited.

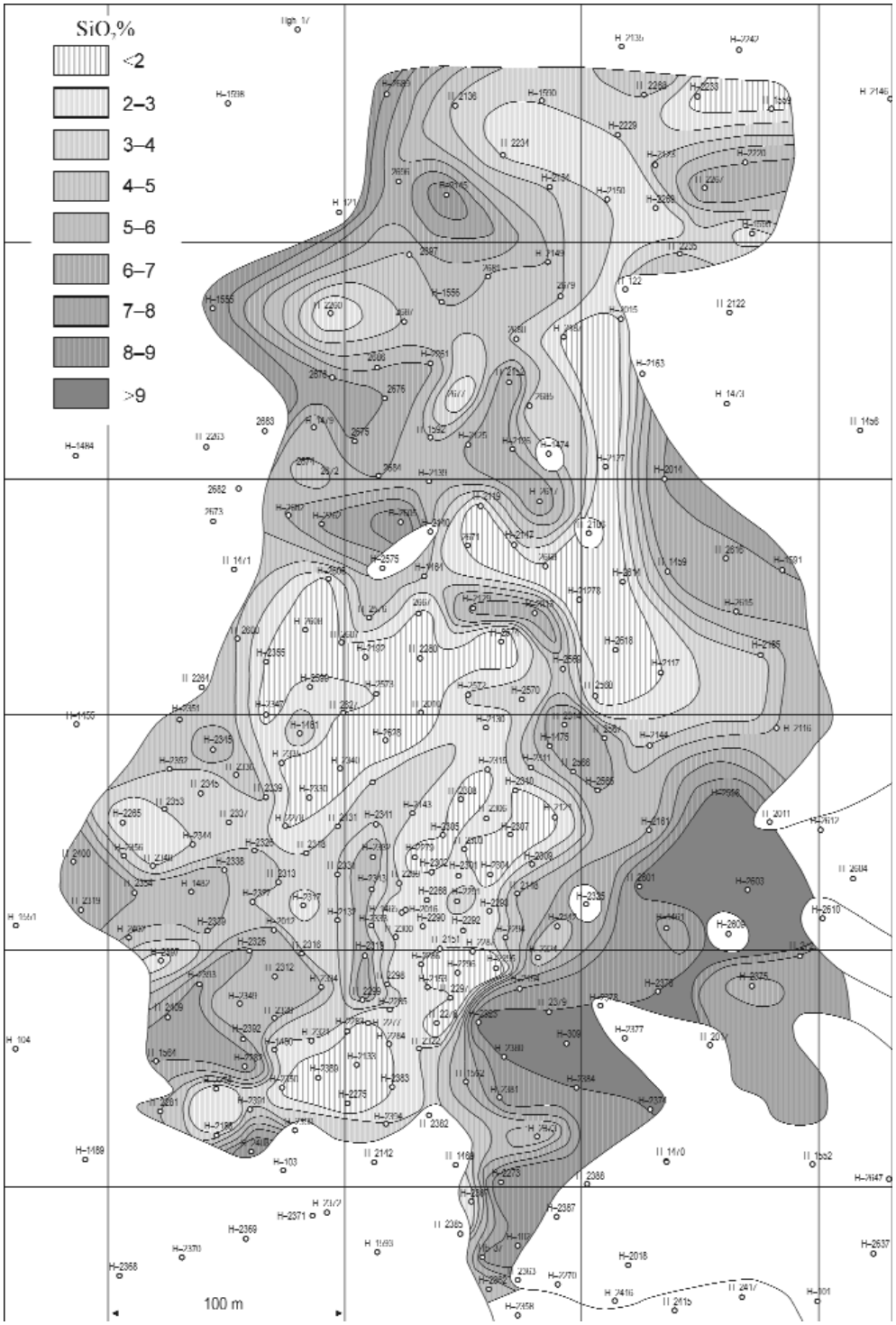


***Figure 25.*** $SiO_2$ content of the bauxite body Halimba II SW (sectors 11–14)
***25. ábra.*** A Halimba II. DNy bauxittest bauxitjának $SiO_2$-tartalma (11–14. részterületek)

The *clayey bauxite* contains 10% to 20% $SiO_2$, predetermined by our petrographic classification. The sector averages are presented on Table 6. The highest $SiO_2$ averages were found on the south-eastern and south-western rim of the deposit (sectors No. 1 and 28) with 17.2% to 19.9%. In most other sectors the average varies from 14.0% to 17.1%. That means that the $SiO_2$ variability is very limited in the clayey bauxite.

The *bauxitic clay* contains more than 20.0% $SiO_2$. The sector averages can be seen in Table 7. The highest values occur again at the south-eastern and south-western edge of the deposit with 29.6% and 35.2% $SiO_2$ content. The variablitiy of $SiO_2$ in the bauxitic clay is even more limited than in the clayey bauxite.

The reason for this overall pattern is not definitely clarified. It is possible, that before the Middle Eocene transgression a local redeposition occurred at the southern rim of the deposit, leading to the increase of the kaolinite content. The ratio of the $Al_2O_3$ and the $SiO_2$ content is called *silica ratio* or *"modulus"* and it is broadly used in the Hungarian aluminium industry as one of the main cut-off values. As these values are not constant, but change according to the international market conditions, it is better to follow in the scientific part of this monography the classification outlined in chapter: Petrographic composition of the bauxite… . When taking into account the categories of this classification the following silica ratios are obtained:

| | |
|---|---|
| Bauxite (ss.) | more than 4.6 |
| Clayey bauxite | 2.0 to 4.6 |
| Bauxitic clay | 0.85 to 1.99 |
| Kaolinitic clay | less than 0.85 |

In geochemical evaluations it is generally more convenient to apply directly and separately the percentages of alumina and silica. However, the silica ratio has a particularly useful property, namely it is independent of the absolute percentage of the sum of these two components. This property can be applied very well to the geochemical evaluation of the detritic carbonate rocks of the Halimba Basin. During the exploration of the Halimba deposit these rocks have been analysed for their main chemical components, among others for $Al_2O_3$ and $SiO_2$. It was found that the rock samples contain at least 2% to 4% of $Al_2O_3$ and $SiO_2$, but in some boreholes their joint amount may increase to 40%. When calculating the silica ratio for all these samples we get information about their "cementing material", taking into account the above presented classification values.

For this reason the silica ratio has been calculated for all analysed detritic rock samples in the Halimba Basin, including those boreholes where no bauxite was found. The results are presented on Figure 26. Unfortunately, these analyses were stopped in the mid nineties because of economic reasons. Thus large spots on the map remained "empty", that is without corresponding information. The contours of the bauxite bodies and of the detritic carbonate rocks are indicated on the map. Within the contours of the bauxite bodies the "cementing material" has a

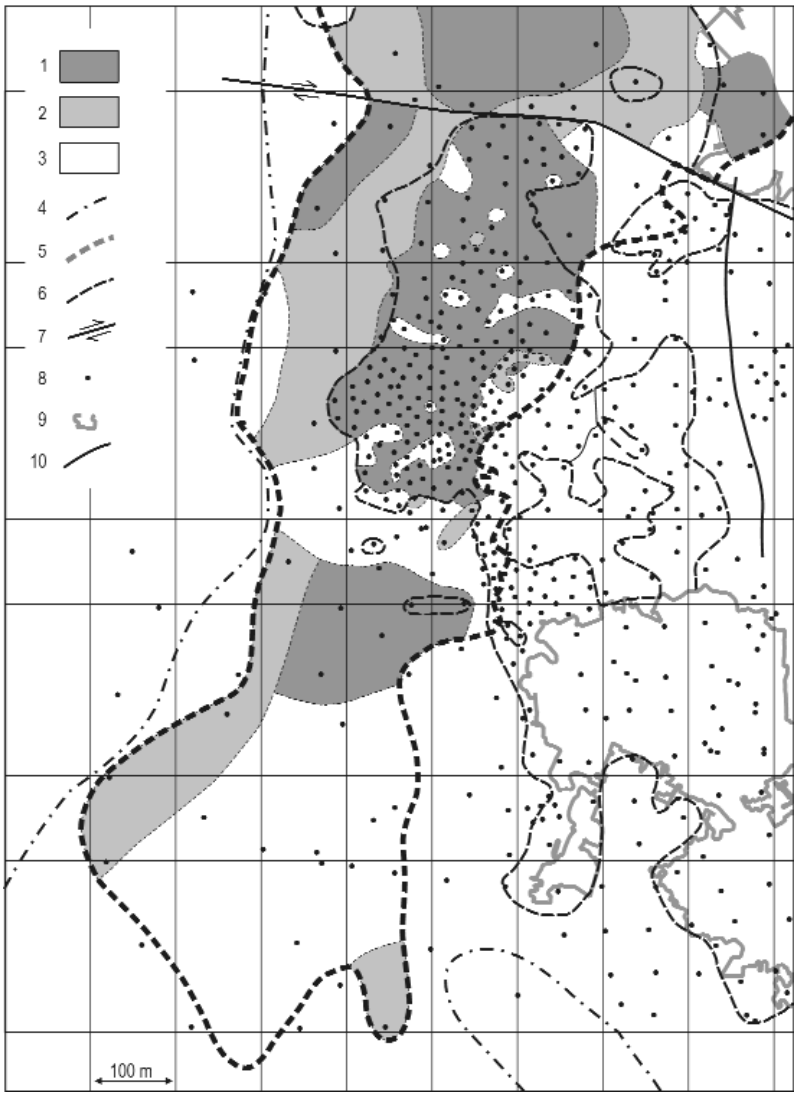


***Figure 26.*** Base material of the detritic carbonate layers in the southern part of the Halimba deposit

1 — bauxitic base material, 2 — clayey bauxite or bauxitic clay as base material, 3 — no chemical analyses from the base material, 4 — contour of the bauxite sequence, 5 — contour of the detritic carbonate rocks, 6 — contour of the bauxite bodies, 7 — main strike-slip fault line, 8 — borehole, 9 — excavated bauxite, 10 — more ancient fault line

***26. ábra.*** A bauxitösszlet karbonáttörmelékes rétegeinek alapanyaga a halimbai előfordulás déli részén

1 — az alapanyag bauxit (modulus >4,6), 2 — az alapanyag agyagos bauxit vagy bauxitos agyag, 3 — nincs elemzés az alapanyagról, 4 — a bauxitösszlet határa, 5 — a karbonáttörmelékes rétegek elterjedésének határa, 6 — a bauxittestek határa, 7 — fő törésvonal, 8 — felszíni fúrás, 9 — kitermelt bauxit, 10 — idősebb törésvonal

highly variable composition. That is it may correspond to bauxite, clayey bauxite and to bauxitic clay. It was found that bauxitic cementing material occurs generally close to the lower and upper border of the bauxitic layers, thus presumably, they are genetically related. The thickness of these layers varies generally from 1 m to 5 m, but in the southern part of the western bauxite body (sectors No. 12 and 13) thicknesses up to 25 m occur. The silica ratio of these layers corresponds generally to that of the bauxite layer, but in several boreholes it is even higher, reaching 100 to 150 units. Farther above and below the bauxite layer the cementing material corresponds to clayey bauxite or to bauxitic clay.

Surprisingly, the cementing material having a bauxitic silica ratio continues at some places outside the contours of the bauxite body, as shown by the analyses of the boreholes. The most important place is to the south of the western bauxite body. The thickness of this layer reaches up to 25 m, with high silica ratios. It is very regrettable that just in this area the detritic carbonate rock samples of the newer boreholes were not analysed at all. Thus we do not know the extent of this peculiar cementing material and whether it is directly connected with the western bauxite body or not, as indicated on the map of Figure 26.

Similar, but much smaller spots of this character occur also to the north-west and to the north-east of the western bauxite body. The cementing material of bauxitic composition continues also to the north of the main fault line, separating the northern and southern part of the deposit. Its extent to the north is not yet clarified.

In the author's opinion the cementing material furnishes important genetic information. It indicates that bauxite arrived to the given place, but it has been mixed by carbonate rock debris arriving in the same time from the south-west. "Pure", that is non-contaminated bauxite layers could be formed only in pauses ("stoppages") of the detritic carbonate rock sedimentation. Thus the presence of a bauxitic cementing material is an important indicator for the exploration process; it can be regarded as a potential place for bauxite accumulation outside the known bauxite bodies. These ideas are taken into account in the recent exploration of the Halimba Basin.

The average $Fe_2O_3$ content of the Halimba bauxite is 24.8%, slightly higher than that of the Malom Valley and Szőc deposits. The sector averages are presented on Table 5. Their variation is quite large ranging from

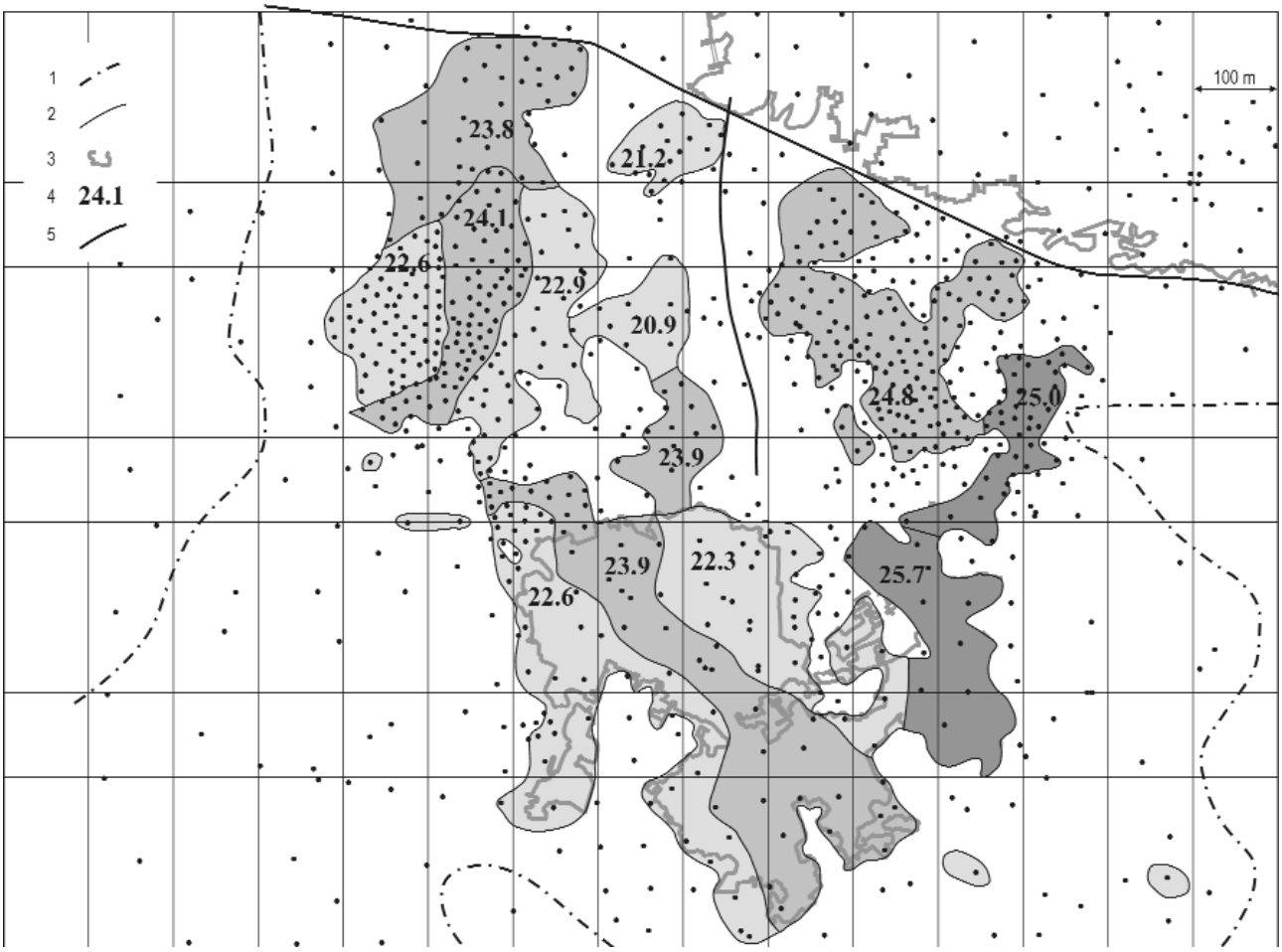


*Figure 27.* Average $Fe_2O_3$ content of the bauxite within the sectors, in the southern part of the Halimba deposit
1 — contour of the bauxite sequence, 2 — contour of the sectors, 3 — excavated bauxite, 4 — average $Fe_2O_3$ content of the sectors, 5 — main fault lines

***27. ábra.*** A bauxit átlagos $Fe_2O_3$-tartalma a részterületeken a halimbai előfordulás déli részén
1 — a bauxitösszlet határa, 2 — a részterületek körvonala, 3 — kitermelt bauxit, 4 — a részterület átlagos $Fe_2O_3$-tartalma, 5 — fő törésvonalak

20.9% to 31.5%. The areal distribution of the sector averages is shown on Figure 27. An overall trend can be seen: the average $Fe_2O_3$ content diminishes from the south-east to north-west direction. A much smaller superimposed trend also exists: the sectors with channel facies contain slightly more $Fe_2O_3$ than the neighbouring levee facies sectors. This trend can be explained by the north-west directed transport of the bauxite, when arriving in the Halimba Basin.

The analytical error of the traditional wet $Fe_2O_3$ determinations is ±0.5%. The standard error of the mean varies from ±0.1% to 0.6%. The statistical skewness varies from –0.01 to –4.55. This corresponds to an asymmetry directed to the low iron content. When calculating the sector averages Tukey's maximum likelihood estimators were applied if the skewness was more than 1.0 unit (Table 5).

The average standard deviation of the sectors, are represented on Figure 28. This value also diminishes from the south-east to the north-west, this being an overall trend for the entire deposit. Thus the variability of the $Fe_2O_3$ content is highest in the south-eastern part of the deposit.

Scatter plots were constructed to evaluate the correlation between the bauxite thickness and the average $Fe_2O_3$ content. The distribution of the points did not show any correlation between these two variables.

It was found that the scaling factor is important also for the $Fe_2O_3$ content. The variability is much higher at the level of the boreholes than at that of the sector averages. The borehole averages vary from 7.8% to 36.7%. On the south-eastern rim of the deposit the average is more than 30% in 10 boreholes. The thickness of this iron-rich bauxite is in most cases less than 2.0 m. This type of bauxite has a dark-red colour and it has an arenitic and "roundgrained" structure. In the central part of the deposit the borehole averages of bauxite are generally less than 30% $Fe_2O_3$. On the other hand, high iron bauxite was detected in some sampling intervals. In the sector No. 15 some sampling intervals occur containing 45–46% $Fe_2O_3$ and only 36–42% $Al_2O_3$. This composition does not correspond to high-iron bauxite, but is a *high alumina iron ore.* Its structure is arenitic and roundgrained. It is interpreted by the author as an accumulation of small debris of a lateritic iron crust. Similar sampling intervals were found also in the eastern part of the Cseres bauxite body (sector No. 2).

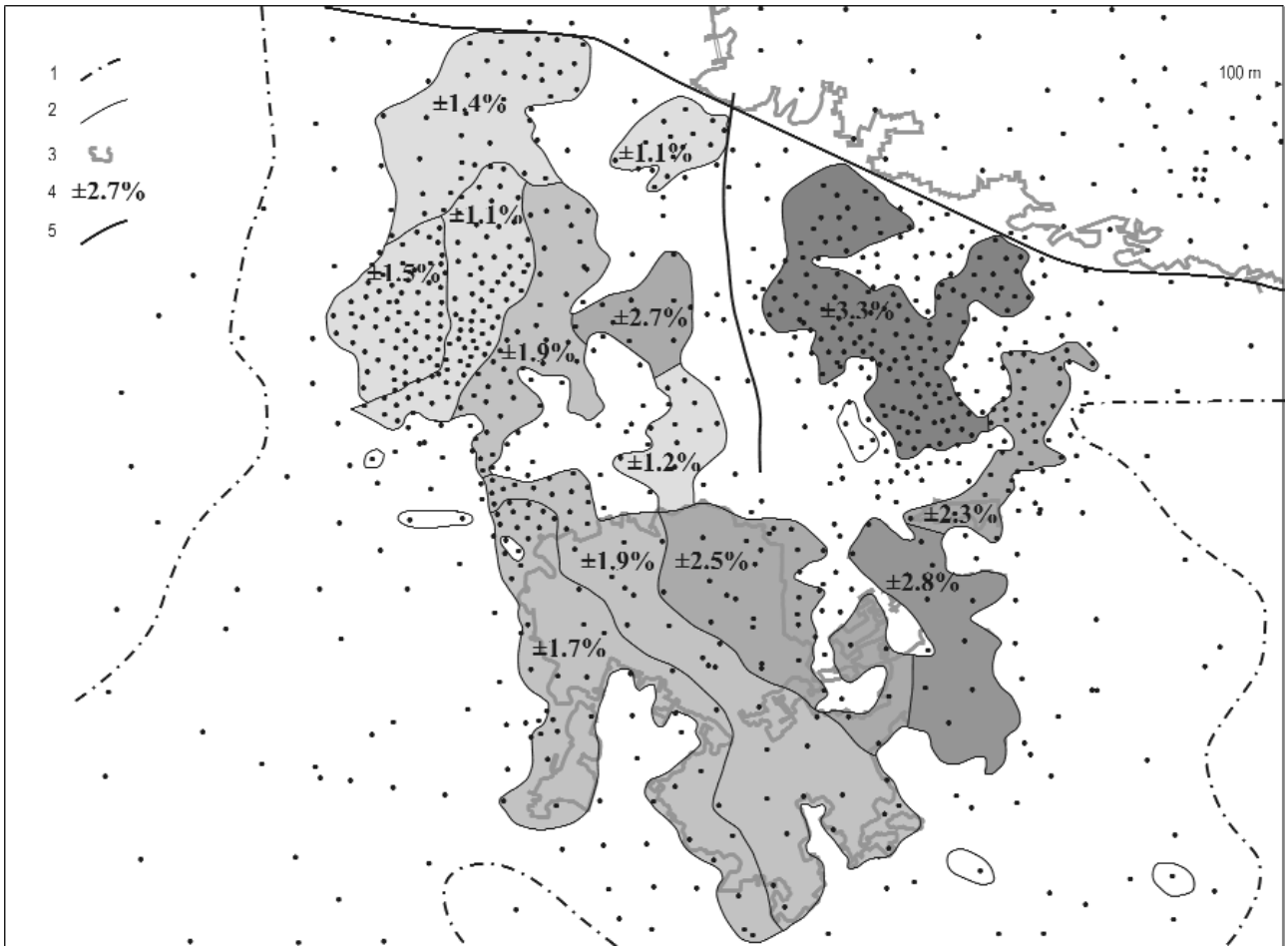


***Figure 28.*** Standard deviation of the $Fe_2O_3$ content of the bauxite in the southern part of the Halimba deposit
1 — contour of the bauxite sequence, 2 — contours of the sectors, 3 — excavated bauxite, 4 — standard deviation (%), 5 — main fault lines
***28. ábra.*** A bauxit $Fe_2O_3$-tartalmának szórása a halimbai előfordulás déli részén
1 — a bauxitösszlet határa, 2 — a részterületek határa, 3 — kitermelt bauxit, 4 — szórás (%), 5 — fő törésvonalak

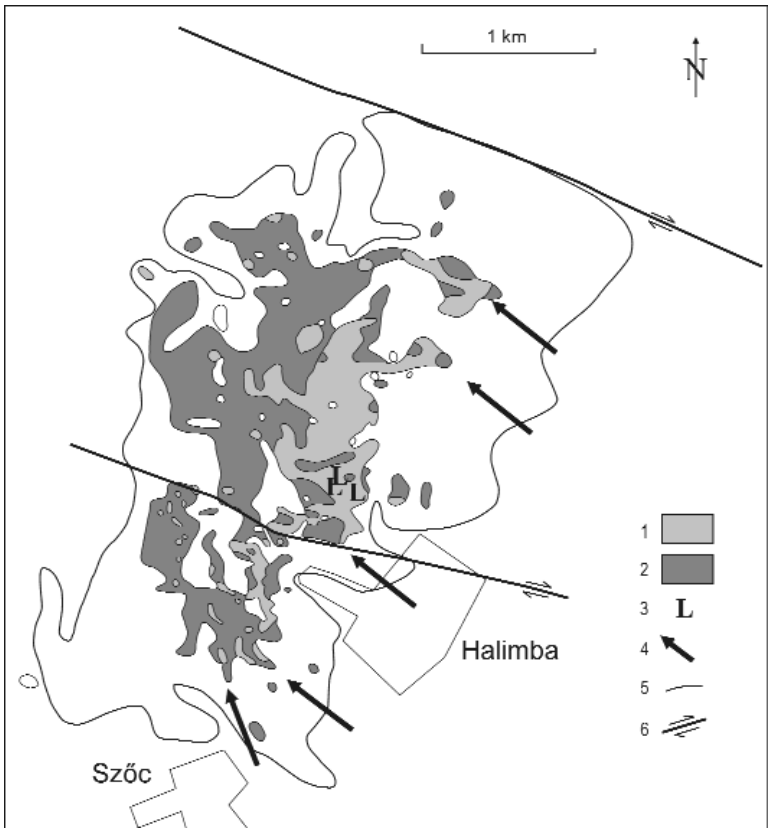


***Figure 29.*** Extent of iron-rich bauxite types and the supposed main transport routes

1 — iron rich "roundgrained" bauxite, 2 — bauxite with "normal" iron content, 3 — lateritic ferrite debris in the bauxite, 4 — main transport routes of the iron rich bauxite types, 5 — contour of the bauxite sequence, 6 — strike-slip faults

***29. ábra.*** A vasdús bauxitfajták elterjedése és behordásuk feltételezett útvonalai

1 — vasdús gömbszemcsés bauxit, 2 — normális vastartalmú bauxit, 3 — laterites ferritkavicsok a bauxitban, 4 — a vasdús bauxitfajták feltételezett behordási útvonalai, 5 — a bauxitösszlet körvonala, 6 — oldalirányú töréses elmozdulások

No iron rich bauxite was found so far in the western and north-western part of the deposit. The genetic interpretation of this trend is shown on Figure 29. The arrows indicate the presumed main transport routes of the bauxitic material. The areal extent of the high-iron bauxite is also indicated on the map. The letters "L" indicate the places where small debris of lateritic iron ore was found in the bauxite.

The Halimba deposit contains also at some places *low-iron bauxite,* which is bauxite containing 5% to 15% $Fe_2O_3$. This type of bauxite was generally found just below the grey pyritic-marcasitic bauxite. Its thickness is less than 2 m. It is well known that sulphuric acid is formed by the oxidation of these reduced bauxites. The downward migrating acidic solutions dissolved part of the original $Fe_2O_3$ content and transported it further downward. What remained is the low iron bauxite.

The areal distribution of the $Fe_2O_3$ content of bauxite in the Halimba II SW bauxite body is presented on Figure 30. The map illustrates the extremely variable distribution of the $Fe_2O_3$ in the bauxite. Long and narrow stripes of high iron bauxite occur between the normal medium-rich bauxite types. The stripes are generally south-east/north-west oriented, corresponding to the general direction of the bauxite transport, outlined above.

The *clayey bauxite* generally contains less $Fe_2O_3$ than the normal bauxite. The sector averages are presented on Table 6. They vary from 13.6% to 28.1%, the highest averages occurring on the eastern rim of the deposit (sector No. 17) and the lowest ones on its south-western edge (sector No. 28). This distribution is in good agreement with the areal distribution of the bauxite.

The average $Fe_2O_3$ content of the *bauxitic clay* is even smaller, as shown on Table 7. The sector averages vary from 14.9% to 20.7%. No high iron content was detected so far in the bauxitic clay. The variability of the normal bauxite is the highest, followed by that of the clayey bauxite and finally by the bauxitic clay.

The average **$TiO_2$** content of the Halimba bauxite is 2.4%, slightly higher than that of the neighbouring Malom Valley and Szőc deposits. The sector averages can be seen on Table 5. They vary from 2.0% to 3.1%. The sector averages are highest in the western bauxite body (sectors No. 12, 13, 14) and are lowest in the south-eastern edge of the deposit. This seems to be an overall trend.

The analytical error of the traditional wet $TiO_2$ determinations is ±0,2%. The standard error of the mean varies from ±0.01% to 0.05%. The statistical skewness of the distribution is less than 1.0 in all sectors. Thus the $TiO_2$ distribution is symmetrical or almost symmetrical. The areal variability is very limited even on the level of the borehole averages, their standard deviation varying from ±0.10% to 0.28%.

A positive correlation was detected between the bauxite thickness and the sector averages. The correlation is close to linear, but quite loose.

The borehole averages of the bauxite vary from 2.0% to 3.2% that is almost in the same way as the sector averages. Exceptionally high $TiO_2$ contents were detected in some sampling intervals of the borehole Halimba H–2286: it reached 4.7–4.9% in the upper part of the bauxite layer and gradually diminished downward. At the bottom is reached 2.6–2.7%. The geochemical reasons of this local enrichment are still not clarified.

The *clayey bauxite* contains less $TiO_2$ than the bauxite. The sector averages vary from 1.6% to 2.3% (Table 6). Similarly to the bauxite, the highest values occur in the western part of the deposit (sector No. 27), and the lowest values in the eastern and south-eastern rim.

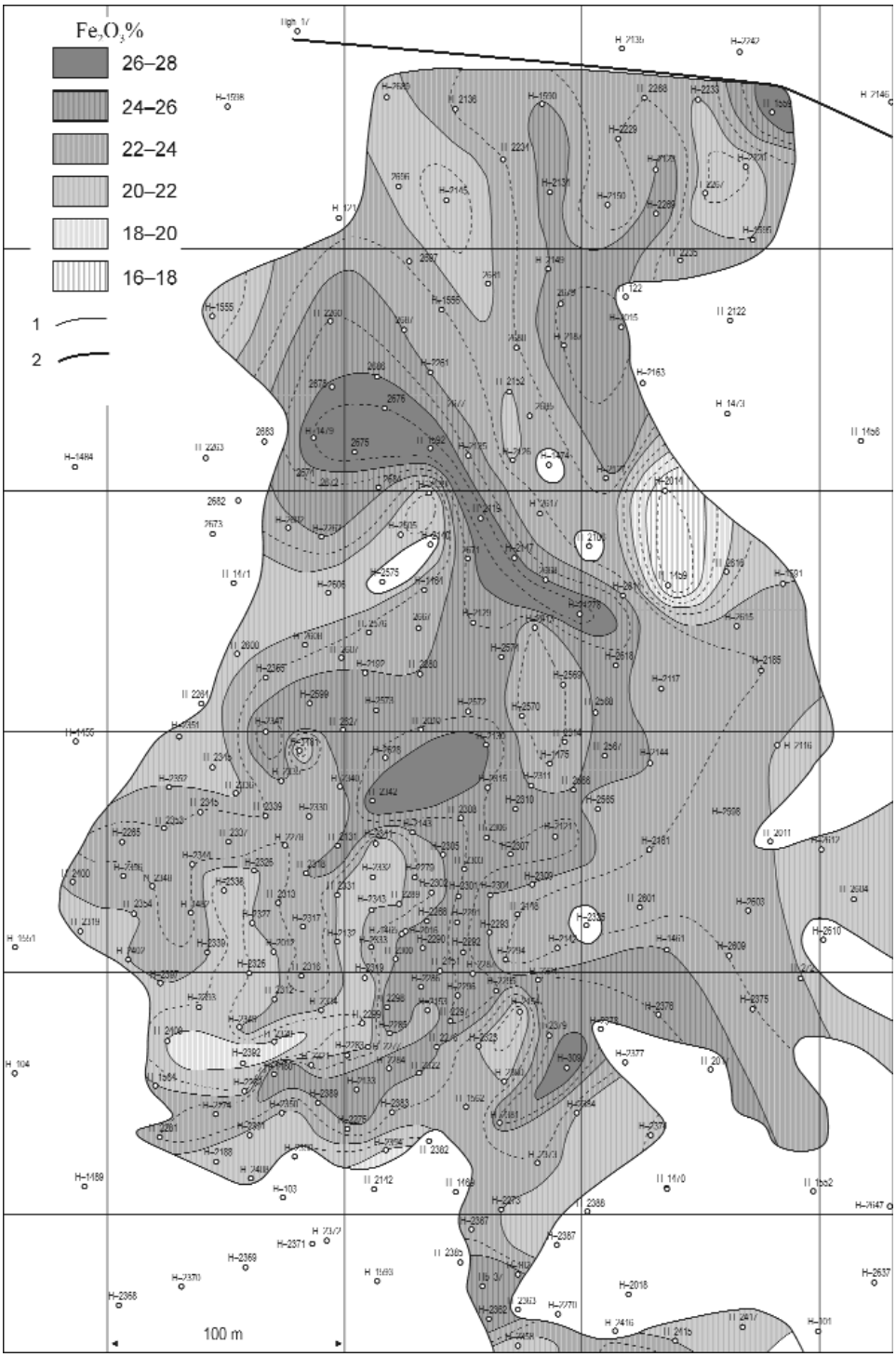


***Figure 30.*** $Fe_2O_3$ content of the bauxite body Halimba II SW (sectors 11–14)
1 — contour of the bauxite body, 2 — main strike-slip fault

***30. ábra.*** A Halimba II. DNy bauxittest bauxitjának $Fe_2O_3$-tartalma (11–14. részterületek)
1 — a bauxittest körvonala, 2 — fő oldalirányú töréses elmozdulás

The *bauxitic clay* contains even less $TiO_2$ as shown on Table 7. The highest sector average (1.9%) occurs in the western edge of the deposit and the lowest in the east. Thus there is a remarkable similarity in the areal distribution of all the three bauxite types. In the author's opinion this is a primary feature, related to a geochemical separation process during the arrival of the initial bauxitic material in the Halimba Basin.

The **loss of ignition** is determined by the well known wet analytical method. It contains not only the $+H_2O$ content, but also the $CO_2$ and the $SO_3$ content of the bauxite.

The **$+H_2O$** was obtained by correcting the loss of ignition for these two components. The analytical error for the determination of ignition loss is ±0.5%.

The corrected average $+H_2O$ content of the Halimba bauxite is 12.5%, corresponding to the boehmitic mineral composition of the bauxite. This is a significant difference with the Malom Valley and Szőc deposits, both having a gibbsitic mineral composition and with a corresponding 20–24% $+H_2O$ content. The sector averages vary from 11.8% to 13.2% (Table 5). No trend was found in the areal distribution of the sector averages. The standard error of the mean varies from ±0.01% to 0.03%. The statistical skewness is less than 1.0, thus the distribution can be considered as symmetric. The $+H_2O$ content has a very low variability, as the standard deviation is less than ±0.86%. No correlation was found between the bauxite thickness and the $+H_2O$ content.

The borehole averages of the bauxite show slightly higher variability. The averages vary from 11% to 14%. The sampling intervals of the bauxite were systematically studied by the author. In a few cases increase of the $+H_2O$ content was detected. As all the $+H_2O$ values were corrected for $CO_2$ and $SO_3$ only the presence of gibbsite can be the source of this increase. The $+H_2O$ values vary in these intervals between 16% and 20%, but in one borehole (Halimba H–263) 22–24% $+H_2O$ was registered in 2.0 m thickness. All these boreholes occur in the north-eastern part of the deposit and the high $+H_2O$ intervals are 1 m to 2 m thick. The immediate cover of the deposit is at some places Senonian, at others Middle Eocene. Thus the age of the cover has no relation to the $+H_2O$ enrichment. In situ transformation of boehmite to gibbsite is improbable at this place for both geochemical and sedimentological reasons. It is more probable that small debris of gibbsitic bauxite arrived to the Halimba Basin together with the boehmitic bauxitic material.

The *clayey bauxite* contains almost the same amount of $+H_2O$ as the bauxite (Table 6). The sector averages vary from 11.5% to 13.8%. No indications of gibbsite enrichment were detected in the clayey bauxite. The variability is smaller than that of the bauxite. The *bauxitic clay* has also a similar $+H_2O$ content (Table 7). Because in the bauxitic clay the kaolinite content higher the $+H_2O$ content is 12.0%. Finally, no areal trend was found in the distribution of the $+H_2O$ content.

The average **CaO** content of the bauxite layers is 0.7%. There is a continuous transition between the CaO content of the bauxite and that of the detritic carbonate rocks. As discussed in chapter: Petrographic composition of the bauxite…, the limit between these rocks was fixed at 10% carbonate mineral content (calcite, dolomite). This value corresponds to 5–6% CaO, depending on the ratio of calcite and dolomite. It is necessary to distinguish a further genetic type of the CaO content: secondary calcite precipitations in some bauxite layers.The analytical error of the wet CaO determinations is ±0.2%. The standard error of the mean is less than ±0.1%

The sector averages of the CaO content are indicated on Table 5. It is astonishing, that bauxite layers situated between the detritic carbonate rocks have very low average CaO content, which is less than 1.1%. Only one weak areal trend was found: the sectors of the southern part of the deposit have a slightly higher CaO content than the northern part.

The variability of CaO within the bauxite layers is very high, the standard deviation being often higher than the mean. The distribution of the CaO content is very asymmetric, as indicated by the high positive values of the statistical skewness, varying from +0.6 to 4.7. The bias of asymmetry was corrected by Tukey's maximum likelihood estimators (Table 5). No correlation was found between the bauxite thickness and the CaO content.

The *clayey bauxite* and the *bauxitic clay* contain about the same amount of CaO as the bauxite (Tables 6 and 7). Their variability is also the same. The *bauxite containing secondary calcite* was discussed in the chapter: Petrographic composition of the bauxite… Its CaO content varies from 1% to 6%. This type of rock has a very limited areal extent. It occurs generally at the top of the bauxite layers and the percentage of CaO quickly diminishes downward. The thickness of this bauxite type varies from 0.5 m to 3.4 m (Table 4).

The average **MgO** content of the bauxite is 0.2%. It is a constituent of the dolomite mineral, having a detritic origin in this deposit. The sector averages vary from 0.05% to0.39% (Table 5). The highest sector averages were found in the western part of the deposit. The northern part of the deposit contains slightly less MgO than the southern one. This can be explained by the easier desegregation of dolomite than the calcite.

The analytical error of the MgO determinations is ±0.2%. The standard error of the mean is less than ±0.1%. The distribution of MgO is more asymmetric than that of the CaO, as indicated by the statistical skewness varying from +0.62 to +6.06. The bias of the asymmetry is so small that no correction was needed for the averages. No correlation was found between the bauxite thickness and the average MgO content.

The clayey bauxite and the bauxitic clay have practically the same MgO content as the bauxite. Sector averages are presented in Tables 6 and 7. The areal variability of the MgO content is very limited.

A number of phosphorus, sulphur and manganese determinations were carried out in different periods of the surface exploration, unfortunately not over the entire deposit. For this reason only a part of the sectors could be evaluated for these components (Table 5).

The $\mathbf{P_2O_5}$ content of the bauxite was determined only in 13 sectors. The analytical error is ±0.1% and the standard error of the mean is less than ±0.01%. Only selected intervals have been analysed for $P_2O_5$ in the boreholes, but its distribution is so uniform that the averages are not biased. The sector averages vary from 0.10% to 0. 29%, being higher in the southern part of the deposit than in the northern one. The distribution of $P_2O_5$ is symmetric as indicated by the values of the statistical skewness.

The study of the individual sampling intervals showed also a very limited variability. There is only one sampling interval where 0.60% $P_2O_5$ was detected. The reasons for this local enrichment are not clarified. Only very few $P_2O_5$ determinations were performed on clayey bauxite and bauxitic clay. The results vary from 0.05% to 0.30%.

**Sulphur** determinations were carried out regularly on the grey pyritic-marcasitic bauxite, plus on some selected intervals of the "normal" red bauxite. All results are presented in the form of $SO_3$ (Table 5). Unfortunately, since the mid nineties no more sulphur determinations were carried out for economic reasons. For this reason sector averages could be calculated only for 9 sectors.

In our opinion the reduction of the red bauxite is mainly a diagenetic process, closely related to the reducing conditions in the immediate cover of Middle Eocene age, consisting mainly of black to grey lignitic, pyritic clay. Below this type of cover the red bauxite has been converted into a grey one and the hematite/goethite were transformed to pyrite and marcasite. Where the immediate cover is Senonian conglomerate or marl, no grey pyritic bauxite was formed on the top of the deposit. The red bauxite contains here less than 0.1% $SO_3$.

The analytical error of the sulphur determinations is ±0.2%. The standard error of the mean is less than ±0.1%. In the excavations of the mine the author observed at several places well crystallized pyrite nests in the upper part of the red bauxite layers. They can be interpreted as precipitations from downward migrating reducing solutions, rich in dissolved ferrous iron.

The grey pyritic-marcasitic bauxite contains 2% to 15% sulphidic S. Unfortunately the grey pyritic-marcasitic bauxite occurring on the bottom of the bauxite sequence has not been analysed for sulphur. Its estimated sulphur content is 5% to 15% sulphidic S. No systematic sulphur determinations were carried out on clayey bauxite and bauxitic clay.

The **$MnO_2$** analyses were performed only in 8 sectors. The sector averages of bauxite vary from 0.09% to 0.30% (Table 5). The highest amount of $MnO_2$ was found in the western edge of the Cseres bauxite body and in the channel facies (sector No. 12) of the western bauxite body.

The analytical error of the wet $MnO_2$ determinations is ±0.1%. The standard error of the mean is less than 0.01%. The borehole averages for bauxite vary from 0.10% to 0.50%, however in the sampling intervals values as high as 0.5% to 0.8% were also registered. The $MnO_2$ content is generally smallest at the top of the bauxite layer and it gradually increases downward. At the bottom the $MnO_2$ content may reach 1.7% to 3.80%. It is highly important that the enrichment of $MnO_2$ is not limited to the bauxite layers, but it was detected also in the underlaying clayey bauxite and bauxitic clay. Even some samples of the detritic carbonate rocks may contain $MnO_2$. For this reason it is presumed that the $MnO_2$ content is of late diagenetic or epigenetic origin. The source of the manganese is so far unknown.

In the foregoing part of this chapter the properties of the chemical components were studied separately. For the comparison of their variability the *coefficient of variation* has been applied. It expresses in percentages the relative variability of the given variable (standard deviation divided by the mean). The following results were obtained on the level of the sector averages:

| | |
|---|---|
| + $H_2O$ | 1–11% |
| $Al_2O_3$ | 3–12% |
| $TiO_2$ | 4–17% |
| $Fe_2O_3$ | 4–19% |
| $SiO_2$ | 26–80% |
| MgO | 15–91% |
| CaO | 40–246% |

Two groups can be distinguished in this list. The first one comprises the four "bauxitic" components, the second one the contaminations, having a much higher variability than the first one. The small quantity of data allowed calculating only approximative data for the $P_2O_5$ and $MnO_2$ contents. The former one has a relatively small relative variability (14% to 25%), the second one is more variable (12% to 75%) For the sulphur content no calculation was carried out because of the high uncertainty of the input data.

A further important question is whether the petrographically separated layers of the deposit are also different in chemical respect or not? *Fuzzy membership functions* were constructed to clarify this question, as they are very suitable for it (BÁRDOSSY, FODOR 2004). The membership functions were constructed in the following way: The mean of the given rock type (bauxite, clayey bauxite, bauxitic clay) was taken as the central point of the "core". The corresponding analytical error was measured on both sides of it, followed by the confidence interval corresponding to the 95% level of confidence. These are the components of the core. The length of the "support" is determined by the minimum and maximum values of the sampling intervals in the boreholes.

The resulting membership functions are presented on Figure 31. They correspond to the 133 productive boreholes of the sector No. 7. The three rock types are most strongly separated regarding their $SiO_2$ content. This is quantitatively expressed by the position of their cores. For example, there is a 9.5% difference between

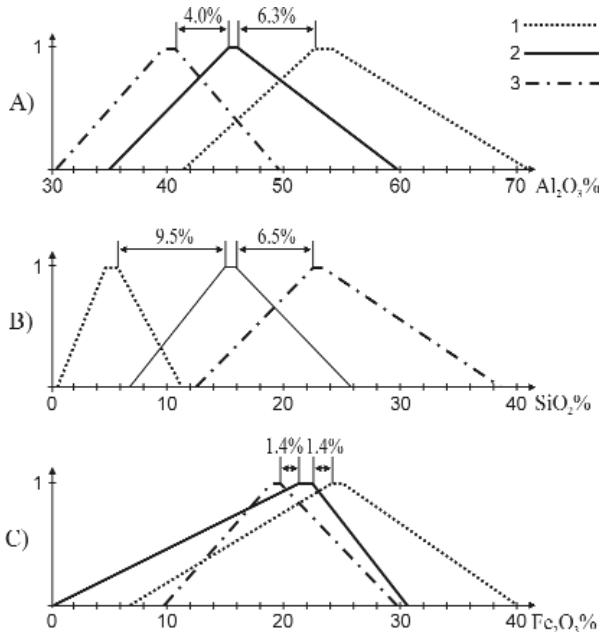


*Figure 31.* Membership functions representing the transitions of the bauxitic rocks (sector No. 7)
1 — bauxite, 2 — clayey bauxite, 3 — bauxitic clay, A — regarding the $Al_2O_3$ content, B — $SiO_2$ content, 3 — $Fe_2O_3$ content

***31. ábra.*** Tagságfüggvények a bauxitos kőzetek átmeneteinek érzékeltetésére (7. részterület)
1 — bauxit, 2 — agyagos bauxit, 3 — bauxitos agyag, A — $Al_2O_3$-tartalomra, B — $SiO_2$-tartalomra, C — $Fe_2O_3$-tartalomra

the core of the bauxite and the clayey bauxite (see Figure 31B). The difference between the position of the core of the clayey bauxite and the bauxitic clay is 6.5%. The overlap between the bauxite and the clayey bauxite is very small. Between the clayey bauxite and the bauxitic clay it is much larger. Note the shortness of the cores for all the three rock types, indicating their limited uncertainty.

For the $Al_2O_3$ content the difference of the core positions is much smaller (see Figure 31A). On the other hand, the overlaps are larger. The differences are smallest for the $Fe_2O_3$ contents and the overlaps are so large, that in this respect no significant difference exists between the three rock types (see Figure 31C). On the other hand, the high variability of the $Fe_2O_3$ content is well demonstrated by the length of the support of the membership functions. Let us stress that these information cannot be obtained directly by the traditional statistical methods. The membership functions are particularly useful when comparing several chemical components for different rock types.

*Correlation studies* were carried out with the aim to detect geochemical relationships between the chemical components of the Halimba bauxite. The role of the scale-factor was also evaluated in this respect. Thus first the level of the sector averages was evaluated, followed by the bauxite averages of the boreholes.

In bauxitic rocks the $Al_2O_3$ is the most important chemical component. For this reason all chemical components were correlated to the $Al_2O_3$ content. In the former correlation studies linear or quasi-linear correlation was presumed between the chemical components and the corresponding Pearson's correlation coefficients have been calculated. The recent calculations revealed however, that in the Halimba bauxite most of the chemical components are correlated in a non-linear way. In this case Pearson's correlation coefficient has no meaning.

The correlation between the sector averages of the $Al_2O_3$ and the $SiO_2$ content of the bauxite is very loose as shown of Figure 32. The "smoother curve" shows a non-linear correlation between the two components. The loose relationship can be explained by the fluvial–detritic accumulation of this bauxite deposit. The correlation on the borehole-level is also loose. In most sectors it is non-linear, as shown on Figure 33A. This figure represents the sector No. 7, containing 133 productive boreholes. Linear correlation was found only in a few sectors, as shown on Figure 33B. Pearson's correlation coefficient is 0.682. This diagram represents the 51 productive boreholes of the sector No. 14.

There is only a weak correlation between the $Al_2O_3$ and $Fe_2O_3$ contents of the bauxite in the sector level. The "cloud" of the diagram on Figure 34 shows well this situation. At any rate, it can be seen on this diagram, that the iron rich sector averages have the smallest average $Al_2O_3$ content, but the high $Al_2O_3$ averages may correspond to different average $Fe_2O_3$ contents (from 21% to 24%). On the borehole level the type of the correlation was found to be quite different. In some sectors the relationship is quite close and almost linear, as shown on Figure 35A. In this sector (No. 7) the $Fe_2O_3$ content clearly diminishes with the increasing $Al_2O_3$ content. However in most sectors there is no correlation at all between the two components (Figure 35B) or the correlation is very loose and non linear (Figure 35C).

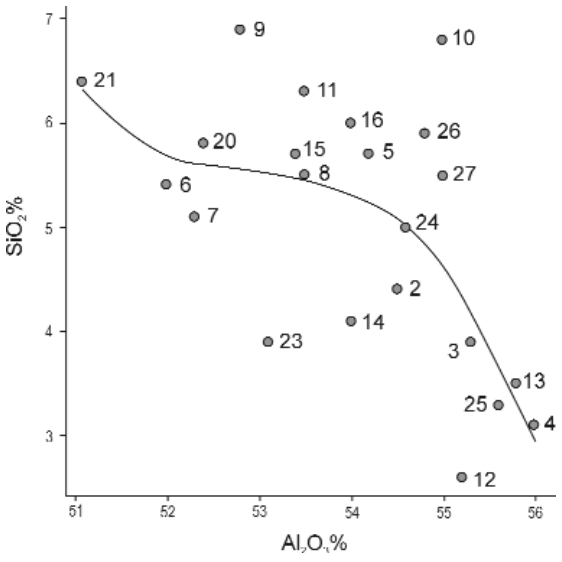


*Figure 32.* Correlation of the $Al_2O_3$ and $SiO_2$ contents in the bauxite (the numbers indicate the sectors)

***32. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $SiO_2$-tartalmának korrelációja (a számok a részterületeket jelölik)

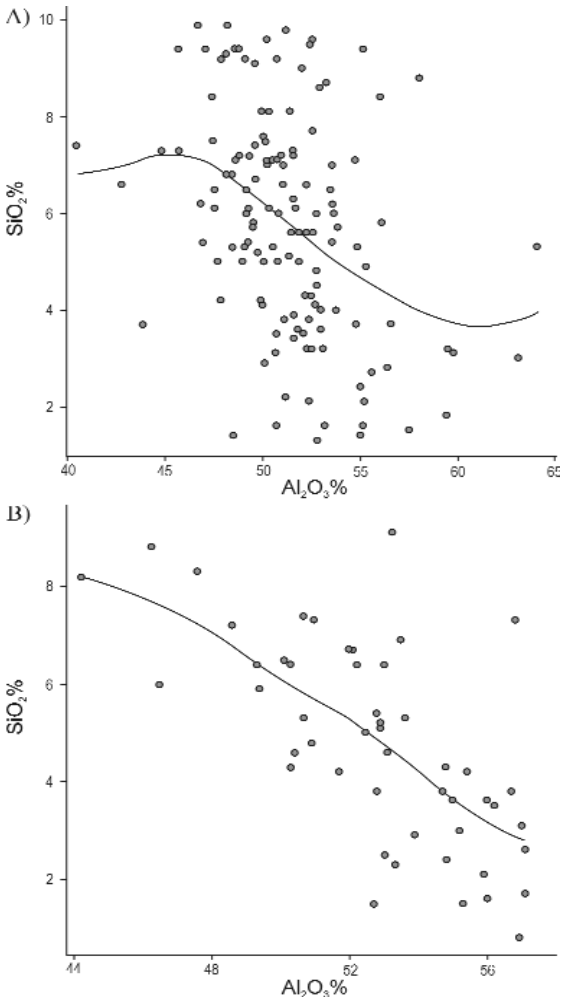


*Figure 33.* Correlation of the $Al_2O_3$ and $SiO_2$ contents in the bauxite

A — sector 7, B — sector 14 (the points indicate bauxite averages of the bore holes)

***33. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $SiO_2$-tartalmának korrelációja a fúrások szintjén

A — 7. részterület, B — 14. részterület (a pontok az egyes fúrásátlagokat jelölik)

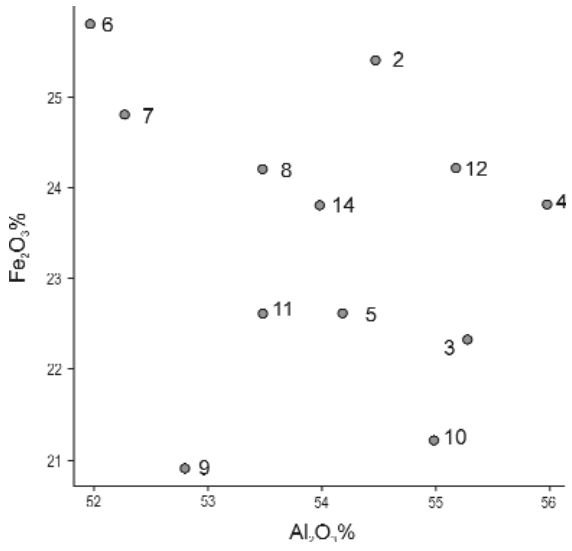


*Figure 34.* Correlation of the $Al_2O_3$ and $Fe_2O_3$ contents in the bauxite (the numbers indicate the sectors)

***34. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $Fe_2O_3$-tartalmának korrelációja (a számok a részterületeket jelölik)

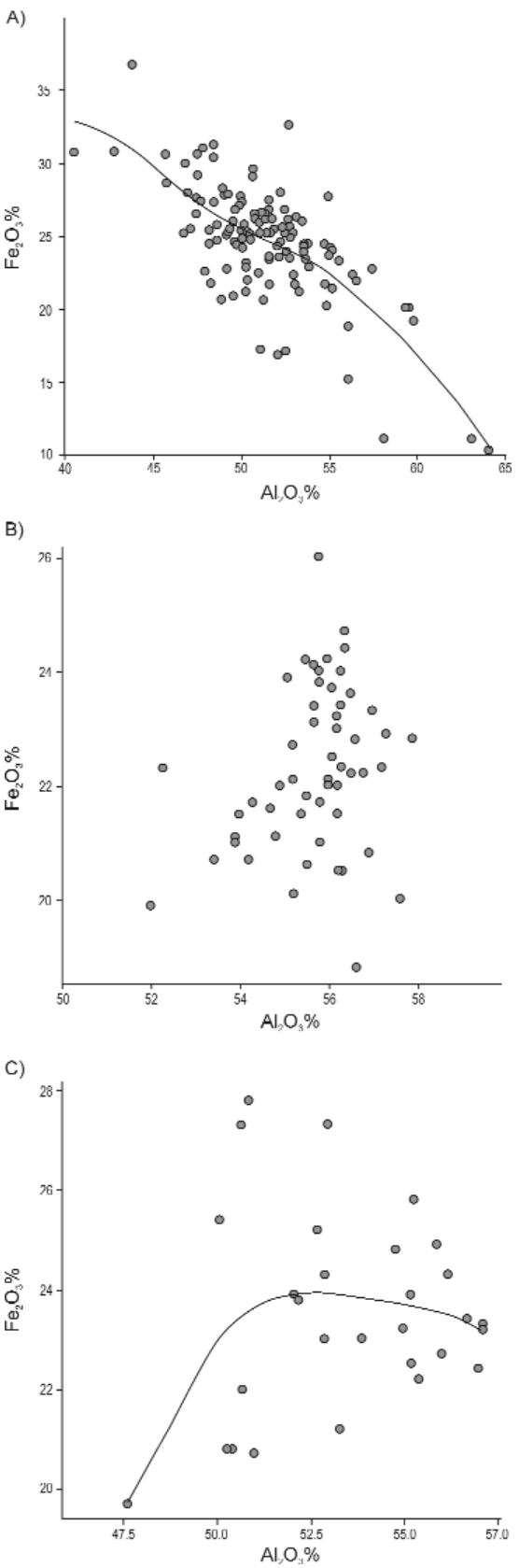


*Figure 35.* Correlation of the $Al_2O_3$ and $Fe_2O_3$ contents in the bauxite

A — sector 7, B — sector 13, C — sector 14. The points indicate bauxite averages of the bore holes

***35. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $Fe_2O_3$-tartalmának korrelációja a fúrások szintjén

A — 7. részterület, B — 13. részterület, C — 14. részterület. A pontok az egyes fúrásátlagokat jelölik

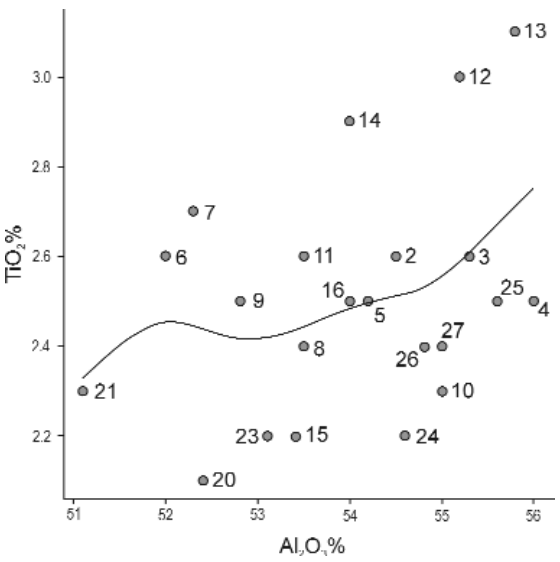


*Figure 36.* Correlation of the $Al_2O_3$ and $TiO_2$ content of the bauxite (the numbers indicate the sectors)

***36. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $TiO_2$-tartalmának korrelációja (a számok a részterületeket jelölik)

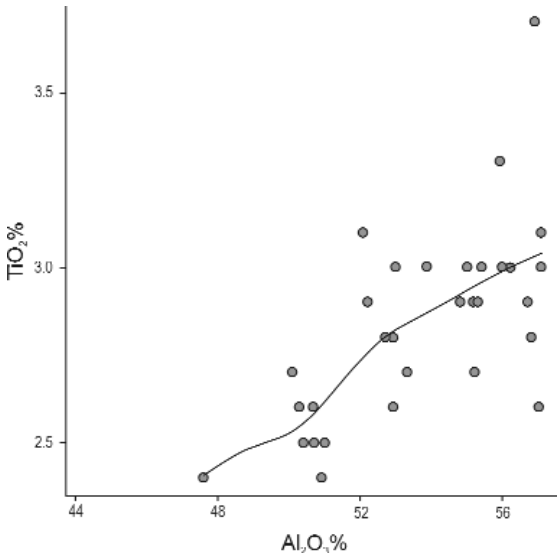


*Figure 37.* Correlation of the$Al_2O_3$ and $TiO_2$ content in the bauxite in sector 14 (the points indicate bauxite averages in the boreholes)

***37. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $TiO_2$-tartalmának korrelációja a fúrások szintjén, 14. részterület (a pontok az egyes fúrásátlagokat jelölik)

It is well known from geochemical textbooks that in several rocks there is a close correlation between the $Al_2O_3$ and the $TiO_2$ content. This is valid for the Halimba bauxite too, but on the sector average level the correlation is very loose, as shown on Figure 36. The correlation is not linear as shown by the "LLR smoother" line. The diagram confirms only the areal trend discussed in this chapter, as the sectors of the Halimba II SW bauxite body have the highest average $TiO_2$ content (sectors No. 12, 13, 14). The correlation is much closer on the level of the boreholes, and almost linear. This can be seen on Figure 37 representing the borehole averages of the sector No. 14.

An interesting relationship could be detected for the $Fe_2O_3/TiO_2$ correlation when comparing the sector averages for the bauxite, clayey bauxite and bauxitic clay (Figure 38). Very weak correlation can be seen within each rock type: a decrease of the $TiO_2$ content occurs with increasing $Fe_2O_3$ averages. On the other hand, a positive correlation can be seen starting from the bauxitic clay in direction of the bauxite. The correlation coefficient is +0.72.

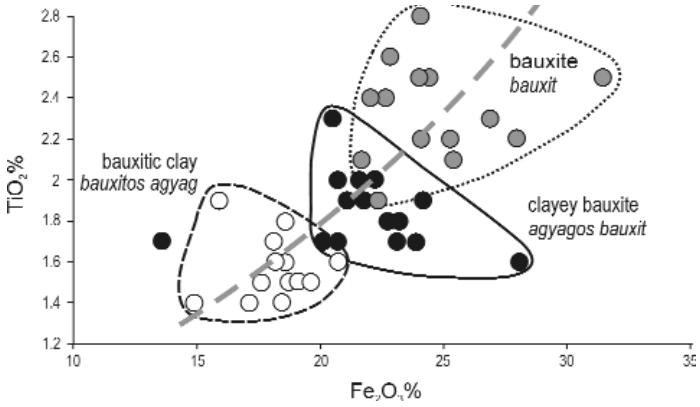


*Figure 38.* Correlation of the $Fe_2O_3$ and $TiO_2$ content on the level of bore hole averages and on the level of the three main rock types

***38. ábra.*** A három bauxitos kőzetfajta $Fe_2O_3$- és $TiO_2$-tartalmának korrelációja a fúrások szintjén, valamint a kőzetfajták szintjén

No correlation was detected between the $Al_2O_3$ and the $+H_2O$, CaO, MgO, $P_2O_3$. In the eight sectors where $MnO_2$ averages were calculated no correlation was found as well (Figure 39). Here again the areal trend discussed in this chapter can be seen: the highest averages occur in the two sectors situated in the western part of the deposit (sectors No. 5 and 12). These two sectors have been evaluated also on the borehole level. There is a significant difference between the two sectors. A non linear positive correlation exists in the western part of the Cseres bauxite body (sector No. 5), as presented on Figure 40A. On the other hand, no correlation exists between the $Al_2O_3$ and the $MnO_2$ in the sector No. 12. It is not clear why are the borehole averages of bauxite located in two groups, most boreholes having a relatively low $MnO_2$ content, but five ones having very high values (0.60% to 0,80%) , as represented on Figure 40B. Most probably a late diagenetic or epigenetic mobilisation was the reason for this high enrichment.

