

VÝSTAVBA METRA V MADRIDU

MADRID METRO DEVELOPMENT

JAN PRUŠKA

1. ÚVOD

Madrid je hlavním městem Španělska a též hlavním městem stejnojmenné provincie, která je jednou ze 17 autonomních společenství (comunidades autónomas) Španělska. Madridskou provincií tvoří 179 obcí a měst s podílem 12,7 % na tvorbě HDP. V madridské aglomeraci žije více než 5 milionů obyvatel, v samotném hlavním městě žije 3,2 milionu obyvatel (stav k listopadu 2005), nicméně v centrální oblasti města, kde je nejvíce pracovních příležitostí, žije necelý milion obyvatel. Počet obyvatel centrální oblasti navíc každoročně klesá přibližně o 2,5 % stěhováním obyvatel do okrajových částí Madridu a satelitních měst. Tento trend má za následek rozsáhlé změny v mobilitě obyvatel s obrovským nárůstem počtu jízd (54 % připadá na veřejnou dopravu a 46 % na soukromé automobily).

V letech 1983 až 1985 proběhl přesun některých vládních pravomocí, v rámci kterého vznikl Úřad pro dopravu v madridské oblasti – CRTM (Consortio Regional de Transportes de Madrid). CRTM je nezávislý výbor územní správy zodpovědný za veřejnou dopravu a byl ustanoven zákonem v roce 1985. V jeho radě jsou zástupci vlády, autonomního společenství Madridu, městské správy Madridu a ostatních měst, asociace dopravců, zaměstnaneckých odborů a sdružení uživatelů. Hlavní cíle CRTM jsou:

- plánování rozvoje infrastruktury veřejné dopravy a koordinace různých druhů dopravy,
- zřízení systému integrované dopravy,
- zastřešení celého systému – vzhledem k veřejnosti vystupovat jako jediný partner.

Současný rozvoj veřejné dopravy v městě Madridu je postaven na metru jako hlavním veřejném dopravním prostředku a probíhá od roku

1. INTRODUCTION

Madrid is the capital of Spain and, at the same time, the capital of a province of the same name, which is one of 17 autonomous communities (comunidades autónomas) existing in Spain. The province of Madrid consists of 179 municipalities, which contribute 12.7 per cent to the national GDP. The Madrid conurbation population exceeds 5 million, with 3.2 million living in the capital (the state as of November 2005). Nevertheless, the population of the central area of the capital, where the number of job opportunities is the highest, is less than one million. On top of that, the population of the central area shrinks annually approximately by 2.5% because of people moving to Madrid's outskirts or to satellite towns. This trend results in considerable changes in the population mobility, with an immense increase in the number of trips (54% by means of public transport, 46% by private cars).

A process of the transferring of some governmental responsibilities took place in the 1983 – 1985 period. This process gave rise to the Madrid Regional Transport Consortium – the CRTM (Consortio Regional de Transportes de Madrid). The CRTM, which was established by law in 1985, is an independent committee of the regional administration which is responsible for public transport. Its Board consists of representatives of the government, the Madrid autonomous community, municipalities of Madrid and other towns, the Freight Transport Association, trade unions and the Public Transport Users Association. The CRTM has the following main objectives:

- public transport development planning and coordination of various modes of transport,
- implementation of an integrated transport system,
- acting as an umbrella organisation for the entire system – the only representative in public relations.

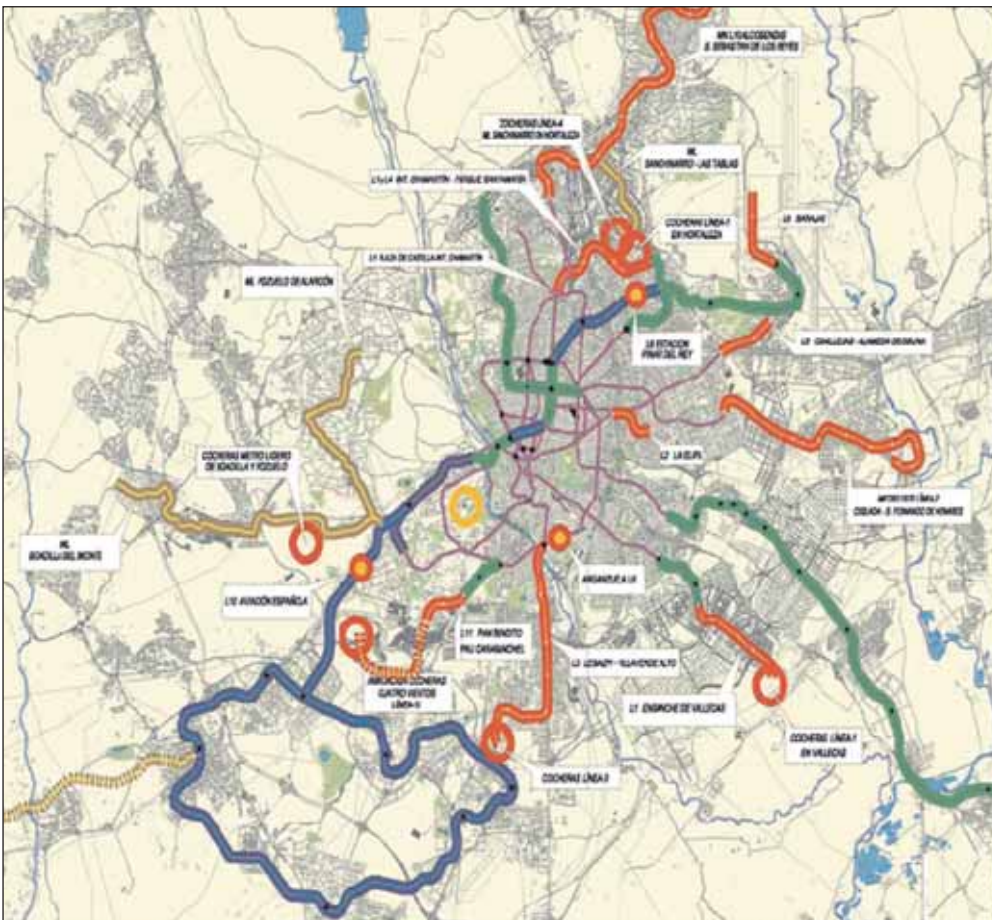
The current development of the public transport in the city of Madrid is based on the Metro as the main means of mass transport. It has been in progress since 1995, consisting of three phases: 1995 – 1999, 1999 – 2003 and 2003 – 2007. During this period, the length of Madrid's Metro (Metro de Madrid) has tripled, reaching 319 km, and the number of stations has risen to 318. This great progress meant that the annual increase in the length of the routes during the past 12 years amounted to 16.4km. The overview of the existing metro lines with the development phases is shown in Figure 1.

