

Några resultat och erfarenheter från EU-projektet Tunconstruct

Cecilia Montelius

Sid Patel

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
2 Design (SP1)	8
2.1 UCIS	8
2.2 IOPT - Expert knowledge basis	10
2.3 Delprojekt inom Design	12
2.3.1 Geologisk modell	13
2.3.2 Geostatistisk modell	13
2.3.3 Databas för bergmekaniska prov	14
2.3.4 Innovativa laboratorieprocedurer för bestämning av bergets egenskaper efter brott	14
2.3.5 Simulering	15
3 Nya och förbättrade undersökningsmetoder	17
3.1 Projektering och visualisering av geologisk data	17
3.1.1 Seismiska undersökningar	17
3.1.2 Sättningskontroll med optisk fiberkabel	18
3.1.3 Tunnelskanner	21
3.1.4 3D-laserskanning för sektionering, ett exempel	22
3.1.5 Tabell över olika 3D LADAR skanners	23
3.2 Övervakning och framdrift i tunneln	24
3.2.1 Kontroll av markförhållanden framför TBM	24
3.2.2 Mobilt multi-sensor system för snabb kvalitetskontroll	25
3.2.3 En metod att jämföra den uppmätta förändring i tunnelstrukturen med värden från en databas	25
3.3 Automatiserad styrning vid fullortsborring	26
4 Tekniska innovationer för effektiv tunneldrivning	26
4.1 Fullortsborringsmaskiner	27
4.1.1 Disk cutting knife test station och datasimulering	27
4.1.2 Fullortsborringsmaskiner med stor diameter	28
4.1.3 Monitored Bouygues Disc Cutter (MOBYDIC)	30
4.2 Roadheaders	33
4.2.1 Ny mjukvara ger omedelbar positions bestämning av roadheader	35
4.3 Automatiserade sprutbetongmaskiner	35
4.3.1 Nya metoder och lösningar	36
4.4 Betongbågar/lining med bättre hållbarhet	39
4.4.1 "Performance based" sprutbetongblandningar	39
4.4.2 Nya material i betongsegment	40
4.5 Miljöpåverkan	41
4.5.1 Återvinningsanläggning för schaktmaterialet från fullortsborring (TBM)	41
4.6 Arbetssäkerhet	42
4.6.1 Trådlös nödläges signalering	42
5 Tunnel övervakning och underhåll	45
5.1 Övervakning och besiktning	45
5.1.1 Sensorer	45
5.1.2 Tryckceller	46
5.1.3 Stålkorrosion sensor och fuktgrad i fiberarmerad betong	47
5.1.4 Borrhåls-extensometer	47
5.1.5 Punkt spänningsmätare (Spot weldable strain gauge)	48

5.2 Andra metoder för att avgöra tunnelns skick	48
5.3 Service metoder.....	48
5.3.1 Dragarita, en fjärrstyrd robot.....	49
5.3.2 Robotbesiktning och servicesystem	49
6 Litteratur.....	51

1 Inledning

Denna rapport, som är finansierad av SBUF¹, har skrivits i syfte att ge en översikt över de mest relevanta resultaten från det integrerade europeiska forskningsprojektet Tunconstruct² (IP 011817-2) som delfinansieras av EU inom det sjätte ramprogrammet för forskning och teknisk utveckling³ (2002-2006). NCC har varit delaktiga som enda svenska medlem. Projektkoordineringen har utförts av det tekniska universitetet i Graz, Österrike. Tunconstruct är indelat i fem forskningsområden (*subprojects*) som är:

- Design (*SP1 Design*)
- Innovativa teknologier (*SP2 Innovative technologies*)
- Innovativa processer (*SP3 Innovative processes*)
- Underhåll och service (*SP4 Maintenance and service*)
- Ledning och exploatering (*SP5 Management and exploitation*)

Varje *subproject* är i sin tur uppdelat i *work packages* (WP). Vilka dessa är framgår av Figur 1.

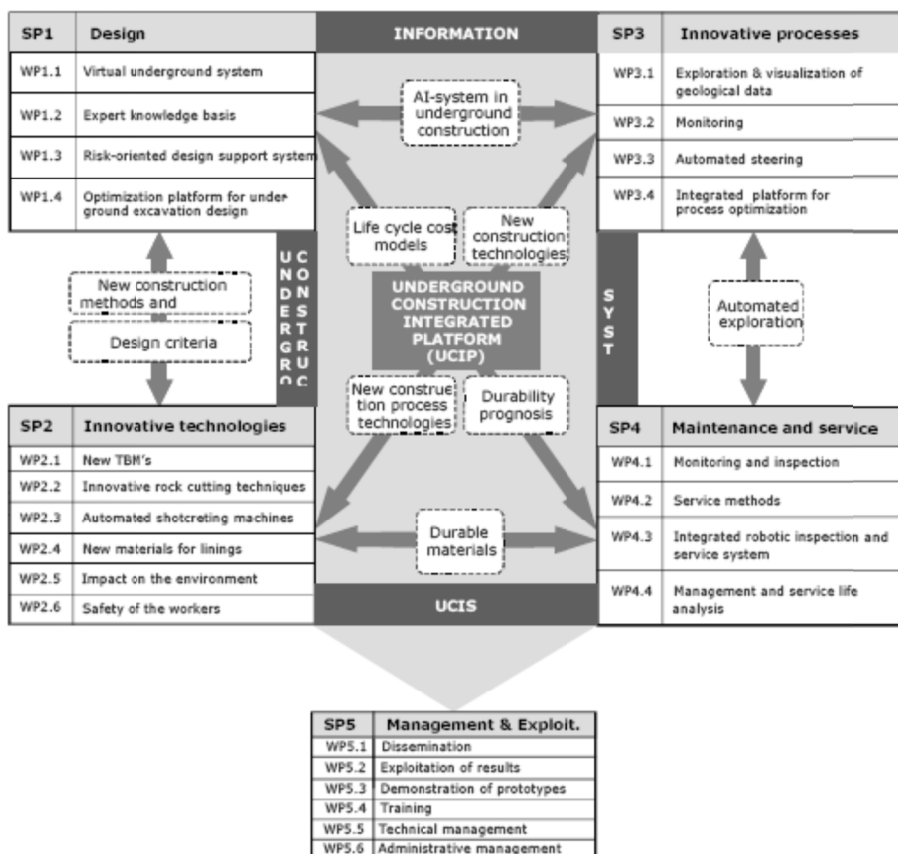
Tunconstructs målsättning är ambitiös och har bl.a. uttryckts som:

”The goal of the project is the transformation of European underground construction into a high tech, high added value activity, capable of giving cost-efficient, sustainable and novel solutions to societal needs. It addresses underground construction issues, which will contribute to improve the quality of life of citizens for example by reducing traffic congestion and the associated pollution and noise. By moving infrastructures underground, aboveground spaces are freed. The project will develop methods that allow a proper assessment of construction risk, innovative materials/techniques and will result in higher quality construction processes beyond the conventional ones used today. This will also impact on the safety of workers. The aim is to perform research and development in order to produce an Underground Construction, Integrated Platform (UCIP) that will include all aspects of the life cycle of an underground construction from planning to operation/maintenance. As a consequence of the work proposed underground construction will be more economic (we expect a reduction of 30% of costs and time at the end of the project), safer (the accident rates will be reduced by 50%) and more environmentally friendly. The consequence of this will be that underground space will be increasingly used to alleviate pressing problems that will confront the European society in the next 20 years: traffic congestion (freight transport is for example expected to increase by 60% from 2000 to the year 2020), increasing urbanisation (mega cities), lack of space and pollution of air and water. In addition the European industry will be more competitive in the world market.”

¹ Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond

² URL: <http://www.tunconstruct.org/tcstatic/overview.htm>

³ URL: http://europa.eu/legislation_summaries/research_innovation/general_framework/i23012_sv.htm



Figur 1 Schematisk bild över delprojekten inom Tunconstruct.

Tunconstructs medlemmar utgörs av 41 stycken olika företag, organisationer, forskningsinstitut och universitet från 11 olika länder, dessa redovisas i Tabell 1.

Tabell 1 Deltagare Tunconstruct	
Frankrike	ACOME Bouygues Travaux Publics Centre d'Etudes des Tunnels Commissariat à l'Energie Atomique Société Metro Marseille
Grekland	Technical University of Crete (TUC)
Nederländerna	Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO
Polen	Kopex S.A.
Schweiz	Alptransit Gotthard AG Amberg Engineering Ltd BLS Lötschbergbahn AG
Slovenien	C3M d.o.o.
Spanien	Acciona Infraestructuras, S.A. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias Asociación para la Investigación y el Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales Ayuntamiento de Madrid Centre Internacional de Mètodes Numèrics en l'Enginyeria (CIMNE) Barcelona Comunidad de Madrid

Tabell 1 Deltagare Tunconstruct	
	<p>Consejo Superior de Investigaciones Científicas Dragados, S.A. FCC Construcción S.A. Geotecnia y Cimientos, S.A. Gestión de Infraestructuras, S.A. (GISA) Sika, S.A. Universitat Politècnica de Catalunya</p>
Storbritannien	Mott MacDonald Limited
Sverige	NCC Construction Sverige AB
Tyskland	<p>Deutsche Bahn AG Ed. Zueblin AG Gloetzl Gesellschaft für Baumesstechnik mbH Herrenknecht AG HOCHTIEF Construction AG Maidl & Maidl - Beratende Ingenieure Ruhr University Bochum STUVA e.V. - Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen</p>
Österrike	<p>Geodata Zivilttechnikergesellschaft mbH Graz University of Technology (Coordinator) Österreichische Bundesbahnen University of Leoben Vienna University of Technology Voest-Alpine Bergtechnik GmbH</p>

2 Design (SP1)

Det övergripande målet med SP1 (design) har varit att ta fram ett beslutsstödsystem för undermarksbyggande, benämmt IOPT (*Integrated Optimization Platform*). Delprojekten har till övervägande del bestått av att ta fram programvara och metoder för att stödja IOPT. En central roll för både IOPT och för många av projekten inom Tunconstruct har varit arbetet med att ta fram en databas som kan användas inom alla delar av ett tunnelprojekt. För detta ändamål har UCIS (*Underground Construction Information System*) utvecklats.

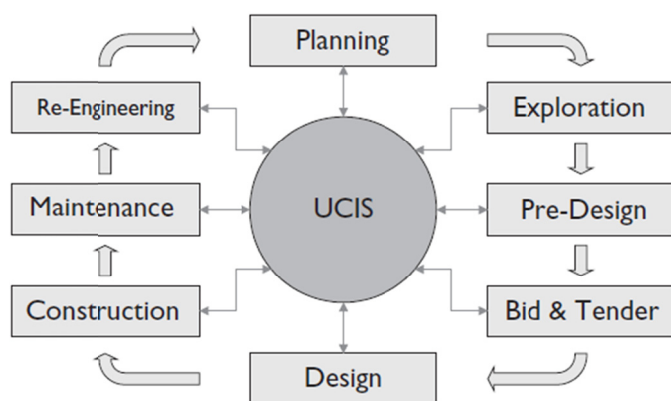
2.1 UCIS

Som nämnts ovan har en av de centrala uppgifterna inom Tunconstruct varit utvecklandet av UCIS (*Underground Construction Information System*) med målsättningen att hantera alla data i ett undermarksprojekt från planering till drift och underhåll (Figur 2). UCIS är i grunden ett relationsdatabassystem som används till att lagra, underhålla och ge åtkomst till datamängder. För ändamålet används Microsoft SQL Server som är ett av de vanligast förekommande systemen för att hantera relationsdatabaser. För att bearbeta data eller utföra uppgifter baserade på informationen från databasen används UCIS-specifika applikationer. Exempel på sådana uppgifter är analyser, visualisering och övervakning.

I den nu framtagna versionen av UCIS har strukturer byggts upp för följande informationsmängder och funktioner:

- Geometrier (tunneldelar t.ex.)
- Geotekniska data
- Geologisk data och strukturer
- Maskindata (TBM)
- Mät- och övervakningsdata
- Alarmering & rapportering

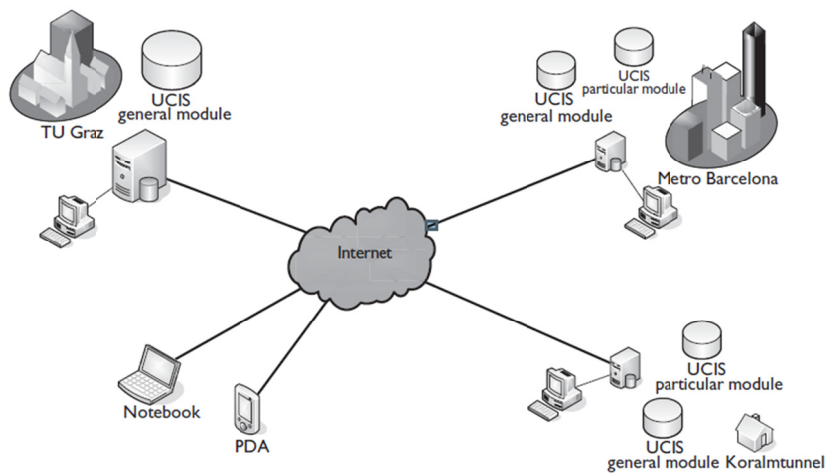
Eftersom databasen har en flexibel uppbyggnad kan nya strukturer läggas till i UCIS allt eftersom behoven uppstår.



Figur 2 Tänkta användningsområden för UCIS.

UCIS har delats upp i två moduler för att tillgodose olika behov. *UCIS particular module* är till för att ta hand om stora mängder data från ett projekt eller en arbetsplats. Datamängden utgörs till största delen av ej filtrerad rådata och är därför mycket detaljerad. *UCIS general module* är avsedd att hantera data från ett flertal olika projekt. Den lagrade datamängden är därför inte lika detaljerad och kan också bestå av bearbetad rådata. Genom synkronisering över nätverk eller internet kan aktuella data hämtas från en eller flera *particular modules* och

läsas in till *general module* så att aktuell data från de olika projekten finns tillgängliga för jämförelser eller övervakning t.ex. (Figur 3).

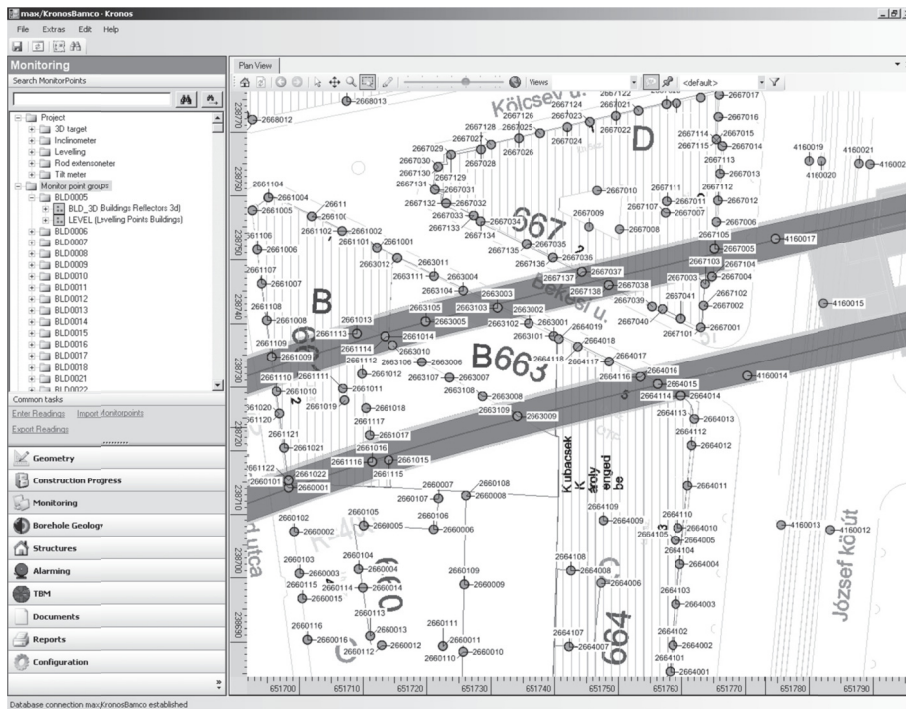


Figur 3 Exempel på användning av UCIS i flera projekt.