As mentioned above, the correlation coefficients calculated for the different chemical components are very uncertain, even biased because of the non-linear relationship of most components. However, an interesting pattern was found when calculating the average correlation coefficients for the three bauxitic rock types:

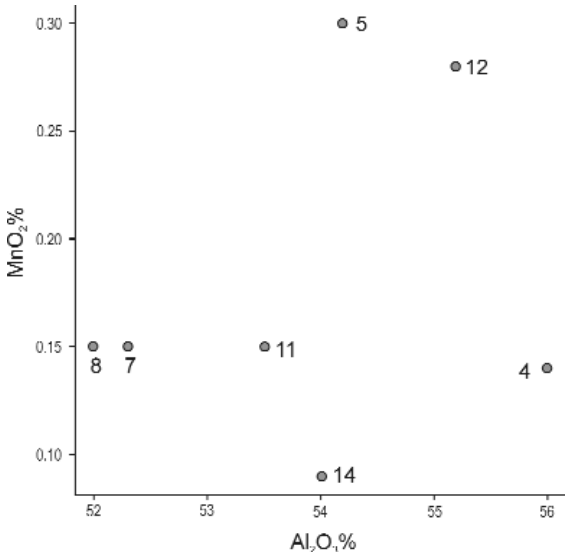


***Figure 39.*** Correlation of the $Al_2O_3$ and $MnO_2$ contents in the bauxite on the level of the sector-averages (the numbers indicate the sectors)
***39. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $MnO_2$-tartalmának korrelációja a részterületek szinjén (a számok a részterületeket jelölik)

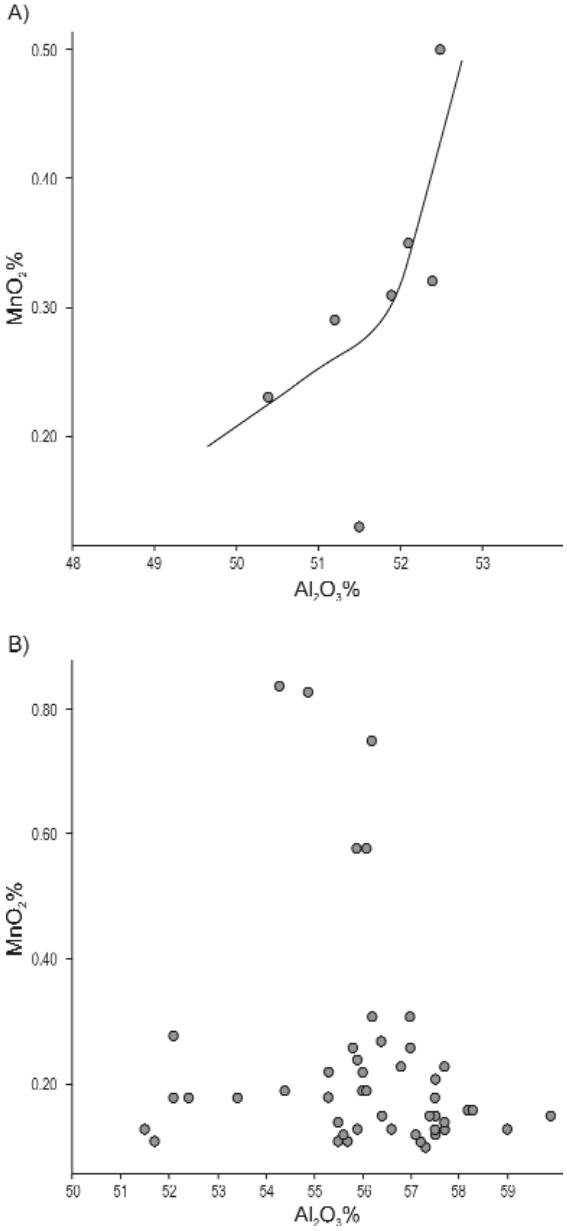


***Figure 40.*** Correlation of the $Al_2O_3$ and $MnO_2$ content of the bauxite on the level of the bore hole averages
A — sector No. 5, B — sector No. 12
***40. ábra.*** A bauxit $Al_2O_3$- és $MnO_2$-tartalmának korrelációja a fúrások szintjén
A — Cseres nyugati széle (5. részterület), B — Halimba II. DNy mederfáciese (12. részterület)

| | |
|---|---|
| Bauxite | 0.54 |
| Clayey bauxite | 0.39 |
| Bauxitic clay | 0.40 |

All the three averages are relatively low, corresponding to the fluvial/detritic accumulation of the bauxite deposit. The correlation coefficient of the bauxite is slightly higher than that of the two other rocks, indicating a geochemical difference with these two rocks. In this respect bauxitic clay and the clayey bauxite are almost identical.

All the above discussed calculations were of bivariate character. However our geochemical experiences showed us that in most places a *multivariate relationship* exists between the chemical components of the Halimba bauxite. The first multivariate statistical evaluation of the Halimba bauxite was carried out by JUHÁSZ, Ó. KOVÁCS (1990).They investigated 230 bauxite samples taken from boreholes. Their aim was to distinguish geochemical groups by applying hierarchical agglomerative cluster analysis. Squared Euclidean distances were used as a measure of similarity. Fourteen groups have been distinguished and a relationship was found between the chemical composition of the groups and their facies of accumulation. However, in several cases samples of different facies had identical or very similar chemical composition.

BÁRDOSSY, Ó. KOVÁCS (1995) performed cluster analysis, nonlinear mapping, discriminant analysis and principal component analysis on bauxite samples of the Halimba, Szőc and Kislőd deposits. These multivariate evaluations have been continued on samples of the Halimba deposit by the author of this monography. *Cluster analysis* was carried out on the $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$, $+H_2O$ and CaO contents of the bauxite by applying the hierarchical agglomerative method and squared Euclidean distances. The calculations were carried out on the sector averages of the bauxite, clayey bauxite and bauxitic clay separately. The results for the bauxite are presented on Figure 41. Three multivariate geochemical zones could be distinguished: a western rim zone, a central axial zone and an eastern rim zone. These zones are in good agreement with the facies distribution of the sectors. The Euclidean distances between the sectors were evaluated separately. In most cases the Euclidean distances are shortest between the clayey bauxite and the bauxitic clay; those with the bauxite are much longer.

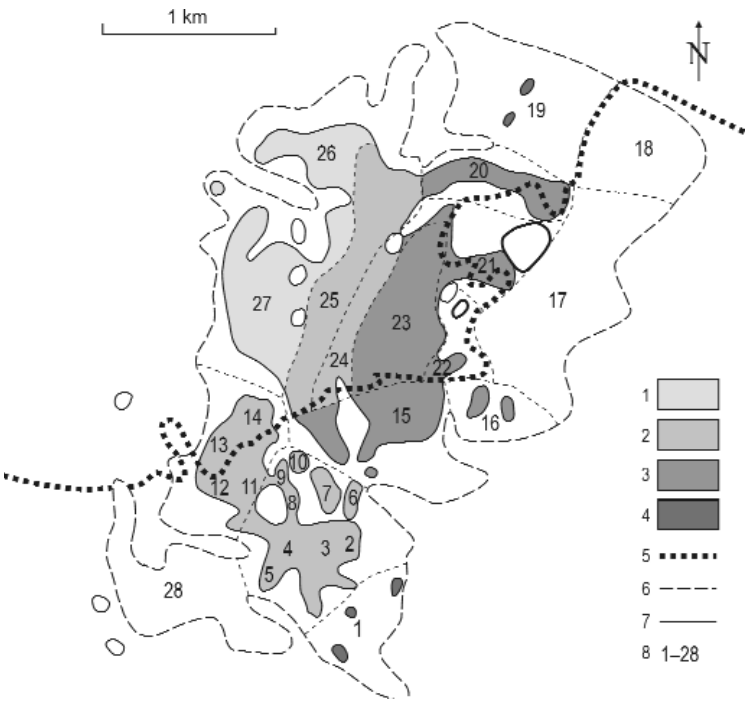


*Figure 41.* Cluster analysis of the multivariate sector averages of the bauxite, obtained by the hierarchical agglomerative method. The differences of the sectors are expressed by Euclidean distances
Geochemical zones: 1 — western rim zone, 2 -central axial zone, 3 — eastern rim zone, 4 — south-eastern rim, 5 — contour of the late Cretaceous sediments, 6 — contour of the bauxite deposit, 7 — contour of the bauxite bodies within the deposit, 8 — numbers of the sectors

***41. ábra.*** A bauxitra vonatkozó részterületátlagok sokváltozós értékelése cluster elemzéssel, hierarchikus agglomeratív módszerrel. A részterületek eltéréseit euklideszi távolságok fejezik ki
Geokémiai övezetek: 1 — nyugati szegélyövezet, 2 — középső tengelyövezet, 3 — keleti szegélyövezet, 4 — délkeleti perem övezete, 5 — a felső-kréta rétegek elterjedésének határvonala, 6 — a bauxitelőfordulás körvonala, 7 — a szorosan vett bauxit körvonala, 8 — a részterületek sorszámai

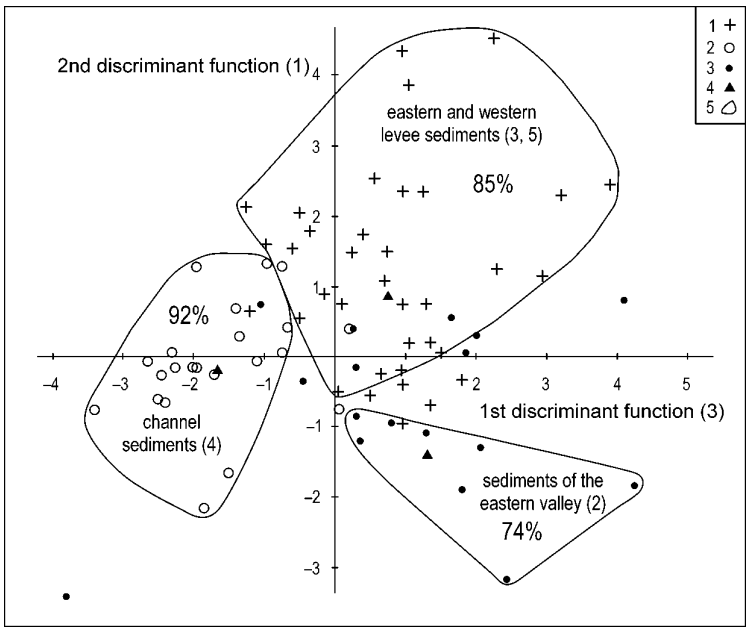


*Figure 42.* Discriminant analysis of the boreholes from the Cseres bauxite body
1 — discriminant scores of the eastern and western levee sediments (sectors No. 3 and No. 5), 2 — discriminant scores of the main channel facies (sector 4), 3 — discriminant scores of the eastern "valley" facies (sector No. 2), 4 — group centroids, 5 — areas where the group classification corresponds to the highest discriminant scores of the given sector. The percentages indicate the rate of correspondance within the given sector

***42. ábra.*** A cseresi bauxittest részterületeinek sokváltozós diszkriminancia-elemzése
1 — a keleti és nyugati szegélyövek (3. és 5. részterületek) diszkriminancia értékei, 2 — a fő mederfácies diszkriminancia-értékei (4. részterület), 3 — a keleti völgybevágás bauxitjának diszkriminancia-értékei (2. részterület), 4 — csoport centroidok, 5 — azon területek körvonalai, amelyekben a diszkriminancia-értékek és a fáciesövek egybeesnek. A százalékok a fáciesekkel megegyező diszkriminancia-értékek arányát fejezik ki

*Discriminant analyses* were carried out with the aim to detect differences in the chemical composition of the neighbouring sectors. The four sectors of the Cseres bauxite body were selected as an example. The results of the calculation are presented on Figure 42. It can be seen that the channel facies is well separated in this respect from its eastern and western neighbouring sectors, characterized by levee facies. The eastern sector (No. 2) corresponds to a shallow valley cut into the underlying clayey bauxite and bauxitic clay. The correspondence of the boreholes with this pattern is very high: 92% in sector No. 4, 85% in the eastern and western levee facies (sectors No. 3 and 5) and 74% in the eastern valley (sector No. 2). Thus the sectors distinguished by their presumed sedimentary facies are characterized by different multivariate chemical compositions.

Similar discriminant analysis was performed on the four sectors of the Halimba II SW bauxite body. The correspondence of the boreholes with the discriminant pattern was even higher: 96.8%. The role of the chemical components in the multivariate composition is as follows: $SiO_2$ 0.89, $Al_2O_3$ 0.58, $TiO_2$ 0.35, CaO 0.26, $+H_2O$ 0.18, $Fe_2O_3$ 0.17, MgO 0.15. Thus the silica and alumina have the dominant role in the multivariate composition of the facies based sectors. Note the surprisingly low role of the $Fe_2O_3$ content.

The role of the different chemical components has been studied also by *principal component analysis.* In most sectors the variability of the chemical composition is determined in the same succession as listed above. As mentioned above, the bivariate correlation between the chemical components is non-linear in most sectors. For this reason no partial and multivariate correlation has been calculated, as these evaluations require linear correlation.

## The trace elements of the Halimba bauxite deposit

The author of the monography collected since 1951 all available trace element analyses of the Hungarian bauxites. Several samples have been analysed from the Halimba deposit. Most of them were annexes to exploration reports. The Bauxite Prospecting Company analysed samples taken from the boreholes. The FKI Research Institute has taken samples from the active mines. Unfortunately, the sampling locations were chosen by chance and not by geochemical considerations. Thus the entire sampling is not representative. The analyses were carried out mainly by spectrometric methods. The analytical error was ±20% if the concentration of the given element was 2 to 10 times higher than the limit of detectability.

Thus the data collected about the Halimba deposit represent a fairly heterogeneous set. For this reason the traditional methods of "descriptive statistics" can be considered only as approximations. As a complement fuzzy numbers and "membership functions" have been constructed.

DUDICH, SIKLÓSINÉ (1967) published a detailed evaluation of the trace elements of the Hungarian bauxites. Unfortunately, their data could not be used directly in this monography as they jointly evaluated the samples of the Halimba and Szőc deposits, having different ages and origin.

Most of the available trace element analyses were carried out on samples from the Halimba II SW bauxite body (sectors No. 6–14). A much smaller number of samples were taken from the Cseres, Tormás-kút and Halimba III mines. No analyses at all were made from the northern part of the deposit (Halimba IV and V). Generally 2 to 6 sampling intervals were analysed from the surface boreholes. Only two boreholes (Halimba hydrogeologic borehole Hk–1 and Halimba H–2016) have been sampled and analysed from the bottom to the top of the bauxite sequence. They have been evaluated by the author separately. The analyses comprised the seven main chemical components of the bauxite, plus 17 trace elements. Only 7 of them extended to all the three mining areas. The trace element contents have been presented in oxide form. The number of analyses is different also for the trace elements, as indicated on Table 8. The table presents the averages, the minimum and maximum values of the three study areas.

The first aim of the evaluation was to determine the average concentrations of each element separately for the three study areas. Based on these data the order of concentration for each area was established. In a next

***Table 8.*** Main statistical parameters of the trace elements in the Halimba bauxite

| Trace elements | Cseres | | | | Halimba II SW | | | | Halimba III and Tormás-kút | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pieces | $\overline{X}$ | minimum | maximum | pieces | $\overline{X}$ | minimum | maximum | pieces | $\overline{X}$ | minimum | maximum |
| $B_2O_3$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0.021 | 0.013 | 0.090 |
| BaO | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0.0105 | 0.0045 | 0.0500 |
| BeO | 9 | 0.0074 | 0.0008 | 0.0166 | 74 | 0.0021 | 0.0006 | 0.0096 | 13 | 0.0013 | 0.0008 | 0.0032 |
| $Co_2O_3$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0.0085 | 0.0030 | 0.0220 |
| $Cr_2O_3$ | 27 | 0.0650 | 0.0300 | 0.1100 | 87 | 0.0580 | 0.0210 | 0.1030 | 16 | 0.0760 | 0.0500 | 0.1300 |
| CuO | – | – | – | – | 74 | 0.0028 | 0.0005 | 0.0359 | 13 | 0.0029 | 0.0004 | 0.0080 |
| F | 8 | 0.110 | 0.080 | 0.140 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| $Ga_2O_3$ | 9 | 0.0046 | 0.0027 | 0.0130 | 74 | 0.0070 | 0.0044 | 0.0110 | 13 | 0.0087 | 0.0050 | 0.0160 |
| $Li_2O$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0.0044 | 0.0001 | 0.0230 |
| $MoO_3$ | 6 | 0.0089 | 0.0075 | 0.0112 | 74 | 0.0018 | 0.0005 | 0.0062 | 13 | 0.0027 | 0.0015 | 0.0045 |
| $Nl_2O_5$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 7 | 0.0160 | 0.0100 | 0.0300 |
| NoO | 4 | 0.0074 | 0.0038 | 0.0102 | 74 | 0.0226 | 0.0060 | 0.0600 | 13 | 0.033 | 0.016 | 0.075 |
| PbO | – | – | – | – | 74 | 0.116 | 0.0030 | 0.0182 | 13 | 0.0080 | 0.0058 | 0.0180 |
| $SnO_2$ | – | – | – | – | 74 | 0.0020 | 0.0006 | 0.0044 | 13 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0011 |
| SrO | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0.0804 | 0.0021 | 0.2200 |
| $V_2O_5$ | 27 | 0.0900 | 0.0440 | 0.1600 | 87 | 0.1640 | 0.0900 | 0.3000 | 16 | 0.1050 | 0.0850 | 0.1950 |
| $ZrO_2$ | 9 | 0.048 | 0.027 | 0.089 | 74 | 0.095 | 0.042 | 0.136 | 13 | 0.071 | 0.043 | 0.089 |

step the variability of the distributions and the relationships between pairs of elements were detected. In a final step a comparison was made between the trace element content of the bauxite and the other rock types of the bauxite sequence.

As mentioned above, Table 8 presents an overview on all the trace element analyses of the bauxite samples. Table 9 shows the order of concentration of the trace elements in the three study areas. The order is quite similar with only a few exceptions, e.g. for nickel and molybdenum. The most frequent element is vanadium in all the three areas, followed by chromium, zircon. The averages of the concentrations diminish quickly. $SnO_2$ has the smallest average concentration (0.0009%).

The studied trace elements belong to the following groups of Szádeczky-Kardoss's geochemical classification (SZÁDECZKY-KARDOSS1955):

| | |
|---|---|
| To the siderophil elements | Co, Ni |
| To the sulpho-chalcophil elements | Cu, Pb |
| To the oxychalcophil elements | Ga, Sn |
| To the pegmatophil elements | Cr, Mo, Nb, V, Zr |
| To the lithophil elements | Ba, Be, Li, Sr |
| To the sedimentophil elements | B, F |

Thus all geochemical groups are represented in the Halimba bauxite, indicating that several rock types participated as source rocks of this bauxite. Note, that the pegmatophil trace elements are present in highest concentration in the bauxite.

The *variability of the distribution* can be characterized by the relative standard deviation. The following values were obtained for the Halimba II SW bauxite:

| | |
|---|---|
| CuO | 193% |
| NiO | 62% |
| $MoO_3$ | 56% |
| $SnO_2$ | 40% |
| PbO | 34% |
| BeO | 33% |
| $Cr_2O_3$ | 31% |
| $V_2O_5$ | 24% |
| $Ga_2O_3$ | 22% |
| $ZrO_2$ | 21% |

Thus the copper content of the Halimba bauxite has the highest variability. Note: how similar, the relative variability of the last six elements.

***Table 9.*** The order of the trace element averages in the Halimba bauxite (%)

| Cseres | | Halimba II SW | | Halimba III Tormás-kút | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $V_2O_5$ | 0.1640 | | |
| | | | | $V_2O_5$ | 0.1050 |
| $V_2O_5$ | 0.0900 | $ZrO_2$ | 0.0950 | | |
| | | | | SrO | 0.0804 |
| | | | | $Cr_2O_3$ | 0.0760 |
| $Cr_2O_3$ | 0.0650 | $Cr_2O_3$ | 0.0580 | $ZrO_2$ | 0.0710 |
| $ZrO_2$ | 0.0620 | | | | |
| | | | | NiO | 0.0330 |
| | | NiO | 0.0226 | $B_2O_3$ | 0.0210 |
| | | | | $NbO_3$ | 0.0160 |
| | | PbO | 0.0116 | BaO | 0.0105 |
| $MoO_3$ | 0.0089 | | | $Ga_2O_3$ | 0.0087 |
| | | | | $Co_2O_3$ | 0.0085 |
| | | | | PbO | 0.0080 |
| NiO | 0.0074 | | | | |
| BeO | 0.0074 | $Ga_2O_3$ | 0.0068 | | |
| $Ga_2O_3$ | 0.0065 | | | | |
| | | | | LiO | 0.0044 |
| | | CuO | 0.0028 | CuO | 0.0029 |
| | | BeO | 0.0021 | | |
| | | $SnO_2$ | 0.0020 | | |
| | | $MoO_3$ | 0.0018 | BeO | 0.0013 |
| | | | | $SnO_2$ | 0.0009 |

The variability of the elements can be represented also by fuzzy membership functions. In the centre of the "core" is the average of the given element. On both sides of it are the confidence intervals at 95% level of confidence. Thus the core represents the most frequently occurring values of the concentration. The "support" of the membership function extends from the lowest analysed value to the highest one. The relative standard deviations represent the average variability of the distribution. On the other hand, the membership functions visualize additionally other values, such as the "range" and the length of the confidence interval. Thus the two indicators complete each other.

The corresponding membership functions are presented on Figures 43 and 44. The four trace elements with highest concentrations are shown on Figure 43. The confidence intervals of the core have very similar length, but the ranges are different. It is longest in the case of the vanadium and shortest in the case of the nickel. The membership functions indicate also that the distributions are not symmetrical. The vanadium, chromium and nickel are skewed in positive direction, the zirconium in the negative one. These skewed distributions are generally interpreted in geochemistry by enrichment and dilution. It is possible that these processes occurred in the Halimba bauxite too, but further studies are needed to prove this assumption.

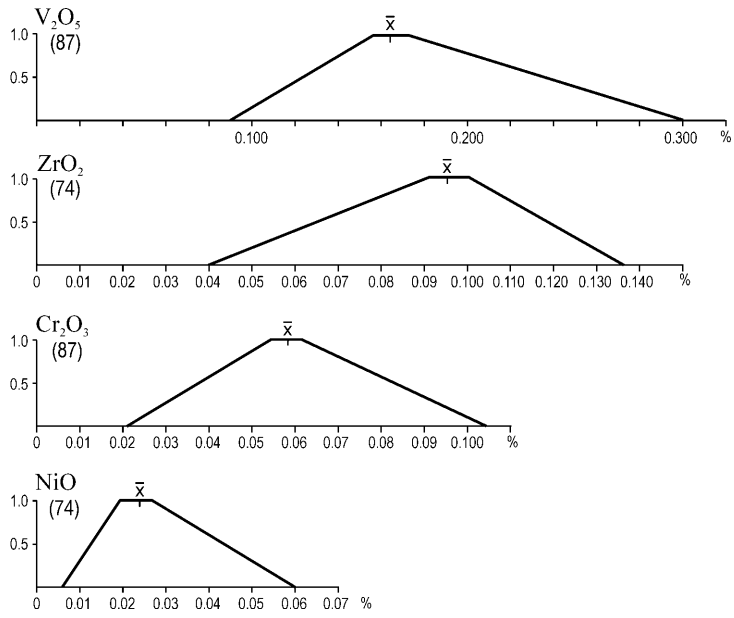


***Figure 43***. Fuzzy membership functions of the zirkon, chromium, nickel and vanadium contents of the bauxite (Halimba II SW bauxite body)

***43. ábra.*** A halimbai bauxit cirkon-, króm-, nikkel- és vanádiumtartalmának fuzzy tagságfüggvényei (Halimba II. DNy)

Further five elements with smaller concentrations are presented on Figure 44. The differences between the membership functions are more significant as in the case discussed before. The short range of the beryllium indicates a limited variability of this element. On the other hand, the range of copper is extremely long. The maximum value of 0.0359% is not an outlier, as four other samples were found having similar

concentrations. The skewness of the distribution is also very high: +4.695. The reasons for this extreme asymmetry are not clarified. Further studies with electron microprobe should be needed.

From the Halimba II SW bauxite body not only the bauxite has been sampled, but the other rock types of the bauxite sequence as well: 55 samples from the clayey bauxite and 20 from the bauxitic–detritic carbonate rocks. Unfortunately, only one to three analyses were made from the bauxitic clay and from the grey pyritic bauxite. The following three groups could be distinguished:

— The concentration of the given trace element is highest in the bauxite.

— The concentration of the given trace element is nearly equal in the bauxite and in the clayey bauxite.

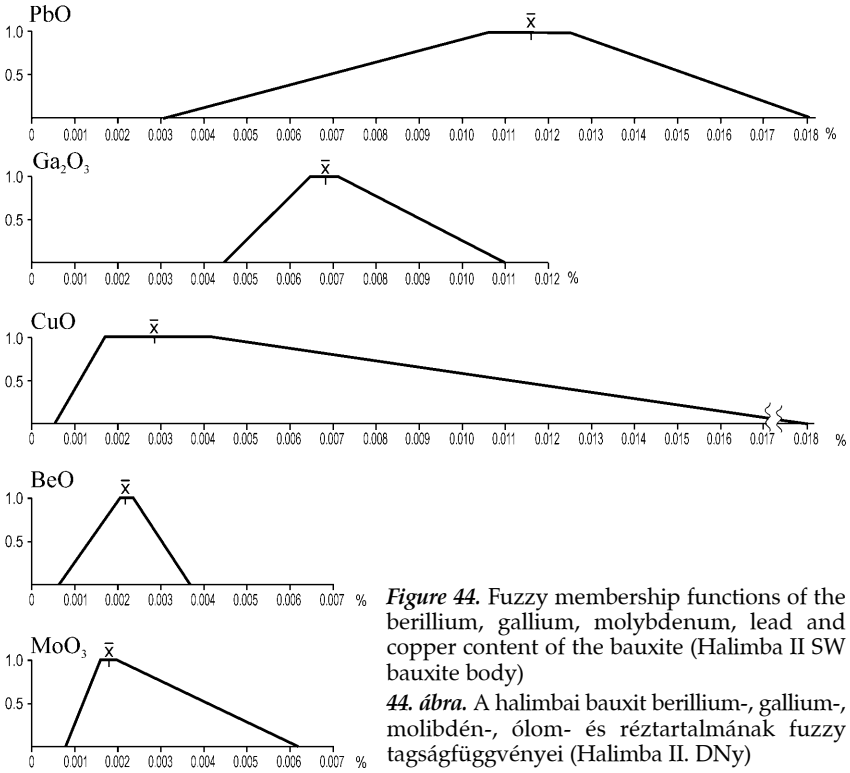


***Figure 44.*** Fuzzy membership functions of the berillium, gallium, molybdenum, lead and copper content of the bauxite (Halimba II SW bauxite body)

***44. ábra.*** A halimbai bauxit berillium-, gallium-, molibdén-, ólom- és réztartalmának fuzzy tagságfüggvényei (Halimba II. DNy)

— The concentration of the given trace element is highest in the clayey bauxite.

The chromium, vanadium and the zirconium belong to the first group. They all are pegmatophil elements and they have the highest trace element concentration in the Halimba bauxite. The changes of concentration with the rock-types are shown by the vanadium on Figure 45. The other two elements show similar changes. For a better comparison a logarithmic scale was applied. The numbers of the rock types are ordered in a genetic sequence. In the case of sufficient analyses a straight line expresses the concentration change. Where only a few analyses were available the maximum and minimum values are indicated. The average must be somewhere in between in the grey coloured field of the diagram.

The beryllium, gallium, lead and zinc belong to the second group. Gallium, lead and zinc are chalcophil elements, the beryllium is lithophil. The diagram of gallium is represented on the Figure 45. Here again the grey shaded area indicates the uncertainty.

The copper, molybdenum and nickel belong to the third group. All the three elements are situated in different geochemical categories. The diagram of nickel is shown on the Figure 45. The concentration of nickel is significantly higher in the clayey bauxite than in the bauxite. Note also the relatively high nickel concentration in the bauxitic–detritic carbonate rock samples.

The diagrams of Figure 45 show that the distribution of average concentrations of the trace elements is significantly different. If we accept that the Halimba deposit consists of subsequent sedimentary layers — as discussed in chapter: Sedimentological features of the deposit — than the different average concentrations must be related

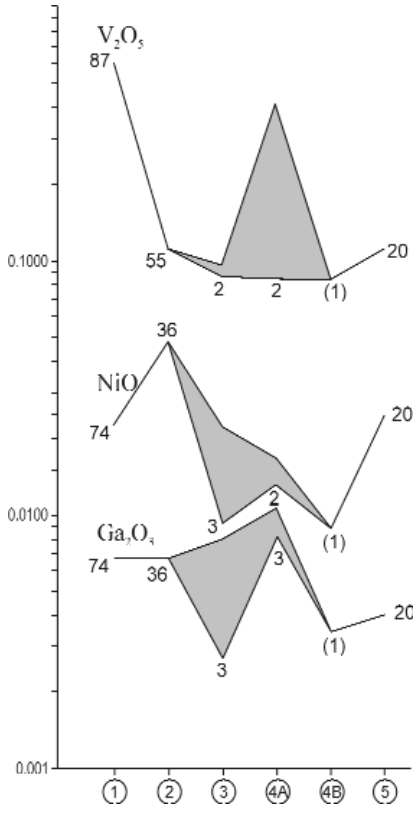


***Figure 45.*** The gallium, nickel and vanadium contents of the bauxitic rock-types in the Halimba II SW bauxite body

1 — bauxite, 2 — clayey bauxite, 3 — bauxitic clay, 4A — gray pyrite bearing bauxite, 4B — gray pyrite bearing bauxitic clay, 5 — detritic carbonate rocks with bauxitic groundmass, 74 — number of chemical analyses. The grey shaded area represents uncertain concentration intervals, because of the small number of chemical analyse

***45. ábra.*** A gallium, nikkel és vanádium mennyisége a bauxitösszlet kőzetfajtáiban (Halimba II. DNy)

1 — bauxit, 2 — agyagos bauxit, 3 — bauxitos agyag, 4A — szürke pirites bauxit, 4B — szürke pirites bauxitos agyag, 5 — bauxitos-karbonáttörmelékes kőzetek, 74 — elemzések száma. A szürke terület a kis számú elemzés miatt bizonytalan koncentráció-intervallumot jelöli

to differences in the source rocks and to the transport of the lateritic weathering products, occurring in different facieses. The details of such a differentiation are not yet clarified, but the simultaneous lateritic weathering of different source rocks seems to be fairly probable.

As mentioned above, that the boreholes Halimba hydrogeologic borehole Hk–1 and Halimba H–2016 have been sampled and analysed by 31–31, together by 62 samples. 19 samples of the Hk–1 borehole are clayey bauxites. Four bauxite layers are situated between the clayey bauxite. Only the vanadium and the chromium have been analysed in this borehole, plus the main chemical components. The averages of the vanadium are almost identical in the four bauxite layers, varying from 0.095% to 0.100%. The chromium content diminishes from the bottom to the top, from 0.090% to 0.070%.

In the Halimba H–2016 borehole bauxitic–detritic carbonate rocks appear in 3 layers.The three bauxite layers are much thicker, and the clayey bauxite layers are thinner. This corresponds to the location of this borehole in the 12$^{th}$ sector, characterized by channel bottom facies (see Figure 2). Here all the ten trace elements were determined. No vertical changes were registered in the case of lead, zinc and molybdenum. The averages of vanadium slightly increase upward. On the other hand, the average concentrations of beryllium, zircon, chromium, gallium and copper slightly increased downward. There is only one element — nickel — where a strong increas downward was registered in the bauxite layers:

| | | |
|---|---|---|
| Average of the upper layer | 0.0130 | (4 samples) |
| Average of the middle layer | 0.0320 | (6 samples) |
| Average of the lower layer | 0.0442 | (3 samples) |

The reason for this increase may be primary — differences in the trace element concentrations in time of the arriving weathering products. However the possibility of a partial mobilisation and downward migration of the nickel content cannot be excluded as well.

DUDICH, SIKLÓSINÉ (1967) presented in their fourth table the correlation coefficients of several trace elements of Hungarian bauxites. For the Halimba bauxites first "scatter-plots" were constructed by the author. He found that the correlation between pairs of elements is not linear. Thus the calculation of Pearson's correlation coefficients is mathematically not justified. In all studied cases the correlation is very loose, the points form irregular clouds. The relationship can be detected only by applying "smoother curves". The positive or the negative sign of the relationship is in good agreement with the results of Dudich and Siklósiné e.g. the vanadium/gallium, the vanadium/chromium and vanadium/beryllium relationships.

According to SCHROLL, SAUER (1964) those elements are enriched in bauxites whose *ionic potential* (the ratio of the ionic charge to the ionic radius of the given element) is close to that of the aluminium: Al, Fe, Ti, V, Co, Cr, Ga, Be, Zr, U, Th, Sc, Sn, Nb, Hf. According to the authors the ionic potential of these elements varies from 3.5 to 7.5 Z/r. They call them *"bauxitophil elements"*.

DUDICH, SIKLÓSINÉ (1967) found that this statement is valid for the Hungarian bauxites too. According to their study, vanadium, chromium, zircon, gallium, beryllium molybdenum and thorium are most enriched in the Hungarian bauxite deposits. The results of this monography are in good agreement with the opinion of Dudich and Siklósiné. No thorium analyses were carried out so far on bauxite samples of the Halimba deposit.

To summarize our trace element study, it can be confirmed that the "bauxitophil elements" are most enriched in the Halimba bauxite. Thus the role of the ionic potential is significant. However, probably other factors like pH, Eh or sedimentary facies could also influence the trace element content of these bauxites.

## The mineralogical composition of the deposit

Several microscopic, thermoanalytical and X-ray diffractometrical studies were performed on the Halimba bauxite deposit with the aim to determine the mineralogical composition of the bauxite. The results have been evaluated by BÁRDOSSY (1961) and BÁRDOSSY et al. (2000). Since that time no further mineralogical studies were carried out.

The Halimba bauxite has an overwhelmingly *boehmitic* composition. *Gibbsite* was detected only in a few intervals of some boreholes in a quantity of less than 5%. On the contrary, the neighbouring Szőc and Malom Valley deposits consist almost entirely of gibbsitic bauxite. *Kaolinite* is the main clay mineral in the bauxite. Some percents of *berthierine* (former chamosite) were detected by X-ray diffractometry. *Quartz* is present in the form of very small detritic minerals in less than 0.01% quantity (MINDSZENTY, GÁLNÉ SOLYMOS 1988, MINDSZENTY et al. 1991). The main ferric iron mineral is *hematite,* accompanied by some percents of *goethite.* It is not a pure goethite, but it contains some molecular percents of Al, in the form of isomorphic substitution. It is more correct therefore to call it *alumo-goethite.* More than 350 *siderite* determinations were carried out on the bauxite, requested by the alumina plants. The average siderite content of the Halimba II SW bauxite body was found to be 0.3%.

As mentioned in chapter: Petrographic composition of the bauxite…, the grey, reduced bauxite contains 5% to 20% *pyrite,* accompanied by some percents of *marcasite.* The two minerals generally occur together, forming nests of centimetre size or they are finely disseminated in the grey bauxite. *Melanterite* is formed by their secondary oxidation. Another oxidation product is *alunite* occurring less frequently in the Halimba bauxite. In one of the galleries of the Cseres mine a concretion of about 20 cm size was found in the red bauxite. Its X-ray diffractometer study revealed that it consists of 80% hematite, 6% goethite and 13% *magnetite.* It is interpreted as a diagenetic or epigenetic product, precipitated from slightly reducing iron rich solutions.

The main titanium mineral is *anatase,* accompanied by less *rutile.* Both minerals are very small, generally of some microns size and they were formed together with the main alumina minerals. Additionally very few detritic anatase and rutile grains were found by microscopic studies of KISS (1955). The phosphorus is present in the form of *apatite* and *crandallite.*

The clayey bauxite and the bauxitic clay consist of the same minerals as the bauxite. The main difference is that they contain more kaolinite: 20–50% the clayey bauxite and more than 50% the bauxitic clay.

The detritic carbonate rocks contain carbonate rock debris consisting of *calcite* and *dolomite* in varying proportions. Their cementing material is bauxitic, consisting of the same minerals as the bauxite.

BÁRDOSSY, Pantó (1971) studied the bauxites by electron microprobe. They found that samples from the Halimba III mine had a grain-size of less than 1 $\mu$m. The same minerals were detected by them as those investigated by X-ray diffractometry.

Microscopic, electron microscope and microprobe studies performed by MINDSZENTY, GÁL-SOLYMOS (1991) detected a number of detritic minerals, so called *extraclast*s in the Halimba bauxite. Their total amount varies from 0.001% to 0.01%. The diameter of the minerals is less than 0.25 mm. The most frequently occurring minerals are: *albite, apatite, potassium feldspar, chlorite, and quartz.* Few *anortite* and *zircon* was detected in some samples. Little tiny rock debris were also found, mainly mica-schist and other metamorphic rock debris. The results of these investigations furnish precious information about the possible source-rocks of the bauxite.

## The origin of the Halimba bauxite

Genetic ideas were formed about the Halimba deposit since the time of its discovery.

GYÖRGY (1923) presumed that the material of the bauxite was transported by wind to its present place from an area covered by silicate rocks. VADÁSZ (1946, 1951) suggested that all bauxite deposits of Hungary are products of lateritic weathering. They were transported to their actual place by fluvial agents. He stressed that the bauxite was several times redeposited. BARNABÁS (1957, 1970) also supposed lateritic weathering of a clayey initial material. He also presumed fluvial transport. The bauxitic material was sedimented close to the ancient sea shore in karstic depressions. He found Pyrgulifera fossils in the top part of the Cseres bauxite body, in the grey clayey bauxite. He interpreted it as a near shore marsh, not suitable for further bauxitisation. ERDÉLYI M. (1965) presented also similar ideas about the origin of the Halimba bauxite. In his opinion, no further bauxitisation occurred after the deposition of the bauxitic material. He supposed that the bauxite arrived from the south-east.

MINDSZENTY (1983, 1984) supposed — based on her macroscopic and microscopic investigations — that the Halimba bauxite deposit accumulated in a near shore environment, close to the groundwater level (saturated facies).On the other hand, the neighbouring Malom Valley deposit accumulated in a higher position and is characterized by a "vadose" facies.

JUHÁSZ (1986, 1988, 1989a, b) carried out microscopic and electron-microscopic investigations on the Halimba bauxite. Based on her results she presumed that the bauxite arrived from the south-east, transported by a meandering river. She distinguished channel bar, channel bottom, levee, talus, alluvial and marshy environments of bauxite accumulation. She completed also a palaeogeographic model of the entire Halimba Basin.

BÁRDOSSY, JUHÁSZ (1991) completed the above mentioned model by the Szőc and Malom Valley deposits (Figure 46). They presumed that the material of these two deposits arrived from the south-east, and that of the Halimba deposit from the east. The author of this monography completed this work by a more detailed facies study of the Cseres bauxite body, that remained valid in this monography.

MINDSZENTY et al. (1994) discovered repeated karstification in the footwall rocks of the Halimba deposit. She developed these ideas with TARI, HERTELENDI (1995) and completed them by oxygen and carbon isotopic measurements. She prepared a set of genetic profiles extending from the town of Sümeg in the west, to Tés in the east, representing the genetic evolution of the bauxite deposits of the entire Bakony Mountains. MINDSZENTY et al. (2001) elaborated a general geo-dynamic model for the bauxite formation in the Transdanubian Range, including that of the Halimba deposit. Of particular interest is the detailed lithologic description of the boreholes Halimba H–2011 and H–2012 and their genetic interpretation.

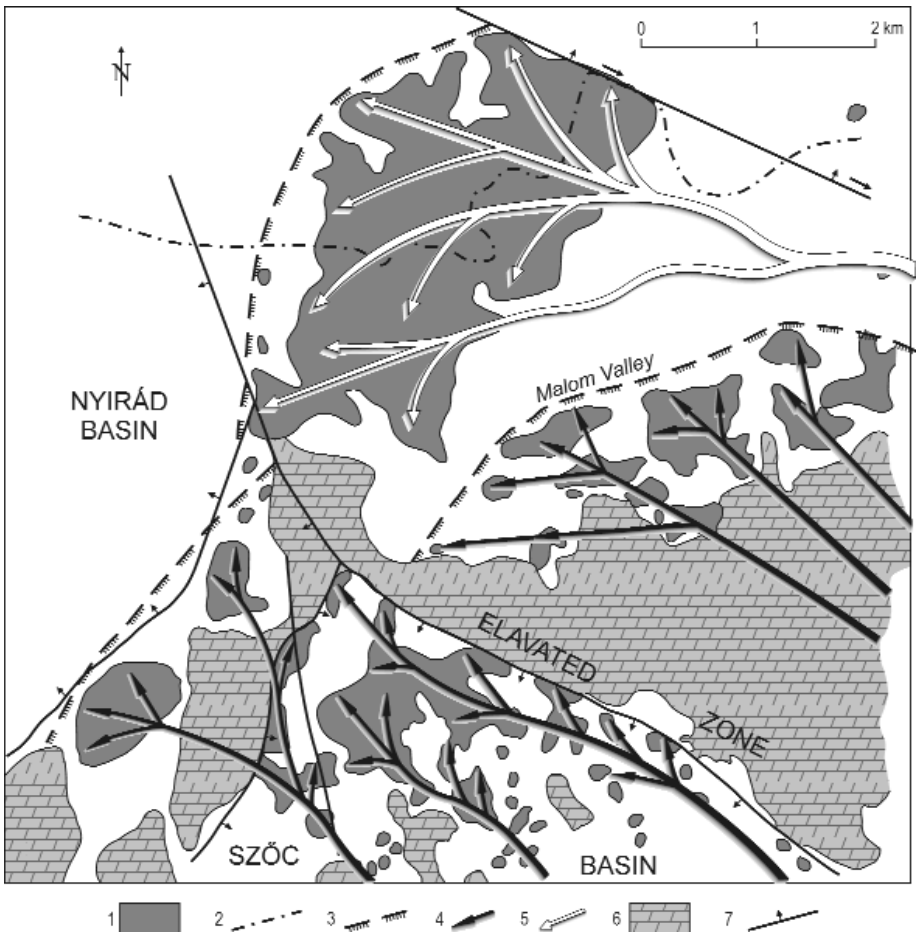


***Figure 46.*** Reconstruction of the main transport routes of the bauxite in the Halimba-Szőc area. (after BÁRDOSSY, JUHÁSZ 1991)
1 — bauxite deposits, 2 — extent of the Senonian sediments, 3 — outer rim of the bauxite accumulations for the three main areas (Halimba, Malom Valley, Szőc), 4 — presumed Palaeocene – Early Eocene transport routes, 5 — presumed Turonian–Senonian transport routes, 6 — Late Triassic sediments on the surface, 7 — main tectonic lines (normal faults and strike-slip faults)

***46. ábra.*** A bauxitos kőzetanyag beszállításának feltételezett útvonalai Halimba és Szőc térségében (BÁRDOSSY, JUHÁSZ 1991 szerint)
1 — bauxittelepek, 2 — a szenon rétegek elterjedésének határa, 3 — a három bauxitelőfordulás felhalmozódásának külső határa, 4 — feltételezett paleocén–alsó-eocén szállítási útvonalak, 5 — feltételezett turon-szenon szállítási útvonalak, 6 — felső-triász képződmények felszíni előfordulásai, 7 — fő törésvonalak (vetők és oldalirányú elmozdulások)

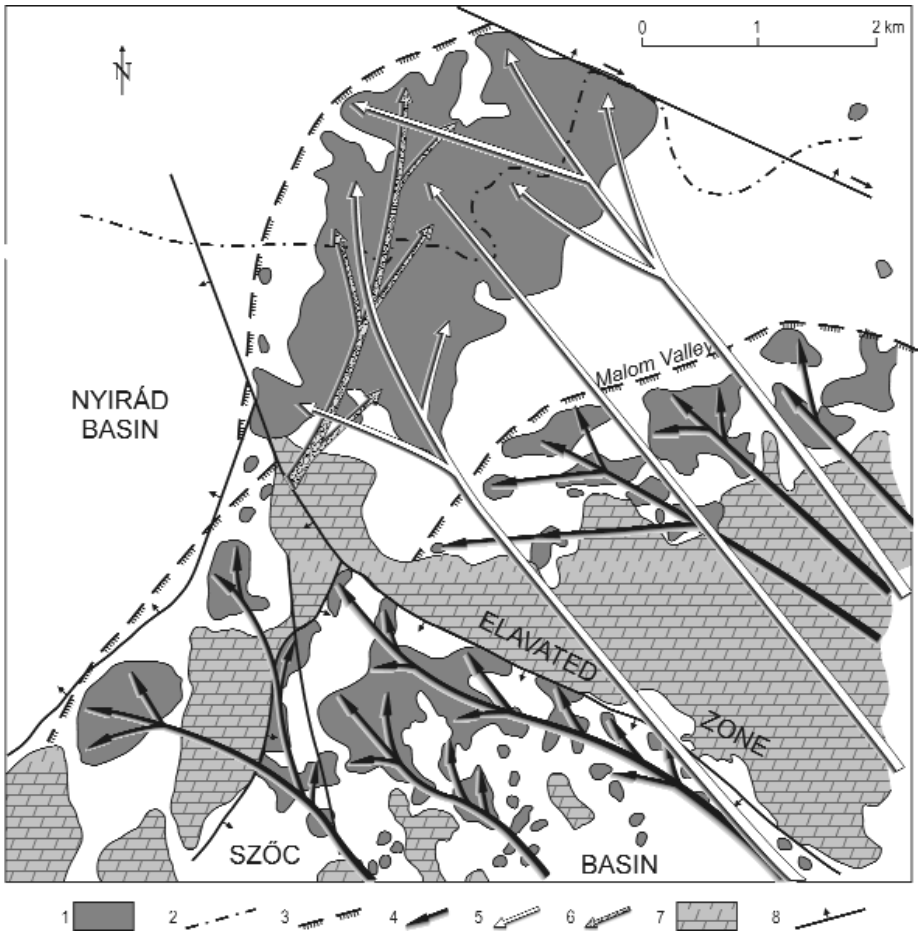


***Figure 47.*** Reconstruction of the main transport routes of the bauxite in the Halimba-Szőc area according to the author's recent assumptions
1 — bauxite deposits, 2 — extent of Senonian sediments, 3 — outer rim of the bauxite accumulationsfor the three main areas (Halimba, Malom Valley, Szőc), 4 — presumed Paleocene – Early Eocene transport routes, 5 — presumed Turonian-Senonian transport routes, 6 — transport routes of detritic carbonate rocks, 7 — Late Triassic sediments on the surface, 8 — main tectonic lines (normal faults and strike-slip faults)

***47. ábra.*** A bauxitos kőzetanyag beszállításának a szerző által jelenleg feltételezett útvonalai Halimba és Szőc térségében
1 — bauxittelepek, 2 — a senon rétegek elterjedésének határa, 3 — a három bauxitelőfordulás (Halimba, Malom-völgy, Szőc) elterjedésének határa, 4 — feltételezett paleocén-alsó-eocén szállítási útvonalak, 5 — feltételezett turon-szenon szállítási útvonalak, 6 — karbonáttörmelék beáramlás fő útvonala, 7 — felső-triász képződmények felszíni előfordulásai, 8 — fő törésvonalak (vetők és oldalirányú elmozdulások)

PATAKI et al. (2002) published an article on the genetic evolution of the Halimba deposit. They presented their genetic ideas on five figures, with special reference to the tectonic movements in the Halimba Basin. I agree with their interpretations, except that of the "Cseres Division", discussed in chapter: Extent and thickness of the bauxite deposit. Observations in the new mining excavations confirmed my assumptions.

This monography discusses only the Halimba deposit and its immediate surroundings. Taking into account my new investigations, I modified the genetic model shown of Figure 46. The transport routes for the Szőc and Malom Valley deposits remained unchanged, but for the Halimba deposit the transport direction had to be changed, as presented on Figure 47. The material arriving from the south-east filled a flat trough in the Halimba Basin. At least three transport routes can be distinguished, as shown on Figure 47. The most important of them was that arriving into the Cseres area. The locations of iron-rich bauxite and of alumina rich ferrite confirm this assumption (see Figure 29).

In the same time coarse grained carbonate rock debris arrived into this trough from south-southwest, as indicated on Figure 47. I agree with the facies groups distinguished by JUHÁSZ (1989a), but instead of separate samples I tried to extend them to entire sectors. The multivariate geochemical evaluations outlined in chapter: The main and accessory chemical components… confirmed this assumption. I fully agree with Mindszenty that the accumulation of the Halimba deposit was a long process, starting in the Albian and ending in the Santonian. This accumulation was not continuous, but it was stopped several times, when the conditions for the transport of the weathering products were less favourable. The material of the Szőc and Malom Valley deposits arrived later, during the Palaeocene and Early Eocene.

The clayey marble and lignitic clay, containing bauxite pebbles, found in 1990 in the Halimba III mine is a highly important point of the genetic interpretations (GÓCZÁN et al. 2002). They presumed that lateritisation occurred here simultaneously with the accumulation of the weathering products. They assumed also that the Halimba bauxite is of Albian age and not Senonian, as presumed before. Based on the lithologic and geochemical studies presented in the foregoing chapters I think that bauxite, clayey bauxite and bauxitic clay layers arrived here separately, one after the other. No essential bauxitisation occurred after the arrival in the Halimba Basin. This opinion does not exclude local, limited bauxitisation at preferred spots. This opinion is confirmed by the microdetritic and detritic structure of the bauxite. Furthermore, it is well known that during lateritisation first the carbonate minerals are dissolved. No trace of such a process could be observed in the Halimba deposit. Lateritisation produced all over the world typical "laterite profiles". The construction of the Halimba deposit is essentially different of these profiles.

I do not agree with the idea to limit the bauxite formation to the Albian. Palaeogeographic studies confirm that this region was a near shore, flat mainland during the Cenomanian and Turonian. The climate was favourable for lateritic weathering all this time. Thus it is not logic to confine the bauxite formation either to the Albian or to the Senonian. As mentioned above, I presume a long process of accumulation from the Albian to the Santonian.

I prepared a number of "genetic" profiles with the aim to understand better the accumulation of the Halimba deposit and to represent my interpretation of the borehole data. As already outlined in the foregoing chapters, the Halimba Basin had a relative flat surface at the end of the Palaeocene – Early Eocene emersion. This has been chosen as a base-surface of the profiles. In this case all tectonic movements that occurred later are excluded. The bauxite sequence is represented in its original form.

Four facies types of accumulation are presented on the Figures 48 and 49. The profiles are oriented perpendicularly to the presumed transport direction. Figure 48A refers to the sector No. 6. First bauxitic clay and clayey bauxite accumulated, followed by the arrival of bauxite. It fills a valley 40–50 m wide, cut into the underlying clayey bauxite layer. The valley was not completely filled by the bauxite. Marshy conditions developed in this flat depression, leading to the formation of grey pyritic-marcasitic bauxite.

Figure 48B refers to the sector No. 7, a much larger bauxite body. The bauxite sequence is also thicker. Layers of bauxitic clay and clayey bauxite form the lower, larger part of it. The bauxite layer is thinner, its form and contours more irregular. I interpret it as an alluvial accumulation. Note the large scale pyritisation of the top of the bauxite indicating low lying marshy conditions at the end of the bauxite accumulation.

Figure 48C refers to sector No. 8. This is the quietest part of the entire bauxite deposit. The accumulation started with a continuous layer of bauxitic clay, containing a lens of the carbonate rock debris ("conglobreccia"). It is followed by a relatively thin layer of clayey bauxite. The bauxite layer is situated on the top and it is also relatively thin. This accumulation occurred in my opinion in very quiet alluvial conditions, situated a little higher than the neighbouring sector No. 7.

Figure 49 refers to the large western bauxite body, containing the sectors 11, 12, 13. It differs significantly from the profiles discussed above. It represents the filling of the large karstic-erosional valley, oriented in NNE/SSW direction. The valley is asymmetric, as it becomes deeper on its western side. Detritic carbonate rocks, mainly conglobreccia fill the west side of the valley. They become thinner in the central part and disappear on the eastern rim of it. Note, that there are only few layers of bauxitic clay in the profile and the baux-

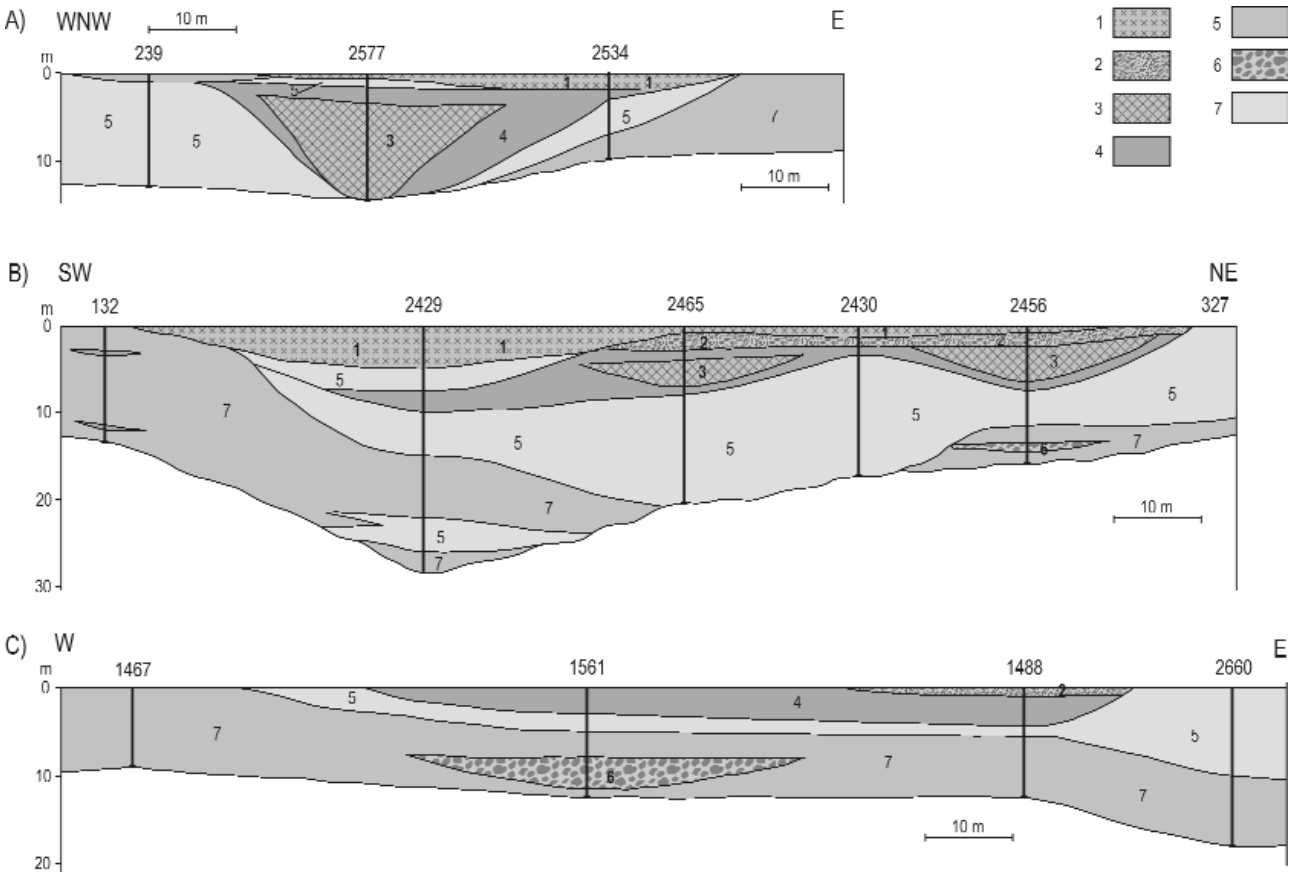


***Figure 48.*** Genetic profiles. Base surface corresponds to the emersion at the end of Senonian and Palaeocene
A — sector No. 6, bauxite cut by erosion into clayey bauxite and bauxitic clay; B — sector No. 7, bauxite accumulation on a flood plain in the upper part of the bauxite sequence; C — sector 8, alluvial bauxite accumulation under quiet conditions. 1 — grey pyritic-marcasitic clayey bauxite, 2 — bauxite with secondary calcite , 3 — high grade bauxite with less than 4% $SiO_2$, 4 — bauxite with 4–10% $SiO_2$, 5 -clayey bauxite, 6 — carbonate rock debris cemented by bauxite, 7 — bauxitic clay

***48. ábra.*** Genetikai szelvények, melyeken a kréta végi – paleocén lepusztulási felszínt vettem alapfelületnek
A — 6. részterület, a bauxit keskeny völgybevágódást alkot a bauxitösszletben; B — 7. részterület, bauxit ártéri felhalmozódása a bauxitösszlet felső részén; C — 8. részterület, bauxitfelhalmozódás nyugodt allúviális környezetben. 1 — szürke pirites-markazitos agyagos bauxit, 2 — kalcitkiválásos bauxit, 3 — <4% SiO2-tartalmú, jóminőségű bauxit, 4 — bauxit ($SiO_2$ 4–10%), 5 -agyagos bauxit, 6 — bauxitos kötőanyagú karbonátos kőzettörmelék, 7 — bauxitos agyag

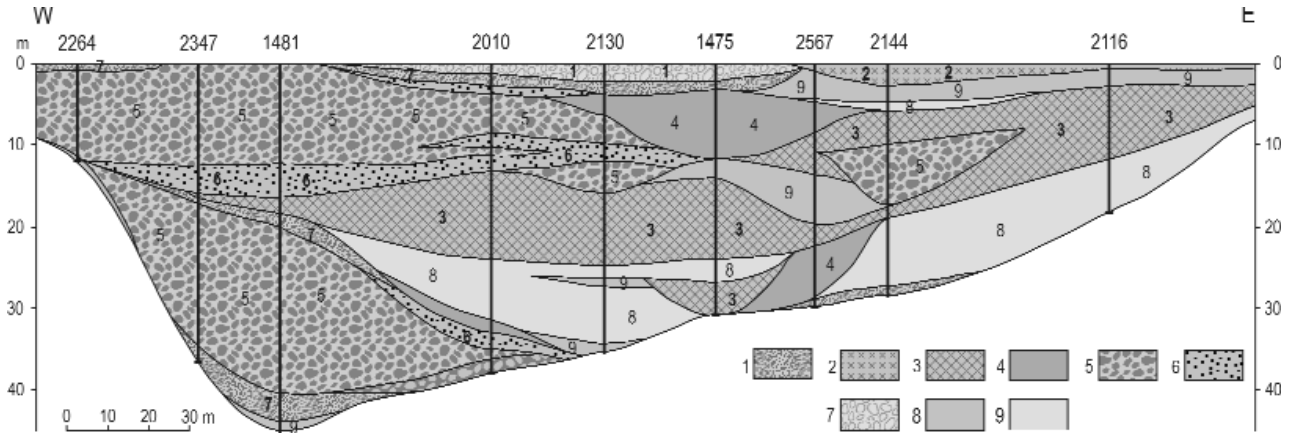


***Figure 49.*** Genetic profile. Base surface corresponds to the emersion at the end of Senonian and Palaeocene (bauxite body Halimba II SW)
1 — Senonian conglomerate 2 — grey pyritic-marcasitic clayey bauxite,, 3 — high grade bauxite with less than 4% SiO2, 4 — bauxite with 4–10% $SiO_2$, 5 — carbonate conglobreccia, 6 — carbonate aleurolite with bauxitic cement, 7 — conglobreccia cemented by clayey bauxite and bauxitic clay, 8 — clayey bauxite, 9 — bauxitic clay

***49. ábra.*** Genetikai szelvény, melyen a kréta végi — paleocén lepusztulási felszínt vettem alapfelületnek (Halimba II DNy bauxittest)
1 — Senon konglomerátum, 2 — szürke pirites-markazitos agyagos bauxit, 3 — <4% SiO2-tartalmú, jóminőségű bauxit, 4 — 4–10% $SiO_2$ tartalmú bauxit, 5 — karbonátos konglobreccsa, 6 — bauxitos kötőanyagú karbonát-aleurolit, 7 — agyagos bauxit és bauxitos agyag kötőanyagú konglobreccsa, 8 — agyagos bauxit, 9 — bauxitos agyag

ite forms several layers of laterally changing thickness. The cementing material of the detritic carbonate rock layers is high grade bauxite immediately below and above the bauxite. The profile shows a very high degree of variability with quick changes of composition. In the same time, here occurs the best bauxite in highest thickness.

As a summary, bauxitic material arrived from the south-east, detritic carbonates from the south-west. They formed alternating layers and mixtures of both materials in a variety of fluvial facies conditions. Finally, no bauxite was found by the boreholes between the Senonian cover and the layers of the Middle Eocene transgression. In my interpretation it indicates that during this emersion no bauxite was transported into this zone. I admit that there remained several uncertainties in this genetic model, but its essential features seem to be true and have been confirmed by the recent mining operations.

# Applied geology

## Experiences of the surface exploration

The goal of this chapter is to outline the methodological experiences collected during the exploration of the deposit. In the author's opinion they can be applied also in the exploration of other solid mineral deposits.

The main experience is that evaluations should not be limited to the ore, but they should be extended to the entire deposit, because they furnish useful additional information. The second main experience is that the choice of a "typical" part of the deposit or sample may lead to erroneous conclusions. Instead, the entire deposit must be evaluated, each borehole and each analysed sample. Finally, representative sampling is the base of any reliable evaluation.

The systematic exploration of the Halimba region started in 1943 by the "Aluminium Ore Mining and Industry" company. The geologic part of the exploration was directed by E. Vadász, an experienced exploration geologist. The technical manager was E. Alliquander, a mining engineer. The exploration was carried out by core drilling. First the Szőc and Malom Valley area vas explored. The exploration of the Halimba Basin followed in 1944. The boreholes were located along the roads, at 100–200 m. distances. Bauxite was found soon along the road leading from Halimba village to Devecser. In the same year bauxite was detected in the neighbouring area, called "Cseres". Nine productive boreholes were drilled here in an irregular set. Then the exploration was extended to the north. Bauxite was found at several places, but in more and more large depth. The exploration in this direction was stopped when the overburden reached 300 m.

