

TUNEL UMIRAY – MACUA, ZÁRUKA PITNÉ VODY PRO MANILU

THE UMIRAY – MACUA TUNNEL, A GUARANTEE OF DRINKING WATER FOR MANILA

PAVEL BLÁHA, ROMAN DURAS, JAN FOUSEK, JITKA NOVOTNÁ

1. ÚVOD

Lidská civilizace je od svého počátku vázána na přírodní zdroje, a to jak na zdroje surovin, tak na zdroje energie. S vývojem lidského rodu se požadavky na druhy surovin i zdroje energií měnily. Nikdy však nebyly tyto změny tak rozsáhlé, jako v druhé polovině dvacátého století a na počátku století jedenadvacátého. Zásobování člověka potřebnými surovinami si vyžaduje čím dál tím větší a důmyslnější stavby. To se týká jak surovin potřebných a nutných pro bezprostřední život člověka, tak surovin potřebných k dalšímu rozvoji lidské civilizace.

2. VODNÍ DÍLO ANGAT

Podobně, jako byla existence člověka po celou dobu jeho vývoje závislá na přírodních zdrojích, je i pronásledována přírodními katastrofami. Zdá se pravděpodobným, že čím je lidská civilizace vyspělejší, tím je i zranitelnější. Poškození lidských výtvarů jakoukoli přírodní pohromou vždy znamenalo, znamená a bude znamenat ekonomické ztráty a v těch nejhorších případech i lidská zranění a ztráty na životech. Zůstává otázkou, jakou míru zodpovědnosti ve smyslu vzniku a průběhu přírodních katastrof nese civilizační rozvoj a jakou příroda sama. Nejtragičtější jsou však ty katastrofy, které člověk pravděpodobně vyvolal a ovlivnit nemůže.

Život člověka poznamenávají nejen katastrofy globálního charakteru, ale i jevy menšího rozsahu. Do těch můžeme počítat i ničivé účinky tropických tajfunů. Tajfun Winnie – Nanmadol, který postihl Filipíny koncem roku 2004, je typickým příkladem těchto událostí. Jeho následky ohrozily i zásobování hlavního města Filipín – Manilu – pitnou vodou. Manila je zásobována vodou z vodního díla Angat (obr. 1), které pokrývá až 90 % spotřeby vody v hlavním městě. Když si uvědomíme, že jde o zásobování regionu s minimálně deseti miliony obyvatel, představuje takovéto ohrožení nemalý problém.

Přehradní hráz vodního díla byla vybudována v šedesátých letech dvacátého století. Samotná rockfillová hráz má výšku 133 metrů a zadržuje při plném vzduťi jezero o objemu asi 700 milionů kubických metrů vody. Voda z nádrže je dopravována do úpravný vody na



Obr. 1 Situace zájmové lokality (základní mapa: Microsoft Encarta, vložená mapa: Google Earth)

Fig. 1 Overview of the area of operations (Microsoft Encarta basic map, inserted map: Google Earth)

1. INTRODUCTION

Since its beginning, human civilisation has been bound to natural resources, resources of both raw materials and energies. Requirements for various kinds of raw materials and energy resources have been changing along with the development of the human society. However, never have those changes been so wide as the changes which took place during the second half of the twentieth century and at the beginning of the twenty first century. Supplying people with necessary raw materials requires ever larger and more sophisticated constructions. This applies to raw materials required and necessary for the immediate lives of people as well as raw materials required for further development of the human civilisation.

2. THE ANGAT WATERWORKS

Similar to its dependency on natural resources, mankind has been pursued by natural catastrophes throughout the time of its development. It seems probable that the more developed the human civilisation, the more vulnerable it becomes. Damage to human artefacts by any natural disaster always meant, means and will mean economic losses and, in the worst cases, even injuries and fatalities. There remains the following question: which proportions of responsibility regarding the origination and course of natural catastrophes are attributable to the development of civilisation and nature itself? Although, the most tragic are the catastrophes which probably were not brought about by people and could not be influenced by them.

Human life is marked not only by global-character catastrophes, but even by smaller-scale phenomena. Devastating effects of tropical typhoons can be counted among them. Typhoon Winnie – Nanmadol, which hit the Philippines at the end of 2004, is a typical example of such events. Its consequences even threatened supplies of potable water for Manila, the capital of the Philippines. The City of Manila is supplied with water from the Angat waterworks (see Fig. 1), which covers up to 90 per cent of the consumption in the capital. If we realise that the region to be supplied has a population of least ten million, we can see that such the threat means a significant problem.

The dam was built in the 1960s. The 133m high rockfill dam impounds about 700 million cubic metres of water at the full reservoir level. Water is transported from the reservoir to a treatment plant in a Manila suburb through a 20km long pipeline, 3000mm in diameter. Water is treated in the plant and then distributed further throughout the city. For a visitor from Central Europe, the water line with measuring equipment installed (at least partially) above ground offers a really unusual sight.

3. TYPHOON NANMADOL AND ITS IMPACT

At the beginning of December 2004, extensive tropical depression Winnie gave rise to Nanmadol typhoon, which hit a vast area of the western Pacific. According to the information published on , precipitation on Luzon Island and its surroundings reached catastrophic values. The total rain precipitation during the typhoon exceeded 1200mm (see Fig. 3). Similar values were measured even in Taiwan. It is possible to say that the total depth of precipitation on Luzon was virtually nowhere smaller than 500mm; in the area around the Angat dam, according to the above-mentioned American server, it exceeded 800mm. This value is even confirmed by the measurement which was conducted on the dam, where the rate of precipitation reached 986mm per 24 hours on 3 December 2004. It is likely that the local currents of air, together with the rugged terrain, significantly affected the total amount of precipitation. At the Ipo equalising reservoir, which is only four kilometres away from the main dam as the crow flies, the rate of precipitation reached only 33mm during the same time. The fact that the actual local rainfall differed from the data provided