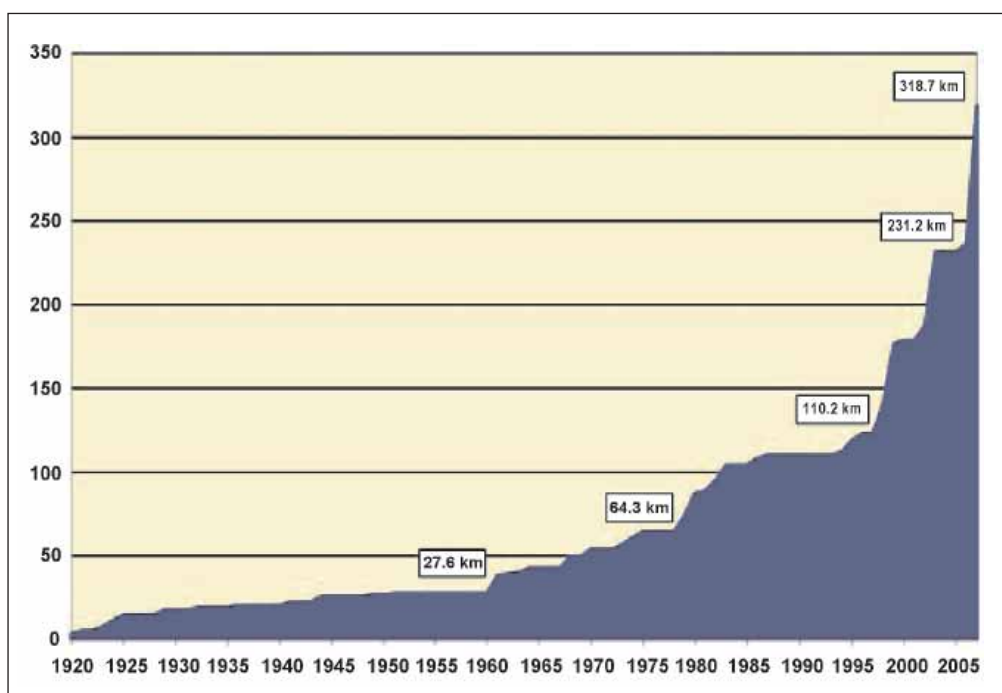
2. MADRID METRO HISTORY

The Madrid Metro is the second largest underground railway system in Europe

Obr. 1 Přehled tras madridského metra s etapami výstavby (stav 2007) [2]
 Fialová – stav roku 1995
 Zelená – 1995–1999
 Modrá – 1999–2003
 Červená – 2003–2007
 Žlutá – lehké metro

Fig. 1 Overview of the Madrid Metro lines with the construction phases (the state as of 2007) [2]
 Violet – 1995 state
 Green – 1995 – 1999
 Blue – 1999 – 2003
 Red – 2003 – 2007
 Yellow – light rail transit system





1995 ve třech časových etapách: 1995–1999, 1999–2003 a 2003–2007. Během tohoto období se délka madridského metra (Metro de Madrid) ztrojnásobila z 110 km na 319 km a počet stanic vzrostl na 318. Tento ohromný postup ve výstavbě znamenal v posledních 12 letech roční přírůstek tratí v délce 16,4 km. Přehled současných tras metra s vyznačením etap rozvoje je na obr. 1.

2. HISTORIE MADRIDSKÉHO METRA

Metro v Madridu je druhý největší systém podzemní dráhy v Evropě, zhruba 92 % celé sítě je podzemních a patří k jednomu z nejstarších. Výstavba začala v červnu 1917 a byla financována jak díky veřejné sbírce, tak částečně i z peněz půjčených bankou a darovaných králem. Dne 17. října 1919 byla otevřena první trasa o délce 3,48 km s osmi stanicemi. Slavnostní ceremonie se zúčastnil i tehdejší král Alfonso XIII. Tato prvá trasa zajistila spojení dvou hustě obydlených částí metropole a nahradila tramvajovou dopravu. Je zajímavé, že rozchod kolejí byl zvolen nestandardní, a to 1445 mm. V roce 1924 se začalo s výstavbou druhé trasy, která se křížila ve stanici Sol s první trasou. Zároveň se na jižním konci prodlužovala i první trasa. Za občanské války se až na první úsek třetí trasy zprovozněné roku 1934 žádné nové trasy v podstatě nestavěly. V roce 1951 měla síť metra délku 27,6 km. Ekonomické problémy v padesátých letech vedly k naprostému zastavení rozvoje metra. Tuto problematickou situaci vyřešilo znárodnění společnosti provozující metro (1961), a tak na konci sedmdesátých let dosáhla síť metra délky 66,9 km. Mezi léty 1979 a 1987 vzrostla síť metra na 110,2 km s průměrným ročním přírůstkem 5,74 km (obr. 2). S ekonomickým růstem španělské metropole a jejím rozšiřováním do okolí (rozvoj satelitních měst) v 80. letech nastává velký rozvoj výstavby madridského metra. U starších stanic byla prodloužena nástupiště, aby bylo možné zajistit provoz nových vlaků s větší přepravní kapacitou. V letech 1983 až 1985 proběhl přesun pravomocí týkajících se rozvoje dopravy na správu provincií. Tento přesun pravomocí umožnil městské správě připravit plán rozvoje metra na období 1995–1999 a následně další dva plány pro období 1999–2003 a 2003–2007 – viz tab. 1.