Kronos är en kommersiell Windows-baserad applikation som har tagits fram inom ramen för Tunconstruct av Geodata⁴. Denna arbetar mot en UCIS *particular module* databas och innehåller funktionalitet för att underlätta vanligt förekommande uppgifter för datahanteringen som import, exportering, redigering, visualisering o.s.v. GIS-liknande funktionalitet finns också för att selektera och granska geografiskt bestämda objekt, t.ex. mätpunkter (Figur 4).

En webbaserad Kronos-applikation har också tagits fram. Denna har mindre funktionalitet än Windows-applikationen och är främsta avsedd för att välja ut och rapportera mätvärdesresultat samt att konfigurera larmvärden.

⁴ URL: <http://www.geodata.at>



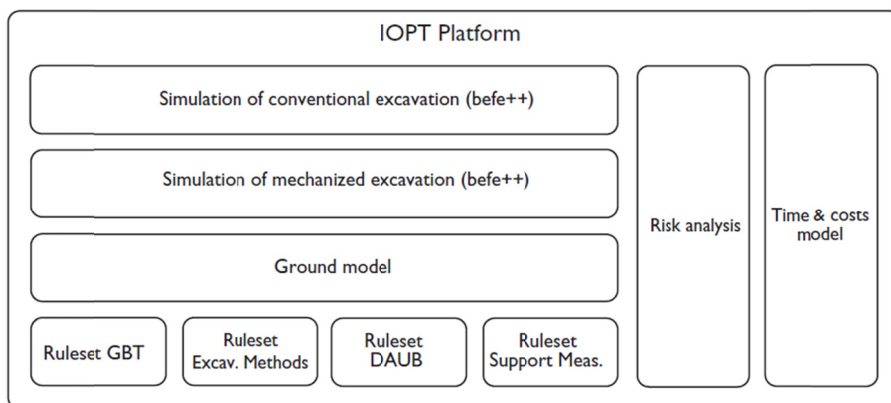
Figur 4 Kronos skärmdump som visar plankarta med tunnlar och mätpunkter uppritade tillsammans.

2.2 IOPT - Expert knowledge basis

En annan av huvuduppgifterna inom Tunconstruct har varit utvecklandet av ett beslutsstödsystem för undermarks byggande (Figur 1). Resultatet av detta arbete har resulterat i en process och programvara benämnd IOPT (*Integrated Optimization Platform*) som integrerar geologisk data, expert kunskap, riskanalyser och numeriska simulationer. Särskild fokus har legat på att formalisera och applicera expertkunskap. IOPT är uppbyggt genom att integrera ett antal olika specialiserade programvaror som har utvecklats av olika deltagare inom Tunconstruct (Figur 5). De ingående programvarorna är samlade i en klientapplikation som används till att hantera data och i design-arbetet.

Designprocessen har formaliserats till ett antal uppgifter som kan utföras oberoende av varandra inom IOPT, dessa är:

- Val av möjlig tunnelsträckning
- Karaktärisering och indelning av marken i klasser längsmed tunnelsträckningen
- Bedömning av spänningsförhållanden
- Bestämning av markresponns baserat klasser och spänningsförhållanden
- Bestämning av randvillkor och randkrav
- Bestämning av lämpliga uttagsmetoder och nödvändiga förstärkningsåtgärder
- Beräkningar av systemets beteende
- Utvärdering av systemets beteende i förhållande till uppställda krav
- Beräkning av kostnader och jämförelser av densamma för olika alternativ



Figur 5 Uppbyggnad av IOPT.

Det rekommenderas att val av tunnelsträckningen och bestämning av randvillkor görs manuellt men i övrigt kan de andra uppgifterna utföras helt eller delvis automatiskt av IOPT.

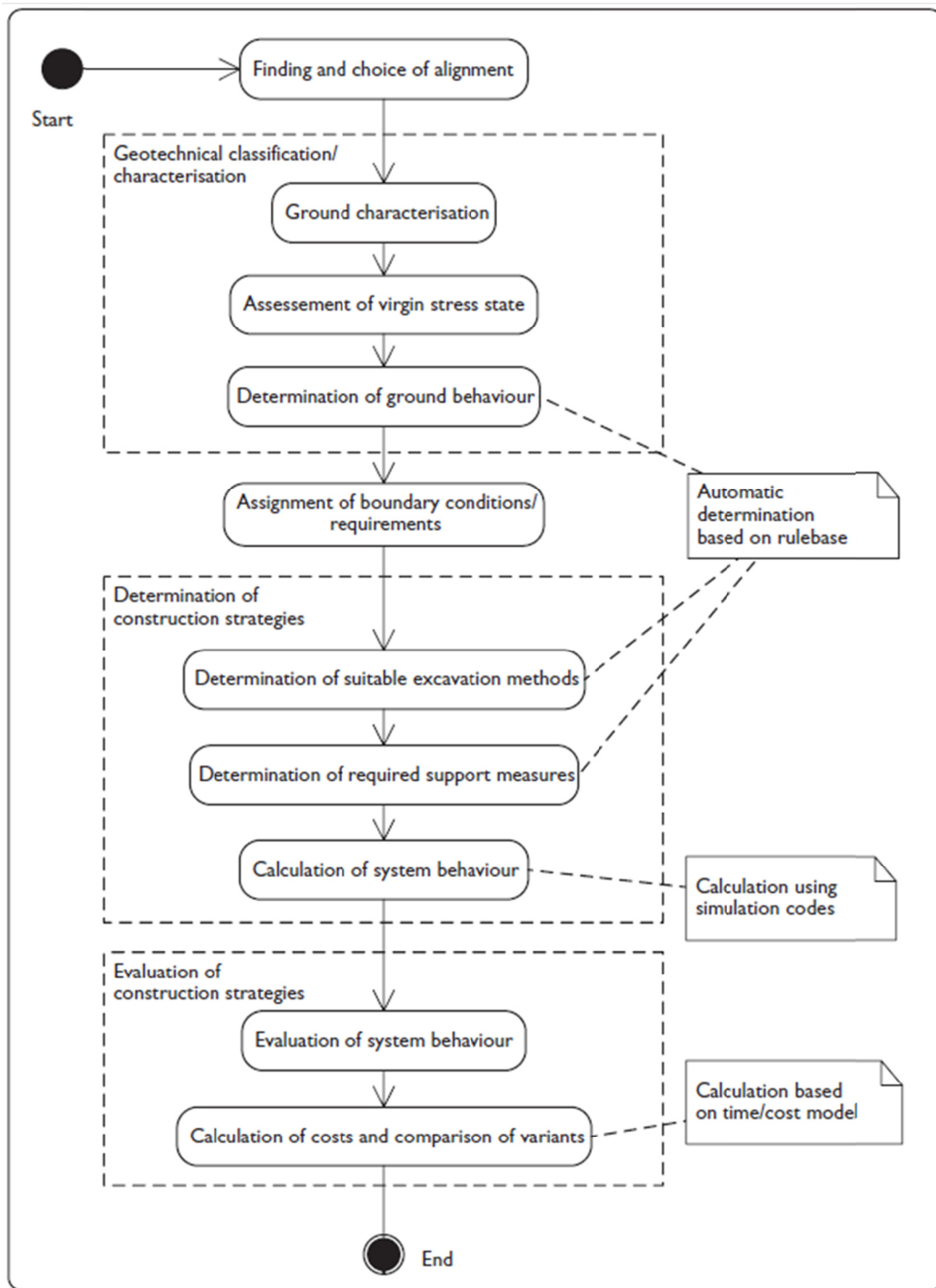
Automatiseringen består i att expert regler, simuleringsprogram och kostnadsmodeller samköras för att ge information som är relevant för byggprocessen. Arbetsflöde enligt denna modell visas i Figur 6.

I dagsläget har ca 130 stycken expertregler för tunnelkonstruktion tagits fram i form av uppslagstabeller. Dessa baseras på erfarenheter och tillgängliga standarder inom tunnelindustrin. Utvärderingen av expertreglerna är baserade på systemen *Java Expert System Shell (JESS)*⁵ och *FuzzyJ toolkit*⁶ som använder sig av ”fuzzy logic”. Två simuleringsprogram har tagits fram för maskinell tunneldrivning (*ekate*) respektive konventionell tunneldrivning (*befe++*). Geologiska och geostatistiska modeller har också utvecklats inom Tunconstruct som ingår i beslutstödsprocessen enligt ovan (Figur 7).

Med IOPT menar utvecklarna att man kan erbjuda en metod som ger en objektiv bedömning av designkriterier och utifrån de definierade expertreglerna ge förslag på konstruktionslösningar. Särskilt pekas möjligheten ut att direkt kunna se ekonomiska utfall för olika konstruktionslösningar redan i design processen.

⁵ URL: <http://www.jessrules.com>

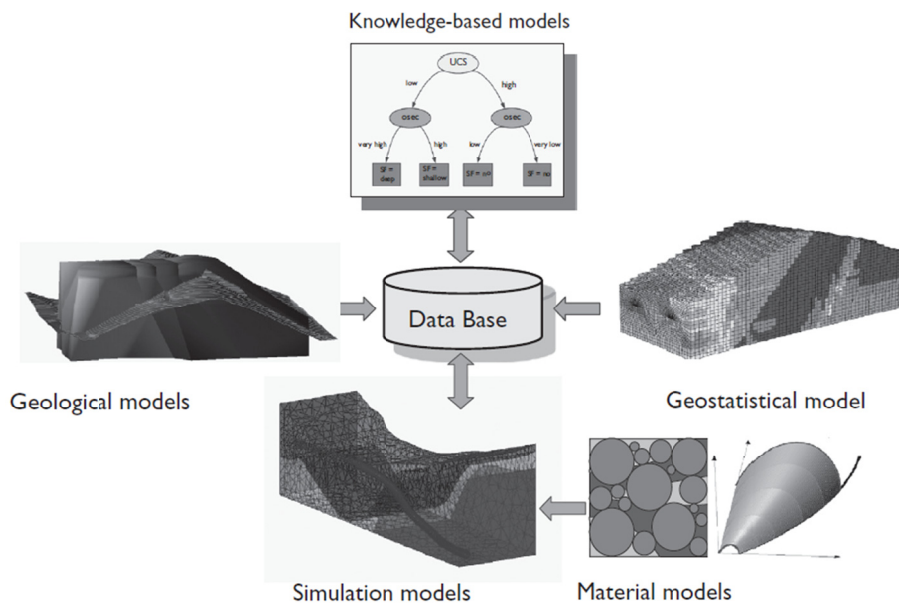
⁶ URL: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca>



Figur 6 Arbetsflöde i IOPT med datorstödd tunnel design.

2.3 Delprojekt inom Design

Som nämnts tidigare har utvecklingen av IOPT varit centralt i projektet med UCIS som en viktig beståndsdel. Övriga projekt inom SP1 (Figur 7) kan grovt indelas som tillhöriga geologiska-, geostatistiska- och numeriska modellering. Delprojekten utgörs av specifikationer, metoder och programvara för att kunna definiera dessa så att de kan samverka med UCIS och utbyta data sinsemellan.



Figur 7 Huvuddelar i IOPT.

2.3.1 Geologisk modell

En geologisk modell och en applikation för att hantera denna har utvecklats av *Graz University of Technology*. Modellen är utvecklad i AutoCAD och innehåller 3D-geometrier som representerar bergmassan, tunnelsträckningarna, borrhål, geologiska strukturer m.m. Egenskaper och data för de modellerade geometrierna lagras i UCIS-databasen och är länkade till 3D-modellen (se Figur 7). Datatabeller i UCIS har definierats för att kunna beskriva de modellerade geometrierna.

Beroende på vilken bearbetning av data som skall utföras så kan denna utföras i en egenutvecklad AutoCAD applikation eller i KRONOS, som beskrivits i kapitel 2.1. I AutoCAD-applikationen kan data som lagras i UCIS tas fram och visualiseras. Genom komplexa frågor i SQL kan avancerade datamängder visualiseras som uppfyller givna logiska villkor, relationer eller geologiska/geotekniska begränsningar. KRONOS å andra sidan är gjord för att bearbeta tabelldata i UCIS. Funktioner för att visa, redigera och exportera data till andra system är implementerade.

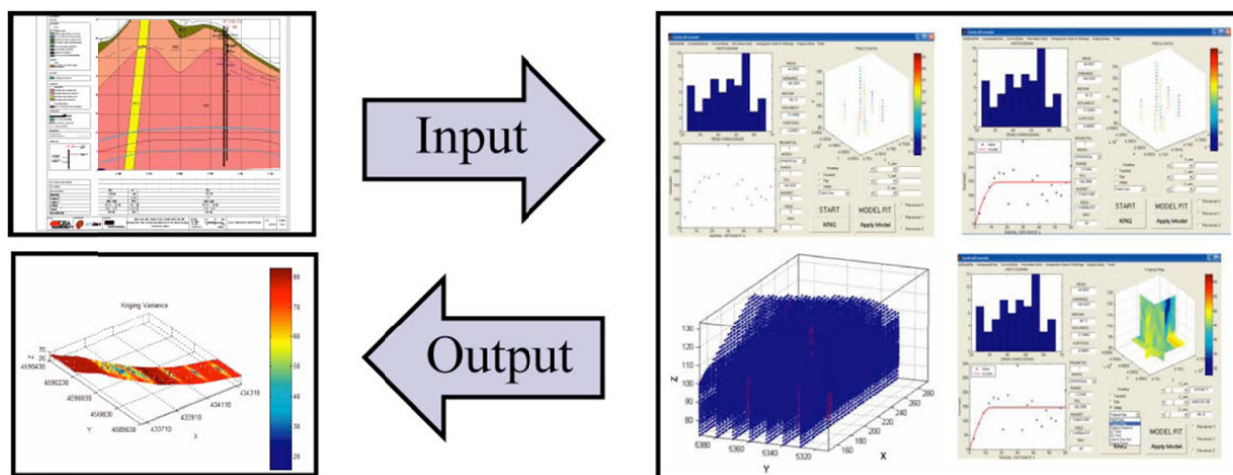
2.3.2 Geostatistisk modell

En geostatistisk block modell har tagits fram vid *Technical University of Crete*. Syftet med denna är att ta hand den relativt begränsade information som finns från förundersökningarna och behandla denna med statistiska metoder. Genom kännedom av de variationer som förekommer kan en bättre utvärdering göras av de risker som olika konstruktionsmetoder innebär. Med den geostatistiska modellen kan osäkerheterna relaterade till en specifik geologisk parameter kvantifieras som statistiska värden.

Arbetsgången med den geostatistiska inom IOPT är:

- Inhämtning av geologisk data
- Förprocessering av data med hjälp av den geostatistiska modellens gränssnittapplikation.
- Geostatistisk processering med "Kriging"

Resultatet från processeringen är en modell som innehåller fördelningen av förväntade värden och standardavvikelse för modellerade geologiska och geomekaniska parametrar.



Figur 8 Geostatistisk processering av geologisk och geomekanisk data; indata från den geologiska modellen, processering av data i den geostatistiska modellen i gränssnittsapplikationen, utdata i form av fördelade parametrar och statistisk spridning.

2.3.3 Databas för bergmekaniska prov

I samarbete mellan *Technical University of Crete*, *Graz University of Technology*, *Ruhr University Bochum* och *Geodata* har en SQL relationsdatabas för bergmekanisk data gjorts. Databasen är indelad i tre distinkta relaterade delar:

1. Bergdata. Petrografisk data, mikroskopieringsresultat, fysikaliska parametrar och bilder.
2. Tester. Metoder och resultat.
3. Laboratorium. Information om laboratoriet.

Målsättningen med arbetet har varit att skapa en databas som kan uppdateras med data från olika europeiska tunnelprojekt och genom att vara länkad med UCIS (kapitel 2.1) kan resultaten användas av IOPT (kapitel 2.2) och andra applikationer vid projekteringen av nya tunnlar. Förhoppningen är även att databasen kan vara ett led i standardisering av bergmekanisk redovisning inom Europa.

2.3.4 Innovativa laboratorieprocedurer för bestämning av bergets egenskaper efter brott

Graz University of Technology har tagit fram en metod för att bättre kunna beskriva bergets uppträdande och egenskaper vid brottstester. Syftet därigenom är att bättre också kunna simulera tunnelbrytning och förstärkning i exempelvis numeriska modeller. I korthet består utvecklingen av en modifiering av ISRM's⁷ standardprovmetod för framtagning av fullständig brottkurv vid enaxlig belastning och i utvärdering av resultaten från den modifierade testen.