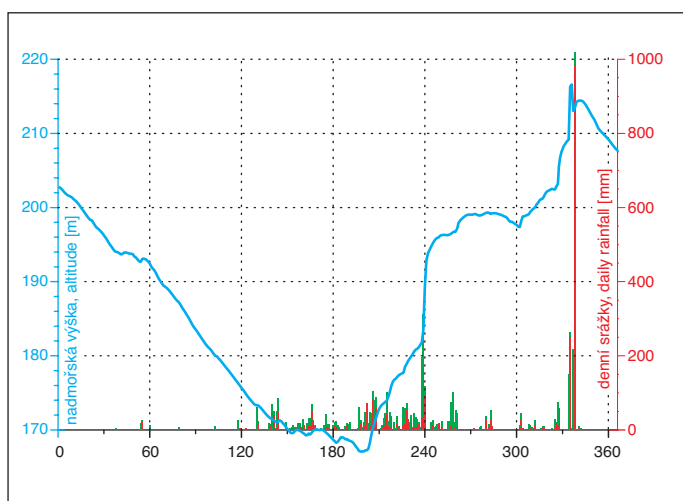


Obr. 2 Situace vodního díla Angat
Fig. 2 Layout of the Angat waterworks

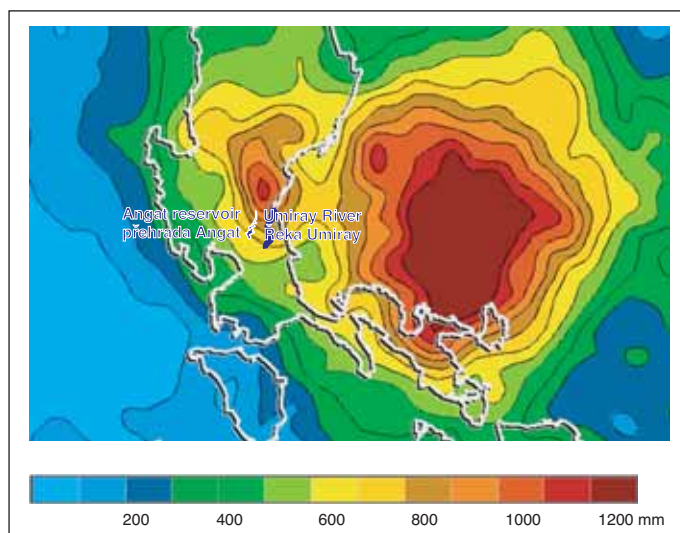
předměstí Manily potřebují o průměru 3000 mm a délce 20 km. Na úpravě je voda upravována a dále pak rozváděna po celém městě. Pro středoevropana představuje vedení rozvodu vody spolu s měřicí technikou (alespoň částečně) nad terénem skutečně nezvyklý pohled.

3. TAJFUN NANMADOL A JEHO ÚČINKY

Na počátku prosince 2004 vyvolala rozsáhlá tlaková níže Winnie tajfun Nanmadol, který postihl rozsáhlou oblast západního Pacifiku. Podle údajů zveřejněných na serveru NASA dosáhly srážky na ostrově Luzon a v jeho okolí katastrofálních hodnot. Celkové dešťové srážky během tajfunu přesáhly úroveň 1200 mm (obr. 3). Obdobné hodnoty byly naměřeny i na Tchaj-wanu. Je možné říci, že na Luzonu celkové srážky prakticky nikde neklesly pod 500 mm a v okolí vodního díla Angat dosáhly podle výše uvedeného amerického serveru hodnot přes 800 mm. Tuto hodnotu potvrzuje i měření na hrázi vodního díla, kde srážky 3. prosince 2004 dosáhly úrovně 986 mm za 24 hodin. Je pravděpodobné, že místní vzdušné proudění spolu s členitým terénem výrazně ovlivňovaly celkový úhrn srážek. Na vyrovnávací nádrži IPO vzdálené od hlavní hráze vzdušnou čarou pouze čtyři kilometry dosáhly srážky za stejnou dobu pouze 33 mm! Že skutečný lokální spád srážek byl jiný, než lze vyčíst z údajů hydrometeorologických stanic, také dokazuje měřená úroveň hladiny vody v nádrži (obr. 4). Ve dne 1. 12. před rekordní srážkou z 3. 12. nastoupala hladina v nádrži na kótu 216,59 m n. m. Den před tím spadlo na Angatu 251 mm a meteorologická stanice na řece Umiray přestala fungovat. Už po



Obr. 4 Hladina vody v nádrži Angat (modrá křivka) a denní srážky na hrázi Angat (červené sloupce) a na vyrovnávací hrázi IPO (zelené sloupce)
Fig. 4 Water surface level in the Angat reservoir (blue curve) and daily precipitation at the Angat dam (red columns) and at the Ipo equalising reservoir (green columns)



Obr. 3 Celkové srážky během tajfunu Nanmadol (upraveno podle trmm.gsfc.nasa.com)
Fig. 3 Total rain precipitation during typhoon Nanmadol (adjusted according to trmm.gsfc.nasa.com)

by meteorological stations is even proved by the measured level of water surface of the reservoir (see Fig. 4). During the day time of 1 December, just before the record rainfall, the level of the water surface in the reservoir rose to the altitude of 216.59m a.s.l. One day before, 251mm of rain fell on Angat, and the meteorological station on the Umiray River ceased to function. The station was put out of action as early as the initial blasts of typhoon; its operation was successfully resumed as late as July 2005.

Of course, such the extreme rains were bound to affect the area around the dam. The banks of the reservoir were stripped of all vegetation during the course of the typhoon. The effects reached not only the level of water surface in the reservoir; the vegetation cover was removed by beating of waves (induced by the typhoon) up to the level which corresponded to the maximum magnitude of waves. We should realise that the velocity of air during Nanmadol typhoon reached up to 320kph. The banks of the reservoir were, as a result of the above-mentioned phenomena, affected up to the elevation of 230m a.s.l. (see Fig. 5). Nevertheless, owing to the self-regeneration power of nature, the slopes around the reservoir were again covered with grass and low bushes during the two years after Nanmadol typhoon (see the photo in Fig. 5).

As mentioned above, the precipitation accompanying the typhoon exceeded 1000mm. The increased amount of water could not freely flow away on the ground surface to local water courses and seeped into the soil cover. Conditions suitable for developing slope deformations started to originate



Obr. 5 Letecký pohled na přehradní jezero Angat 10 týdnů po tajfunu a dva roky po tajfunu
Fig. 5 Aerial view of the Angat reservoir, 10 weeks after the typhoon and two years after the typhoon



Obr. 6 Svahové deformace na březích řeky Umiray
Fig. 6 Slope deformation on the Umiray River banks

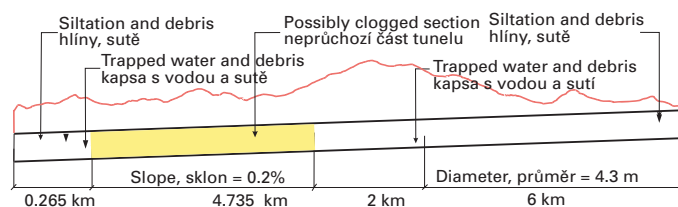
prvních nápirech tajfunu byla stanice vyřazena z činnosti a obnovit její činnost se podařilo až v červenci roku 2005.

Je samozřejmé, že takovéto extrémní srážky se musí projevit i na krajině v okolí vodního díla. V průběhu tajfunu byly břehy nádrže zbařeny veškeré vegetace. Postižení sahalo nejen do výšky vzdutí nádrže, ale vlivem vlnobití (vyvolaného tajfunem) byl stržen rostlinný pokryv až do výše odpovídající maximálním vlnám. Měli bychom si uvědomit, že proudění vzduchu během tajfunu Nanmadol dosahovalo rychlosti až 320 km/hod. Břehy nádrže byly kvůli zmíněným jevům postiženy až do výšky 230 m n. m (obr. 5). Avšak díky samoregeneračním schopnostem přírody byly do dvou let od tajfunu Nanmadol svahy nádrže již znovu zarostlé travinami a nízkými keři (vložená foto na obr. 5).