The exploration was interrupted for a short time in 1945 when the advancing Russian troops reached the Halimba area. The drilling restarted quickly and continued until 1947. VADÁSZ prepared three short geologic reports summarizing the results of the exploration (VADÁSZ 1943, 1944, 1945). In 1946 the Soviet–Hungarian Bauxite–Aluminium Company (Maszobal) was founded. The exploration of the Halimba area came under the direction of this company. In 1949 a report was prepared containing all exploration data (geologic description of the boreholes, coordinates of borehole locations, chemical analyses). The authors of this volume were E. Alliquander, E. Vadász and I. A. Ljubimov, a Russian geologist (ALLIQUANDER et al. 1949).

The exploration outlined above was successful, and straightforward. The extent and the main features of the Halimba deposit have been determined by only 118 boreholes. The geologic descriptions of the boreholes were confirmed by the later mining operations. The report mentioned above remained the base-documentation for all further exploration activities. The sampling intervals of bauxite have been well selected (0.5 m and 1.0 m), they remained the same up to the present days. The chemical analyses comprised the seven main chemical components of the bauxite. The first printed article about the exploration results appeared in 1946, written by Vadász (VADÁSZ 1946).

In 1950 the "Bauxite Exploration Expedition" was founded within the framework of Maszobal, with it's headquarter at Balatonalmádi. Because of the high need for bauxite and aluminium detailed exploration was started immediately on the Cseres bauxite body. In an area of 32 hectares a drilling grid of 50×50 m was established. This dimension of the drilling grid was suitable for mine planning and production. 74 boreholes were drilled in only half a year, with a total length of 5182.7 m. Together with the former ones 105 boreholes were evaluated in a report. Note, that the ore body was not completely contoured on its western and northern side, simply because of lack of time. In the last ten years detailed exploration was carried out in these areas and a significant extent of the ore was detected.

The exploration report has been prepared by K. Barnabás, at that time chief geologist of the Expedition (BARNABÁS 1950). This first report was remarkably well prepared containing a deposit model confirmed by later mining. The method of the resource/reserve estimation will be discussed in chapter: Resource estimation Note that the sectors No. 2, 3, 4 and 5 of the present monography correspond to the Cseres bauxite body.

Detailed exploration of the deposit continued in northern direction, immediately followed by mining. Practically the same exploration method was applied as in the Cseres bauxite body. In 1953 a new exploration

report was prepared by Gy. BÁRDOSSY (BÁRDOSSY 1952). With increasing depth of the deposit the exploration grid was changed to 50×100 m and even to 100×100 m. A further report was prepared by K. Virágh (VIRÁGH 1954).

In 1954 Maszobal was transformed into a company owned entirely by the Hungarian state. The Expedition received a new name, "Bauxite Exploration Company". The exploration of the Halimba deposit continued in northern direction. Because of the urgent need of the industry for bauxite new mining districts have been opened, called Halimba III, IV and V. The corresponding exploration reports were prepared by Szantner, ERDÉLYI M. (1960), ERDÉLYI M. (1961), SZABÓ, POZSGAY (1963) and the last one by the Department of Resource Estimation (1966). The methods of evaluation remained the same. After finishing this last report the detailed exploration of the Halimba deposit was interrupted for more than 20 years. Mining started in all the explored mining districts.

However, a 400–600 m broad area remained unexplored between the Cseres bauxite body and the bauxite bodies situated to the north of the main fault line dissecting the deposit in WNW/ESE direction (see Figure 5). Only some boreholes covered the area indicating that the bauxite sequence is continuous, but only a few, seemingly small bauxite bodies were detected in the zone. The presence of detritic carbonate rocks was a new and unexpected feature of this zone, not explained by the existing deposit model. This was the reason, why the detailed exploration of the zone was postponed for a later time.

In 1990 the Bakony Bauxite Mining Company initiated the detailed exploration of this zone. Because of the complexity of the bauxite bodies the distance of the boreholes was diminished to 15–25 m. No drilling grid has been planned, but the boreholes were located according to the existing geologic information. Variograms have been calculated for the bauxite thickness and for the $SiO_2$ content of the bauxite. Ranges of influence were calculated separately for each sector (BÁRDOSSY 1991). Exploration reports have been prepared in 1998 and 1999. A new geologic model was constructed for the Halimba II SW bauxite body taking into account the layers of detritic carbonate rocks.

The exploration gradually extended to the east and new large bauxite bodies have been discovered, e.g. sector No. 7. Underground mining of the entire zone started in 2003. Additional boreholes were drilled within the contours of the excavated Cseres ore body, where mining finished in 1972. Because of the higher cut-off values considerable quantities of the ore remained in the mine. The new boreholes detected the remaining bauxite at several places. Furthermore the north-western and western contours of the ore body were extended. The excavation of these reserves is now under consideration.

Altogether more than 2200 boreholes were finished by core drilling during the last 60 years. All this borehole information has been evaluated by the author for this monography. The following main experiences have been obtained:

The entire exploration strategy was empiric, based on the personal experiences of the exploration geologists. The strategy was successful, but a number of problems remained open. The first is the problem of the *optimum level of exploration*. According to internationally accepted guidelines the optimum level corresponds to the amount of information allowing responsible decisions concerning the mining investments. If more exploration is carried out, unnecessary expenses are produced. This is the case of over-exploration. On the other hand, if the exploration is finished before reaching the optimum level, high risks will accompany the decisions of the shareholders. This is the case of under-exploration.

The problem is how to determine quantitatively the optimum level? Unfortunately, the traditional deterministic and stochastic methods are not suitable to solve this problem. The Matheronian "geostatistics" were a considerable step ahead, by introducing kriging and by determining the kriging standard deviation, but the entire problem was not solved by them. For this reason *resource/reserve categories* were applied in most countries, expressing the overall reliability of the exploration results. Unfortunately, the systems of categories are quite different and it is hard to compare them. But the main problem is that all these systems, even the most sophisticated ones (e.g. United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Resources 2002) are based on the opinion of a "competent person" or "expert" and not on mathematical calculations.

A new method of resource estimation was elaborated by BÁRDOSSY et al. (2001) based on the *theory of the fuzzy sets* (see chapter: Resource estimation) .This method allows the quantitative determination of the uncertainties of resource estimation. However, for the optimum level of exploration some additional points must be clarified, like the role of tectonic elements or the natural variability of the main resource components. BÁRDOSSY (2005) applied the Bayes theorem with its prior and posterior probabilities to solve these problems.

The first test calculation of this new approach was carried out on the sectors No. 6 and 7. As a first step the prior probabilities of some variables have been chosen, e.g. the rate of productive boreholes in the study area. The initial prior probability was chosen 0.6. Posterior probabilities have been calculated successively as the exploration progressed. The results are presented on Figure 50. It can be seen that in the first stages of the exploration the rate of productive boreholes was quite low. But later the posterior probabilities grew continuously and they reached the 0.6 probability at about 160 boreholes. Finally they stabilized at about 0.63, which is quite close to the initial prior probability. Note that the same final result would be obtained with the choice

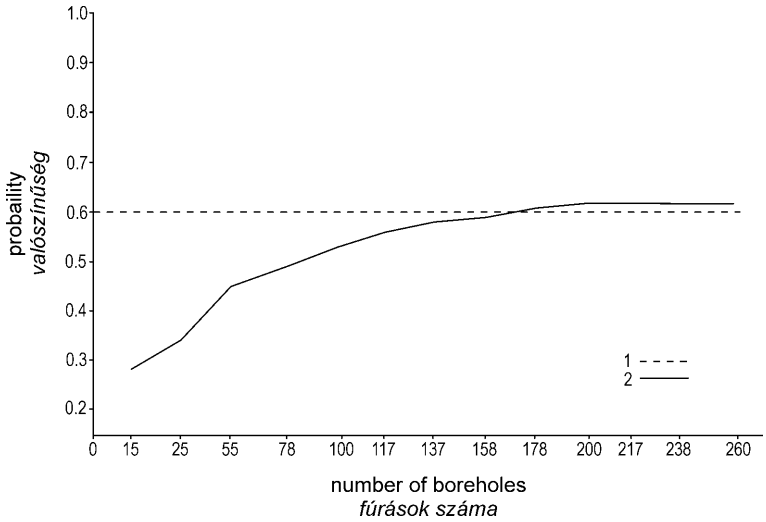


***Figure 50.*** Evaluation of the rate of productive bore holes by applying the Bayes-theorem
1 — initial prior probability, 2 — posterior probability
***50. ábra.*** A produktív fúrások várható arányának értékelése a Bayes-elv felhasználásával
1 — kiinduló előzetes valószínűség, 2 — utólagos valószínűség

of 0.5 or 0.7 prior probabilities; it shows only that our starting guess was right.

A more detailed way of applying the Bayes theorem is the comparison of exploration results at the successive stages (number of boreholes) of the exploration. In the present test calculation, this occurred after the drilling of 15–20 new boreholes. The comparison included the bauxite thickness, the productive area, the tonnage and the percentage of the main chemical components. For a quick calculation the following programme packages were applied:

Dbase and Excel — as data bases

AutoCad — for the calculation of the productive areas

SPSS — for the statistical calculations

Variowin — for the calculation of variograms and ranges of influence

At the end of each stage tables and maps were constructed, representing the different variables. As long as there were significant differences between the successive stages the drilling of new boreholes continued at locations chosen by the exploration geologists. For all variables stabilization was achieved after a certain stage. In our opinion this signalizes that for the given variable the optimum level was reached. The variables of the exploration reached the optimum level at different stages depending on the degree of their spatial variability. For this reason an order of importance must be constructed for all the variables and the exploration can be finished when the most important variables reached stability. This is the essence of the new concept! Let us stress that according to our experience *there is no general optimum level of the exploration, but it is different for the evaluated variables!* Note that the order of the variables may be different in the different mineral deposits.

In the Halimba II study area (sectors No. 6 and 7) 265 boreholes were finished up to the end of 2006.166 of them were productive. The core recovery of bauxite was in the average more than 90%, thus this type of uncertainty could be excluded. The cut-off values for the evaluation correspond to those listed in chapter: Petrographic composition of the bauxite…, $Al_2O_3$ content more than 46%, $SiO_2$ less than 10%, carbonate minerals less than 10%, thickness of the bauxite equal or more than 2.0 m.

After ending each stage variograms have been calculated for the bauxite thickness and for the Si $O_2$ content. Because of the high spatial variability no satisfactory variograms could be obtained in the first three stages. For these stages the ranges of influence of the neighbouring Cseres bauxite body were applied, e.g. 40 m for the bauxite thickness. At the end of the 4$^{th}$ stage (78 finished boreholes) reliable variogram models could be constructed. The range of influence for the bauxite thickness was then 20 m. With the successive stages this value varied from 15 m to 25 m and after the last stage it was 23 m. For the $SiO_2$ it was less than 10 m with no exact range value.

Note that the average distance of boreholes for the entire study area was 25 m at the end of 2006. But for the productive area this value was only 18 m. Thus at least for the bauxite thickness the range of influence is longer than the average distance of the productive boreholes. For the $SiO_2$ content this could not be achieved.

In the study area altogether 13 exploration stages have been evaluated. The changes between the successive stages are presented on Table 10. Tukey's maximum likelihood estimators were used for the bauxite thickness because of the asymmetry of the distribution. For most variables the changes are non-linear. For the bauxite thickness stabilisation was reached after the 10$^{th}$ stage. The productive area was divided into an inner (certain) and an outer (possible) part. Details of this distinction are presented in chapter: Resource estimation. The certain area and the entire productive area (certain + possible) increased until the last stages. Thus the optimum level of exploration was reached for the entire study area, except some uncertain contours. These places were explored later, in the galleries of the new mine, by drilling from the galleries (see chapter: Underground exploration of the deposit).

The stabilisation of the averages of the main chemical components was reached more quickly than for the above variables. This can be seen on Table 10. The changes between the successive stages are small; close to the analytical error e.g. the analytical error for the $Al_2O_3$ content is ±0.5%. The changes are smaller than analytical error after the 8$^{th}$ stage, that is stabilisation was reached. For the $SiO_2$ content the development was

***Table 10***. Changes of the averages of the main components of the bauxite in the subsequent stages of exploration, (sectors No. 6 and 7)

| Exploration stage | Number of boreholes | Productive bore holes | Average bauxite thickness (m) | Certaine area $m^2$ | Sum of certaine and possible area ($m^2$) | Average bauxite grade | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $Al_2O_3$ % | $SiO_2$ % | $Fe_2O_3$ % | CaO % | MgO % | Md |
| 1 | 15 | 4 | 1.2 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 2 | 35 | 13 | 4.6 | 5300 | 17 400 | 52.8 | 5.4 | 25.3 | 0.60 | – | 9.8 |
| 3 | 55 | 30 | 5.2 | 11 800 | 40 400 | 52.4 | 5.5 | 24.8 | 0.68 | – | 9.5 |
| 4 | 78 | 42 | 6.4 | 12 600 | 48 000 | 51.9 | 5.5 | 24.3 | 0.76 | – | 9.4 |
| 5 | 98 | 60 | 6.6 | 14 100 | 46 600 | 51.9 | 5.6 | 24.3 | 0.82 | – | 9.3 |
| 6 | 117 | 75 | 6.2 | 15 600 | 47 700 | 51.9 | 5.7 | 24.3 | 0.89 | – | 9.1 |
| 7 | 137 | 88 | 6.0 | 14 100 | 45 600 | 51.8 | 5.7 | 24.4 | 0.90 | – | 9.1 |
| 8 | 158 | 100 | 5.7 | 17 000 | 44 100 | 51.6 | 5.7 | 24.6 | 0.90 | – | 9.1 |
| 9 | 178 | 115 | 5.6 | 16 700 | 47 900 | 51.5 | 5.6 | 24.6 | 0.93 | – | 9.2 |
| 10 | 198 | 131 | 5.2 | 18 900 | 52 300 | 51.4 | 5.5 | 24.6 | 0.95 | – | 9.3 |
| 11 | 217 | 140 | 5.2 | 20 900 | 52 200 | 51.3 | 5.4 | 24.6 | 0.98 | – | 9.5 |
| 12 | 238 | 153 | 5.2 | 24 300 | 58 300 | 51.2 | 5.3 | 24.6 | 1.00 | – | 9.7 |
| 13 | 265 | 166 | 5.3 | 24 700 | 53 000 | 51.2 | 5.3 | 24.6 | 1.00 | – | 9.7 |

even more favourable the difference between the first and last stage being only 0.1%. In the same time the analytical error was ±0.3%! The change of the $Fe_2O_3$ content was 0.2% between the third and the 13th stage, the analytical error being ±0.5%. The mean values of the CaO content were also surprisingly stable between the second and the 13th stage the change was ±0.4% and the analytical error ±0.2%.

As mentioned before, the silica modulus ($Al_2O_3/SiO_2$) is used in the Hungarian Aluminium Industry as an indicator of the economic value of the bauxite. For this reason the silica modulus has been also evaluated in Table 10. The modulus was 9.8 at the second stage; it diminished and increased again to reach 9.7 at the 13th stage. This is a surprising stability of this indicator.

All these results are very positive, but one should not forget that they are averages of the entire bauxite body. If the chemical composition of the bauxite is compared on the level of the boreholes a much higher variability is found. High variability is indicated also by the short ranges of influence of the main variables. In the Halimba mine the "room and pillar" excavation method is applied. This system is very sensible for the local variations of the chemical composition of the bauxite. For this reason the above presented variations of the averages should be considered as first approximations, giving a general overview. The detailed picture can be obtained only by the underground exploration, to be discussed in the next chapter.

Repeated resource estimations are also suitable to contribute to the determination of the optimum level of exploration. The resources should be calculated at the end of each stage in the form of fuzzy numbers. In this case the stabilisation of the tonnages is again an indicator of the optimum level of exploration. This can be seen on Figure 51 for the sectors No. 6 and 7. The most important experience is that the tonnage does not change in a linear way with the increase of the boreholes. Instead in the early stages of the exploration an "over estimation" occurred — completely by chance, followed by a decrease and finished by a stabilisation in the last three stages. Note that the maximum value of the support shows the largest variations, followed by the maximum value of the core. The minimum tonnage of the core is already smoothened and finally the minimum of the support is almost a straight line. These four tonnage values of a trape-

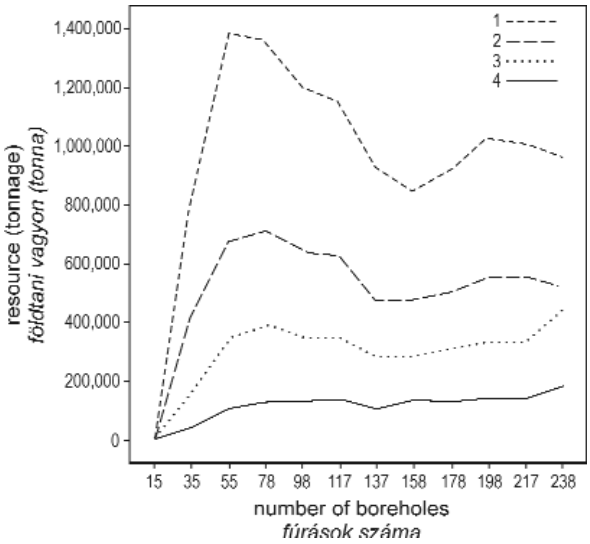


***Figure 51.*** Evaluation of the tonnage of the recources in the sectors 6 and 7, as a function of the number of boreholes
1 — maximum value of the support of the fuzzy numbers, 2 — maximum value of the core, 3 — minimum value of the core, 4 — minimum value of the support

***51. ábra.*** A hatodik és hetedik részterület földtani vagyonának alakulása a fúrások számának függvényében, fuzzy számokkal kifejezve
1 — a fuzzy szám tartójának maximuma, 2 — a fuzzy szám magjának maximuma, 3 — a mag minimuma, 4 — a tartó minimuma

*Table 11.* Categorization of selected boreholes according to the prior informations (sectors No. 6 and 7)

| Number of borehole | Research stages | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| H-2564 | ? | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2557 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | **1** |
| H-2556 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** |
| H-2555 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** |
| H-2554 | ? | (1) | (1) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2553 | ? | (2) | (1) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2552 | ? | (3) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2551 | ? | (1) | (1) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | **3** |
| H-2550 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2549 | ? | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | **4** |
| H-2548 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** |
| H-2547 | ? | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **3** |
| H-2546 | ? | 5 | (1) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | **1** |
| H-2545 | ? | 5 | (4) | (4) | (4) | (4) | (4) | (4) | 4 | **4** | . |
| H-2544 | ? | ? | 5 | ? | ? | ? | ? | 5 | 3 | **2** | . |
| H-2543 | 5 | 5 | 5 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** | . |
| H-2542 | 5 | 5 | 5 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **4** | . |
| H-2541 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | 5 | **2** | . |
| H-2540 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **2** | . |
| H-2539 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **4** | . |

zoidal fuzzy number are excellent indicators of the variability of the resource estimates.

The above discussed methods are suitable to determine the optimum level of exploration for the entire ore body. To resolve this problem on the *local level* the following method is suggested by the author: The boreholes of the selected local area are divided into 5 groups:

1 — The borehole is inside the border of the "certain" area.

2 — The borehole is situated close to the border of the "certain" area.

3 — The borehole is situated within the "possible" area.

4 — The borehole is close to the outer border of the possible area.

5 — The borehole is in the unproductive area.

All boreholes situated outside the range of influence of the bauxite thickness are signed by "?".Numbers in parentheses indicate categorization by extrapolation. Note that the expression "close to" may vary according to the geologic model of the given bauxite body. In our case this was 1 m to 5 m. The numbers of the last column indicate the results obtained by the boreholes

This classification can be applied to the optimisation of the exploration in a certain local area if we determine the category of each borehole for each exploration stage — before it has been finished. This can be done easily by indicating the given borehole on the resource estimation maps of the prior stages. This "presumed" category may change at the successive exploration stages, its final value corresponding to the information after finishing the given borehole. If the category changes significantly in the successive prior stages, a high degree of uncertainty of the resource estimation maps can be assumed. Table 11 is an example of this type of local evaluation. Where the presumed category corresponds to the drilling result a low level of uncertainty can be presumed. Large differences may exist in this respect between neighbouring boreholes. The necessity of drilling additional boreholes can be objectively judged by this method.

More general conclusions on the validity of the geologic model can be drowning when all the boreholes of the exploration area are evaluated together. This is shown on Table 12 for the sectors No. 6 and 7. Two exploration stages were selected for the evaluation, distinguishing positive and negative changes relative to the starting position or coincidence with it. In our case the numbers of coincidence and of positive changes are almost equal, the negative changes are subordinate. This indicates our initial model was realistic and conservative.

*Table 12.* Efficiency of the boreholes, as compared with the prior probabilities

| | Number of boreholes | | Σ |
|---|---|---|---|
| | 7th stage | 12th stage | |
| Positive deviation | 41 | 56 | 97 |
| Conformity | 49 | 43 | 92 |
| Negative deviation | 12 | 2 | 14 |
| Sum | 102 | 101 | 203 |

In the Halimba deposit the evaluations indicate a general optimum level of exploration, with some local places characterized by higher uncertainty of the resource estimation contours. Often it is more reasonable not to drill additional boreholes at these places, but to postpone the clarification of the problem to the underground exploration. Methods and aims of this type of exploration are discussed in the next chapter.

## Underground exploration of the deposit

The building of the Halimba mines started in 1951. Since 1953 the mining is continuous up to the present days. Mining started in the Cseres bauxite body and it finished there in 1972. (Note that mineable quantities of remaining bauxite were detected in this bauxite body during the last years). The production of the follow-

***Table 13.*** Production of the Halimba mines from 1953 to 2007

| Years | Cseres | Halimba II | | | | | Halimba III | | | | | Halimba II SW | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | production | production | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | mod. | production | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | mod. | production | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | MgO | mod. |
| 1953 | 21 600 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1954 | 71 066 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1955 | 75 497 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1956 | 82 980 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1957 | 85 263 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1958 | 100 477 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1959 | 101 211 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1960 | 126 774 | 48 160 | 49.91 | 9.48 | | 5.26 | | | | | | | | | | | |
| 1961 | 133 492 | 120 041 | 50.60 | 8.88 | | 5.70 | | | | | | | | | | | |
| 1962 | 130 990 | 158 118 | 50.34 | 10.28 | | 4.90 | | | | | | | | | | | |
| 1963 | 143 385 | 128 402 | 50.92 | 9.02 | | 5.56 | | | | | | | | | | | |
| 1964 | 150 119 | 191 552 | 50.44 | 8.97 | | 5.62 | | | | | | | | | | | |
| 1965 | 179 306 | 224 223 | 50.10 | 9.33 | | 5.37 | | | | | | | | | | | |
| 1966 | 223 230 | 218 555 | 50.30 | 9.51 | | 5.29 | | | | | | | | | | | |
| 1967 | 186 590 | 222 291 | 51.23 | 8.13 | | 6.30 | | | | | | | | | | | |
| 1968 | 250 599 | 163 277 | 50.93 | 8.58 | | 5.94 | 100 035 | 51.96 | 5.93 | | 8.76 | | | | | | |
| 1969 | 131 729 | 192 201 | 50.91 | 9.18 | | 5.55 | 162 519 | 49.33 | 6.96 | | 7.09 | | | | | | |
| 1970 | 136 058 | 196 452 | 51.32 | 8.88 | | 5.78 | 174 077 | 49.84 | 7.43 | | 6.71 | | | | | | |
| 1971 | 103 329 | 205 918 | 51.69 | 8.55 | | 6.05 | 209 873 | 50.77 | 5.07 | | 10.01 | | | | | | |
| 1972 | 17 825 | 223 130 | 52.20 | 8.28 | | 6.30 | 265 067 | 51.33 | 5.80 | | 8.85 | | | | | | |
| 1973 | | 223 074 | 50.80 | 8.89 | | 5.71 | 352 066 | 50.53 | 6.66 | | 7.59 | | | | | | |
| 1974 | | 241 442 | 47.89 | 10.97 | | 4.37 | 313 000 | 49.77 | 6.55 | 2.01 | 7.60 | | | | | | |
| 1975 | | 225 700 | 48.57 | 11.03 | | 4.40 | 474 500 | 52.34 | 6.46 | 1.38 | 9.59 | | | | | | |
| 1976 | | 19 930 | 48.61 | 11.15 | | 4.36 | 755 077 | 50.65 | 7.91 | 1.22 | 6.40 | | | | | | |
| 1977 | | | | | | | 850 200 | 50.53 | 8.00 | 1.09 | 6.32 | | | | | | |
| 1978 | | | | | | | 900 079 | 49.78 | 8.41 | 1.16 | 5.92 | | | | | | |
| 1979 | | | | | | | 860 366 | 49.97 | 8.25 | 1.14 | 6.06 | | | | | | |
| 1980 | | | | | | | 864 034 | 49.86 | 7.91 | 1.31 | 6.30 | | | | | | |
| 1981 | | | | | | | 820 087 | 49.72 | 7.44 | 1.60 | 6.68 | | | | | | |
| 1982 | | | | | | | 704 459 | 49.67 | 7.30 | 1.29 | 6.80 | | | | | | |
| 1983 | | | | | | | 796 018 | 48.73 | 7.98 | 1.38 | 6.11 | | | | | | |
| 1984 | | | | | | | 850 039 | 49.27 | 8.33 | 0.80 | 5.91 | | | | | | |
| 1985 | | | | | | | 850 348 | 49.67 | 7.96 | 0.83 | 6.24 | | | | | | |
| 1986 | | | | | | | 850 239 | 49.04 | 8.53 | 1.18 | 5.75 | | | | | | |
| 1987 | | | | | | | 860 020 | 49.58 | 8.39 | 1.17 | 5.91 | | | | | | |
| 1988 | | | | | | | 860 000 | 49.41 | 8.82 | 1.20 | 5.60 | | | | | | |
| 1989 | | | | | | | 370 100 | 49.69 | 9.16 | 1.02 | 5.42 | | | | | | |
| 1990 | | | | | | | 450 000 | 49.26 | 9.59 | 0.95 | 5.14 | | | | | | |
| 1991 | | | | | | | 529 700 | 50.36 | 8.57 | 0.85 | 5.88 | | | | | | |
| 1992 | | | | | | | 422 329 | 50.53 | 8.49 | 0.80 | 5.95 | | | | | | |
| 1993 | | | | | | | 470 038 | 50.87 | 8.01 | 0.80 | 6.35 | | | | | | |
| 1994 | | | | | | | 270 100 | 50.34 | 7.94 | 0.78 | 6.34 | | | | | | |
| 1995 | | | | | | | 288 003 | 50.93 | 8.06 | 0.85 | 6.32 | | | | | | |
| 1996 | | | | | | | 301 004 | 50.45 | 8.34 | 0.85 | 6.05 | | | | | | |
| 1997 | | | | | | | 270 005 | 50.58 | 8.43 | 0.43 | 6.00 | | | | | | |
| 1998 | | | | | | | 287 006 | 50.91 | 8.38 | 0.57 | 6.08 | | | | | | |
| 1999 | | | | | | | 274 007 | 50.59 | 8.19 | 0.68 | 6.18 | | | | | | |
| 2000 | | | | | | | 290 008 | 51.02 | 8.49 | 0.68 | 6.01 | | | | | | |
| 2001 | | | | | | | 280 002 | 50.22 | 8.01 | 0.60 | 6.27 | | | | | | |
| 2002 | | | | | | | 190 000 | 50.87 | 7.32 | 1.20 | 6.95 | | | | | | |
| 2003 | | | | | | | 210 012 | 51.02 | 7.25 | 0.95 | 7.04 | 40 010 | 51.28 | 7.12 | 0.70 | 0.34 | 7.20 |
| 2004 | | | | | | | | | | | | 262 093 | 50.90 | 7.09 | 1.10 | 0.52 | 7.18 |
| 2005 | | | | | | | | | | | | 312 500 | 50.24 | 7.16 | 1.10 | 0.55 | 7.02 |
| 2006 | | | | | | | | | | | | 315 013 | 50.01 | 7.78 | 1.06 | 0.50 | 6.43 |
| Σ | 2 451 520 | 3 002 466 | 50.48 | 9.28 | n.a. | 5.44 | 17 774 417 | 50.03 | 7.95 | 1.20 | 6.28 | 926 616 | 50.39 | 7.35 | 1.07 | 0.16 | 6.86 |
| Halimba | | | | | | | 21 706 499 | 50.11 | 8.12 | 0.87 | 6.17 | | | | | | |
| Sum of production: | | | | | | | | | | | 24 158 019 | | | | | | |

ing years is shown on Table 13. Note that the production in the new mine (Halimba II SW) started only in 2003. The grade of the produced bauxite is also indicated on the table, except for the Cseres mine. The average grade of the production changed gradually according to the requirements of the alumina plants.

The highly variable form and grade of the Halimba bauxite pressed the mining company to organise its own "mining-geological service". The activity of the service developed from year to year and to the present it reached an outstandingly high level, even in international comparison. Geologic documentation of the galleries, underground mapping was organised. Underground exploration started and resource estimations were carried out each year several times according to the needs of the mining operations. F. Zenkovics, B.

Bíró, K. Mérai, T. Erdélyi were the successive chief geologists of the service. It is actually leaded by B. Jankovics.

The underground exploration is performed by mechanical drilling from the galleries, vertically up and down — generally at 5 m distances — and horizontally in all requested directions. The aim is to reach the hanging wall and the foot wall contact and to detect the contours of the bauxite body. Actually 50–60 m long horizontal boreholes are produced by a "Turmag"-type compressed air drilling equipment. Bauxite samples are taken at 2 m sampling intervals. The homogenised (powdered) samples were analysed before for five or seven components. At present it is limited to the $Al_2O_3$ and the $SiO_2$ carried out by neutron activation. The coordinates of the borehole locations are carefully measured by the mining-geodesy service of the mining company.

All exploration results are placed into a computerised data base. By using adequate computer programs (see chapter: Geomathematical and informatical experineces) maps of 1:500, 1:1000, 1:2000 and 1:5000 scales are printed for the entire deposit or for selected areas of it. Geologic maps and profiles are constructed for each zone where production is started. Particular attention is paid to the tectonic observations e.g. normal faults or strike-slip faults etc.

The author of this monography constructed a large number of geologic profiles with the aim to compare the results of the surface exploration with those of the mining exploration. One of these profiles is presented on Figure 52. The rock types distinguished on these profiles correspond to those listed in chapter:

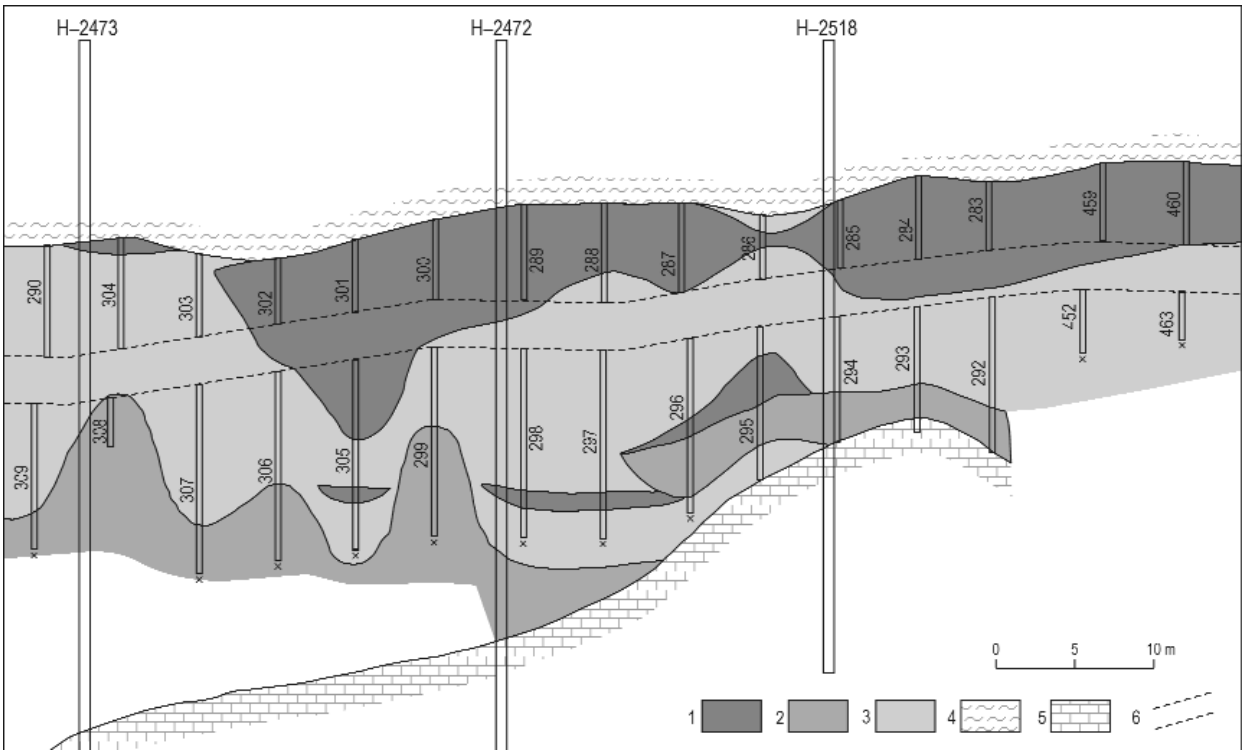


***Figure 52.*** Profile constructed from the data of mining exploration (the three surface boreholes indicate the spatial relation of surface and underground exploration)
1 — bauxite, 2 — clayey bauxite, 3 — bauxitic clay, 4 — Middle Eocene hanging wall, 5 -Dachstein Limestone footwall, 6 — gallery

***52. ábra.*** A termelési kutatás adatai alapján szerkesztett vágatszelvény (a három felszíni fúrás a távolságarányokat érzékelteti)
1 — bauxit, 2 — agyagos bauxit, 3 — bauxitos agyag, 4 — középső eocén fedőrétegek, 5 — Dachsteini Mészkő fekü, 6 — vágat

Petrographic composition of the deposit. All these profiles showed a higher variability of the form of the bauxite layers as it could be detected by the surface exploration. They stress also the high importance of the underground exploration for the bauxite production.

47 000 underground boreholes were produced until the end of 2006 in the northern part of the deposit, with a total length of 235 000 m. In the new Halimba II SW mine 8580 boreholes were drilled in the same time, with a length of 48 803 m. Furthermore 790 Turmag type boreholes were finished in a length of 20 530 m. Unfortunately no data are available on the amount of underground exploration in the Cseres mine.

At some places the footwall surface was not reached by the boreholes because the high bauxite thickness. Geoelectrical measurements were applied in these galleries. The footwall surface could be detected fairly well by the results of these measurements.

From the very beginning of the mining the geological service performed hydrogeologic observations and measurements. The results are discussed in chapter: Hidrogeologic experiences.

At some places Middle Eocene black lignitic clay is the immediate cover of the bauxite. The pyrite/marcasite content of this clay often produced fires when it came in contact with the air of the galleries. These fires were serious obstacles for the mining operations. The mining–geologic service placed temperature measuring sonds at particularly dangerous places of the mine. Temperature changes were registered and temperature maps were constructed. This way a successful prediction of dangerous places and processes could be obtained. These places could be isolated in time.

## Resource estimations

The first up-to-date resource estimation was performed on the Cseres bauxite body in 1950, as a part of the exploration report. K. Barnabás chief geologist directed this work. The cut-off values for the resource estimation were determined by the Ajka alumina plant — the future destination of this bauxite as follows: $Al_2O_3/SiO_2$ modulus more than 10.0, $Al_2O_3$ >50.0%, CaO < 0.5%. The first resource estimation revealed that the CaO cut-off is too strict, only a small part of the bauxite could be considered as a resource. For this reason the management of Maszobal decided to withdraw this item from the cut-off requirements. The new version resulted in a reasonable tonnage of resource. A further estimation was also carried out with a silica modulus more than 6.0

It is surprising that no cut-off value was determined for the minimum thickness of ore. As a result several boreholes were included into the resource estimation with 1.0 m bauxite thickness and three boreholes with only 0.5 m thickness. Note, that the later mining operations did not approve these cut-off values, the real mineable ore thickness was found >2.0 m.

The productive area was divided into so called geologic blocks, each containing one to 11 boreholes. The neighbouring blocks were separated by straight lines connecting the boreholes. The outer contour of the productive area was determined by the external productive boreholes. The reliability of the tonnage was expressed by "resource categories" corresponding to the existing Soviet guidelines ($A_1$, $A_2$, B, $C_1$ and $C_2$). The inner part of the resource blocks became $A_2$ category, the outer part $C_1$ category.

The *grade* of the resource was calculated in three steps: first weighted averages were determined according to the length of the sampling intervals in the productive boreholes (mainly 1.0 m). In the second step the weighted averages of the geologic blocks were calculated taking into account the ore thickness in the boreholes. In the final step the overall grade was calculated separately for the resource categories, and the summary of them. The weighting referred to the block tonnages. This procedure was carried out for the $Al_2O_3$, $SiO_2$ and the CaO content of the ore. The average bulk density based on laboratory measurements was taken 2.0 $t/m^3$.

In the north-eastern part of the productive area a fault line was presumed, based on the profiles and isoline maps. On both sides of it a zone of 5 m width has been excluded from the resource estimation.

The overall "geologic resource" of the Cseres ore body was 1 050 000 t, under the above described conditions (modulus >10.0). 667 000 t of it belong to the $A_2$ category and 383 000 to the $C_1$ category. The average silica modulus of the ore was 17.9. The resource estimation based on the >6 modulus cut-off value resulted in 1 293 000 t with an average modulus of 13.1. Thus the diminished cut-off value for the modulus did not reduce significantly the average grade of the bauxite. The average CaO content of the first version was 2.2%, this value being in good agreement with the later mining experiences.

The resource estimation of the Cseres ore body can be considered as reliable as the successive mining operations confirmed its results.

As the exploration of the Halimba deposit continued new resource estimations were performed separately for each mining unit. The cut-off values were changed gradually according to the requirements of the alumina plants. The silica modulus was lowered to >4.0 and the minimum $Al_2O_3$ content to >42%. CaO + MgO <3.0%. A new parameter was added, the sulphur content, with a maximum value of 0.6%. The minimum thickness of the bauxite became 2.0 m.

In the nineties the mining company replaced the rigid cut-off values by a set of variants with different cut-off values. A computer programme compared the results and the economically best was selected.

In the nineties several estimation methods were applied for the surface estimation results, mainly the triangular, the polygonal, the geologic blocks and the "isopach method" evaluating directly the bauxite thickness from isoline maps. The categorisation of the resources had to follow the guidelines of the Hungarian Geological Survey. The categories remained A1, A2, B, C1 and C2. The categorisation remained an expression of exploration experiences as no methods of calculation existed in this respect.

A *resource balance* was prepared by the Exploration Company each year evaluating and presenting separately all changes that occurred during the given year, e.g. increase or decrease of resource resulting from surface exploration, mining production, production loss, contamination etc.

In the mine mainly the geologic block and the polygon methods were applied, but after 1976 they calculated the resources separately for each production level. The main advantage of this method was that the resources were directly related to the production levels. However with growing number of production levels the calculating system became more and more complicated and lost its transparency. For this reason they abandoned the method of production levels and replaced it by *mining production blocks*. Each block extends vertically over the entire bauxite layer and is directly related to the main production units. This method is applied also in the present days.

A further important mining experience was that the contours of the productive area do not follow the maps obtained by linear interpolation. Instead exact borders of the productive area are determined mainly from the galleries by horizontal boreholes (Turmag). In a second step these exact points are connected by a contour line. The grade of the ore is determined as before by weighting the results of the underground boreholes located in the galleries at 5 m distances. The average bulk density has been calculated again based on new laboratory measurements. Its present value is 2.25 t/m$^3$.

In the following the problem of resource *reliability* and of their *uncertainty* will be discussed. In the author's opinion all resource estimates must be based on a reliable model of the given deposit. In the case of complicated deposits and in the early stages of exploration alternative deposit models can be constructed. In the Cseres bauxite body the model constructed for the 1951 exploration report was reliable, as confirmed by the later mining operations. The model has been only slightly modified and completed in the successive years. A similar model was used for the northern part of the deposit. An unexpected new problem appeared in 1990 when the detailed exploration of the Halimba II SW bauxite body started with the presence of the detritic carbonate rocks. A number of strongly contradicting models were constructed by different geologists. With the growing number of boreholes and with the starting mining operations the picture became more and more clear. At present there is a uniform opinion about the model — discussed in the first part of the monography. This development is an excellent example on the high amount of uncertainty in complicated mineral deposits.

A further component of uncertainty is the problem of the *continuity of the deposit.* In other words, how certain can we are that the deposit is continuous between two neighbouring productive boreholes if their distance is shorter than the corresponding range of influence? (In our case, this is the thickness of the bauxite). The answer was so far empiric: the exploration experiences collected on the given deposit or other analogous ones furnished the most probable maximum distance where continuity could be assumed. This concept was applied on the Halimba deposit as well. Generally it worked well, but in some cases unexpected negative situations also occurred disturbing the ongoing mining activity.

The theory of *regionalized variables,* called also *geostatistics,* elaborated by G. Matheron furnished a solid mathematical background for answering the problem. The ranges of influence mentioned above furnished a mathematical base to determine the maximum distance of *autocorrelation* between two spatial points. However this distance does not obligatorily correspond to the continuity of the deposit between the two points!

The author of this monography calculated several hundred variograms for the different sectors of the Halimba deposit. Very different ranges were obtained for the different variables (see Figures 12 and 23). For the bauxite thickness it varied from <10 m to 65 m. The mining experiences confirmed in most cases the continuity of the bauxite within the corresponding range of influence, but in some places the continuity was not confirmed. These were relatively small parts of the given sector.

A good example of these cases is shown on Figure 53. The range of influence for the bauxite thickness is 23 m for the entire bauxite body. However a 10–15 m wide unproductive stripe was found by the galleries between the productive boreholes. This peculiar form of the bauxite contour can be explained in different ways e.g. original depositional property, erosion of the original bauxite by the immediate covering layer (clayey bauxite), and finally diagenetic resilification. Similar unproductive stripes were found also in other parts of the deposit.

These experiences led the author to reconsider the concept of the ranges of influence regarding the continuity of the ore in the given deposit. In his opinion *the ranges of influence should be considered as random variables*! If this is true, the variogram models represent the average value for the given area (sector). This is the case also in the Halimba deposit. However, smaller local areas of the sector may differ significantly from that average. The solution of this problem is to find a method for the construction of *local variograms*. A first method was elaborated by SEN (1998). BÁRDOSSY (2006) presented another method to express the changes of local variability of a chosen variable. This method has been applied at the Halimba deposit.

After these general considerations let us overview the resource estimations applied on the Halimba deposit. All the resource estimations applied so far correspond to a *deterministic* mathematical approach. In this case the results are all "point-estimates". When applying a *stochastic* approach a part of the uncertainties can be determined by confidence intervals. Unfortunately, this approach has not been applied at the Halimba deposit or on any other mineral deposit in Hungary. The reason for it is simple: it requires the knowledge of some basic (simple) statistic methods and a little more work. The Matheronian geostatistics offered a further step ahead in the determination of uncertainties in the resource estimations by the new estimator "kriging

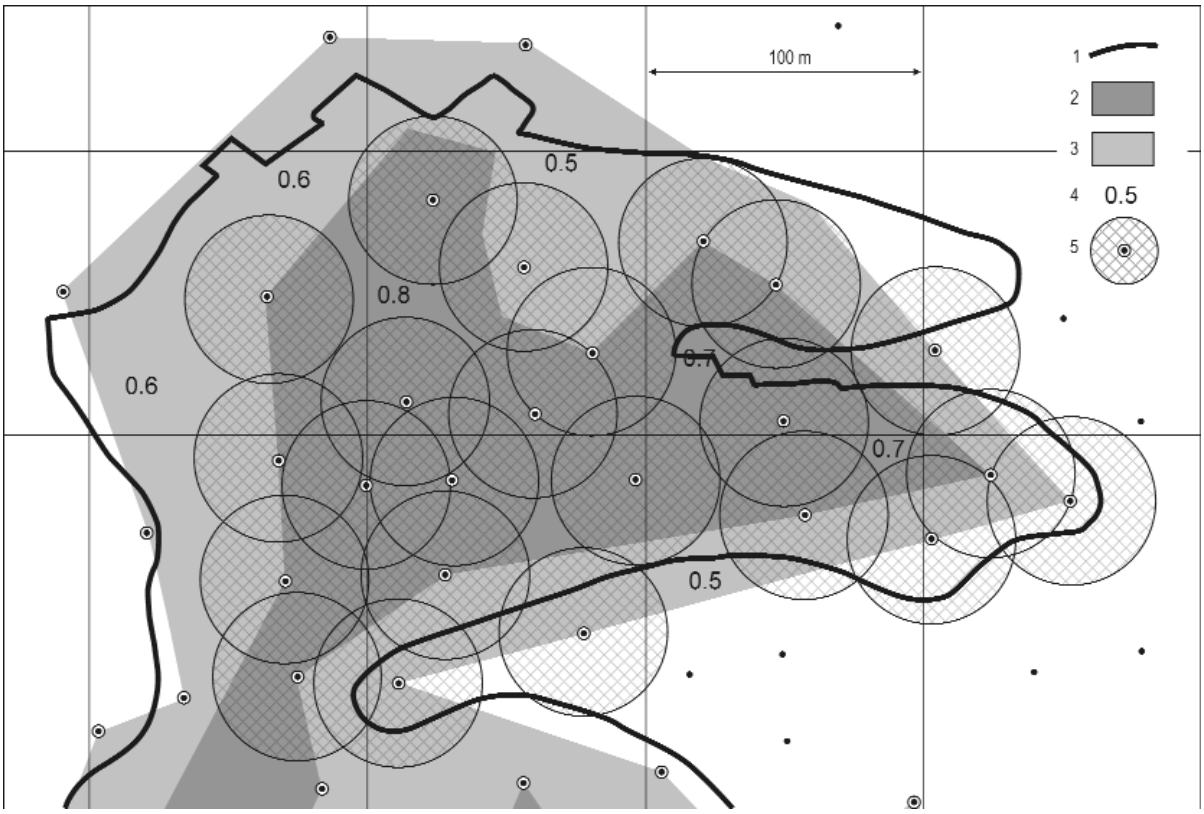


***Figure 53.*** Comparison of the results of surface exploration and excavation in the underground mine (northern part of sector No. 7)

1 — contour of the excavated ore, 2 — "certain" part of the productive area, according to the surface exploration, 3 — "possible" part of the productive area, 4 — Bayes prior probabilities outside of the range of influence, 5 — bore hole locations and their ranges of influence (for the bauxite thickness 15 metre)

***53. ábra.*** A felszíni kutatás és a bányászat eredményeinek összevetése a 7. részterület északi részén

1 — a bányászatilag kitermelt érc határa, 2 — a készletszámítás "biztosnak" tekintett területei, 3 — a készletszámítás "lehetségesnek" tekintett területei, 4 — a hatástávolságon kívül eső területek Bayes-féle valószínűségei, 5 — fúrások és hatástávolságuk (bauxitvastagságra 15 méter)

standard deviation". Unfortunately this method did not find application at the Halimba deposit, because it requires more mathematical knowledge than the foregoing methods.

In the last decades a number of new mathematical methods were developed by theoretical mathematicians, suitable for uncertainty determinations. From all these methods the *fuzzy set theory* seems to be the best for the determination of uncertainties in geology, particularly for resource estimations (BÁRDOSSY, FODOR 2004). A number of resource estimations was carried out on different bauxite deposits of Hungary (BÁRDOSSY et al. 2001, 2003) .The author of this monography applied it to the Halimba deposit. In the following the basic features of this method will be outlined.

As a first step the uncertainties of the input variables must be determined, e.g. the errors of the chemical analyses, of the productive area and average bauxite thickness. The uncertainties of the variables are represented by *fuzzy numbers.* All arithmetic procedures are carried out by these fuzzy numbers.

As in the traditional resource estimations the tonnage of the deposit is determined as the product of the average bulk density of bauxite, the productive area and the average thickness of the bauxite. For the *bulk density* the main uncertainty is the analytical error. An additional source of uncertainty is the requirement of representative sampling and the number of analysed samples. For the Halimba deposit the analytical error is ±5 relative %. More than 100 analytical determinations were performed in a set corresponding to a representative sampling. The results correspond to the "mine-moisture" natural state of the sample. The results have been evaluated in the form of a trapezoidal fuzzy number (Figure 54). The average of the measurements is indicated on the core (2.29 t/m$^3$). The analytical error has been measured on both sides of it, followed by the confidence interval at the 95% level of confidence. Thus the

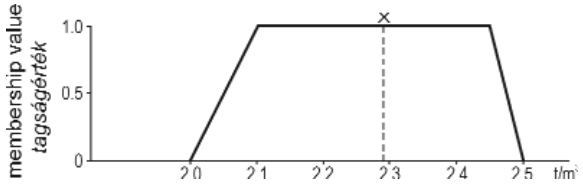


***Figure 54.*** Fuzzy number expressing the uncertainty of the average bulk densitiy

***54. ábra.*** Az átlagos térfogatsúly bizonytalanságát kifejező fuzzy szám

core extends from 2.10 t/m³ to 2.45 t/m³. The support of the fuzzy number extends from the smallest measured value (2.00 t/m³) to the largest one (2.50 t/m³).

Note, that fuzzy numbers can be constructed applying different parameters of the variable, depending on its variability. At any rate, outliers should be excluded from the evaluation as they lead to biased results.

In fuzzy resource estimations the *productive area* is divided into two parts, into an inner *certain part,* and an outer *possible* part. The extent of the certain area is determined by the outermost productive boreholes, connected by straight lines. This area corresponds to the minimum value of the support. The extent of the possible area is determined by its inner border, and by the closest unproductive boreholes connected again by straight lines. The sum of the certain and of the possible areas corresponds to the maximum value of the support of the fuzzy number. In the case when the possible area is limited in all directions by boreholes the uncertainty of the area determination is smaller than in the case when extrapolation is needed. This is expressed by the length of the core. It can be one point if the extent of the area is determined in all directions by boreholes. The more extrapolation was needed the longer should be the core interval. The mid point of the core should correspond to the certain area plus the half of the possible area.

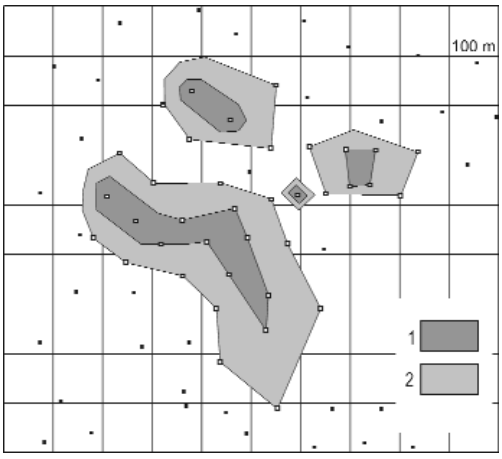


***Figure 55.*** Resource estimation map at the end of the third stage, sectors No. 6 and 7
1 — certain productive area, 2 — possible productive area

***55. ábra.*** Készletszámítási térkép a 6. és 7. részterületről a harmadik szakasz végén
1 — biztosnak tekintett produktív terület, 2 — lehetségesnek tekintett produktív terület

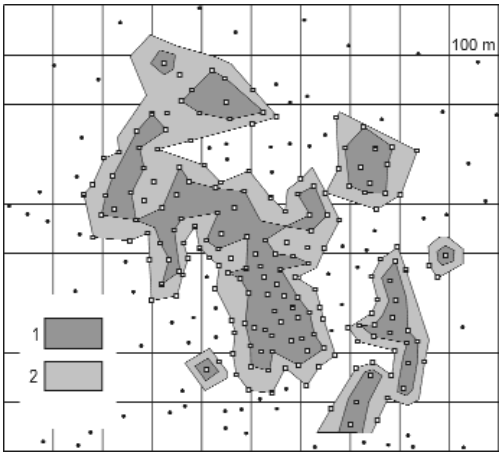


***Figure 56.*** Resource estimation map at the end of the 12h stage, sectors 6 and 7
1 — certain productive area, 2 — possible productive area

***56. ábra.*** Készletszámítási térkép a 6. és 7. részterületrol a 12. szakasz végén
1 — biztosnak tekintett produktív terület, 2 — lehetségesnek tekintett produktív terület

This seems to be a rather rough estimation of the productive area. Before, a geologic contour has been constructed with much work, including linear interpolation, isopach maps and profiles. However observations in the mine showed that in several places the productive area ended at some metres distance from the outermost productive borehole. At other places the productive area extended almost to the next unproductive borehole. Finally, there were places where the productive area extended beyond the straight line connecting two closest unproductive boreholes. Thus statistically, the above outlined method provides reasonably limited uncertainty with a minimum of work. Thus the time consuming constructions are superfluous.

Even by this method alternative possibilities of connecting the boreholes may occur, mainly in the early stages of exploration. Figure 55 is an example for the sectors No. 6 and 7, at the end of the third stage with 70 boreholes involved. The extrapolated contours can be well distinguished having no boreholes at the extrapolated contour points. Figure 56 shows the situation after the 12$^{th}$ stage when already 237 boreholes were available. The very complicated contours of the bauxite bodies are determined in much more detail. Nevertheless, some extrapolated contour points still remained.

In former resource estimations a significant source of error was the determination of the productive area by planimeter. The introduction of the AutoCad programme completely eliminated this error.

The *average thickness of the bauxite* is calculated as the arithmetic mean of all productive boreholes, again in the form of a fuzzy number. The skewness of the thickness distribution should be checked. If it is more than one unit robust estimators should be applied to eliminate the bias due to the skewness. In the Halimba deposit the distribution of the thickness is slightly asymmetric in positive direction that is there is a tail in the direction of large bauxite thicknesses. Tukey's maximum likelihood estimator was used to eliminate the bias.

The minimum value of the support of the fuzzy number is the cut-off value that is 2.0 m. The maximum value of the support is the reduced maximum thickness to its 95%. It serves the elimination of the thickness outliers. Central point of the core is the arithmetic or the robust mean. The technical error of the thickness measurements is in the Halimba case ±10 cm. It is placed on both sides of the arithmetic mean. This is followed on both sides by the confidence interval at 95% level of confidence.

The product of the average bulk density, the average thickness and of the productive area produces the *tonnage of the geologic*

*resource.* The fuzzy numbers can be multiplied according to the rules of "fuzzy arithmetic". The corresponding fuzzy numbers and their products for our test calculation are represented on Figure 57 at three selected explorations stages. There is no significant difference between the results of the 5th and 11th stages. The diminishing uncertainty is well expressed by the shorter length of the supports.

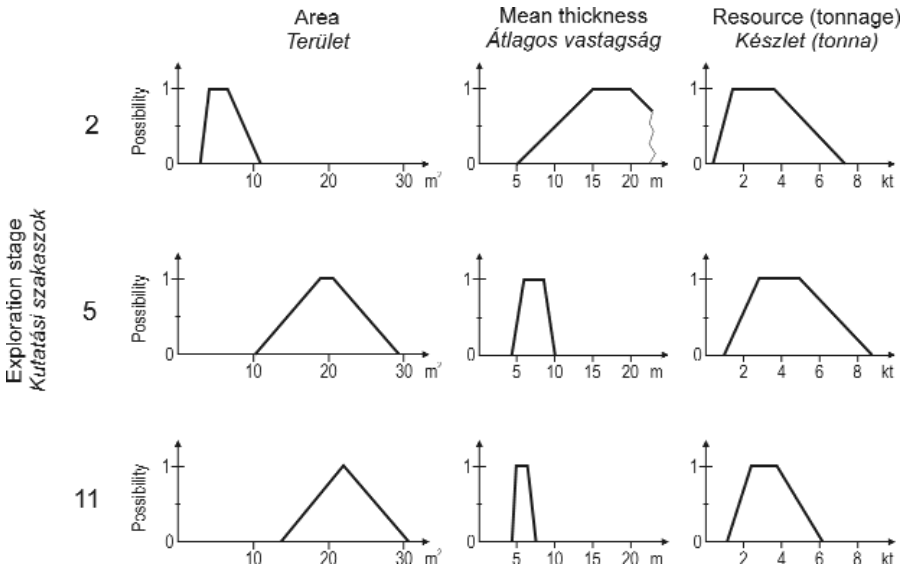


***Figure 57.*** Fuzzy numbers of the productive area, the average thickness and the resource tonnage at the end of the 2nd, 5th and 11th exploration stages (sectors No. 6 and 7)

***57. ábra.*** Az alapterület, az átlagos vastagság és a földtani vagyon fuzzy számai a 2., 5. és 11. szakasz végén (6. és 7. részterület)

The main advantage of the fuzzy method is the quantitative determination of the uncertainties, replacing the values of the expert's opinion and its estimated categories. Furthermore, the minimum and maximum values of the support furnish a range of the possible values of the resource in the worst and best case. On the other hand, the core of the fuzzy number represents the "most possible" tonnage. The length of the core expresses the amount of uncertainty of this tonnage. It can be presented either directly in the form of tonnages, or in relative percentages, related to the central point of the core. Figure 58 shows the change of these parameters as a function of the number of boreholes. There is a great difference between the relative uncertainties (percentage!) relative to the support or to the core of the fuzzy number. The diminution of the relative uncertainty is clearly visible.

It occurred at some places that the isotropic ranges of influence did not cover entirely the productive area. This can be seen on Figure 53. In a strict evaluation these spots should be excluded from the productive area. However, by applying the Bayes theorem *"prior probabilities"* can be calculated separately for each "empty" spot (BÁRDOSSY 2005). These probabilities are indicated on Figure 53. It should be stressed that these values are only probabilities! They were confirmed in most places by the mining, but some negative exceptions also occurred, as seen on Figure 53. Such exceptions cannot be excluded, at least in the case of the Halimba deposit.

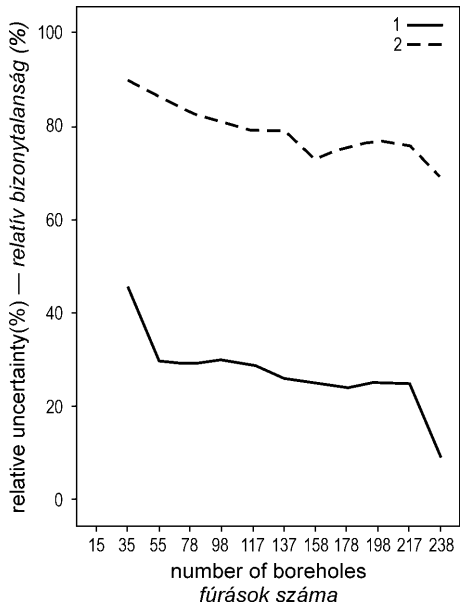


***Figure 58.*** Relative uncertainty of the resource tonnage as a function of surface exploration
1 — core of the fuzzy number, 2 — support of the fuzzy number

***58. ábra.*** A földtani vagyon relatív bizonytalanságának alakulása a kutatás előrehaladásával
1 — a fuzzy szám magja, 2 — a fuzzy szám tartója

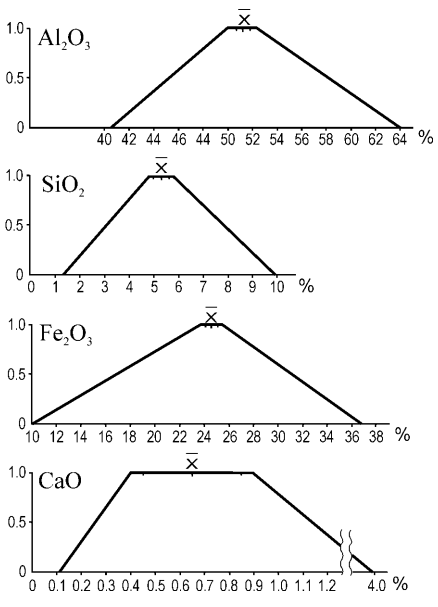


***Figure 59.*** Fuzzy numbers of the average $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$ and CaO contents of the bauxite (sectors No. 6 and 7)

***59. ábra.*** A bauxit átlagos $Al_2O_3$-, $SiO_2$-, $Fe_2O_3$- és CaO-tartalmának fuzzy számai (6. és 7. részterület)

The estimation of the *ore grade* occurs in the same way as outlined above. The corresponding fuzzy numbers for the $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$ and CaO contents are presented on Figure 59. Their great advantage against the "crisp" numbers is that they express the uncertainty of the grade estimation. The length of

the support can be very different depending on the variability of the given component. On the other hand the length of the core interval is surprisingly short, reflecting the large number of the chemical analyses.

All the above outlined calculations refer to the surface exploration by boreholes. For the actual reserves calculated by the mining–geologic service see the descriptions of chapter: Underground exploration of the deposit. Thus the calculations described above refer to the so called *geologic resources.* The *extractable resources* are derived from them by subtracting the *excavation losses* and by adding to it the *dilution* by contamination with foreign material. In the case of the Halimba deposit the following values were registered:

| | Excavation losses | Dilution |
|---|---|---|
| Halimba III mine | 26.4% (22.0–32.2%) | 1.5% (1.0–2.2%) |
| Halimba II SW mine | 28.8% (27.2–30.8%) | 1.6% (1.5–1.7%) |

The higher values of the Halimba II SW mine are consequences of the higher variability of this part of the Halimba deposit. No data are available from the Cseres mine.

A comparison of the estimated *productive area* was carried out by the author for that part of the sectors No. 6 and 7 where the extraction of the ore was already finished and the real contours of the ore — with the 2.0 m cut-off for the bauxite thickness — were established and documented by the mining geologic service. First a map has been constructed showing the inner (certain) and outer (possible) contours of the surface resource estimation (Figure 60). In a second step J. Tiszay, geologist of the mine constructed the contour of the ore, as established in the mine. The study area is open from the west, where extraction is not yet finished.