Resultaten från den föreslagna metoden omfattas också i databasen som beskrivits i kapitel 2.3.3 och därigenom finns de även tillgängliga i UCIS och IOPT.

⁷ International Society for Rock Mechanics

2.3.5 Simulering

TUG har utvecklat BEFE++ pre-processor vilket är ett gränssnitt för att göra modellering av geometrier och uttagssekvenser enkelt. Import av digitala terrängmodeller från UCIS skall möjliggöras. Pre-processorerna ska kunna generera en XML-fil som används som indata i BEFE++ simuleringensmodul. Simuleringsmodulen har följande möjligheter:

- Elasto- och viskoplastisk analys av material från subrutiner som har utvecklats av UPC (Universitat Politècnica de Catalunya).
- Simulering av sekventiella berguttag och konstruktionssteg.
- Simulering av bergförstärkning (bultar och sprutbetong)
- Variation av sprutbetongens styvhet baserat på tabeller från TUW (Vienna University of Technology).
- Beaktande av inhomogena geologiska förhållanden.
- Tredimensionell simulering.

Ecate är ett annat numeriskt simuleringprogram som också har utvecklats av TUG, men för fullt inklädda TBM-tunnlar i helt eller delvis dränerade jordar. Ecate kan ta hänsyn till interaktionen mellan konstruktionsprocessen och den omgivande jordmassan och dess beståndsdelar (materialkorn, porvattentryck, porluft) via stuffförstärkningen, kontakten mellan TBM inklädnaden och jorden och genom injekteringen av bakomvarande fogar.

TUG har också tagit fram en GSI baserad uppskalningsprocedur för laboratoriedata till "verklig" skala. Denna är av stor vikt för att kunna beskriva bergmassan korrekt i beräkningsmodeller etc. GSI anses vara bäst för detta ändamål. I dagsläget kan modellen ge elastiska och grundläggande hållfasthetsparametrar. Modellen är helt anpassad för användning i IOPT.

3 Nya och förbättrade undersökningsmetoder

3.1 Projektering och visualisering av geologisk data

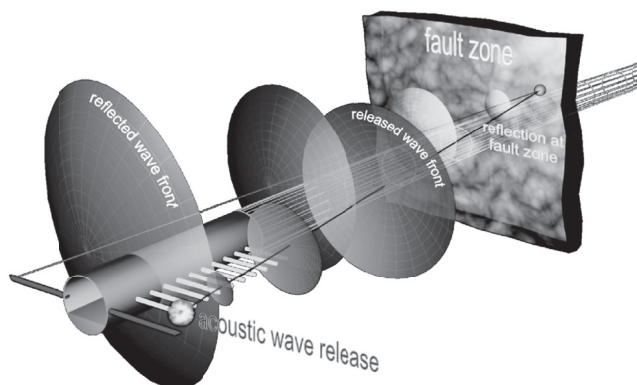
Vid allt tunnelbyggande utgör mätning, geologisk förundersökning och kartering en viktig del av flera orsaker. Det underlättar framdriften och förstärkningsinsatsen nämnvärt, både vid sprängning och schaktning och vid fullortsborrning. Det är av intresse att verifiera att utfört arbete motsvarar det önskade resultatet, både vad gäller berguttag och förstärkning. Dessutom är det grundläggande att övervaka berget, marken och eventuella byggnader ovanför tunneldrivningen för att upptäcka sättningar i god tid. Ovan nämnda undersökningar kan i dagsläget innebära att tunneldrivningen måste göra uppehåll. Alternativt måste undersökningen utföras vid planerade tunneldrivningsstopp, t.ex. nattetid.

Syftet med delprojekten inom SP3 är att ta fram metoder, utrustning och programvara som ska förbättra behandling och visualisering av geologiska data. Erhållna resultat ska leda till ett säkrare och mer effektivt tunnelbyggande genom att kartering, mätning och övervakning effektiviseras. Medverkande företag och institutioner är GEOD, AMBERG, Herrenknecht AG, Dragados, AITEMIN och Kretas Tekniska Universitet.

3.1.1 Seismiska undersökningar

Det man vill åstadkomma med utvecklingen av seismiska undersökningar vid tunnelbyggande är en metod som ger så mycket information om det framföriggande berget (eller jorden) som möjligt. Detta ska ske effektivt, d.v.s. dels så ska informationen vara relevant och lättbehandlad och dels ska insamlandet av informationen störa produktionen i så liten uträkning som möjligt. Vid fullortsborrning gäller det även att undersökningen ska kunna genomföras utan tillgång till stoff.

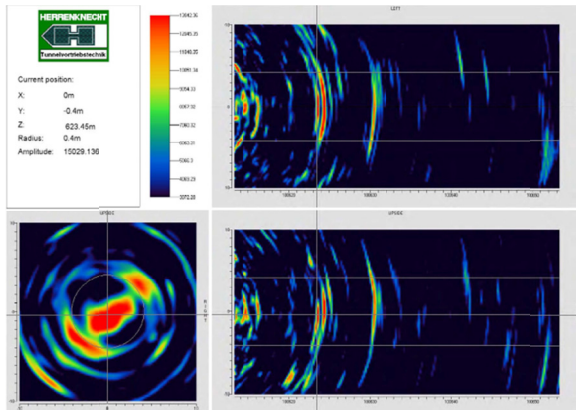
TSP-metoden (Tunnel Seismic prediction) började användas 1994 och bygger på att en serie med 24 laddningar längs med tunnelväggen genererar en akustisk signal. Två trekomponentsmottagare, inborrade i berget i båda väggar, fångar upp den reflekterade signalen (Figur 9).



Figur 9 Standard TSP utformning. De akustiska vågorna genererade av liten sprängladdning når en geologisk diskontinuitet (förkastnings zon) och reflekteras. Trekomponentsmottagare längs tunnelns väggar fångar upp vågsignalen.

Det är denna metod som det schweiziska företaget Amberg Technologies har valt att utveckla genom nya hård- och mjukvarukomponenter. Det förbättrade systemet kan integreras i borrhuvudet på en fullortsborrningsmaskin och således kan seismisk data inhämtas kontinuerligt

samtidigt som borrhuvudet arbetar utan att avbryta borrprocessen. Genom mer tillförlitlig data och genom utvecklad databehandling (mjukvara) kan diskontinuiteter av oregelbundna ytor (t.ex. block) upptäckas ungefär 40 m framför en fullortsborrningsmaskin. Vidare kan plana diskontinuiteter (t.ex. krosszoner, förkastningar) upptäckas och visas i en 3D reflektionsmodell av marken framför i realtid (Figur 10).



Figur 10 Skärmbild av 3D reflektions modell som visar stark reflektion från ett dolt block i marken.

Amberg Technologies har modellerat undersökningsförloppet med finita differensmetoden för att finna optimala antalet och uppsättningen av högkänsliga multi-komponentmottagare och olika signalkällor för olika bergtyper och bergförhållanden. Figur 11 visar ett exempel på en sådan optimal uppsättning.



Figur 11 Exempel på uppställning vid seismisk undersökning i en tunnel, de seismiska skott-hålen är markerade med röda cirklar.

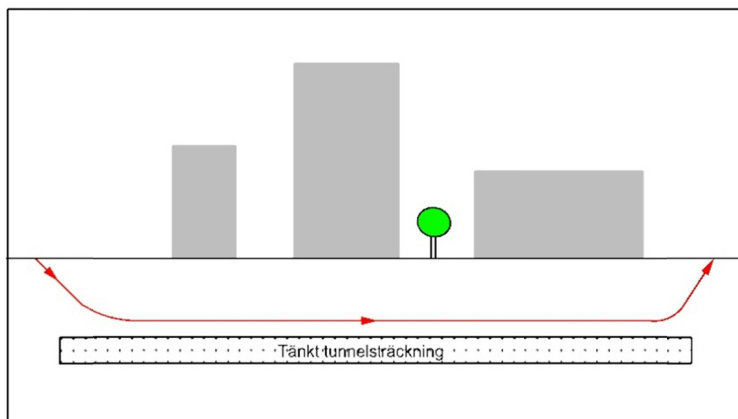
Amberg Technologies anser att med de metoder som de tagit fram så är seismiska undersökningar möjliga att utföra för praktiskt taget alla typer av bergsbyggen.

3.1.2 Sättningskontroll med optisk fiberkabel

Sättningar vid tunnelbygge innebär stora risker dels för människor och byggnader på ytan men också för människor som arbetar med tunnelbygget. Om små rörelser i marken kan upptäckas tidigt ökar chansen för att man ska kunna vidta åtgärder och förhindra sättningar. Det finns idag olika metoder att mäta sättningar både från ytan och inifrån tunneln. Dessa metoder bygger dock på mätningar punktvis vilket innebär att det finns risk för att man missar små rörelser i koncentrerade områden. En vanlig sättningsmätningmetod är att vertikala hål borraras ovanför tunneln i vilka en eller flera mätare placeras. Denna metod anses dock bristfällig

av flera anledningar. Det finns t.ex. inte alltid tillgång till ytan direkt ovanför tunneln, p.g.a. byggnader eller liknande. Med den föreslagna metoden önskar man kunna mäta rörelser i marken ovanför en hel planerad tunnelsträckning kontinuerligt och i realtid. Detta ska göras genom styrd horisontell borrhning ovanför och längs med tunnelsträckningen. Det borrhade hålet förses därefter med olika typer av mätutrustning.

Styrd borrhning är en metod som i stor utsträckning används i oljebranschen och är därför inte i behov av någon utveckling inom ramen för projektet. När metoden appliceras på den nya föreslagna sättningmätningssättningen innebär det i korta drag att man borrar ett hål som börjar i vinkel mot horisontalplanet. Borrhuvudet styrs sedan i en radie tills det borrar horisontellt i önskad höjd och följer sedan tunnelsträckningen för att avslutas med ännu en radie och en vinkel (Figur 12).



Figur 12 Principskiss - horisontell borrhning.

Den horisontella borrhningen innebär ingen störning av ovanliggande bebyggelse och i dagsläget har man möjlighet att borra sträckor upp till 2 km och med en diameter på 1,2m.

Fokus har i delprojektet legat på att finna en mätutrustning som ska kunna leva upp till de krav som ställts. En bra lösning är att en optisk fiberkabel dras genom borrhålet. Det man mäter är förändringen, krökningen av den optiska kabeln (sensing cable) som är utbredd mellan tunneln och markytan. En s.k. "sensing cable" är baserad på spänningsmätningar i optisk fiber genom Brillouin teknologi. Det man egentligen mäter är det återstrålande ljuset från interaktionen mellan akustiska och optiska vågor inuti kiselfiber kabeln (Brillouin optical time domain reflectometers). När fibern spänns ändras hastigheten på den akustiska vågen och frekvensen på det återstrålande ljuset ändras. Det karaktäristiska med "sensing cable" är dess förmåga att följa markens sättningar och rörelser. Test utförda på en bänk på markytan (open air test bench) visar att en kabel med diametern 15 mm kan upptäcka kollaps, förändringar i amplituder på 17 mm över ett avstånd på 20 meter. En kabel med diametern 150 mm kan känna av kollaps, förändring i amplituder på 1 mm över ett avstånd på flera meter och sättningar på flera centimeter över ett avstånd på några tiotal meter.

Denna metod är känslig för rörelser och med tillhörande mätutrustning och programvara fungerar kabeln som en effektiv sättningsmätare. Det finns olika varianter och prototyper av fiberkabel (Figur 13). Mätmetoden avses vara ett komplement för tunneldrivning med TBM, men sannolikt kan metoden eller delar av den användas även vid andra drivningssätt, t.ex. sprängning och schaktning.

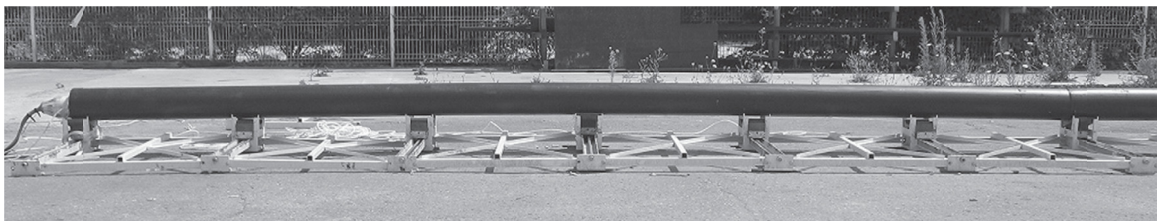


Figure 5.14. SMARTprofil

Figure 5.15. SMARTcord

Figure 5.16. SMARTape

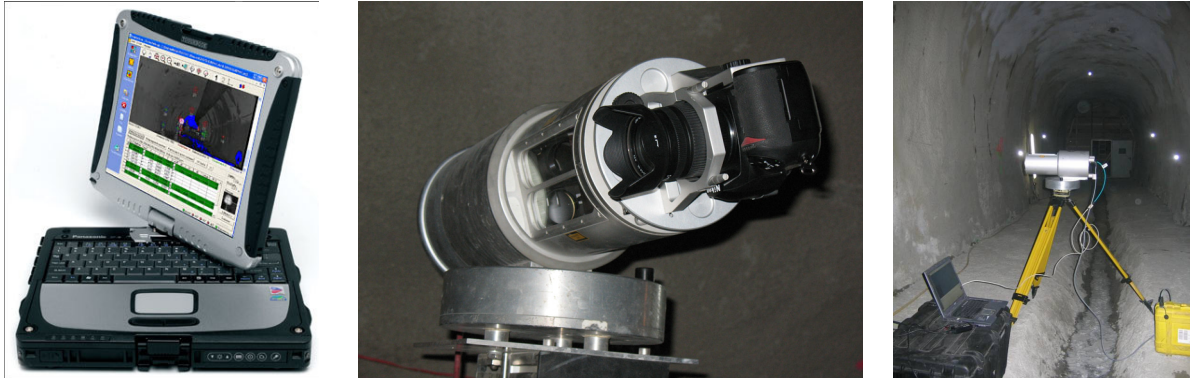
Figur 13 Olika varianter av fiberkabel för olika ändamål. SMARTprofil för att mäta utsträckningen, SMARTcord för att mäta jordrörelser och SMARTaper för att mäta temperaturen.



Figur 14 Sensorkabel i testrigg.

3.1.3 Tunnelskanner

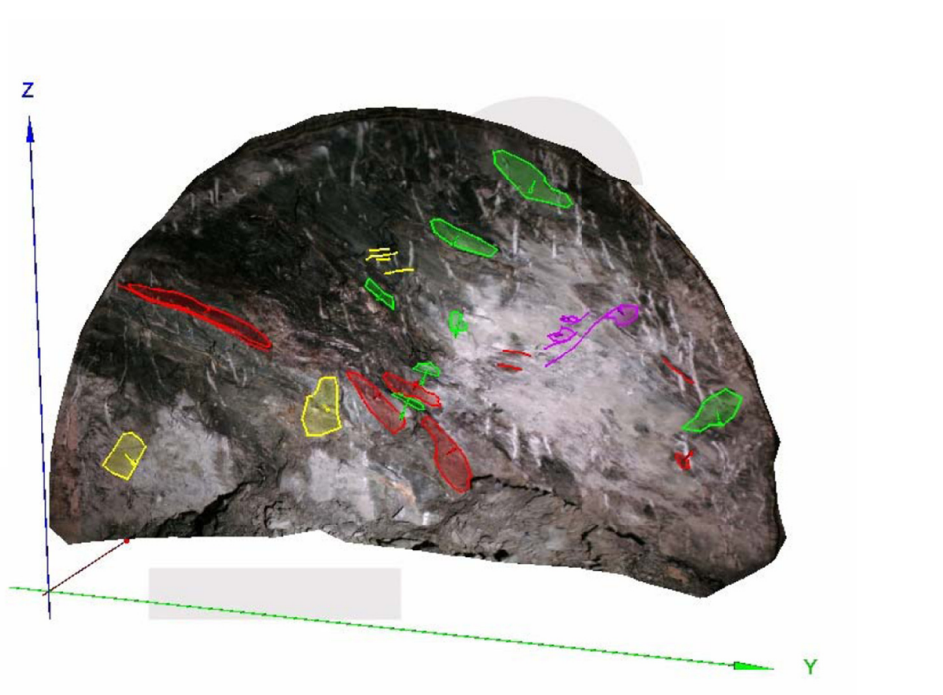
Det österrikiska företaget Geodata har tagit fram ett mätsystem som snabbt ska ge information om geologiska och geotekniska egenskaper hos bergmassan. Detta för att optimera tunneldesignen och tunneldrivningen. Systemet bygger på befintlig teknik. Hårdvaran är en kontroll dator, en 3D- skanner av typen RIEGL LMS-Z420i och en digitalkamera (Figur 15). I Kontroll- datorn finns mjukvara/ program som kontrollerar avläsningskedet och sedan hanterar data för efterbehandling⁸.