Jak již bylo zmíněno, vodní srážky doprovázející tajfun dosáhly přes 1000 mm. Zvýšené množství vody nebylo schopno volně odtéci po terénu do místních vodotečí a zasakovalo do půdního pokryvu. Na březích přehradního jezera, podél řek a potoků i na svazích hor začalo docházet k vytváření vhodných podmínek pro vznik svahových deformací. Vlivem enormního zasakování vody do pokryvu docházelo často ke ztekucení sutí a jejich odtékání po svazích do potoků a řek (obr. 6). Rychlost pohybů takovýchto svahových deformací je velmi vysoká a může dosáhnout až desítek kilometrů za hodinu. Jen samotný pohyb takovýchto těles vyvolává katastrofální následky. V případě neobydleného tropického pralesa dochází „pouze“ k devastaci rostlinného pokryvu. Akumulační části svahových deformací byly v řekách okamžitě rozmyty a odneseny do údolí dále po vodě nebo až do vlastní nádrže Angat v závislosti na velikosti průtoku a spádu koryta. Objemová hmotnost směsi vody a unášeného sedimentu se v tomto



Obr. 8 Pohled na ruční čištění nápuštěného kanálu vstupu tunelu
Fig. 8 A view of the manual cleaning of the feeding canal at the tunnel intake structure



Obr. 7 Řez zaneseným tunelem (podle materiálů firmy EDCOP)
Fig. 7 A section through the silted tunnel (according to EDCOP company materials)

on the banks of the reservoir, along rivers and streams, and on mountain slopes. The enormous seepage of water into the cover frequently resulted in liquefaction of rock debris, which started to flow down the slopes to streams and rivers (see Fig. 6). The speed of movement of such slope deformations is very high; it may reach even tens of kilometres per hour. Even the movement of such bodies alone has catastrophic consequences. In the case of an uninhabited tropical forest, vegetation cover is the only subject of devastation. Accumulation parts of the slope deformations were immediately washed and transported further, in the water flow direction, to a valley or even down to the Angat reservoir itself, depending on the flow rate and gradient of the stream bed. At that moment, the volume weight of the mixture consisting of water and floating sediments may increase up to 1.4 g.cm^{-3} , thus the erosive action of the river may intensify. This is how the Umiray River banks were stripped of all vegetation and the Quaternary cover up to the level of 8 – 10 metres was removed.

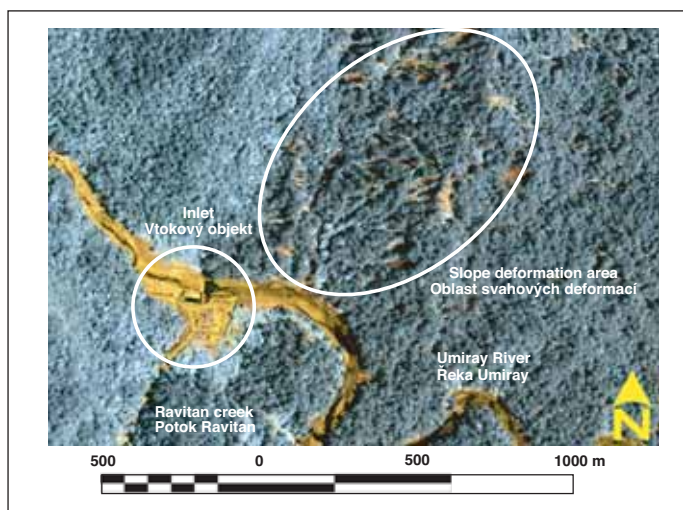
4. NATURAL CONDITIONS

The Philippine Islands lie on the Philippine plate; the Pacific plate subducts beneath the Philippine plate. The northern and eastern parts of Luzon Island belong to the Eastern Philippine section of later Alpides. The sub-base is formed by a crystalline rock complex of the Pre-Upper Cretaceous age. Younger sediments of Miocene age lie discordantly on the crystalline complex; they are locally covered by a basalt nappe. The thickness of the whole complex is up to 8000 metres. There are gabbro and granodiorite bodies in the middle. The hiatus which originated at the end of the Miocene period is followed by sandstone sedimentation, which is often covered by vulcanite nappes of basalt-andesite composition. The young volcanism, deep-focus earthquakes and the nearness of the Philippine Trough are properties of a non-consolidated geological structure; they indicate increased geological risk for the entire waterworks scheme.

We carried out the assessment of detailed geological conditions in the area of the power plant and tunnel outlet using the results of exploration boreholes, test pits and measurements on seismic profiles, which had been carried out before. However, with respect to the results of field reconnaissance, the data on the bedding conditions and the character of the Quaternary sediments which was obtained through the previous surveys must be considered as only roughly informative. Changes in the thickness



Obr. 9 Pohled na ruční čištění výtoku zaneseného tunelu (foto firmy EDCOP 2005)
Fig. 9 A view of the manual cleaning of the outlet of the silted tunnel (photo by EDCOP 2005)



Obr. 10 Satelitní snímek IKONOS, pohled na vtokový objekt a svahové deformace
Fig. 10 IKONOS satellite image; a view of the inlet structure and slope deformations

okamžiku může zvýšit až na $1,4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, a tím zvýšit erozní činnost řek. Břehy řeky Umiray byly takto zbaveny veškeré vegetace a kvartérního pokryvu až do výšky 8–10 metrů.

4. PŘÍRODNÍ POMĚRY

Filipínské souostroví leží na tzv. filipínské desce, pod kterou se podouvá deska pacifická. Severní a východní část ostrova Luzon náleží k tzv. východofilipínskému úseku mladoalpid. Podkladem je komplex krystalických hornin předsvrchnokřídového stáří. Na nich leží diskordantně mladší sedimenty miocénního stáří místně překryté ve svrchní části bazaltovými příkrovy. Mocnost celého komplexu je až 8000 metrů. Ve středu se nalézají tělesa gaber a granodioritů. Po hiátu koncem miocénu následuje sedimentace pískovců překrývaná často příkrovy vulkanitů bazalto-andezitového složení. Mladý vulkanismus, hluboká zeměřesení a blízkost Filipínského příkopu charakterizují nekonsolidovanou geologickou stavbu a naznačují zvýšené geologické riziko pro celý komplex vodního díla.

Pro posouzení detailních geologických poměrů v prostoru elektrárny a výtoku tunelu jsme použili výsledky v minulosti realizovaných průzkumných vrtů, kopaných sond a výsledky měření na seismických profilech. Ovšem vzhledem k výsledkům terénní prohlídky je nutno považovat především údaje o úložných poměrech a charakteru kvartérních sedimentů získaných z průzkumných děl jen za hrubě orientační. Během povodně došlo k řádově metrovým změnám mocnosti aluvia a na vytváření současného charakteru terénu se podílely dnes již nezjistitelné sedimentační a erozní pochody. Změny v mocnosti kvartérních sedimentů v korytě řeky Macua neproběhly pouze po tajfunu v prosinci 2004, ale de facto probíhají neustále, zejména pak při povodních v období výrazných srážek v listopadu a prosinci každého roku. Podle hydrometeorologických údajů mají atmosférické srážky v oblasti řeky Umiray jiný roční průběh než na ostatních měřicích stanicích v oblasti.

5. PROVOZOVÁNÍ VODOHOSPODÁŘSKÉHO SYSTÉMU

Zvýšený odběr vody způsobený rychlým růstem počtu obyvatel v metropoli způsobil, že řeka Angat přestala být schopná v dostatečné míře plnit přehrady. Z tohoto důvodu bylo v osmdesátých letech rozhodnuto převádět do nádrže tunelem o délce 13 km také vody z řeky Umiray. Tunel, vybudovaný v devadesátých letech dvacátého století, převádí do nádrže průměrně 13 m^3 vody za vteřinu. V době dostatku vody v řece Umiray lze toto množství zvýšit až na $24 \text{ m}^3/\text{s}$.