Období	Trasy	Počet stanic	Délka tras [km]
Rok 1995	Existující	164	120,00
1995 – 1999	Nově vybudovaných	38	56,00
	Celkový počet	202	176,00
	Nárůst v %	23	45
1999 – 2003	Nově vybudovaných	36	59,23
	Celkový počet	238	235,23
	Nárůst v %	19	34
2003 – 2007 včetně lehkého metra	Nově vybudovaných	81	86,85
	Celkový počet	319	322,08
	Nárůst v %	34	37

Tab. 1 Plán rozvoje tras madridského metra od roku 1995 [1]

Obr. 2 Nárůst tras metra [2]

Fig. 2 Increase in the metro lines lengths [2]

(an about 92% portion of the whole network is underground) and belongs among the oldest. The construction started in June 1917, with the funding obtained both owing to a public collection and from bank loans or royal gifts. The first line, which was 3.48km long and contained 8 stations, was opened on 17th October 1919. It was inaugurated in the presence of the then king, Alfonso XIII. The first line provided a connection between two densely populated parts of the metropolis and replaced the tram lines. It is interesting that the track gauge of 1445mm, which was selected, was not standard at that time. The year 1924 saw the beginning of the construction of the second line, which crossed the first line at Sol station. At the same time, the first line was being extended at the southern end. With the exception of the first section of the third line, which went into passenger service in 1934, no new lines

were developed, in substance, during the Spanish Civil War. In 1951, the metro network length reached 27.6km. The economic problems existing in the 1950s led to complete suspension of the development of the metro. This problematic situation was solved by means of the nationalisation of the metro operating company (1961); thus the length of the metro network reached 66.9km at the end of the 1970s. Between 1979 and 1987, the metro network expanded, reaching the length of 110.2km, with the average annual increments of 5.74km (see Fig. 2). In the 1980s, with the Spanish metropolis economy growing and its territory expanding (the development of satellite towns), the Madrid metro experienced significant growth. Older stations were provided with longer platforms to allow the operation of new trains with larger carrying capacity. In 1983 – 1985, the authority over the development of transport was transferred to the administration office dealing with provinces. This transfer of authority allowed



Obr. 3 Stanice Getafe Central [1]

Fig. 3 Getafe Central station [1]

3. ETAPY ROZVOJE METRA OD ROKU 1995

3.1 První etapa 1995–1999

Tento čtyřletý plán rozvoje madridského metra se snažil dohnat deficit v rozvoji sítě metra a počítal s vybudováním 57,4 km nových tras s 38 stanicemi. S cílem zajistit optimální rozvoj sítě metra byl výběr tras vhodných k prodloužení a nových tras proveden na základě dvou zcela konkrétních požadavků:

- prodloužit současné trasy do okrajových oblastí vybraných podle skutečného nárůstu obyvatel,
- sjednotit a popřípadě zlepšit stávající síť.

Prvý požadavek byl dosažen:

- prodloužením trasy 1 z Miguel Hernández do Congosto,
- prodloužením trasy 4 z Esperanza do Mar de Cristal,
- prodloužením trasy 7 z Avenida de América do Pitis,
- prodloužením trasy 9 z Puerta de Arganda do Arganda del Rey a z Pavones Puerta de Arganda (prvá trasa vedoucí za hranice města),
- vybudováním nové trasy 8 z Mar de Cristal přes Fair Grounds na mezinárodní letiště Barajas,
- vybudováním nové trasy 11 z Plaza Elíptica do Pan Bendito.

Druhý požadavek byl splněn:

- spojením tras 8 a 10 mezi stanicemi Nuevos Ministerios a Alonso Martínez,
- zavedením nové linky 10, která se stala páteřním spojením ve směru sever–jihovýchod.

3.2 Druhá etapa 1999–2003

V druhé etapě se pokračovalo v rozšiřování sítě metra tak, že veškeré stavby budou pod povrchem terénu. Bylo vybudováno 54,7 km tunelů, 36 nových stanic a dodáno 300 nových vozů. Stanice Getafe Central může být ukázkou moderního řešení přestupní stanice (obr. 3). Z této etapy rozvoje jsou z hlediska obslužnosti regionu nejvýznamnější následující dva projekty:

- prodloužení trasy 8 do stanice Nuevos Ministerios,
- vybudování okružní linky Metrosur.

Metrosur – území ležící na jih od Madridu zahrnuje několik měst s počtem obyvatel od 20 000 do 70 000 ležících v pěti samosprávných oblastech: Alcorcón, Mostoles, Fuenlabrada, Getafe a Leganés. Celkový počet obyvatel tohoto území překračuje jeden milion a dlouhodobě roste. Rozvojem infrastruktury v této oblasti (výstavba univerzit, nemocnic, škol, nákupních center atd.) se tato oblast stává více méně nezávislou na hlavním městě. Z tohoto důvodu projekt rozvoje madridského metra navrhl v tomto území vybudovat okružní linku metra (nazvanou Metrosur) a napojit ji na trasu 10 jejím 7 km dlouhým prodloužením (do stanice Alcorcón). Vlastní okružní linka spojující všech pět oblastí dosahuje délky 40,5 km, má 6 přestupních stanic napojených na systém příměstských vlaků a v každém městě minimálně dalších 5 stanic. Vybudování této okružní linky umožnilo významně redukovat automobilovou dopravu, ochránit životní prostředí a díky nabídce zpracovaného přepravního systému zajistit udržitelný vývoj daného regionu.

Prodloužení trasy 8 ze stanice Cristal do stanice Nuevos Ministerios (poblíž obchodního centra) umožnilo napojení na trasy 6 a 10 (včetně přestupu na příměstské vlaky) a dále přímé spojení mezinárodního letiště Madrid – Barajas s centrem Madridu. Cesta z letiště do centra se tak zkrátila na 15 minut a je denně využívána přibližně 42 000 cestujícími.

3.3 Třetí etapa 2003–2007

Pro léta 2003 až 2007 byl stanoven nárůst délky tras klasického podzemního metra na 55,7 km s 43 stanicemi a 22,2 kilometru s 36 stanicemi u tzv. lehkého metra, což představuje nejrychlejší nárůst v historii madridského metra. Přehled rozvoje metra této etapy je uveden přehledně v tabulce 2 a znázorněn na obr. 1.

Vedle rozvoje nových tras dojde též ke zlepšování tras stávajících, které se dá shrnout do následujících bodů:

- dovybavení stanic staré sítě metra na stejnou úroveň stanic vybudovaných po roce 1995,
- přizpůsobení 26 vestibulů a 49 stanic pro cestující se sníženou možností pohybu a orientace,
- rekonstruování 78 stanic (obnova a dostavba eskalátorů, obnova podlažních vrstev, ostění, osvětlení apod.),



Obr. 4 Výstavba stanice Puerta del Sol – Gran Via – celkový pohled
Fig. 4 Construction of Puerta del Sol-Gran Via station – overall view

the municipality to prepare the metro development plan for the period of time 1995 – 1999 and, subsequently, other two plans, for the 1999 – 2003 and 2003 – 2007 periods (see Table 1).