***Figure 60.*** Comparison of the results of surface exploration by bore holes and mining

1 — "certain" productive area, 2 — "possible" productive area, 3 — contour of the excavated ore, 4 — older excavated areas, 5 — fault line

***60. ábra.*** A felszíni kutatás és a bányászati kitermelés eredményeinek összevetése a 6. részterületen és a 7. részterület keleti részén

1 — biztosnak tekintett produktív terület, 2 — lehetségesnek tekintett produktív terület, 3 — a kitermelt terület körvonala, 4 — korábbi években kitermelt területek, 5 — törésvonal

G. Varga, mining geologist carried out the calculation of the corresponding areas by the AutoCad computer programme. The results are very positive. 91.0% of the "certain" area has been in fact excavated by the mine and only 9% was abandoned, mainly because of a decrease of the thickness below the cut-off value. For the possible area three types of situations could be distinguished:

— The area could be extracted.

— The area has been abandoned (thickness falling below the cut-off value).

— The in fact productive area extended beyond the contour of the resource estimation.

Their percentage is as follows: extracted area 68.3%, abandoned area 31.7%, surplus area beyond the original contour 15.1%. The balance of the three variants is 83.4% was extractable regarding the possible area. Note that in fact contour of the ore is more complicated, more variable as it could be established at the end of the surface exploration. The range of the change of the contour line is shorter than the range of influence obtained by the surface boreholes. These results confirm the applicability of the fuzzy set method for the resource estimation and the necessity of additional exploration in the galleries if the mine.

The tonnage and the grade of the ore could not be compared directly as the mine changes time-to-time its cut-off values depending on the requirements of the alumina plants. The economic aspects of these calculations are beyond the scope of this monography. On his part, the author of the monography applied stable-cut off values corresponding to the deposit model.

## Geomathematical and informatical experiences

Geomathematical methods were applied first on the Halimba deposit in the exploration report of the Cseres bauxite body in 1950. The author of this report was K. Barnabás, chief geologist. Averages of the grade and tonnage were calculated by the well known traditional statistical methods. All these calculations were carried out by mechanical calculators. The weighted average was calculated in all cases, but other important parameters such as the standard deviation or the skewness were not taken into account.

In the monography "Geochemistry of the Hungarian bauxite" (BÁRDOSSY 1961) further statistical parameters were included, such as the mode, the median, the standard deviation. Histograms were constructed for the composition of the entire bauxite sequence. Only the Cseres and the Tormás-kút bauxite bodies were included in this monography from the Halimba deposit. It can be of interest that a large number of correlation diagrams were constructed taking the $Al_2O_3$ content as independent variable. Averages of the dependent variables (all other chemical components) were calculated corresponding to the different $Al_2O_3$ content. It was found that in the different bauxite deposits of Hungary the correlation of the chemical components is not the same.

A great step ahead occurred with the introduction of computers into the bauxite exploration. The Bauxite Exploration Company carried out its first computerized resource estimation in 1966 on the Halimba V mining unit. The first publication applying computerized calculations was that of JOCHÁNÉ EDELÉNYI (1981). The calculations were performed by I. Dienes. BÁRDOSSY, Ó. KOVÁCS (1995) carried out various computer aided multivariate calculations e.g. cluster analysis, discriminant analysis, multicorrelation etc. on the Halimba deposit.

In the nineties with the help of the Hungarian Academy of Sciences a computerised data base was established for all the surface boreholes of the Halimba Basin. This database contains now more than 350 000 data. Their statistical evaluation was carried out by the SPSS programme package (see chapter: The main and accessory chemical components…).

As already mentioned before, a large number of variograms was constructed for different variables by the Variowin programme. Ranges of influence were calculated and so called "variogram surfaces" were constructed.

G. Varga, geologist of the Halimba mine established a further data base in the dBaseIII system, for the mining geologic data (VARGA 2002). Furthermore, maps and profiles were constructed for the mine by the AutoCad R–14 programme. An overview of the entire mining–geologic exploration was elaborated on an up to date level.

The theoretical background for the quantitative evaluation of uncertainties was assured by the book of BÁRDOSSY, FODOR (2004). This short overview shows that the geological study of the Halimba deposit is based on both theoretical (mathematical) and practical geologic experiences and knowledge.

## Hydrogeologic experiences

The central and the northern parts of the Halimba deposit are situated below the local karst water level (+176 m), being a part of the karst water system of the Bakony Mountains. The very favourable hydrogeologic properties of the immediate footwall, that is of the Kössen Limestone and of the Dachstein Limestone allowed mining deep below the karst water level. Both formations are characterized by low permeability. The fissures and cavities of the Dachstein Limestone are filled by clay and bauxitic clay (see chapter: Footwall and hanging wall formations).

The complex reverse tectonic line in the western part of the deposit is of high hydrogeologic importance (see Figure 3), as the Main Dolomite Formation appears on its western side. This formation is widely distributed in the Bakony Mountains and it is characterized by very high permeability. It is the main danger for the mining where the bauxite deposits are situated below the karst water level. This is the situation also in the western part of the Halimba deposit (see Figure 3). Detailed hydrogeologic investigations were carried out in this zone by surface boreholes and from the galleries of the mine (PATAKI et al. 2002). Exploratory drifts were made across the tectonic zone and 6–8 $m^3$/minute water entry was detected in the Dolomite Formation. 11 hydrogeologic boreholes were drilled along the tectonic zone between 1997 and 2002. The overall evaluation of the exploratory drifts and of these boreholes demonstrated that the tectonic zone is dissected by at least eight transversal faults having a NW/SE strike. The larger ones are indicated on Figure 3.

*Table 14.* Water pumping of the Halimba mines ($m^3$/minutes)

| Years | Water pumping ($m^3$/minute) | | |
|---|---|---|---|
| | Halimba III mine | Halimba III. air shaft | Halimba II SW mine |
| 1955 | 0.7 | | |
| 1960 | 1.7 | | |
| 1965 | 2.2 | | |
| 1970 | 3.6 | | |
| 1975 | 5.75 | | |
| 1980 | 5.46 | | |
| 1985 | 8.28 | | |
| 1990 | 7.48 | | |
| 1997 | 9.04 | | |
| 1998 | 9.99 | | |
| 1999 | 10.72 | | |
| 2000 | 10.70 | | |
| 2001 | 11.08 | | |
| 2002 | 11.99 | | |
| 2003 | 10.77 | | |
| 2004 | | 5.69 | 0.10 |
| 2005 | | 6.82 | 0.54 |
| 2006 | | 6.97 | 1.59 |
| 2007 | | 7.27 | 1.73 |

Data received from B. Vizy and B. Jankovics.

Along the tectonic zone dolomitization of the Dachstein Limestone occurred in a width of 100 m to 200 m. The activity of thermal waters is indicated by pulverisation and pyritisation of this dolomite. The tectonic zone is filled by tectonic breccia of bauxitic clay and carbonate rock debris.

The high danger of water inrush and of high pumping costs led to the decision not to open the bauxite resources situated to the west of the tectonic zone. 2700 kt of bauxite was abandoned by this decision. The high uncertainty of these resources contributed to the decision of the mine.

After finishing the excavation in the northern part of the deposit (Halimba III, IV, V fields) the mining activity was concentrated in the southern part of the deposit., where the hydrogeologic conditions are more favourable: the bauxite is situated less deep below the karst water level and the immediate footwall is mainly Kössen Limestone and Dachstein Limestone, both having favourable properties in hydrogeologic respect. Nevertheless 29 additional hydrogeologic boreholes were drilled in a length of 1857.5 m up to 2007.

The amount of water pumping from the entire Halimba mine is shown on Table 14. The rate of pumping is very low in the Halimba II SW mine as compared with the northern part of the deposit, but it is slowly growing as the excavation extends to more and more parts of the bauxite bodies. The general opinion is that the rate of pumping will remain close to the actual level.

# Summarizing ideas and explanations

The aim of this monography was to collect and to evaluate all available data and documents on the Halimba deposit and to save them for the future. In the first, scientific part of the monography the author tried to describe the facts, followed by an explanation of genetic reasons and relationships. His basic principle was to distinguish facts and conclusions.

In the practical part of the monography all available experiences are presented on surface and underground mining-exploration and resource estimation. New geomathematical methods have been applied and their methodology is presented in test calculations. The author is convinced that these methods can be applied with full success in other types of deposits too.

The reader may ask why was the monography prepared and published in this year, as the production of the Halimba mine will finish probably in a few years? The author did not want to wait for an uncertain term in the future, as the geologists and mining engineers of the mine make great efforts to localize and to sample the resources remaining in the mine, because of very high cut-off requirements in the past decades. Additional exploration is also carried out at places where the contours of the bauxite bodies have not been detected with full precision. Considerable results were obtained in the last years by these activities. The author performed his geologic observations since the beginning of the mining. In his opinion, the documents collected so far are sufficient to present a reliable evaluation of the deposit. The author is convinced that both the scientific and the practical results can be applied in bauxite and other solid mineral deposits, in Hungary and abroad.

# A halimbai bauxit-előfordulás

*Földtudományi rész* . . . . . 73
Bevezetés és célkitűzés . . . . . 73
A kiértékelés módszerei . . . . . 73
A fedő- és feküképződmények értékelése . . . . . 73
A feküképződmények . . . . . 73
Fedő képződmények . . . . . 74
A bauxitelőfordulás és a bauxittestek kiterjedése, vastagsága . . . . . 75
Tektonikai felépítés . . . . . 78
A bauxitösszlet szedimentológiai felépítése . . . . . 79
A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete . . . . . 80
A bauxitösszlet fő és járulékos kémiai komponensei . . . . . 84
A bauxitösszlet nyomelemei . . . . . 95
A bauxitösszlet ásványtani felépítése . . . . . 99
A bauxit-előfordulás kialakulása . . . . . 99
*Alkalmazott, gyakorlati rész* . . . . . 103
A felszíni bauxitkutatás módszertani tapasztalatai . . . . . 103
A föld alatti termelési kutatás tapasztalatai . . . . . 108
A készletszámítások tapasztalatai . . . . . 110
Geomatematikai, számítástechnikai és informatikai tapasztalatok . . . . . 114
Hidrogeológiai tapasztalatok . . . . . 115
*Összefoglaló értékelés* . . . . . 116
*Felhasznált irodalom* . . . . . 117

*Jelen monográfia megírására az ösztönzött, hogy a Halimba II teleprészen 2001-ban megindult bányászati beruházás és kitermelés számos új földtani információt szolgáltatott. A bánya vezetőinek és geológusainak önzetlen támogatásával lehetőségem nyílt a régebbi és az új földtani és bányászati adatok kiértékelésére, korábbi értékeléseim újragondolására. E munka eredményeit tartalmazza ez a monográfia.*

*Monográfiám első részében azt vizsgáltam, hogy van-e valamilyen szabályszerűség a teljes bauxitösszlet kőzetfajtáinak tulajdonságaiban és elterjedésében, továbbá a fő kémiai komponensek eloszlásában. Megvizsgáltam a közvetlen fekü és fedőrétegekkel való összefüggéseket és a fő tektonikai elemeket. Mindezekből a bauxit felhalmozódására és a mai helyzet kialakulására próbáltam következtetéseket levonni. A mai szóhasználattal élve a bauxit-előfordulás teleptani modelljét próbáltam megalkotni. Monográfiám másik részében a bauxitkutatás és készletszámítás módszereit értékeltem és összehasonlítottam a felszíni fúrásos kutatás, a bányabeli kutatás és a termelés eredményeit.*

* * *

*A halimbai bányászat kezdete óta a bánya vezetőitől és geológusaitól földtani vizsgálódásaimhoz minden segítséget megkaptam. Köszönettel tartozom Zenkovics Ferencnek, Bíró Bélának, Erdélyi Tibornak és Mérai Károlynak a sok segítségért. A monográfia megírásával kapcsolatosan Jankovics Bálintnak, R. Szabó Istvánnak, Tiszay Jánosnak és Varga Gusztávnak tartozom hálás köszönettel, akik kéziratomhoz értékes tanácsokat adtak és különböző számításokat is végeztek. Külön köszönöm Kis István üzemvezető főmérnöknek a közös bányajárásokat, tanácsait és észrevételeit. Hálás köszönettel tartozom Haas Jánosnak a bauxitfekü rétegtani problémáinak megoldásához nyújtott segítségéért.*

*Hálásan köszönöm Piros Olgának és Simonyi Dezsőnek azt a gondos és figyelmes munkát, amivel e kötet szerkesztését elvégezte. Végül hálás köszönettel tartozom a Magyar Tudományos Akadémia elnökségének. Anyagi támogatásuk nélkül ez a monográfia nem jelenhetett volna meg.*

# Földtudományi rész

## Bevezetés és célkitűzés

A halimbai bauxit-előfordulás a Bakony hegység délnyugati részén helyezkedik el (1. ábra). Az egyik legnagyobb Európában. Megismerésének történetét 1998-ban Pataki Attilával és Tiszay Jánossal közös cikkben ismertettük. Az akkor leírtak megismétlését feleslegesnek tartom. Azóta is több tanulmány jelent meg az előfordulásról, a fúrásos kutatás és a bányászat is folytatódik (MÁTÉFI 2002, PATAKI et al. 2002, GÓCZÁN et al. 2002). A Halimba II teleprészen 2001-ban megindult bányászati beruházás és kitermelés következtében számos új földtani információ keletkezett, melynek tudományos és gyakorlati célú feldolgozását tartalmazza ez a monográfia.

## A kiértékelés módszerei

Kiértékelésem alapját az a több száz bányajárás képezte, melyeket a halimbai bánya megnyitása, 1951 óta, évről évre végeztem és ma is végzek. E bányajárások során rendszeresen mintákat vettem laboratóriumi vizsgálatokra, helyszíni megfigyeléseket végeztem és földtani vázlatokat készítettem. A bauxitminták a Magyar Természettudományi Múzeum Ásványtárában nyertek elhelyezést, ahol a szakemberek számára hozzáférhetők.

A kiértékelés során 2200 „H" jelű (halimbai) és 30 „Sz" jelű (szőci) gépi magfúrás rétegsorára vonatkozó földtani, ásványtani és kőzettani adatokat, valamint vegyelemzéseket dolgoztam fel. Ezek a fúrások 80–460 méter mélységig terjedtek. A Magyar Tudományos Akadémia támogatásával az összes alapadatot számítógépen rögzítettük. A bányaüzemtől kapott fúrási koordináták és ponttérképek segítségével földtani szelvényeket, valamint a fő változókra izovonalas térképeket szerkesztettem. Az SPSS számítógépes programcsomag segítségével egy és többváltozós statisztikai számításokat végeztem. A „Variowin"-program segítségével a fő változókra variogramokat és ún. variogram-felszíneket számítottam és meghatároztam a főbb változók hatástávolságát. Az átmenetek és a bizonytalanságok meghatározására fuzzy aritmetikát és fuzzy logikát alkalmaztam. A Bayes-elv felhasználásával a kutatások előrehaladása során elért ismeretnövekedést is számszerűen értékeltem.

Külön foglalkoztam az ún. *„méréthatás"* (scale factor) értékelésével. Azt találtam, hogy a vizsgált változókat az értékelés mérettartományától függően eltérő tulajdonságok jellemzik. Ez a jelenség a változók közötti kölcsönhatásokra is kiterjedt. E kiértékelés elősegítésére teleptani ismérvek (felső-kréta, ill. eocén fedő, üledékfácies, belső, ill. peremi sávok, karbonáttörmelék jelenléte, vegyi összetétel stb.) alapján, az előforduláson 28 *részterületet* különböztettem meg. Ezek körvonala és számozása a 2. ábrán látható a három helyi elnevezéssel együtt. A részterületek tulajdonságait külön-külön értékeltem.

## A fedő- és feküképződmények értékelése

### *A feküképződmények*

A vállalat geológusai gondosan meghatározták a fúrásokban és a bányavágatokban észlelt feküképződmények korát és kifejlődését. Ezek alapján MÁTÉFI (2002) térképet szerkesztett a közvetlen fekü képződményeinek elterjedéséről. A terület alaphegységét képező nori *Fődolomit Formáció* az előfordulás nyugati keretét adja, továbbá az előfordulás déli és keleti szélén is ez a közvetlen fekü. A Fődolomit MÁTÉFI (2002) szerint egy ÉÉK–DDNy-i irányú idős (ausztriai?) szerkezeti vonal mentén érintkezik a fiatalabb felső-triász korú képződményekkel.

Kiértékelésem során minden egyes kutatófúrás fekü rétegsorát értékeltem és ennek alapján egy áttekintő térképet szerkesztettem a feküképződmények általam feltételezett térbeli eloszlásáról (3. ábra). Ez az értékelés nagyrészt megerősítette MÁTÉFI fent említett megállapításait azzal a kiegészítéssel, hogy az előfordulás keleti és délkeleti szélén is a *Fődolomit* Formáció a közvetlen fekü, és ez folytatódik kelet és délkelet felé. Az 1976-ban az előfordulás északi szélén mélyített Padragkút Pa–6 szerkezetkutató fúrás rétegsora is igazolja ezt a képet: 230 métert fúrt a fekübe, melyből a felső 120 m *Dachsteini Mészkő*, alsó részén dolomit-közbetelepülésekkel. Ez alatt 110 métert fúrtak a Fődolomit Formációba, amely dolomitból és dolomitmárgából állt (JOCHÁNÉ EDELÉNYI 1981).

A rhaeti–nori *Kösseni Mészkő és márgás mészkő* az előfordulás középső és keleti részén, nagy területen összefüggő réteget alkot. Becsült vastagsága 30–50 méter. Dél felé lepusztulás következtében fokozatosan kivékonyodik, majd kiékelődik. A nyugati nagy „völgy" nyugati oldalán az újabb kutatások észak–déli irányú, 100×50 m kiterjedésű területen szintén kimutatták a Kösseni Mészkövet. Az előfordulás északnyugati szélén szintén ez a képződmény a közvetlen fekü (3. ábra).

A Halimba II. mező középső részén, mintegy 400×500 méteres területen, rhaeti korú *Dachsteini Mészkő* borítja a kösseni rétegeket. Nyilvánvalóan jóval nagyobb volt a kiterjedése, de a későbbiekben lepusztult. Vastagságát 20–200 méterre becsülik. A fúrások szerint a mészkőben sok a bauxitos agyaggal kitöltött üreg. Tévesnek tartom a Dachsteini Mészkő Formáció déli határának korábban feltételezett lefutását, ami azon alapult, hogy a cseresi bauxittest területén az 1960 előtti fúrásokban mindenütt Fődolomitot jeleztek feküként. Ugyanakkor az 1996-óta e területen mélyített sűrítő fúrásokban a helyi geológusok Dachsteini Mészkő feküt írtak le, pl. Halimba H–2206, –2207, –2210, –2211 stb. A fúrómagok alapján az utóbbi látszik megalapozottabbnak. Haas János szóbeli közlése szerint a közelmúltban az előfordulás északi részén mélyített Hgh–11 jelű hidrogeológiai fúrás fekürétegsorából vett mintákon egy sor vékonycsiszolati vizsgálatot végzett. Szerinte a rétegsor felső részén található ooidos-onkoidos mészkő nagy valószínűséggel az alsó-liász Kardosréti Mészkő Formációba sorolható. A rétegsor alsó részén erős dolomitosodást észlelt, amit késő diagenetikus folyamattal magyarázott. Véleménye szerint a fúrásban a Kardosréti Mészkő vastagsága eléri a 100 métert. A Dachsteini Mészkő és a Kardosréti Mészkő között pedig üledékfolytonosság van.

Valószínű, hogy a cseresi telep területén is késő diagenetikus dolomitosodás történt a feküben és ez vezetett a Fődolomit Formációba való téves besoroláshoz. Megerősíti a fenti megállapításokat az, hogy a Halimba II. mező északi részén két fúrásban (Halimba H–1457 és H–1460) néhány méter vastag liász (hettangi) korú mészkövet észleltek, melyet szintén a Kardosréti Formációba soroltak. Az alsó-liász korú mészkő tehát jóval nagyobb elterjedésű és vastagságú a halimbai előfordulás területén, mint ahogy azt a korábbiakban gondolták.

A triász és alsó-liász korú képződmények felszíne a bauxitösszlet alatt karsztos-eróziós jellegű (BÁRDOSSY 1977). E viszonylag mérsékelt fekümorfológiát a Halimba III. és IV. mezők területén két ÉK–DNy-i irányú, völgyszerű bemélyedés tagolja (4. ábra). A Halimba II. mező nyugati oldalán is hasonló völgy található, melynek kitöltéséről a következő fejezetekben lesz szó.

A fúrások ezen felül néhány 20–60 m mély, közel függőleges falú, kerek vagy ovális alaprajzú, töbörszerű karsztos-tektonikus mélyedést is kimutattak. Alapterületük 1000–1700 m$^2$. A legmélyebb töbröt a Halimba H–592 és H–597 jelű fúrások között észleltük. Relatív mélysége eléri a 60 m-t és teljes egészében jóminőségű bauxit tölti ki.

### *Fedő képződmények*

A halimbai előfordulás északi részén a bauxitösszletet felső-kréta santoni korú képződmények — főként karbonátkonglomerátum és márga — borítják *(Csehbányai Formáció*). Folyóvízi és ártéri kifejlődésűek. Igen valószínű, hogy eredetileg a felső-kréta képződmények a bauxitelőfordulás egészét, vagy legnagyobb részét beborították, de a paleocén és alsó-eocén kiemelkedés során az erózió áldozatául estek. Egy korábbi tanulmányunkban megszerkesztettük a felső-kréta képződmények elterjedésének jelenlegi határát (4. ábra) (BÁRDOSSY et al. 1998a, b). Teljes vastagságuk eléri az 50 m-t. A halimbai bauxit-előfordulás északnyugati részén a Csehbányai Formációra az *Ajkai Kőszén Formáció* rétegei települnek. A rétegsor agyag-, agyagmárga- és homokkőrétegekből áll, vékony agyagos kőszénrétegekkel. Részleges lepusztulása miatt e formáció eredeti vastagságát nem ismerjük, megmaradt vastagsága több tíz méter. Néhány lezökkent tektonikus árokban a *Jákói Márga Formáció* és az *Ugodi Mészkő Formáció* rétegei is megmaradtak.

A Halimba II. mező fő törésvonalától délre a felső-kréta fedőrétegek nagyrészt lepusztultak, csak a terület északnyugati sarkán maradtak meg kb. 300 méterre dél felé nyúló ék alak formájában. Főleg márgából, agyagból és karbonátkonglomerátumból állnak. Vastagságuk csak a fő törésvonal közelében éri el a 10–15 métert, ettől délre 1–10 méter között váltakozik. A földtani szelvények szerint egy késő-kréta korú tektonikus lezökkenés is szerepet játszott abban, hogy itt a bauxitösszlet felszínén egy sekély mélyedés alakult ki. Ezt követően a középső-eocén transzgressziót megelőző erózió itt egy viszonylag kiegyenlített, sima felszínt hozott létre.

A Halimba II. mező nyugati bauxittestétől nyugatra egy kis kiterjedésű lezökkent tektonikai árok területén a Halimba H–1551 jelű fúrás 65,7 m vastagságban harántolta a fent leírt felső-kréta képződményeket. Ez is arra utal, hogy a kréta fedőrétegek kiterjedése a paleocén–eocén korú lepusztulás előtt a mainál jóval nagyobb lehetett.

A terület a paleocén és az alsó-eocén során kiemelkedett. A lepusztulás után a transzgresszió igen egyenletes abráziós térszínen indult meg a középső-eocén elején (*Darvastói Formáció, Szőci Mészkő Formáció*). E képződmények alkotják a bauxitösszlet közvetlen fedőjét az előfordulás déli és keleti részén. Az eocén fedőösszletet egy korábbi tanulmányunkban ismertettük (BÁRDOSSY et al. 1998a, b). Az újabb rétegtani ismereteket KECSKEMÉTI (2005) foglalta össze. Említést érdemel, hogy a cseresi területen a fúrások a bauxitösszletbe bevágódott néhány lapos völgyet mutattak ki, amelyet több méter vastag középső-eocén pirites-markazitos szenes agyag töltött ki

Egyes szakemberek feltételezése szerint a santoni képződmények felszínére bauxit rakódott le és ezt követte a középső-eocén transzgresszió. Ezt a feltevést sem a fúrási rétegsorok, sem a bányabeli feltárások nem erősítették meg.

Az előfordulás északi részén az eocén összlet a *Padragi Márga Formációval* (bartoni–priabonai) zárul. Az eocén összlet lepusztult felszínét területünkön néhány méter vastag pleisztocén korú homok, agyag és kavics fedi.

## A bauxitelőfordulás és a bauxittestek kiterjedése, vastagsága

Az előfordulás kereken 8 km$^2$ alapterületű, Európa területén a legnagyobb, összefüggő karsztbauxit-előfordulás. Hossza északkeleti irányban 4 km, szélessége rá merőlegesen 1,5–2,5 km. Az előfordulást északon egy NyÉNy–KDK csapású törésvonal zárja le. Egy másik hasonló csapású markáns törésvonal pedig egy déli (Halimba-Cseres, Halimba II.) és egy északi részre osztja (2. ábra). Értékelésem súlypontja a déli területrész, ahol több éve új fúrásos kutatás és 2003 óta bányászati kitermelés folyik. Az északi területrészt az ott elért korábbi eredmények, valamint saját korábbi vizsgálataim (BÁRDOSSY el al. 1998a, b, 2000) tükrében értékeltem újra.

Az előfordulástól alig több mint egy kilométerre délkeletre terül el a *malom-völgyi* bauxit-előfordulás jellegzetes lencsés telepeivel. A halimbai előfordulástól délre kb. egy kilométerre kezdődik a *szőci* előfordulás ugyancsak lencsés telepekkel. E két előfordulás határai a halimbai előfordulás felé a 4. ábrán láthatók. Kapcsolatukat a halimbaival a genetikai fejezetben ismertetem.

Az előfordulás északnyugati és északi részén a fúrások a bauxitösszlet körvonalának két mély beöblösödését mutatták ki (2. ábra). Az ezeken keresztül szerkesztett földtani szelvények alapján az a véleményem, hogy ezek a bauxitösszletbe bevágódott lapos, eróziós völgyeknek felelnek meg. Ezeket az 5–20 méter mély völgyeket a Csehbányai Formáció folyóvízi fáciesű durvatörmelékes üledékei töltik ki. Ezen kívül az előfordulás északi részén, öt helyen, 50–100 m átmérőjű foltokban teljesen kimaradt a bauxitösszlet. Ezeket a helyeket a 2. ábrán feltüntettem. A földtani szelvények szerint a triász fekü kiemelkedései ezek, tehát nem téveszthetők össze a tektonikai fejezetben ismertetendő tektonikai „kutakkal".

A senon rétegekkel fedett területrészeken néhol nehézségbe ütközött a bauxitösszlet és a Csehbányai Formáció pontos elhatárolása a képződmények nagy hasonlósága miatt. Ilyenkor a határ megvonásához a vegyelemzéseket is figyelembe vettem. Ismeretes, hogy kvarcmentes kaolinites kőzetekben az $Al_2O_3/SiO_2$ hányadosa 0,85. Ennél nagyobb hányados esetén a kőzet bauxitásványokat (böhmit, gibbsit) tartalmaz. A bauxitösszlet jelenlétének fő bizonyítási kritériuma a bauxitásványok jelenléte. Ennek értelmében a bizonytalan helyeken 0,85 hányadosnál vettem fel a határt. Az így kapott fedőhatár földtani szelvényeim alapján reális.

Fontosnak tartottam azt is kiértékelni, hogy az előfordulás teljes területén mekkora az egyes bauxitos kőzetfajták kiterjedése. Ez látható az 5. ábrán. A teljes területre csak a bauxitos agyag terjed ki. Jóval kisebb az agyagos bauxit és még kisebb a szorosan vett bauxit kiterjedése. Igen jellegzetes a bauxittestek rendkívül szabálytalan, kacskaringós körvonala, ami különösen az előfordulás északi részén látványos. Ezek ellenére a bauxit itt is összefüggő réteget alkot. A déli területen térben jobban elkülönülnek a bauxittestek.

A déli terület nyugati részén egy ÉÉK–DDNy irányú völgyet tölt ki az összlet, amely főként bauxittal cementált mészkő- és dolomitkonglomerátumból és breccsából, valamint karbonátaleuritból áll („*Cseresi Tagozat*"). Ezek között találhatók a bauxitrétegek. Mivel a kitermelhető bauxit itt is térben jól meghatározott rétegeket alkot, a kutatók nem törekedtek mindenütt a bauxit alatt található viszonylag nagy vastagságú karbonáttörmelékes összlet átfúrására és a triász korú fekü elérésére. Ezért a Halimba II. terület nyugati szélén (13. részterület) a bauxitösszlet teljes vastagságát csak becsülni tudtam, kb. 60–100 m-re.

Az előfordulás déli részén részterületenként kiszámítottam az összletvastagság fő statisztikai mutatóit (1. táblázat). Az egyes részterületek átlagos vastagsága 7,2 és 32,0 méter között váltakozik. A legtöbb részterületen 10 és 20 méter között van, legnagyobb a nyugati bauxittest mederfáciesű övében, ahol mint említettem 60–100 méter lehet (12. részterület). A medián és a két szélén 5%-al csökkentett vastagság (trimmed mean) nem különbözik érdemlegesen az átlagtól. Földtani szempontból különös figyelmet érdemel a leggyakoribb átlagos vastagság (módusz), amely szintén többnyire 10 és 20 méter között van. Mindez az összletvastagság igen

*1. táblázat.* A halimbai déli részterületek bauxitösszlet-vastagságának statisztikai mutatói

| Részterület | Átlag | Medián | Módusz | Trimmelt átlag | Minimum | Maximum | Konfidencia | | Szórás | Relatív szórás (%) | Ferdeség |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | minimum | maximum | | | |
| 1 | 7,2 | 8,2 | 8,0 | – | 2,8 | 9,5 | 2,4 | 12,0 | 3,0 | 41,7 | -1,76 |
| 2 | 15,2 | 13,5 | 12,0 | 14,9 | 10,5 | 24,7 | 12,3 | 18,1 | 4,3 | 28,3 | 1,26 |
| 3 | 16,8 | 16,9 | 18,5 | 16,4 | 10,2 | 31,0 | 14,6 | 18,9 | 5,6 | 31,9 | 1,10 |
| 4 | 15,5 | 14,4 | 20,5 | 15,3 | 5,3 | 30,0 | 13,1 | 17,9 | 6,7 | 43,0 | 0,48 |
| 5 | 10,1 | 9,9 | 8,5 | 9,7 | 3,0 | 25,7 | 8,2 | 12,0 | 5,0 | 42,9 | 1,10 |
| 6 | 11,6 | 11,4 | 12,0 | 11,3 | 4,9 | 27,5 | 10,1 | 13,1 | 4,0 | 34,3 | 2,17 |
| 7 | 21,2 | 20,6 | 21,5 | 20,7 | 5,8 | 46,0 | 19,8 | 22,2 | 7,0 | 33,0 | 0,75 |
| 8 | 13,5 | 12,6 | 13,0 | 13,4 | 7,7 | 20,5 | 11,4 | 15,7 | 3,6 | 26,4 | 0,30 |
| 9 | 15,0 | 15,2 | 15,5 | 14,9 | 9,3 | 22,0 | 11,2 | 18,9 | 4,6 | 30,1 | 0,21 |
| 10 | 14,7 | 16,0 | 15,0 | 14,5 | 7,2 | 26,4 | 10,6 | 18,9 | 6,1 | 41,8 | 0,41 |
| 11 | 17,1 | 15,4 | 14,0 | 16,9 | 6,4 | 31,0 | 14,6 | 19,6 | 7,1 | 41,5 | 0,51 |
| 12 | 32,0 | 28,2 | 27,0 | 30,7 | 21,6 | 77,0 | 29,2 | 34,9 | 10,7 | 33,4 | 2,15 |
| 13 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 14 | 22,6 | 22,1 | 10,0 | 21,6 | 4,7 | 69,4 | 19,2 | 26,1 | 12,2 | 54,2 | 1,43 |

mérsékelt ferdeségének a következménye. Egyetlen kivételtől eltekintve az összes ferdeségi érték pozitív előjelű, tehát az eloszlás a nagyobb vastagságok felé kissé elnyúlt. A bauxitösszlet fúrással igazolt maximális vastagsága 77,0 m a 12. részterületen levő Halimba H–2016 jelű fúrásban. Hasonlóan nagy az összletvastagság e részterület északi folytatásában (14. részterület). A többi részterületen a maximális vastagság 20 és 46 méter között váltakozik. Ez arra utal, hogy a fent említett völgytől eltekintve kevésbé tagolt felszínt borított el a bauxitösszlet. A minimális összletvastagság értékei 3 és 22 méter között váltakoznak.

Az átlagértékek bizonytalanságát kifejező konfidencia intervallumokat is kiszámítottam 95% konfidencia szinten. Ezt az értéket a természeti adottságokon túl a fúrások száma is érdemben befolyásolta, ahol sok fúrás mélyült ott a legrövidebb a konfidencia intervallum (1. táblázat).

Az összletvastagság változékonyságát a szórással és a relatív szórással lehet a legjobban jellemezni. Összehasonlításra az utóbbi az alkalmasabb. E szerint az összletvastagság változékonysága a déli terület északnyugati részén (14. részterület) a legnagyobb: 54,2%. A többi részterület többségében 28 és 49% között mozog, ami közepes változékonyságnak felel meg.

Az északi területen két közel párhuzamos, ÉÉK–DDNy irányú völgyszerű mélyedést mutattak ki a fúrások (23. és 25. részterületek a 2. ábrán). Ezekben a bauxitösszlet átlagos vastagsága 16, ill. 18 méter. A többi északi részterületen 4–11 méter.

A déli területről a statisztikai mutatókon felül vastagságvonalas térképet is szerkesztettem (6. ábra). Jól látszik, hogy az előfordulás keleti, délnyugati és déli szélén 200–400 m széles sávban 1–10 m vastag a bauxitösszlet. A már kitermelt cseresi bauxittest területén átlagosan 10–20 m vastag és csak kisebb foltokban éri el a 20–30 métert. A déli terület északkeleti részén rendkívül szabálytalan körvonallal 40 m vastagságot ér el az összlet. Ezt és az előbb említett nyugati vastagabb területet egy átlagosan 13–15 méter vastag területsáv választja el egymástól.

A kérdés az, hogy miként értelmezhető ez az eloszlás? A bányászati tapasztalatok szerint a bauxitösszlet felszíne viszonylag sima. A szöveti vizsgálatok törmelékes, folyóvízi felhalmozódásra utalnak. Ennek értelmében az a véleményem, hogy a bauxitösszlet egy nagy ÉNy–DK-i irányú teknőt töltött fel. Csak nyugati részén alakult ki tektonikus, eróziós és karsztos folyamatok együttes hatására egy viszonylag mélyebb völgy, amelybe délnyugat felől, feltehetően kis távolságból, időszakos vízi szállítással karbonáttörmelék hordódott be. Nem tudok egyetérteni PATAKI et al. (2002) véleményével, aki a Cseresi Tagozat alsó részét hegylábi lejtőtörmeléknek tartja. Először is egy erősen lepusztult térszín volt itt, az összlet felhalmozódásának kezdetén, ahol legfeljebb lapos dombok szegélyezték az egykori halimbai medencét. Ilyen térszínen nem halmozódhatott fel ilyen nagy vastagságú lejtőtörmelék. De a törmelékes felhalmozódás erősen elnyúlt alakja sem felel meg hegylábi lejtőtörmeléknek. Tehát a Cseresi Tagozat felső részének folyóvízi-alluviális eredetét az egész tagozatra nézve érvényesnek tartom. Maguk a bauxitos kőzetfajták (bauxit, agyagos bauxit, bauxitos agyag) minden jel szerint délkelet felől érkeztek, ugyancsak folyóvízi szállítással.

Áttérve a szorosan vett bauxit értékelésére az látszik, hogy a bauxittestek főként az összlet vastagabb részein helyezkednek el, bár vannak ez alól kivételek is. Így a cseresi bauxittest legnagyobb része egy viszonylag vékony, 5–20 m vastagságú összletben helyezkedik el, ugyanakkor ettől északra 30–40 métert elérő összletvastagság mellett sem találtak bauxitot a fúrások.

Figyelemre méltó, hogy kiértékelésem során nem találtam érdemi vastagságkülönbséget a senon rétegekkel, ill. az eocén rétegekkel fedett részterületek között. Ez arra utal, hogy a paleocén és alsó-eocén korú lepusztulás elsősorban a senon korú fedőrétegeket távolította el, magát a bauxitösszletet megkímélte.

Az 2. ábrán bemutatott részterületek az előfordulás egészét lefedik, de részletes értékelést csak a szorosan vett bauxit által elfoglalt területekre végeztem. Ezeket nevezem *bauxittesteknek.*

A déli területen a *bauxittestek* elterjedését és átlagos vastagságát a 7. ábra szemlélteti. Az ábrán a már kitermelt bauxit körvonalát is feltüntettem. Három nagyobb (Cseres, Halimba II. DNy, Halimba II. K) és több kisebb bauxittest különböztethető meg, melyek vékony „nyakakon" át közvetlenül összefüggenek egymással. Ezeken belül a bauxit vastagsága, összetétele és a települési módja alapján 14 részterületet különböztettem meg. Az előfordulás délnyugati szélét képező 28. részterületen nincs szorosan vett bauxit, ezért ez értelemszerűen nem szerepel a kiértékelésben.

A bauxitvastagság főbb statisztikai mutatóit a bauxitra is kiszámítottam (2. táblázat). A bauxit átlagos vastagsága a nyugati, ÉK–DNy irányú völgy tengelyében a legnagyobb: 12,3 m és észak felé következő 14. részterületen kissé vékonyabban folytatódik (7,1 m). A többi részterület átlagos vastagsága 1,5 és 6,1 méter között váltakozik. Az utóbbi a cseresi bauxittest tengelyében található, ÉNy–DK-i irányban hosszan elnyúlt sáv (4. részterület). E három részterületet a folyóvízi behordás mederfácieseként értelmezem. Nem világos a cseresi és az északi mederfáciesű részterület kapcsolódása. Az sem kizárt, hogy egymástól független medrekről van szó a bauxitösszleten belül. E medrek két oldalán kisebb a bauxit átlagos vastagsága (északon 3,7 és 3,7 m, a cseresi érctestben pedig 3,8 és 5,0 m az átlag).

A cseresi és a Halimba II. terület keleti részén két viszonylag vékony részterület kapcsolódik egymáshoz kanyargós körvonalakkal (3,3 és 3,8 m az átlag; 7. ábra). A földtani szelvények és a bányászati feltárások alapján feltételezem, hogy a bauxit itt az agyagos bauxitba bevágódott, DNy–ÉK-i irányú keskeny völgyet töltött ki. Hasonló, de laposabb és kisebb vastagságú völgykitöltésként értelmezem a középső területrész három bauxittestét, (8., 9. és 10. részterület), amelyek átlagosan csak 3,2, 3,0 és 3,6 méter vastagok (7. ábra).

A keleti fő bauxittest (7. részterület) rendkívül szabálytalan körvonalú. Átlagos vastagsága 5,0 m. Ebben az esetben eróziós völgykitöltés helyett időszakos ártéri-árvízi elöntésre gondolok. Ezt erősítik meg a bányavágatokban és a fejtésekben végzett megfigyeléseim, amelyek szerint a bauxit közepes és durvatörmelékes szövetű és igen szabálytalan eloszlású a törmelékszemcsék mérete. E bauxittest középső részén a Halimba H–2435 jelű fúrásban 34,0 m vastag bauxitot mutattak ki, ami az egész bauxittest legnagyobb bauxitvastagsága. Ezt egy töbörszerű mélyedés kitöltéseként értelmeztem, bár ilyen feküalakzat a térségben eddig nem fordult elő. Amikor a bányászati kitermelés e fúrást is elérte kiderült, hogy itt nem egy töbörről, hanem egy keskeny víznyelőről van szó, amiben a fúrás lefelé haladt. A bauxit tényleges vastagsága ezért nem több 14–16 méternél. Ez az eset jó példája annak, hogy a felszíni kutatás folyamán az ilyen kivételes jelenségeket milyen óvatossággal kell értelmezni.

A részterületek többségében a medián, a módusz és az 5%-al csökkentett vastagság alig tér el a súlyozott átlagtól. Kivétel ez alól a 12. részterület, ahol a 12,3 m-es súlyozott átlaggal szemben a leggyakoribb bauxitvastagság (módusz) kerek 20 m. Az összes ferdeségi mutató pozitív előjelű, de csak igen kis mértékű, nem haladja meg a 2,06 értéket. Ezek szerint a bauxitvastagság eloszlása enyhén elnyúlt a nagyobb vastagságok irányába.

A 2. táblázaton feltüntettem a részterületek szórását és relatív szórását. Azt találtam, hogy a relatív szórás sokkal jobban kifejezi a bauxitfelhalmozódás változékonyságát, mint az egyszerű statisztikai szórás. A bauxitvastagság átlagos *relatív szórását* térképen is ábrázoltam (8. ábra). A relatív szórás a keleti két részterületen a legnagyobb ±104,7 és ±102,0%. Ez igen jó összhangban van a bányászati tapasztalatokkal, amely szerint ezen a két részterületen váltakozik a legszeszélyesebben a bauxit vastagsága. A többi részterületen többnyire 60–80% a relatív szórás, csak a középső vékony bauxittestekben csökken le 50–53%-ra. A nyugati nagy bauxittestben keletről nyugat felé csökken a relatív szórás. A viszonylag kis vastagságú nyugati szélső részterületen

***2. táblázat.*** A halimbai déli részterületek bauxitvastagságának statisztikai mutatói

| Részterület | Átlag | Medián | Módusz | Trimmelt átlag | Minimum | Maximum | Konfidencia | | Szórás | Relatív szórás (%) | Ferdeség |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | minimum | maximum | | | |
| 1 | 1,5 | 1,2 | 1,0 | – | 0,3 | 3,5 | 0,0 | 3,8 | 1,4 | 93,3 | 1,32 |
| 2 | 3,3 | 2,3 | 2,0 | 3,1 | 1,5 | 7,5 | 1,8 | 4,7 | 2,1 | 65,5 | 1,66 |
| 3 | 5,0 | 4,0 | 10,5 | 4,7 | 0,5 | 15,5 | 3,4 | 6,6 | 4,0 | 80,5 | 1,08 |
| 4 | 6,1 | 5,3 | 9,5 | 5,7 | 1,0 | 19,5 | 4,4 | 7,8 | 4,7 | 76,6 | 1,45 |
| 5 | 4,0 | 3,7 | 1,5 | 3,7 | 0,5 | 12,5 | 2,9 | 5,1 | 2,9 | 73,3 | 1,26 |
| 6 | 3,8 | 2,0 | 2,5 | 3,3 | 0,6 | 17,0 | 2,3 | 5,3 | 4,0 | 104,7 | 1,94 |
| 7 | 5,0 | 3,0 | 1,5 | 4,8 | 0,5 | 22,1 | 4,5 | 6,4 | 5,5 | 102,0 | 2,06 |
| 8 | 3,2 | 3,1 | 2,5 | 3,2 | 1,0 | 5,9 | 2,2 | 3,2 | 1,7 | 52,5 | 0,32 |
| 9 | 3,0 | 2,4 | 2,0 | 2,9 | 1,5 | 6,0 | 1,7 | 4,2 | 1,5 | 49,7 | 1,32 |
| 10 | 3,6 | 2,5 | 5,0 | 3,2 | 1,0 | 12,0 | 1,4 | 5,7 | 3,2 | 91,0 | 1,99 |
| 11 | 3,5 | 3,0 | 2,0 | 3,3 | 0,5 | 12,5 | 2,7 | 4,4 | 2,5 | 70,3 | 1,85 |
| 12 | 12,3 | 10,5 | 20,0 | 12,0 | 0,8 | 31,0 | 10,4 | 14,1 | 8,3 | 67,8 | 0,49 |
| 13 | 3,7 | 3,5 | 4,0 | 3,6 | 0,3 | 6,6 | 3,2 | 4,2 | 2,1 | 57,3 | 0,78 |
| 14 | 7,1 | 5,3 | 2,0 | 6,3 | 0,5 | 36,1 | 5,2 | 9,1 | 7,0 | 98,3 | 2,01 |

a legkisebb a relatív szórás. A bauxit vastagsága tehát rendkívül egyenletes. Ezt az értékelést az azóta e térségben befejezett bányászati kitermelés is megerősítette. Összességében megállapítható, hogy a bauxittestek vastagsága az összleténél lényegesen változékonyabb, ami értékes információ a felhalmozódás körülményeinek vizsgálatában.

A részterületátlagok arra mutatnak, hogy van összefüggés a teljes bauxitösszlet és a szorosan vett bauxit vastagsága között. Ennek tisztázására korrelációs diagramot szerkesztettem az összletvastagság és a bauxitvastagság között a részterületátlagokra. Az összefüggés egyértelmű, de nem lineáris. Elsősorban ott érvényesül, ahol az átlagos bauxitvastagság a 4 métert meghaladja. Az ennél vékonyabb részterületeken viszont ez az összefüggés nem jelenik meg (9. ábra).

Azt is megvizsgáltam, hogy van-e kapcsolat a részterületek átlagos bauxitvastagsága és szórása között. A 10. ábrán bemutatott korrelációs diagram egyértelmű összefüggést jelez, nem lineáris jelleggel, ami legjobban egy logaritmusfüggvénnyel modellezhető.

A már említett mérethatás miatt az is megvizsgáltam, hogy van-e összefüggés egy-egy részterületen belül az összletvastagság és a bauxitvastagság között, a fúrások szintjén? Azt találtam, hogy az összefüggés igen laza, de kiegyenlítő görbék segítségével felismerhető. A 11. ábrán egy vastag, egy közepes és egy vékony átlagos vastagságú részterület fúrásainak korrelációs diagramja látható. Jól látszik, hogy az összefüggés a nagyobb vastagságú részterületen belül a legszorosabb, a kis vastagságún a leglazább és egyetlen részterületen sem lineáris.

A bauxitvastagság térbeli változékonyságát még ennél is jobban jellemzi a variogramokból nyerhető *hatástávolság* (12. ábra). Az ábrán a hatástávolságok mellett a számításba vett fúrások számát is feltüntettem, mert a variogramok megbízhatósága a fúrások számával erősen növekszik. Összesen 506 fúrás került így számításba. Minél rövidebb a hatástávolság, annál nagyobb mértékű a bauxitvastagság térbeli változékonysága. A medersávokat szegélyező peremi sávokban a legnagyobb a hatástávolság: 34–65 m, a medersávokban csak 27–30 m. Még ennél is rövidebb a keleti mezőé, ahol ez csak 23 méter. Ne feledjük, hogy ezek a részterületek bauxitvastagságára vonatkozó *átlagértékek*. A helyi hatástávolságok ezektől lényegesen eltérhetnek. A jelenleg folyó bányászati műveletek és termelési kutatások eredményei is ezt igazolták. Tapasztalataim szerint a magyarországi bauxittelepekben a bauxitvastagság hatástávolsága többnyire 50–100 méter. A vastagsághoz képest nagy skaláris szórás és a rövid hatástávolságok alapján a halimbai előfordulás vastagság tekintetében a legváltozékonyabb magyarországi bauxitelőfordulásnak tekinthető.

A variogramokból számított hatástávolságok pontosságát a *bauxittestek körvonalának változékonysága* is befolyásolja. Minél szabálytalanabb, kacskaringósabb a körvonal, annál nagyobb a hiba lehetősége. Halimbán a legváltozékonyabb a keleti fő bauxittest körvonala (7. részterület). Ez így csak empirikus vélemény, amit számszerűsíteni is lehet, ha megmérjük a bauxittest alapterületét, majd kiszámítjuk az e területtel megegyező négyzet kerületét. Ha ezt elosztjuk a bauxittest tényleges körvonalával, akkor egy viszonyszámot kapunk, amely annál kisebb, minél nagyobb az adott bauxittest körvonalának változékonysága.

A bauxitösszlethez hasonlóan a részterület vastagságátlagok bizonytalanságát is meghatároztam 95%-os konfidenciaszintre számított konfidencia-intervallummal (2. táblázat). Az egyes részterületek konfidencia-intervallumai nem különböznek érdemlegesen a 12. részterület kivételével, ahol a viszonylag sok fúrás ellenére nagy a konfidencia-intervallum. Ez az itteni bauxitvastagság nagy változékonyságának következménye.

A fejezetben elmondottakból kiderült, hogy milyen fontos a *mérethatás* figyelembevétele. A jelen esetben a legmagasabb egység egy-egy bauxittest volt. Szükség esetén ezt osztottuk fel részterületekre. A következő lépés volt a részterületek vizsgálata a fúrások szintjén. Végül az egyes fúrásokon belül megfigyelhető változások értékelése következett. A soron következő fejezetekben is ebben a sorrendben végezzük a kapott eredmények bemutatását.

## Tektonikai felépítés

A halimbai bauxit-előfordulásról készült kéziratos kutatási jelentések mindegyike tartalmaz tektonikai fejezetet. Egységesen azt a véleményt képviselik, hogy az előfordulás területét alapvetően töréses tektonika jellemzi. Sűrűn egymásra következő, sakktáblaszerűen elhelyezkedő vetők rendszerét tételezték fel, melyek csapásiránya ÉK–DNy, ill. ÉNy–DK. Ezt a feltételezést finomította Erdélyi M. (1965), aki abból indult ki, hogy a középső-eocén összlet bázisa egy közel vízszintes abráziós térszín lehetett. E felszínhez viszonyította az ennél fiatalabb tektonikai elmozdulásokat. Tektonikai értékelésemnél magam is ehhez hasonló kiinduló feltevést követtem azzal a pontosítással, hogy ez a térszín délkelet felé enyhén emelkedett. Ezen az alapon egy egész sor ősföldrajzi-tektonikai szelvényt szerkesztettem. Ezek a szelvények igen jól jelzik az eocénnél idősebb tektonikai elmozdulásokat. Így derült fény arra, hogy a kréta végén az egész felső-kréta összlet a bauxitösszlettel együtt északnyugati irányban dőlt kb. 5–10 fok alatt. Erdélyi M. a fent említett fő irányok mellett még néhány K–Ny, ill. É–D irányú törésvonalat is feltételezett. Szerinte a triász feküképződményeket az ausztriai fázisban érték töréses elmozdulások.

Az egész előfordulás kétségtelenül legfontosabb törésvonala az, amely azt északon lezárja (2. ábra). MÉSZÁROS (1982) ismerte fel azt, hogy e NyÉNy–KDK csapású törésvonal mentén kb. 2 km-es „jobb oldali" vízszintes eltolódás történt. Az elmozdulás kora MÉSZÁROS szerint az eocénnél fiatalabb, mert az elmozdulásban eocén és alsó-badeni képződmények is résztvettek. Később (intra-szarmatára pontosította az elmozdulás korát (MÉSZÁROS 1983). MÁTÉFI (2002) szerint Padragkúttól délkeletre megtalálhatók az elvonszolódott triász korú képződmények a bauxitösszlettel együtt (lásd 1. ábráját).

A fenti fő törésvonallal közel párhuzamos az a törés, amely az előfordulás északi és déli részét választja el egymástól, és amely mentén véleményem szerint 200–300 méteres szintén „jobb oldali" elmozdulás történt (2. ábra). Ez a törésvonal véleményem szerint a fentinél idősebb, mert az eocén fedőrétegekben ez az elmozdulás nem mutatható ki. Az új kutatások e törésvonaltól kiindulva egy déli irányban haladó törésvonalat is kimutattak, amely egészen a cseresi bauxittestig terjed. E vonal mentén érintkezik a Dachsteini Mészkő a Kösseni Mészkővel. Feltehetően egy idős, többszörösen megújult tektonikai vonalról van szó, mert lefutása egybeesik a nyugati és a keleti bauxittesteket elválasztó bauxitos agyag vonulattal (lásd a 13. ábrát), tehát egy ősföldrajzi határt jelent.

A bányászati kutatások és feltárások alapján az előfordulás nyugati oldalán egy ÉK–DNy irányú tektonikai vonal húzódik (3. ábra). Valószínű, hogy az új-kimmériai orogén fázis során jött létre. MÁTÉFI (2002) szerint az ausztriai orogén fázis hozta létre. A larámi orogén fázis során ez a feltolódásként értelmezett törésvonal megújult és a törésvonal mentén tértágulás következett be. Ezt a több méter vastag zónát bauxit és bauxitos agyagból álló törmelék tölti ki (vetőbreccsa). A törési zónát ÉNy–DK irányú haránttörések szelik át, amelyek mentén 10–40 méteres oldalirányú elmozdulások történtek. Jól szemlélteti ezt PATAKI et al. (2002) 1. ábrája. Valószínűleg a pireneusi fázis során jöttek létre, mert ezek mentén az eocén rétegek is elmozdultak. Nem zárható ki, hogy az elmozdulások a miocénben is folytatódtak (szávai fázis). A feltolódás mentén 50–200 m szélességben a Dachsteini Mészkő dolomitosodott. A feltolódás nyugati oldalán a Fődolomit Formáció, északon a Kösseni Formáció található (3. ábra). Valószínűnek tartom, hogy az előfordulás korábbiakban már említett ÉÉK–DDNy csapású „völgyeinek" kialakulása is ezzel a fő tektonikus vonallal függ össze.

A bányászati feltárások során a fentieken kívül számos kisebb — 2–5 méteres — vetőt észleltek, mind az északi, mind a déli területen. Lokális szerepük miatt nem foglalkozom velük.

A részletes fúrásos kutatás és a bányászati feltárások során több helyen kerek, vagy ovális alaprajzú, kútszerű beszakadásokat mutattak ki, melyeket 50–150 méter vastag felső-kréta rétegek töltenek ki. A fúrások többségében e „kutak" aljáról hiányzott a bauxit. Helyüket a 4. ábrán tüntettem fel. MÉSZÁROS (1981) a larámi orogén fázis tértágulásos elmozdulásaival hozta ezeket kapcsolatba. A beszakadások 40–80 méter átmérőjűek és a bányászati feltárások szerint közel függőleges falúak. Az eocén fedőrétegek települése e beszakadások felett zavartalan, tehát a beszakadás után ülepedtek le. A kutak kerek és ovális alaprajza nehezen egyeztethető össze tektonikai beszakadással. Ezért lehetséges, hogy törésvonalak kereszteződésében jöttek létre. Közismert, hogy az ilyen tektonikusan meggyengített helyeken a karbonátos kőzetek jóval könnyebben oldódnak, mint egyebütt. Lehetséges, hogy ezeken a meggyengült, részben kioldott helyeken a kőzetek beszakadtak és így jöttek létre ezek a kútszerű formák. A kérdést mindenesetre még nem tartom lezártnak.

## A bauxitösszlet szedimentológiai felépítése

A szorosan vett bauxit gazdasági jelentősége miatt a korábbi kiértékelések erre a képződményre összpontosultak. Mostani kiértékelésemet a bauxitösszlet egészének felépítésére terjesztettem ki, mert véleményem szerint ezáltal a bauxitképződés megismeréséhez értékes új információkat nyerhetünk.

A fúrónaplók és rendszeres bányabeli megfigyeléseim szerint a bauxitösszlet több, kőzettanilag jól megkülönböztethető *rétegből* áll. A réteghatárok többnyire elmosódottak, de szabadszemmel felismerhetők. Maga a bauxit is több helyen enyhén rétegzett. Ugyanakkor a karbonáttörmelékes rétegek túlnyomóan éles határral érintkeznek a normális bauxitfajtákkal. A felszíni magfúrások igen alapos földtani leírásaiban is rétegeket különböztettek meg a helyi geológusok. A rétegek kőzettani összetétel tekintetében érdemben különböznek egymástól. Számuk az üledékfelhalmozódás változékonyságát fejezi ki, ezért az összes fúrást e szempontból is kiértékeltem. Az egyes részterületekre eső igen eltérő számú fúrás miatt a darabszámokat százalékokra is átszámoltam.

Mind az északi, mind a déli területen a részterületek zömében a *rétegek számának eloszlása* a normál eloszláshoz áll közel, enyhe jobboldali aszimmetriával. A részletesebben feldolgozott déli területen a bauxittestek területén leggyakrabban (52,7%) 3–5 rétegből áll az összlet. Ezt követi a 6–10 rétegből álló összlet (31,0%). Két rétegből 8,1%, egyetlen rétegből csupán 4,7% áll. Az utóbbiak az előfordulás déli és délnyugati részén találhatók, ahol az összlet 4–5 méterre vékonyodik ki (3. táblázat).

Itt jegyzem meg, hogy a táblázat adatai az 1. és 15. részterület kivételével csak a bauxittestek fúrásaira vonatkoznak. A maximális rétegszám többnyire 7–8 réteg. Ennél több — 11–18 réteg — csak a nyugati bauxittest területén található. Ennek nyugati szélén — mint említettem — nem ismerjük a bauxitösszlet felépítését a feküig, de

*3. táblázat.* Rétegek száma a fúrásokban a halimbai előfordulás déli részterületein

| Részterület száma | | A rétegek száma a fúrásban (összletre) | | | | | | | | | | | | | | | | | A fúrások száma (db) | Ebből bauxitrétegek | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | | 12 | 12 | 5 | 2 | – | – | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 32 | 4 | – | – | – | – | – |
| 2 | | – | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 11 | 10 | – | 1 | – | – | – |
| 3 | | – | 4 | 6 | 6 | 3 | 4 | 3 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 26 | 18 | 8 | – | – | – | – |
| 4 | | – | 4 | 10 | 6 | 8 | 4 | – | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 33 | 25 | 8 | – | – | – | – |
| 5 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 22 | 15 | 7 | – | – | – | – |
| 6 | | – | 3 | 8 | 11 | 6 | 3 | 2 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 33 | 31 | 2 | – | – | – | – |
| 7 | | – | 1 | 21 | 40 | 30 | 19 | 13 | 8 | – | 1 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | 134 | 117 | 15 | 2 | – | – | – |
| 8 | | – | 1 | 1 | 5 | 6 | – | 1 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 15 | 14 | 1 | – | – | – | – |
| 9 | | – | 1 | – | 4 | 2 | 1 | – | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 9 | 7 | 2 | – | – | – | – |
| 10 | | – | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | – | – | 2 | 1 | – | – | – | – | – | – | – | – | 12 | 9 | 3 | – | – | – | – |
| 11 | | – | – | 1 | 8 | 10 | 4 | 6 | 2 | 1 | | 2 | – | – | – | – | – | – | – | 34 | 24 | 9 | 1 | – | – | – |
| 12 | | – | – | 7 | 9 | 7 | 13 | 13 | 6 | 6 | 6 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 79 | 28 | 30 | 17 | 1 | 3 | – |
| 14 | | – | – | 4 | 6 | 7 | 8 | 7 | 5 | 6 | 4 | 1 | 1 | – | 1 | – | – | – | – | 50 | 29 | 15 | 4 | 2 | – | – |
| 28 | | 10 | 11 | – | 7 | – | – | – | – | – | – | – | | – | – | – | – | – | – | 28 | – | – | – | – | – | – |
| ? | db | 24 | 42 | 72 | 116 | 86 | 62 | 47 | 24 | 15 | 12 | 7 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | – | 2 | 518 | 331 | 100 | – | – | – | – |
| | % | 4,7 | 8,1 | 13,8 | 22,1 | 16,8 | 12,9 | 9,1 | 4,6 | 2,9 | 2,3 | 1,4 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | | 0,4 | | 71,6 | 21,6 | 5,6 | 0,6 | 0,6 | – |

a fácieseloszlás alapján feltételezem, hogy itt található a legtöbb réteg. Tehát a déli területnek a nyugati részén a legnagyobb a rétegek száma, egyértelműen a karbonáttörmelékes közbetelepülések miatt. Az északi területen a fentiekhez hasonló a rétegeloszlás.

A déli területen azt is megvizsgáltam, hogy a szorosan vett bauxit hány réteget alkot egy-egy fúrásban (3. táblázat). A bauxit a fúrások 71,6%-ában egyetlen réteget, a fúrások 21,6%-ában két réteget alkot. Három réteg már csak a fúrások 5,6%-ában, négy és öt pedig csak 0,6%-ban fordult elő, kizárólag ott, ahol karbonáttörmelékes közbetelepülések választják el őket, elsősorban a nyugati bauxittest területén. Egy korábbi, az egész előfordulásra kiterjedő értékelésünk a fentiekkel közel azonos eredményeket adott (BÁRDOSSY et al. 1998a, b). Mindebből az következik, hogy a bauxit nagyobb része egyetlen, fő behordási időszak alatt érkezett a Halimbai-medencébe. Ezt a bauxitfelhalmozódást a déli terület nyugati részén többször megszakította a délnyugat felől érkező karbonátos kőzettörmelék. Kisebb méretű bauxitbehordások ez előtt és után is történtek (lásd a genetikai fejezetet).

Az északi területen hasonló eloszlást észleltem. Itt is messze leggyakoribb az egyetlen bauxitréteg (74%), amit két réteg követ (22%). Három réteg 5%-ban, négy és öt réteg kevesebb mint 1%-ban fordul elő. Mindez megerősíti fentiekben leírt feltevéseimet.

## A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete

A korábbi tanulmányok szerzői elsősorban a szorosan vett bauxit kőzettani felépítését vizsgálták. Tanulmányomban a bauxitösszlet egészének kőzettani felépítését próbáltam meghatározni és az esetleges szabályszerűségeket felismerni. Eddigi tanulmányaim alapján a bauxitösszletben az alábbi kőzetfajtákat különböztettem meg:

1. Szorosan vett bauxit 9,9%-nál kevesebb $SiO_2$-tartalommal ($Al_2O_3$ >46%, a karbonátásványok mennyisége <10%).

2. Agyagos bauxit 10–19,9% $SiO_2$-tartalommal.

3. Bauxitos agyag 20%-nál nagyobb $SiO_2$-tartalommal.

4. Vörös agyag (bauxitásványokat nem tartalmaz, modulus <0,85).

5. Mészkő- és dolomittörmelékes bauxit, agyagos bauxit (karbonátásványok 10–50%).

6. Mészkő- és dolomit-konglobreccsa (karbonátos kőzetek >50%).

7. Bauxitos kötőanyagú mészkő- és dolomitaleurolit (karbonátásványok >50%, a karbonátos törmelék szemnagysága 2 mm-nél kisebb)

8. >10% másodlagos kalcitot tartalmazó bauxit és agyagos bauxit.