Během tajfunu Nanmadol a následné povodně, která byla výraznější v povodí řeky Umiray, byl zničen prakticky celý vtokový objekt tunelu. Vzhledem k tomu, že tunelová trouba nebyla nijak zabezpečena a ani nebyla řízeně zaplavena, povodňová vlna se dostala i do tunelu a zaplnila jej různými sedimenty. Jak vypadala situace v tunelu po povodni, je patrné z obr. 7. Značná část tunelu nebyla přístupná vůbec a ve zbývající části byla tunelová trouba zaplněna směsí vody, hlíny, kamení a organického materiálu. Nebylo výjimkou, že v tunelu byly

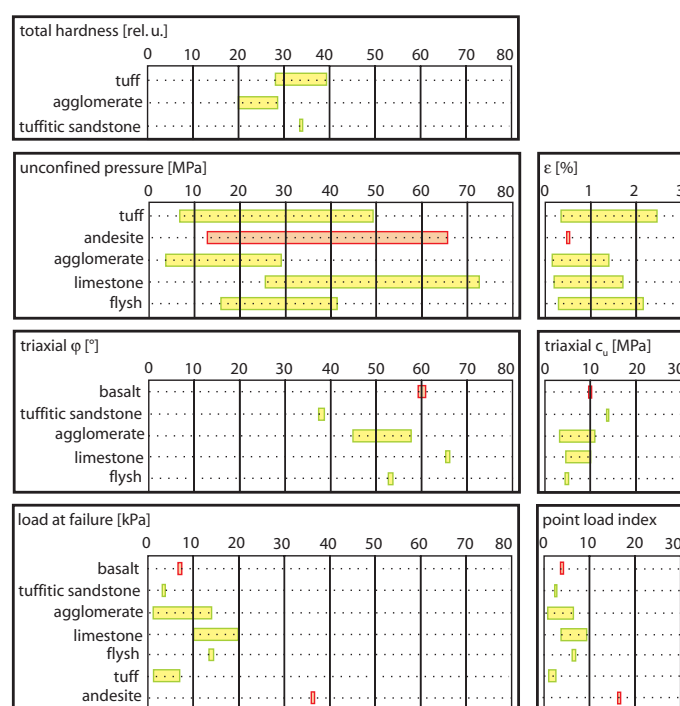
of the alluvium in the order of metres occurred during the flood; sedimentation and erosion processes, which are no more detectable, participated in the formation of the current character of the terrain. Changes in the thickness of the Quaternary sediments in the Macua River valley did not occur only after the typhoon in December 2004. De facto, they occur permanently, first of all during floods in significant rainfall seasons, i.e. in November and December, at the end of each year. Hydrometeorological data shows that the course of atmospheric precipitation in the Umiray River area during a year differs from the precipitation measured at other measurement stations in the region.

5. OPERATION OF THE WATER RESOURCES SYSTEM

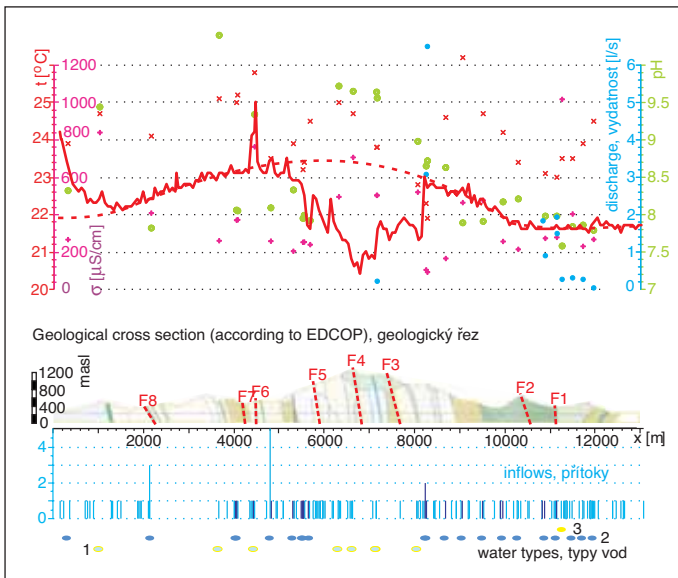
Increased consumption of water, which was caused by rapid growth of population of the metropolis, resulted in the fact that the Angat River ceased to be capable of filling the reservoir in a sufficient extent. This is why the decision was made in the 1980s to divert even the Umiray River water to the reservoir, through a 13km long tunnel. The tunnel, which was built in the 1990s, carries water at a rate of roughly 13 m^3 per second. In the periods when there is enough water in the Umiray River, this rate can be increased to $24 \text{ m}^3/\text{s}$.

Virtually the whole tunnel intake structure was destroyed during typhoon Nanmadol and the subsequent flood, which was more intense in the Umiray River catchment area. Because of the fact that the tunnel tube had been neither protected nor inundated in a controlled manner, the flood wave even got inside the tunnel and filled it with various sediments. The condition of the tunnel interior after the flood is shown in Fig. 7. Significant part of the tunnel was completely inaccessible and the remaining section was filled with a mixture of water, loam, stones and organic matter. It was no exception to find whole trees with trunk diameters exceeding 0.5 metre in the tunnel. The character of the sediments in the tunnel, a chaotic mixture of organic and inorganic matter consolidated by pressure induced by flowing water, is shown in the photos in Figures 8 and 9, which show the condition about 2.5 months after the typhoon. The picture even shows the tunnel cleaning operation, which could not be performed by equipment and all the work had to be carried out manually. The tunnel was again put into operation as late as March 2005, after reconstruction of necessary components; however, for example the cable supplying power for buildings at the tunnel intake receiving water from a small hydroelectric station was not replaced till the time of our last visit.

While documenting the initial condition within the locality, we tried to use even non-traditional techniques. We investigated the wider area of operations by means of ASTER multi-spectral satellite images, and the immediate surroundings of the intake structure by means of IKONOS high



Obr. 11 Mechanické vlastnosti hornin
Fig. 11 Mechanical properties of rock



Obr. 12 Měření v tunelu:

- horní část: teplota ostění, teplota, vodivost a pH přítoků
- střední část: geologický řez; a typizace hornin, podle materiálů firmy EDCOP
- spodní část: místa přítoků, typy vod

Fig. 12 Measurements in the tunnel:

- upper part: temperature of the lining; temperature, conductivity and pH of inflowing water
- central part: geological section and determination of rock types, according to EDCOP documents
- bottom part: locations of leaks, types of water

nalezeny celé stromy s kmeny o průměru přesahujícím půl metru. Charakter náplavů v tunelu, chaotickou směs organických a anorganických hmot ztuhnutých tlakem proudící vody ukazují fotografie na obr. 8 a 9, které zachycují stav asi 2,5 měsíce po tajfunu. Na obrázku je patrné i čištění tunelu, ke kterému nebylo možné použít mechanizace a veškeré práce musely být prováděny ručně. Tunel byl po rekonstrukci nezbytných součástí znovu uveden do provozu až v březnu 2005, ovšem například kabel zajišťující napájení objektů na vtoku do tunelu z malé vodní elektrárny ještě nebyl v době naší poslední návštěvy vyměněný.