Figur 15 Från vänster: Robust och fukt tålig kontroll dator; Panasonic Toughbook CF18; Di- gital SLR kamera Nikon D200 monterad på en RIEGL-laser skanner; Lasern mon- terad på ett stativ, kan också monteras på vagn eller biltak.

⁸ Detaljerad teknisk information om;
3D laser skanner och RIEGL LMS-Z420i laser skanner: www.geodata.com, www.riegl.com
Panasonic Toughbook CF18: www.panasonic.com
Kameran: <http://nikonimaging.com/global/products/digitalcamera/slr/d200/index.htm>

Mätförloppet sker i fyra steg. Först sker en laserskanning 5-20 meter från stuff. Tunneln skannas bakåt från stuff och alla geodetiska reflektorer tas med. Därefter skannas de geodetiska punkterna på nytt men i högsta upplösning vilket ger skannerns koordinater och orientering och fastställer positionen för den första skanningens geo-referens resultat. I steg tre fotas tunnelstufven och resultaten skickas till datorn. Det fjärde steget innefattar efterbehandling i en kraftfullare dator och en komplett 3D-bild skapas där man kan urskilja t.ex. antal, placering och orientering av sprickor (Figur 16).



Figur 16 Komplet 3D-bild av tunnel front med geologiska särdrag i olika färgfält.

3.1.4 3D-laserskanning för sektionering, ett exempel.

Vid berggaraget vid Liljeholms torg i Stockholm har 3D-laserskanning använts för sektionering. Berggaraget ett garage för ca 900 bilar. Det är en berganläggning med fem ca 100 meter långa berggrum med 17 meters spännvidd, arbetstunnlar samt in- och utfartstunnlar. Totalt togs 117 000 m³ berg ut under framdrift och byggnation av berggaraget.

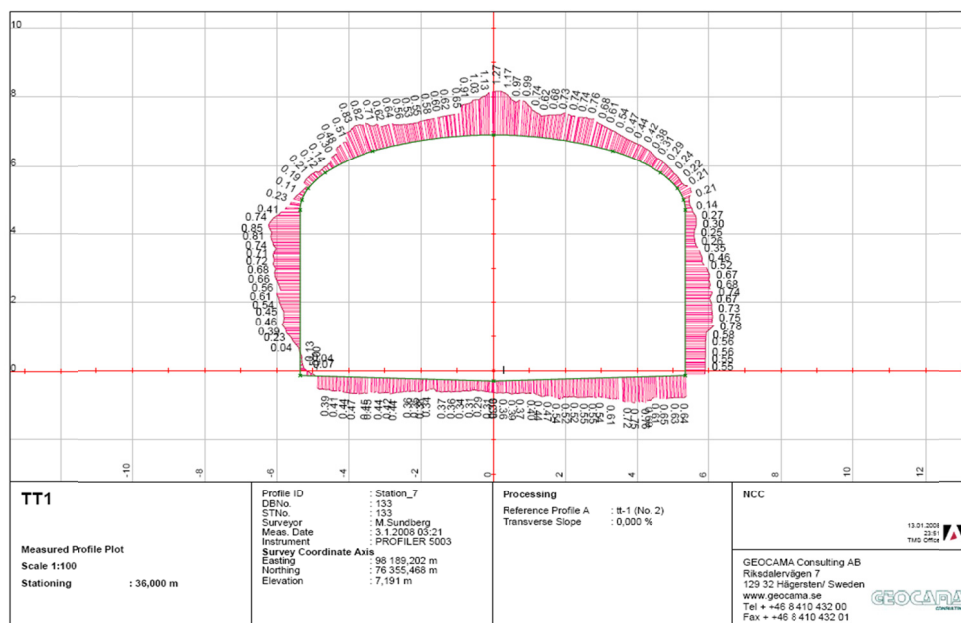
Projektet utfördes i nära samarbete mellan beställaren Citycon, bygglidningen Forsen och entreprenören NCC mellan åren 2007-2009. NCC Teknik var tekniskt stöd genom hela projektet.

Bergtäckningen över garaget var ställvis liten, vilket påverkade driften i dessa områden. Ovanför berggaraget fanns flera punkthus och i närheten tunnlar som var känsliga för vibrationer. Under byggskedet ansvarade NCC Teknik för kartering, bestämning av permanentförstärkning, uppföljning och dokumentation.

Sektionering av en tunnelprofil för att avgöra hur mycket berg som sprängts bort jämfört med tänkt tunnelprofil kan göras med en total station eller med en laserskanner. Avståndet mellan mätpunkterna från en total station är större än från en laserskanner. Laserskanning är en punkt-tät mätmetod. Sektionering med 3-D laserskanner (Leica 6000) utnyttjades i berggaraget vid Liljeholms torg. Detta sparade tid och gav större noggrannhet.

Efter sprängning av uppmätt tunnelprofil skannades berggrummen/tunnlarna av och sedan jämfördes resultatet med teoretisk tunnelprofil, för att avgöra om tillräckligt mycket av berget

sprängts bort (Figur 17). Under byggskedet av berggaraget användes 3D-laserskanning som stöd vid framdriften.



Figur 17 Skannad tunnelsektion från berggaraget vid Liljeholms torg.

3.1.5 Tabell över olika 3D LADAR skannars

AITEMIN har testat olika LADAR skannars med avseende på att ta fram en robust, billig skanner med kort räckvidd för övervakning av tunnel strukturen under konstruktionsfasen och framdriften (Tabell1). Ladarskannars använder kollimerade laser strålar vilket betyder att laser strålen har låg divergens d v s att strålradien inte ändras nämnvärt med ökat avstånd. Upplösningen (minimala avståndet mellan två punkter) är begränsat av våglängden mellan mätsignalen. Den skiljer sig åt mellan olika typer av skannars: cm för Ultraljud, dm för RADAR och μm för LADAR. Ju lägre diameter desto bättre upplösning kan fås. LADAR är i detta avseende överlägsen de andra och därmed mest lämplig för tunneldrivnings ändamål.

Tabell 2 Laserskannars⁹

Fabrikat	Modell	Räckvidd	Strålens divergens	Pulsfrekvens (antal/s)	Noggrannhet A: avstånd, VV:vertikal vinkel, HV: horisontell vinkel	Upplösning A: Avstånd, VV: vertikal vinkel, HV: horisontell vinkel	Utgång(ar)	Vikt [kg]
Lase	ELD La (360°)	>40 m på mörk yta >100 m på ljus yta	2.5 mrad	50 000	A:38 mm	A: 4 mm VV: 1.222 mrad	RS 232, RS 422, CAN BUS	3.2
Faro	Laserskannars LS (320x360)	0-76 m	0.25 mrad	120 000	A: 3 mm. VV: 160 μrad HV: 13 μrad			
Faro	Lasertrackers 3D	0-70 m		10 000	A: 10 μm + 0.4 $\mu\text{m}/\text{m}$			

9 Länkar: www.faro.com, www.lase.de, www.sick.com, www.zf-laser.com, www.leica.com, www.mensi.com, www.pointtools.com, www.innovmetric.com, www.geomagic.com, www.rapidform.com

Tabell 2 Laserskannrar⁹

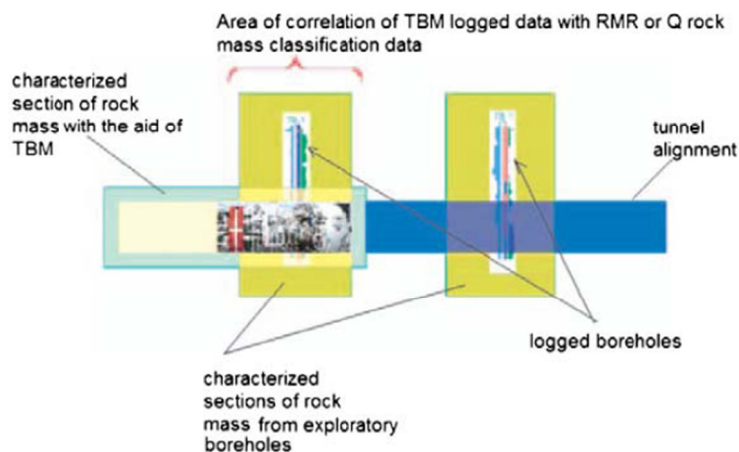
Fabrikat	Modell	Räckvidd	Strålens divergens	Pulsfrekvens (antal/s)	Noggrannhet A: avstånd, VV: vertikal vinkel, HV: horisontell vinkel	Upplösning A: Avstånd, VV: vertikal vinkel, HV: horisontell vinkel	Utgång(ar)	Vikt [kg]
	(125x270)				VV:10 µrad HV:10 µrad			
Leica	HDS6000 (310°/360°)	0-50 m	0.22 mrad	500.000	A: 6 mm, VV: 125 µrad HV: 125 µrad		Bluetooth, Ethernet	16
Leica	LTD 800 (90°x360°)	0-40 m	Punkt 4.5 mm	3000	A: 10µm + 5 µm /m VV:10 µrad HV:10 µrad	A: 1.26 µm		51
Leica	Scanstation 3D (270°x360°)	0-300 m	6 mm @ 50 m 1.2 mrad	4000	A: 4 mm. VV: 60 µrad HV: 60 µrad			13
Riegel	LMS Z420i (80°x360°)	Upptill 250 m	0.25 mrad	8000	A: 10mm	A: 5 mm VV: 35 µrad HV: 43 µrad	RS 232	13
Trimble	GX3D (60°x360°)	0-200 m	Punkt 3 mm @ 50m	5000	A: 7 mm VV: 60 µrad HV: 60 µrad			13
Visi Image	3Dguru (270° x 360°)	24 m	Punkt 2 mm @ 15m	210.000	A: 3 mm@24 m	A:1.03 mm @20 m VV: 50 µrad HV: 50 µrad		7.7
Z+ F	3D imager 5006 (310°/360°)	53.5 m on 20%	0.22 mrad	500.00	A: 3-9 mm@24 m	VV: 350 µrad HV: 350 µrad	Ethernet Bluetooth	14

3.2 Övervakning och framdrift i tunneln

Under tunneldrivningsfasen finns det olika sätt att övervaka framdriften i tunneln. Nedan presenteras dels metoder för fullortsborrningsmaskiner och dels sätt passande för framdrift genom sprängning och skrotning. Skanning av tunneln är den metod som belyses främst då det är den metod som framförallt använts.

3.2.1 Kontroll av markförhållanden framför TBM

Egenskaperna hos berget framför en fullortsborrningsmaskin kan tillsammans med bergklassificeringsmetoder som Q-systemet och RMR bedömas utifrån data som kontinuerligt loggas från bormaskinen (rotationshastighet, tryck och indriftshastighet) under tunneldriften. Det ger fortlöpande ge information om mark-berg förhållanden kring tunneln (Figur 18).



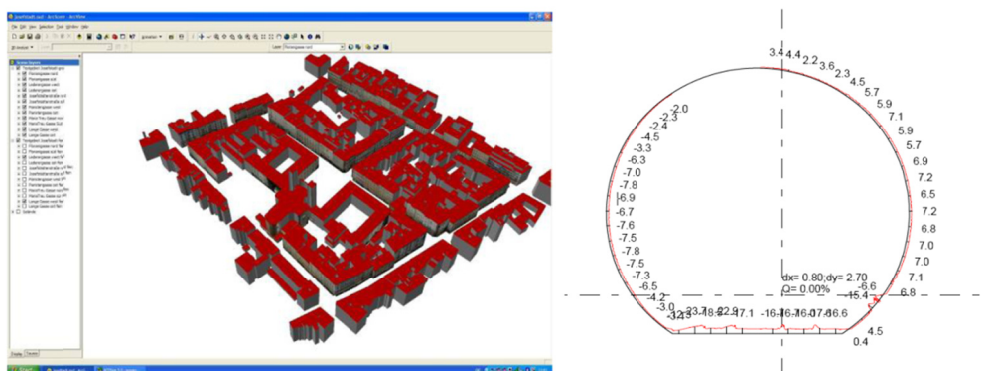
Figur 18 Data från en fullortsborrningsmaskin kan används som en sensor av markbergförhållanden.

3.2.2 Mobilt multi-sensor system för snabb kvalitetskontroll.

Syftet är att fundamentalt minska och effektivisera långa, kostsamma och störande inspektioner, genom automatisering. Två mobila multi-sensor system, en för ovanjord och en för underjord verksamhet har testat under verkliga förhållanden.

Multi-sensor systemet skannar snabbt av omgivande strukturer från en bil och producerar hög kvalitet data för olika ändamål t ex inspektion, kvalitetskontroll (Figur 19). Ovanjord är syftet att få en snabb överblick av strukturer, sprickor, lös mursten och deformationer i hus, väggar och vägbeläggning. Medan underjord är syftet att inspektera tunnelns struktur.

Systemet involverar en 3D-laser skanner, två digitala kameror, GPS och flera sensorer som är installerade på en teleskoparm på fullortsborrningsmaskinen.

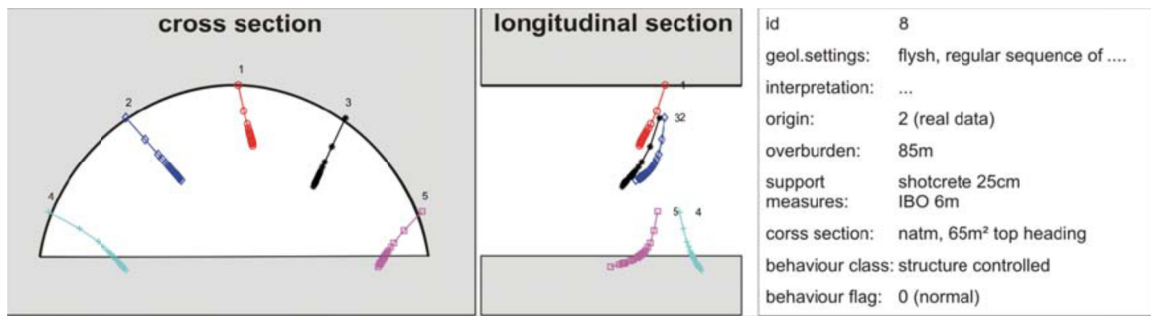


Figur 19 Resultat från ovanjords skanning och från underjord. Underjordsbilden visar sektionering av en fullortsborrad och betonginklädd tunnelprofil (jmf.) Liljeholmsgaraget).

3.2.3 En metod att jämföra den uppmätta förändring i tunnelstrukturen med värden från en databas

En metod har utvecklats som tillåter att jämföra förändringen som periodvis mäts i tunneln med förändring från en databas. Syftet är att hitta den bästa matchningen och därigenom

stödja den geotekniska tolkningen och bestämma om förändringen är normal eller onormal (Figur 20).