9. Szürke, pirites-markazitos bauxit, agyagos bauxit és bauxitos agyag (S > 0,6%).

Ezek a kőzetfajták megfigyeléseim szerint a bauxitösszletben önálló rétegeket alkotnak. Ezt a tényt az első négy kőzetfajta esetében az egymaximumos gyakorisági hisztogrammok bizonyítják. A fő kémiai komponensek egy rétegen belül közel szimmetrikus, egymaximumos eloszlásúak, ami a rétegek tényleges jelenlétét bizonyítja.

A kőzetfajták térbeli elterjedését a déli területrészen a 13. ábrán mutatom be. Az összefüggések felismerése érdekében feltüntettem a bauxittestek körvonalát és a karbonáttörmelékes kőzetek elterjedésének határát. A bauxittestek körvonala igen kacskaringós, mély beöblösödések és ívelt kiágazások tarkítják. Az utóbbiak különösen az előfordulás északi részén gyakoriak. Egykori patakmedrekként értelmezem őket, melyeket bauxithordalék töltött fel. A déli területen a három fő bauxittesttől nyugatra, délre és keletre 50–300 m szélességben kizárólag bauxitos agyagból áll az összlet. A nyugati oldalon karbonáttörmelékes kőzetekkel váltakozik, sőt itt egyes fúrásokban kizárólag karbonáttörmelékes kőzetekből áll.

A halimbai előforduláson a bauxitos agyag kiterjedése a legnagyobb és többnyire ez a kőzetfajta adja az előfordulás körvonalát. Az előfordulás déli és délnyugati szélén a bauxitos agyag közé vörösagyag is települt. Egy további, bauxitos agyagból és agyagos bauxitból álló sáv húzódik a cseresi bauxittest közepétől észak felé mintegy 400 m hosszan és 50–100 m szélességben, egészen a fő törésvonalig (13. ábra). Úgy tűnik, hogy ennek a sávnak komoly paleomorfológiai szerepe lehetett, amennyiben elválasztotta egymástól a nyugati és a keleti bauxitfelhalmozódásokat. E sáv tengelyében egy idősebb törésvonal húzódik, amelyről a tektonikai fejezetben már említést tettem.

A nyugati bauxittest nyugati határán túl azonnal bauxitos agyag következik. Ez szembetűnő különbség az előfordulás többi részéhez képest, ahol agyagos bauxiton keresztül érjük el a bauxitos agyagot. A bauxittestek területén belül is található több-kevesebb agyagos bauxit és bauxitos agyag, elsősorban a bauxit alatt.

A bauxittesteken belül térben jól elkülönül a 4%-nál kevesebb, ill. több $SiO_2$-ot tartalmazó bauxit. A kovasavban szegényebb bauxitfajta elsősorban a Cseres és a nyugati bauxittest mederkifejlődésű részein halmozódott fel (13. ábra ). A keleti bauxittestben két elkülönült, szabálytalan körvonalú sávban dúsult a kovasavszegény, igen jóminőségű bauxit. Ezeket választja el, ill. szegélyezi a kovasavban dúsabb bauxit. Figyelemre méltó, hogy a 4%-nál kisebb $SiO_2$-tartalmú bauxit helyenként 10 méternél vastagabb. Legnagyobb kiterjedésben a nyugati bauxittest mederfáciesű sávjában található. Ezen kívül csak néhány kisebb foltra korlátozódik a Cseres mederfáciesében és a keleti bauxittestben (13. ábra).

A nagyszámú fúrás alapján a fenti kép eléggé megbízhatónak látszik, hiszen majdnem mindenütt hatástávolságon belül vannak a szomszédos fúrások. A képet a jóval részletesebb bányabeli kutatás is igazolta, azzal az eltéréssel, hogy az egymástól 5–5 méterre végzett fúrásokban még nagyobb az egyes bauxitfajták térbeli változékonysága. Az a véleményem tehát, hogy a halimbai bauxitösszletben nem véletlenszerű az egyes bauxitos kőzetfajták térbeli eloszlása, hanem a felhalmozódás eltérő fácieseit tükrözi. Azt sem tartom kizártnak, hogy ahol kedvező volt a vízelvezetés, ott a kovasavtalanodás a bauxit felhalmozódása után is folytatódott.

A fenti általános szabályszerűségek felismerése arra ösztönzött, hogy a bauxitösszlet kőzetfajtáinak fúrásonkénti elterjedését és vastagságát számszerűen is kiértékeljem. Ennek érdekében az előbbiekben felsorolt 9 kőzetfajtát három genetikai csoportba soroltam:

1. csoport. A kőzetfajták anyaga túlnyomóan laterites mállásból származik rövid távolságú vízi szállítás és leülepedés révén (bauxit, agyagos bauxit, bauxitos agyag, vörösagyag).

2. csoport. A kőzetfajták mészkő- és dolomittörmelékes behordásából származnak, több-kevesebb bauxitos alapanyaggal.

3. csoport. Másodlagos folyamatok révén létrejött, módosult összetételű kőzetanyag (szürke pirites bauxit, kalcitkiválásos bauxit).

A kilenc kőzetfajta vastagságát minden egyes fúrásban meghatároztam a fúrónaplók és a vegyelemzések egybevetésével. Az eredményeket a déli terület részterületeire külön-külön összesítettem (4. táblázat). A nyugati bauxittest nyugati szélső részterületét (13. részterület) ki kellett hagynom az értékelésből, mert mint már említettem, itt a legtöbb fúrás nem érte el a triász–alsó-liász korú feküt.

Meglepően szabályszerű kép alakult ki, amit a következőkben mutatok be. A laterites eredetű kőzetfajták aránya a terület keleti részén a legnagyobb, eléri a 95–99%-ot (14. ábra). Valamivel kisebb ez az arány a cseresi és a középső részterületeken (84–95%), a cseresi bauxittest nyugati szélén már 85%-ra csökkent. Hirtelen és erőteljes csökkenés figyelhető meg a nyugati bauxittest középső és északi részterületén (55–57%). A nyugati részterületen a rétegsor ismert része alapján legfeljebb 35–40% bauxitos részarányt tételezek fel.

Még figyelemre méltóbb e kőzetcsoporton belül a szorosan vett bauxit részarányának területi eloszlása, amit a 14. ábrán ugyancsak feltüntettem. Ez az arány a cseresi bauxittest keleti részterületén a legkisebb: 23%. Nyugat felé haladva fokozatosan nő 30, 39, majd 45%-ra. Az északabbi bauxittesteknél más a helyzet: középen a legkisebb a bauxit aránya (24–27%). A nyugati bauxittest északi részterületén 36%, a középső meder sávban pedig 38% annak ellenére, hogy a bauxitos kőzetcsoport összesített aránya itt már erősen lecsökkent. Egyértelmű szabályszerűségről van itt szó. A fúrások nagy száma miatt az eredmény megbízhatónak tekinthető.

A szőci előfordulás genetikai kiértékelése során tapasztaltam, hogy a folyóvízi behordás során térben elvált egymástól a bauxit, agyagos bauxit és bauxitos agyag. A kolloid oldatok és iszapok formájában szállított bauxi-

*4. táblázat.* Kőzetfajták részaránya a halimbai bauxitelőfordulás déli részterületein

| Részterület száma | Kőzetfajták részaránya | | | | | | | | | | Átlagos vastagság | | Fúrások száma (db) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | bauxit | agyagos bauxit | bauxitos agyag | vörös agyag | karb. törm. bauxit | konglo-breccsa | karb. alemolit | kalcitos bauxit | szürke bauxit felül | szürke bauxit alul | összlet (m) | bauxit (m) | |
| 1 | 3,6 | 17,3 | 63,7 | 4,0 | 2,4 | 1,5 | - | - | 7,5 | - | 5,3 | 1,5 | 32 |
| 2 | 23,1 | 24,5 | 51,8 | - | - | - | - | - | 0,1 | - | 14,9 | 3,4 | 11 |
| 3 | 30,3 | 19,4 | 46,5 | - | 1,1 | - | - | - | 2,7 | - | 17,2 | 5,2 | 26 |
| 4 | 39,0 | 29,4 | 20,2 | - | 1,0 | 7,9 | - | - | 2,6 | - | 15,2 | 5,9 | 33 |
| 5 | 45,4 | 26,5 | 14,3 | - | 2,9 | 7,5 | - | 1,0 | 2,5 | - | 9,4 | 4,3 | 22 |
| 6 | 33,1 | 37,2 | 25,0 | - | - | 0,5 | - | 0,2 | 4,0 | - | 11,4 | 3,8 | 33 |
| 7 | 25,5 | 48,4 | 15,2 | 0,1 | 0,2 | 1,7 | 0,5 | 1,9 | 6,5 | - | 21,1 | 5,4 | 134 |
| 8 | 24,1 | 30,2 | 40,2 | - | 1,0 | 2,1 | - | 0,5 | 1,8 | - | 12,6 | 3,0 | 15 |
| 9 | 27,1 | 34,7 | 33,7 | - | - | - | - | - | 4,4 | - | 15,7 | 4,3 | 9 |
| 10 | 25,4 | 48,2 | 10,2 | - | 6,5 | 4,3 | 0,6 | - | 4,7 | - | 14,8 | 3,8 | 12 |
| 11 | 23,3 | 41,9 | 18,4 | - | 1,2 | 11,0 | 0,5 | 0,2 | 3,5 | - | 17,2 | 4,0 | 34 |
| 12 | 37,7 | 12,3 | 4,8 | - | 7,7 | 28,8 | 8,3 | - | 0,4 | - | 37,4 | 14,1 | 79 |
| 14 | 36,2 | 10,3 | 10,6 | - | 16,2 | 11,8 | 10,9 | - | 0,2 | 3,9 | 21,7 | 7,8 | 50 |
| 28 | - | 0,2 | 60,4 | 13,9 | 0,4 | 6,9 | - | - | 18,2 | - | 4,4 | - | 28 |

13. részterületet nem számoltam, mert a feküt többnyire nem érték el. 1. és 15. részterület az egész összletre vonatkozik, a többi részterület csak a bauxittestre vonatkozik.

tos agyag többnyire a nyugodtabb, lassabb szállítási ökvekben dúsult fel. A törmelékesebb jellegű, kevésbé szétaprózódó, szorosan vett bauxit ezzel szemben a gyorsabb szállítási ökvekben, a mederfáciesben dúsult. Az agyagos bauxit e két szállítási mód közötti helyzetet foglal el. Ezt vélem felfedezni a 13. ábrán látható eloszlás esetében is.

Ha csak az agyagos bauxit és a bauxitos agyag részarányát vizsgáljuk, úgy az tűnik fel, hogy a bauxitos agyag részaránya egy a terület közepén át húzódó, DK–ÉNy irányú sávban a legnagyobb. Ezen belül délkelet felől északnyugat felé haladva fokozatosan csökken: 52–46, 40–24 és végül 10%-ra (14. ábra). Ettől északkeletre csak 15–25% a bauxitos agyag részaránya. A nyugati oldalon levő részterületeken is csak 11–20% részarányú bauxitos agyag található. Véleményem szerint ez is az üledékfáciesek által meghatározott eloszlás. Az agyagos bauxit részaránya a legszabálytalanabb, 10-től 48%-ig terjed, egyértelmű területi szabályszerűség nélkül.

Említést érdemel, hogy a Halimba II. területen csak egyetlen fúrásban (Halimba H–2592, 3,0 m) észleltem a bauxitösszleten belül bauxitásványokat nem tartalmazó vörösagyagot. A vörösagyag elsősorban az előfordulás délnyugati szélén levő 28. részterületen dúsul, ahol 10 fúrásban fordult elő önállóan, vagy bauxitos agyag kíséretében. Az előfordulás DK-i szélét képező első részterületen két fúrásban mutattak ki vörösagyagot, ugyancsak bauxitos agyag kíséretében. Mindez arra utal, hogy a halimbai előfordulás felhalmozódásában a vörösagyagnak igen alárendelt szerepe volt. Emlékeztetni szeretnék arra, hogy a típusos lateritbauxit-szelvények alján gyakran fordul elő kaolinos agyag. Ezért jelenléte a halimbai bauxitelőfordulásban egyáltalában nem tekinthető rendkívülinek.

A második nagy kőzetcsoportot, *a karbonáttörmelékes kőzetfajtákat* a hazai litosztratigráfiai beosztás a „Halimbai Bauxit Formáció Cseresi Konglobreccsa Tagozatának" tekinti. E kőzetcsoport különböző szemnagyságú karbonátos kőzettörmelékből áll az aleurolittól a konglobreccsáig. A szemcsék gyengén, vagy közepesen koptatottak. Kötöttsége is igen változó. Figyelemre méltó, hogy kizárólag karbonátos kőzetdarabokból áll, sem kvarcot, sem szilikátos kőzetek törmelékét nem találtam bennük. A kőzet alapanyaga agyagos, bauxitos. Az alapanyag részaránya többnyire lefelé csökken.

A kőzetcsoport térbeli eloszlása jól felismerhető szabályszerűségeket mutat (15. ábra). A három kőzetfajta a cseresi bauxittest keleti szélén egyáltalában nem fordult elő, a szomszédos szegélyövben pedig csak 1% a részarányuk. A meder sávban 9%-ra, a nyugati peremen viszont 11%-ra nőtt az arány. A kelet–nyugati irányú növekedés tehát egyértelmű. Földtani szelvényeim szerint ezek vékony közbetelepülések az összlet alsó felében.

Hasonló az eloszlás alakulása ettől északra. Az itteni keleti peremen 0,5% a karbonátos törmelék részaránya. A keleti fő telepben ez 3%-ra nő és ugyanennyit észleltem a középső terület déli részén is. Az északi lencsén — 10. részterület — már 12%-ot ér el a kőzetcsoport. A nyugati bauxittest keleti részterületén ez az arány 12,5%-ra nő. Ezután újabb erőteljes növekedés következik: az északi részterületen 39%-ot ér el, a medersávban pedig 45% a részaránya. Végül a nyugati részterületen becslésem szerint meghaladja a 60%-ot. E karbonáttörmelékes rétegek vastagsága fél métertől 10 méterig terjed. Jellegzetességük a vastagság gyors megváltozása a szomszédos fúrásokban.

Korábban a karbonáttörmelékes kőzetfajták elterjedését teljesen szeszélyesnak tartották, minden szabályszerűség nélkül. Egy korábbi dolgozatunkban (BÁRDOSSY et al. 1998a, b) az összes halimbai kutatófúrás kiértékelése alapján megállapítottuk, hogy délnyugaton az egész karsztos-eróziós völgyre kiterjednek, de a cseresi bauxittestre ez a nagyarányú behordás nem terjedt ki (lásd a 13. ábrát). Észak felé haladva viszont egyre

keskenyebb, kanyargós szalagokká szűkülnek a rétegek, melyeket egykori patakmedrek kitöltéseként értelmeztünk. Tovább haladva északkelet felé egyre kisebb izolált foltokban jelennek meg a karbonáttörmelékes kőzetek. Ezt az értékelésünket az azóta lemélyített fúrások és bányabeli kutatások teljes mértékben megerősítették.

A karbonáttörmelékes kőzetcsoporton belül is figyelemre méltó szabályszerűség ismerhető fel: A konglobreccsa aránya a délnyugati és nyugati szélső részterületeken a legnagyobb és észak felé haladva csökken (15. ábra). Helyét a karbonátaleurolit foglalja el. A mészkő- és dolomittörmelékes bauxit legnagyobb mennyiségben a nyugati bauxittest középső, nyugati és északi részterületein fordul elő. Mindez megerősíti azt a feltevésemet, hogy a mészkő és dolomittörmelékes kőzetanyag délnyugat felől hordódott be az előfordulás területére, és ezen belül is elsősorban a nyugati nagy karsztos-eróziós völgybe. Ez a tendencia a halimbai előfordulás északi részén is folytatódik, annak nyugati részterületein. Itt már a karbonáttörmelékes aleurolit a leggyakoribb. A nagyobb felületre kiterjedő rétegek egyre inkább keskeny, hosszan elnyúlt völgykitöltésekbe mennek át.

A három karbonáttörmelékes kőzetfajta alapanyaga bauxitból, agyagos bauxitból és bauxitos agyagból áll. A korábbi években ezek anyagát is megelemezték, így lehetőségem nyílt ezeket is kiértékelni. Mivel a különbségeket a vegyi összetétel fejezi ki legjobban, ezért a kémiai fejezetben mutatom be az értékelés eredményeit.

Mivel a karbonáttörmelékes kőzetfajták együttes aránya a bauxitösszletben igen eltérő, külön is megvizsgáltam a laterites eredetű kőzetcsoportot úgy hogy összegét 100%-ra vettem. Ennek az értékelésnek az eredményei láthatók a 16. ábrán. Igen jól kirajzolódik a korábbiakban említett középső, agyagos sáv, mely főként bauxitos agyagból áll, kevesebb agyagos bauxit kíséretében, elválasztva egymástól a déli terület nyugati és keleti részét. Egy lapos térszíni kiemelkedés lehetett ez, ahova a szorosan vett bauxit behordása nem terjedt ki. Hasonló módon bauxitos agyag veszi körül a déli terület többi bauxittestét is.

A fent említett középső sáv nyugati oldalán kíséri a szorosan vett bauxitot a legtöbb bauxitos agyag és agyagos bauxit. A bauxitos agyag részaránya délkelet felől északnyugat felé haladva fokozatosan csökken 53%-ról 48%, 43%, 35% és végül 12%-ra. Ezzel párhuzamosan nő az agyagos bauxit részaránya 20%, 32%, 36% és végül 58%-ra (16. ábra).

A két, másodlagos folyamatok révén létrejött kőzetfajta érthető módon az előző két csoporttól teljesen eltérő elterjedésű (4. táblázat). A másodlagos kalcitot tartalmazó bauxit, fúrásonkénti kiértékelésem szerint, a keleti főtelepben a leggyakoribb, ahol a bauxitösszlet 1,9%-át teszi ki. Mindig a szorosan vett bauxit felett foglal helyet és lefelé a másodlagos kalcittartalom csökkenésével fokozatosan megy át a normális bauxitba. Ahol több bauxitréteg fordul elő egymás felett, ott az alsó rétegeket nem fedi kalcitos bauxit. A kalcitos bauxit többnyire 1–2 m vastag. Legnagyobb vastagságban a Halimba H–2494 jelű fúrásban észleltem (3,4 m). A többi részterületen néhány tized százalékot tesz ki a részaránya, vagy egyáltalában nem észleltem. Ugyanakkor számos olyan fúrás van, amelyekben vegyelemzéssel igazoltan megjelenik a másodlagos kalcit, de mennyisége nem éri el a 10%-os értékhatárt.

Jóval elterjedtebb a *szürke pirites-markazitos bauxit*, agyagos bauxit és bauxitos agyag. A szürke bauxit gyakoribb a bauxitösszlet tetején, sokkal korlátozottabb az elterjedése a bauxitösszlet legalján, közvetlenül a fekükőzetek felett. A felső szürke bauxit minden egyes részterületen előfordul, de nem minden fúrásban. Legnagyobb a részaránya az előfordulás délnyugati és délkeleti szélén, ahol átlagosan 18,2%, ill. 7,5%-ot ér el. A bauxittesteken belül a keleti főtelep területén a legtöbb a pirites-markazitos bauxit 6,5%-kal. Átlagos vastagsága 1,8 m. Említést érdemel, hogy az egész halimbai előfordulás területén itt észleltem a legnagyobb vastagságban, a Halimba H–2512 jelű fúrásban (7,9 m). A többi részterületen 2–4% a részaránya, egyedül a nyugati bauxittest északi részén 0,2%. Ahol felső-kréta rétegek fedik a bauxitot ott eddig sehol sem találtak az összlet tetején szürke bauxitot. Az északi részterület túlnyomó részén pedig felső-kréta korú a fedő.

A szürke bauxit átlagos vastagsága a többi részterületen meglepően egységes, 0,7 és 1,0 m között mozog. A maximális vastagság is csak 0,7–3,2 m. A középső területsáv északi bauxittestében a Halimba H–2713 jelű fúrásban 4 méter vörös bauxit alatt 2,3 méter vastag szürke pirites bauxitot harántolt a fúró. Alatta még 13 méter vastag bauxit és agyagos bauxit következett. Ilyen helyzetű szürke bauxitot más fúrásban eddig nem találtunk.

A szürke pirites-markazitos bauxit egyértelműen redukáló környezetben jött létre, elsősorban ott, ahol a bauxitot eocén korú szürke pirites mocsári agyag fedi. Szelvényeim szerint ezek a bauxitösszlet felszínének lapos mélyedéseiben alakultak ki.

A fentiekben említett alsó szürke bauxitot eddig egyedül a nyugati bauxittest északi részén észlelték 9 fúrásban. Részaránya az összleten belül 3,9%, átlagos vastagsága pedig 4,7 m. Legnagyobb vastagságát a Halimba H–2233 jelű fúrásban érte el 14,4 m-el. Az alsó szürke bauxit elterjedését térképi formában részletesen értékeltem. E szerint a szürke bauxit egy ÉK–DNy irányú, az összlet felhalmozódását megelőző törésvonal nyugati, levetett oldalán helyezkedik el, három nem összefüggő kis lencsét alkotva. A bányavágatok e sor délnyugati folytatásában is kimutatták a Halimba H–2355 jelű fúrástól északra. Egy további, kisebb előfordulása a Halimba H–1555 jelű fúrásnál van a bauxittest ÉNy-i szélén. A földtani szelvények és térképek alapján az a véleményem, hogy ide is vörös bauxit érkezett, de a tektonikusan lezökkent térszínen a magas talajvízszint miatt mocsarasodás indult meg, melynek hatására a bauxit redukálódott, piritesedett és markazitosodott. Nem találtam arra utaló jelet, hogy itt elsődlegesen pirites-markazitos bauxit rakódott volna le.

Végül megvizsgáltam azt is, hogy van-e valamiféle szabályszerűség a különböző kőzettani összetételű rétegek egymásutánjában a bauxitösszleten belül. Ezt az ún. *Markov-láncok* módszerével próbáltam felderíteni. Markov-folyamatoknak nevezik azokat a jelenségeket, amelyekben egy tulajdonság megjelenése vagy eltűnése részben a megelőző állapottól, részben pedig véletlen változásoktól függ. A bauxitösszletet a fekütől a fedő felé haladva egy-egy méteres szakaszokra osztottam fel és ezek alapján ún. *„átmenet-gyakorisági mátrixokat"* és *„átmenet-valószínűségi mátrixokat"* szerkesztettem DAVIS (1986) könyvében leírt módszer szerint. E számításhoz nyolc szelvényt választottam ki, összesen 70 produktív fúrással. E szelvényeket a fő szerkezeti egységek tengelyvonalában vettem fel.

A számítások eredményei többféle szabályszerűséget mutattak ki, melyeket a makroszkópos összehasonlítgatás alapján nem lehetett felismerni. Így egyértelművé vált, hogy a szorosan vett bauxitra többnyire agyagos bauxit következik. Továbbá az egyes részterületek átmenet-gyakorisági mátrixai feltűnően hasonlítanak egymásra. Ez alátámasztja azt a véleményemet, hogy az egész halimbai előfordulás közel azonos szedimentológiai környezetben halmozódott fel (folyóvízi-ártéri). Az is igazolt trendnek bizonyult, hogy a déli terület nyugati részén a karbonáttörmelékes rétegekre többnyire közvetlenül települ a szorosan vett bauxit. Maguk a karbonáttörmelékes rétegek sűrűn váltakoznak (konglobreccsa-, karbonátaleurolit-, mészkő- és dolomittörmelékes bauxit), ami a behordás nyugtalan és erősen váltakozó jellegét tükrözi.

A magyarországi és ezen belül a halimbai bauxitösszlet részletes mikroszkópos *szöveti vizsgálatával* elsőnek MINDSZENTY (1983, 1984) foglalkozott. Elsődleges üledékes, korai diagenetikus és késői diagenetikus folyamatokkal magyarázta a különböző szöveti elemek kialakulását. Rámutatott arra, hogy a bauxitszövetek fontos genetikai információkat tartalmaznak. Ezen az alapon magasabban fekvő „vadózus" és mélyebb (talajvíz szintjéhez közeli) „átitatott" (saturated) üledékfácieseket különböztetett meg. Genetikai ábrasorozatán a malom-völgyi előfordulás a vadózus, a Halimbai-medence az átitatott fáciesbe tartozik. Megállapításaival én is egyetértek.

JUHÁSZ (1988) makroszkópos és mikroszkópos vizsgálatokkal megállapította, hogy a bauxitösszlet alulról felfelé durvuló szemcseösszetételű. Folyóvízi üledékképződésre jellemző üledékfácieseket különböztetett meg (mederzátony, hordalékkúp, ártéri, medence, mocsári). Ezek szerinte az összletben önálló rétegeket alkotnak, ami jó összhangban van saját tapasztalataimmal. Saját vizsgálataim szerint a halimbai bauxit *szövete* főként mikrotörmelékes és törmelékes jellegű. Egyes helyeken bauxitkonglomerátum figyelhető meg több centiméteres bauxitkavicsokkal. Gyakoriak az 1–3 mm-es gömbszemcsék, amelyek nem tévesztendők össze a gömbhéjas felépítésű bauxitooidokkal és -pizoidokkal. Egyes helyeken tisztán gömbszemcsékből álló rétegek figyelhetők meg. A tisztán afanitos (pelitomorf) szövetű bauxit viszonylag ritka. (A szövettípusok részletes ismertetését lásd BÁRDOSSY et al. [2000]). A Halimba II. mező új bányászati feltárásai megerősítették ezeket a megállapításainkat, nevezetesen a törmelékes szövetű bauxitfajták túlsúlyát.

BÁRDOSSY et al. (1978) pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal megállapították, hogy a halimbai bauxit uralkodó szemnagysága 0,1–0,3 mm. Csak a másodlagos ásványok szemnagysága nagyobb ennél. Figyelemre méltó, hogy a halimbai bauxit térkitöltése nem különbözik azoktól a karsztbauxitokétól, amelyeket csak vékony fedőréteg borított be, holott a halimbai előfordulás fedőrétegeinek vastagsága az északi részen meghaladja a 300 métert.

A halimbai bauxit uralkodóan rozsdavörös és téglavörös színű, felső részén fehér foltokkal és erekkel. A bauxitos agyag többnyire a bauxitnál világosabb téglaszínű. Ritkábban lila bauxit is előfordul az összlet tetején. A pirites-markazitos bauxit szürke színű. A bauxit közepes keménységű, földes-érdes törésű. Elvétve keményebb, kagylós törésű bauxit is előfordul.

1990-ben a Halimba III. bányamezőben a Halimba H–456 jelű fúrás térségében kb. 30 m vastag jóminőségű vörös bauxit alatt szürke bauxitkavicsos márgát, agyagmárgát és szenes agyagot találtak 2–4 méter vastagságban, a Dachsteini Mészkő egy karsztos mélyedésében. Ez az üledék őslénytani vizsgálatok alapján albai korúnak bizonyult és a Tési Agyagmárga Formációba sorolható (GÓCZÁN et al. 2002). E nagy jelentőségű felfedezés genetikai értékelésével a tanulmány genetikai fejezetében foglalkozom.

## A bauxitösszlet fő és járulékos kémiai komponensei

A halimbai bauxitösszletből a felszíni fúrásos kutatás során vegyelemzés céljából rendszeresen 0,5, ill. 1,0 méteres mélységközökből vettek mintákat. Ritkábban 0,1–0,5 méteres mélységközökből is készültek vegyelemzések. Az elemzések a 90-es évek végéig az egész bauxitösszletre kiterjedtek, ezután azonban takarékossági okokból a mészkő- és dolomit-konglobreccsából, valamint az aleurolitból nem készültek vegyelemzések. Ez kétségkívül megtakarítást jelentett, de ugyanakkor értékes információktól fosztotta meg a kutatókat. A bauxit fő vegyi komponenseit ($Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$, izzítási veszteség) nedves analitikai módszerrel minden egyes mintában meghatározták. 2004 óta a sorozatelemzéseket az $Al_2O_3$ és a $SiO_2$ meghatározására korlátozták neutronaktivációs módszerrel, ami tovább csökkentette a felszíni kutatás geokémiai értékelhetőségét.

Korábban a szorosan vett bauxitból ezen kívül CaO-, MgO-, $CO_2$-, S-, $P_2O_5$- és $MnO_2$-meghatározások is készültek. Korlátozott számban — főleg összevont mintákon — a bauxit nyomelemeit is meghatározták.

A vegyelemzési adatokat a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával számítógépen rögzítettük. Windows XP rendszerű számítógépen az SPSS/15.0 (2006) statisztikai programcsomag segítségével értékeltem ki az adatokat. Több mint 20 000 rekord kiértékelésére került sor, ami több mint 350 000 numerikus adatnak felel meg. Azoknál a mintáknál, amelyek $CO_2$-ot és ként is tartalmaztak megfelelő korrekcióval az izzítási veszteséget $+H_2O$-ra számítottam át, mert csak ezt lehet geokémiailag értékelni. Ellenőrzés céljából az elemzések összegét is kiszámítottam. Csak a 95,0–101,0 közötti összegeket fogadtam el változatlanul, a többieknél igyekeztem a hiba okát felderíteni és kijavítani.

A magyar bauxit geokémiai vizsgálata című monográfiámban (BÁRDOSSY 1961) a halimbai előfordulás cseresi és tormás-kúti részterületeit is kiértékeltem az öt fő vegyi komponensre. A kiértékelés során az egész bauxitösszletet egységesen értékeltem. Az ilyen értékelésnek az a fő előnye, hogy jó áttekintést ad az egész összlet összetételéről. Azóta viszont meggyőződtem arról, hogy a halimbai bauxitösszlet több, egymástól érdemben eltérő összetételű kőzetfajtából épül fel és célszerű ezeket külön-külön kiértékelni. Ezt tettem már a kőzettani fejezetben is, és ezt az elvet követem mostani geokémiai értékelésemben is. JOCHÁNÉ EDELÉNYI (1981) az egész halimbai bauxitösszletet értékelte $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$ és $TiO_2$-ra egy sor számítógépes térképi ábrázolással. MÁTÉFI (2002) a halimbai előfordulás legészakibb, mintegy 400 méter széles sávjában végzett hasonló elvű geokémiai értékelést gyakorisági hisztogramok bemutatásával. E két munka hasznosan egészíti ki mostani, kőzetfajtánkénti kiértékelésemet.

A halimbai előfordulás geokémiai vizsgálatának fő eredményeit legutóbb BÁRDOSSY et al. (2000) cikkünkben ismertettük. Azóta jelentősen megnőtt a déli területen a fúrásokban végzett elemzések száma. A szorosan vett bauxit kémiai felépítését így pontosabban meg lehetett határozni. Geokémiai értékelésem során igyekeztem az ún. *mérettartomány-hatást* is figyelembe venni. Ezért első lépésként a halimbai előfordulás összes produktív fúrásában — szám szerint 850-ben — kiszámítottam a szorosan vett bauxit súlyozott átlagos vegyi összetételét. Az északi területre 320, a délire 530 produktív fúrás esik, tehát az utóbbi területen jóval nagyobb a fúrások sűrűsége. Ezért a déli területet értékeltem részletesebben. Ezen felül az agyagos bauxitot és a bauxitos agyagot is külön kiértékeltem.

A fúrási átlagok alapján a fentiekben már említett 28 részterületre áttekintő statisztikai kiértékelést végeztem, melynek során kiszámítottam az előzőkben felsorolt kémiai komponensek fő statisztikai mutatóit. Ezen kívül sűrűségfüggvényeket és box-plot diagramokat szerkesztettem minden egyes részterületre. Ezután következett a részterületeken belüli, fúrásátlagokra vonatkozó geokémiai értékelés, majd egy-egy kiválasztott fúráson belül értékeltem az egyes komponensek eloszlását, ill. változékonyságát. Külön foglalkoztam a *kiütő értékekkel.* Ezek részben adatrögzítési hibák következményei, amelyeket sikerült kijavítani. De találtam „valós" kiütő értékeket is, amelyek földtani folyamatok révén jöttek létre. Ezeket igyekeztem az értékelésnél figyelembe venni. A vegyi összetétel átmeneteinek értékelésére fuzzy számokat is szerkesztettem, amelyek jól szemléltetik az átfedések mértékét. A következőkben kémiai komponensenként mutatom be a kapott eredményeket.

A halimbai előfordulás egészére vonatkozóan a szorosan vett bauxit átlagosan 54,5% **$Al_2O_3$-**ot tartalmaz. Ez a magyarországi viszonylatban szokatlanul nagy alumíniumtartalom az itteni bauxit monohidrátos ásványtani felépítésének és viszonylag kis kovasavtartalmának köszönhető.

A szorosan vett bauxit részterületenkénti átlagértékeit az 5. táblázaton mutatom be. Ezek a számok matematikai értelemben állítások, melyekhez szükségszerűen több-kevesebb hiba (bizonytalanság) tartozik. Az első a vegyelemzések ún. analitikai hibája, mely az $Al_2O_3$ esetében ±0,5%. A második, az átlag ún. standard hibája, melynek nagysága az elemzések számától és a változékonyságtól függ. Az $Al_2O_3$ esetében ez a hiba ±0,1-től ±0,4%-ig terjed. További hibaforrás lehet az eloszlás jellege. Elméletileg bizonyított, hogy a kapott átlagok csak akkor „torzításmentesek" ha az eloszlás szimmetrikus, vagy legalább közel szimmetrikus. A következőkben azokat az eloszlásokat tekintem szimmetrikusnak, melyeknél a statisztikai ferdeség (skewness) ±1,0-nál kisebb. Az SPSS-programcsomag segítségével a ferdeséget minden egyes részterületre kiszámítottam. Ferde eloszlás esetén ún. robusztus becslőket (maximum likelihood estimator) alkalmaztam. A lehetséges becslők közül a Tukey-féle becslő bizonyult legalkalmasabbnak, amit az SPSS-programcsomag segítségével ugyancsak kiszámítottam. A táblázatban csillaggal tüntettem fel, hogy hol szerepel ez a becslő az átlag helyett.

A normál átlagok 47,7-től 56,0%-ig terjednek. Egyetlen részterület van csupán, ahol az átlagos $Al_2O_3$-tartalom 51%-nál kisebb. Ez a 22. számú, az északi terület keleti oldalán (47,7%). A kisszámú fúrás miatt az eredményt nagy bizonytalanság terheli, mégis egyértelmű, hogy a rendkívül nagy (31,5%) átlagos $Fe_2O_3$-tartalom miatt csökkent le ennyire az $Al_2O_3$-tartalom. Az északi területen a nagy nyugati völgykitöltés (25. részterület) átlaga a legnagyobb: 55,6%. A nyugati peremet is nagy $Al_2O_3$-tartalom jellemzi (27. részterület 55,0%).

A jobb megkutatottság miatt a déli területet értékeltem részletesebben. A részterületátlagokat a 17. ábrán is bemutatom. Két tendencia együttese ismerhető fel: egyrészt keletről nyugat felé haladva növekednek a

*5. táblázat.* A szorosan vett bauxit fő vegyi összetevőinek vastagsággal súlyozott átlagai

| Részterület | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | $+H_2O$ | CaO | MgO | $P_2O_5$ | $SO_3$ | $MnO_2$ | Fúrás (db) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 52,6 | 7,5 | 22,1 | 2,0 | 12,9 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 4 |
| 2 | 54,5 | 4,4 | 25,4 | 2,6 | 11,9 | 0,80 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 10 |
| 3 | 55,3 | 3,9 | 22,3 | 2,6 | 12,4 | 2,5 | 0,18 | n.m. | n.m. | n.m. | 26 |
| 4 | 56,0 | 3,1 | 23,8 | 2,5 | 11,8 | 1,09* | 0,17 | n.m. | n.m. | 0,14 | 34 |
| 5 | 54,2 | 5,7 | 22,6 | 2,5 | 12,2 | 0,63* | 0,20 | n.m. | n.m. | 0,30 | 29 |
| 6 | 52,0 | 5,4 | 25,8* | 2,6 | 12,4 | 1,12 | 0,32 | n.m. | n.m. | 0,15 | 33 |
| 7 | 52,3 | 5,1 | 24,8 | 2,7 | 12,3 | 0,42* | 0,26 | 0,20 | n.m. | 0,15 | 133 |
| 8 | 53,5 | 5,5 | 24,2* | 2,4 | 13,0 | 0,91 | 0,20 | n.m. | n.m. | n.m. | 13 |
| 9 | 52,8 | 6,9 | 20,9 | 2,5 | 13,2 | 0,85 | 0,30 | n.m. | n.m. | n.m. | 8 |
| 10 | 55,0 | 6,8 | 21,2 | 2,3 | 13,0 | 0,60 | 0,24 | n.m. | n.m. | n.m. | 11 |
| 11 | 53,5 | 6,3 | 22,6 | 2,6 | 12,4 | 0,29* | 0,18 | 0,22 | n.m. | 0,15 | 34 |
| 12 | 55,2 | 2,6 | 24,2 | 3,0 | 12,4 | 0,28* | 0,19 | 0,29 | n.m. | 0,28 | 79 |
| 13 | 55,8* | 3,5 | 22,6 | 3,1 | 12,6 | 0,50* | 0,33 | n.m. | n.m. | 0,10 | 65 |
| 14 | 54,0 | 4,1 | 23,8 | 2,9 | 12,2 | 0,39* | 0,20 | 0,26 | ? | 0,09 | 54 |
| 15 | 53,4 | 5,7 | 25,4 | 2,2 | 12,2 | 0,70 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | n.m. | 72 |
| 16 | 54,0 | 6,0 | 22,9 | 2,5 | 12,5 | 0,60 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | n.m. | 11 |
| 17 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 18 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 19 | 53,1 | 8,6 | 21,7 | 2,1 | 12,7 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 2 |
| 20 | 52,4 | 5,8 | 25,4 | 2,1 | 12,3 | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,30 | n.m. | 19 |
| 21 | 51,1 | 6,4 | 26,9 | 2,3 | 12,1 | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 11 |
| 22 | 47,7 | 4,7 | 31,5 | 2,5 | 12,1 | 0,30 | 0,15 | 0,10 | 0,20 | n.m. | 3 |
| 23 | 53,1 | 3,9 | 28,0 | 2,2 | 11,9 | 0,40 | 0,15 | 0,10 | 0,10 | n.m. | 53 |
| 24 | 54,6 | 5,0 | 24,2 | 2,2 | 12,4 | 0,60 | 0,26 | 0,10 | 0,10 | n.m. | 25 |
| 25 | 55,6 | 3,3 | 24,4 | 2,5 | 12,6 | 0,60 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | n.m. | 57 |
| 26 | 54,8 | 5,9 | 22,7 | 2,4 | 12,6 | 0,50 | <0,05 | 0,10 | <0,05 | n.m. | 21 |
| 27 | 55,0 | 5,5 | 22,1 | 2,4 | 12.8 | 1,00 | 0,20 | 0,10 | <0,05 | n.m. | 43 |
| 28 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| ∑ | | | | | | | | | | | 850 |

* Tukay-féle robusztus átlag, n.m.= nincs meghatározás

részterületátlagok 52,0%-ról 55,8%-ra. Másrészt a cseresi bauxittesten belül a mederfácies $Al_2O_3$-tartalma a legnagyobb (56,0%). Ennek okaira a genetikai fejezetben próbálok magyarázatot adni.

Az eloszlás ferdesége részterületenként egy kivétellel 0,03 és 1,17 között mozog, tehát az $Al_2O_3$ eloszlása közel szimmetrikus. Ezért az átlagok torzításmentesek. Egyedül a nyugati bauxittest nyugati részén (13. részterület) 3,60 a ferdeség, tehát az eloszlás a kis $Al_2O_3$-tartalom felé megnyúlt, aszimmetrikus. Ezért itt a Tukey-féle robusztus átlagot használtam, amely 55,8%, tehát 0,2%-al nagyobb a normális átlagnál. Az elemzések átnézése során kiderült, hogy az aszimmetria oka néhány fúrásban a megnövekedett karbonáttartalom, ami miatt az $Al_2O_3$-tartalom 50% alá csökkent.

Az $Al_2O_3$-eloszlás *változékonyságát* skalárisan a szórással és a min./max. különbséggel („range") értékeltem. Az alumíniumtartalom nagyságához képest a szórás csekély: 1,6 és 4,4% között mozog. Ez a déli terület keleti és nyugati szélén a legkisebb és a közepe felé nő (18. ábra). Számításaim azt mutatták, hogy a $Al_2O_3$ átlagértékei és szórása között nincs korrelációs kapcsolat. Az eloszlás szélső értékei 4,7 és 23,5% között váltakoznak, legnagyobb a keleti fő bauxittest területén. Ez jó összhangban van a bányászat azon tapasztalatával, hogy ebben a bauxittestben a legnagyobb a vegyi összetétel változékonysága.

Korrelációs diagram segítségével azt is megvizsgáltam, hogy van-e összefüggés a részterületek átlagai és a bauxit vastagsága között (19. ábra). A diagram azt szemlélteti, hogy nincs érdemi összefüggés az alumíniumtartalom és a vastagság között, a részterületátlagok egy szabálytalan „felhőt" alkotnak.

A fenti áttekintő képet részleteztem a méretthatás felderítésére a szorosan vett bauxit *fúrásonkénti átlagainak* értékelésével. Ezek a déli részterületeken 40,6-tól 65,5%-ig terjednek. Tehát fúrási szinten az eltérések jóval nagyobbak, mint a részterületek szintjén. Mindez felhívja a figyelmet arra, hogy a részterületek átlagai összesítő képet adnak, amelyen belül a fúrások szintjén a különbségek számottevőek lehetnek. Számos fúrásban a szorosan vett bauxit átlagos $Al_2O_3$-tartalma meghaladja a 60%-ot! Legnagyobb a keleti főtelep Halimba H–2243 és H–2553 jelű fúrásában volt. Mindkettőt feltűnően alacsony (10–11%) $Fe_2O_3$-tartalom jellemzi.

Az $Al_2O_3$-tartalom térbeli eloszlásának jobb megismerése céljából a nyugati főtelepre izovonalas térképet készítettem (20. ábra). Szembetűnő a térbeli eloszlás nagy változékonysága. Felismerhető azonban, hogy a

bauxittest keleti és nyugati peremén többnyire kisebb a bauxit $Al_2O_3$-tartalma, mint a középső részen. A bauxittest déli szélétől az északiig húzódik tehát az a nagy $Al_2O_3$-tartalommal jellemzett sáv, amelyet mederfáciesként értelmezek.

Még nagyobb változékonyságot mutatnak az egy fúráson belüli *elemzési intervallumok*. Gyakoriak a 60%-ot meghaladó elemzések, sőt a H–2435 jelű fúrásban (7. részterület) a bauxittest felső részén két egy-egy méteres intervallumban 71,7, ill. 70,5% $Al_2O_3$-at mutattak ki. Tudomásom szerint ezek a Magyarországon eddig észlelt legnagyobb alumíniumtartalmú bauxitminták. Figyelemre méltó, hogy azokban a fúrásokban, ahol a bauxit nagy vastagságú (10–25 méter) az egymásra következő intervallumok $Al_2O_3$-tartalma alig különbözik egymástól. Legfeljebb az alsó és a felső szélső intervallumban csökken le néhány százalékkal az $Al_2O_3$-tartalom.

A részterületek egy részére az *agyagos bauxit* átlagait is kiszámítottam (6. táblázat). Az átlagok 38,8 és 48,2% között mozognak. Legkisebb az előfordulás keleti szélén, legnagyobb ott, ahol az összlet vastag jóminőségű bauxitot is tartalmaz, tehát a völgyeket kitöltő középső részterületeken (23. és 25. részterület). Nincs érdemi különbség az északi és a déli terület részterületátlagai között. Az $Al_2O_3$-tartalom változékonysága kisebb, mint a fentiekben ismertetett szorosan vett bauxit esetében. A bauxitos agyag az agyagos bauxitnál kevesebb $Al_2O_3$-at tartalmaz (7. táblázat). Az előfordulás szélein 35–38%, a középső részeken 38–42% a bauxitos agyag átlagos $Al_2O_3$-tartalma. $Al_2O_3$-tartalmának eloszlása a legegyenletesebb.

A szorosan vett bauxit **$SiO_2$-tartalma** az előfordulás egészére átlagosan 4,2%. Ez alacsonyabb, mint a szőci előfordulás 5,1%-os és a malom-völgyi 5,0%-os értéke. A részterületátlagok az 5. táblázatban láthatók. Legkisebbek az átlagok a mederfáciesekben: a déli területen 2,6 és 3,1%, az északin 3,3 és 3,9%. Nincs érdemi különbség a kréta és az eocén fedőjű részterületek átlagos $SiO_2$-tartalma között, ami genetikai szempontból fontos eredménynek tekinthető. A déli terület részterületátlagait a 21. ábrán mutatom be. Jól látszik, hogy a nyugati érctest nyugati és északi részterületén igen kicsiny az átlagos $SiO_2$-tartalom. Legnagyobb átlaga a középső és a hozzá keletről csatlakozó szegélyfáciesű részterületnek van: 6,3–6,9%. A keleti fő bauxittest és a szélső részterület közepes $SiO_2$-tartalmú: 5,1% és 5,4%. Viszonylag nagy a cseresi nyugati perem $SiO_2$-tartalmának átlaga: 5,7%, de az itteni mederfáciesé csak 3,1%. Tovább kelet felé haladva kissé nő az átlagos $SiO_2$-tartalom.

Az északi terület keleti és nyugati peremén is viszonylag nagy az átlagos $SiO_2$-tartalom: 5,5 és 6,4% között mozog. Mindehhez figyelembe kell venni, hogy a $SiO_2$-meghatározás analitikai hibája nedves analitikai módszerrel ±0,3%. Az átlagok standard hibája kicsiny, egy kivételtől eltekintve 0,05 és 0,2% között mozog.

A $SiO_2$-tartalom szórása az átlagokhoz képest nagy: 1,5–2,6%. A $SiO_2$ átlagai és szórásai között az összefüg-

***6. táblázat.*** A halimbai részterületek agyagos bauxitrétegeinek súlyozott átlagos vegyi összetétele

| Részterület | 1 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 45,6 | 47,2 | 46,2 | 38,8 | 47,7 | 45,2 | 45,7 | 46,2 | 46,2 | 47,7 | 48,2 | 46,6 | 46,2 | 47,3 | 46,1 |
| $SiO_2$ | 17,2 | 15,0 | 15,2 | 17,1 | 15,2 | 15,0 | 14,6 | 15,3 | 14,9 | 14,0 | 15,0 | 14,5 | 15,2 | 14,2 | 20,0 |
| $Fe_2O_3$ | 20,7 | 21,8 | 22,2 | 28,1 | 20,2 | 23,1 | 23,9 | 24,2 | 23,2 | 22,8 | 21,1 | 21,6 | 21,2 | 20,5 | 13,6 |
| $TiO_2$ | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 2,3 | 1,7 |
| $+H_2O$ | 12,6 | 12,3 | 12,4 | 11,5 | 12,3 | 12,5 | 12,1 | 12,1 | 12,2 | 12,3 | 12,6 | 12,8 | 12,8 | 12,9 | 13,8 |
| CaO | n.m. | 1,0 | 0,6 | 1,0 | n.m. | 1,0 | 0,2 | n.m. | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,8 | 0,7 | 1,4 | 0,5 |
| MgO | n.m. | 0,2 | 0,1 | n.m. | n.m. | 0,1 | 0,1 | n.m. | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | n.m. |
| $P_2O_5$ | n.m. | n.m. | 0,1 | n.m. | n.m. | 0,1 | 0,1 | n.m. | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| $SO_3$ | n.m. | n.m. | 0,005 | n.m. | n.m. | 0,005 | 0,005 | n.m. | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,1 |
| Összeg | 98,1 | 99,4 | 98,8 | 98,1 | 97,1 | 98,7 | 98,4 | 98,4 | 99,0 | 99,3 | 99,5 | 98,7 | 98,1 | 99,0 | 95,9 |

n.m.= nincs meghatározás

***7. táblázat.*** A halimbai részterületek bauxitos agyagrétegeinek súlyozott átlagos vegyi összetétele

| Részterület | 1 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 36,0 | 41,2 | 38,5 | 35,8 | 37,4 | 38,5 | 39,3 | 38,4 | 38,2 | 40,0 | 40,0 | 39,7 | 37,4 | 40,3 | 35,1 |
| $SiO_2$ | 29,6 | 25,2 | 26,5 | 28,7 | 27,7 | 24,4 | 24,5 | 25,0 | 26,8 | 24,1 | 25,5 | 25,4 | 27,1 | 26,1 | 35,2 |
| $Fe_2O_3$ | 18,4 | 18,2 | 18,6 | 18,7 | 17,1 | 19,1 | 19,5 | 20,7 | 19,6 | 20,7 | 18,5 | 18,6 | 17,6 | 15,9 | 14,9 |
| $TiO_2$ | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,5 | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 1,5 | 1,9 | 1,4 |
| $+H_2O$ | 12,1 | 12,3 | 12,5 | 12,8 | 12,9 | 13,1 | 12,5 | 12,4 | 12,4 | 12,4 | 12,5 | 12,6 | 13,2 | 13,4 | 12,7 |
| CaO | n.m. | 0,8 | 0,8 | 0,3 | 1,5 | 1,5 | 0,05 | 0,05 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,5 | n.m. |
| MgO | n.m. | 0,1 | 0,1 | 0,1 | n.m. | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | n.m. |
| $P_2O_5$ | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | n.m. |
| $SO_3$ | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | n.m. | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | n.m. |
| Összeg | 97,5 | 99,3 | 98,6 | 97,9 | 98,5 | 98,6 | 97,3 | 98,1 | 99,2 | 99,5 | 98,8 | 98,8 | 97,9 | 99,8 | 99,3 |

n.m. = nincs meghatározás

gés nem egyértelmű. A szegélyfáciesű részterületeken többnyire valamivel nagyobb a szórás, mint a mederfáciesekben (22. ábra). Különösen nagy a szórás a cseresi bauxittest keleti szélén.

Izotrop variogramok segítségével a $SiO_2$-tartalom hatástávolságát részterületenként is kiszámítottam (23. ábra). Legrövidebb a hatástávolság a keleti fő és szélső bauxittestekben (6. és 7.részterület), ahol 10 méternél rövidebb. E két telepben tehát a legnagyobb a $SiO_2$-tartalom térbeli változékonysága, amit a későbbi bányászati műveletek teljesen igazoltak. A nyugati bauxittest mederfáciesében viszont a hatástávolság 44 m-re nő. A cseresi bauxittest középső részén 20–30 m a hatástávolság, a nyugati peremen pedig 70 m-re nő, de az itteni fúrások kis száma miatt ez az érték eléggé bizonytalan. A legfontosabb tapasztalat tehát az, hogy a bauxittesteken belül nem egységes a $SiO_2$ hatástávolsága, hanem részterületenként érdemben eltér egymástól, ami nyilvánvalóan a bauxit felhalmozódásának kissé eltérő körülményeivel függ össze.

Érdekes szabályszerűség rajzolódott ki az eloszlás ferdeségének tekintetében. A ferdeség két kivételtől eltekintve pozitív előjelű és legnagyobb a két mederfáciesű sávban (+1,28 és +1,44), a többiben 1,0 alatt van. A két negatív előjelű ferdeség két viszonylag nagy átlagos $SiO_2$-tartalmú részterületen fordul elő, a középső és a nyugati bauxittestben (–0,36 és –0,59). Ezt a negatív ferdeséget szin- vagy diagenetikus reszilifikációként értelmezem.

Korreláció-számításaim szerint negatív korrelációs kapcsolat van a bauxitvastagság és a részterületek átlagos $SiO_2$-tartalma között. Ezt szemlélteti a 24. ábra. A kapcsolat itt sem lineáris és eléggé laza, különösen az 5 méternél kisebb bauxitvastagságoknál. Az azonban egyértelműen látszik, hogy a növekvő bauxitvastagsággal csökken az átlagos $SiO_2$-tartalom.

A fúrások szintjén $SiO_2$-tartalom esetében is jóval nagyobb a változékonyság. A fúrási átlagok 0,6 és 9,9% között mozognak. A legkisebbek (<4%) a cseresi és a nyugati érctest mederfáciesű sávjában találhatók, ott is a bauxittest legvastagabb részén. Viszonylag keskeny ÉÉK–DDNy irányban elnyúlt testeket képeznek. Nem tekintem őket önálló rétegeknek, mert felfelé és lefelé fokozatosan mennek át a kissé kovasavasabb bauxitba. Ezek a magyarországi bauxittelepek talán leginkább kovasavtalanodott bauxitjai.

Az $Al_2O_3$-hoz hasonlóan a $SiO_2$ térbeli eloszlását is izovonalas térképen ábrázoltam a nyugati bauxittestre (25. ábra). Jól látszik, hogy a bauxittest középső részén húzódik délről észak felé a legkisebb átlagos $SiO_2$-tartalmú bauxit. E sávban gyakori a $SiO_2$-tartalom 1–2%-os fúrási átlaga. A keleti és a nyugati peremeken ugyanakkor fokozatosan 8–9%-ra nő a $SiO_2$-tartalom átlaga. Ez a kép jól megfelel a középső meder- és a két szegélyfáciesnek. A kis $SiO_2$-tartalmú mederzónát északon a kelet–nyugat irányú fő törésvonal határolja. Délen viszont feltehetően a karbonátos kőzettörmelék erőteljes behordása zárta le a bauxittestet.

A mederfácies nagy vastagságú bauxitjában számos fúrási intervallumban 0,1–1% $SiO_2$-tartalmú bauxitot is kimutattak az elemzések. Az egyes intervallumok alig különböznek egymástól, csak a bauxitréteg tetején és legalján nő meg néhány százalékkal a $SiO_2$-tartalom.

Az *agyagos bauxit* nagyobb kaolinittartalma miatt a szorosan vett bauxitnál több $SiO_2$-ot tartalmaz. Az előzőkben ismertetett kőzettani felosztás 10 és 20% $SiO_2$-tartalom közé helyezi az agyagos bauxitok tartományát. Ezen belül a déli területrészen többnyire 15–16%, az északin 14–17% a részterületek átlagos $SiO_2$-tartalma. Csak az előfordulás délnyugati szélén, a 28. részterületen éri el a $SiO_2$-tartalom a 20%-ot (6. táblázat). A *bauxitos agyag* a kőzettani felosztásnak megfelelően 20%-ot meghaladó $SiO_2$-tartalmú. Ezen belül legnagyobb a délnyugati szélső részterület $SiO_2$-tartalma (35,2%). Az északkeleti és délkeleti szélső részterületek $SiO_2$-átlaga 26–30%. A jó minőségű érctesteket kísérő bauxitos agyag viszont átlagosan 26–30% $SiO_2$-ot tartalmaz (7. táblázat). A részterületátlagok a szorosan vett bauxitra a legheterogénebbek. Ezt követik az agyagos bauxit részterületátlagai. Végül a bauxitos agyag átlagai a legegységesebbek.

A fentiekben felvázolt kép magyarázata még nem megoldott. Az tűnik legvalószínűbbnek, hogy a középső-eocén transzgresszió megindulása előtt az előfordulás délnyugati és délkeleti szélén helyi áthalmozódás történt és ennek során növekedett meg ezeken a helyeken a $SiO_2$-tartalom.

A bauxit $Al_2O_3$- és $SiO_2$-tartalmának hányadosát a magyar ipari gyakorlatban *modulusnak* hívják és e szerint választják szét az iparilag hasznosítható és a „nem-ipari" bauxitot. A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete című fejezetben ismertetett kőzettani felosztásban a szorosan vett bauxit modulusa kerekítve 5-nél nagyobb, az agyagos bauxité 2-től 5-ig, a bauxitos agyagé pedig 0,85-től 2,00-ig terjed. A bauxitásványokat nem tartalmazó kaolinos vörösagyag modulusa 0,85-nél kisebb. Geokémiai értékelésekben tapasztalataim szerint célszerűbb a kémiai komponensek százalékaival számolni. Van azonban a modulusnak egy rendkívül hasznos tulajdonsága: hányados révén független a két komponens együttes nagyságától. Ezt használtam fel a karbonáttörmelékes kőzetfajták alapanyagának geokémiai értékelésére. E kőzetfajtákban az $Al_2O_3$ és a $SiO_2$ együttes mennyisége 2–3%-tól kb. 40%-ig terjed. Az elemzett minták modulusát kiszámítva megkaptam, hogy az alapanyag milyen kőzetfajta: bauxit, agyagos bauxit, bauxitos agyag, vagy kaolinos vörösagyag.

Az előfordulás mindazon fúrásaira, melyek a bauxitösszleten belül karbonáttörmelékes kőzetfajtákat is harántoltak és elemzés készült róluk, kiszámítottam ezek modulusait és külön térképen ábrázoltam, hogy mely fúrásokban fordult elő bauxitnak megfelelő alapanyag (26. ábra). Sajnálatos módon az újabb fúrásokban nem elemezték meg a karbonáttörmelékes kőzetfajtákat. Ezeket a térképen üresen hagytam. Természetesen

olyan fúrások is voltak, melyeket megelemeztek, de csak agyagos bauxit, ill. bauxitos agyag összetételű alapanyagot tartalmaztak. Ezeket külön jellel láttam el. A térképen a bauxittestek körvonalát is feltüntettem. Jól látszik, hogy a bauxittestek körvonalán belül a legtöbb fúrásban szorosan vett bauxitból áll a karbonát-törmelékes kőzetek alapanyaga. E mellett majdnem minden fúrásban agyagos bauxit és bauxitos agyag összetételű alapanyag is előfordult. A bauxitos alapanyag legtöbbször a szorosan vett bauxit rétegének alsó és felső határa mentén fordult elő. E rétegek vastagsága többnyire 1–5 m, de a Halimba II. nyugati bauxittest déli részén több fúrásban 20–23 métert ért el. A modulus elérte a bauxitréteg modulusát, sőt több helyen lényegesen meghaladta azt. Egyes mélységközökben 100–150-es modulusok is előfordultak.

A bauxitos alapanyag több helyen túlterjedt a bauxittest körvonalán, elsősorban a nyugati bauxittest északkeleti részén, valamint a déli terület északi határát képező törésvonaltól északra. A leginkább figyelemre méltó az, hogy a nyugati nagy bauxittesttől délre nagy területen önállóan is előfordult. Legnagyobb vastagsága itt 25 métert ért el (Halimba H–1565 jelű fúrás). Sajnálatos módon elemzések hiányában nem állapítható meg miként függ össze ez a terület a tulajdonképpeni bauxittesttel, továbbá hogy dél felé meddig terjed a bauxitos összetételű alapanyag.

Véleményem szerint ez az alapanyag fontos genetikai információt hordoz. Azt jelzi, hogy az adott helyre behordódott bauxit, agyagos bauxit, vagy bauxitos agyag az egyidejűleg ideérkezett karbontátos kőzettörmelékkel elkeveredett. Bauxitrétegek ugyanitt a karbonátbehordás szüneteiben alakulhattak ki. Az ilyen helyek a további bauxitkutatás számára ígéretesek lehetnek. Mindezeket a genetikai fejezetben részletesebben tárgyalom.

A szorosan vett bauxit **$Fe_2O_3$-tartalmának** átlaga az előfordulás egészére 24,8%, ami valamivel nagyobb a szomszédos szőci és malom-völgyi előfordulásoknál. A részterületátlagok 20,9-től 31,5%-ig terjednek (5. táblázat). Az átlagok térbeli eloszlása az előző kettő komponenstől gyökeresen eltér. Mind az északi, mind a déli területen délkelet felől északnyugat felé haladva csökken az átlagos $Fe_2O_3$-tartalom. A déli területre vonatkozóan ezt a 27. ábrán mutatom be. Legnagyobb a két délkeleti szélső részterület átlaga: 25,0% és 25,7%, és innen nyugat felé haladva fokozatosan csökken, legkisebb (21,2%) a középső területsáv északi bauxittestében. Ezen az általános trenden belül a mederfáciesek átlagai a szomszédos részterületeknél néhány tized %-al nagyobbak (23,9%, 24,1%). Ez az eloszlás a vasásványok délkelet felől történt törmelékes behordásával magyarázható.

Az $Fe_2O_3$-meghatározás analitikai hibája ±0,5%. Ehhez járul az átlagszámítás standard hibája, amely 0,1-től 0,4%-ig terjed, egyetlen kivétellel, ahol 0,6%.

A részterületek statisztikai ferdeségei túlnyomóan 0,01-től –1,76-ig terjednek. A 8. részterületen –2,07, a 6.-on –4,55 a ferdeség. Ez azt jelzi, hogy az eloszlás a kis vastartalom irányába elnyúlt és ezért az átlag torzult. A Tukey-féle robusztus átlag ezért a 8. részterületen 23,9% helyett 24,2%, a 6. részterületen pedig 25,0% helyett 25,8%. Az utóbbi már érdemi különbség.

A szórás az átlaghoz hasonlóan szintén keletről nyugat felé csökken ±2,3–2,8%-ról ±1,1–1,4%-ra (28. ábra). A mederfáciesű két részterület e tekintetben nem különbözik a szegélyfáciesektől. Tehát a terület keleti oldalán a legnagyobb az $Fe_2O_3$ eloszlásának változékonysága.

A bauxit vastagsága és az $Fe_2O_3$-tartalom között nem találtam korrelációs kapcsolatot. Ezért a korrelációs diagramot sem mutatom be.

A mérethatás következtében a fúrások szintjén itt is megnő a változékonyság, mert a fúrási átlagok 7,8 és 36,7% között mozognak. Az utóbbi a keleti fő bauxittestben található (Halimba H–2466 jelű fúrás). Az itteni 119 darab $Fe_2O_3$-ra is elemzett fúrás közül 10-ben haladta meg a bauxit átlaga a 30%-ot! Ezen kívül még a cseresi medersávban észleltem 30%-ot meghaladó bauxitátlagot. A vasdús bauxit vastagsága többnyire nem haladja meg a 2 métert. A vasdús bauxit a normális bauxitnál sötétebb vörösszínű, gömbszemcsés és arenites szövetű.