K dokumentaci počátečního stavu na lokalitě jsme se snažili používat i netradiční postupy. Širší okolí zájmového území jsme zkoumali pomocí multispektrálních satelitních snímků ASTER a bezprostřední okolí vtokového objektu pomocí snímků s vysokým rozlišením IKONOS. Výřez ze záběrů této družice je na obr. 10. Obrázek je zpracován v nepravých barvách, tj. ke konstrukci snímku byla použita pásma červené a zelené barvy a blízkého infra. Tuto kombinaci jsme volili proto, abychom snížili přesvětlení vtokového objektu. Na tomto výřezu je možné pozorovat jednotlivé objekty v oblasti vtoku a četné svahové deformace ležící na severovýchod od vtokového objektu. Zatím se nám nepodařilo objasnit důvody, proč svahové pohyby postihly jen část území. Vzhledem k tomu, že do oblasti není pro omezenou dobu pobytu na vtokovém objektu možné vstoupit, jsme tento problém zatím neřešili. Předpokládáme, že výskyt svahových deformací byl zapříčiněn kombinací geologické stavby území a množství srážek, které v daném území spadly. Je pravděpodobné, že při příští návštěvě lokality se na některé svahové deformace pokusíme dostat vrtulníkem a zjistit důvody rozličného poškození svahů svahovými pohyby.

6. PRÁCE V TUNELU

Za klíčový objekt v systému Umiray – Angat je nutné považovat tunel spojující obě řeky. Jedním ze základních pramenů informací o horninovém prostředí, které jsme měli k dispozici, je geologický řez tunelem. Vlastnosti hornin, které jsme zjistili zkoumáním archivních zpráv, jsou uvedeny na obr. 11. Vzhledem k nízkým počtům zpracovaných vzorků jsou v obrázku znázorněné hodnoty uvedené pouze orientační. Parametry smykové pevnosti charakterizují horninovou hmotu a nikoli horninový masív, jehož vlastnosti jsou rozhodující pro dimenzování ostění tunelu. Rozptýl hodnot uvažovaných v tabulce

resolution images. A section of the images provided by this satellite is presented in Figure 10. The picture was processed using unrealistic colours, which means that red and green colour zones and the close infra zone were used for the imaging. We chose this combination with the aim of reducing the flaring of the intake structure. In this section, it is possible to see individual structures in the intake area and numerous slope deformations north-east of the intake structure. We have not succeeded in explaining the causes of the fact that land sliding affected only a part of the area. Since it has been impossible to enter the area because of the fact that the time of staying on the intake structure is limited, we have not addressed this problem yet. We expect that the slope deformations were caused by a combination of the geological structure of the area and the amount of precipitation which fell within the given area. It is likely that we will try to get to some of the slope deformations by helicopter, to determine the causes of the varying affection of slopes by mass movements.

6. WORK IN THE TUNNEL

The key structure within the Umiray – Angat system is certainly the tunnel connecting the two rivers. One of the basic sources of information about the ground environment which we have had available is a geological section through the tunnel. The rock properties which we determined by studying archive reports are presented in Fig. 11. With respect to the small number of the samples which were analysed, the values shown in the picture are only orientative. The parameters of shear strength characterise the rock and not the rock mass, the properties of which are critical for the tunnel lining design. The spread of the values contained in the table suggests that mechanical properties of the rock and rock mass are variable. The tunnel was driven by a 4.3m diameter TBM; the average excavation advance rate was 544 metres per month. The variability of the geological conditions is also characterised by the spread of the values of the monthly advance rates, which range from 994m/month (June 1998) to 20m/month (December 1997). We guess from the condition of the tunnel lining that the strength-related and deformational characteristics of the rock mass were taken into consideration during the design calculations because the lining does not exhibit any significant damage resulting from rock pressures.

The measurements in the tunnel which we conducted in November 2007 provided lots of new information. The results of all the measurements are presented in Figure 12. Ground water types are demonstrated at the bottom of the picture (details are available in the text below). The inflows of ground water into the tunnel, as we managed to record them during a passage through the tunnel, are presented above them. The locations where inflow rates higher than about 1 l/s were encountered are marked in blue colour, while green colour marks all other, smaller leaks. The inflows have turned out to be more significant than we expected at the moment of the survey. The highest inflow rate which we recorded was at 8272m, where about 6.5 l/s flew into the tunnel. This amount is not a result of guessing; it was measured by means of a measuring vessel with the volume of 80 l. Next time, we plan that we will again document all inflows during the course of an inspection walk through the tunnel to get the idea of changes in the hydrological regime during a year. We verified the yield of eleven springs between chainages m 7,159 and 11,959 by direct measurements. We selected higher-yield springs, where the yield ranged from



Obr. 13 Přítok vody do tunelu

Fig. 13 Inflow of water into the tunnel



Obr. 14 Trhлина v segmentu ostění
Fig. 14 A crack in a lining segment

ukazuje na variabilitu mechanických vlastností hornin a horninového masivu. Tunel byl ražen metodou TBM průměrem 4,3 m, průměrný měsíční postup byl 544 bm/měsíc. Variabilitu geologických poměrů charakterizuje i rozptyl měsíčních postupů, který kolísá mezi 994 bm/měsíc (VI/98) a 20 bm/měsíc (XII/99). Ze stavu tunelového ostění soudíme, že pevnostní a deformační charakteristiky masivu byly při jeho návrhu respektovány, protože toto nevykazuje výrazné poškození vlivem horských tlaků.

Měření v tunelu, která jsme uskutečnili v listopadu 2007, poskytla škálu nových informací. Výsledky všech měření jsou uvedeny na obr. 12. V nejspodnější části obrázku jsou znázorněny typy podzemních vod (detaily dále v textu). Nad nimi jsou znázorněny přítoky podzemní vody do tunelu, tak jak jsme je zdokumentovali během průjezdu tunelem. Tmavě modrou barvou jsou označena místa, kdy byly zjištěny přítoky o vydatnosti větší než cca 1 l/s, světle modrou barvou pak všechny ostatní menší přítoky. Ukazuje se, že přítoky vody do tunelu jsou výraznější, než jsme do okamžiku dokumentace předpokládali. Největší přítok jsme zaznamenali v 8272 metrech, kde do tunelu přitékalo cca 6,5 l/s. Tato veličina není odhadovaná, ale změřená pomocí odměrné nádoby o objemu 80 l. Příště plánujeme všechny přítoky znovu zdokumentovat při pěší kontrole tunelu, abychom získali představu o změnách vodního režimu během roku. Měření, která jsou uváděna na obrázku, byla zjišťována v období nejvyšších srážek, příští měření budou naopak provedena v období s nejmenším množstvím srážek. Přímým měřením jsme ověřovali vydatnosti jedenácti přítoků ve staničení 7159 až 11959 m. K měření jsme vybírali vydatnější prameny, jejichž vydatnost se pohybovala od 0,04 l/s do již zmíněných 6,5 l/s. Výsledky měření jsou znázorněny v horní části obrázku 12 tmavě modrými body. Část přítoků vody do tunelu byla podchycena již při vystrojování tunelu. V těchto případech je do ostění tunelu osazena krátká trubka, kterou voda do tunelu vtéká. Ukázka jednoho z přítoků vody do tunelu je na obr. 13. Zbylá část přítoků je samovolných, tj. voda si během provozu tunelu vytvořila v ostění otvor, jímž do tunelové trouby přitéká. Přesný poměr obou typů přítoků jsme nezjišťovali, ale odhadujeme, že oba typy jsou zastoupeny rovnoměrně.