Period	Number of stations	Length of lines [km]	
1995	Existing	164	120.00
1995 – 1999	Newly built	38	56.00
	Total	202	176.00
	Increase in %	23	45
1999 – 2003	Newly built	36	59.23
	Total	238	235.23
	Increase in %	19	34
2003 – 2007 including a light rail transit line	Newly built	81	86.85
	Total	319	322.08
	Increase in %	34	37

Table 1 The Madrid Metro development plan since 1995 [1]

3. METRO DEVELOPMENT PHASES SINCE 1995

3.1 The first phase: 1995 – 1999

This four-year development plan for the Madrid metro tried to make up for the deficit in the metro network development and contained the construction of 57.4km of new lines with 38 stations. The selection of lines suitable for extension and new lines was carried out with the aim of ensuring optimum development of the metro network. It was based on the following two perfectly concrete requirements:

- the existing lines to be extended to the locations on the outskirts, which would be selected according to the actual increase in the population,
- the existing network to be unified and improved, if necessary.

The first requirement was met through:

- the extension of the Line 1 from Miguel Hernández to Congosto,
- the extension of the Line 4 from Esperanza to Mar de Cristal,
- the extension of the Line 7 from Avenida de América to Pitis,
- the extension of the Line 9 from Puerta de Arganda to Arganda del Rey and from Pavones to Puerta de Arganda (the first line running beyond the city limits),
- the construction of the new Line 8 from Mar de Cristal through Fair Grounds to the Barajas international airport,
- the construction of the new Line 11 from Plaza Elíptica to Pan Bendito.

The other requirement was met by means of:

- the connection of the Lines 8 and 10 between Nuevos Ministerios and Alonso Martínez stations,
- the establishment of the new Line 10, which became an artery running in the N - SE direction.

3.2 The second phase: 1999 – 2003

In the second phase, the expansion of the metro network continued (all structures were built under the surface). The construction comprised 54.7km of new tunnels and 36 new stations; 300 new cars were supplied. Getafe Central station can be presented as an example of an interchange station (see Fig. 3). In terms of the importance for the resident traffic in the



Obr. 5 Výstavba stanice Puerta del Sol – Gran Vía – madridská metoda
Fig. 5 Construction of Puerta del Sol-Gran Vía station – the Madrid Method

– zvýšení počtu vypravovaných souprav tak, aby ve špičce byla zajištěna maximální hustota 3,5 pasažéra na 1 m².

Největší změny úprav se týkají trasy 3 z roku 1935, kde je nutné prodloužit stanice z 60 na 90 metrů (z důvodu zvýšení počtu vozů

region, the following two projects are the most important projects of this development phase:

- the extension of the Line 8 to Nuevos Ministerios station,
- the construction of the Metrosur loop.

Metrosur – The area south of Madrid contains several cities with the populations of 20,000 to 70,000, which are found in five autonomous regions: Alcorcón, Mostoles, Fuenlabrada, Getafe and Leganés. The population of this area is in excess of one million and grows in the long-term. Through the development of infrastructure in this area (development of universities, hospitals, schools, shopping centres etc.), this area has become more or less independent of the capital. This was the reason why the Madrid Metro development project contained the construction of a metro loop line (named Metrosur), which was to be linked to the Line 10 through a 7km long extension of this line (to Alcorcón station). The loop line, which connects all of the five regions, is 40.5km long, has 6 interchange stations which are connected to the system of suburban trains and at least 5 other stations in each of the cities. Owing to the development of the loop line, it was possible to significantly reduce vehicular traffic, to protect the environment and, thanks to the offer of the elaborate transport system, to ensure sustainable development of the given region.

The Line 8 extension from Cristal station to Nuevos Ministerios station (near a shopping centre) made the connection to the Lines 6 and 10 possible (including the transfer to suburban trains) and allowed direct connection between the international airport Madrid – Barajas and the Madrid downtown. The time of the travel from the airport to the downtown, which is daily used approximately by 42,000 passengers, was reduced to 15 minutes.

Metro	Počet stanic	Délka [km]	Čas výstavby [měsíc]	Rozpočet [milióny eur]
Metro	Number of Stations	Length [km]	Construction Time [month]	Budget [million Euro]
Prodloužení trasy 1, úsek Pza. Castilla – Pinar de Chamartín Line 1 Extension, Pza. Castilla - Pinar de Chamartín section	3	3	27	432,93
Prodloužení trasy 4, úsek P. de Sta. María – Pinar de Chamartín Line 4 Extension, P. de Sta. María – Pinar de Chamartín section	3	4,78	30	
Prodloužení trasy 1, úsek Congosto – Paus de Vallecas Line 1 Extension, Congosto – Paus de Vallecas section	3	3	24	158,69
Prodloužení trasy 2, úsek Ventas – La Elipa Line 2 Extension, Ventas - La Elipa section	1	1,2	17	73,03
Prodloužení trasy 3, úsek Legazpi – Villaverde Alto Line 3 Extension, Legazpi – Villaverde Alto section	7	7,5	26	310,73
Prodloužení trasy 5, úsek Canillejas – Alameda – Osuna Line 5 Extension, Canillejas-Alameda – Osuna section	2	2	22	145,78
Nová stanice na trase 6 (Arganzuela) / A new station on the Line 6 (Arganzuela)	1	-	18	50,99
Prodloužení trasy 7, Line 7 Extension, úsek Las Musas – M40 / Las Musas – M40 section	1	1,3	23	
úsek M40 – Coslada / M40 – Coslada section	1	4,14	17	519,53
úsek Coslada – San Fernando de Henares / Coslada – San Fernando de Henares section	4	5,19	21	
úsek San Fernando de Henares – Hospital de Coslada San Fernando de Henares – Hospital de Coslada section	1	1,47	21	
Nová stanice na trase 8 (Pinar del Rey) / A new station on the Line 8 (Pinar del Rey)	1	-	18	39,82
Prodloužení trasy 7 do terminálu T4 letiště Barajas Line 7 Extension to Terminal T4 of the Barajas airport	1	2,57		46,50
Nová stanice na trase 10 (Aviación Española) A new station on the Line 10 (Aviación Española)	1	-	21	29,74
Prodloužení trasy 11, úsek Pan Bendito – Carabanchel Alto Line 11 Extension, Pan Bendito – Carabanchel Alto section	3	3,1	15	164,97
Celkem / Total	44	46,9	-	
Lehké metro / Light rail transit system				
Nová trasa A / New Line A				
Pinar de Chamartín – Sanchinarro – Las Tablas Pinar de Chamartín - Sanchinarro – Las Tablas	10	5,3	20	238,72
Nová trasa B Colonia Jardín – Pozuelo de Alarcón New Line B Colonia Jardín – Pozuelo de Alarcón	15	8,66	22	116,41
Nová trasa C Colonia Jardín – Boadillia del Monte New Line C Colonia Jardín - Boadillia del Monte	14	13,8	23	166,42
Nová trasa D Móstoles Central – Navalcamero New Line D Móstoles Central – Navalcamero	12	10,5		
Celkem / Total	51	39,6	-	
Příměstské vlaky / Suburban trains				
Chamartín – Nuevos Ministerios – Alonso Martínez – Sol/Gran Vía – Atocha Chamartín – Nuevos Ministerios – Alonso Martínez – Sol/Gran Vía – Atocha	3	8,3	-	75