Jóval több fúrás van a telep középső részén, ahol a bauxit $Fe_2O_3$-átlaga ugyan nem éri el a 30%-ot , de egyes mélységközökben meghaladja azt. A legnagyobb $Fe_2O_3$-tartalmú mélységközöket a tormás-kúti 15. részterület Halimba H–167, –347 és –350 jelű fúrásaiban észleltem 0,5, ill. 0,9 m vastagságban. Az itteni sötétvörös, gömbszemcsés szövetű bauxitban az $Fe_2O_3$-tartalom (45–46%) meghaladta az $Al_2O_3$-at (36–42%), tehát kőzettanilag nem is vasdús bauxitról, hanem *alumíniumdús ferritről* van itt szó. Valószínűleg laterites vaskéreg lepusztulásának termékei halmozódtak itt fel. A déli területen a keleti fő bauxittest Halimba H–2467 jelű fúrásában észleltem egy 39,5% $Fe_2O_3$-tartalmú mélységközt. Ezt követi a Cseres keleti részén levő H–210 jelű fúrásban észlelt 36,5%-os intervallum. Az sem véletlen, hogy vizsgálati területünk középső és nyugati részén még az egyedi mélységközökben sem haladja meg az $Fe_2O_3$-tartalom a 30%-ot. Mindez arra enged következtetni, hogy a vasdús bauxittörmelék délkelet felől érkezett jelenlegi helyére. Itt jegyzem meg, hogy laterites ferrit törmeléket a szőci és a malom-völgyi előfordulás bauxittelepeiben is találtam. Ez megerősíti a feltételezett délkelet felől történt behordást. Öt fő behordási útvonalat különböztetek meg, közülük a legtöbb vasdús bauxit a tormás-kúti részterületre érkezhetett (29. ábra). A térképvázlaton a vasdús-gömbszemcsés bauxit elterjedését is feltüntettem.

A vasdús bauxithoz képest a vasszegény, 5–15% $Fe_2O_3$-at tartalmazó bauxit jóval ritkábban fordul elő. Többnyire a szürke pirites-markazitos bauxit alatt található 1–2 méter vastagságban. Feltehetően a pirit bomlásakor keletkező és lefelé szivárgó kénsavas oldatok oldották ki a vastartalom egy részét. Kivételt képez a Halimba H–314 jelű fúrásban 2,3 méter vörösagyagos bauxit alatt átfúrt 1,5 m vastag szürkésfehér bauxit, amely csak 2,0–3,5% $Fe_2O_3$-at tartalmazott. Keletkezésére nem találtam egyértelmű magyarázatot. Feltehetően helyi redukciós környezet vezetett a vas kioldásához.

A nyugati bauxittestre megszerkesztettem a szorosan vett bauxit fúrási $Fe_2O_3$ átlagainak izovonalas térképét (30. ábra). A térkép jól szemlélteti a bauxit vastartalmának rendkívül változékony területi eloszlását. Hosszan elnyúlt keskeny „csíkokban" váltakozik vasdús, közepes és viszonylag vasszegény bauxit. E sávok nagyobb részt DDK–ÉÉNy és DK–ÉNy irányúak. Ez az eloszlás jó összhangban van a DK felől feltételezett törmelékes bauxit behordással.

Az *agyagos bauxit* átlagos vastartalma többnyire 20–24% (6. táblázat). Legnagyobb a keleti peremet alkotó 17. részterület átlaga (28,1%), ami jó összhangban van a szorosan vett bauxitnál tapasztaltakkal. Feltűnően kicsiny az előfordulás délnyugati szélén levő 28. részterület átlaga (13,6%). A mélységközök szintjén elvétve néhány erősen vasdús mélységköz itt is előfordul, főleg a terület délkeleti részén.

A *bauxitos agyag* vastartalma még kisebb, többnyire 15–21% (7. táblázat). Az $Fe_2O_3$ eloszlása egységesebb, kevésbé változékony mint a szorosan vett és az agyagos bauxité. Erősen vasdús mélységközöket nem észleltem.

A halimbai előfordulás átlagosan 2,4% **$TiO_2$**-ot tartalmaz, ez valamivel több, mint a szomszédos szőci és malom-völgyi előfordulás átlaga. A részterület átlagok 2,0-tól 3,1-ig terjednek (5. táblázat). Legnagyobb a déli terület nyugati fő bauxittestének nyugati szegélyén (3,1%) és a mederfáciesében (3,0%). Az északi területen is a nyugati nagy völgyben és a csatlakozó nyugati peremen a legnagyobb a $TiO_2$ átlaga (2,4–2,5%). A legkisebb az előfordulás délkeleti peremének átlaga, 2,0% (5. táblázat).

A $TiO_2$-meghatározás analitikai hibája ±0,2%. Ehhez jön még az átlagszámítás standard hibája, amely részterületenként 0,01 és 0,05% között mozog.

A $TiO_2$-eloszlás statisztikai ferdesége egyetlen kivételtől eltekintve 0,01-től 1,0-ig terjed, tehát szimmetrikusnak tekinthető. Egyedül a déli terület nyugati peremén (13. részterület) –1,5 a ferdeség értéke, de ez sem okozott torzulást: a Tukey-féle robusztus átlag megegyezik a normál átlaggal (3,1%). Az eloszlás változékonysága is jóval kisebb, mint az előző három fő komponensé, a szórás ±0,10–0,28% között mozog. Legnagyobb a déli terület keleti fő bauxittestén (7. részterület), amely a másik három fő komponens tekintetében is a legváltozékonyabbak között van.

Korrelációs számításaim szerint a bauxitvastagság és a $TiO_2$-tartalom között pozitív korrelációs kapcsolat van a részterületátlagok szintjén. A kapcsolat közel lineáris, de eléggé laza, különösen a kisebb bauxitvastagságoknál.

A fúrásátlagok túlnyomó többsége 2,0 és 3,2% között mozog. A legkisebb a Halimba H–309 jelű fúrás átlaga (1,7%), amely a déli terület fő bauxittestében van, a 11. részterületen. Ezen kívül még néhány fúrásban 1,8–1,9% a $TiO_2$-tartalom átlaga. A legnagyobb $TiO_2$-átlagok értelemszerűen a déli terület nyugati fő bauxittestében találhatók. A legnagyobb átlag 3,7% a Halimba H–2127 jelű fúrásban, a bauxittest északi részén. Több olyan fúrás van itt, amelynek $TiO_2$-átlaga 3,3–3,5%.

Ha az egyes mélységközöket vizsgáljuk, akkor még ennél is nagyobb értékekkel találkozunk. Így a Halimba H–2286 jelű fúrás 22,0 m vastag bauxitjának felső 6 méterében 4,7–4,9% a $TiO_2$ mennyisége. Ez lefelé fokozatosan csökken és a bauxittest legalján már csak 2,6–2,7%. Ez egyébként a halimbai előforduláson eddig észlelt legnagyobb $TiO_2$-tartalom. A H–2127 jelű fúrás egyes mélységközeiben 3,9–4,1%-ot ér el a $TiO_2$.

Az *agyagos bauxit* részterületenként 1,6–2,3% $TiO_2$-t tartalmaz (6. táblázat). Legtöbb az előfordulás nyugati szélén, legkevesebb az északkeleti szélén van. A titánoxid eloszlása kevésbé változékony, mint a szorosan vett bauxitban. A *bauxitos agyagban* még kevesebb a $TiO_2$, részterületenként átlagosan 1,4–1,9% (7. táblázat). Itt is a nyugati részterületeken a legtöbb (1,8–1,9%) és északkeleten a legkevesebb (1,4–1,5%). A változékonyság az agyagos bauxiténál is kisebb. Csak igen elvétve észleltem olyan mélységközöket, amelyekben a $TiO_2$-tartalom eléri, vagy kissé meghaladja a 2,0%-ot. Figyelemre méltó, hogy mind a bauxitban, mind az agyagos bauxitban és bauxitos agyagban az előfordulás nyugati részén a legtöbb a $TiO_2$, északkeleten és délkeleten pedig a legkevesebb. Ez az eloszlás véleményem szerint a bauxit-előfordulás felhalmozódásakor jött létre, tehát nem utólagos kémiai átrendeződés következménye.

Egyértelmű korreláció adódott a bauxit, az agyagos bauxit és a bauxitos agyag részterületátlagainak összehasonlításakor $Al_2O_3/TiO_2$-korreláció keretében. A csökkenő $Al_2O_3$-tartalommal a $TiO_2$ mennyisége is csökkent. Ezen felül a három kőzetcsoport jól elkülönült egymástól, ami megerősíti kőzettani felosztásomat.

A hagyományos nedves vegyelemzések során rendszeresen meghatározták az ún. *izzítási veszteséget*. Ez egy összetett mennyiség és ezért geokémiai értékelésre nem használható. Mint a korábbiakban már említettem, a $CO_2$-ot és $SO_3$-ot tartalmazó mintákban az izzítási veszteséget kémiailag kötött vízre — $+H_2O$-ra — számítottam át. Most következő értékelésem tehát a $+H_2O$-ra vonatkozik.

A halimbai előfordulás **+$H_2O$-tartalma** átlagosan 12,5%, ami megfelel a bauxit boehmites ásványtani felépítésének. Ez a legnagyobb kémiai különbség a szőci és a malom-völgyi bauxittal szemben, amely túlnyomóan gibbsites felépítése miatt átlagosan 20–22% +$H_2O$-ot tartalmaz. A részterület átlagok igen egységesek, 11,8 és 13,2% között mozognak (5. táblázat). Nem találtam szabályszerűséget az átlagok területi elrendeződésében. Az izzítási veszteség meghatározásának analitikai hibája ±0,5%. Az átlagszámítás standard hibája jelentéktelen: ±0,01–0,03%. A +$H_2O$-eloszlás közel szimmetrikus, ezért a statisztikai ferdeség értékek többnyire 1,0-nél kisebbek. A legnagyobb ferdeség +1,43 sem okozott torzulást az átlagértékekben.

Az eloszlás változékonyságát kifejező szórás is kicsiny a többi fő komponenshez képest ±0,1-től ±0,86%-ig terjed. Legkisebb a szórás a déli terület három középső kis bauxittestében, legnagyobb pedig a Cseres keleti szélén. Korrelációs számításaim szerint nincs érdemi korrelációs kapcsolat a bauxitvastagság és a részterületek $H_2O$-átlagai között.

Kissé megváltozik a kép ha a fúrásátlagok szintjén vizsgáljuk a +$H_2O$-tartalmat. Több fúrásban 13–14%-ra nőtt a +$H_2O$ átlaga, ami néhány százalék gibbsit jelenlétét valószínűsíti. A mélységközök szintjén még érdekesebb eredményt észleltem. Több olyan fúrást is találtam, melyekben jelentéktelen karbonát- és kéntartalom mellett néhány mélységközben jelentősen megnőtt a kötöttvíztartalom. Ezek a fúrások az északi terület keleti oldalán helyezkednek el, ami szerintem nem véletlen. Legjobb példa a Halimba H–263 jelű fúrás, amelyben a bauxit 2,0 m vastagságban 22–24% +$H_2O$-t tartalmazott, jelentéktelen karbonáttartalom mellett. Hasonlót észleltem a közeli H–267 jelű fúrásban, ahol 1,5 m vastagságban 18,9–20,3% volt a kötöttvíz mennyisége. A Halimba H–496, H–504 és H–748 jelű fúrásokban, 1–1,5 méter vastagasággal ugyancsak megnőtt a kötöttvíztartalom. Ez egyértelműen gibbsites bauxitnak felel meg, mely felfelé és lefelé éles határral érintkezik a szokásos boehmites — kis +$H_2O$-tartalmú — bauxittal. A fedő hol eocén, hol felső-kréta. Véleményem szerint e vékony közbetelepülések települési helyzete valószínűtlenné teszi a helyben lejátszódott gibbsitesedést. E helyett délkelet felől történt törmelékes behordásra gondolok.

Az *agyagos bauxit* +$H_2O$-tartalma rendkívül egységes. A részterületátlagok 11,5 és 13,8% között mozognak (6. táblázat). Gibbsit jelenlétére utaló +$H_2O$-dúsulást a fúrási mélységközök szintjén nem találtam. A *bauxitos agyag* kötöttvíztartalma még egységesebb, 12,1 és 13,6% között mozog (7. táblázat). Meghatározó szerepet játszik ebben az uralkodóvá vált kaolinittartalom. Az átlagok területi elrendeződésében trendet nem találtam.

A szorosan vett bauxit átlagos **CaO-tartalma** számításaim szerint 0,7%. A kalcium geokémiai értékelése a többi komponensénél nehezebb, mert nincs éles határ a bauxit és a kalcittal, dolomittal szennyezett bauxit között. Önkényesen, a könnyebb áttekinthetőség érdekében 10% karbonátásvány-tartalomnál húztam meg a kőzettani határt. Ez természetesen nem esik egybe a többször is változó ipari számbavételi határral. Az így kiértékelt részterületek meglepő módon nem mutattak érdemi különbséget a mészkő- és dolomittörmelékben oly gazdag nyugati bauxitestek, a Cseres és a keleti részterületek között (5. táblázat). A CaO-tartalom térbeli eloszlása mindenesetre a többi vegyi komponensénél szabálytalanabb. Ez azzal magyarázható, hogy a kalcium részben a karbonáttörmelékhez kötve jelenik meg, részben pedig másodlagos kalcitkiválások formájában dúsult. Legkisebbek az északi terület középső részének átlagai: 0,2–0,6%-al. A déli 0,3–1,1% az átlagos CaO-tartalom. Egyedül a cseresi bauxittest keleti szegélyén ér el 2,5%-ot. A CaO-ra elemzett fúrások kis száma miatt (13 db) ez az érték fenntartással kezelendő. A CaO-meghatározás analitikai hibája ±0,2%. Az átlagszámítás standard hibája ±0,1%-nál kisebb.

Az eloszlás változékonysága igen nagy, ezt jelzi az átlagot elérő vagy meghaladó szórás. Az eloszlás erősen aszimmetrikus. A ferdeségi értékek mind pozitívak, 0,55-től 4,70-ig terjednek. Ezért a normális átlagok felfelé torzultak. A Tukey-féle robusztus átlagok az előzőknél 0,1–0,2%-al kisebbek. Az 5. táblázatban ezeket figyelembe vettük. A bauxitvastagság és a CaO-tartalom között nem találtam korrelációt.

A fúrási átlagok is igen változékonyak, 0,1–0,2%-osak a legkisebbek. A fúrásokon belül a CaO-tartalom rendkívül szabálytalanul váltakozik. Sajnálatos módon a CaO-meghatározások többnyire nem terjedtek ki a szorosan vett bauxit rétegének egészére, a megelemzett mélységközök kiválasztása sokszor ötletszerű volt. Ezért a kiszámított statisztikai mutatók bizonytalansága a korábban ismertetett komponensekénél nagyobb.

Az *agyagos bauxit* CaO-tartalma a részterületek átlagában 0,4 és 1,4% között mozog. A *bauxitos agyag* esetében az átlag 0,3-től 1,5%-ig terjed. Nincs tehát érdemi különbség a szorosan vett bauxit és az agyagos bauxit átlagos CaO-tartalma között (6. és 7. táblázat). Változékonyságuk is megegyezik a bauxitéval.

A kőzettani fejezetben ismertetett másodlagos kalcitot tartalmazó bauxit és agyagos bauxitban 5–10%-ra dúsul a CaO-tartalom. Ezt a kőzetfajtát a szorosan vett bauxittól mindig élesen megkülönböztettem. Legtöbb kalcitos bauxit a déli terület keleti fő bauxittestében található (lásd a 4. táblázatot).

A halimbai bauxit, számításaim szerint, átlagosan 0,20% MgO-t tartalmaz. A **MgO-tartalom** a kalciuménál jóval egyenletesebben oszlik el a szorosan vett bauxitban. A részterületátlagok 0,05-től 0,33%-ig terjednek. Ennek az az oka, hogy a magnézium kizárólag dolomittörmelék alkotórészeként fordul elő, másodlagos kiválásokban nem található. Legnagyobb a déli terület nyugati bauxittestének nyugati szélén, ami azt jelzi, hogy a karbonátos törmelékben itt volt a legnagyobb a dolomit aránya (5. táblázat).

A MgO-meghatározások analitikai hibája ±0,2%. A kis koncentráció miatt az átlagszámítás standard hibája ±0,1%-nál kisebb. A szórások ebben az esetben is elérik, ill. meghaladják a részterületek átlagait. Az eloszlás a CaO-nál kissé aszimmetrikusabb. A ferdeségek mind pozitívak és 0,62 és 6,06 között mozognak. A kis koncentráció miatt viszont a torzulás az analitikai hibán belül van és ezért nem is vettem figyelembe. A MgO-tartalom sem korrelál a bauxitvastagsággal.

Az agyagos bauxit részterületátlagai 0,1-től 0,3%-ig terjednek, a bauxitos agyagé pedig 0,1-től 0,4%-ig. E tekintetben sincs tehát érdemi különbség a szorosan vett bauxit, az agyagos bauxit és a bauxitos agyag között. Mindegyikben igen korlátozott a MgO térbeli változékonysága.

Az előző komponensekénél jóval kisebb számban foszfor-, kén- és mangánelemzések is készültek, sajnos nem az egész előfordulásra kiterjedően, hanem ettől függetlenül bizonyos időszakokban. Így az 5. táblázatban szereplő értékelés csupán a részterületek egy részére terjedt ki. Az előfordulás egészére ezért nem is láttam értelmét átlagot számolni.

A szorosan vett bauxit **$P_2O_5$-tartalmára** vonatkozóan a 28 részterület közül csak 13-ban találtam elemzési adatokat. Az északi területen szinte egységesen 0,1% a foszfortartalom. A déli területen az átlagok 0,20 és 0,29% között mozognak. Legkisebb a keleti fő bauxittestben és legnagyobb a nyugati érctest mederfáciesében. A foszfor eloszlása tehát igen egyenletesnek tűnik. Az elemzések analitikai hibája ±0,1%. Az átlagolás standard hibája elhanyagolható, 0,01%-nál kevesebb. Az értékelés bizonytalanságát megnöveli, hogy a bauxitnak rendszeresen csak egyes mélységközeit elemezték meg foszforra. Az egyenletes eloszlás ezt nagyjából kiegyenlíti. A foszfortartalom statisztikai eloszlása szimmetrikus. Ezt jelzik az 1,0-nál kisebb ferdeségértékek. A fenti átlagok tehát torzításmentesek.

A fúrásátlagok is egyenletesek. Egyedül a már említett mederfáciesben (12. részterület) ért el a fúrásátlag 0,50%-ot (a Halimba H–2148 jelű fúrás). Ugyanitt a legnagyobb foszfortartalmú mélységköz 0,60%. A $P_2O_5$-eloszlás változékonysága a fúrásokon belül is igen mérsékelt. A szórás ±0,01-től ±0,06%-ig terjed. Az agyagos bauxitban és a bauxitos agyagban is 0,05–0,3% a $P_2O_5$-tartalom. Az elemzések kis száma miatt részletesebb értékelésnek nem láttam értelmét.

A halimbai bauxitról viszonylag sok **kénmeghatározás** készült részben szulfidkén, részben szulfátkén formájában. Az előbbieket $SO_3$-ra számoltam át. Sajnálatos módon az 1990-es évek közepétől kezdve rendszeres kénmeghatározások nem történtek, a déli területre nem is tudtam részterületátlagokat számolni. Összesen kilenc részterületről találtam kénelemzési adatokat. Az északi területen az $SO_3$-átlagok 0,05-től 0,3%-ig terjednek. Az eocén fedőjű területeken átlagosan 0,1–0,3%, a kréta fedőjűeken viszont csak 0,05–0,1% a szorosan vett bauxit átlagos $SO_3$-tartalma. Ez nyilvánvalóan a közvetlen fedő eocén szenes agyagrétegek hatása. A kénelemzések analitikai hibája ±0,2%. Az átlagolás standard hibája ±0,1%-nál kisebb, tehát elhanyagolható.

Bányajárásaim során mind az északi, mind a déli területen a vörös, jó minőségű bauxit legfelső részén több helyen néhány mm-es, jól kristályos pirit-markazit fészkeket észleltem. Eloszlásuk annyira szeszélyes volt, hogy átlagos kéntartalmat ezen az alapon nem tudtam számolni. Annyit azonban meg lehetett állapítani, hogy e kiválások gyakorisága lefelé haladva rohamosan csökkent. Lefelé szivárgó redukáló oldatokból származtatom őket. Ezekből csapódott ki az oldott ferrovas.

A kőzettani fejezetben már szóltam a bauxitösszlet tetején található szürke pirites-markazitos bauxitról. Szürke színe alapján a vörös bauxittól könnyen meg lehetett különböztetni és ezért nem is mindig került sor kéntartalmuk meghatározására. A szürke bauxit minősége a szorosan vett bauxittól az agyagos bauxiton át a bauxitos agyagig terjedt. Szulfidkéntartalma rendkívül változékony, 2–15%. Külön csoportot alkot az a szürke pirites-markazitos bauxit, amely a bauxitösszlet alján található a déli terület nyugati részén, több méter vastagságban. Erről a kőzettani fejezetben már szóltam. Sajnos kénelemzések még ezekből a mintákból sem készültek.

Az agyagos bauxit és a bauxitos agyag az északi területen 0,005–0,1% $SO_3$-ot tartalmaz. A kisszámú elemzés miatt csak annyit tudtam megállapítani, hogy a kéntartalom a bauxitösszlet tetején a legnagyobb, amennyiben a közvetlen fedő eocén korú szenes agyag.

A halimbai bauxit **$MnO_2$**-tartalma is meghatározásra került,, sajnos a kutatásnak csak néhány évre terjedő szakaszában. Ezért aztán a 28 részterület közül csak 8-ra vonatkozóan találtam $MnO_2$-meghatározásokat (5. táblázat). Az egész előfordulásra ezért nem is számoltam átlagot. A részterületátlagok 0,09-től 0,30-ig terjednek. Az elemzések analitikai hibája ±0,1%. Az átlagolás standard hibája elhanyagolhatóan kicsiny, kevesebb mint 0,01%. Az elemzések a szorosan vett bauxiton túl az agyagos bauxitra és a bauxitos agyagra is kiterjedtek.

Az elemzett részterületek közül a Cseres nyugati szélén és a Halimba II. bauxittest mederfáciesében találtam a legtöbb $MnO_2$-ot. Az előbbi részterületen a legnagyobb fúrásátlag 0,50 $MnO_2$ volt (Halimba H–2386), 0,58% legnagyobb mélységközzel. Még jelentősebb a mangándúsulás a Halimba II. mederfáciesében. Itt a többnyire 0,10–0,30%-os fúrásátlagok mellett négy olyan fúrást találtam, melyekben az $MnO_2$ nagymértékben feldúsult:Halimba H–2288-ban 0,84%; H–2306-ban 0,83%; H–2287-ben 0,75% és H–2286-ban 0,58%-ra. Ezekben a fúrásokban felülről lefelé haladva nő a $MnO_2$-tartalom. Így a Halimba H–2288 jelű fúrásban a 27

méter vastag szorosan vett bauxit rétegének tetején 0,15–0,19% a mangán-oxid-tartalom és ez lefelé haladva fokozatosan 2,65%-ot ért el. A H–2306 jelű fúrásban hasonló módon 1,77–2,33% a bauxitréteg alján a $MnO_2$-tartalom. A H–2286 jelű fúrásban a bauxitréteg alján 2,79%, a H–2287-ben pedig 2,18% a legnagyobb $MnO_2$-tartalom. A Halimba H–2305 jelű fúrásban négy bauxitréteg fordul elő. A két alsóban 0,77–3,75%-ra dúsult a $MnO_2$.

Geokémiai szempontból rendkívül figyelemre méltó körülmény, hogy a mangándúsulás nem szorítkozott a bauxitrétegre, hanem az alatta levő agyagos bauxitra és bauxitos agyagra is kiterjedt, sőt a karbonátos konglobreccsa- és aleurolitrétegekben is feldúsult (a bauxit alsó határán, pl.Halimba H–2290 jelű fúrásban). Olyan másodlagos folyamatról lehet itt szó, ahol a helyi mangándúsulás forrását nem ismerjük. Csak az előfordulás egészére kiterjedő mangánmeghatározásokkal lehetne ezt a kérdést tisztázni.

A kémiai komponensek egyenkénti értékelésén túl szükségesnek láttam a *változékonyságot* az összes elemzett komponensre együttesen megvizsgálni. Erre az ún. *relativ szórás* a legalkalmasabb, amelyet úgy kapunk meg, hogy a szórást az adott átlagra normáljuk. Így az egyes komponensek változékonysága közvetlenül összehasonlíthatóvá válik.

A halimbai előfordulás egészére a részterületek szintjén a fő kémiai komponensek közül a $+H_2O$ *relatív szórása* a legkisebb (1–11%), ami az itteni bauxit egységes boehmites jellegével magyarázható. Ezt követi az $Al_2O_3$ 3–12%-al, majd a $TiO_2$ következik 4–17%-al. Alig valamivel nagyobb az $Fe_2O_3$ változékonysága (4–19%). A $SiO_2$ változékonysága jóval nagyobb (26–80%). A MgO relatív szórása 15–91%. A CaO relatív szórása ezeknél lényegesen nagyobb (40–246%). Az utóbbi rendkívül nagy relatív szórását az magyarázza, hogy főként törmelékszemcsék (mészkő, dolomit) formájában került jelenlegi helyére, de másodlagos kalcit formájában is feldúsult.

A kémiai komponensek e tekintetben két jól elkülönülő csoportra oszthatók. A kis relatív változékonyságú csoport „bauxitogén" komponensekből áll. Ezek geokémiai tekintetben szorosan összetartoznak. A másik, nagy relatív változékonyságú csoportból a $SiO_2$ a laterites mállás kaolinitként fennmaradt maradéka. A CaO és MgO pedig a törmelékes karbonátos kőzetanyag összetevője. Geokémiai tekintetben e három komponens a bauxit szennyezője.

A $P_2O_5$-ra az elemzések korlátozott volta miatt csak közelítő értékek adhatók. Az elemzett részterületeken 14–25% a relatív szórás. A $MnO_2$-ra vonatkozóan feltűnően eltérő eredményeket kaptam: Egy kivételével 12–34%, viszont a 12. részterületen kerek 75% a relatív szórás. Ennek okaira a fent elmondottak jó magyarázatot adnak. Az elemzések kis száma miatt a kéntartalom relatív szórását nem lehetett a szükséges megbízhatósággal kiszámítani. Áttekintés alapján e komponens változékonysága igen nagy.

Megvizsgáltam azt is, hogy a kémiai összetétel tekintetében mennyire különül el egymástól a bauxit, az agyagos bauxit és a bauxitos agyag. Erre a célra a *fuzzy tagságfüggvények* bizonyultak legalkalmasabbnak. A tagságfüggvények ugyanis igen szemléletesen mutatják be az átfedések és a szétkülönülések mértékét.

A tagságfüggvény magjának közepe a súlyozott átlag. Ehhez mértem fel kétoldalt az analitikai hibát, majd pedig a 95% konfidenciaszintre számolt konfidencia-intervallum felső és alsó határát. A tagságfüggvény talpa (support) az elemzett mélységközök legkisebb értékétől a legnagyobbikig terjed. A 31. ábrán a déli terület keleti fő bauxittestének (7. részterület) $Al_2O_3$-, $SiO_2$- és $Fe_2O_3$-tartalmát ábrázoltam a bauxitra, az agyagos bauxitra és a bauxitos agyagra vonatkozóan 133 produktív fúrás alapján. Legjobban a $SiO_2$ tekintetében különül el e három kőzetfajta. Ezt mennyiségileg is kifejezi, hogy a bauxit és az agyagos bauxit tagságfüggvényének magja 9,5%-al különbözik egymástól. Az agyagos bauxit és a bauxitos agyag között ez a különbség csak 6,5%. Ezzel összhangban az átfedés a bauxit és az agyagos bauxit között jóval kisebb, mint az agyagos bauxit és a bauxitos agyag között. Figyelemre méltó, hogy mindhárom kőzetfajta esetében igen rövid a mag, ami a fúrások nagy számával magyarázható.

Az $Al_2O_3$ esetében a három kőzet elkülönülése mérsékeltebb és az átfedések aránya is nagyobb. Végül a $Fe_2O_3$ tekintetében alig van különbség a három kőzet között. A bauxit vastartalma a legnagyobb, a bauxitos agyagé a legkisebb. A bauxit és az agyagos bauxit magja között csak 1,4% a különbség és ugyanez a különbség az agyagos bauxit és a bauxitos agyag között. Az agyagos bauxit és a bauxitos agyag között majdnem teljes az átfedés, de a bauxit és az agyagos bauxit között is jelentős.

Mindezek olyan információk, amelyekhez hagyományos statisztikai értékeléssel nem juthattunk volna el közvetlenül. Ezért ajánlható e módszer alkalmazása más bauxit-előfordulások és más nyersanyagok esetében is, mert szemléletes összehasonlításokra nyújt lehetőséget.

A kémiai komponensek közötti kapcsolatok felderítésére **korrelációs vizsgálatokat** is végeztem előbb a részterületek, majd a fúrások átlagértékeire. Mivel geokémiai szempontból az $Al_2O_3$ a legfontosabb komponens elsősorban ehhez viszonyítva vizsgáltam a korrelációs kapcsolatokat. A korábbi években számos korreláció-számítást végeztem és lineáris, vagy közel lineáris kapcsolatot feltételezve kiszámítottam a Pearson-féle korrelációs együtthatót. Újabb vizsgálataim során derült ki, hogy matematikailag korrektebb nem lineáris összefüggésekkel modellezni a korrelációs kapcsolatokat, amelyekre viszont a korrelációs együttható nem érvényes.

A részterületek szintjén nem lineáris a korrelációs kapcsolat a bauxit $Al_2O_3$- és $SiO_2$-tartalma között (32. ábra). Minél nagyobb az átlagos $Al_2O_3$-tartalom, annál kisebb a $SiO_2$ átlaga. A kiegyenlítő görbe szerint a kapcsolat a kis és a nagy $Al_2O_3$-nál szorosabb, mint a közepeseknél. Az összefüggés eléggé laza, több részterület átlaga eléggé távol esik a kiegyenlítő görbétől. Ennek okát az előfordulás törmelékes, szállított felhalmozódásában látom.

A fúrások szintjén a déli terület összes részterületére korrelációs diagramokat szerkesztettem. Azt találtam, hogy ez a kapcsolat laza, többnyire csak az elsimító görbe alapján lehet felismerni. A kapcsolat majdnem minden esetben nem lineáris. Példaként a keleti fő bauxittestet mutatom be (33.ábra, A), ahol a kapcsolat lazasága a legkifejezettebb. Ezzel szemben a nyugati fő bauxittesten belül a kapcsolat bár laza, de egyértelmű. Ezt szemlélteti a 33 ábra B, amely a 14. részterület 51 fúrására vonatkozik. A kiegyenlítő görbe itt közel áll a lineárishoz és ezért kiszámítottam a Pearson-féle korrelációs együtthatót, amely –0,682. A különbség okát az eltérő üledékfáciesben látom.

$Al_2O_3/Fe_2O_3$-korreláció a részterületek szintjén nem ismerhető fel. Kivétel ez alól a keleti fő és szélső részterület átlaga, amelyeket a többinél kisebb $Al_2O_3$ és nagyobb $Fe_2O_3$ jellemez (34. ábra). A két mederfáciesű részterület is igen közel van egymáshoz, nagy $Al_2O_3$ és közepes $Fe_2O_3$-tartalmukkal. Ugyanakkor a legnagyobb $Al_2O_3$-tartalmú részterületek $Fe_2O_3$ átlagai 21–24%-ig terjednek.

A fúrások szintjén a részterületeket külön-külön értékeltem. Többnyire itt sem adódott észrevehető korrelációs kapcsolat a keleti főtelep kivételével, ahol a kapcsolat közel lineáris és a korábbiaknál szorosabb, ahogy nő az alumíniumtartalom, úgy csökken a vas mennyisége (35. ábra, A). Ellenpélda a nyugati bauxittest északi, ill. nyugati részterülete, ahol a kiegyenlítő görbe alapján sem lehet korrelációs kapcsolatot feltételezni (35. ábra, B és C).

A geokémiai szakirodalomból közismert, hogy a legtöbb bauxit-előforduláson többé-kevésbé szoros korrelációs kapcsolat van az $Al_2O_3$- és a $TiO_2$-tartalom között. A halimbai előforduláson a részterület átlagok szintjén ez a kapcsolat jóval lazább (36. ábra). Inkább területi befolyás érvényesül, amennyiben a nyugati érctest három részterülete (12., 13., 14. részterület) tartalmaz a többinél lényegesen több $TiO_2$-t. Ennek magyarázatát eddig nem sikerült megtalálni. A fúrások szintjén a geokémiai kapcsolat sokkal egyértelműbb. Ezt szemlélteti a nyugati bauxittest északi részterületének korrelációs diagramja (37. ábra), amely közel lineáris lefutású. Korrelációs együtthatója 0,665.

Érdekes összefüggés adódott, amikor a bauxit, az agyagos bauxit és a bauxitos agyag részterületátlagait hasonlítottam össze a $Fe_2O_3/TiO_2$-korreláció szempontjából (38. ábra). Jól látszik, hogy egy-egy kőzetfajtán belül igen gyenge a korrelációs kapcsolat. Annyi azonban felismerhető, hogy növekvő vastartalommal némileg csökken a $TiO_2$ mennyisége. Ugyanakkor a bauxitos agyagtól a bauxit felé haladva a növekvő vastartalommal a $TiO_2$-tartalom is egyértelműen növekszik.

Nem találtam érdemi korrelációt az $Al_2O_3$-tartalom és a $+H_2O$-, a CaO-, a $P_2O_5$- és a MgO-tartalom között. A $SiO_2$- és az $Fe_2O_3$-tartalom között sem észleltem korrelációt. Ezekkel részletesebben nem foglalkozom.

Szükségesnek láttam viszont megvizsgálni az eddig oly kevéssé ismert $MnO_2$ geokémiai kapcsolatait. Sajnos csak nyolc részterületre készültek $MnO_2$-elemzések. Ezek átlagértékei nem mutatnak korrelációt az $Al_2O_3$-dal (39. ábra). Feltűnőek és nyilván nem véletlen a Cseres nyugati és a Halimba II. DNy mederfáciesének kiugróan nagy $MnO_2$-átlagai. E két részterületet ezért a fúrásátlagok szintjén is megvizsgáltam. Meglepő módon e két részterület e tekintetben alapvetően különbözik egymástól. A Cseres nyugati szélén, ha lazán is, de korreláció látszik az $Al_2O_3$ és a $MnO_2$ között (40. ábra, A). Ezzel szemben a nyugati bauxittest mederfáciesében a viszonylag nagyszámú elemzés ellenére nem mutatható ki korreláció az $Al_2O_3$ és a $MnO_2$ között (40. ábra, B). A kémiai fejezetben korábban elmondottak alapján a mangán dia- vagy epigenetikus mobilizálódását és vándorlását tételezem fel a bauxitösszletben, amely a fő kémiai komponensektől függetlenül ment végbe és elsősorban a redox és pH-viszonyoktól függhetett.

Mint már említettem, a megvizsgált korrelációs kapcsolatok zöme nem lineáris jellegű, kisebb része pedig csak közelíti a lineáris kapcsolatot. A minden részterületre és kőzetfajtára kiszámított korrelációs együtthatókat ezért nagy bizonytalanságuk miatt nem értékeltem. Egyedül egy összefoglaló értékelést tartok bemutatásra érdemesnek, nevezetesen a korrelációs együtthatók átlagát számoltam ki a vizsgált kémiai komponensekre. Ezek a következők:

| | |
|---|---|
| bauxit | 0,54, |
| agyagos bauxit | 0,39, |
| bauxitos agyag | 0,40. |

Ezek az átlagok jóval kisebbek, mint az üledékes kőzetekben általában észlelhető korrelációs kapcsolatok. Nyilvánvalóan az előfordulás törmelékes felhalmozódása lehet ennek a fő oka. Az is figyelmet érdemel, hogy a szorosan vett bauxitban az átlagos korreláció valamivel szorosabb, mint az agyagos bauxitban és a bauxitos agyagban.

A fentiekben a fő kémiai komponensek kétváltozós korrelációs kapcsolatait tekintettük át. Korábbi vizsgálódásaim tapasztalatai viszont arra hívták fel a figyelmet, hogy a legtöbb esetben több komponens összetett kapcsolatáról van itt szó.

Az első sokváltozós statisztikai értékelés JUHÁSZ, Ó. KOVÁCS (1990) nevéhez fűződik. Tizenhat halimbai fúrásból származó 230 minta $Al_2O_3$-, $SiO_2$- és $Fe_2O_3$-tartalma alapján képeztek geokémiai csoportokat hierarchikus agglomeratív cluster-elemzés segítségével. A hasonlóság mértékéül az ún. euklideszi távolságot használták. A kapott dendrogramokon 14 csoportot különbözettek meg, melyek átlagos összetételét is kiszámították. A csoportok összetétele szignifikánsan különböző. A minták mikroszkópos vizsgálata alapján sikerült a csoportokat üledékfáciesekhez rendelni. Ugyanakkor azt is észlelték, hogy számos minta esetében a szedimentológiai különbözőség nem vont maga után kémiai különbséget.

Ezt követően Ó. KOVÁCS Lajossal kislődi, szőci és halimbai bauxitmintákon cluster-elemzést, nemlineáris felmérést, diszkriminancia-elemzést és főkomponens-elemzést végeztünk (BÁRDOSSY, Ó. KOVÁCS 1995). Ezeket az értékeléseket az SPSS-programcsomag felhasználásával azóta is folytatom.

*A cluster-elemzést* az $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$, $+H_2O$, Cao és MgO együttesére végeztem el ugyancsak hierarchikus agglomeratív módszerrel és euklideszi távolságokkal, mégpedig külön a bauxitra, az agyagos bauxitra és a bauxitos agyagra. A számítás alapjául első lépésben a részterületátlagok szolgáltak. A dendrogramok alapján eltérő összetételű részterületeket lehetett megkülönböztetni. A bauxitértékelésből kiderült, hogy egyes részterületek kis euklideszi távolságokkal különböznek egymástól, míg mások igen eltérőek. Ezen az alapon kirajzolódott egy összetételében leginkább egymáshoz hasonló sáv a Cserestől a Halimba II. DNy-i nagy bauxittesten át az északi terület nagy völgykitöltéséig (41. ábra). Ettől a sávtól keletre és nyugatra haladva igen eltérő a bauxit sokváltozós összetétele. Ez a kép igen jó összhangban van a feltételezett fácieseloszlással, tehát megerősíti azt.

Az agyagos bauxit és a bauxitos agyag dendrogramjai a bauxitnál kisebb euklideszi távolságokat jeleznek. Kisebb tehát a különbség a részterületek sokváltozós összetétele között. Ez egyébként az előbbiekben ismertetett komponensenkénti kiértékelés alapján várható is volt. Az agyagos bauxit és a bauxitos agyag esetében nem rajzolódott ki a bauxitéhoz hasonló markáns kép, viszonylag egységes a sokváltozós eloszlás.

A Halimba II. DNy-i bauxittest bauxitjára fúrásonként is végeztem cluster-elemzést, méghozzá szomszédos részterületek fúrásaira. A dendrogramok alapján a szomszédos részterületeket igen jól meg lehetett különböztetni.

A cluster-elemzés tehát hasznosan egészíti ki az egy és kétváltozós geokémiai elemzés eredményeit.

*Diszkriminancia-analízissel* azt kívántuk meghatározni, hogy van-e szignifikáns különbség a részterületek összesített vegyi összetétele között. E bonyolult számításra a cseresi bauxittest négy részterületét választottam ki. Ennek eredménye látható a 42. ábrán. A mederfácies jól elkülönül a többi részterülettől. A mederfáciest kétoldalt szegélyező peremi fáciesek viszont egymást teljesen átfedik, ezért összevontam őket. Azonos fáciesről lévén szó ez teljesen indokolt. Végül a keleti szegélyzóna, amit keskeny völgykitöltésként értelmezek, újra jól elkülönül a másik két részterülettől. A kapott kép megbízhatóságát jelzi, hogy a számításba vett fúrások 84%-a az ábrán látható csoporthatárokon belül van. Legnagyobb a megfelelés a mederfáciesű övben (92%), legkisebb a keleti szélső részterületen (74%). Mindez azt bizonyítja, hogy az üledékfácies alapján megkülönböztetett részterületek vegyi összetételükben is szignifikánsan különböznek egymástól.

Hasonló diszkriminancia-elemzést végeztem a Halimba II. DNy négy részterületén. Az elemzés a fúrások 96,8%-ában igazolta a részterületek határait. A részterületek összetételének kialakulásában a vizsgált komponensek értéke a következő volt: $SiO_2$ 0,89, $Al_2O_3$ 0,58, $TiO_2$ 0,35, CaO 0,26 $+H_2O$ 0,18, $Fe_2O_3$ 0,17, MgO 0,15.

A komponensek változékonyságát az előzőkben egyenként értékeltem. *Főkomponens-elemzés* segítségével megpróbáltam az egyes komponensek szerepét mennyiségileg értékelni. Azt találtam, hogy a részterületek többségében 1–3 „főkomponens" határozza meg az együttes változékonyságának túlnyomó részét. Ezen felül a részterületek összesített változékonysága is meghatározható.

A kétváltozós korrelációszámításnál tapasztalt túlnyomó nem-lineáris összefüggés miatt sem parciális, sem multikorrelációs együtthatókat nem számoltam, mert ezek lineáris kapcsolatot tételeznek fel a komponensek között.

## A bauxitösszlet nyomelemei

1951 óta rendszeresen gyűjtöttem minden, a magyar bauxitra vonatkozó, nyomelemzési adatot. Ezek között számos minta a halimbai előfordulásról származik. Ezek az elemzések a legkülönbözőbb időpontokban készültek, különböző laboratóriumokban és különböző elemzési módszerekkel. Az elemzések többnyire kutatási zárójelentések teljességének bemutatására szolgáltak. A Bauxitkutató Vállalat fúrásaiból a mélységközök megadásával készültek elemzések, ami lehetővé tette teleptani és geokémiai értékelésüket. Különösen értékesek azok, amelyekben ugyanabból a fúrásból több elemzés is készült. A volt Fémipari Kutató Intézet országos bauxitkatasztert készített a bauxitfajták feldolgozhatóságának értékelésére. E célból a halimbai bányaüzemekből is több mintát vettek. Sajnos nincsenek adatok a régebbi elemzések módszeréről és a mérési hibákról. Az ajkai timföldgyár laboratóriuma a Halimba II. DNy-i bányamező fúrásaiból készített vanádium- és cinkmeghatározásokat spektro-

méterrel. A Magyar Állami Földtani Intézetben ICP-AES módszerrel készültek nyomelemzések. Ezek átlagos mérési hibája 2–10-szeres kimutathatósági határ feletti koncentráció esetén ±20% volt (Bartha A. szóbeli közlés).

Mint látható egy teljesen heterogén adathalmaz állt rendelkezésemre, melyben a mintavétel távol áll a reprezentatívtól. Ebből az következik, hogy a „leíró statisztika" hagyományos módszereivel csak korlátozott mértékben lehet feldolgozni ezt az adathalmazt. Ezért e mellett a jóval egyszerűbb, de biztos áttekintést nyújtó fuzzy feldolgozást is alkalmaztam.

1967-ben Dudich és Siklósiné publikált igen színvonalas és tartalmas tanulmányt a magyar bauxit-előfordulások nyomelemtartalmáról. Elemzési adataikat sajnos nem tudtam felhasználni, mert a halimbai és a szőci előfordulás bauxitját összevonva értékelték, e monográfia célja pedig a halimbai előfordulás önálló vizsgálata volt (DUDICH, SIKLÓSINÉ 1967).

Halimbán a legtöbb nyomelemzés a Halimba II. DNy-i bányamező felszíni fúrásaiból készült. Ez a monográfia 6–14. részterületét foglalja magába. Jóval kevesebb nyomelemzés készült a Cseres, Tormás-kút és a Halimba III. területéről. A Halimba IV. és V. területéről egyáltalán nem készültek nyomelemzések. Az egyes fúrásokból csak 2–6 mélységközt választottak ki nyomelemzésre. Csak két olyan fúrást találtam, melyben az elemzések az egész bauxitösszletre kiterjedtek. Ezek a Halimba Hk–1 jelű hidrogeológiai fúrás 31 elemzéssel és a Halimba H–2016 jelű fúrás ugyancsak 31 elemzéssel. Ezeket a következőkben külön értékelem. Az összegyűjtött elemzések az ismert fő vegyi komponenseken kívül 17 nyomelemre terjedtek ki, de ezek közül csak 7 szerepel mindhárom vizsgálati területen. Ezeket oxidos formában adták meg. Az egyes nyomelemekről igen eltérő számú elemzés készült. Kimagaslóan a legtöbb a króm- és a vanádiumelemzés. Feltehetően a feldolgozás során remélt gazdaságos kinyerésük motiválta a nagyobb számú elemzést.

A halimbai előfordulásról készült nyomelemzéseket három fő területre vontam össze a könnyebb áttekinthetőség céljából. Az adatokat a 8. táblázaton mutatom be. Az elemzések számán kívül az átlagot, valamint a legkisebb és legnagyobb értéket nyomelemenként meghatároztam.

Értékelésem első kérdése arra irányult, hogy milyen mennyiségben vannak jelen a halimbai bauxitban a vizsgált nyomelemek és van-e különbség e téren a három vizsgálati terület között? Ezt követően a nyomelemek eloszlását, változékonyságát és egymás közötti kapcsolatát vizsgáltam. Végül azt is megvizsgáltam, hogy van-e érdemi különbség a bauxit és az összlet többi kőzetének nyomelemtartalma között?

A 8. táblázat a nyomelemek átlagos mennyiségét ábécésorrendben tartalmazza. Sokkal jobb áttekintést kapunk, ha a nyomelemek átlagait mennyiségi sorrendbe rendezzük. Ez látható a 9. táblázaton. Egyetlen nyomelem van, amely tizedszázalékos mennyiségben van jelen és ez a vanádium. Hét nyomelem századszázalékos, hét pedig ezredszázaléknyi mennyiségben van jelen. Egyetlen nyomelem — az ón — még az ezredszázalékos átlagot sem éri el. Az elemek sorrendje nagyjából azonos a három vizsgálati területen, kisebb eltérések a nikkel és a molibdén esetében vannak. Figyelmet érdemel, hogy a három értékelt terület átlagai nem különböznek szignifikánsan egymástól.

A vizsgált nyomelemek a Szádeczky-Kardoss E.-féle geokémiai elemfelosztás (SZÁDECZKY-KARDOSS 1955) csoportjainak mindegyikébe tartoznak:

— sziderofil elemekhez: Co, Ni;

— szulfokalkofil elemekhez: Cu, Pb;

***8. táblázat.*** A halimbai bauxit nyomelemeinek fő statisztikai mutatói

| Komponens | Cseres | | | | Halimba II DNy | | | | Halimba III és Tormás-kút | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | db | $\overline{X}$ | minimum | maximum | db | $\overline{X}$ | minimum | maximum | db | $\overline{X}$ | minimum | maximum |
| $B_2O_3$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0,021 | 0,013 | 0,090 |
| BaO | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0,0105 | 0,0045 | 0,0500 |
| BeO | 9 | 0,0074 | 0,0008 | 0,0166 | 74 | 0,0021 | 0,0006 | 0,0096 | 13 | 0,0013 | 0,0008 | 0,0032 |
| $Co_2O_3$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0,0085 | 0,0030 | 0,0220 |
| $Cr_2O_3$ | 27 | 0,0650 | 0,0300 | 0,1100 | 87 | 0,0580 | 0,0210 | 0,1030 | 16 | 0,0760 | 0,0500 | 0,1300 |
| CuO | – | – | – | – | 74 | 0,0028 | 0,0005 | 0,0359 | 13 | 0,0029 | 0,0004 | 0,0080 |
| F | 8 | 0,110 | 0,080 | 0,140 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| $Ga_2O_3$ | 9 | 0,0046 | 0,0027 | 0,0130 | 74 | 0,0070 | 0,0044 | 0,0110 | 13 | 0,0087 | 0,0050 | 0,0160 |
| $Li_2O$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0,0044 | 0,0001 | 0,0230 |
| $MoO_3$ | 6 | 0,0089 | 0,0075 | 0,0112 | 74 | 0,0018 | 0,0005 | 0,0062 | 13 | 0,0027 | 0,0015 | 0,0045 |
| $Nl_2O_5$ | – | – | – | – | – | – | – | – | 7 | 0,0160 | 0,0100 | 0,0300 |
| NoO | 4 | 0,0074 | 0,0038 | 0,0102 | 74 | 0,0226 | 0,0060 | 0,0600 | 13 | 0,033 | 0,016 | 0,075 |
| PbO | – | – | – | – | 74 | 0,116 | 0,0030 | 0,0182 | 13 | 0,0080 | 0,0058 | 0,0180 |
| $SnO_2$ | – | – | – | – | 74 | 0,0020 | 0,0006 | 0,0044 | 13 | 0,0009 | 0,0007 | 0,0011 |
| SrO | – | – | – | – | – | – | – | – | 13 | 0,0804 | 0,0021 | 0,2200 |
| $V_2O_5$ | 27 | 0,0900 | 0,0440 | 0,1600 | 87 | 0,1640 | 0,0900 | 0,3000 | 16 | 0,1050 | 0,0850 | 0,1950 |
| $ZrO_2$ | 9 | 0,048 | 0,027 | 0,089 | 74 | 0,095 | 0,042 | 0,136 | 13 | 0,071 | 0,043 | 0,089 |

— oxikalkofil elemekhez: Ga, Sn;
— pegmatofil elemekhez: Cr, Mo, Nb, V, Zr;
— litofil elemekhez: Ba, Be, Li, Sr;
— szedimentofil elemekhez: B, F.

Ez a sokféleség megerősíti véleményemet, hogy a halimbai bauxit kiinduló anyagában sokféle kőzet szerepelt. Figyelmet érdemel, hogy legnagyobb mennyiségben — a molibdén kivételével — a pegmatofil elemek dúsultak a halimbai bauxitban.

Az eloszlás változékonyságát a *relatív szórással* jól lehet jellemezni. A Halimba II. DNy bauxitjaira a következő sorrendet kaptam:

| | |
|---|---|
| CuO | 193%, |
| NiO | 62%, |
| $MoO_3$ | 56%, |
| $SnO_2$ | 40%, |
| PbO | 34%, |
| BeO | 33%, |
| $Cr_2O_3$ | 31%, |
| $V_2O_5$ | 24%, |
| $Ga_2O_3$ | 22%, |
| $ZrO_2$ | 21%. |

A nyomelemek közül tehát kiemelkedően a legváltozékonyabb eloszlású a réz, amit a nikkel és a molibdén eloszlása követ. A többi elem eloszlása statisztikai értelemben mérsékelten változékony.

***9. táblázat.*** A nyomelemek átlagainak sorrendje a halimbai előforduláson (%)

| Cseres | | Halimba II DNy | | Halimba III Tormás-kút | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $V_2O_5$ | 0.1640 | | |
| | | | | $V_2O_5$ | 0,1050 |
| $V_2O_5$ | 0,0900 | $ZrO_2$ | 0,0950 | | |
| | | | | SrO | 0,0804 |
| | | | | $Cr_2O_3$ | 0,0760 |
| $Cr_2O_3$ | 0,0650 | $Cr_2O_3$ | 0,0580 | $ZrO_2$ | 0,0710 |
| $ZrO_2$ | 0,0620 | | | | |
| | | | | NiO | 0,0330 |
| | | NiO | 0,0226 | $B_2O_3$ | 0,0210 |
| | | | | $NbO_3$ | 0,0160 |
| | | PbO | 0,0116 | BaO | 0,0105 |
| $MoO_3$ | 0,0089 | | | $Ga_2O_3$ | 0,0087 |
| | | | | $Co_2O_3$ | 0,0085 |
| | | | | PbO | 0,0080 |
| NiO | 0,0074 | | | | |
| BeO | 0,0074 | $Ga_2O_3$ | 0,0068 | | |
| $Ga_2O_3$ | 0,0065 | | | | |
| | | | | LiO | 0,0044 |
| | | CuO | 0,0028 | CuO | 0,0029 |
| | | BeO | 0,0021 | | |
| | | $SnO_2$ | 0,0020 | | |
| | | $MoO_3$ | 0,0018 | BeO | 0,0013 |
| | | | | $SnO_2$ | 0,0009 |

A vizsgált nyomelemek eloszlásának változékonyságát fuzzy tagságfüggvényeken is szemléltetem. A tagságfüggvény „magjának” közepén van az adott nyomelem átlaga, amelyhez kétoldalt a 95%-os konfidenciaszintnek megfelelő konfidencia-intervallumot mértem fel. A tagságfüggvény „tartójának” két végpontja a legkisebb és a legnagyobb elemzett érték. Ezt az értékelést a Halimba II. DNy minden egyes nyomelemére elkészítettem, mert ahogyan a 8. táblázaton látható, innen van a legtöbb elemzés (elemenként 74, ill 87 a bauxitra). Míg a fentiekben felsorolt relatív szórások az adott nyomelem átlagos változékonyságát fejezik ki, addig a fuzzy tagságfüggvények a szélső értékeket, a „range” hosszát, a leggyakoribb értékeket és az eloszlás szimmetriáját szemléltetik.

A 43. ábrán a négy legnagyobb koncentrációjú nyomelem tagságfüggvényét ábrázoltam. A mag hossza mind a négy elem esetében viszonylag szűk, ugyanakkor a legkisebb és legnagyobb érték különbsége, szaknyelven a „range” tág határok között mozog. Leghosszabb a vanádium esetében (0,210%), legrövidebb a nikkel esetében (0,054%). Figyelemre méltó az is, hogy ezek a tagságfüggvények nem szimmetrikusak, a vanádium, a króm és a nikkel felfelé, a cirkon lefelé elnyúlt. Ezt a képet a ferdeségi mutatók (skewness) is igazolták. Az ilyen eloszlásokat a geokémikusok általában utólagos dúsulással, ill. hígulással magyarázzák. Nem kizárt, hogy a halimbai bauxit esetében is ez a helyzet, de ennek bizonyításához jóval több adatra lenne szükség.

A 44. ábrán a Halimba II. DNy terület bauxitjának további öt, kisebb koncentrációjú nyomelemének tagságfüggvényeit mutatom be. Az egyes nyomelemek tagságfüggvényei között nagyobbak a különbségek, mint az előző nyomelemeknél. Viszonylag szűk maggal és rövid „range-el” jellemezhető a gallium, a berillium és a molibdén tagságfüggvénye. Ezek koncentrációeloszlása tehát a bauxitban viszonylag egységes. Ezzel szemben az ólom és a réz (nem véletlen, hogy mindkettő szulfokalkofil elem) magja jóval hosszabb és a range is igen hosszú. Különös figyelmet érdemel e téren a réz, amelynek legkisebb értéke 0,0005, a legnagyobb 0,0359%. Ezt először kiütő értéknek gondoltam, de az elemzések átnézésekor még további négy hasonló koncentrációjú mintát találtam. Ennek megfelelően az eloszlás ferdesége is szélsőségesen nagy +4,695! E szélsőséges dúsulás okainak feltárásához további kémiai és mikroszondás vizsgálatokra lenne szükség.

A Halimba II. DNy bauxittestből szerencsére a bauxiton felül a többi bauxitos kőzetfajtából is készítettek nyomelemzéseket. Legtöbbet az agyagos bauxitból (55, ill. 36 minta) és a bauxitos-karbonáttörmelékes kőzetfajtákból (20 minta). A többiből sajnos csak 1–3 mintát elemeztek meg. Ezt figyelembe véve megpróbáltam az egyes kőzetfajták nyomelemtartalmának különbségeit értékelni. Három elemcsoportot sikerült megkülönböztetni:
— Az adott nyomelem koncentrációja az agyagos bauxitban kisebb, mint a bauxitban.
— Az adott nyomelem koncentrációja a bauxitban és az agyagos bauxitban közel megegyező.
— Az adott nyomelem koncentrációja az agyagos bauxitban nagyobb, mint a bauxitban.

Az első csoportba a króm, a vanádium és a cirkon tartozik. Mindhárom pegmatofil elem és ezek koncentrációja a legnagyobb a bauxitban. Közülük a vanádiumot ábrázoltam a 45. ábrán. A másik két csoport kisebb koncentrációja miatt logaritmusos skálát alkalmaztam. Az egyes kőzetfajtákat kőzettani kapcsolatuk sorrendjében helyeztem el a diagramon. Ahol kellő számú elemzés állt rendelkezésre ott a koncentrációváltozást egyenes vonallal ábrázoltam. Kisszámú elemzés esetén az átlagolásnak nem lett volna értelme, helyette a legkisebb és a legnagyobb érték közötti intervallumot szürke színnel tüntettem fel. Az átlagnak, valahol ezen belül kell lennie. A vanádiumdiagram jól jelzi, hogy ez milyen bizonytalan. Feltűnő, hogy a bauxitos-karbonáttörmelékes kőzetfajták közel ugyanannyi vanádiumot tartalmaznak, mint az agyagos bauxit.

A második csoportba a berillium, gallium, ólom és az ón tartozik. Közülük a gallium, ólom és az ón kalkofil, a berillium litofil elem. A 45. ábrán a gallium diagramját tüntettem fel. Itt is jól látszik, hogy a kis elemzésszám miatt — szürke színnel jelzett — nagy a bizonytalanság. A bauxitos-karbonáttörmelékes kőzetfajtákat a bauxiténál kisebb koncentráció jellemzi.

A harmadik csoportba tartozik a réz, a molibdén és a nikkel. Ezek mindegyike más geofázisban található. A 45. ábrán a nikkel diagramját mutatom be. Szignifikáns különbség van a bauxit és az agyagos bauxit nikkelkoncentrációja között, mégpedig az agyagos bauxitban több a nikkel, mint a bauxitban. Az is figyelmet érdemel, hogy a bauxitos-karbonáttörmelékes kőzetekben is valamivel több nikkel van, mint a bauxitban.

A 45. ábra alapján jól látszik, hogy a három csoport koncentrációjának kőzettani eloszlása markánsan különbözik. Ha elfogadjuk azt a korábbi fejezetekben ismertetett feltevést, hogy e kőzetfajták a szürke bauxit kivételével önálló rétegeket alkotnak, akkor a három csoport eltérő koncentrációja részben a kiinduló kőzetekre, részben a több lépcsős vízi szállítás időszakára vezethető vissza. Ennek részletes megismerése is további vizsgálatokat igényelne. Mindenesetre az első elemcsoport az, ahol a laterites mállás szerepe egyértelműnek látszik.

Mint már említettem, a Halimba Hk–1 jelű hidrogeológiai és a Halimba H–2016 jelű fúrás teljes szelvényéből 31+31, összesen 62 nyomelemzés készült. A Hk–1 jelű fúrás esetében a szelvény zöme (19 minta) agyagos bauxit, közötte négy rétegben bauxittal. Az elemzések itt sajnos csak a vanádiumra és a krómra korlátozódtak. A vanádiumtartalom átlagai mind a négy rétegben közel azonosak, 0,095 és 0,100% között mozognak. A króm esetében alulról felfelé haladva csökken az átlagos krómtartalom 0,090-ről 0,070%-ra. Az agyagos bauxit rétegek vanádium és krómtartalma közel megegyezik a bauxitéval.

A Halimba H–2016 jelű fúrás az előzőtől abban különbözik, hogy itt három rétegben bauxitos-karbonáttörmelékes kőzetfajták is megjelentek, ugyanakkor lényegesen kevesebb az agyagos bauxit. Ez azzal magyarázható, hogy a fúrás a mederfácies tengelyében, a 12. részterületen helyezkedik el, (lásd a 2. ábrát). A vizsgált tíz nyomelem közül felfelé csak a vanádium átlagai növekedtek. Közel azonosak voltak a bauxitrétegek átlagai az ólom, ón és a molibdén esetében. Kismértékben nőttek lefelé az átlagok a berillium, cirkon, króm, gallium és a réz esetében. Végül igen erős növekedést észleltem a nikkelnél:

— felső réteg átlaga: 0,0130% (4 minta),
— középső réteg átlaga: 0,0320% (6 minta),
— alsó réteg átlaga: 0,0442% (3 minta).

E különbségek oka lehet a behordott laterites málladék összetételének megváltozása, de lehet a leülepedést követő elemmigráció is.

Dudich és Siklósiné (1967) tanulmányuk IV. táblázatában számos elempár korrelációs együtthatóját közölték. E számításokat a Halimba II. DNy bauxittest bauxitjára is elvégeztem és ún. „scatter-plot" diagramokat szerkesztettem. Azt találtam, hogy a korrelációs összefüggések kivétel nélkül nem lineárisak, tehát nincs értelme Pearson-féle korrelációs együttható kiszámításának. Ezen felül a korreláció igen laza, az elempárok többnyire alaktalan felhőként jelennek meg. A korreláció pozitív, vagy negatív jellege azonban egyértelműen megállapítható és ez jól egyezik Dudich, Siklósiné (1967) eredményeivel, pl. a vanádium/gallium, a vanádium/króm és a vanádium/berillium esetében én is pozitív korrelációt észleltem.

Schroll, Sauer (1964) munkája nyomán úgy tűnik, hogy a bauxitokban elsősorban azok az elemek dúsulnak fel, amelyek *ionpotenciálja* (az iontöltés és az ionrádiusz hányadosa) az alumíniuméhoz közel áll. E szerzők a 3,5–7,5 Z/r ionpotenciál-tartományt tekintették kedvezményezettnek és az ide esőket *„bauxitofil elemeknek"* nevezték el: Al, Fe, Ti, V, Co, Cr, Ga, Be, Zr, U, Th, Sc, Sn, Nb, Hf.