Při dokumentaci přítoků vody do tunelu jsme zjistili, že v panelech ostění tunelu jsou trhliny a že na panelech jsou četné sintrové povlaky (obr. 14). Tyto skutečnosti jsme blížeji nedokumentovali. Důvodem je skutečnost, že do tunelu je časově omezený přístup. Vstup do tunelu je možný pouze v době jeho uzavření, což bývá jedenkrát za 4–6 týdnů. I v tomto případě je možné v tunelu setrvat maximálně šest hodin.

Mimo vydatnosti přítoků vody do tunelové trouby jsme měřili i vybrané parametry vody přitékající do tunelu – teplotu, měrnou vodivost a pH. Vydatnost přítoků jsme měřili jen v horní části tunelu, kdežto vybrané vlastnosti podzemní vody jsme měřili v celé délce tunelu. Výsledky všech těchto měření jsou též znázorněny na obrázku 12. Všechny naměřené parametry ukazují na značnou rozdílnost vlastností podzemní vody. Snad nejvíce je to překvapující u pH. Tyto hodnoty se mění od 7,58 (11 258 m) do 10,4 (3656 m). Teplota přitékající vody se pohybuje v mezích 21,9 °C (8274 m) až 26,2 °C (9056 m). Minimální vodivost 92 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jsme zjistili v 8274 metrech a maximální hodnota byla změřena 1017 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve 11258 metrech.

0.04 l/s to the above-mentioned 6.5 l/s. Results of the measurements are presented at the top of Figure 12 by means of dark-blue points. Some of the tunnel inflows were dealt with during the installation of the tunnel lining. A short pipe through which water flows into the tunnel was embedded in the tunnel lining at each of the springs. One of the water inflows into the tunnel is presented in Fig. 13. Remaining inflows developed by themselves; water created holes in the lining during the tunnel operation, allowing water to flow into the tunnel tube. We have not surveyed the exact proportion of both inflow types, but we guess that both types are represented equally.

While documenting the inflows of water into the tunnel, we found out that there were cracks in lining segments and numerous sinter crust patches are on the segments (see Fig. 14). We did not record these facts in a more detailed way. The reason is the fact that the time available for the access to the tunnel was limited. The access to the tunnel is possible only in the period during which it is closed, which is usually once in four to six weeks. Even in such the case it is possible to stay in the tunnel for six hours as the maximum.

Apart from the measurement of the yield of water inflows into the tunnel tube, we measured selected parameters of the water flowing into the tunnel, namely temperature, electrical conductivity and the pH value. The yield of inflows was measured only in an upstream section of the tunnel, whereas the selected properties of ground water were measured throughout the tunnel length. The results of all of those measurements are also presented in Figure 12. All of the measured parameters suggest that the ground water properties are very variable. This fact is probably the most surprising in the case of the pH values. These values range from 7.58 (11258 m) to 10.4 (3656 m). The temperature of the water flowing into the tunnel varies between 21.9 degrees centigrade (8274 m) and 26.2 degrees centigrade (9056 m). The minimum and maximum values of conductivity of 92 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 1017 $\mu\text{S}/\text{cm}$ were measured at 8274 metres and 11258 metres respectively.

One of the most important measurements in the tunnel was the measurement of temperature of the tunnel lining. We measured the temperature by an infrathermometer, from a moving vehicle. The identified differences are surprisingly great, with the main anomalous zone found between approximately 5500 metres and 8200 metres. In contrast to a normal block, the temperature in this tunnel section is lower. If we assume a smooth course of temperature in the tunnel, following the red dot curve, the magnitude of the temperature anomaly in the middle of the tunnel reaches practically three degrees centigrade. The cause of the cooling of the rock mass must be searched for in the groundwater flow.

To learn more about the character of the ground water, we plotted cross charts from all measurements. The cross charts for the water temperature - pH and water temperature - conductivity relationships show neither dependency nor clustering of the points, forming partial assemblies. The condition of the cross chart which displays the relationship between the temperature of water flowing into the tunnel and the temperature of the tunnel lining in close vicinity of the leak is different. In this particular case, it would have been more surprising if both temperatures were identical. The causes may be searched for partly in the different physical technique of the temperature measurement, partly in certain thermal inertia of the rock mass against flowing water. Nevertheless, there is a significant fact there: all points lie close to the line of correlation. The correlation coefficient of the line is 0.895; it is the evidence of a real state of dependency between these parameters.

Nevertheless, the cross chart for electrical conductivity and pH (see Fig. 15) is the most significant. In this case, it is obvious from the chart that the points form clusters in two areas, while only one point lies totally outside. We obtained samples of water concurrently with the field measurement. After preliminary office processing of the results of the measurements conducted in the tunnel still in the Philippines, we selected one sample from each group and sent it to GEOTest Brno. a.s. laboratories with the aim of conducting a physico-chemical analysis of the water. The results of the laboratory analysis confirmed the results of field measurements. It turned out that the ground water flowing into the tunnel from the rock mass could be divided into three basic types.

The assessment of the character of the ground water flowing into the tunnel itself was carried out from the hydrochemical viewpoint, from the aspect of its quality as drinking water (the water terminates in a potable water reservoir) and from the viewpoint of its corrosive effect on concrete (see Table 1).

Jedním z nejdůležitějších měření v tunelu bylo měření teploty ostění. Teplotu jsme měřili z jedoucího vozíku v tunelu infrateploměrem. Zjištěné rozdíly jsou překvapivě vysoké s tím, že hlavní anomální pásmo sahá od cca 5500 metrů do 8200 metrů. V této části tunelu dochází oproti normálnímu poli k poklesu teploty. Pokud bychom předpokládali klidný průběh teploty v tunelu podle tečkované červené křivky, pak velikost teplotní anomálie ve středu tunelu dosahuje prakticky tří stupňů. Příčinu ochlazení horninového masivu je potřebné hledat v proudění podzemní vody.

Abychom lépe poznali charakter podzemních vod, zkonstruovali jsme ze všech měření křížové grafy. Křížové grafy pro vztahy: teplota vody – pH a teploty vody – vodivost nevykazují žádné závislosti ani žádné shlukování bodů do dílčích celků. Jiná je situace u křížového grafu sledujícího závislost mezi teplotou vody vtékající do tunelu a teplotou ostění tunelu v těsné blízkosti přítoku. V tomto případě by více překvapilo, pokud by obě teploty byly stejné. Důvody je možné hledat jednak v odlišném fyzikálním způsobu měření teploty a jednak v určité teplotní setrvačnosti horninového masivu oproti proudící vodě. Podstatná je však skutečnost, že všechny body leží v blízkosti korelační přímkou. Koeficient korelace přímkou je 0,895 a svědčí o skutečné závislosti mezi těmito parametry.

Nejpodstatnější je ovšem křížový graf pro měrnou vodivost a pH (obr. 15). V tomto případě je z grafu patrné, že body se shlukují do dvou oblastí, jen jeden bod leží zcela mimo. Souběžně s terénním měřením jsme odebírali vzorky vody. Po předběžném kamerálním zpracování výsledků měření v tunelu ještě na Filipínách jsme z každé skupiny vybrali jeden vzorek a ten jsme dopravili do laboratoří GEOTestu Brno, a. s., za účelem provedení rozboru fyzikálně-chemických vlastností vody. Výsledky laboratorních zkoumání potvrdily výsledky terénních měření. Ukázalo se, že podzemní vodu přítékající do tunelu z horninového masivu je možné rozdělit do tří základních typů.