Tab. 2 Rozvoj madridského metra v období 2003–2007

Table 2 The development of the Madrid metro in the period 2003–2007



Obr. 6 Výstavba stanice Puerta del Sol – Gran Via
Fig. 6 Construction of Puerta del Sol – Gran Via station

soupravy ze 4 na 6), umožnit do všech stanic přístup osobám se sníženou možností pohybu a orientace, kompletně přebudovat vestibuly, změnit napájení z 600 V na 1500 V a zavedení nového zabezpečovacího systému.

Velice zajímavým projektem řešícím dopravní obslužnost Madridu je vybudování dvou nových tunelů o délce 9 km spojujících nádraží Atocha (ležícího na jihu města) a Chamartin (ležícího na severu). Jeden tunel je určen pro vysokorychlostní železnici systému Renfe AVE a druhý pro příměstskou železnici (Cercanías Renfe). Oba tunely byly budovány pomocí TBM. Tunel pro příměstskou železnici umožní prodloužení tras C3 a C4 dnes končících ve stanici Atocha, a tím nejen odlehčí tomuto nádraží, ale také umožní jeho další rozvoj pro dálkovou železniční dopravu. Podle průzkumů dojíždí na nádraží Atocha 400 000 cestujících denně, z nichž 63 000 využívá dále k cestě do středu města metro. Z tohoto důvodu budou také vybudovány dvě nové stanice umožňující přímý přestup z příměstské železnice na trasy metra: Alonso Martínez na trasy 4 a 10 a Puerta de Sol – Gran Via na trasy 1,2,3 a 5. Stanice Puerta del Sol – Gran Via je projektována jako jednodílná ražená stanice s bočními nástupišti o délce 240 m, výška nadloží je 30 až 40 m. Stanice se nachází v historickém středu města a vedle přestupních vestibulů bude mít přímý výstup na náměstí Sol a na ulici Gran Vía a její výstavba má skončit v roce 2008. Výstavba stanice probíhala pomocí madridské tunelovací metody až po vyražení celého dvoukolejného tunelu zeminovým štítem. Po vyražení stanice se ostění tunelu ve stanici až na spodní klenbu rozebere. Na obrázcích 4, 5 a 6 jsou záběry z ražby této stanice.

4. METODY VÝSTAVBY

Od výstavby první trasy roku 1917 bylo použito velké množství metod – od tradičních přes NRTM až po TBM. Protože ražba může probíhat v různém prostředí (soudržné a nesoudržné zeminy, sádkovce atd.), je možné volit ze značného počtu tunelovacích metod. Pro zefektivnění byla vydána společností MINTRA (Madrid Infraestructuras del Transporte) směrnice, kde je volba metod omezena na následující:

- tradiční madridskou metodu,
- hloubení,
- zasypávání,
- zeminové štíty.

Zastoupení jednotlivých metod při výstavbě klasického i tzv. lehkého metra od roku 1995 je uvedeno v tab. 3.

Zeminové štíty

Vzhledem ke geologickým podmínkám se pro ražbu nejvíce používají zeminové štíty (EPB). V rozmezí let 2003–2007 bylo použito celkem 10 EPB, devět pro dvoukolejné tunely (8 o průměru 9,4 m, 1 o průměru 8,9 m) a jeden EPB pro jednokolejný tunel o průměru 7,4 m. Pomocí zeminových štítů bylo vyraženo celkem 40,9 km

3.3 The third phase: 2003 – 2007

The task for the phase 2003 – 2007 was to reach the length of traditional heavy metro rail lines of 55.7km, with 43 stations, and the length of light rail transit lines of 22.2km, with 36 stations. It represented the most rapid increase in the history of the Madrid metro. The overview of the development of the metro in this phase is presented in Table 2 and shown in Figure 1.

Apart from the development of new lines, the existing lines will also be improved. The improvement can be summarised as follows:

- the installation of additional equipment in stations on the old metro network so that they achieved the level of the stations which were built after 1995,
- the adaptation of 26 concourse halls and 49 stations to the needs of passengers with impaired mobility and orientation,
- the reconstruction of 78 stations (renovation and new construction of escalators, renovation of floor assemblies, lining, lighting etc.),
- an increase in the number of running trains so that the maximum density of 3.5 passengers per 1m² was not exceeded during rush hours.

The most significant changes were required on the Line 3, which was built in 1935, where the length of the stations had to be extended from 60 to 90metres (to be able to receive 6-car trains instead of 4-car ones), the access had to be provided for passengers with impaired mobility and orientation, the concourse halls had to be completely reconstructed, the power supply systems had to be converted from 600V to 1500V and a new interlocking system had to be installed.