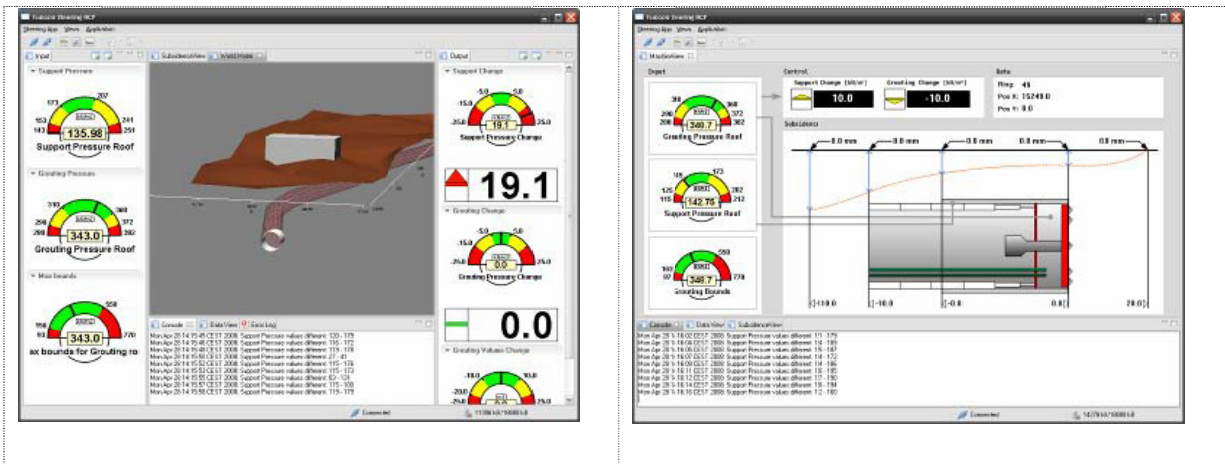
Figur 20 Uppmått förändring jämförs med databasvärden och anses normal.

3.3 Automatiserad styrning vid fullortsborrning

För att få automatisk styrning av utschaktningsprocessen vid fullortsborrning har det tyska företaget Amberg utvecklat en speciell mjukvara (än så länge endast i demoversion). Syftet är att ta fram ett verktyg som stödjer arbetarna vid TBM driften för att få en säker utschaktning och undvika onödiga sättningar.

Mjukvaran kombinerar seismisk data (erhållen genom TSP-metoden, se avsnitt 3.1.1), data från TBMen som styrdata, borrh-parametrar samt geologisk data erhållen under tidigare skeden av utschaktningen (Figur 21).

Dessa data används som stöd vid olika geotekniska förhållanden under utschaktningen och som stöd av kontrollen av fullortsborrningsdriften.



Figur 21 Skärmbild på mjukvara för styrning av utschaktningsprocessen vid framdrift vid fullortsborrningsmaskin.

4 Tekniska innovationer för effektiv tunneldrivning

Detta delprojekt inom Tunconstruct har tre huvudriktningar: utrustning, material och teknik. Bergbrytning med bergbrytningsmaskiner som "road headers" eller med fullortsborrningsmaskiner (TBM) påverkas av flera faktorer som bergets hållfasthets egenskaper, bergets nötnings förmåga, markförhållanden, instrument designen, instrumentens mekaniska egenskaper, borrhuvudets design och operativa parametrar.

För att få en maximal bergbrytningsprocess har samspelet mellan dessa parametrar testats experimentellt och även analyserats genom datorsimulering inom Tunconstruct.

4.1 Fullortsborrningsmaskiner

En tunnelborrmaskin pressar sig framåt med hjälp av hydrauliska domkrafter. Borrning av en tunnel sker genom förankring av maskinen i tunnelväggen, sedan trycks med stor kraft borrhuvudet med borkronan längst fram på maskinen mot tunnelfrontens vägg. Samtidigt roteras borkronan för att tryckdiskarna (skivor) förstärkta med hårdmetallskär på den ska kunna penetrera och krossa bergytan. Det loss brutna och krossade materialet passerar därefter genom borrhuvudets öppningar till ett fack. En transportskruv för bormassorna bakåt för vidare transport ut ur tunneln med hjälp av transportband.

4.1.1 Disk cutting knife test station och datasimulering

En av de viktigaste faktorerna i effektiviteten av TBM-maskiner är slitaget av tryckdiskarna på borkronan, vilka med rätt design kräver mindre avbrott under tunneldrivningen. Det är vanligt att en fullortsborrningsmaskin är stoppad för underhåll och reparation, ungefär 40 procent av tiden går åt till detta.

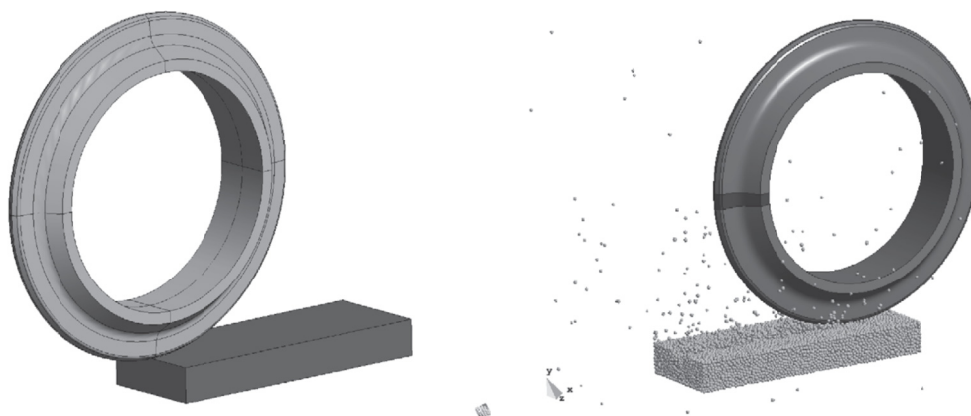
Herrenknecht har designat och utvecklat en ”cutting knife test station” (Figur 22) för att korrelera penetrations grad, hastighet och huggkrafter för tryckdiskarna på brohuvudet. Korrelationen mellan dessa parametrar varierade mellan olika tryckdisks design. Även sågs att olika kornstorlekar bildades vid olika penetrations grad. Låg penetrations grad resulterade ofta i dimbildning, medan en hög penetrations grad resulterade i flisutveckling.



Figur 22 Disk cutting knife test station.

För att komplimentera resultaten från ”cutting knife test station” och finna de mest lämpade tryckdiskarna för olika bergförhållanden har datorsimulering gjorts.

International Center for Numerical Method in Engineering (CIMNE) har gjort numeriska modeller för slitaget av diskarna under bergborrningsprocessen. Simuleringen av dessa test (Figur 23) är ett extra redskap i designen av nya fullortsborrningsmaskiner då variabler som t ex tryck och slitage beaktas.



Figur 23 Simulering av bergbrytningen med fullortsbormaskin, TBM.

Numerisk modellering kan användas som alternativ eller komplement till laborativa bergbrytningstester. Med datasimulering är det möjligt att uppskatta bergbrytningskrafter, instrumenttemperaturer och slitage under olika förhållanden. Hur dessa parametrar påverkar processen under olika bergförhållanden går snabbare med datorsimulering än med experimentella tester. Detta spar tid och pengar i designen. Numerisk simulering ger också en större detaljnivå av bergbrytningsprocessen och mekanismen bakom varför ett brott i berget sker.

Att kombinera undersökningar från testriggar och teststationer med numerisk simulering innebär bättre optimering av bergbrytningsinstrumenten och bergbrytningsprocessen. Vilket i sin tur leder till snabbare och billigare utgrävning/brytning av berget.

4.1.2 Fullortsbormaskiner med stor diameter

Den nuvarande trenden i dagens infrastrukturprojekt framförallt i städer är att planera för tunnlar med stora profiler. Ofta projekterar man för tunnlar med diametrar större än 10 meter. Det tyska företaget Herrenknecht har erfarenheter för fullortsbormaskiner med mycket stor diameter i olika markförhållanden, som mjuka bergarter, hårda bergarter och i blandade markförhållande med höga grundvatten tryck. Ett projekt med syftet att förbättra befintliga fullortsbormaskiner så att de kan borra med en diameter större än 15 meter har genomförts. Projektet har fokuserat på designen för att minska vridmomentet (vilket ökar med större diameter) och den döda vikten på TBMen, men också processingenjörsproblematik som stödbelastnings tryck ("support pressure") och tiden för byggandet av varje betongring samt logistikfrågor som effektiv förstärkning och återfyllning (leverans av segment och murbruk) och transport till och från byggsplatsen av de stora fullortsbormaskinerna.

Nedan två referensexempel på TBM borrarde tunnlar med diameter större än 15 meter, vilka visar att det är möjligt att borra stora tunnlar och ha ett välfungerande transportsystem av schaktat material samt god konstruktionssäkerhet och ekonomi. Mer än 60 fullortsbormaskiner med diameter större än 10 m har fram till år 2008 levererats. Bormaskinerna har använts i mjuka och hårda bergarter samt under mixade markförhållanden.

4.1.2.1 Världens största "earth pressure balance shield" TBM Ø 15,2

En "EPB shield" TBM har använts för en trefilig 3,65m lång motorvägstunnel i centrala Madrid med en extremt tajt tidplan. Tunnelsträckningen passerar genom ett mycket tätbefolkat område och korsar flera strukturer som tre stycken tunnelbanelinjer och järnvägsspår med liten berg/marktäckning. Det lägsta avståndet från tunnel toppen/kronan till dessa tågspår är 6,5 meter och detta med en invändig diameter av tunneln på 13,37 meter. Tunneln är konstruerad med armerade betong segment. En tunnelring består av 9+1 segment och har en längd på 2 meter. TBMen har designats för att klara de omgivande kohesionsjordsförhållandena. De

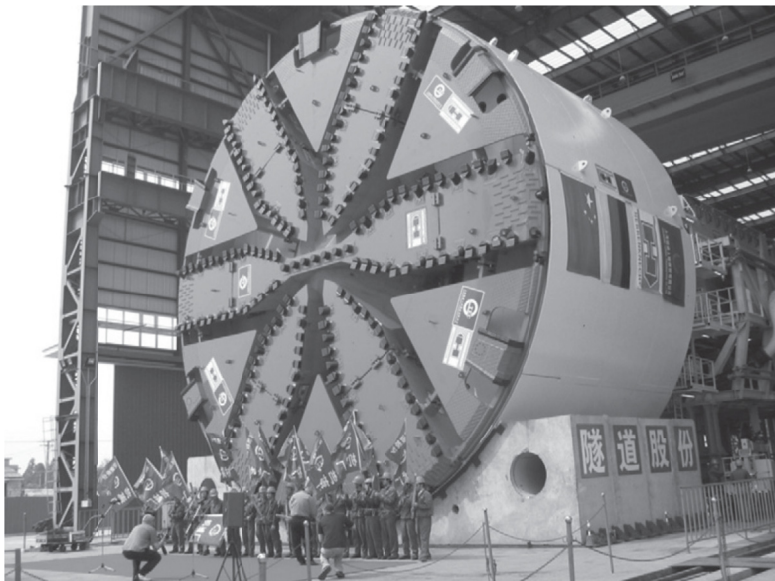
geologiska omständigheterna vid tunnelnivån är styv till hård lera och gips. Utgrävningen av tunneln började i november 2005 och var klar i juli 2006 och utfördes av Acciona Infraestructuras S.A. och Ferrovial-Argroman i samarbete med Herrenknecht AG.

Exempel från Sverige där Earth pressure shield tekniken använts i tunnelbyggandet är Citytunneln i Malmö. Den tåg tunneln är borrar i kalkberggrund med två fullortsborrmaskiner med en diameter på 10 meter vardera. Citytunneln beräknas vara klar år 2010.

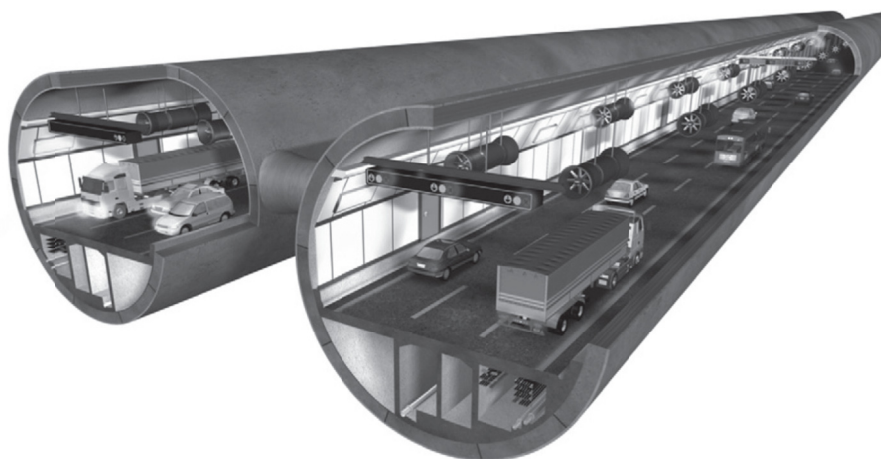
4.1.2.2 Världens största "mixed shield" TBM Ø 15,4 m

De två största mixed shield fullortsborrmaskinerna har använts i Changjiang för en tunnel under en flod i Shanghai. Här har två parallella trefiliga motorvägstunnlar varje med en längd på 7,47 km utgrävts med ett djup upp till 65 meter. Tunneln förbinder Changxing River Island och fastlandet Pudong/Shanghai. De innovativa egenskaperna hos dessa "mixed shield" TBMer är designen på borkronan, där tryckdiskarna/bergbrytningsverktygen sitter tillgängligt (med luftavstånd emellan) för att kunna ersättas vid behov (Figur 24). De två "mixed-shield" TBMer är anpassade för de lokala geologiska och hydrologiska förutsättningarna som kännetecknas av lerformationer med mycket höga grundvattentryck. Hela tunneln kommer att byggas i mycket svag, lerig jord under grundvattenytan. Karakteristiskt för geologin är lokala lager av silt och sand med skalrester. På grund av grundvatten nivån som är upp till 47 meter över tunnelns mitt är TBMer designade för ett maximalt arbetstryck på 6,5 bar. Vid de djupaste delarna kommer tunneln att gå 65 meter under ytan.

De två fullortsborrmaskinerna tillverkades i Kina på fyra månader. Changjiang under flodstunnelprojektet avslutades under 2008, långt före tidplanen.



Figur 24 Världens största Mixed shield TBM (Ø 15,4m) till tunnelprojektet i Shanghai.



Figur 25 Vägtunnlarna i Changjian, Shanghai.

Idag finns TBMer med diametern från 100 mm till 16 m för olika komplexa tunnelprojekt. I framtiden förväntas det vara möjligt att bygga tunnlar med diametrar större än 16 meter genom t.ex. tätbefolkade områden, genom naturliga barriärer som bergskedjor, floder och floddeltan.

I Sverige har fullortsborrade tunnlar främst använts för mindre tunnlar, som kraftlednings-tunnlar men exempel på större tunnlar med diameter på ca 10 meter är de två tågtunnlarna citytunneln i Malmö och tunneln genom Hallandsåsen.

Tunnelbygget genom Hallandsåsen är en del i utbyggnaden av Västkustbanan mellan Göteborg och Lund. I tunnelbygget har två olika fullortsborrmaskiner använts; Banverkets entreprenör Vattenfall-Kraftbyggarna använde en TBM (Hallborr) som inte klarade av den sprickiga och de mixade markförhållandena, medan den TBM (Åsa) som Banverkets entreprenör Skanska-Vinci använder idag klara både att borra i berget och i leran. TBMen Åsa är specialpassad för mycket komplicerade geologiska förhållanden (mixed shield) och är 240 meter lång och borrhuvudets diameter är 10,6 meter. Den bygger och tätar tunneln med betongsegment. Liningen består av betongringar och varje ring består av 8 betongsegment. Åsa kan köras i öppet och slutet läge. När den körs i öppet läge kan grundvatten flöda ut genom maskinens borrhuvud och bergmaterialet transporteras ut på transportband. Då berget är vittrat och har hög vattenhalt kan maskinen köras i slutet läge, vilket innebär att maskinen sätts under ett tryck motsvarande det omgivande vattentrycket. Åsa kan på detta sätt arbeta sig framåt i berget trots den höga vattenhalten.

Hallandsåstunneln beräknas stå färdig för tågtrafik år 2015.

4.1.3 Monitored Bouygues Disc Cutter (MOBYDIC)

Borrning av en tunnel med en fullortsborrningsmaskin sker genom förankring av maskinen i tunnelväggen, sedan trycks med stor kraft borrhuvudet med borkronan längst fram på maskinen mot tunnelfrontens vägg. Samtidigt roteras borkronan för att tryckdiskarna på den ska kunna penetrera och krossa bergytan.