Dudich, Siklósiné (1967) szerint ez a megállapítás a magyarországi bauxitokra is érvényes. Szerintük a magyar bauxitban elsősorban a vanádium, króm, cirkon, gallium, berillium, molibdén és a tórium dúsult fel. Vizsgálataim eredményei szerint a halimbai bauxit is beleillik ebbe a képbe. Tóriumra sajnos nem vizsgálták a halimbai bauxitot.

A halimbai bauxitos kőzetek nyomelemdúsulása tehát valószínűleg elsősorban a kedvező ionpotenciál következménye volt. Ez nem zárja ki azt, hogy e mellett kisebb mértékben más geokémiai és szedimentológiai tényezők is szerepet játszhattak az előfordulás nyomelemtartalmának kialakulásában. Így a változó vegyértékű vanádium és urán esetében a redoxpotenciál alakulása is befolyásolhatta a dúsulás mértékét.

## A bauxitösszlet ásványtani felépítése

A halimbai bauxit ásványtani összetételéről 1950 óta számos mikroszkópos, termikus és röntgendiffraktométeres vizsgálat készült. Ezekről BÁRDOSSY (1961), majd BÁRDOSSY et al. (2000) készített összefoglaló értékelést. Sajnos, azóta nyugdíjasként nem volt lehetőségem újabb ásványtani vizsgálatok elvégzésére.

A halimbai bauxit eltérően a szomszédos malom-völgyi és szőci gibbsites bauxittól uralkodóan *böhmites* felépítésű. *Gibbsitet* csak néhány mintában és néhány százalékos mennyiségben mutattak ki a vizsgálatok. Ezek térbeli eloszlása nem mutatott szabályszerűséget. A kovasav uralkodóan *kaolinit* formájában van jelen. Röntgendiffraktométeres vizsgálattal több mintában néhány százalék *berthierint,* korábbi nevén chamositot is találtam.

Kvarc elenyésző mennyiségben van jelen apró törmelékes szemcsék formájában (MINDSZENTY, GÁLNÉ SOLYMOS 1988).

A vas főként *hematit* formájában van jelen, amelyet néhány százalék *goethit* kísér. Ez nem ásványtanilag tiszta goethit, hanem néhány molekulaszázalék alumíniumot is tartalmaz izomorf helyettesítés formájában. Helyesebb ezért *alumo-goethitnek* nevezni. A Halimba II. DNy-i telep bauxitjából több mint 350 kémiai *sziderit*-meghatározás készült. Ezek átlaga 0,3%. A sziderit eloszlásában nem találtam térbeli szabályszerűséget. A korábbiakban említett szürke bauxitban e két vasásvány redukálódott *piritté* és *markazittá.* Többnyire fészkek formájában, ritkábban finoman hintve fordulnak elő. Elvétve magában a vörös bauxitban is találtam több milliméteres pirit-markazit fészkeket. Másodlagos oxidáció hatására a pirites-markazitos bauxit egy része *melanteritté* alakult át. Ugyancsak pirit-markazit oxidációjának terméke a néhány helyen előforduló *alunit* is. A cseresi bauxittest egyik bányavágatában a vörös bauxitban egy 20–30 cm átmérőjű kemény konkréciót találtam, amely röntgendiffraktométeres felvételeim szerint 80% hematit mellett 13% *magnetitet* és 6% goethitet tartalmazott. Véleményem szerint ez is dia- vagy epigenetikus kiválás lehet. A magnetit jelenléte enyhén redukáló környezetre utal.

A halimbai bauxit fő titánásványa az *anatáz,* melyet alárendeltebb mennyiségben *rutil* kísér. A titánásványok néhány mikron méretű szemcséi a bauxit alapanyagának részét képezik. E mellett elenyésző mennyiségben 10–200 mikron méretű törmelékes anatáz és rutil is előfordul a halimbai bauxitban (KISS 1955). A kémiailag kimutatott foszfor *apatit* és *crandallit* formájában van jelen.

A szorosan vett bauxitot kísérő agyagos bauxit és bauxitos agyag is a fentiekkel egyező ásványokból áll, csak a kaolinit mennyisége nő meg a többi ásvány rovására. Az agyagos bauxitban 20–50%, a bauxitos agyagban több mint 50% a mennyisége. A vörösagyagból teljesen kimarad a bőhmit és a gibbsit. A karbonáttörmelékes kőzetfajtákban a kalcit és a dolomit nem önálló ásványok formájában, hanem kőzetalkotó ásványként jelenik meg: mészkő- és dolomittörmelékben. Ugyanakkor ezek alapanyaga a bauxitos kőzetfajták fentiekben ismertetett ásványaiból áll. A kőzettani fejezetben ismertetett kalcitos bauxitban a *kalcit* önállóan, dia-, ill. epigenetikus kiválás formájában jelenik meg, tehát nem keverhető össze mészkőtörmelékes bauxittal.

Bárdossy Gy. és Pantó Gy. egy a Halimba III. bányamezőből származó típusos afanitos (pelitomorf) bauxitot elektronmikroszondával megvizsgáltak (BÁRDOSSY, PANTÓ 1971). Az ásványszemcsék 1 mm-nél kisebbek. Ugyanazokat az ásványokat találták a mintában, mint amiket röntgendiffraktométerrel sikerült kimutatni, az uralkodó bauxitásvány ebben a mintában is a bőhmit. 1987-ben Juhász E. és Polgári M. további elektronmikroszondás vizsgálati eredményeket tettek közzé (JUHÁSZ, POLGÁRI 1987).

MINDSZENTY A., GÁLNÉ SOLYMOS K. (1988), valamint MINDSZENTY et al. (1991) mikromineralógiai, mikroszonda és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatai szerint a halimbai bauxit 0,001–0,01% extraklasztot tartalmaz. Ezek mérete 0,25 mm-nél kisebb. A gyakoribb ásványok albit, apatit, káliföldpát, klorit, kvarc. Ritkábban találtak benne anortitot és cirkont. Ezen kívül néhány csillámpala és földpátos-csillámos kőzettörmelék-szemcsét is találtak. E törmelékes ásványok jelenléte a bauxit anyakőzetének megismeréséhez nyújt értékes információt.

## A bauxit-előfordulás kialakulása

A halimbai előfordulás kialakulásáról a földtani kutatások kezdete óta számos elképzelés látott napvilágot. GYÖRGY (1923) a halimbai bauxitot „szilikátos területről" szél által idehordott üledékes képződménynek tartotta. VADÁSZ (1946, 1951) nem foglalkozott külön a halimbai előfordulás genetikájával, de a magyarországi bauxitokat laterites mállásterméknek tekintette, melyeket felszíni vízfolyások szállítottak jelenlegi helyükre. Szerinte a hazai bauxitok szövete ismételt áthalmozódásra utal. BARNABÁS (1957, 1970) agyagos alapanyag laterites mállásából származtatta a halimba–nyirádi térség bauxit-előfordulásait. Szerinte a bauxit egykori tengerpart közelében, időszakosan vízzel elborított mélyedésekben halmozódott fel. A cseresi telep legfelső részén szürke pirites bauxitos agyagban talált Pyrgulifera-kőbelek vízzel borított tengerparti mocsarat jeleznek, amely már nem volt megfelelő a bauxitképződés számára. ERDÉLYI M. (1965) a halimbai előfordulást szállítottnak tartotta, tehát kész bauxitként érkezett a jelenlegi helyére. Szerinte a beszállítás délkelet felől történt.

MINDSZENTY (1983, 1984) makroszkópos és mikroszkópos bauxitszövet-vizsgálatai alapján arra a véleményre jutott, hogy a halimbai bauxit partközeli, a talajvíz szintjéhez közeli ún. „átitatott" (saturated) üledékfáciest képvisel a magasabban fekvő „vadózus" fáciesű malom-völgyi előfordulással szemben. Szerinte is délkelet felől érkezett a bauxit a jelenlegi helyére.

JUHÁSZ (1986, 1988, 1989a, b) mikroszkópos és elektronmikroszkópos vizsgálatai alapján feltételezte, hogy a Halimbai-medencébe délkelet felől egy meanderező folyó hozta a bauxitot és az különböző üledékfáciesekben halmozódott fel, nevezetesen mederfeneken, mederzátonyon, hordalékkúpon, a folyóparton, az ártéren és mocsári környezetben. Juhász E. a Halimbai-medence feltöltődésére térbeli modellt is készített.

BÁRDOSSY, JUHÁSZ (1991) a vizsgálatokat a malom-völgyi és a szőci előfordulásra is kiterjesztette és ennek alapján a halimba–szőci terület egészére készített szedimentológiai-ősföldrajzi modellt (46. ábra). Feltételezték, hogy a malom-völgyi és a szőci előfordulás anyaga délkelet felől, a halimbai pedig kelet felől érkezett jelenlegi helyére. A későbbiekben a cseresi bauxittestre geokémiai vizsgálatok geomatematikai kiértékelésével pontosítottam a fácieseloszlást és eltérő fáciesű részterületeket különböztettem meg.

MINDSZENTY et al. (1994) elsőnek ismerte fel az ismétlődő karsztosodást a halimbai feküképződményekben és ennek szerepét a bauxit felhalmozódásában. Ezeket a gondolatokat TARI, HERTELENDI (1995) tovább fejlesztette és oxigén- és szénizotópos vizsgálatokkal egészítette ki. Az albaitól a középső-eocénig terjedő elvi-genetikai szelvénysorozaton mutatta be a halimbai és Sümegtől Tésig a bakonyi bauxit-előfordulások földtani helyzetét és kialakulását. 2001-ben MINDSZENTY et al. nagyvonalú geodinamikai keretbe foglalta a Dunántúli-középhegység bauxitképződését és ezen belül a halimbai előfordulás geodinamikai helyzetét. Külön figyelmet érdemel a Halimba H–2011 és H–2012 jelű fúrások részletes litológiai leírása és a karsztosodás-genetikai értékelése.

PATAKI et al. (2002) a bauxit-előfordulás kialakulásának időrendjét és fejlődéstörténetét vizsgálták. Öt sematikus ábrán mutatták be elképzeléseiket a terület tektonikai mozgásainak tükrében. Értelmezésükkel egyetértek. Egyedül a Cseresi Konglobreccsa Tagozat kifejlődésével és elterjedésével kapcsolatos értelmezésüket pontosították az előző fejezetekben ismertetett mostani vizsgálataim.

Jelen monográfia a halimbai előfordulásra és annak közvetlen környékére irányul. Ezért az elmúlt hét évben munkámat erre a területre összpontosítottam. Ennek eredményeként, az új fúrások figyelembe vételével, a 46. ábrán bemutatott ősföldrajzi modellt több tekintetben módosítottam (47. ábra). A malom-völgyi és a szőci előfordulások szállítási útvonalain nem változtattam. Ugyanakkor az összes új, az előző fejezetekben leírt kőzettani és geokémiai eredmény amellett szól, hogy a halimbai előfordulás anyagának behordása nem kelet, hanem délkelet felől történt. Az összlet egy korábban kialakult lapos teknőt töltött fel. Legalább három útvonalat lehet megkülönböztetni, amelyek közül az lehetett a legfontosabb, amely délkelet felől a cseresi bauxittest, a Halimba II. DNy, majd az északi völgy kitöltéséhez vezetett. A vasdús bauxit és alumíniumdús ferrit korábbiakban ismertetett elhelyezkedése jelzi a másik két útvonalat. Jól látható ez a 29. ábrán, ahol a három fő útvonal mellett még két jelentéktelenebb útvonal is feltételezhető. A halimbai bauxittestek keleti nyúlványai is ezeket az útvonalakat támasztják alá.

A bauxitos anyag felhalmozódásával egyidőben, azt mintegy megszakítva délnyugat felől durva karbonátos kőzettörmelék áramlott a medencébe. Ennek általam feltételezett fő beáramlási útvonalait szintén feltüntettem a 47. ábrán. A JUHÁSZ E. által megkülönböztetett üledékfáciesekkel ma is egyetértek, de a jobb áttekinthetőség érdekében célszerűbbnek látom e fácieseket nem egyes mintákra, hanem a részterületek egészére alkalmazni. Ez természetesen általánosítás, de a kőzettani fejezetben leírtak alapján megalapozottnak tűnik.

Egyetértek MINDSZENTY A.-val abban, hogy a felhalmozódás a Halimbai-medencében hosszú ideig tartott, az albaitól a senon santoni emeletének végéig, ami véleményem szerint nem folytonos, hanem hosszabb-rövidebb megszakításokkal tarkított volt. A szőci és a malom-völgyi előfordulás pedig a paleocén és az alsóeocén folyamán halmozódott fel.

Az 1990-ben a Halimba III. bányamezőben talált albai korú bauxitkavicsos agyagmárgáról és szenes agyagról a korábbiakban már szóltam (GÓCZÁN et al. 2002). A szerzők véleménye szerint itt „az üledékfelhalmozódással egyidejűleg zajlott a lateritesedési folyamat is, amelynek végterméke a bauxit". Feltételezték továbbá, hogy a bauxit albai és nem senon korú. E megállapításokkal szemben az a véleményem, hogy a halimbai bauxitösszlet felhalmozódása után — tehát jelenlegi helyén — érdemi lateritesedés már nem történt. Ezt jelzi többek között a bauxit törmelékes szövete. Közismert továbbá, hogy lateritesedéskor elsőnek a karbonátos kőzetanyag oldódik fel és távozik el a szelvényből. A Halimba II. DNy bauxittestén belül ennek nyoma sincs. A karbonátos kőzettörmelék többszörösen összefogazódik a majdnem teljesen kovasavtalanodott bauxitrétegekkel. Az is közismert, hogy az in situ lateritesedés jellegzetes lateritszelvényeket hoz létre, amiről az elmúlt évtizedek során a helyszínen meggyőződhettem. A halimbai bauxitösszlet felépítése gyökeresen különbözik ezektől a típusos laterit szelvényektől. Mindez nem zárja ki azt, hogy egyes különösen kedvező helyeken a még meglevő kovasav kioldása és eltávozása a leülepedés után folytatódott. Ez tehát helyi jelenség lehetett és nem általános kiterjedésű.(BÁRDOSSY 1977).

Nem tudok egyetérteni azzal sem, hogy a bauxitösszlet egésze albai korú. Véleményem szerint a cenománban és a turonban e terület partközeli lapos szárazulat lehetett és az éghajlat is kifejezetten kedvezett

a bauxitképződésnek. Azt sem gondolom, hogy a bauxitösszlet kizárólag senon korú. Sokkal valószínűbb szerintem, hogy az albaitól a senon transzgresszió kezdetéig megszakításokkal ismétlődve érkezett bauxit. Ezen belül azonban „A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete" című fejezetben leírtak és a 3. táblázat adatai szerint létezett egy fő behordási fázis. Ennek időpontjára és időtartamára vonatkozóan viszont nincsenek objektív ismereteim. Ennek pontosítása további elmélyült üledékföldtani és geodinamikai kutatásokat igényel.

A felhalmozódás körülményeinek jobb megértéséhez a közelmúltban nagyszámú speciális „genetikai"szelvényt szerkesztettem, amelyeken a kréta végi – paleocén lepusztulási felszínt vettem alapfelületnek. Ezáltal kizártam az értékelésből a kréta időszaknál fiatalabb tektonikai mozgásokat és egyszerűbbé tettem a bauxitösszlet felhalmozódásának megértését. A szelvények közül négyet mutatok be, melyek szerintem négy különböző üledékfáciesnek felelnek meg. A szelvények nyugat–keleti irányúak és így keresztezik az általam feltételezett behordási útvonalakat. A déli területen keletről nyugat felé haladva előbb egy keskenyebb völgykitöltést értékeltem (48. ábra, A). Jól látszik, hogy e területrészen elsőnek bauxitos agyag és agyagos bauxit halmozódott fel, amibe egy későbbi fázisban behordott bauxit vágódott be. Ez a kb. 50–60 méter széles völgybevágódás délnyugat felől északkelet felé haladt (lásd a 6. ábrát). E völgybevágódás mentén kissé mélyebb térszín alakult ki, ami kedvezett a mocsarasodásnak. Ezt jelzi az összlet tetején található szürke pirites-markazitos agyagos bauxit.

A második szelvény a keleti fő bauxittestet szeli át nyugat–keleti irányban (48. ábra, B). Az összlet itt vastagabb. Értékelésem szerint előbb agyagos bauxit vágódott be az elsőként leülepedett vastag bauxitos agyag rétegbe. Ezt követte a bauxittest bevágódása, amelyet itt ártéri hordalék felhalmozódásnak tartok. Figyelemre méltó az ingadozó bauxitvastagság, továbbá az, hogy itt is lapos mélyedés alakult ki a bauxit felszínén, amit mocsarasodás követett. A Halimba H–2429 jelű fúrásban 5,0 méter a szürke pirites-markazitos agyagos bauxit vatagsága!

A harmadik szelvény a középső terület vékony bauxitrétegét mutatja be (48. ábra, C). Itt jóval nyugodtabb volt az üledékképződés, ugyanakkor a bauxitos agyagban már egy vékony karbonáttörmelékes réteg is megjelent. Bauxitbevágódás legfeljebb a szelvény keleti végén tételezhető fel. A bauxitréteg vékony, egyenletes vastagságú, ami véleményem szerint nyugodt alluviális felhalmozódásnak felel meg. Az összlet felszíne is közel sík lehetett az előző szelvényeken látható mocsarasodás nélkül.

Végül a negyedik szelvény a nyugati nagy bauxittestet harántolja oly módon, hogy a mederfáciest és kétoldalt annak szegélyét is bemutatja (49. ábra). Szembetűnő a fekü felszínének völgyszerű alakja, továbbá a nyugat felé egyre vastagabbá váló karbonáttörmelékes behordás. Bauxitos agyag csak nyomokban van az összlet alján, rá települ a vastag agyagos bauxit réteg, két helyen is bauxit-közbetelepüléssel. A bauxitba helyenként karbonáttörmelék vágódik be (lásd a H–2144 fúrást). A bauxitrétegek felett és alatt a karbonáttörmelék kötőanyaga kiváló minőségű bauxit! Ezt úgy értelmezem, hogy két irányból egyszerre érkezett ide bauxit és karbonátos kőzettörmelék. A szelvény közepén legfelül a senon rétegek lepusztulási maradványai láthatók. Az egész szelvényt igen változékony üledék-felhalmozódás jellemzi. A keleti oldalon a senon fedő eltűnésével szürke prites-markazitos bauxit jelenik meg az összlet tetején.

Összefoglalva: a déli területre készített nagyszámú szelvényem szerint többnyire bauxitos agyag van az összlet legalján, e felett következik a helyenként igen vastag agyagos bauxit, bauxitos agyaglencsékkel megszakítva. Ritkábban vékony bauxitlencsék is előfordulnak benne. A tulajdonképpeni bauxittest az összlet felső harmadát/felét foglalja el. Ritkábban 1–3 méter agyagos bauxit fedi. A keleti fő telepben szinte mindenütt kalcitkiválásos bauxit fedi a bauxitot, fokozatos átmenettel. A keleti fő telep kissé mélyebb térszíni helyzetét jelzi az, hogy az összlet legfelső 1–5 métere szinte mindenütt szürke pirites-markazitos bauxit. A szorosan vett bauxiton belül a középső részen található a legjobb, 4%-nál kevesebb $SiO_2$-ot tartalmazó bauxit. Mindez nem helyben történt szeparálódást, hanem eltérő összetételű rétegek felhalmozódását jelzi. Úgy tűnik, hogy az újonnan érkezett bauxitos hordalék vagy korábban kialakult mélyedéseket töltött fel, vagy bevágódott a korábban leülepedett, még laza üledékbe. A bevágódás iránya közelítően délről észak felé mutat.

A nyugati nagy völgyben a fentiektől érdemben eltérő felhalmozódás történt. Jóval nagyobb az összlet vastagsága és meghatározó a karbonáttörmelékes rétegek szerepe.

Bauxitprognózis című könyvükben SZANTNER et al.(1986) egyebek között a halimbai térség prognózisával is foglalkoztak. Megállapításaik a kutatások akkori szintjét tükrözik. A mai kutatási információk alapján a következő véleményen vagyok:

A halimbai előfordulás északon egy jelentős tektonikai vonallal ér véget, amely oldalirányú elmozdulással mintegy 2 km-re délkelet felé tolta el az előfordulás természetes északi elvégződését. Ezt ábrázolta MÁTÉFI (2002) első ábráján. Véleményem szerint ez a Padragkúttól délkeletre eső terület ma még nincs kellően megkutatva. Az eocén fedőrétegek alatt több helyen találtak bauxitos agyagot és agyagos bauxitot. Nem tartom kizártnak, hogy e területen még kisebb-nagyobb bauxitlencsék is rejtőznek.

Még nehezebben értelmezhetők a halimbai előfordulástól 3 km-re ÉÉK-re lemélyített Ajka Ak–3, –5 és –6 jelű fúrások. Ezek 260–350 méter mélységben elérték a bauxitszintet és az Ak–3 jelű fúrásban 1,3 méter vastag

bőhmites bauxitot harántoltak 55% $Al_2O_3$- és 5,5% $SiO_2$-tartalommal. Nyitott kérdés, hogy mi köze van ennek a bauxitnak a halimbai előforduláshoz? A magam részéről ezt a bauxitot halimbai analógiára délkelet felől származtatnám. Ha ez igaz, akkor egy kb 15 km$^2$ kiterjedésű terület bauxitföldtani újraértékelése válna szükségessé.

A Halimbai-medencétől délre és délkeletre, némileg magasabb térszínen az alsó eocénben folytatódott a bauxit behordása délkelet felől. Így jött létre a szőci és a malom-völgyi előfordulás. A kiemeltebb helyzet tagoltabb térszínt eredményezett. Ez lehet az oka, hogy ezen a két előforduláson nem a halimbaihoz hasonló nagykiterjedésű, összefüggő bauxitösszlet rakódott le, hanem egymástól kiemelkedésekkel elválaszott bauxitlencsék jöttek létre. Speciális hordalékkúpokként értelmezhetjük ezek együttesét, melyek északnyugat felé ívesen végződtek el. A felhalmozódás általam feltételezett határát a 47. ábrán szintén feltüntettem. E két előfordulás kiemeltebb „vadózus" helyzete Mindszenty A. értelmezésével összhangban a halimbaitól eltérő, gibbsites összetételt is magyarázza.

Délkelet felé nem ismerjük e két előfordulás eredeti természetes határát. A neogén lepusztulás során ugyanis nem csak az eocén korú fedőrétegek tűntek el, hanem maga a bauxitösszlet is elpusztult. Ez a lepusztulás olyan heves volt, hogy az eocén rétegek déli, lepusztulási határától dél felé 50–100 méterre nem folytatódnak a bauxitlencsék. Azt hogy nagy mennyiségű bauxit pusztult le a miocén és pliocén rétegekben található nagyszámú bauxitkavics bizonyítja.

A halimbai medencében az előfordulás területén az ismertetett senon fedőrétegek és a középső-eocén transzgresszió rétegei között a fúrások és a bányaműveletek tanúsága szerint nem található bauxit. Ebből az következik, hogy a paleocénben és az eocén kezdetén erre a területre nem hordódott be bauxitos anyag. Ezt támasztja alá az is, hogy a malom-völgyi előfordulás íves északi elvégződése és a halimbai előfordulás között a fúrások nem találtak bauxitot.

Végül nyugat felé kevésbé tartom valószínűnek a halimbai előfordulás folytatódását, legalábbis az eddigi fúrások erre vallanak. A lengyelmajori bauxitlencse megtalálása óta azonban ez sem kizárt. Ha van bauxit a senon és az eocén fedőrétegek alatt, úgy az 200–300 métert meghaladó mélységben lehet, tehát a jelenlegi környezetvédelmi előírások mellett nem hozzáférhető.

# Alkalmazott, gyakorlati rész

## A felszíni bauxitkutatás módszertani tapasztalatai

A tudománytörténeti áttekintésen túl e fejezettel fő célom a kutatás módszertani tanulságainak összefoglalása. Az a véleményem, hogy e tanulságok jó része más szilárd ásványi nyersanyagtelepek kutatásánál is sikerrel alkalmazható.

Legfőbb tapasztalatom az, hogy az adott előfordulás minden részletre kiterjedő kutatási értékelése sokkal megbízhatóbb eredményeket biztosít, mintha csak néhány „típusosnak" (reprezentatívnak) mondott fúrást vagy teleprészt dolgoznak fel, és ennek eredményeit terjesztik ki az egész előfordulásra. Sajnos ma is ez a gyakrabban alkalmazott eljárás.

Halimbán is az a tapasztalatom, hogy bár a bauxitösszlet minden egyes mélységközét megelemezték (részletek „A bauxitösszlet fő és járulékos kémiai komponensei" című fejezetben) tényleges kiértékelés csak a szorosan vett bauxitra történt. Megnövelte e téren a bizonytalanságot, hogy 2004-óta csak neutronaktivációs elemzések készülnek két alkotóra ($Al_2O_3$ és $SiO_2$). A statisztikai értékelés is készletszámítási tömbökre korlátozódott, genetikai területegységek megkülönböztetésére nem törekedtek. A következőkben időrendi sorrendben tekintem át a kutatás módszertani tapasztalatait.

A Halimbai-medence első, tájékozódó jellegű kutatása a huszas-harmincas években történt (GYÖRGY 1923, KORMOS 1932, VITÁLIS 1932). A halimbai térség érdemi kutatása 1943-ban indult meg az Alumíniumérc Bánya és Ipar Rt. kezdeményezésére. A kutatás földtani irányítását Vadász Elemér, műszaki vezetését Alliquander Endre bányamérnök látta el. A gépi magfúrások eleinte a szőci és a malom-völgyi előfordulások területére estek, ezeket most nem ismertetem. A Halimbai-medence déli részén fúrásokat főként szelvényszerűen telepítették a fő útvonalak mentén, egymástól 100–200 méter távolságra. A kutatás 1944-ben sikerrel járt, mert a Halimbáról nyugatra vezető „Devecseri út" mentén, továbbá a Halimbát Szőccel összekötő út mentén középső-eocén mészkő alatt jóminőségű bauxitot találtak. Még ennél is eredményesebbek voltak a két út között laza, szabálytalan elrendezésben elhelyezett fúrások — a későbbiekben Cseresnek elnevezett bauxittest területén. Kilenc produktív fúrás mélyült itt.

A medence közepe felé egyre mélyebbre került a bauxit. A legészakibb fúrás (Halimba H–171) már 254,5 méter mélységben érte el a bauxitot, a ma ismert előfordulás északi részén. A kutatásokat a II. világháború eseményei csak rövid időre szakították meg és azok már szovjet felügyelet alatt egészen 1947-ig folytatódtak. Vadász Elemér három rövid kéziratos jelentésben számolt be a kutatási eredményekről (VADÁSZ 1943, 1944, 1945). A fúrási rétegsorokat, a vegyelemzéseket és a földtani térképeket 1949-ben az 1946-ban megalakult a Maszobal (Magyar–Szovjet Bauxit-Alumínium Rt.) kéziratos kötet formájában jelentette meg szöveges értékelés nélkül. A kötet összeállítói Alliquander Endre, Vadász Elemér és I. A. Ljubimov szovjet geológus voltak (ALLIQUANDER et al. 1949).

Mai szemmel nézve ezek a kutatások gyorsak és célratörők voltak. Viszonylag kevés fúrással (118 db) a Halimbai-medence bauxitföldtani értékéről jó áttekintést adtak. Az 1949-ben készült kötet mindmáig a halimbai bauxitkutatás alapdokumentációja. A fúrási rétegleírások bár rövidek, de pontosak, az azóta végzett kutatások igazolták őket. A mintavételi mélységközök mindmáig beváltak. Igen helyesen a bauxit öt fő komponensét minden mintában megelemezték, sőt több mintáról $SO_3$-meghatározás is készült.

Vadász Elemér 1946-ban megjelent munkájában felismerte, hogy itt egy nagykiterjedésű telepről van szó, amely a Halimbai-medence nagy részét kitölti.

1950-ben a Maszobal Balatonalmádi székhellyel megalakította a Bauxitkutató Expedíciót. Az egyre sürgetőbb ipari bauxitigény miatt azonnal hozzáfogtak a legkedvezőbb helyzetűnek ítélt cseresi területrész megkutatásához. A kutatást figyelemre méltó tervszerűség jellemezte: A Cseresi-dülő mentén egy 32 hektáros területet jelöltek ki 50×50 méteres hálózatban történő megkutatásra. A hálózat méretét korábbi hazai bauxitkutatási tapasztalatok alapján jelölték ki és a cseresi bányászati tapasztalatok igazolták ezt a választást. Négy Crälius fúrógéppel fél év alatt 74 kutatófúrás készült 5182,7 m terjedelemben. A már meglevő korábbi fúrá-

sokkal együtt 105 fúrás alkotta a kelet–nyugat és észak–dél irányban tájolt hálózatot. A sürgetett befejezés miatt a bauxittestet nyugat és észak felé nem határolták le megfelelően, amit az utóbbi évek kutatásai egyértelművé tettek.

A rendkívül rövid idő alatt elkészült kutatási jelentés szerzője Barnabás Kálmán az Expedíció főgeológusa volt (BARNABÁS 1950). A jelentés tartalma a fennálló — igen korszerű — szovjet előírásokhoz igazodott, de a szerző ezeket számos pontban kiegészítette. Elmondható, hogy ez lett az első, nemzetközi összehasonlításban is korszerű hazai bauxitkutatási zárójelentés. A bauxittelep modelljét egyébbként a bányászat teljes mértékben igazolta. A készletszámítással „A készletszámítások tapasztalatai" című fejezetben foglalkozom. A monográfia földtudományi részében ismertetett 2., 3., 4. és 5. részterület felel meg a cseresi bauxittestnek (2. ábra).

A Devecseri út mentén 1944-ben talált bauxittest megkutatására 1952-ben került sor. A kutatás eredményeiről 1953-ban Bárdossy György készített jelentést a cseresi jelentésben alkalmazott módszerek szerint (BÁRDOSSY 1952). A sikeres kutatás a tormás-kúti területen folytatódott 100×100, ill. 100×50 méteres hálózatban. Az eredményekről Virágh Károly készített jelentést 1954-ben (VIRÁGH 1954). Az értékelés itt is a szovjet előírások figyelembevételével történt. (A a 15. részterület felel meg ennek a bauxittestnek.)

1954 végén a magyar állam átvette a Maszobal üzemeit. Ennek során a Bauxitkutató Expedíció önálló Bauxitkutató Vállalattá alakult át. Folytatták a kutatásokat északi irányba terjeszkedve, többnyire 100×100 méteres fúrási hálózattal, amelynek a tájolása változatlanul észak–déli volt. E laza hálózatot helyenként 50×50 méterre sűrítették be. A jól felismerhető teleptani elrendeződés figyelmen kívül hagyásával kelet–nyugati irányú szeletekre osztották az előfordulás megkutatott részeit, melyeket Halimba II., III., IV. és V. „mezőknek" neveztek el és ezek szerint készültek az újabb jelentések. E felosztás oka a gyors ütemben terjeszkedő halimbai bányászat lehetett. E jelentések felépítése továbbra is megegyezett a korábbi jelentésekével. Színvonalas, a célnak megfelelő munkáknak tartom őket (SZANTNER, ERDÉLYI 1960, ERDÉLYI 1961, SZABÓ, POSGAY 1963, Bauxitkutató Vállalat, Földtani Kamerális Osztály 1966). Ezzel egy időre le is zárult a halimbai előfordulás nagy volumenű, hálózatos fúrásos kutatása. Csupán néhány kiegészítő fúrás lemélyítésére került sor a bányászat helyi problémáit megoldó céllal.

A nyolcvanas–kilencvenes években a bányavállalat által végzett felszíni kutatások eredményeiről PATAKI (1987), továbbá PATAKI et al. (2002) számolt be.

Furcsa módon a megkutatott cseresi bauxittest és az északi nagy bauxittest között egy 400–600 m széles sáv maradt, amelyről nem készült kutatási jelentés. Bár nyilvánvaló volt, hogy a bauxitösszlet itt is megszakítás nélkül folytatódik, mégis csak egymástól látszólag izolált helyeken találtak szorosan vett bauxitot, továbbá a mészkő és dolomit törmelék megjelenése (Cseresi Tagozat) is megoldatlan problémát okozott. Természetes határt jelentett észak felé a 2. ábrán feltüntetett KDK–NyÉNy irányú törésvonal.

1990-ben a Bakonyi Bauxitbánya Vállalat kezdeményezte e sáv nyugati részének (Halimba II. DNy) részletes megkutatását. A kutatás fokozatosan a sáv középső és keleti részére is átterjedt és még mára sem zárult le teljesen. Felhagytak a korábbi merev hálózatos kutatással és mindenegyes fúrópontot a helyi teleptani adottságok figyelembevételével jelöltek ki egymástól 15–30 m távolságra. Megjegyzem, hogy a számítógépes programok alkalmazása feleslegessé tette a fúrási hálózatokhoz való merev ragaszkodást. E helyett variogramszámítások segítségével a hatástávolságokhoz igazították a megkutatás sűrűségét. A Halimba II. DNy bányamezőn végzett kutatás eredményeiről 1991-ben a Geoprospect Kft., a Bakonyi Bauxitbánya Kft. Földtani és Bauxitkutatási Üzeme pedig 1998 és 1999-ben készített jelentéseket. BÁRDOSSY 1991-ben geokémiai és geostatisztikai számításairól készített jelentést.

A vállalat ezt követően a már befejezett cseresi bánya területén végzett fúrásokat. Tekintettel arra, hogy az ötvenes-hatvanas években a timföldgyárak csak a ma elfogadottnál jobb minőségű — előbb 10 feletti, majd 7 feletti modulusú — bauxitot fogadtak el, számos helyen olyan bauxitot kellett visszahagyni, amely ma már műrevalónak minősül. Mint a korábbiakban említettem, a cseresi érctest nyugati és északi lehatárolása sem volt megfelelő. Az utóbbi években itt lemélyített fúrások nyugat és északnyugat felé kitolták a cseresi bauxittest határait. Északkelet felé pedig keskeny nyakkal a keleti szélső bauxittestbe ment át a telep (6. részterület).

Összefoglalva az a véleményem, hogy a halimbai előfordulás területén az elmúlt hét évtized folyamán színvonalas, célratörő és eredményes földtani kutatás folyt, melynek módszereit a bányászat igazolta. E több mint 2200 fúrást kitevő kutatásnak néhány általános érvényű tapasztalata is van, elsősorban az optimális megkutatás tekintetében. Ezeket a tapasztalatokat szeretném a következőkben bemutatni.

Véleményem szerint a fent ismertetett, empirikus jellegű kutatási módszereket még eredményesebbé lehet tenni a megkutatás tudatos elméleti továbbfejlesztésével. Először is tisztázni kell, hogy mit értünk *megkutatottság* alatt. A nemzetközi szakirodalom általánosan elfogadott álláspontja szerint a megkutatottság egy ásványi nyersanyag telep olyan mértékű ismeretessége, amely a bányászati kitermelés és a feldolgozhatóság tekintetében megalapozott döntéseket tesz lehetővé. Ebből fakad a következő kérdés: *Mikor optimális a megkutatottság mértéke?* Ez a kérdés mind bányaműszaki, mind gazdasági szempontból rendkívül fontos, hiszen a

*túlkutatás* felesleges költségtöbblettel jár, az *alulkutatás* pedig növeli a bányászati beruházás kockázatát és ezen túlmenően a termelési költségekre is kihathat.

A szakirodalom abban is megegyezik, hogy a hagyományos determiniszikus és sztochasztikus módszerekkel nem lehet az optimális megkutatottságot kellő pontossággal meghatározni. A geostatisztikai módszerek alkalmazása a krigelés bevezetésével ezen a téren is előrelépést jelentett, de a problémát nem tudta teljesen megoldani. Kvantitatív számítások helyett ezért világszerte, de hazánkban is, ún. *ismeretességi kategóriákkal* fejezik ki a megkutatottság mértékét (A, B, $C_1$, $C_2$), melyeket ún. szakértői vélemény (expert's opinion) alapján választanak meg. A volt KFH, majd az MGSZ is ezek használatát írta elő.

BÁRDOSSY et al. (2001) a bauxitvagyon meghatározására a „bizonytalan halmazok elmélete" alapján új módszert dolgozott ki, amelyet többek között a halimbai előforduláson is kipróbáltunk (lásd „A készletszámítások tapasztalatai" című fejezetet). A megkutatottság azonban ezen túlmenően a bauxittelep térbeli helyzetének meghatározását is magába foglalja. A fenti módszer erre is alkalmazható. A kutatási optimum meghatározása azonban még így is — a változók természetes változékonysága miatt — bizonytalan maradt. Ezért a kutatásértékelés egy teljesen új megközelítését javasoltam (BÁRDOSSY 2005) a Bayes-féle valószínűségek és a fuzzy elmélet felhasználásával. Ezt próbáltam ki a halimbai déli terület két szomszédos bauxittelepén (6. és 7. részterület). E módszerek részletes ismertetése BÁRDOSSY, FODOR (2004) könyvében megtalálható.

Első lépésként ún. Bayes-féle előzetes valószínűségeket (prior probabilities) becsültem meg a legfontosabb mutatókra, pl. produktív fúrások várható aránya a kutatási területen. Ez természetesen csak szubjektív becslés volt az addigi ismeretek alapján. A Bayes–Laplace-képlet segítségével a kutatás előrehaladásával párhuzamosan értékeltem azt, hogy mennyire válik be ez az előzetes valószínűség. Ennek alakulása segíti a kutatókat a kutatási módszer esetleges megváltoztatásában, vagy a kutatás felhagyásának eldöntésében. Példaként a bauxitra vonatkozó fúrási *találati valószínűség* alakulását mutatom be a déli terület 6. és 7. részterületére (50. ábra), amelynél az általam becsült kiinduló előzetes valószínűség 0,6 volt. Nem okozott volna bajt, ha az előzetes valószínűséget 0,7, vagy 0,5-re becsültem volna, mert az új információk alapján az utólagos valószínűségek hamar beálltak volna az eredeti görbébe és ott stabilizálódtak volna. Csak annyi lett volna a tanulság, hogy kiinduló becslésem hibás volt. Jól látszik, hogy az utólagos valószínűségek egy eléggé kedvezőtlen induló szakasz után fokozatosan stabilizálódtak az eredetileg feltételezett 0,6-os valószínűség közelében.

Értékelésem másik fő módszere az, hogy a megkutatottságot befolyásoló minden egyes változót (terület, vastagság, kémiai komponensek, térbeli helyzet stb.) a kutatás megindításától kezdve, célszerűen megválasztott szakaszonként kiértékelem sztochasztikus és fuzzy módszerek segítségével. Egy-egy szakasz hossza e halimbai példa esetében 15–20 fúrás volt, de lehet több vagy kevesebb is. Számítógépes program segítségével ezt az értékelést nagymértékben fel lehet gyorsítani. Az általam a monográfia készítéséhez használt számítógépes programok a következők voltak:

— Dbase és Excel adatbázisok létrehozására és kezelésére,
— AutoCad területszámításra és térképszerkesztésre,
— SPSS statisztikai számításokra,
— Variowin variogramok és variogram-felszínek készítésére.

Ahogy a kutatás haladt előre táblázatok és diagramok formájában összehasonlítottam az egymásra következő kutatási szintek eredményeit. Amíg a változók szakaszonként érdemben megváltoznak, nem tekinthető teljesnek a megkutatottság. Amint az egymásra következő szakaszok nem szolgáltatnak eltérő eredményeket, nagy valószínűséggel elértük az optimális megkutatottság szintjét. Ha ez igaz, úgy további fúrások lemélyítése már nem változtatja meg érdemben a változók értékeit. Ekkor érjük el a túlkutatás fázisát.

A halimbai értékelés során az is kiderült, hogy a különböző változók eltérő változékonyságúak és ezért eltérő megkutatási szinten érték el az optimumot. *Tehát nincs egységes, az összes változóra egyaránt érvényes megkutatottsági optimum!* Az érintett szakemberek feladata fontossági sorrendet meghatározni és abban dönteni, hogy e sorrendben meddig menjenek el a kutatás során. A fent leírtakat az alábbi gyakorlati példán mutatom be.

Az értékelésre kiválasztott 6. és 7. részterületen 2006 végéig 265 felszíni fúrás mélyült, amelyből 166 harántolt szorosan vett bauxitot. E fúrások bauxit-magkihozatala meghaladta a 90%-ot, ezért ezt a bizonytalansági tényezőt nem vettem figyelembe. Tekintettel arra, hogy ezen értékelés célja alapvetően módszertani volt megtartottam „A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete" című fejezetben ismertetett kőzettani beosztást. Tehát az összlet azon részét vettem számításba, ahol a $SiO_2$-tartalom nem érte el a 10%-ot, az $Al_2O_3$ több mint 46%, a karbonátásványok együttes mennyisége 10%-nál kevesebb, az $SO_3$-ban kifejezett kéntartalom pedig 1%-nál kevesebb. A készletszámításba csak a 2,0 méternél vastagabb bauxitot vettem be. Ez tehát az ún. *számbavételi határ.*

A területen található fúrásokat szigorúan lemélyítésük időbeli sorrendjében vettem figyelembe, ez biztosította a megkutatás alakulásának objektív értékelését. Minden ilyen kutatásnál első feladatnak a *teleptani modell* megalkotását tartom. Ez a jelen esetben megtörtént (lásd az előző fejezeteket). Ezután a *hatástávolságok* meg-

határozása következett, mégpedig elsősorban a bauxitvastagságé és a $SiO_2$-tartalomé. Tapasztalataim szerint ezek a megkutatottság számára a legfontosabb változók. A Variowin-program segítségével számos variogramot szerkesztettem és iterációs eljárással határoztam meg a leginkább elfogadható variogrammodellt. Az első 15 fúrás alapján nem sikerült értékelhető variogramot szerkeszteni. Ugyanezt történt az első 35 fúrás elkészülte után is. Ezért e szakasz készletszámításához a cseresi bauxittest analógiájára 40 m hatástávolságot választottam a bauxitvatagságra. (Magát a készletszámítást a következő fejezetben ismertetem.) Még a harmadik szakasz végén (55 fúrás) sem kaptam értékelhető variogramot. A 4. szakasz végén (78 fúrás) viszont jól értékelhető variogramokat sikerült szerkeszteni, ahol a bauxitvastagság hatástávolsága 20 m lett. A következő fázisok végén 15 és 25 m között ingadozott a hatástávolság és végül a 166 produktív fúrás lemélyítése után a vizsgálati területre 28 m lett. A $SiO_2$-tartalom hatástávolságát nem sikerült pontosan meghatározni, csak annyi biztos, hogy 10 méternél rövidebb.

Figyelemre méltó, hogy 2006 végére a kiválasztott kutatási területen lemélyített összes fúrás átlagos távolsága 25 m lett. Ezen belül a produktív területen 18 m az átlagos távolság. Tehát a fúrások sűrűsége elérte a bauxitvastagság hatástávolságát.

Tizenhárom kutatási szakaszra végeztem kiértékelést a fő változókra. A készletszámításhoz szükséges három változó közül a térfogatsűrűséget nem értékeltem, mert ez az eddig elvégzett nagyszámú meghatározás alapján az egész előfordulás területén viszonylag szűk határok között ingadozik. Az átlagos bauxitvastagság, az alapterület és az átlagos minőség változásait a 10. táblázaton mutatom be. Aszimmetrikus vastagság-eloszlás esetében a Tukey-féle robusztus átlagokat használtam. A legfőbb tanulság az, hogy a fúrások számának növelésével nem szükségszerűen egyirányúak, ill. lineárisak a változások. Különösen jól látszik ez az átlagos bauxitvastagság esetében, ahol előbb erősen megnőtt az átlag, majd a 6. szakasztól kezdve fokozatosan lecsökkent és végül a 10. szakasz után stabilizálódott. E tekintetben tehát elértük az optimális megkutatottságot.

A készletszámítás biztos területe kisebb visszaesésektől eltekintve fokozatosan növekedett. Ez érthető, hiszen a produktív fúrások számának növekedése a belső terület növekedését kell, hogy eredményezze — hacsak nem téves teleptani modellt alkalmaztunk! A teljes (belső + külső) terület is fokozatosan növekedett, mert a kutatás során egyre újabb produktív területrészeket mutattak ki a fúrások. Ebben a vonatkozásban nem tekinthető a megkutatottság teljesnek, hiszen csak az utolsó két szakasz területe egyező. Fontos szempont itt az, hogy a lehatárolás még nyitott kérdéseit a bányavágatokból végzett „termelési kutatással" jóval olcsóbban és célratörőbben lehet megoldani.

A bauxit minőségét meghatározó négy fő vegyi komponens súlyozott átlaga meglepő módon az előzőeknél gyorsabban stabilizálódott és az átlagok változásai is kisebbek. (10. táblázat). Különösen mérsékeltnek tekinthetők ezek a változások, ha a komponensek analitikai hibáival vetjük őket össze. Az $Al_2O_3$-tartalom esetében a nedves elemzés analitikai hibája ±0,5%. Ugyanakkor a 2. szakasz 52,8%-a és a 13. szakasz 51,2%-a között csupán 1,6% a különbség. A 8. szakasztól kezdve már az analitikai hibán belül van az átlagok különbsége! Még kedvezőbb a helyzet a $SiO_2$ esetében, ahol a 2. és a 13. szakasz között csupán 0,1% a különbség. Az analitikai hiba ugyanakkor 0,3%. Persze itt is voltak a közbenső szakaszokban ingadozások, de a 9. szakasztól

***10. táblázat.*** A fő összetevők átlagainak változása a kutatás előrehaladásával a szorosan vett bauxitra (6. és 7. részterület)

| Szakasz | Fúrások száma | Ebből bauxitot ért | Átlagos bauxit – vastagság (m) | Biztos terület ($m^2$) | Biztos és lehetséges terület ($m^2$) | A bauxit minősége | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $Al_2O_3$ % | $SiO_2$ % | $Fe_2O_3$ % | CaO % | MgO % | Md |
| 1 | 15 | 4 | 1,2 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 2 | 35 | 13 | 4,6 | 5300 | 17 400 | 52,8 | 5,4 | 25,3 | 0,60 | | 9,8 |
| 3 | 55 | 30 | 5,2 | 11 800 | 40 400 | 52,4 | 5,5 | 24,8 | 0,68 | | 9,5 |
| 4 | 78 | 42 | 6,4 | 12 600 | 48 000 | 51,9 | 5,5 | 24,3 | 0,76 | | 9,4 |
| 5 | 98 | 60 | 6,6 | 14 100 | 46 600 | 51,9 | 5,6 | 24,3 | 0,82 | | 9,3 |
| 6 | 117 | 75 | 6,2 | 15 600 | 47 700 | 51,9 | 5,7 | 24,3 | 0,89 | | 9,1 |
| 7 | 137 | 88 | 6,0 | 14 100 | 45 600 | 51,8 | 5,7 | 24,4 | 0,90 | | 9,1 |
| 8 | 158 | 100 | 5,7 | 17 000 | 44 100 | 51,6 | 5,7 | 24,6 | 0,90 | | 9,1 |
| 9 | 178 | 115 | 5,6 | 16 700 | 47 900 | 51,5 | 5,6 | 24,6 | 0,93 | | 9,2 |
| 10 | 198 | 131 | 5,2 | 18 900 | 52 300 | 51,4 | 5,5 | 24,6 | 0,95 | | 9,3 |
| 11 | 217 | 140 | 5,2 | 20 900 | 52 200 | 51,3 | 5,4 | 24,6 | 0,98 | | 9,5 |
| 12 | 238 | 153 | 5,2 | 24 300 | 58 300 | 51,2 | 5,3 | 24,6 | 1,00 | | 9,7 |
| 13 | 265 | 166 | 5,3 | 24 700 | 53 000 | 51,2 | 5,3 | 24,6 | 1,00 | | 9,7 |

kezdve az eltérések az analitikai hibán belül voltak. A vastartalomnál is hasonló a helyzet: a 3. és a 13. szakasz átlagai között csupán 0,2% a különbség. Ugyanakkor az analitikai hiba ±0,5%. Meglepően egységes a CaO-átlagok alakulása is. Fokozatosan nő az átlag a 2. szakasztól (0,6%) a 13.-ig (1,00%). Az analitikai hiba pedig ±0,2%, alig kisebb a fenti változásnál.

A hazai alumíniumipari gyakorlatban az ún. *modulus* a legelfogadottabb minőségi értékmérő ($Al_2O_3/SiO_2$). A 10. táblázatban ezt is feltüntettem. A kutatás előre haladásával az átlagos modulus 9,8-ról fokozatosan 9,1-re csökkent, majd újra 9,7-re nőtt. A 12. szakasztól stabil az értéke.

Mindez a bauxitminőség tekintetében félrevezetően kedvező benyomást kelthet. Ne feledjük, hogy a 10. táblázat adatai a két bauxittest összes bauxitos fúrásának súlyozott átlagait jelentik. Ezen a szinten a változékonyság valóban igen mérsékelt. Ha viszont az egyes fúrások átlagait hasonlítjuk össze, akkor jóval nagyobb változékonyság adódik. Ezt jelzi a $SiO_2$-tartalom 10,0 méternél rövidebb hatástávolsága is. A Halimbán alkalmazott omlasztásos kamra/pillér fejtési módszer esetében a bauxit helyi minőségének van döntő szerepe. Ezért véleményem szerint a felszíni fúrásos megkutatottság megítélésére a fent bemutatott módszer alkalmas, de a termelés minőségi alakításához feltétlenül szükség van a föld alatti termelési kutatás adataira. Erről a következő fejezetben lesz szó.

A készletszámítás módszertani kérdéseiről „A készletszámítások tapasztalatai" című fejezetben szólok, de a kutatási szakaszonként megismételt fuzzy készletszámítás eredményeit is fel lehet használni az optimális megkutatottság megítéléséhez. Ennek eredményeit a 51. ábrán mutatom be fuzzy számok formájában. Megint az a legfőbb tanulság, hogy a fúrások számának növekedésével nem lineárisan változik a földtani készlet. A kutatás kezdeti szakaszaiban túlértékelődött a készlet, majd a fúrások számának növekedésével erősen visszaesett. Hasonlót külföldi bauxitkutatásra irányuló tanulmányutaimon is tapasztaltam. A fúrások korai befejezése tehát a készletek terén érzékeny tévedésekhez vezethet. A „fuzzy" értékelés nagy előnye, hogy a fuzzy számok segítségével a változások mértékét szemlélteti. Jól látszik, hogy a tartó maximális vagyona a legérzékenyebb a változásokra, tehát ez a legjobb változásjelző, ugyanakkor a „mag" minimális és maximális értékei adják a leginkább megbízható értékeket. A tartó legkisebb vagyonának görbéje túlzottan kiegyenlített, nem alkalmas a megkutatottság értékelésére.

Egy-egy szűkebb területrész optimális megkutatottságának megítélésére a következő módszert alakítottam ki. E területen belül fúrások lehetséges elhelyezkedését öt csoportra osztottam:

1. A fúrás a produktív terület belső („biztos") részén belül van.

2. A fúrás a belső terület határán van (1 m széles sávban).

3. A fúrás a külső, „lehetséges" területen van.

4. A fúrás a lehetséges terület külső határán van (1 m széles sávban).

5. A fúrás agyagos bauxit, vagy bauxitos agyag területére esik.

Zárójelbe tettem a fúrás minősítését, ha az extrapolálással lett meghatározva, mert ez kisebbb megbízhatóságnak felel meg. Kérdőjeles minősítést kaptak azok a fúrások, amelyek a bauxitvastagság hatástávolságán kívül találhatók („nem kategorizált terület").

***11. táblázat.*** Kiválasztott fúrások kategorizálása az előzetes információk alapján (6. és 7. részterület)

| Fúrás száma | Kutatási szakaszok | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| H-2564 | ? | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2557 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | **1** |
| H-2556 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** |
| H-2555 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** |
| H-2554 | ? | (1) | (1) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2553 | ? | (2) | (1) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2552 | ? | (3) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2551 | ? | (1) | (1) | 1 | 1 | **1** | 1 | 1 | 1 | 1 | **3** |
| H-2550 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **2** |
| H-2549 | ? | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | **4** |
| H-2548 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** |
| H-2547 | ? | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | **3** |
| H-2546 | ? | 5 | (1) | 1 | 1 | **1** | 1 | 1 | 1 | 1 | **1** |
| H-2545 | ? | 5 | (4) | (4) | (4) | (4) | (4) | (4) | 4 | **4** | . |
| H-2544 | ? | ? | 5 | ? | ? | ? | ? | 5 | 3 | **2** | . |
| H-2543 | 5 | 5 | 5 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **5** | . |
| H-2542 | 5 | 5 | 5 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **4** | . |
| H-2541 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | 5 | **2** | . |
| H-2540 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **2** | . |
| H-2539 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | **4** | . |

1. produktívnak minősített terület, 2. produktív terület határa, 3. lehetségesnek minősített terület, 4. lehetséges terület külső határa,5. improduktívnak minősített terület, ( ) extrapolálással minősített terület,? nem kategorizált terület (hatástávolságon kívül), a vastag számok a fúrással észlelt kategóriáknak felelnek meg.

Ezután a készletszámítási térképsorozat alapján meghatároztam, hogy az adott fúrás helye a lemélyítése előtt kutatási szakaszonként melyik kategóriába került. A területrészek megítélése a kutatás előrehaladtával természetesen megváltozott. Sorrendben az utolsó érték a fúrás lemélyítését követő, tényleges helyzetet fejezi ki. Húsz véletlenül kiválasztott fúrás kategorizálásának alakulása látható a 11. táblázaton. Az adatsor szemléletesen mutatja be, hogy egy-egy szűkebb területrész minősítése mennyire volt reális. Minél több változás érte a minősítést, annál bizonytalanabb volt az értékelés. Egy helyi területrész minősítését akkor tekintem megbízhatónak, ha a fúrást közvetlenül megelőző szakaszok előzetes minősítése nem, vagy csak alig változott és megegyezett a fúrás által ténylegesen észlelt kategóriával.

*12. táblázat.* A fúrások összesített eredményessége az előzetes valószínűségekkel összevetve

| | A fúrások száma | | Σ |
|---|---|---|---|
| | 7. szakasz | 12. szakasz végén | |
| Pozitív eltérés | 41 | 56 | 97 |
| Megegyezés | 49 | 43 | 92 |
| Negatív eltérés | 12 | 2 | 14 |
| Összesen | 102 | 101 | 203 |

A kutatás előrehaladásával természetesen egyre kevesebb lesz a nem kategorizálható és a csak extrapolálással kategorizált fúrás. Optimális megkutatás esetén ezeknek teljesen el kellene tűnni. Ettől természetesen el lehet tekinteni, ha a még nyitott minősítést célszerűbbnek látjuk a termelési kutatás során megoldani.

Általánosabb következtetésekhez juthatunk, ha egy kiválasztott területrész összes fúrását több szakasz együttesére értékeljük (12. táblázat). A táblázaton azt láthatjuk, hogy a 7., ill. a 12. kutatási szakasz végén hány fúrásnál észleltünk a megelőző kategorizáláshoz képest teljes egyezést, pozitív, ill. negatív eltérést. Láthatjuk, hogy a vizsgálati területen a legtöbb változás pozitív volt ill teljes egyezést eredményezett. A negatív eltérések száma ugyanakkor jelentéktelenre csökkent. Mindez óvatos, konzervatív modellezésnek felel meg.

Tapasztalataim szerint a bányászat számára kiemelten fontos a lehatárolás minél biztosabb előrejelzése. Ezért tanácsos azokon a helyeken, ahol a minősítés új fúrás lemélyítése során hirtelen megváltozott, kiegészítő felszíni fúrást mélyíteni, vagy a termelési kutatás során alaposabban megkutatni. Még így sem zárhatók ki teljesen a váratlan negatív meglepetések, például a szorosan vett bauxit hirtelen kimaradása két produktív fúrás között hatástávolságon belül.

## A föld alatti termelési kutatás tapasztalatai

A halimbai bauxit bányászati kitermelése 1952 óta folyamatosan tart. A cseresi bányaüzem 1952 és 1972 között termelt. Az igen szigorú minőségi feltételek miatt sok, ma kitermelhetőnek tekinthető bauxit maradt vissza a bányában. Az északi terület (Halimba II–V.) kitermelése 1960-ban kezdődött és 2003-ban befejeződött. A déli, Halimba II. DNy-nak nevezett területen 2003-ban indult meg a termelés. A termelés éves és összesített mennyiségi és minőségi adatait a 13. táblázat tartalmazza. A termelés minősége az évek folyamán a timföldgyárak követelményeinek megfelelően alakult.

A halimbai előfordulás rendkívül változékony felépítése miatt igen hamar megalakult a bányák földtani szolgálata. Zenkovics Ferenc, Bíró Béla, Erdélyi Tibor, Mérai Károly és végül Jankovics Bálint vezetése alatt kiépült a termelés számára létfontosságú *„termelési kutatás”* rendszere, amely mára nemzetközi viszonylatban is kiemelkedő színvonalat ért el (ERDÉLYI T. 1983, MÉRAI et al.1982)

A vágatokban napi rendszerességgel 5 méterenként talp és főtefúrásokat végeznek, lehetőleg a fekü és a fedő eléréséig. 2 méteres mélységközökben mintákat vesznek a bauxitból, amelyeket neutronaktivációs módszerrel $Al_2O_3$-ra és $SiO_2$-ra megelemeznek. A helyi földtani felépítés bonyolultságától függően a vágatoktól oldalirányban vízszintes fúrásokat végeznek, de ezeknek nincs előre meghatározott távolsága. A bauxittestek szélein, vagy tektonikai vonalak közelében Turmag-rendszerű sűrített levegős fúrógéppel 50–60 métert fúrnak előre. Ekkor is 2 méterenként vesznek mintákat. A vegyelemzési eredményeket jól áttekinthető számítógépes adatbázisban rögzítik. A fúrások koordinátáit a bányamérő szolgálat beméri és helyüket a különböző léptékű bányatérképeken feltüntetik és bányaföldtani szelvényeket szerkesztenek. A termelési kutatásnak ez a rendszere rendkívül hatékonyan segíti nemcsak a termelést, hanem az évenként készített készletszámításokat is. Külön figyelmet fordítanak a vágatokkal harántolt tektonikai vonalak észlelésére és térképi dokumentálására.

Annak szemléltetésére, hogy a termelési kutatás nyomán milyen mértékben megnőnek ismereteink a bauxitösszlet felépítéséről, a bányaüzemtől kapott adatok alapján szelvényeket szerkesztettem. Az üzemi szelvényektől eltérően ezeknél „A bauxitösszlet kőzettani felépítése és szövete” című fejezetben ismertetett kőzetfajtákat különböztettem meg (52. ábra). A szelvények alapján olyan részletekre is fény derült, amelyeket csak a felszíni fúrások alapján nem lehet meghatározni. E szelvényeknek az a tanulsága, hogy még az ilyen rendkívül sűrű felszíni fúrási hálózat segítségével sem kaphatunk teljes részletességű képet a bauxitösszlet kőzettani felépítéséről. Csak első közelítés, amit a termelési kutatás tesz teljessé.

Az északi területen összesen 47 000 fúrás készült 235 000 méter összterjedelemben. Az új Halimba II. DNy üzemben 2006. december 7-ig 8580 kézi főte-, talp-, oldal- és előfúrás létesült 48 803 m terjedelemben. Ezen felül 790 gépi (Turmag) fúrás készült 20 530 m összhosszban. A cseresi üzemből sajnos nem maradtak meg ezirányú adatok.

Előfordult hogy a talpfúrásokkal nem sikerült a fekü képződményeket elérni. Ilyen esetekben geoelektromos méréseket alkalmaztak, amelyekkel sikerült a fekü lefutását kellő pontossággal meghatározni. E méréseket a pécsi uránbányák geofizikai csoportja készítette el. A bányászat igényeinek megfelelően rendszeresen készítenek ún. szelettérképeket a kitermelhető érc fedő és fekü szintvonalainak feltüntetésével.