There is a very interesting project, dealing with resident traffic in Madrid, which consists of the construction of two new tunnels 9km in length, designed to connect railway stations Atocha (found in the south of the city) and Chamartin (found in the north). One of the tunnels is intended for the AVE high-speed trains (operated by RENFE company), while the other one is for suburban trains (Cercanías Renfe). Both tunnels were driven by TBMs. The tunnel on the suburban railway line will make the extension of the Lines C3 and C4, which are currently terminating at Atocha station, possible. Thus the tunnel will not only relieve the burden on the railway station but will also make further development of the station possible so that it meets the needs of long-distance railway transport. According to surveys, 400,000 passengers commute daily to Atocha railway station, 63,000 of which use metro to continue with their travel to the downtown. This is why two new stations will be built, to allow direct transfer from the suburban railway line to the metro lines, namely to the Lines 4 and 10 at Alonso Martínez station and to the Lines 1, 2, 3 and 5 at Puerta de Sol-Gran Via. The Puerta del Sol-Gran Via station design is that for a one-vault mined structure, with 240m long side platforms; the ground cover will be 30 to 40m thick. The station location is in the historic centre of the city. Apart from transfer concourse halls, there will be a direct exit to Sol Square and to Gran Vía Street. The construction is scheduled for completion in 2008. The station was constructed using the Madrid Method of tunnelling, when all EPB TBM operations had been finished throughout the length of the double-rail tunnel. Once the excavation of the station had been completed, the tunnel lining was dismantled in the station, with the exception of the tunnel invert. Pictures taken during the excavation of the station are shown in Figures 4, 5 and 6.

4. CONSTRUCTION METHODS

The number of the methods which have been used since the construction of the first line in 1917 is high, from traditional ones through the NATM to TBM applications. Because tunnel excavation may pass through various types of environment (cohesive and incohesive soils, gypsum etc.), it is possible to choose from rather a wide selection of tunnelling methods. With the aim of making the selection more effective, MINTRA (Madrid Infraestructuras del Transporte) company issued a directive where the selection of methods is restricted to the following ones:

- the traditional Madrid Method,
- cut-and-cover,
- false tunnelling,
- EPB TBMs.

The percentage of the individual methods which have been used during the construction of the traditional metro and the light rail transit line since 1995 is presented in Table 3.

Earth pressure balance (EPB) TBMs

Earth pressure balance (EPB) TBMs have been used most frequently for the drives, with respect to the geological conditions. A total of 10 EPB



Obr. 7 Zeminový štít Herrenknecht S280 [1]
Fig. 7 Herrenknecht S280 EPB TBM [1]

tunelů během 26 měsíců, z toho 37 km za necelých 19 měsíců (to odpovídá i časovému nasazení EPB) – podrobnější údaje jsou uve-

TBMs was used in the period 2003 – 2007; nine of them were designed for double-rail tunnel drives (8 pieces 9.4m in diameter and 1 piece 8.9m in diameter) and one for a 7.4m-diameter single-rail tunnel. The aggregate length of 40.9km of tunnels was driven by the EPB TBMs during 26 months; 37km of that length during less than 19 months (this data corresponds to the times for which the TBMs were employed) – more detailed data is presented in Table 4. Figure 7 presents a Herrenknecht S280 TBM in a launching pit.

Traditional Madrid Method

As it follows from the title, this method has been the most frequently used tunnelling method in Madrid. In 1995, the length of the tunnel tubes which had been driven by this method was 80km, out of the total length of 116km. It is a traditional tunnelling system where the lining is constructed in stages, in partial headings. The method is based on the principle that the calotte excavation is carried out as the first step and the lining of the vault is installed immediately after the excavation. The excavation of the lower part of the cross section with side walls follows only when the profile support by means of the final lining has been finished (see Fig. 8). This method is slow; the maximum advance rate is 2.5m per day.

Cut-and-cover

The construction of cut-and-cover tunnels has dominated mainly in Madrid outskirts and satellite towns, where the conditions on the surface

Úsek [m] / Section [m]	Typ EPB / EPB TBM type	Doba výstavby / Construction period	Délka tunelu / Tunnel length
Trasa 1 Congosto – Ensanche de Vallecas Line 1 Congosto – Ensanche de Vallecas	Carpetana (Herrenknecht S165) Ø 9,40 m	20. 9. 2004 – 3. 5. 2005	2013
Trasa 5 Canillejas – Alameda de Osuna Line 5 Canillejas – Alameda de Osuna	Carpetana (Herrenknecht S165) Ø 9,40 m	21. 7. 2005 – 7. 12. 2005	1342
Trasa 11 Pan Bendito – Carabanchel Alto Line 11 Pan Bendito – Carabanchel Alto	Excavolina (Mitsubishi – NFM) Ø 9,40 m	17. 10. 2005 – 7. 3. 2006	3841
Trasa 7 Metroeste II Sever M40 – Coslada Line 7 Metroeste II Nord M40 – Coslada	Rompearenas (Lovat) Ø 7,40 m	20. 6. 2005 – 24. 10. 2005	4030
Trasa 7 Metroeste II Jih Coslada – M40 Line 7 Metroeste II South Coslada – M40	Rompearenas (Lovat) Ø 7,40 m	22. 11. 2005 – 13. 3. 2006	1732
Trasa 3 Legazpi – San Cristóbal Line 3 Legazpi – San Cristóbal	Guster (Herrenknecht S302) Ø 9,40 m	19. 5. 2005 – 28. 3. 2006	4300
Trasa 3 San Cristóbal – Villaverde Alto Line 3 San Cristóbal – Villaverde Alto	Adelantada (Mitsubishi – NFM) Ø 9,40 m	5. 5. 2005 – 19. 4. 2006	2488
Trasa 1 a 4 Chamartín – P. Sta. María Line 1 and 4 Chamartín – P. Sta. María	Verne (Herrenknecht S274) Ø 8,70 m	19. 7. 2005 – 20. 4. 2006	3090
Metronorte 2B	Metromachine (Herrenknecht S280) Ø 9,40 m	16. 5. 2005 – 12. 6. 2006	4885
Metronorte 1B	Madriladora (Herrenknecht S280) Ø 9,40 m	29. 9. 2005 – 3. 7. 2006	2562
Trasa 7/III Coslada – S. Fernando Line 7/III Coslada – S. Fernando	Mascastiza (Herrenknecht S122) Ø 9,40 m	5. 7. 2005 – 27. 9. 2006	5820
Metronorte 1C/2A	Chotis (Herrenknecht S295) Ø 9,40 m	29. 6. 2005 – 18. 9. 2006	4485

Tab. 4 Nasazení EPB v období 2003–2007
Table 4 Employment of EPB TBMs in the period 2003–2007

Metro Metoda / Method	Druh stavby / Construction type	Délka / Length		
		1995 – 1999	1999 – 2003	2003 – 2007
EPB	Tunel / Tunnel	22,500 m 60,30 %	38 144 m 69,70 %	44 060 m 74,94 %
Tradiční madridská / Traditional Madrid	Tunel a stanice / Tunnel and stations	5 700 m 15,30 %	3610 m 6,60 %	3 805 6,47 %
Hloubení / Cut and cover	Tunel a stanice / Tunnel and stations	7 900 m 21,20 %	7 037 m 12,90 %	10 729 m 18,24 %
Přesypání / False tunnel	Tunel / Tunnel	1200 m 3,20 %	5 909 m 10,80 %	207 m 0,35 %
Lehké metro / Light rail transit system Metoda / Method	Druh stavby / Construction type	2003 – 20007		
Tradiční madridská / Traditional Madrid	Tunely a stanice / Tunnels and stations	160 m/0,58 %		
Hloubení / Cut and cover	Tunely a stanice / Tunnels and stations	9397 m/33,83 %		
Povrch / At grade	koleje / rails	18217 m/65,59 %		

Tab. 3 Metody výstavby
Table 3 Construction methods

deny v tabulce 4. Na obr. 7 je tunelovací stroj Herrenknecht S280 ve startovací jámě.