Vid tunnelbyggnation i mark med olikartad markförutsättning uppstår ofta komplexa tekniska problem och stora säkerhetsrisker i huvudsak med avseende på underhåll av bergbrytningsverktygen vilka är monterade på det roterade borkronan. För att reducera risker vid tunneldriften är det viktigt att få kontinuerlig återkoppling av slitaget på bergbrytningsverktygen. Idag finns ingen bra metod för detta. Det enda sättet är att titta på vridningen av borkronan och genom detta syns inte om endast ett verktyg, t ex en tryckdisk är utsliten. När en tryckdisk

är utsliten kommer borrkronan bakom i direkt kontakt med marken. Istället för att bryta berget/marken kommer borrkronan där istället att karvas ur och skadas. Således blir skadan och reparationen mer omfattande än om den utslitna tryckdisken byts ut i tid.

Det finns det inget lätt sätt att få information av tunnelfronten eller tillstånden av bergbrytningsverktygen i utmanande projekt med höga tryck vid stuff kombinerat med varierande grundförutsättningar (heterogen mark). Bouges Travaux Publics har utvecklat en speciell instrumentering, MOBYDIC (Monitored Bouygues Disc Cutter) som direkt på varje tryckdisk registrerar den aktuella temperaturen, omkringliggande lasten/trycket och rotationshastigheten. Data överförs från inbäddade specifika sensorer, utvecklade utanför Tunconstruct. Från data som registreras i real-tid från dessa kan flera parametrar fås:

Hårdheten på marken/berget vid stuff. Vid rotation av borrkronan snurrar tryckdiskarna som sitter med olika radie längs kronan olika beroende på belastning och hårdhet på marken framför. Sammanställandet av data från flera tryckdiskar placerade med olika radie längs borrkronan möjliggör kartläggning av hårdheten av den framföriggande marken.

Instrument/verktygs slitage. Tryckdiskens rotation kring sin axel är en konsekvens av borrkronans rotation. När stålringen på tryckdisken är utsliten är dess radie mindre. En detaljerad analys av rotationshastigheten på varje tryckdisk, tillsammans med borrkronans rotation, möjliggör information om nötningsgrad och underhållet av tryckdisksverktygen kan planeras optimalt.

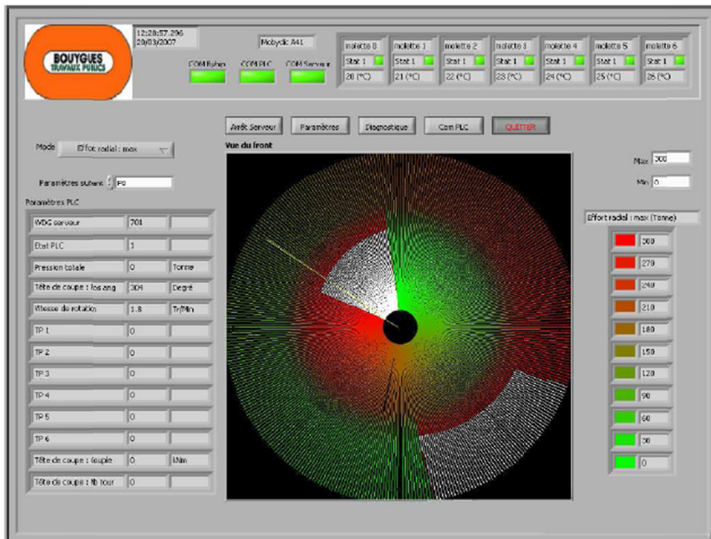
Styrningsparametrar. Den direkta registreringen av belastningen av alla tryckdiskarna kan i real-tid användas till att kontrollera avanceringshastigheten på TBMen. Således kan avanceringshastigheten optimeras och sönderbrytning på grund av överbelastning undvikas.

Alarminställning. När en tryckdisk slutar rotera eller en tryckdisk kommer till ett block eller är överhettad kan ett alarm skickas till föraren för nödstopp och reparation.

Fördelarna med detta system är flera: direkt information vid instrument skada (därigenom undviks risken för skada på borrkronan), en uppföljning i real-tid av geologin vid stuff, vilket möjliggör anpassning av TBM styrningen till den aktuella situationen samt en permanent kontroll av slitaget på tryckdiskarna, vilket optimerar underhållet av dessa. Detta leder till minskade underhålls intervall och stillastående för reparation jämte minskade risker för personal i farliga delar/områden.

Registrerad data visas på en bildskärm (Figur 26) ungefär som på en radarskärm. Tunneln/ borrhuvudet är indelad i små vinkelformade celler. Varje cell visar en mätt eller interpolerad normal belastning. Gröna färger visar låga värden och höga värden visas i starkt röda färger. Visualiseringsskalan kan modifieras för att underlätta tolkningen. Ett utvecklat gränssnitt gör det möjligt att jämföra tidigare sparad och bearbetad data med nuvarande data och därigenom få en uppfattning om ändrade förhållande, exempelvis förändring i marken/bergets karaktär.

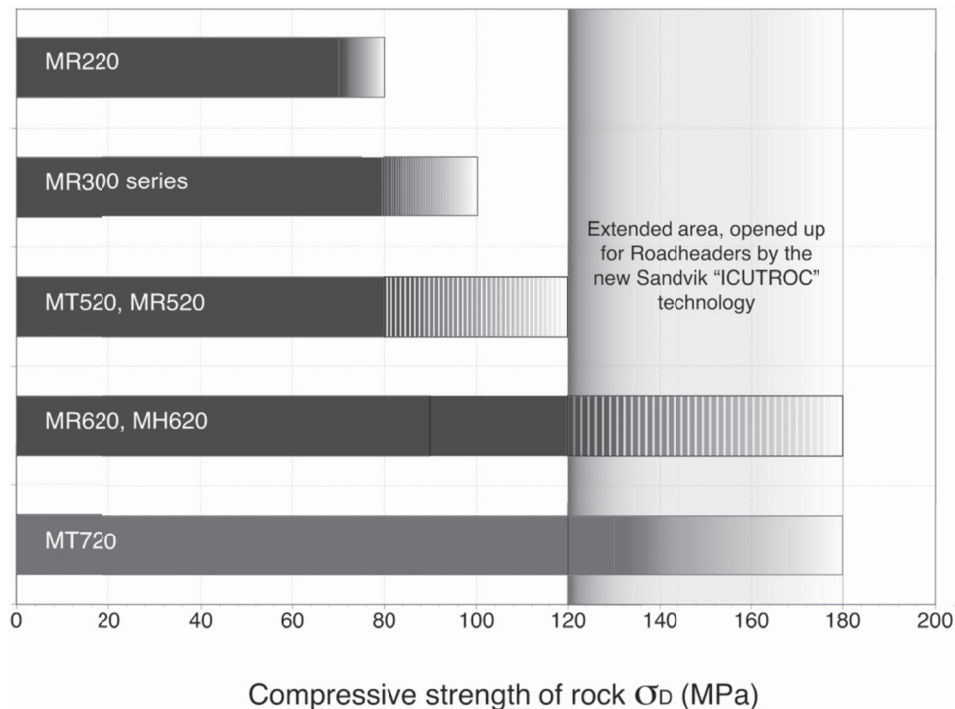
MOBYDIC (Monitored Bouygues Disc Cutter) och har installerats och testats på en fullortsborrmaskin i Frankrike (Tunnel Mont Sion, 2 x 3.2 km). Figur 26 visar en skärmbild av hur ett resultat från MOBYDIC ser ut från Mont Sion tunneln.



Figur 26 MOBYDIC system: skärmbild av resultat från beslut stöd systemet.

4.2 Roadheaders

Moderna roadheader-maskiner erbjuder ett säkert, kostnads-effektivt och flexibelt sätt att mekaniskt bryta berget. Roadheaders bryter berget genom en hacka/spets som är monterad på en kranarm som kan svänga runt. Denna flexibla bergbrytningsmetod gör roadheaders användbara för tunnlar och bergrum med stora variationer i profilen och där sprängning inte är lämpligt eller tillåtet. Överberg och spridd tunnelprofil som ofta är problemet vid sprängning och skrotning av en tunnel undviks. Tidigare har roadheaders använts främst för sedimentära bergarter, d v s relativt mjuka bergarter med nyare teknologi kan även hårdare berg brytas (Figur 27, jämför Tabell 3).



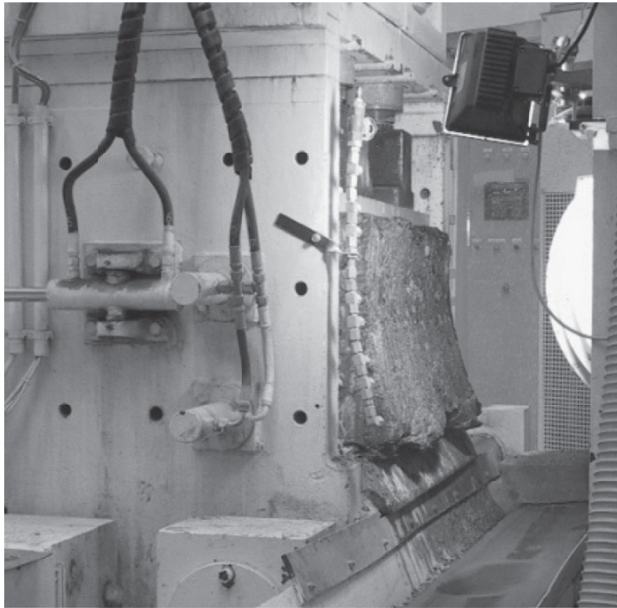
Figur 27 Verksamhetsintervall för Sandviks roadheaders, d v s hur hårt berg maskinen klarar av jämför med Tabell 1.

Tabell 3 Exempel på tryckhållfasthets intervall för några vanliga bergarter. Tabell modifierad efter Waltham, T., 2009.

Bergart	Tryckhållfasthet (MPa)
Granit	50-350
Basalt	100-350
Sandsten	5-100
Kalksten	15-150
Gnejs	50-200
Skiffer	20-100

För att optimera bergbrytningen för olika bergförhållanden krävs en förståelse för hur integrationen mellan bitsen på roadheadern och berget fungerar, vilka parametrar som påverkar resultatet. För att kvantifiera bergbrytnings krafter, instrument slitage, spets temperaturer av olika bergbrytnings instrument i olika typer av berg, har i Sandvik Mining and Construction laboratorium en testrigg byggts. I denna kan bergbrytningstest utföras för olika instrument och

för olika parametrar (Figur 28)

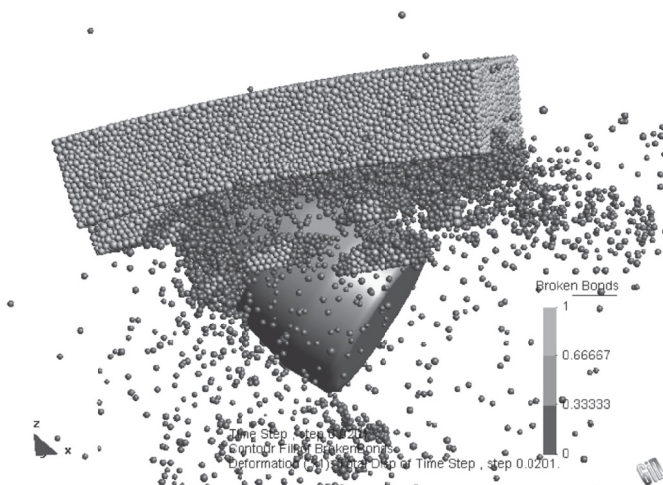


Figur 28 Sandviks "The cutting test rig".

För att komplettera testrigg undersökningarna har numerisk simulering utförts för att finna den optimala strukturen, sammansättningen för specifika förhållanden. Dessutom ökar det möjligheten att förutbestämma slitaget av roadheader spetsarna. Datasimulering har utförts av CIMNE i samarbete med Sandvik.

Numerisk modellering av bergbrytningen kräver att hänsyn tas till olika diskontinuiteter i bergmassan. En ursprunglig numerisk modell av bergbrytningen baserad på *discrete element model* (DEM) har utvecklats inom Tunconstruct. DEM modellen är ett lämpligt verktyg att modellera bergbrott som karaktäriseras av många diskontinuiteter. I DEM modellen antas att ett solitt material kan representeras av en samling rigida partiklar/block vilka integrerar i normalens och tangentens riktning.

I en numerisk modell för roadheaders (Figur 29) kan kvantifiering av bergbrytningskrafter, instrument slitage och temperaturen av olika bergbrytnings instrument i olika bergarter göras.



Figur 29 3D numerisk simulering av bergbrytningen med roadheader.

Denna förbättrade bergbrytningsteknologi har resulterat i att Sandvik har utvecklat specialanpassade bergbrytnings huvuden med specifika bitsmönster och olika bergbrytningsinstrument med specifika spetsar för olika geologiska förhållanden. Idag kan Sandviks roadheaders med ICUTROC teknologi bryta betydligt hårdare berg än andra typer av roadheaders. Fortsatt forskning pågår för att i framtiden kunna bryta ännu hårdare berg.

4.2.1 Ny mjukvara ger omedelbar positions bestämning av roadheader

En mjukvara som är integrerad med det övergripande kontroll systemet och roadheaderns (bergbrytningsmaskinens) processsystem har utvecklats av CIMNE och testats på en SANDVIK roadheader (MT720/052) i en betongtunnel i Zeltweg, Österrike (Figur 30). Den integrerade mjukvaran bestämmer maskinens position i tunneln. Resultatet tillämpas av föraren direkt och ger således större precision i bergbrytningsprocessen.



Figur 30 Mjukvara integrerad i SANDVIK roadheader ger maskinens position i tunneln direkt (vänster). SANDVIK roadheader (MT720/052) (höger).

4.3 Automatiserade sprutbetongsmaskiner

Sprutbetong används ofta i förstärkningsdesignen i dagens tunnelbyggande. I regel används en sprutrobot som styrs av bergarbetare. Entreprenören som applicerar sprutbetongen arbetar efter krav på betongens beskaffenheter och tjockleken på det applicerade lagret.

Oavsett om betongen tillverkas på plats eller levereras, tillsätts vanligen någon form av tillsatsmedel, accelerator, under sprutningen.

Idag sker kvalitetskontrollen huvudsakligen i efterhand. Stickprov tas ur den färska betongen som får härda och sedan provas i laboratorium. Tjockleken mäts med jämna mellanrum genom att det härdade sprutbetonglagret genomborras enligt ett givet mönster. Ofta är spridningen stor vad gäller tjockleken, till viss del som en följd av bergytans naturligt ojämna struktur.

Vidhäftningsförmågan kontrolleras genom dragprov på en liten del av den färdiga konstruktionen. För samtliga testmetoder innebär det att om undermålig kvalitet upptäcks måste ofta en ny uppställning av sprutroboten ske och en kompletterande sprutning genomföras.

En högre grad av automatisering av sprutbetongprocessen innebär högre säkerhet och mindre arbetsbelastning för operatörerna. Bättre förutsättningar för kontinuerlig kvalitetskontroll och tjockleksmätning innebär en slutprodukt med jämnare kvalitet och minskar behovet av överdimensionering och överflödigt tjocka betonglager. En optimering av sprutprocessen minskar återstuds och betongspill vilket är kostnadseffektivt.

4.3.1 Nya metoder och lösningar

Kvaliteten hos sprutbetongkonstruktioner påverkas av pumpbarhet, sättmått, bindningstid, dosering av accelerator, påföringsparametrar, tjockleken hos sprutbetongen.

4.3.1.1 Pumpbarhet

Pumpbarhet beror inte enbart på betongen utan även på utrustningen och externa omständigheter (så som temperatur, höjd och avstånd).

För att kunna utvärdera pumpbarheten hos sprutbetong har AITEMIN¹⁰ och IETCC (*Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*) tagit fram en prototyp som kallas ”*Pumping rheometer*” (pumpreometer). Utrustningen består av ett cylindriskt rör försett med speciella lock och ventiler som är kopplade till en kontrollenhet, vilken registrerar tryckskillnader och betongens position i röret. Prototypen har som uppgift att utvärdera elasticitetsgränsen och den dynamiska viskositeten hos en Binghamvätska i rörelse i ett rör och utsatt för differentialtryck. Utrustningen kan hantera betong och murbruk med kornstorlekar upp till 20 mm och kan användas både i laboratorium och i produktion. Lämpliga användningsområden är:

- Optimering av betongrecept.
- Mätning av effektiviteten hos tillsatsmedel i laboratoriemiljö.
- Kvalitetskontroll i produktion.
- Acceleratordosering

¹⁰AITEMIN är ett spanskt privatägt icke vinstdrivande teknologiskt centrum i Madrid vars huvudsyfte är att driva forskning och ge tekniskt stöd inom området naturresurser.