A bányageológiai szolgálat rendszeresen hidrogeológiai méréseket is végez, ezekről a „Hidrogeológiai tapasztalatok” című fejezetben számolok be. Azokon a helyeken, ahol a bauxitösszletre eocén szenes agyag

***12. táblázat.*** A fúrások összesített eredményessége az előzetes valószínűségekkel összevetve

| Év | Cseres | Halimba II | | | | | Halimba III | | | | | Halimba II DNy | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | termelés | termelés | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | Mod. | termelés | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | Mod. | termelés | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | MgO | Mod. |
| 1953 | 21 600 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1954 | 71 066 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1955 | 75 497 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1956 | 82 980 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1957 | 85 263 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1958 | 100 477 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1959 | 101 211 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1960 | 126 774 | 48 160 | 49,91 | 9,48 | | 5,26 | | | | | | | | | | | |
| 1961 | 133 492 | 120 041 | 50,60 | 8,88 | | 5,70 | | | | | | | | | | | |
| 1962 | 130 990 | 158 118 | 50,34 | 10,28 | | 4,90 | | | | | | | | | | | |
| 1963 | 143 385 | 128 402 | 50,92 | 9,02 | | 5,56 | | | | | | | | | | | |
| 1964 | 150 119 | 191 552 | 50,44 | 8,97 | | 5,62 | | | | | | | | | | | |
| 1965 | 179 306 | 224 223 | 50,10 | 9,33 | | 5,37 | | | | | | | | | | | |
| 1966 | 223 230 | 218 555 | 50,30 | 9,51 | | 5,29 | | | | | | | | | | | |
| 1967 | 186 590 | 222 291 | 51,23 | 8,13 | | 6,30 | | | | | | | | | | | |
| 1968 | 250 599 | 163 277 | 50,93 | 8,58 | | 5,94 | 100 035 | 51,96 | 5,93 | | 8,76 | | | | | | |
| 1969 | 131 729 | 192 201 | 50,91 | 9,18 | | 5,55 | 162 519 | 49,33 | 6,96 | | 7,09 | | | | | | |
| 1970 | 136 058 | 196 452 | 51,32 | 8,88 | | 5,78 | 174 077 | 49,84 | 7,43 | | 6,71 | | | | | | |
| 1971 | 103 329 | 205 918 | 51,69 | 8,55 | | 6,05 | 209 873 | 50,77 | 5,07 | | 10,01 | | | | | | |
| 1972 | 17 825 | 223 130 | 52,20 | 8,28 | | 6,30 | 265 067 | 51,33 | 5,80 | | 8,85 | | | | | | |
| 1973 | | 223 074 | 50,80 | 8,89 | | 5,71 | 352 066 | 50,53 | 6,66 | | 7,59 | | | | | | |
| 1974 | | 241 442 | 47,89 | 10,97 | | 4,37 | 313 000 | 49,77 | 6,55 | 2,01 | 7,60 | | | | | | |
| 1975 | | 225 700 | 48,57 | 11,03 | | 4,40 | 474 500 | 52,34 | 6,46 | 1,38 | 9,59 | | | | | | |
| 1976 | | 19 930 | 48,61 | 11,15 | | 4,36 | 755 077 | 50,65 | 7,91 | 1,22 | 6,40 | | | | | | |
| 1977 | | | | | | | 850 200 | 50,53 | 8,00 | 1,09 | 6,32 | | | | | | |
| 1978 | | | | | | | 900 079 | 49,78 | 8,41 | 1,16 | 5,92 | | | | | | |
| 1979 | | | | | | | 860 366 | 49,97 | 8,25 | 1,14 | 6,06 | | | | | | |
| 1980 | | | | | | | 864 034 | 49,86 | 7,91 | 1,31 | 6,30 | | | | | | |
| 1981 | | | | | | | 820 087 | 49,72 | 7,44 | 1,60 | 6,68 | | | | | | |
| 1982 | | | | | | | 704 459 | 49,67 | 7,30 | 1,29 | 6,80 | | | | | | |
| 1983 | | | | | | | 796 018 | 48,73 | 7,98 | 1,38 | 6,11 | | | | | | |
| 1984 | | | | | | | 850 039 | 49,27 | 8,33 | 0,80 | 5,91 | | | | | | |
| 1985 | | | | | | | 850 348 | 49,67 | 7,96 | 0,83 | 6,24 | | | | | | |
| 1986 | | | | | | | 850 239 | 49,04 | 8,53 | 1,18 | 5,75 | | | | | | |
| 1987 | | | | | | | 860 020 | 49,58 | 8,39 | 1,17 | 5,91 | | | | | | |
| 1988 | | | | | | | 860 000 | 49,41 | 8,82 | 1,20 | 5,60 | | | | | | |
| 1989 | | | | | | | 370 100 | 49,69 | 9,16 | 1,02 | 5,42 | | | | | | |
| 1990 | | | | | | | 450 000 | 49,26 | 9,59 | 0,95 | 5,14 | | | | | | |
| 1991 | | | | | | | 529 700 | 50,36 | 8,57 | 0,85 | 5,88 | | | | | | |
| 1992 | | | | | | | 422 329 | 50,53 | 8,49 | 0,80 | 5,95 | | | | | | |
| 1993 | | | | | | | 470 038 | 50,87 | 8,01 | 0,80 | 6,35 | | | | | | |
| 1994 | | | | | | | 270 100 | 50,34 | 7,94 | 0,78 | 6,34 | | | | | | |
| 1995 | | | | | | | 288 003 | 50,93 | 8,06 | 0,85 | 6,32 | | | | | | |
| 1996 | | | | | | | 301 004 | 50,45 | 8,34 | 0,85 | 6,05 | | | | | | |
| 1997 | | | | | | | 270 005 | 50,58 | 8,43 | 0,43 | 6,00 | | | | | | |
| 1998 | | | | | | | 287 006 | 50,91 | 8,38 | 0,57 | 6,08 | | | | | | |
| 1999 | | | | | | | 274 007 | 50,59 | 8,19 | 0,68 | 6,18 | | | | | | |
| 2000 | | | | | | | 290 008 | 51,02 | 8,49 | 0,68 | 6,01 | | | | | | |
| 2001 | | | | | | | 280 002 | 50,22 | 8,01 | 0,60 | 6,27 | | | | | | |
| 2002 | | | | | | | 190 000 | 50,87 | 7,32 | 1,20 | 6,95 | | | | | | |
| 2003 | | | | | | | 210 012 | 51,02 | 7,25 | 0,95 | 7,04 | 40 010 | 51,28 | 7,12 | 0,70 | 0,34 | 7,20 |
| 2004 | | | | | | | | | | | | 262 093 | 50,90 | 7,09 | 1,10 | 0,52 | 7,18 |
| 2005 | | | | | | | | | | | | 312 500 | 50,24 | 7,16 | 1,10 | 0,55 | 7,02 |
| 2006 | | | | | | | | | | | | 315 013 | 50,01 | 7,78 | 1,06 | 0,50 | 6,43 |
| Össz | 2 451 520 | 3 002 466 | 50,48 | 9,28 | n,a, | 5,44 | 17 774 417 | 50,03 | 7,95 | 1,20 | 6,28 | 926 616 | 50,39 | 7,35 | 1,07 | 0,16 | 6,86 |
| Minősített Halimba | | | | | | | 21 706 499 | 50,11 | 8,12 | 0,87 | 6,17 | | | | | | |
| Mindösszesen: | | | | | | | | | | | 24 158 019 | | | | | | |

települt többször is előfordult öngyulladás és bányatűz. Ez a folyamatos termelésnek komoly gondokat okozott. A geológiai szolgálat feladata volt hőmérsékleti szondák telepítése a tűzveszély előrejelzése céljából. A mérési eredmények alapján termikus izovonalas térképeket szerkesztettek, amelyek segítségével előre lehetett jelezni a várható tűzgócokat.

## A készletszámítások tapasztalatai

A halimbai előforduláson az első korszerű készletbecslés 1950-ben a cseresi zárójelentés keretében készült. Barnabás Kálmán főgeológus vezetése alatt. A számításokban én is résztvettem.

A *számbavételi határok* az ajkai timföldgyár követelményei miatt igen szigorúak voltak: $Al_2O_3/SiO_2$-arány 10 felett, minimális $Al_2O_3$-tartalom 50%, maximális CaO-tartalom 0,5%. Tekintettel arra, hogy az utóbbi követelmény betartása esetén jelentéktelen készlet maradt volna, úgy döntött a Maszobal vezetése, hogy a CaO-tartalmat nem kell figyelembe venni. Ez a változat már gazdaságosan kitermelhető reális földtani készletet eredményezett. Egy második készletváltozat is kidolgozásra került 6 feletti modulussal és változatlan minimális $Al_2O_3$-tartalommal. Érdekes, hogy a minimális ércvastagságra nem adtak meg számbavételi határt, így aztán több 1,0 méteres fúrás és három 0,5 méteres ércvastagságú fúrás (Halimba H–102, –117, –200) is szerepel a készletszámításban. Az érctestet ún. „becslési tömbökre" osztották, melyek 1–11 fúrásból álltak. A tömbhatárokat a szélső produktív fúrások egyenesekkel való összekötésével határozták meg. Egy további számítást is végeztek a vastagságvonalas térkép alapján, ahol a szélső körvonalat interpolálással 0,5 m ércvastagságnál vették fel. Az érvényes szovjet kategorizálási előírásnak megfelelően az egyenesekkel határolt tömböket az $\mathbf{A_2}$ kategóriába, a külső, 0,5 méteres vastagságvonallal határolt készletet a $\mathbf{C_1}$ kategóriába sorolták.

A bauxitminőség meghatározása 1 méteres fúrómagok átlagolása alapján történt. A magkihozatal mértéke nem került meghatározásra. A fúrásonkénti átlagokat a vastagság szerint súlyozva számították ki az ún. méterszázalékok segítségével. Ugyanígy történt az egyes tömbök átlagminőségének a kiszámítása. Végül a teljes készlet átlagos minőségét számították ki a tömbök szerinti súlyozott átlagolással. Az $Al_2O_3$-, $SiO_2$- és a CaO-átlagokat határozták meg. Az érc térfogatsúlyát 2,0 t/m$^3$-nek vették fel. (A jelentés nem közli, hogy nedves, vagy légszáraz bauxitról van-e szó).

A kiértékelés szerint a telep északkeleti részét egy törésvonal szeli át. E mentén egy 5 m széles meddő zónát vettek fel, amit a készletszámításból kihagytak.

Mindezek alapján a cseresi telep területén 10 feletti modulusú ércre 667 000 t, $A_2$ kategóriájú és 383 000 t $C_1$ kategóriájú, összesen 1 050 000 t földtani készletet határoztak meg 17,9 átlagos modulussal. A 6 feletti modulusra végzett készletszámítás eredménye összesítve 1 293 000 t volt 13,1 átlagos modulussal (földtani vagyon). Tehát a lazább számbavételi határ nem rontotta le érdemlegesen az átlagos minőséget. Az átlagos CaO-tartalom 2,2% lett, ami jó összhangban van mostani saját számításaim eredményeivel (lásd az 5. táblázatot). Mai szemmel nézve korrekt, az akkori előírásoknak megfelelő volt ez az első készletszámítás.

Az ezután készült halimbai zárójelentések a következő számbavételi határok szerint készültek: $Al_2O_3$ több mint 42%, modulus több mint 2,6, összes kén kevesebb mint 0,6%, minimális bauxitvastagság 1,0 m. A karbonáttartalomra nem volt megkötés. Az 1990-es évek elején szigorodtak a számbavételi feltételek: $Al_2O_3$ több mint 42%, modulus több mint 4,0, összes kén nem változott, CaO+MgO kevesebb mint 3,0%, minimális bauxitvastagság 2,0 m. Az 1990-es évek közepétől kezdve a Bakonyi Bauxitbánya Kft.-nél felhagytak a merev számbavételi határok alkalmazásával és egy-egy telep esetében több változatban készült készletszámítás különböző számbavételi határokkal. Ezek közül azt fogadták el, amely a legnagyobb gazdasági eredményt ígérte.

A „földtani tömb" módszer mellett a háromszög, a sokszög (Boldürev-féle) és a vastagságvonalas módszereket alkalmazták. A készletek kategorizálására a Központi Földtani Hivatal, majd a Magyar Geológiai Szolgálat adott ki irányelveket, melyeket ismerteknek tételezek fel (A, B, $C_1$, $C_2$ ismeretességi kategóriák). Ezek empirikus tapasztalatokon alapultak, mert egyszerűen nem volt lehetőség a hagyományos számítási módszerekkel a bizonytalanság, vagy más néven megbízhatóság számszerű mértékének mennyiségi meghatározására.

Az éves kutatások következtében keletkezett változásokról a Bauxitkutató Vállalat, a bányászati tevékenység következtében beállt változásokról (termelés, termelési veszteség, hígulás, készletnövekedés, készletcsökkenés, átszámítás stb.) a bánya földtani szolgálata készített évente ún. *készletmérleget*.

A bányában kezdetben a földtani tömb és a sokszög módszereket alkalmazták, majd 1976-tól áttértek az ún. szintenkénti készletszámításra. Ennél a módszernél minden egyes termelési szint külön készletszámítási tömböt alkotott. A módszer számos előnye mellett az adathalmaz bővülése miatt egyre áttekinthetetlenebbé vált. Ezért az utóbbi években olyan módszerre tértek át, ahol az egymás feletti termelési szintek egyetlen készletszámítási tömbben jelennek meg.

A sokéves termelési tapasztalatok több fontos módszertani újítást tettek lehetővé. Így elvetették a bauxit lehatárolásának eddigi merev elveit (felezés stb.) és olyan körvonalat vettek fel, amely a termelési kutatás és a felszíni fúrások információinak leginkább megfelelt. A tömbök belső határai a kitermelés tervezett alakulásához igazodnak. A tömb átlagos bauxitvastagságát a termelési kutatás során meghatározott helyi vastagság átlagaként határozták meg. A kiékelődési vastagságcsökkentést elvetették, mert ezt objektíven nem lehet meghatározni. Ezzel saját tapasztalataim is megegyeznek. Az $Al_2O_3$ és $SiO_2$ tömbátlagait a bauxitvastagsággal súlyozva számították ki. A kitermelésre kerülő gyengébb minőségű közbetelepüléseket (agyagos bauxit) szin-

tén figyelembe vették az átlagolásnál. Halimbán a bauxit bányanedves térfogatsúlya nagyszámú mérés átlagaként 2,29 tonna/$m^3$. Az eredményeket 1:1000 méretarányú térképeken ábrázolták. Személyes tapasztalataim szerint ez a módszer felel meg legjobban a halimbai bányaföldtani adottságoknak.

A következőkben a *bizonytalanság* meghatározására irányuló saját módszertani tapasztalataimat ismertetem. Véleményem szerint minden készletszámítás alapfeltétele egy megbízható *teleptani modell* kialakítása. Ez már a cseresi készletszámításnál sikerült, a későbbi bányászati feltárások teljes mértékben igazolták (lásd „A bauxit-előfordulás kialakulása" című fejezetet). Ezt a modellt az előfordulás északi részére végzett készletszámításokhoz már csak finomítani kellett. Komoly probléma jelentkezett, amikor 1990-ben megindult a Halimba II. DNy bauxitjának részletes kutatása. Szélsőségesen eltérő teleptani nézetek láttak napvilágot. E vita a fúrások számának növekedésével, majd a bányászat megindulásával fokozatosan elcsitult. A kialakult és a bányászati feltárásokkal igazolt teleptani képet a monográfia első részében ismertettem.

Véleményem szerint a készletszámítás megkezdése előtt még a *telepfolytonosság* kérdését kell tisztázni. Arról van szó, hogy két szomszédos produktív fúrás között hatástávolságon belül minden esetben folytonos-e a bauxittest? A válasz erre a közelmúltig empirikus volt: az adott előforduláson szerzett tapasztalatok alapján határozták meg nagyjából azt a távolságot, ameddig két fúrás között az érc folytonosságát lehetett feltételezni. Ez történt a halimbai előfordulásnál is és az esetek többségében bevált. Ugyanakkor nem várt negatív meglepetések is előfordultak.

A hetvenes években Matheron professzor által kidolgozott „regionalizált valószínűségi változók elmélete" (geostatisztika) a *variogramok* segítségével lehetőséget adott annak meghatározására, hogy milyen távolságig terjed az autokorreláció két térbeli pont között egy bizonyos valószínűségi változóra. Ez óriási előrelépést jelentett.

A Variowin-program segítségével több száz variogramot készítettem a halimbai déli terület részterületeire. A készletszámítás szempontjából a szorosan vett bauxit vastagsága a legfontosabb. A részterületenkénti hatástávolságokat a 12. ábrán mutattam be. Ugyancsak fontosnak tartottam a $SiO_2$ hatástávolságainak meghatározását. A kapott eredményeket a 23. ábra szemlélteti. Mindkét változó esetén meglepően nagyok a hatástávolságok különbségei az egyes részterületek között.

Véleményem szerint készletszámítás esetén csak a *hatástávolságig* szabad két fúrás között interpolálni, ill. egy fúrásból kiindulva extrapolálni. A déli terület részletes kutatása során ez a feltétel túlnyomórészt teljesült (lásd a módszertani és a termelési kutatás tapasztalataival foglalkozó fejezetet). A bányászati feltárások többnyire igazolták a hatástávolságokat. Néhány kellemetlen meglepetésre mégis sor került. Példaként a keleti főtelep (7. részterület) északi részét mutatom be (53. ábra), ahol két szomszédos, egymástól 22 méterre levő produktív fúrás között egy kelet–nyugat irányú 10–15 m széles sávban teljesen kimaradt a bauxit. A folytonosságot leginkább meghatározó bauxitvastagság hatástávolsága e területrészre 23 m-nek adódott. Hasonló, 5–15 m széles „meddő" sávok a telepek más részein is előfordultak.

Ezek az esetek a variogramok számításának újragondolására késztettek. Rájöttem arra, hogy *a hatástávolságokat is valószínűségi változóknak kell tekinteni!* A variogram modellek ugyanis a számításba vett terület *átlagértékét* fejezik ki. Ettől a helyi hatástávolságok szignifikánsan eltérhetnek. Ezért nagyfokú térbeli változékonyság esetén — és ez a helyzet a halimbai előforduláson — a szokásos variogramok mellett helyi, *lokális variogramokat* is célszerű szerkeszteni. Ennek lehetőségét elsőnek SEN (1998) vetette fel. A földtani adottságokhoz jobban alkalmazkodó módszert a közelmúltban ismertettem (BÁRDOSSY 2006). A változók nagyfokú változékonysága véleményem szerint a készletszámítás bizonytalanságának egyik fő forrása.

Tekintsük át ezután a Halimbán eddig alkalmazott készletszámítási eljárásokat. A korai számítások mindegyike matematikai tekintetben *determinisztikus jellegű*. A kapott eredmények pontbecslések. *Sztochasztikus módszer* alkalmazása esetén a bizonytalanság egy részét intervallum-becsléssel lehetne meghatározni. Erre szolgálnak az ún. *konfidencia-intervallumok*. Sajnos a halimbai készletszámítások ilyen számításokat nem tartalmaznak, de más hazai nyersanyagtelepekre sem számítottak tudomásom szerint konfidencia-intervallumokat. Ennek okát abban látom, hogy a konfidencia-intervallumok kiszámítása többletmunkát és bizonyos mértékű statisztikai előismereteket igényel. A geostatisztikában alkalmazott *krigelés* a bizonytalanság további részének meghatározására alkalmas („kriging standard deviation"), de a számítások bonyolultsága, időigényessége és matematikai jártasságot feltételező igénye miatt nem honosodott meg hazánkban.

Olyan módszer bevezetésére volt tehát szükség, amely viszonylag egyszerű, jól áttekinthető és képes a teljes bizonytalanság kiszámítására. Erre alkalmas a *bizonytalan halmazok elmélete* (fuzzy set theory). E módszert Fodor Jánossal írt könyvünkben részletesen ismertettük (BÁRDOSSY, FODOR 2004). A bauxit-készletszámításra történő alkalmazást pedig R. Szabó Istvánnal és Varga Gusztávval közösen mutattuk be (BÁRDOSSY et al. 2001, 2003). Ezért itt csak a legfontosabb tapasztalatokat ismertetem.

Alapvető tételem az, hogy a készletszámítás teljes bizonytalanságát csak úgy tudjuk kiszámítani, ha a bemenő alapadatok (input data) szintjén határozzuk meg a bizonytalanságot, és ezeket visszük tovább a hibaterjedés törvényei szerint a készletek mennyiségi és minőségi összesítéséig. Erre alkalmasak az ún. *fuzzy*

*számok*. Bauxit-készletszámítás esetén a három legfontosabb bemenő változó a térfogatsűrűség, a produktív alapterület és az átlagos bauxitvastagság. Ehhez jönnek a kémiai összetételre vonatkozó számítások.

A *térfogatsűrűség* esetében a bemenő adatok bizonytalansát az ún. laboratóriumi analitikai hiba adja meg, amely sok éves tapasztalatok szerint ±5 relatív %-nál kevesebb. További, de kisebb hibaforrás a minták száma és eloszlása (reprezentativitás). A halimbai előfordulás esetében ezek szerepe elhanyagolható, mert Halimbán eddig százat meghaladó számú térfogatsűrűség-meghatározás történt. Ezek megerősítésére szolgáltak a bányában végzett 0,5–1,0 $m^3$-es térfogatsűrűség-mérések. A vizsgálati terület egészére érvényes átlagos térfogatsűrűséget és annak bizonytalanságát fuzzy számmal fejeztük ki. A fuzzy szám magjának közepe a számtani közép (2,29 tonna/$m^3$). A laboratóriumi vizsgálati eredmények eloszlása szimmetrikus lévén ferdeségi korrekcióra nem volt szükség. Erre mértük fel kétoldalt az analitikai hibát, majd a 95% konfidenciaszintre számított konfidencia-intervallumot, amely 2,10-től 2,45-ig terjed. A fuzzy szám tartójának két végpontja a laboratóriumi vizsgálat legkisebb és legnagyobb értéke, az esetleg előforduló kiütő értékek elhagyásával (54. ábra). Ez a jelen esetben 2,0 és 2,5 tonna/$m^3$.

Itt jegyzem meg, hogy fuzzy számot különböző határértékekkel lehet szerkeszteni, a változékonyság mértékétől függően. Így tapasztalataim szerint erősen változékony változók esetében célszerű a fuzzy szám magjának hosszára az analitikai hibát, plusz az átlag standard hibáját felvenni. A tartó hosszát ilyenkor a konfidencia-intervallummal határoztam meg. Kevéssé változékony változó esetében a mag hosszát az analitikai hibával plusz a 95%-os konfidencia-intervallummal adtam meg. A tartó két végpontja ilyenkor a legkisebb és a legnagyobb érték (a kiütő értékek elhagyásával!). Bármilyen módon szerkesztünk átlagot kifejező fuzzy számot, a határértékeket közölni kell, hiszen ez a fuzzy számok összehasonlíthatóságának alapja.

Az *alapterület* meghatározásakor tapasztalataim szerint legcélszerűbb először a *biztosnak tekinthető területet* meghatározni a számbavételi határt elérő és meghaladó szélső fúrások egyenesekkel való összekötésével. Ez lesz a fuzzy szám tartójának minimum értéke. A *lehetséges maximális területet* ebben az esetben a „biztos" körvonalhoz legközelebbi azon fúrások összekötése adja, amelyek nem érték el a számbavételi határt. Tapasztalataim szerint a hatástávolságot elérő fúrási sűrűség esetén ez a szerkesztés érdemben korlátozza a terület meghatározás bizonytalanságát, de gyakorlati tapasztalataim szerint alternatív összekötési változatok is előfordulhatnak. Ilyenkor a teleptani modellnek leginkább megfelelő változatot szoktam alkalmazni. A bizonytalanság annál nagyobb lehet minél változékonyabb a körvonal és minél nagyobb a fúrások távolsága (a hatástávolságon belül).

Előfordul, főleg a kutatás kezdeti szakaszában, hogy a produktív fúrások egy részétől a legközelebbi „lehatároló" improduktív fúrások a hatástávolságnál távolabb vannak. Ilyenkor *extrapolálásra* van szükség a szélső produktív fúrástól, mégpedig a hatástávolságig. Ez a helyzet látható a keleti fő telep (7. részterület) északnyugati lehatárolásánál a 3. szakasz végén (55. ábra). Ez természetesen a fentieknél jóval megbízhatatlanabb lehatárolás, de a kutatás előrehaladásával ezek az extrapolált határok fokozatosan megszűnnek. Ez történt fenti példánk esetében is, ahol a kérdéses rész lehatárolására további fúrásokat mélyítettek. A 12. szakasz végére kialakult helyzet látható az 56. ábrán, amikor erre a területrészre már 237 fúrás került. Még így is maradt az érctest északnyugati szélén extrapolálással lehatárolt rész.

A fuzzy szám magját korábban földtani szelvények és vastagságvonalas térkép alapján, mint a „földtanilag legelfogadhatóbb" területet határoztam meg. A halimbai bányászati tapasztalatok szerint viszont számos esetben a kitermelhető bauxit közvetlenül a lehatároló improduktív fúrásig terjedt. Ez főként akkor fordult elő, ha a külső lehatároló fúrásban harántolt bauxit jó minőségű volt, csak a vastagsága nem érte el a 2,0 méteres számbavételi határt. Más esetekben épen ellenkezőleg a szélső produktív fúrástól néhány méterre hirtelen kiékelődött a bauxit. Ezeket a helyeket előre megjósolni nem lehetett, tehát feleslegesnek tartom a fáradságos és időigényes földtani szerkesztéseket. Statisztikusan teljesen megfelelelő szerintem, ha a szélső területsáv felével növeljük meg a belső (biztos) területet. E meghatározás hibája értelemszerűen annál kisebb, minél kisebb a külső (lehetséges) terület.

Korábban eléggé jelentős hibaforrás volt a planiméteres területmérés. Az AutoCad-program bevezetésével ez a hibaforrás teljesen megszűnt. Ezért a fuzzy szám magja egyetlen pont lett. Csak akkor szükséges magintervallumot felvenni, ha a lehatárolás extrapolálással történt. Ennek a többletbizonytalanságát veszi figyelembe a magintervallum, melynek hossza az extrapolált terület 10–20%-a lehet.

Az *átlagos bauxitvastagság* helyes meghatározása a vastagság nagyfokú változékonysága miatt (lásd „A bauxitelőfordulás és a bauxittestek kiterjedése, vastagsága" c. fejezetet) kiemelt fontosságú. E miatt az ún. belső területen sem elegendő a vastagság számtani közepét kiszámítani, hanem célszerű gyakorisági hisztogramot szerkeszteni és az ún. ferdeségi mutatót kiszámítani. Az SPSS-programcsomag segítségével ez könnyen végrehajtható. Tapasztalataim szerint a halimbai előforduláson a bauxitvastagság ferdesége szinte kivétel nélkül pozitív előjelű, ami azt jelenti, hogy az eloszlás a nagy vastagságok felé elnyúlt. Ebben az esetben a számtani közép a ténylegesnél nagyobb lesz. Ennek helyreigazítására ún. robusztus átlagok szolgálnak. Tapasztalataim szerint a lehetséges robusztus átlagok közül a Tukey-féle felel meg legjobban az itteni földtani adottságoknak.

A fuzzy szám magjának közepe a belső terület bauxitvastagságainak ily módon korrigált számtani közepe lesz. A vastagság meghatározás műszaki hibája átlagosan ±10 cm, amit a számtani közép két oldalára mérünk fel. Ehhez csatlakozik a 95%-os konfidenciaszintre számolt konfidencia-intervallum. A fuzzy szám tartójának alsó szélső értéke — értelemszerűen — a számbavételi határ, jelen esetben 2,0 m. A felső határnak a 95%-ra redukált legnagyobb vastagságot vettem fel, ami a kiütő értékek kiszűrését szolgálja. A térfogatsűrűség, az alapterület és az átlagos vastagság fuzzy számainak „fuzzy szorzata"adja meg a *készlet mennyiségét* tonnában. Az 57. ábrán a kutatás 2., 5. és 11. szakasza után nyert értékek szerepelnek. Figyelmet érdemel, hogy az utóbbi kettő között már nincs érdemi különbség. A csökkenő bizonytalanságot jelzi a fuzzy számok tartójának rövidülése.

Az általam javasolt módszer egyik fő haszna az, hogy a vagyon bizonytalanságát nem szubjektív megítélés alapján, az ismeretességi kategóriákkal fejezzük ki, hanem a földtani vagyon fuzzy számának területével, vagy még egyszerűbben a mag hosszával. A bizonytalanságot leolvashatjuk tonnákban, vagy megadhatjuk relatív százalékban — az átlaghoz viszonyítva. Ez a hagyományos módszerekhez képest igen nagy előnyt jelent. A tartó két szélső értéke azt a két mennyiséget adja meg tonnában, aminél a készlet a legkedvezőtlenebb, illetőleg a legkedvezőbb véletlen találati eloszlás esetében sem lehet kisebb, vagy nagyobb. Ez aztán a fentiekkel azonos módon relatív százalékokká számítható át. Az 58. ábrán e relatív bizonytalanságok alakulása látható. Természetesen igen nagy a különbség a mag és a tartó által kifejezett bizonytalanság között. Jól látszik, hogy a megkutatás előrehaladásával milyen mértékben csökken a készlet bizonytalansága.

Előfordul, hogy a kutatási hálózat besűrítése ellenére maradnak a kimutatott bauxittesten belül kisebb területrészek, amelyeken a környező produktív fúrások hatástávolságai nem érnek össze. Ez látható az 53. ábrán, amely a keleti fő bauxittest északnyugati részét ábrázolja.

Szigorú értékelést alkalmazva ezeket a területrészeket ki kellene hagyni a készletszámításból. A Bayes-elv féle előzetes valószínűségek segítségével van megoldás erre a problémára: A Bayes–Laplace-képlet segítségével (BÁRDOSSY 2005) kiszámítható e részterületekre a számbavételi határt elérő bauxit jelenlétének valószínűsége és így a készlet a teleptanilag elfogadott bauxittest egészére kiszámítható. Hangsúlyozni szeretném, hogy ezek csak valószínűségek, melyek az esetek többségében igazolódtak, de ahogy az ábrán láthatjuk, szélsőségesen szabálytalan körvonalak esetén improduktívaknak is bizonyulhattak.

A fentiekkel azonos módon történik a *bauxitminőség* fuzzy számainak megszerkesztése. Az 59. ábrán az $Al_2O_3$-, $SiO_2$-, $Fe_2O_3$- és CaO-tartalom fuzzy számait láthatjuk. Nagy előnyük a hagyományos átlaggal szemben, hogy e komponensek meghatározásának bizonytalanságát is figyelembe veszik. A tartó eltérő hossza a komponensek eltérő változékonyságától függ. Figyelmet érdemel számítási példánk esetében a magintervallum rövidsége mind a négy komponensnél. A mag hosszát itt is az analitikai hiba és a konfidencia-intervallum (95% konfidenciaszinten) összege adja. A tartó két vége a minimális és a maximális érték. Az értékelés bizonytalanságát ugyanúgy ki lehet számítani, mint a fentiekben bemutatott földtani vagyonra. Jelen példánk esetében jól látszik, hogy a konfidencia-intervallumok igen rövidek. Ez a körülmény tette lehetővé a kutatás előrehaladása során észlelt feltűnő stabilitást (lásd a 10. táblázatot).

Hangsúlyozni szeretném, hogy az itt leírtak mind az ún. *földtani vagyonra* érvényesek. A *kitermelhető készlet* kiszámítása a termelési veszteség és a hígulás figyelembevételével a hagyományos módon történik. Jankovics Bálinttól kapott adatok szerint a halimbai bányászat során az alábbiak szerint alakult a termelési veszteség és a hígulás:

| | Termelési veszteség | Hígulás |
|---|---|---|
| „Halimba III." (teljes északi rész) | 22,0–32,2%, átlag 26,4% | 1,0–2,2%, átlag 1,5% |
| Halimba II. DNy (új bányaüzem | 27,2–30,8%, átlag 28,8% | 1,5–1,6%, átlag 1,6% |

Az új bányaüzem kissé megnövekedett termelési vesztesége és hígulása a korábbiakban ismertetett rendkívül nagy változékonyság következménye. A cseresi bányaüzemről sajnos nem maradtak fenn adatok.

Mindez a felszíni kutatás alapján történő készletszámításra vonatkozik, a bányabeli termelési kutatás alapján történő készletszámításra a bányaföldtani szolgálat által kidolgozott, fentiekben ismertetett módszert tartom legalkalmasabbnak.

A fuzzy módszerrel kapott készleteket összevetettem a bányászatilag kitermeltekkel azokon a területrészeken, ahol a termelés 2007. január 1-ig véget ért. A kitermelt vagyon mennyiségét Tiszay János geológus határozta meg. Az összevetés csak közelítő lehetett, hiszen én nem a hivatalos számbavételi határok, hanem „A bauxitösszlet kőzettani felépítése…" c. fejezetben közölt kőzettani- geokémiai határok alapján végeztem számításaimat. Egyértelmű összehasonlítást csak a számított és a ténylegesen kitermelt területre lehetett végezni.

Példaként a 6. részterületet és a 7. keleti részét mutatom be (60. ábra). Az ábrán feltüntettem felszíni kutatás alapján felvett belső és a külső telephatárokat és a ténylegesen kitermelt bauxit határát. Jól látszik, hogy a biztosnak tekintett belső terület túlnyomó része valóban kitermelhető volt. Csupán az északi és délkeleti szélén maradt ki egy kevés. A területnövekedés, ill. -csökkenés mértékét az AutoCad-program segítségével Varga Gusztáv pontosan meghatározta. Azt találta, hogy a „biztos" terület 91,0%-a ténylegesen lefejtésre került. Ezt a magam részéről igen jó aránynak tartom.

A külső, lehatároló telephatár természetesen ennél jóval bizonytalanabb volt. Voltak helyek, ahol a lefejtett terület e telephatáron is túlterjedt, másutt közel egybeesett a felvett és a tényleges lefejthető telephatár. Végül helyenként a tényleges telephatár alig terjedt túl a szélső produktív fúrásokon. A tényleges telephatárnak ezt a szeszélyes lefutását felszíni földtani módszerekkel (szelvények, izovonalas térképek) meghatározni nem lehet és ezért feleslegesnek is tartom. A célnak szerintem teljesen megfelel a fentiekben ismertetett fuzzy lehatárolási módszer. Ezt igazolják Varga Gusztáv területszámításának eredményei:

— lefejtésre került a teljes „külső" terület 68,3%-a,

— nem került lefejtésre 31,7%,

— a külső produktív határon túl lefejtésre került a teljes „külső" terület 15,1%-a.

Az utóbbi terület értelemszerűen hozzáadható a lefejtett területhez. Tehát a „lehetséges" produktív terület 83,4%-a lett ténylegesen lefejtve. Ez az elméleti megfontoláson felüli jó eredmény, hiszen statisztikai alapon legfeljebb 50%-ra számíthattunk. Ugyanakkor az is kiderült, hogy a felszíni fuzzy készletszámítás külső telephatárának lefutása sokkal egyszerűbb, mint a bányában ténylegesen kitermelt bauxit körvonala. A meglevő felszíni fúrási hálózattal ezt nem lehetett meghatározni.

A bauxit átlagos vastagságára nem volt mód összehasonlítást végezni, mert a bánya közvetlenül a kitermelt bauxit mennyiségével számol. Tehát a tonnák összehasonlítására van csak lehetőség. A Tiszay János által meghatározott kitermelt bauxit mennyiségéhez képest a fuzzy készlet 89%-nak felel meg. Ez érthető, hiszen az általam használt kőzettani-geokémiai számbavételi határ a kitermelésnél használtnál szigorúbb: Nálam a modulus alsó határa 4,6, a bányaüzemnél pedig 4,0. Közvetlen összehasonlításra a módszer üzemszerű alkalmazása esetén kerülhet sor, a mindenkori (hivatalos) számbavételi határ alkalmazásával.

A teljesen kitermelt 6. részterületen Tiszay János számításai szerint a kitermelt bauxit átlagos minősége a következő volt: $Al_2O_3$ 48,4%, $SiO_2$ 9,6%, modulus 5,0. Saját számításom csak a felszíni fúrások alapján $Al_2O_3$ 52,0%, $SiO_2$ 5,4%, modulus 9,6. A fent leírtak alapján az eltérés elfogadható.

A készletek gazdasági értékelése (ipari vagyon) meghaladná e monográfia kereteit, ezért ezzel nem foglalkoztam.

## Geomatematikai, számítástechnikai és informatikai tapasztalatok

Geomatematikai módszerek először a cseresi zárójelentésben kerültek alkalmazásra (Barnabás 1950) a készletek és azok átlagos minőségének kiszámításakor. Ezek vastagsággal súlyozott átlagszámítások voltak a készletek átlagos minőségének meghatározására. Minden egyes mélységközre ún. méterszázalékot kellett kiszámítani, majd ezek összesítéséből adódott ki a teljes bauxitvastagság súlyozott átlagminősége. E hosszadalmas számítások részeredményeit is legépelték és bekerültek a zárójelentésbe. Más statisztikai paraméterek kiszámítására nem került sor, részben ez irányú hiányos ismereteink, részben a mechanikus számológépekkel végzett számítások nehézkessége és nagy időigénye miatt. A többi halimbai zárójelentésnél is ugyanezeket a számításokat alkalmazták.

„A magyar bauxit geokémiai vizsgálata" című monográfiámban (Bárdossy 1961) más statisztikai mutatókat is értékeltem (módusz, medián, szórás) és gyakorisági hisztogramokat is szerkesztettem a bauxitösszlet egészére. A halimbai előfordulásról csak a cseresi és a „tormás-kúti" (15. részterület) telepeket értékeltem az öt fő kémiai komponensre. Korrelációs együtthatókat nem tudtam számítani, de korrelációs diagramokat szerkesztettem, amelyeken azt ábrázoltam, hogy miként változik a fő komponensek átlagos összetétele az $Al_2O_3$-tartalom függvényében. Meglepően sok geokémiai összefüggést sikerült e diagramok segítségével felderíteni (lásd „A bauxitösszlet fő és járulékos kémiai komponensei" című fejezetet).

Az előrelépést a számítógépek hazai megjelenése tette lehetővé. A Bauxitkutató Vállalat 1966-ban számítógép felhasználásával készítette el a Halimba V. mező zárójelentését. Az első nyomtatásban megjelent halimbai alkalmazás Jocháné Edelényi Emőke nevéhez fűződik, aki számára a számításokat Dienes István készítette el (Jocháné Edelényi 1981). Számítógépes programokkal a kilencvenes években több két- és sokváltozós statisztikai módszert (klaszteranalízis, diszkriminancia analízis, multikorreláció, főkomponens analízis) alkalmaztam hazai bauxit-előfordulásokon (Bárdossy, Ó. Kovács 1995). A halimbai alkalmazások eredményei ugyancsak „A bauxitösszlet fő és járulékos kémiai komponensei" című fejezetben találhatók meg.

A Magyar Tudományos Akadémia támogatásával számítógépes adatbázist létesítettem az összes halimbai fúrásra, majd a beszerzett SPSS statisztikai programcsomag több mint háromszázötvenezres adathalmaz statisztikai feldolgozását tette lehetővé számomra. A halimbai előforduláson a kilencvenes években végzett geokémiai számításaim eredményei sajnos nem kerültek publikálásra.

A Variowin-programcsomag segítségével sikerült a halimbai előfordulás több részterületéről variogramokat szerkeszteni, sőt ún. variogram-felszíneket létrehozni. Varga Gusztáv munkájának köszönhetően dBASE III alapon működő adatbázis létesült a Bakonyi Bauxitbánya Kft. teljes működési területére (Varga 2002). Az AutoCad R14 programcsomag segítségével az adatbázis adatait térképek és szelvények formájában

értékelték, sőt a fent említett Variowin 2.2 program segítségével variogramokat is szerkesztettek. Ezek az informatikai rendszerek hatásosan segítették a halimbai bauxitbányászatot.

A bizonytalanságok tanulmányozása vezetett a *bizonytalan halmazok* elméletének alkalmazásához, Fodor János matematikus professzorral való együttműködésben (BÁRDOSSY, FODOR 2004). E módszereket alkalmaztam bauxit-készletszámításokra és a megkutatottság optimalizálására a halimbai előfordulás példáján (BÁRDOSSY 2005).

Összefoglalva az a véleményem, hogy a halimbai bauxitkutatás és bányaföldtan terén geomatematikai tekintetben a nemzetközit meghaladó színvonalat sikerült elérni.

## Hidrogeológiai tapasztalatok

A halimbai bauxitbánya középső és északi része a helyi főkarsztvízszint (+177 méter) alatt helyezkedik el. Regionális vízszintsüllyesztésre mégsem volt szükség a fekü Kösseni Formáció és a Dachsteini Mészkő Formáció igen kedvező vízföldtani tulajdonságai miatt. A Kösszeni Mészkő és márgás mészkő önmagában is jó vízzáró, a Dachsteini Mészkő karsztos járatait és üregeit pedig vízzáró agyag és bauxitos agyag tölti ki.

Vízföldtani szempontból az a tektonikai fejezetben már említett szerkezeti vonal a legfontosabb, amelytől nyugatra a vízveszélyes Fődolomit Formáció jelenik meg (3. ábra). Mivel a halimbai előfordulás nyugati széle erre a sávra is kiterjed széleskörű hidrogeológiai vizsgálatokat végeztek e területrészen (PATAKI et al. 2002). A bányavágatokból indított vízszintes fúrásokkal pontosították a szerkezeti vonal lefutását és azt átfúrva 6–8 $m^3$/perc vizet fakasztottak. 1997 és 2001 között e sávban 11 felszíni kutatófúrást is mélyítettek, amelyekben számos vízföldtani mérést végeztek, sőt egy vágatpárral a szerkezeti vonalat is harántolták. Mindezek alapján alakult ki az a kép, amely szerint a fő szerkezeti vonalat legalább nyolc vízszintes eltolódás tagolja ÉNy–DK-i csapással (lásd PATAKI et al. 2002 1. ábráját). A fő szerkezeti vonal mentén a Dachsteini Mészkő 100–200 m szélességben dolomitosodott. Egyes szakaszokon hévizes folyamatok hatása ismerhető fel porlódás és piritesedés formájában. Magát a szerkezeti vonalat vetőbreccsa tölti ki. A szerkezeti vonaltól nyugatra eső sáv fokozott vízveszélye miatt a bánya vezetése úgy döntött, hogy az ottani 2700 ktonna $C_1$ és $C_2$ kategóriájú, tehát eléggé bizonytalan földtani készlet kitermelésére nem tesznek kísérletet. Véleményem szerint ez helyes döntés volt.

***14. táblázat.*** A halimbai bányaüzemek vízemelése ($m^3$/perc)

| Év | Vízemelés ($m^3$/perc) | | |
|---|---|---|---|
| | Halimba III. üzem (a telep É-i része) | Halimba III. légakna | Halimba VI. üzem a telep DNy-i része |
| 1955 | 0,7 | | |
| 1960 | 1,7 | | |
| 1965 | 2,2 | | |
| 1970 | 3,6 | | |
| 1975 | 5,75 | | |
| 1980 | 5,46 | | |
| 1985 | 8,28 | | |
| 1990 | 7,84 | | |
| 1997 | 9,04 | | |
| 1998 | 9,99 | | |
| 1999 | 10,72 | | |
| 2000 | 10,70 | | |
| 2001 | 11,08 | | |
| 2002 | 11,99 | | |
| 2003 | 10,77 | | |
| 2004 | | 5,69 | 0,10 |
| 2005 | | 6,82 | 0,54 |
| 2006 | | 6,97 | 1,59 |
| 2007 | | 7,27 | 1,73 |

(Vizy Béla és Jankovics Bálint adatai)

A Halimba III., IV., és V. mezők termelésének befejeződésével a termelés az előfordulás déli részére helyeződött át, ahol a telep magasabb helyzete, valamint a Kösseni és a Dachsteini Mészkő Formáció jelenléte miatt a korábbinál kisebb a vízveszély. Ennek pontosítására eddig 29 vízvédelmi és vízmegfigyelő fúrást készítettek 1857,5 m hosszban.

A halimbai bányából történő vízemelést a 14. táblázat mutatja be. Jól látható, hogy a Halimba III. bányából és a légaknából emelt víz mennyisége jelentéktelen a szomszédos nyirádi terület egykori vízemeléséhez képest. A déli területen (Halimba II. DNy) ennél is lényegesen kevesebb vizet emelnek, de a kiemelt víz mennyisége lassan növekszik. A vízemelés előreláthatólag a jövőben sem fogja a bauxittermelést zavarni.

# Összefoglaló értékelés

Monográfiámmal a legjelentősebb magyar bauxit-előfordulásról összegyűlt adatokat és ismereteket igyekeztem az utókor számára megmenteni, hiszen ismeretes, hogy egy-egy hazai bánya bezárása után milyen gyorsan mennek veszendőbe a bányászati és földtani adatok.

A monográfia földtudományi részében az adatok részletes ismertetésén túl igyekeztem a földtani okokat, összefüggéseket és a genetikai folyamatokat is bemutatni, úgy ahogy azokat én látom. Nagyon fontosnak tartottam az adatok és értelmezésük egyértelmű szétválasztását, továbbá a csak gondolati elemekre épülő „szárnyaló" hipotézisek mellőzését. Monográfiám így talán kevésbé élvezetes szövegű, de helyette reményeim szerint megalapozottabb lett.

A gyakorlati részben igyekeztem az utóbbi évtizedben kollegáimmal közösen alkalmazott új matematikai módszereket ismertetni és a halimbai előfordulás példáján felhasználásukat bemutatni. Ez a rész nem csak a halimbai előfordulás megkutatását és készletszámításait mutatja be, hanem az új módszerekre vonatkozó konkrét tapasztalatokat is ismerteti. Meggyőződésem ugyanis, hogy ezek a módszerek más szilárd ásványinyersanyag-előfordulásokon is sikerrel alkalmazhatók.

Felmerülhet az olvasóban a kérdés, hogy miért épp most került sor a monográfia elkészítésére, hiszen a halimbai előfordulás kitermelése a tervek szerint néhány év múlva fejeződik be. Valóban gondolkodtam azon, hogy megvárom a bányászat befejezését, de rájöttem arra, hogy ez az én koromban igen kockázatos dolog lenne, hiszen egy váratlan megbetegedés akár meg is akadályozhatná a monográfia megírását. Azt is számításba vettem, hogy a halimbai bányaüzem vezetői és geológusai az utóbbi időben egyre újabb visszahagyott bauxitkészletek kitermelését tették lehetővé kiegészítő kutatásokkal. Ez a rendkívül sikeres tevékenység akár további évekkel is meghosszabbíthatja a bánya életét. Így született meg a döntés, hogy már 2007-ben befejezem a monográfiát, amelyen hosszabb-rövidebb szünetekkel immár közel tíz éve dolgozom. A monográfia így nem ad lezárt képet, de az előfordulás érdemi földtani sajátosságait bemutatja. Erősen remélem, hogy az olvasók is egyetértenek majd ezzel a véleményemmel.

# Felhasznált irodalom

*Nyomtatott dokumentumok*


BARNABÁS K. 1957: A halimbai és a nyirádi bauxitterület földtani kutatása (Geologische Untersuchung des Bauxitgebietes von Halimba und Nyirád). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve*. 46 (3), pp. 409–431.

BARNABÁS K. 1970: Die vergleichende Untersuchung der characteristischen Bauxitlager-stätten des Mittelgebirges von Dunántúl. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* 54 (3), pp. 69–93.

BÁRDOSSY GY. 1961: A magyar bauxit geokémiai vizsgálata (Geochemical evaluation of the Hungarian bauxites). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Alkalmi kiadványa*, Budapest, 233 p.

BÁRDOSSY GY. 1977: *Karsztbauxitok (Karstbauxites).* — Akadémiai Kiadó. 413 p.

BÁRDOSSY GY. 2005: Szilárd ásványi nyersanyagtelepek megkutatottságának értékelése a Bayes-féle valószínűségek és a bizonytalan halmazok elméletének segítségével (Assessment of the completeness of exploration of solid mineral deposits by the application of Bayesian probabilities and fuzzy arithmetic methods). — *Földtani Közlöny* 135 (1), pp. 57–76.

BÁRDOSSY, GY. 2006: Geologic and geostatistical evaluation of spatial variability. — *Acta Geologica Hungarica* 49 (1), pp. 89–101.

BÁRDOSSY, GY., CSANÁDY, Á., CSORDÁS-TÓTH, A. 1978: Scanning electron microscope study of bauxites of different ages and origins. — *Clays and Clay minerals* 26. pp. 245–262.

BÁRDOSSY, GY., FODOR ,J. 2004: *Evaluation of Uncertainties and Risks in Geology.* — Springer Verlag. Heidelberg, Berlin, London, New York, 221 p.

BÁRDOSSY, GY., JUHÁSZ, E. 1991: Application of sedimentological methods to karst bauxites evaluation: the Halimba-Szőc area, Hungary. — *Acta Geologica Hungarica* 34 (3), pp. 241–252.

BÁRDOSSY, GY., Ó. KOVÁCS, L. 1995: A multivariate statistical and geostatistical study on the geochemistry of allochtonous karst bauxite deposits in Hungary. — *Nonrenewable Resources* (4) 2, pp. 138–153.

BÁRDOSSY, GY., PANTÓ, GY. 1971: Investigation of bauxites with the help of electron-probe. — *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 15, pp. 165–184.

BÁRDOSSY GY.,PATAKI A., TISZAY J. 1998a: A halimbai bauxittelep földtani megismerésének és megkutatásának története (The history of geological research and exploration of the Halimba bauxite deposits). — *Földtani Kutatás* 35 (1), pp. 3–7.

BÁRDOSSY GY.,PATAKI A., TISZAY J. 1998b: A halimbai bauxittelep rétegtani, teleptani és tektonikai értékelése (Stratigraphic and tectonic evaluation of the Halimba bauxite deposit). — *Földtani Kutatás* 35 (4), pp. 1–6.

BÁRDOSSY GY., PATAKI A., TISZAY J. 2000: A halimbai bauxittelep szöveti, ásványtani és geokémiai értékelése. (Textural, mineral and geochemical assessment of the Halimba bauxite deposit). — *Földtani Kutatás* 37 (1), pp. 7–12.

BÁRDOSSY GY., R. SZABÓ I., VARGA G. 2001: Az ásványvagyon értékelés új lehetőségei a hazai bauxitvagyon példáján (New opportunities of mineral reserve assessment on the model of the national bauxite reserve). — *Földtani Kutatás* 38 (3), pp. 35–44.

BÁRDOSSY, GY., R. SZABÓ, I.,VARGA, G. 2003: A new method of resource estimation for bauxite and other solid mineral deposits. — *Berg und Hüttenmännische Monatshefte*148, pp. 57–64.

DAVIS, J. C. 1986: *Statistics and Data Analysis in Geology.* — John Wiley and Sons, New York 646 p.

DUDICH E., SIKLÓSI L.-NÉ 1967: A fenyőfői, iszkaszentgyörgyi és halimba–szőci bauxit nyomelem-geokémiai leírása és összehasonlítása (Description et comparaison géochimiques des éléments rares de trois gisements de bauxite en Hongrie [Fenyőfő, Iszkaszentgyörgy et Halimba–Szőc]). — *Földtani Közlöny* 97, pp. 145–159.

ERDÉLYI, M. 1965: Geological studies in the Halimba basin. — *Acta Geologica Hungarica Academiae Scientiarum Hungaricae* 9. pp. 339–362.

ERDÉLYI T. 1983: A halimbai bauxitbánya triász feküjének bányaföldtani kutatása (Montangeologische Untersuchung des triadischen Liegenden der Bauxitlagerstätte und Bergwerk Halimba). — *Földtani Kutatás* 26 (1), pp. 11–15.

GÓCZÁN F., PATAKI A., RÁKOSI L., TISZAY J. 2002: Albai bauxitos üledék a halimbai meden-cében (Albaian bauxite depositing in the Halimba basin). — *Földtani Kutatás* 39 (1), pp. 50–52.

GYÖRGY A. 1923: Bauxittelep Halimbán és környékén Veszprém megyében (Bauxite deposit at Halimba and surroundings in Veszprém county). — *Bányászati és Kohászati Lapok* 56 (8), pp. 57–77.

JOCHÁNÉ EDELÉNYI E. 1981: A halimbai bauxit számítógépes vizsgálatának eredményei (The bauxite deposits of Halimba in the light of a computerized data processing). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1979. évről*, pp. 561–582.

JUHÁSZ E. 1986: A halimbai és a németbányai bauxitok scanning elektronmikroszkópos vizsgálatából levont néhány genetikai következtetés (Genetic conclusions from scanning electron microscope study of bauxite samples from halim-

ba and Németbánya (Transdanubia, Hungary). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1984. évről*, pp. 333–342.
JUHÁSZ, E. 1988: *Sedimentological features of the Halimba bauxite and paleogeographic reconstruction.* — *Acta Geologica Hungarica Academiae Scientiarum Hungaricae* 31, pp. 111–136.
JUHÁSZ, E. 1989a: *Sedimentological features of the Halimba karstic bauxite, Hungary.* — *Travaux de l'ICSOBA, Zagreb*, 19 (22), pp. 301–310.
JUHÁSZ, E. 1989b: Joint occurrence of Late Cretaceous and Eocene bauxite beds at Halimba, Transdanubia, Hungary. — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1987. évről*, pp. 179–188.
JUHÁSZ E., Ó. KOVÁCS L. 1990: A halimbai bauxit kémiai és szedimentológiai típusainak vizs-gálata (Relationship between the chemical and sedimentological types of the Halimba bauxite). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1988. évről*, pp. 327–334.
JUHÁSZ E., POLGÁRI M. 1987: A halimbai bauxit elektronmikroszondás vizsgálatok tükrében (The Halimba bauxite in the light of electron-microprobe investigations). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1985. évről*, pp. 261–267.
KECSKEMÉTI T. 2005: A bauxitkutatás eocén rétegtani hozadéka (The proceeds of the bauxites prospecting for the Eocene stratigraphy). — *Földtani Kutatás* 42 (3–4), pp. 38–40.
KISS I., KÁROLY F. 2006: Művelésbe vonható bauxitterületek értékelése (Evaluation of exploitable bauxite reserves). — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* 139 (6), pp. 15–20.
KISS, J. 1955: Recherches sur les bauxites de la Hongrie I. — *Acta Geologica Hungarica Academiae Scientiarum Hungaricae* 3, pp. 45–88.
KORMOS T. 1932: Néhány szó a halimbavidéki bauxitokról (Some words about the bauxites of the Halimba area). — *Bányászati és Kohászati Lapok* 65 (22), pp. 460–461.
MÁTÉFI T. 2002: A halimbai bauxittelep É-i részének földtani viszonyai, minőségeloszlási és genetikai kérdései (The northern part of the Halimba site and its structural geological quality distributional and genetic relation). — *Földtani Kutatás* 39 (1), pp. 22–26.
MÉRAI K., BÍRÓ B., ERDÉLYI T. 1982: A bakonyi bauxit-előfordulások földtani felépítése (Geology of the bauxite deposits worked by the Bakony Bauxite Mining Enterprise). — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* 115 (8), pp. 519–528.
MÉSZÁROS J. 1981: A halimbai bauxit-előfordulás sajátos larámi tektonikájának gyakorlati jelentősége (Importance practique de la tectonique de Laram spéciale du gisement de bauxite de Halimba). — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* 114 (5), pp. 301–303.
MÉSZÁROS J. 1982: Nagyméretű vízszintes eltolódás a Bakony nyugati részén és szerepe a nyersanyagkutatásban (Major horizontal tectonic dislocation as a guide to mineral prospectors in the Western Bakony Mountains). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1980. évről*, pp. 517–526.
MÉSZÁROS J. 1983: A bakonyi vízszintes eltolódások szerkezeti és gazdaságföldtani jelentő-sége (Structural and economic-geological significance of strike-slip faults in the Bakony Mountains). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1981. évről*, pp.
MINDSZENTY, A. 1983: Some bauxitic textures and their genetic interpretation. — *Geologicky Zbornik — Geologica Carpathica* 34, pp. 665–674.
MINDSZENTY, A. 1984: The lithology of some Hungarian bauxites — A contribution to the paleogeographic reconstruction. — *Acta Geologica Hungarica* 27 (4), pp. 441–455.
MINDSZENTY A., GÁLNÉ SOLYMOS K. 1988: A halimbai bauxit extraklasztjainak földtani je-lentősége (Geological significance of the extraclasts of the Halimba bauxite deposits). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1986. évről*, pp. 451–468.
MINDSZENTY, A., GÁLNÉ SOLYMOS, K., CSORDÁS-TÓTH, A., IMRE, I., FELVÁRI, GY., RUTTNER, A. W., BÖRÖCZKY, T., KNAUER, J. 1991: *Extraclasts from Cretaceous/Tertiary bauxites of the Trans-danubian Central Range and the Northern Calcareous Alps. Preliminary results and tentative geological interpretation.* — Jubiläumsschrift 20 Jahre Geologische Zusammenarbeit Österreich–Ungarn, Wien. (I), pp. 309–345.
MINDSZETY, A., KNAUER, J., MÁTÉFINÉ STEFFLER, M. 1994: Superimposed paleokarst phenomena in the Halimba basin, South Bakony, Hungary. — *Proceedings of the International Association of Sedimentologists, Ischia*, pp. 285–286.
MINDSZENTY A., CSOMA A., TÖRÖK Á., HIPS K., HERTELENDI E. 2001: Flexura jellegű előtéri deformációhoz köthető karsztbauxitszintek a Dunántúli-középhegységben (Rudistid limestones, bauxites, paleokarst and geodinamics. The case of the Cretaceous of the Transdanubian Range). — *Földtani Közlöny* 131 (1–2), pp. 107–152.
PATAKI A. 1987: *Bauxitkutatás és földtani kép. Halimba (Bauxite exploration and geological model at Halimba).* — In: *Bauxitbányászat a Bakonyban.* Tapolca, pp. 59–73.
PATAKI A., BÖRÖCZKY T., MÁTÉFI T., TÓTH K., TISZAY J., VARAGA G. 2002: A halimbai bauxittelep 1995-2001 közötti kutatásának földtani eredményei (Exploration of the Halimba bauxite deposit, 1995–2001). — *Földtani Kutatás* 39 (1), pp. 27–37.
SCHROLL E., SAUER D. 1964: Ein Beitrag zur Geochemie der seltenen Elemente in Bauxiten. — *ICSOBA Symposium. Zagreb. 1–3 October1963,* I, pp. 201–225.
Sen, Z. 1998: Point cumulative semivariogram for identification of heterogeneities in regional seismicity of Turkey. — *Mathematical Geology* 30, pp. 767–787.
SZÁDECZKY-KARDOSS E. 1955: *Geokémia (Geochemistry).* — Akadémiai Kiadó, Budapest 680 p.
SZANTNER F., KNAUER J.,MINDSZENTY A. 1986: Bauxitprognózis (Bauxite prognostics). — Veszprémi Akadémiai Bizottság Kiadása, Veszprém 472 p.
VADÁSZ E. 1946: A magyar bauxitelőfordulások földtani alkata (Geological constitution of the Hungarian bauxite occurrences). — *A Magyar Állami Földtani Intézet Évkönyve* 36 (2),.pp. 173–286.
VADÁSZ E. 1951: *Bauxitföldtan (Bauxite Geology).* — Akadémiai Kiadó, Budapest, 129 p.
VARGA G. 2002: A földtani adatfeldolgozás informatikai háttere a Bakonyi Bauxitbánya Kft-nél (Informatics background of geological Processing at the Bakony Bauxite Mine). — *Földtani Kutatás* 39 (1), pp. 45–49.
VITÁLIS I. 1932: A halimbavidéki bauxitok és hasznosításuk (The bauxites of the Halimba region and their utilisation). — *Bányászati és Kohászati Lapok,* 65 (19), pp 386–392.

*Kéziratos jelentések*


ALLIQUANDER E., LJUBIMOV I. A., VADÁSZ E. 1949: A délnyugati Bakonyban Halimba, Padrag és Szőc bauxitterületen végzett geológiai kutatások adatai (Data on the geologic exploration for bauxite in the region of Halimba, Padrag and Szőc in the southwestern Bakony Mountains). — Maszobal Rt. és Alumíniumérc Bánya és Ipar Rt. 334 p.

BARNABÁS K. 1950: Jelentés az 1950 évben Magyarországon a halimbai cseresi bauxitelőfor-duláson végzett kutató munkálatok és készletbecslések eredményeiről (Report on the results of bauxite exploration and reserve estimation of the Halimba–Cseres bauxite deposit in 1950). — Maszobal Bauxitkutató Expedíció, Balatonalmádi, (I), 199 p., (II), mellékletek.

BÁRDOSSY GY. 1952: Jelentés a Magyarországon a halimbai devecseri-úti bauxitelőforduláson végzett kutató munkálatok és készletszámítás eredményeiről (Report on the results of bauxite exploration and reserve estimation of the Halimba – Devecseri út bauxite deposit in Hungary). — Maszobal Bauxitkutató Expedíció, (I) 310 p., (II), mellékletek.

BÁRDOSSY GY. 1991: A Halimba II/DNy terület geokémiai, geomatematikai és bauxitföldtani értékelése (Geochemical, geomathematical and bauxite-geological evaluation of the Halimba II/SW area). — Bakonyi Bauxitbánya Kft. Irattár. 17 p. 149 p. (táblázat)

ERDÉLYI M. 1961: Jelentés a Halimba IV. bauxitelőforduláson végzett kutató munkálatok és készletszámítás eredményeiről (Report on the results of bauxite exploration and reserve estimation of the Halimba IV deposit). — Bauxitkutató Vállalat, Balatonalmádi.

SZABÓ E., POSGAY K. 1963: Jelentés a Halimba IV bauxitelőfordulás területén végzett kiegészítő kutatás munkálatairól és a készletszámítás eredményeiről (Report on the results of complementary exploration and reserve estimation of the Halimba IV bauxite deposit). — Bauxitkutató Vállalat. Balatonalmádi. 265 p.

SZANTNER E, ERDÉLYI M. 1960: Jelentés a Halimba III bauxitelőforduláson végzett kutató munkálatok és készletszámítás eredményeiről (Report on the results of bauxite exploration and reserve estimation of the Halimba III deposit).— Bauxitkutató Vállalat, Balatonalmádi.

VADÁSZ E. 1943: A halimbai kutatások helyzetképe (Report on the situation of the exploration in the Halimba area). — *Kézirat*, Bakonyi Bauxitbánya Kft. gyűjteménye, Halimba.

VADÁSZ E. 1944: A halimbai bauxitterület kutatásáról (Report on the exploration of the Halimba bauxite area).— *Kézirat*, Bakonyi Bauxitbánya Kft. gyűjteménye, Halimba.

VADÁSZ E. 1945: A halimbai bauxitkutatások irányelvei (Guiding principles of the bauxite exploration in the Halimba area). — *Kézirat*, Bakonyi Bauxitbánya Kft. gyűjteménye, Halimba.

VIRÁGH K. 1954: Jelentés a Halimba Devecseri úti bauxitelőforduláson végzett kutató mun-kálatok és készletszámítás eredményeiről.(Report on the results of exploration and reserve estimation of the Halimba Devecseri-út bauxite deposit). — Maszobal Bauxitkutató Expedíció.

Bauxitkutató Vállalat, Földtani Kamerális Osztály 1966: Jelentés a Halimba V. bauxittelep-részen végzett kutató munkálatok és készletszámítás eredményeiről (Report on the results of exploration and reserve estimation of the Halimba V bauxite deposit). — Bauxitkutató Vállalat, Balatonalmádi.

Bakonyi Bauxitbánya Kft., Földtani és Bauxitkutatási Üzem 1998: Jelentés a Halimba II DNy-i bányamező – 92 szint alatti mezőrészben végzett pótló kutatásról és annak kiértékeléséről (Report on the results of complementary exploration of the Halimba II/SW mining district and its evaluation). — Tapolca

Bakonyi Bauxitbánya Kft. Földtani és Bauxitkutatási Üzem 1999: Jelentés a Halimba II. DNy-i teleprész pótkutatásáról.(Report on the complementary exploration of the Halimba II/SW mining district). — Tapolca.