Tradiční madridská metoda

Jak vyplývá z názvu, je tato metoda historicky nejpoužívanější tunelovací metodou v Madridu. V roce 1995 bylo z 116 km celkové délky tunelových trub touto metodou vyraženo 80 km. Jedná se o klasickou tunelovací soustavu, při níž se výstavba ostění provádí ve stadiu dílčích výlomů. Princip metody spočívá v tom, že se nejprve provádí výlom kaloty, v němž se neprodleně vybuduje klenba ostění. Teprve v profilu zajištěném definitivní klenbou se razí spodní část průřezu, v níž se budují opěry ostění – viz obr. 8. Tato metoda je relativně pomalá, maximální postup je 2,5 m za den.

Hloubení

Výstavba tunelů hloubením dominuje především v okrajových částech Madridu a v satelitních městech, kde nejsou podmínky na povrchu tak stísněné, zatímco v centru města se hloubením budují jen některé stanice. Nejčastější postup výstavby byl následující:

- odkloní se doprava a vybudují se podzemní stěny na požadovanou délku,
- provede se výkop na úroveň pracovní spáry klenby (podle šířky se stěny rozpírají či kotví),
- na terén dna jámy se postaví bednění, do kterého se vybetonuje klenbová konstrukce,
- po provedení konstrukce se jáma zasype a obnoví se doprava na povrchu,
- další výstavba probíhá pod ochranou klenbového stropu.

Vedle tohoto postupu se uplatnily i další postupy, např. ve svaňovaných či pažených jámách.

5. REDUKCE DEFORMACÍ NADLOŽÍ

Rozšíření madridského metra v sobě zahrnuje různé druhy staveb: prodloužení stávajících tras, výstavbu nových stanic (a to i v již provozovaných trasách) a výstavbu tras lehkého metra mimo město (podzemní i povrchové vedení tras). Již před vlastní výstavbou byl posouzen její vliv na okolí (deformace nadloží, velikost poklesové kotliny, vliv na okolní zástavbu, inženýrské sítě apod.) a stanoveny rizikové faktory. Tato analýza využívala následující rozborů:

- zhodnocení projektové dokumentace (geologického profilu, dispozice, navržené konstrukční metody),
- pasportizace objektů v okolí stavby (typ, způsob založení, využití, stáří apod.),
- výpočet poklesové kotliny (odhad deformace nadloží),
- posouzení vlivu deformace nadloží na konstrukce (z hlediska limitních hodnot),
- v případě rizikové oblasti provedení preventivních měření (HPV, odběr vzorků zemin z nadloží apod.).

Ovlivnitelné rizikové faktory byly zakomponovány do projektového řešení navržením doplňujících opatření:

- a) trysková injektáž,
- b) svislé předsunuté clony z mikropilot,
- c) klasická injektáž horninového prostředí,
- d) kompenzační injektáže,
- e) dynamické zhutňování,
- f) pilotové stěny – obr. 10,
- g) stabilizace pojivy (cementem, vápnem),
- h) odvodňování pomocí studní,
- i) ochranný deštník z mikropilot či pilot,
- j) pilotové stěny kolmé na osu tunelu při ražbě EPB.

6. ZÁVĚR

Na počátku 21. století má madridské metro jednu z nejrychleji se rozrůstajících sítí, díky linkám 12 a 9 dokáže obsloužit i oblasti předměstské a je také navázáno na systém příměstské dopravy (Cercanías Renfe). Jen za poslední čtyři roky byl nárůst délky tras o 83,5 km, počtu stanic o 81 a bylo proinvestováno skoro 4 400 milionů eur (viz tabulka 5). Od května 2007 je madridské metro doplněno i systémem tzv. lehkého metra (Metro Ligero). Jeho první trasa (ML1) byla otevřena v květnu 2007 a staví se i další linky (ML2 severozápadním a ML3 západním směrem). Dá se konstatovat, že se madridské metro



Obr. 8 Madridská tunelovací metoda [3]

Fig. 8 The Madrid Method of tunnelling [3]

are not so much constrained, whereas only few stations were built by the cut-and-cover system in the downtown. The most frequent was a top-down construction process, consisting of the following steps:

- traffic was diverted and diaphragm walls were installed at a required length,
- excavation was carried out to the level of the springing of the vault (the diaphragm walls were braced or anchored, depending on the width of the excavation),
- a mould was constructed on the bottom of the pit and the concrete vault was cast on it,
- once the vault structure had been completed, the pit was backfilled and surface traffic reinstated,
- the other construction work was carried out under the protection of the vaulted roof.

Apart from the above-mentioned procedure, even other procedures were applied, e.g. construction in excavations with slopes or in box excavations.