4.3.1.2 Doseringsenhet och sprutmunstycke

Tillsättandet av en accelerator påverkar resultatet av betongsprutningen. En felaktig dosering kan leda till att sprutmunstycket sätter igen, betongen fastnar dåligt på underlaget (mycket återstuds) eller att den färdiga konstruktionen får en för dålig kompaktion för att garantera en tillräcklig kvalitet. En ojämn dosering ger en ojämn kvalitet på den färdiga konstruktionen. För att få en jämnare kvalitet i sprutbetongen utvecklades en doseringsenhet av AITEMIN tillsammans med företaget SIKA (Figur 31). Denna tillsätter erforderlig mängd accelerator vilket överensstämmer med synkront uppmätt betongvolym.

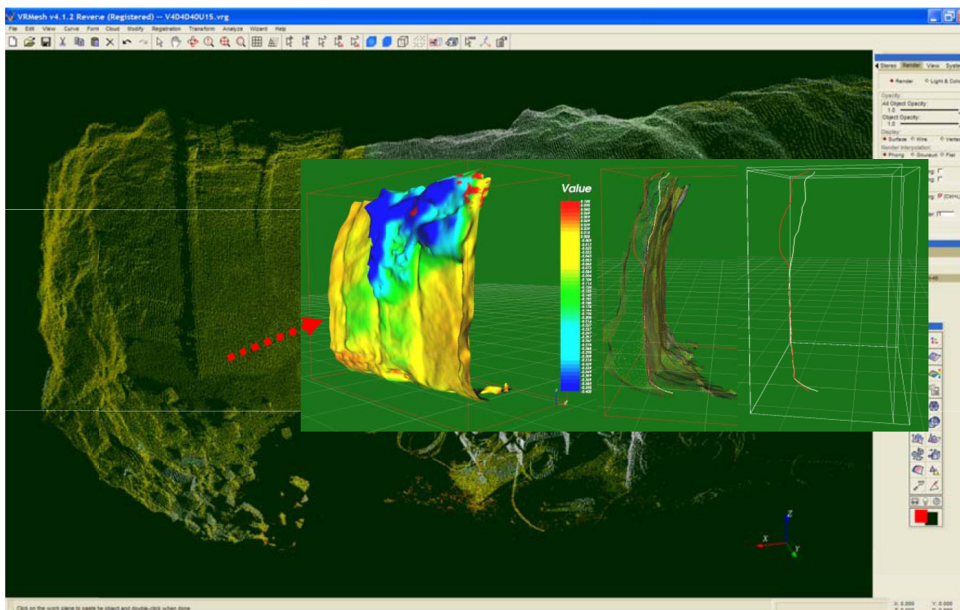


Figur 31 Prototyp av den nya doseringsenheten (AL 404.5) installerad på en SIKA-PM 407 sprutbetongsrobot

Tryckhållfastheten hos betong sprutad med den nya typen av doseringsenhet jämfört med den hos betong sprutad med sedvanliga metoder är jämnare. En undersökning utförd av AITEMIN och SIKA visade testkroppar som sprutats med vanlig metod att tryckhållfastheten varierade som mest med ca 20 kg/cm². Medan motsvarande variation av tryckhållfastheten med den nya metoden var normalt ca 3 kg/cm² och i extremfallet mindre än 10 kg/cm².

4.3.1.3 Tjockleksmätning

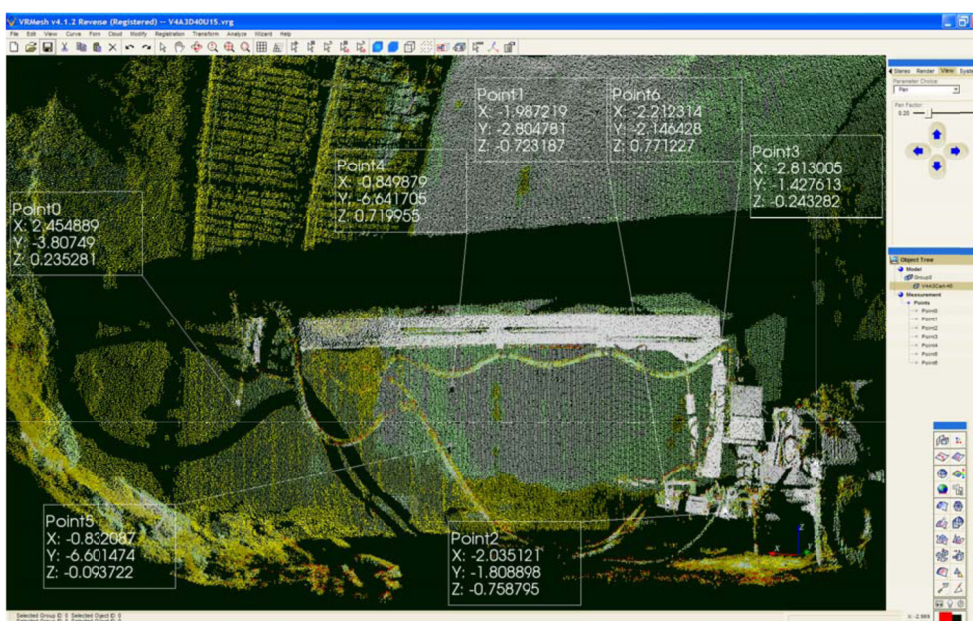
För att utföra kontinuerlig tjockleksmätning har en prototyp utvecklats av AITEMIN, IETcc och SIKA. Denna 3D Ladarskanner som monteras på sprutbetongsroboten ger information om tunnels dimensioner före och efter betongsprutning. Resultaten visar sprutbetongens tjocklek och stödjer sekvensplaneringen av sprutbetongprocessen. Förenklat skannar man kontinuerligt av den aktuella ytan och med en tillhörande programvara jämförs punkterna som utgör resultatet.



Figur 32 För att erhålla tjockleken på ny sprutad betong analyseras två grupper av punktmoln (3D bilder) tagna med LICAM-16 Ladar Scanner före och efter betong besprutningen.

Den stora fördelen med den nya utrustningen är bl.a. att det blir möjligt att data processas direkt i skannern utan behov av efterbehandling. På så sätt kan informationen sändas direkt till sprutrobotens kontrollenhet som styr tjockleksmätningen och beräknar sprutbetongbanan. Programvaran som ingår i prototypen behandlar punkterna från laser-skannern och sorterar bort punkter utan värde (d.v.s. felaktigt registrerade punkter, t.ex. p.g.a. damm i luften) och beräknar områden med få punkter (områden med låg reflektion av laserstrålen) (Figur 32).

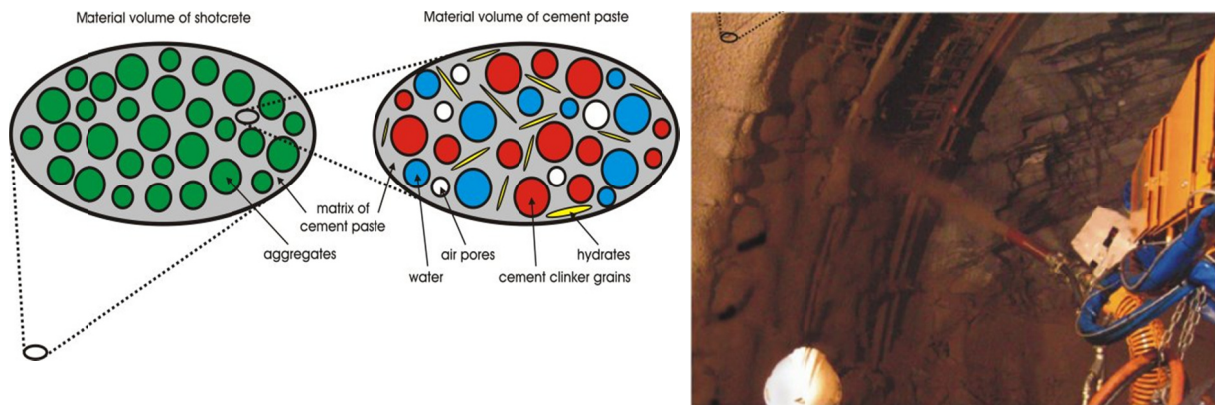
För att fastställa maskinens position i tunneln används kända punkter både på maskinen och på tunnelväggen (Figur 33). Den relativa positionen mellan dessa kända punkter ger också maskinens aktuella position och till detta har VRMesh-Reverse-mjukvara (en 3D-modelleringsapplikation med allmänna funktioner) använts.



Figur 33 LICAM-16 Ladar Skanner bild på en sprutbetongsmaskin och tunnelväggar

4.4 Betongbågar/lining med bättre hållbarhet

Syftet med detta delprojekt har varit att förbättra de tekniska egenskaperna hos sprutbetong och betongsegment och därigenom öka livslängden/ minska underhållsfrekvensen av betongkonstruktioner/lining (Figur 34). Flera företag är delaktiga däribland de tyska företagen Hochtief construction AG och Stuva och de spanska företagen Accina infraestructurs, Dragados och Sika.



Figur 34 Bättre tekniska egenskaper hos materialen i betongsegment och sprutbetong.

4.4.1 "Performance based" sprutbetongblandningar

I undermarks konstruktioner behöver sprutbetong sammansättningen ständigt anpassas/uppdateras till de rådande förhållandena. Utformning av betongblandningar för sprutbetong är kemiskt komplicerat. Detta gör att det finns ett behov av ett portabelt och snabbt verktyg som kan möta kraven för olika specifika tillämpningar. Inom Tunconstruct har en mjukvara utvecklats för detta ändamål. En *performance based* (PB) ansats har använts, vilket innebär att de tekniska kraven (målen) uttrycks som kvantifierbara värden. Dessa värden är relaterade till specifika testmetoder på bestämda prover.

Mer i detalj innefattar detta:

- Utvecklandet av testprotokoll (PB orienterade) för ny designade sprutbetonglösningar
- Genom PB kriterierna kan man bestämma vilka ingredienser i betongblandningen som passar bäst för önskat ändamål
- Utvecklandet av tillsatser/blandningar för att framställa hög kvalitativ sprutbetong
- Utvecklandet av experimentella program för numerisk modellering
- Utvecklandet av ett förenklat regelprogram betongblandning
- Utvärdering och demonstration av PB handlingsplanen för design av miljövänliga och hög presterande blandningar genom att jämföra med icke standardiserade material.

4.4.2 Nya material i betongsegment

Inom Tunconstruct har nya material för betongsegment (lining) (Figur 35) utvecklats med syfte att minska byggkostnaderna och öka hållbarheten hos betongsegment.



Figur 35 Betongsegment i nytvecklade material.

De nya materialen är självkompakterande betong (SCC), stål- och/eller plastfiber (Figur 36) armerad betong (SFRC, PFRC), liksom höga och ultra högpresterande betong (HPC, UHPC).



Figur 36 Polypropylen fiber.

Vid sidan av teoretiska utvärderingar och laborativa tester har tyngdpunkten lagts på att samla erfarenheter från produktionen och följa upp föreslagna förbättringar erhållna från olika belastnings tester utförda i verklig skala. Syftet testerna var att visa fördelarna med betongsegment som produceras av de nytvecklade materialen, t.ex. på deras högre böjning kapacitet, högre belastning fördelning i relations till de längsgående sprickorna och dess högre motståndskraft mot oväntade belastningar.

Jämförande beräkningar visar att användning av högpresterande betong (HPC) i segment kan leda till en minskning av fodertjocklek med 15-25 %. På grunda av en känslig produktions process och att den är dyr är UHPC (Ultra-hög presterande) betongen mer lämplig att använda vid speciella tillfällen. Exempelvis kan UHPC betongen användas för att ersätta stål vid korsande passager vid svåra förhållanden. Stålfiber är lämpligt att använda för att förbättra böj-

ning-, tøjningsstyrkan på segment och användning av polypropylen¹¹ (plast) fiber i segment för att få bättre brandsäkerhet.

Huvudsyftet med detta projekt var att introducera HCP och UHPC betong i undermarks konstruktioner. Detta innefattade utvecklandet av recept, härledning av design parametrar samt verifiering av förväntade resultat.

4.5 Miljöpåverkan

4.5.1 Återvinningsanläggning för schaktmaterialet från fullortsborrning (TBM)

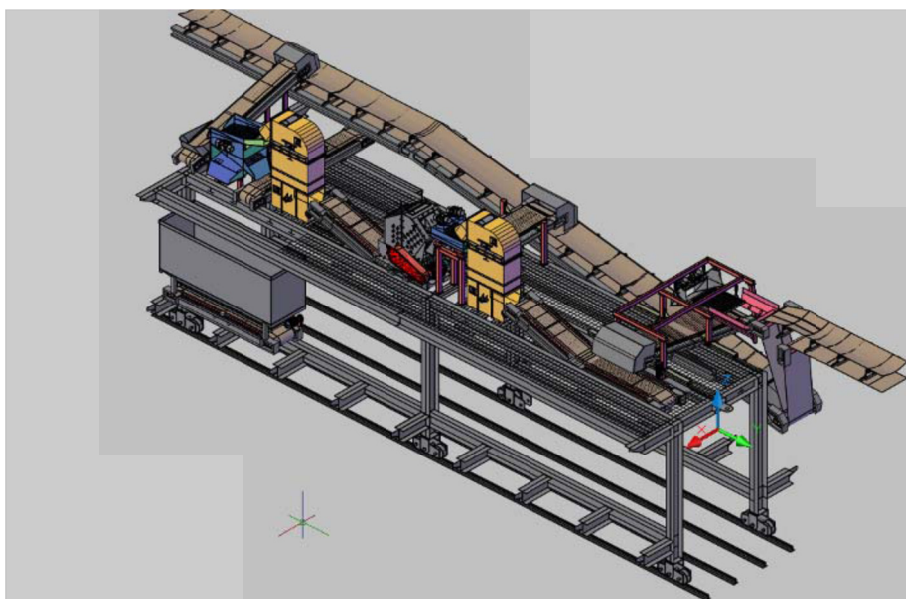
Vid tunneldrivning med TBM fås en stor mängd schaktmaterial och borrhax (Figur 37) Att återanvända detta material istället för att dumpa det är fördelaktigt både ur ekonomisk och ur miljömässig synvinkel.

Företaget Dragados har gjort en första design på en återanvändningsanläggning som placeras ovanpå TBM uppställningen i tunneln (Figur 38). Materialet som ska återanvändas får inte vara förorenat och ska, beroende på vad det ska användas till, uppfylla de kriterier som krävs för ändamålet. I återanvändningsanläggningen sorteras först materialet och material som inte uppfyller kraven sorteras ut ur tunneln på TBMs normala transportband. Schaktmaterialet krossas ner till sand och används till betongtillverkning, se Tabell 4.



Figur 37 Schaktmaterial från Pajares-tunneln.

¹¹ Polypropylen är en av de vanligaste termoplasterna. Dess glastemperatur är mellan -10° till -20° grader Celsius, vilket gör att den i Sveriges kalla vinterväder blir spröd och lätt går sönder.



Figur 38 Placeringen av återvinningsanläggningen i en TBM uppställning.

Tabell 4 Användningsområden för utschaktat material		
Fractions	Material usage	Type of use
0 – 5 mm	Directly	Mortar for backfilling (1/3 of the lining segment perimeter)
5– 12 mm	Directly	Gravel injection for backfilling (2/3 of the lining segment perimeter)
> 12 mm	Directly	Segments production

4.6 Arbetssäkerhet

4.6.1 Trådlös nödläges signalering

Ett trådlöst sensor nätverk (wireless sensor network, WSN)¹² består av flera utspridda och autonoma enheter. Nätverket är baserat på mesh-näts teknik¹³ och är själv-konfigurerande vilket betyder att det fortsätter att fungera om en enhet i nätverket går sönder eller tas bort. Sensorerna som sitter på varje enhet registrerar fysikaliska faktorer som temperatur, ljud, vibrationer, tryck, rörelse och föroreningar.