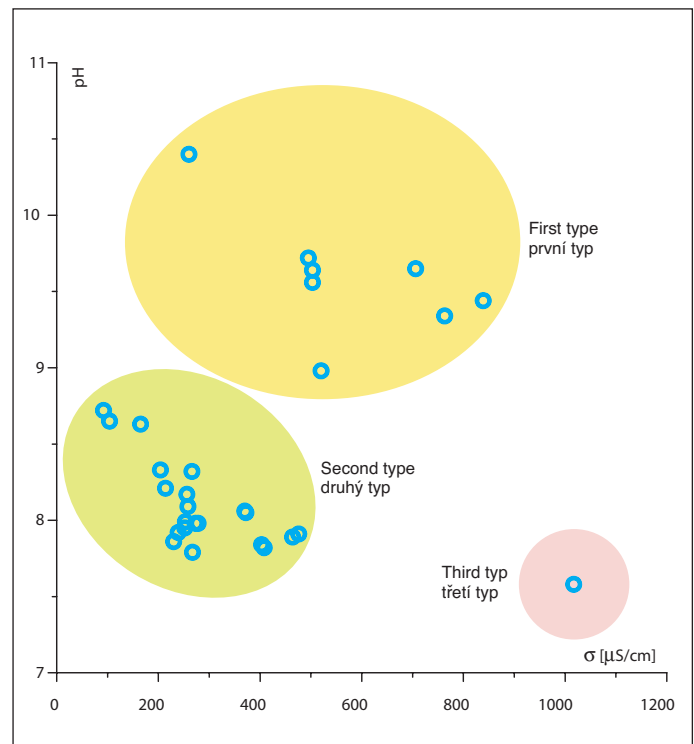
Vlastní hodnocení charakteru podzemní vody vtékající do tunelu bylo provedeno jednak z pohledu hydrogeochemie, z pohledu její kvality jako vody pitné (voda končí v nádrži pitné vody) a z pohledu její agresivity na beton (tab. 1).

Vzorek 5469 charakterizuje vody se střední mineralizací a s vysokým (zásaditým) pH. Z hlediska hydrogeochemie jde o vodu Na–SO₄ typu s nízkým podílem vápníku a hydrogenuhličitanů. Má zvýšený obsah fluoridů (2,5 mg/l). Jde tedy pravděpodobně o vodu s určitou dobou zdržení v horninovém prostředí vulkanitů. Vzhledem k relativně nízkým obsahům vápníku, hořčíku a hydrogenuhličitanů může být agresivní na beton – rozpouštěním. Z hlediska kvality vody v porovnání s limity pro pitnou vodu v EU (Vyhláška č. 252/2004 Sb. ČR) jsou z daných parametrů překročeny limity v případě výše uvedených fluoridů.

Vzorek 6298 charakterizuje vody s nízkou mineralizací a s neutrálním pH. Z hlediska hydrogeochemie jde o vodu CaHCO₃ typu. Jde tedy pravděpodobně o vodu s velmi krátkou dobou zdržení v horninovém prostředí, pravděpodobně v zóně porušení hornin (mohlo by jít o přednostní proudění podzemní vody v tektonickém pásmu). Voda má charakter vody „dešťové“. Vzhledem k nízkému obsahu rozpuštěných látek lze předpokládat agresivitu vody na beton – jeho rozpouštění. Z hlediska kvality vody jako vody pitné nejsou ze sledovaných parametrů překročeny žádné ukazatele.

Vzorek 8600 charakterizuje vody s vysokou mineralizací a s neutrálním pH. Z hlediska hydrogeochemie jde o vodu Ca–SO₄ typu s nízkým obsahem sodíku. Jde tedy pravděpodobně o vodu s dlouhou dobou zdržení v horninovém prostředí. Lze předpokládat, že voda vystupuje po hluboké tektonické linii na rozhraní vulkanitů (které jsou zdrojem síranů) a vápenců (které jsou zdrojem vápníku). Agresivita vody na betonové konstrukce je dána vyšším obsahem síranů. Z hlediska kvality vody v porovnání s limity pro pitnou vodu jsou z daných parametrů překročeny limity v případě celkové tvrdosti, koncentrace vápníku a síranů. Uvedené překročené ukazatele nepředstavují hygienické riziko pro uživatele vody (tab. 2) vzhledem k naředění podzemní vody z přítoků vodou povrchovou z řek Angat a Umiray.

Na základě provedených měření a laboratorních stanovení lze z pohledu proudění podzemní vody vymežit minimálně tři odlišné zóny. Jde o zónu vulkanitů (první typ – skupina vod charakterizovaná vzorkem 5469), o zónu rychlého oběhu pozemní vody (druhý typ – skupina vod charakterizovaná vzorkem 6298) a zónu hlubokého oběhu podzemní vody (třetí typ – vzorek 8600).



Obr. 15 Křížový graf, vodivost – pH
Fig. 15 Conductivity – pH cross chart

Sample 5469 is characteristic of medium mineralised water with high (alkaline) pH. From the hydrochemical point of view, it is water of the Na – SO₄ type with a small proportion of calcium and acid carbonates. It contains increased amount of fluorides (2,5 mg/l). It is therefore probably water which was retained for some time in the vulcanite rock environment. With respect to the relatively low content of calcium, magnesium and acid carbonates, it may have corrosive (dissolving) effect on concrete. In terms of quality of the water in comparison with the limits on drinking water applied in the EU (the Decree No. 252/2004 Coll. of the Czech Republic), the limits on the particular parameters are exceeded in the case of the above-mentioned fluorides.

Sample 6298 is characteristic of low mineralisation water with neutral pH. From the hydrogeochemical point of view, it is CaHCO₃ type of water. It is therefore probably water which was retained for a very short time in the rock environment, probably in a fractured zone (it could be the case of preferential ground water flow through a fault zone). The water has the character of “rainwater”. With respect to the low content of dissolved solids, it can be expected that it has corrosive (dissolving) effect on concrete. In terms of quality of the water as drinking water, no limit on the monitored parameters was exceeded.

Sample 8600 is characteristic of highly mineralised water with neutral pH. From the hydrochemical viewpoint, it is the Ca–SO₄ type of water, with low content of sodium. It is therefore water which was retained for a very long time in the rock mass. It is possible to assume that the water rises along a deep fault line at the interface between vulcanites (which are the source of sulphates) and limestone (which is the source of calcium). The corrosive effect of the water on concrete structures is the result of the higher content of sulphates. In terms of quality of the water in comparison with the limits on drinking water, the limits on the particular parameters are exceeded in the case of the total hardness and concentration of calcite and sulphates. The above-mentioned exceeded indicators do not pose a sanitary risk for water users (see Table 2) because of the fact that the ground water from the leaks is thinned with surface water from the Angat and Umiray Rivers.

It is possible to distinguish at least the following three distinct zones in terms of the ground water flows, on the basis of the completed measurements and laboratory determination of properties: a vulcanite zone (first type – the group of water characterised by sample 5469), a rapid ground-water circulation zone (second type – the group of water characterised by sample 6298) and a deep circulation of ground water zone (third type – sample 8600).