5. REDUCTION OF OVERBURDEN DEFORMATIONS

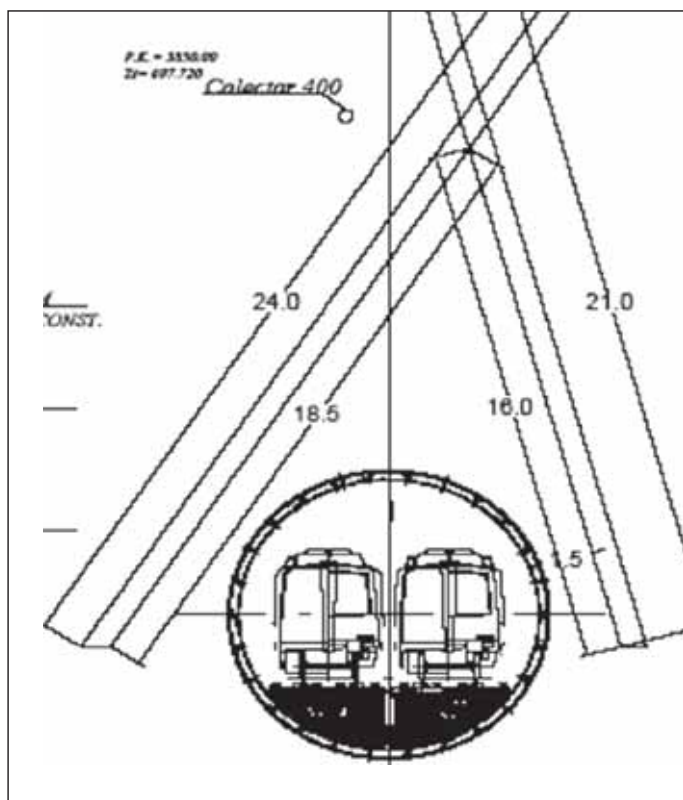
The expansion of the Madrid Metro network comprises various types of structures, namely the extension of existing lines, construction of new stations (even on operating lines) and the development of the light rail transit system leading outside the city (both underground and at-grade routes). The impact of the construction on the surroundings (deformations of the overburden, the size of the settlement trough, influence on existing buildings and utility networks etc.) were assessed and risk factors determined before the commencement of the works. The analysis used the following documents:

- the assessment of design documents (the geological profile, layout, construction methods designed),
- the condition survey of existing structures (type of structure, type of foundation, purpose, age etc.).



Obr. 9 Výstavba ve svaňované jámě [4]

Fig. 9 Construction in a trench with slopes [4]



Obr. 10 Předinjektování trasy tunelu [3]

Fig. 10 Pre-grouting along the tunnel route [3]

stalo jedním z největších a nejmodernějších ve světě. Rozvoj madridského metra nepřinesl jen nové trasy, ale také ohromné zkušenosti s použitím EPB. Je též nutné konstatovat, že tak rozsáhlý projekt by nebylo možné realizovat bez:

- plné politické podpory,
- použití inovačních technologií,
- plného nasazení všech zúčastněných stran,
- využití zkušeností předešlých zákonodárných sborů,
- zapojení nejlepších evropských odborníků v daných oborech.

Další čtyřletý plán rozvoje metra na období 2007–2011 již není tak ambiciózní a počítá s prodloužením klasického metra o 11 km (trasy 2, 3, 9, 11) a tzv. lehkého metra o 10 km (Puerta de Hierro – Majadahonda – Las Rozas).

Celkový rozpočet tunelů a stanic ¹⁾	3 360,18 M€
Celkový rozpočet dep a skladů	344,34 M€
Celkový rozpočet nákupu vozového parku	694,26 M€
Celkem	4 398,78 M€

¹⁾ Investice zahrnují přípravu projektu, stavební práce, vybavení a technický dozor

Tab. 5 Investice v období 2003–2007

Poděkování

Příspěvek byl zpracován v rámci řešení projektu výzkumného záměru MSM 6840770003 Rozvoj algoritmů počítačových simulací a jejich aplikace v inženýrství

DOC. DR. ING. JAN PRUŠKA, pruska@fsv.cvut.cz, ČVUT PRAHA – Fakulta stavební

- the calculation of the settlement trough (estimation of the deformation of the overburden),
- the assessment of the influence of deformations of the overburden on existing structures (from the viewpoint of limiting values),
- the results of preventative measurements which were carried out in dangerous areas (water table detection, taking of samples of soils from the overburden etc.).

The following additional measures were incorporated into the design with the aim of dealing with the risk factors where the reduction of the risk was possible:

- a) jet grouting,
- b) vertical, forward positioned curtains consisting of micropiles,
- c) traditional grouting of the ground mass,
- d) compensation grouting,
- e) dynamical compaction,
- f) pile walls – see Figure 10,
- g) soil stabilisation by binders (cement, lime),
- h) dewatering wells,
- i) protective umbrellas formed by micropiles or piles,
- j) pile walls, perpendicular to the tunnel centre line (during EPB TBM driving).

6. CONCLUSION

At the beginning of the 21st century, the Madrid Metro has one of fastest expanding networks of lines. Owing to the Lines 12 and 9, it is capable of serving even the outskirts and, in addition, is connected to the suburban transport system (Cercanías Renfe). Only during the past four years, the length of the lines grew by 83.5km, the number of stations by 81 and nearly 4,400 million euro were invested (see Table 5). The light rail transit system (Metro Ligero) was added to the Madrid metro network in May 2007. The first line of this system (ML1) was inaugurated in May 2007 and other lines (ML2 heading to the north-west and ML3 to the west) are under construction. We can say that the Madrid metro has become one of the largest and most modern in the world. The development of the Madrid metro brought not only new lines but also plenty of experience of the use of EPB TBMs. It can also be stated that such an extensive project could not be implemented without:

- full political support,
- the application of innovative technologies,
- total commitment of all parties involved in the project,
- drawing on the experience gained by preceding legislatures,
- engagement of the best European professionals in the given engineering branches.

The next four-year plan for the metro development in the period 2007 – 2011 is no more so ambitious; it contains the extension of the traditional metro lines by 11km (the Lines 2, 3, 9 and 11) and of the light rail transit system by 10km (Puerta de Hierro - Majadahonda - Las Rozas).

Overall budget for tunnels and stations ¹⁾	3360.18 M€
Overall budget for depots and storage facilities	344.34 M€
Overall budget for the purchase of rolling stock	694.26 M€
Total	4398.78 M€

¹⁾ The budget contains the cost of the design, construction, equipment and engineering supervision

Table 5 Investments in the period 2003 – 2007

Acknowledgement

The paper was prepared within the framework of the solution to the project of the research program MSM 6840770003 „The development of algorithms of computer simulations and their engineering application“

DOC. DR. ING. JAN PRUŠKA, pruska@fsv.cvut.cz, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Plan de Ampliación de la Red de Metro de Madrid, MINTRA, Madrid
- [2] Trabada J. at al: The Madrid Extension Plan 2003–2007, In:Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 2007–2019, Madrid 2007
- [3] Luis Armada Martínez-Campos: Plan de Infraestructura de la Comunidad de Madrid 2003–2007, Viceconsejero de Transportes e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid, Madrid, 2007
- [4] stránky firmy MINTRA: <http://www.mintramadrid.es/pro0307.php>