Tab. 1 Hydrogeochemické ukazatele

1	2	3	4	5	6
pH		8,65	7,5	7,22	6,5 – 9,5
konduktivita	μS.cm ⁻¹	505	108	1023	1250
tvrdost celková	mmol/l	0,6	0,45	6,65	2 – 3,5
mineralizace	mg/l	373	96	967	
sodík	mg/l	93,7	8,4	11,5	200
draslík	mg/l	< 1	< 1	1,1	
lithium	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
amonné ionty	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,5
vápník	mg/l	24,0	18,0	255	30 – 80
hořčík	mg/l	< 0,9	< 0,9	7	10 – 30
mangan	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
železo	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2
chloridy	mg/l	6	5	6	100
sírany	mg/l	220	7,2	511	250
dusitany	mg/l	0,06	0,14	< 0,01	0,5
dusičnany	mg/l	< 3	< 3	< 3	50
fluoridy	mg/l	2,5	< 0,2	< 0,2	1,5
orthofosforečnany	mg/l	< 0,05	0,05	< 0,05	
hydrogenuhlíčnany	mg/l	26,1	57,4	175,1	

Vysvětlivky: 1 parametr, 2 jednotka, 3 přítok 5469, 4 přítok 6298, 5 přítok 8600, 6 Pitná voda (vyhláška č. 252/2004 Sb.)

Pozn.: Červené hodnoty překračují vyhlášku č. 252/2004 Sb.

Tab. 2 Agresivita podzemních vod vůči betonovým konstrukcím

1	2	3	4	5
sírany	mg/l	220	7,2	511
pH		8,65	7,5	7,22
CO ₂ agresivní na CaCO ₃	mg/l	-	-	-
amonné ionty	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1
hořčík	mg/l	< 0,9	< 0,9	7

Vysvětlivky: 1 parametr, 2 jednotka, 3 přítok 5469, 4 přítok 6298, 5 přítok 8600

Pozn.: Červené hodnoty překračují ČSN EN 206 – 1/22

7. ZÁVĚR

Tunel spojující řeku Umiray s vodní nádrží Angat je nutno považovat za jeden z klíčových prvků systému zásobování hlavního města Filipín – Manily pitnou vodou. Jeho potřebu si filipínská vodohospodářství uvědomovali už před desetiletími, protože množství vody přiváděné do přehrady jezera řekou Angat nestačilo potřebám rozpínající se metropole. Kromě potřeby je však nutné si neustále uvědomovat i jeho důležitost, a tím také zranitelnost. Z toho důvodu je potřeba celou stavbu náležitě chránit zejména před nepříznivými jevy a jejich následky. Pro potřeby projektování ochranných opatření je nezbytné získat jednak řadu jednorázových informací a poznatků o geologické stavbě širšího okolí a také opakovaným pozorováním vybraných struktur a prvků reliéfu, na jejichž základě je možné, při návrhu a konstrukci ochranných opatření, postupovat maximálně efektivně a ekonomicky. Při zajišťování všech potřebných podkladů a při zpracovávání výsledků měření se osvědčil multidisciplinární přístup specialistů různých oborů.

DOC. RNDr. PAVEL BLÁHA, DrSc., blaha@geotest.cz,

ING. ROMAN DURAS, duras@geotest.cz,

ING. JAN FOUSEK, fousek@geotest.cz,

RNDr. JITKA NOVOTNÁ, novotna@geotest.cz, GEOTest Brno, a. s.

Recenzoval: Doc. Ing. Richard Šňupárek, CSc.

Table 1 Hydrogeochemical indicators

1	2	3	4	5	6
pH		8.65	7.5	7.22	6.5 – 9.5
conductivity	μS.cm ⁻¹	505	108	1023	1250
total hardness	mmol/l	0.6	0.45	6.65	2 – 3.5
mineralisation	mg/l	373	96	967	
sodium	mg/l	93.7	8.4	11.5	200
calcium	mg/l	< 1	< 1	1.1	
lithium	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
ammonium ions	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.5
calcium	mg/l	24.0	18.0	255	30 – 80
magnesium	mg/l	< 0.9	< 0.9	7	10 – 30
manganese	mg/l	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05
iron	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2
chlorides	mg/l	6	5	6	100
sulphates	mg/l	220	7.2	511	250
nitrites	mg/l	0.06	0.14	< 0.01	0.5
nitrates	mg/l	< 3	< 3	< 3	50
fluorides	mg/l	2.5	< 0.2	< 0.2	1.5
orthophosphates	mg/l	< 0.05	0.05	< 0.05	
acid carbonates	mg/l	26.1	57.4	175.1	

Legend: 1 parameter, 2 Unit, 3 inflow 5469, 4 inflow 6298, 5 inflow 8600
6 Drinking water (Decree No. 252/2004 Coll.)

Note: Red values exceed the Decree No. 252/2004 Coll.

Table 2 Corrosive effect of ground water on concrete structures

1	2	3	4	5
sulphates	mg/l	220	7.2	511
pH		8.65	7.5	7.22
CO ₂ corrosive effect on CaCO ₃	mg/l	-	-	-
ammonium ions	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1
magnesium	mg/l	< 0.9	< 0.9	7

Legend: 1 parameter, 2 unit, 3 inflow 5469, 4 inflow 6298, 5 inflow 8600

Note: Red values exceed the CSN EN 206 – 1/22 standard

7. CONCLUSION

The tunnel connecting the Umiray River with the reservoir on the Angat River must be considered as one of the key elements of the system supplying Manila, the Philippine capital, with drinking water. Philippine water engineers realised the need for this system decades ago because the amount of water carried to the reservoir by the Angat River was not sufficient for the expanding metropolis. It is, however, necessary to realise not only the necessity but also the importance and thus also vulnerability of the system. For that reason, the entire structure must be duly protected, above all against adverse phenomena and their consequences. It is necessary for designing protective measures to obtain many one-shot pieces of information and knowledge on the geological structure of the closer surroundings. It is also necessary to proceed with maximum effectiveness and economy when designing and implementing the protective measures, using repeated observations of selected structures and elements of the terrain as the basis. The multidisciplinary approach of all specialists in various fields of science acquitted itself during the preparation of all required fundamentals and processing of measurement results.

DOC. RNDr. PAVEL BLÁHA, DrSc., blaha@geotest.cz,

ING. ROMAN DURAS, duras@geotest.cz,

ING. JAN FOUSEK, fousek@geotest.cz,

RNDr. JITKA NOVOTNÁ, novotna@geotest.cz, GEOTest Brno, a. s.

LITERATURA / REFERENCES

Bláha P.: Angat, A study of flood protection., Geotest, Brno, 4/2005, MS.

Bláha P., Fousek J.: Output 2.1 Design of Geological Investigation for Protective Measures at the Power Plant Site, Geotest Brno, 9/2006, MS.

Bláha P., Fousek J.: MVE – Fresh Water for Manila, 2.2 Report of Geological Investigation, for Protective Precaution at Power Plant Place., Geotest Brno, 12/2006, MS.

Bláha P., Fousek J., Duras R., Novotná J.: Philippines – Drinking Water for Manila, MHPP, Report on a Geological Survey for Protective Measures in a Wider Vicinity of the Power Plant., Geotest Brno, 12/2007, MS.

Factual Report Geotechnical @ Geological Investigation, Umiray – Angat Transbasin Project, Construction & Drilling Specialists Inc., Manila, September 1993, MS.

Umiray – Angat Transbasin Project, Geological and Geotechnical Annexes, Volume II, MWSS, Manila, January, 1994, MS.

Vyhl. č. 252/2004 Sb. Ministerstva zdravotnictví ČR

3. <http://edcdaac.usgs.gov/aster/asteroverview.asp>.