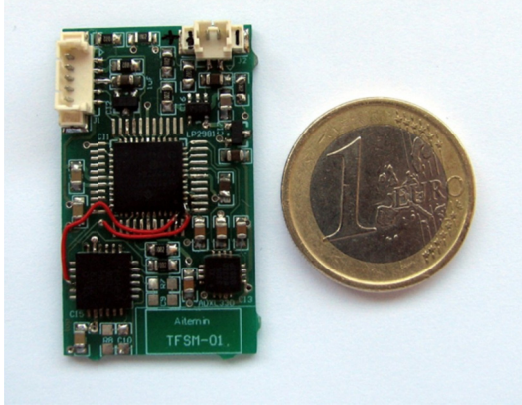
Radiotekniken som används i detta system är baserad på IEEE802.15.4 standard, också känd som ZigBee. För att ta reda på var personen befinner sig används ett nätverk av fixerade noder (bas-stationer) som installeras vid arbetsplatser och utgångar. Mobila noder (sensor noder) finns på personer och maskiner som rör sig i tunneln. På detta sätt kan sensor noden används till både lokalisering av arbetaren/maskinen och till registrering av andra parametrar som t ex temperatur, ljud, vibrationer.

¹²Wikipedia artiklen om WSN (http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network) ger en kort beskrivning av denna teknik.

¹³Meshnät (ex. Internet) är en nätstruktur av olika noder (enheter som kan ta emot, sända och vidarebefordra data). En nod har kontakt med minst två noder och alla noder är lika mycket värda, d v s ingen nod styr nättrafiken.

Flera typer av mobila noder utvecklades under TUNCONSTRUCT. TFSM noden (Fig. 8) utvecklad av AITEMEN har tagits fram för att öka personalens säkerhet.

TFSM noden informerar om arbetarens placering och tillstånd. Vidare ger den information om arbetarens rör sig eller är stilla, står eller ligger och när personen rör sig i vilken riktning hon rör sig. Den ger också arbetaren information om var närmsta nödutgång och skyddsrum finns (Figur 39).



Figur 39 TFSM nod prototyp.

5 Tunnel övervakning och underhåll

5.1 Övervakning och besiktning

Målet med delprojektet ”övervakning och besiktning” är att göra övervakning av en tunnel i bruk automatiserad och kontinuerlig samt att datainformation ska kunna avläsas och behandlas på distans. Utvecklande av och framtagande av olika sensorprototyper har varit ett led i detta.

Spanska företaget Geocisa¹⁴ och tyska företaget Glötzl¹⁵ är huvudaktörerna inom detta delprojekt.

5.1.1 Sensorer

Under själv tunnelbyggandet installeras sensor i tunneln eller efteråt om ett dåligt/skadat område upptäckts, som behöver övervakas.

Betonginklädda tunnlar med stålbågar/fiberarmering s.k. linade tunnlar är den dominerande tunneltypen i Europa. För att avgöra en linad tunnels skick, tillstånd tittar man på förändringen i tunnel-liningen och den omgivande marken. Det är främst följande parametrar som man vill mäta i tunneln:

Rörelser i tunnelsektionen. De flesta rörelser i tunnelsektionen är relaterade till konstruktionsfasen av tunneln, men efter en tid kan en del jordar orsaka en rörelse, en formförändring. Detta mäts genom att göra en ny profil över en ny tunnelsektion antingen genom 2D skanner eller genom relativa variationen i avstånd mellan punkter i sektionen, vilka mäts från en total station.

Belastning och spännings förhållandet i tunnelstrukturen bedöms genom att mäta deformationen i liningen i både stålet och betongen. För detta används tryckcellers sensorer (Total pressure cells).

Korrosion och nedbrytning av liningen avgörs genom att mäta fukthalten i betongen. För detta används en korrosions-sensor.

Öppnandet och stängandet av befintliga sprickor och brott i liningen. Detta avgörs genom att mäta avståndet mellan tre fixpunkter på var sida om sprickan med en manuell eller automatisk sprickmätare.

En 3D sprickmätare består av en grupp av tre vibrerande trådar kopplade till varsin omvandlare (three vibrating wire displacement transducers). Dessa tre instrument fastställer skjuvning, longitudinell rörelse, vertikal rörelse. Spänningen i respektive tråd i varje instrument är direkt relaterat till dess förlängning och bestämmer exakt rörelserna som sker i sprickan.

För att avgöra den omkringliggande markens påverkan på tunneln vill man främst mäta följande parametrar:

- Markens tryck på liningen. För detta använder man tryckcells sensorer.
- Rörelser i den omkringliggande marken. Man mäter flera punkter med olika avstånd från liningen och refererar till en antagen fixpunkt långt bort från liningen. För detta använder man en sensor av borrhåls extensometer typ (Borehole rod extensometer).
- Grundvattnets tryck på liningen, mäts med piezometer.

¹⁴ <http://www.geocisa.com/home.html>

¹⁵ <http://www.gloetzl.com/>

5.1.2 Tryckceller

Tryckcells sensorer används för att mäta belastningsförändringen i cement, jord och fyllnad och i sprickkontakter. För övervakning av tunnel i bruk är det främst de radiella och de tangentiala trycken i tunneln som är intressanta. Sensor instrumentet består av två plattor av rostfritt stål. Kanterna av plattorna är fastsvetsade och bildar ett förseglat hålrum, vilket är fyllt med vätska.

Ena delen av de hopsvetsade plattorna (cellen) sätts mot tunnelstrukturen eller jorden. Det totala trycket som utövas på den ytan överförs genom vätskan inuti cellen till en tryckomvandlare (pressure transducer) som sitter på cellens utsida. Därigenom kan tryckförändringen uppmätas.

Cellen installeras efter schackting av tunneln och innan sprutbetongen. I platsgjutna betongtunnlar (linade) placeras radiella celler i mellanrummet mellan schaktade marken och fiberarmeringen. Tangentiella celler placeras på armeringen.

Olika typer av tryckomvandlare kan kopplas till tryckcellen som membran switch, vibrerande lednings omvandlare (Vibrating wire pressure transducer), piezo resistivitet omvandlare (Piezo-resistive transducer).

En prototyp på en energisnål tryckcells sensor (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer (EFPI) total pressure cell,) med automatisk avläsning på distans utvecklats av det tyska företaget GLÖTZL Bau & technik (Figur 40).



Figur 40 Från vänster: Sensorhuvud med interferometer; skyddsplatta med kontakter.

Fördelen med den nya sensorn är att genom att använda en interferometer (utnyttjar ljusets interferens) istället för ett vibrerande sträng system kan utslagen på membranen minskas från 20-30 mikrometer till 1 mikrometer. Detta betyder att den plastiska deformationen på membranen i princip elimineras vilket är nödvändigt vid långvarig användning av sensorn.

Det spanska företaget GEOCISA installerades dessa nya sensorer i en service tunnel i de nya M-30 tunnlar i Madrid. Sensorerna installerades radiellt mot tunneln (Figur 41). Konventionella tryckceller installerades som jämförelse. Syftet är att ta reda på hur den överliggande lasten fördelas över liningen av en tunnel i bruk. Detta görs genom att mäta förändringar i marktrycket på liningen. Under installationen nollades sensorerna mot den omkringliggande marken. Förändringar i marktrycket förmodas inte ske på kort sikt och har inte skett under denna rapport sammanställning. De kontinuerligt uppmätta värdena från tryckcells-sensorerna på noll är ett tecken på att installationen av prototyperna fungerat bra.



Figur 41 Uppkopplad tryckcells sensor färdig för installation (vänster). Sensorn sätts in i borrhålet (höger).

De automatiserade sensorerna är sammankopplade med en station för datauppsamling. Från denna överförs data via en router till en central server med ett visst tidsintervall. Servern nås av en användare med internetuppkoppling.

5.1.3 Stålkorrosion sensor och fuktgrad i fiberarmerad betong

Vatteninnehållet baseras på betongens resistivitet och denna parameter indikerar fuktnivån i betongen. Fukt i betongen tillsammans med syretillgång är relaterat till olika kemiska riskreaktioner som t ex alkali-aggregat reaktion och sulfat attack. Denna sensor ger värden på betongens resistivitet, korrosions potential och korrosions hastighet.

För att utvärdera möjlig korrosionen av armeringen sätts sensorer fast i betongen vid olika djup.

En prototyp på en energisnål korrosions sensor med automatiserad avläsning på distans tagits fram av det tyska företaget GLÖTZL.

5.1.4 Borrhåls-extensometer

Andra varianter av sensorer är Borrhåls-extensometer (Borehole rod extensometer) och Punkt spänningsmätare (Spot welded strain gauge). Båda ger information om resonans frekvensen efter töjningen av en stål tråd/vajer och tillverkas av de amerikanska företaget Geokon.

Rörelser i tunneln mäts med borrhåls extensometer, då den ger information om deformationen i marken omkring tunneln och de andra sensorerna. Dessa installeras i borrhål borrade radiellt ut från tunnelstrukturen. Borrhåls extensometern mäter längden mellan en eller flera ändpunkter i ett borrhål jämfört med en referens överst vid borrhålsslutet.

Extensometrarna fästs vid olika nivåer. Deras syfte är att visa den relativa förändringen mellan ändpunkterna i varje extensometer och tunnels struktur. I huvudsak är det de rörelser som är producerade av dekompression efter att tunneln är schaktad och omfördelningen av original spänningar i tunneln relaterade till detta, som mäts. I fullortsborrade tunnlar är det inte möjligt att installera extensometer innan alla maskiner är ute ur tunneln och då har redan deformation orsakad av dekompression ägt rum. Därför är denna metod mindre lämplig att använda vid TBM drift.

Denna sensor ger hög precision även vid stora installationsdjup. Mätpunkterna kopplas till en central-box för att antingen avläsa sensorerna digitalt eller för att föra signalen till en automatisk datauppsamlare.

5.1.5 Punkt spänningsmätare (Spot weldable strain gauge)

Punkt spänningsmätaren mäter deformationen i bultar vilket ger belastnings och spännings förhållandet i tunneln. Denna sensor är en vibrerande tråd extensometer (Vibrating wire extensometer) som sätts fast på bulten. Resonans frekvensen av vibrationen av en spänd stålvarer är beroende av spänningen eller töjningen i vajern.

5.2 Andra metoder för att avgöra tunnelns skick

Nackdelen med de flesta av metoderna nedan (Tabell 5) är att de inte kan utföras när tunneln trafikeras eller på annat sätt är i bruk.

Tabell 5 Olika metoder för att bedöma tunnels skick

Metoder	Mäter/registrerar	Kommentar
Elektriska metoder Elektrodmätning på betongytan Borrkärnor (två elektrods metod)	Elektrisk resistivitet, ρ Låg $\rho \rightarrow$ hög korrosions hastighet	Många faktorer påverkar som; fukthalt, kloridhalt, porositet, karbonathalt, typ av cementblandning
Georadar	Ekot från en elektromagnetisk impuls	Ger information om olika lager och dolda ojämnheter
Infraröd termografi skanning av tunneln från fordon	Värmestrålningen/ emissiviteten från ett material	Ger information om ojämnheter i betongen. Kan inte användas när tunneln trafikeras
Laser-skanning	Avståndet och reflektionen från ett föremål	Ger information om strukturer och ojämnheter i betongen. Kan inte användas när tunneln trafikeras
Seismik med sensorer i tak, sula och vägg	Hastigheten av S-vågor i tunnel linjen och omgivningen	Ger information om sprickor och ojämnheter. Kan inte användas när tunneln trafikeras
Ultraljuds undersökning tar in data i 35 -250 kHz intervall	Ljudhastigheten genom betongen vilken reflekterar materialets täthet och hårdhet	Ger information om betongens homogenitet och defekter (sprickor). Kan inte användas när tunneln trafikeras.
Akustisk metod, Impak- teko,		Ger information om konditionen av tunnel-linjen i kontakt med jord eller berg

5.3 Service metoder

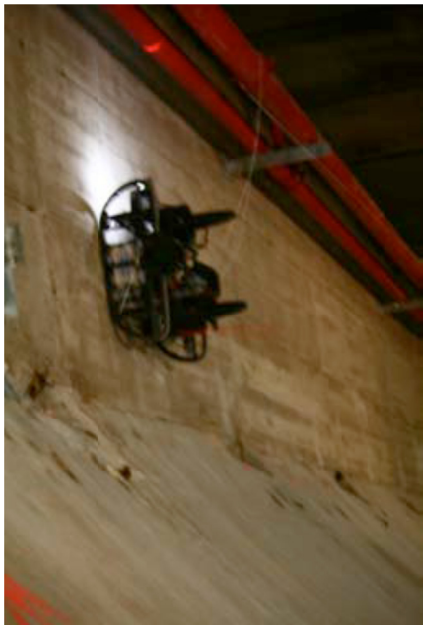
Övervakning och inspektion är en viktig del av tunneldriften. För att i möjligaste mån undvika interaktion och störning av den ordinarie tunneltrafiken måste inspektioner göras under korta tidsintervaller och ofta nattetid. För att få mindre trafikstörning av en tunnel i verksamhet och

säkrare kontroll och underhåll av tunnlar har ett kontroll- och servicesystem med olika robotar utvecklats av företagen DRAGADOS, SIKA och STUVA.

5.3.1 Dragarita, en fjärrstyrd robot

Dragarita roboten är ett mångsidigt, fjärrstyrt robotfordon (

Figur 42) som kan röra sig på horisontella, vertikala och inverterade ytor. Den har designats för att kunna nå svårtillgängliga områden i betongtunnlar och för att med kamera och skanner göra en snabb besiktning av liningen i tunneln. Genom att installera två infra-röds sensorer på roboten, en för kort avstånd och en för långt avstånd minskas kollisionsrisken. Liksom de två specialdesignade inklinometrarna som kontrollera robotens lutning.



Figur 42 Dragarita robot besiktigar betongsegment.

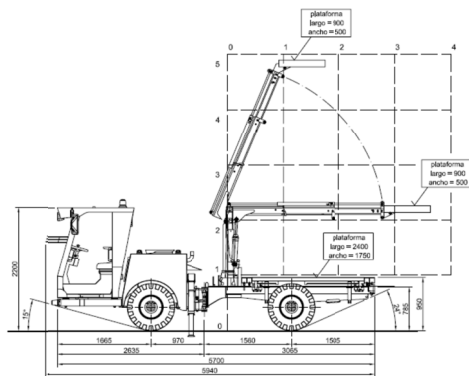
5.3.2 Robotbesiktning och servicesystem

Syftet med detta robotverktyg (Figur 43) som sätts på en plattform med kran på ett fordon (Figur 44) är att på plats direkt efter kontroll reparera och förstärka. Roboten kan fylla igen sprickor eller sätta på FRP (fiber armerade polymer) i förstärkning syfte. Roboten har också möjlighet att rengöra tunnelytan innan lämplig reparationsmetod används.



Figur 43 Reparationsrobot.

Fordonet är utrustat med en kran vilken gör det möjligt att lyfta roboten dit kontroll och reparationen är nödvändig.



Figur 44 Fordon med kran.

6 Litteratur

Nedan redovisas några av de rapporter som har producerats inom Tunconstruct projektet och som behandlas i denna rapport.

- D 2.1.1.1 Bäßler, K., Herrenknecht AG, Martos, A., FCCCO. Large diameter TBM. State of the art. (2006).
- D 2.1.1.2 Bäßler, K., Herrenknecht AG, Susana Arce (FCC) Partial Large Diameter TBM prototypes tested. (2007).
- D 2.1.1.3 Edelmann, T., Herrenknecht AG. Report on Large Diameter TBM prototypes tested (design & construction). (2008).
- D 2.1.3.1 García, J.L., FCC, Martos, A., FCC, Frenzel C., Herrenknecht AG. Report of study on cutting technologies. (2006).
- D 2.1.3.2 Labra C., Rojek, J., Oñate, E., Zarate, F., CIMNE. Report of numerical modeling of disc cutter wear (Intermediate) (2007).
- D 2.1.3.3 Labra, C., Rojek, J., Oñate, E., CIMNE, Köppl, F., Herrenknecht AG. Report of numerical modelling of disc cutter wear. (2008).
- D 2.1.3.4 Köppl F., Frenzel, C., Herrenknecht AG, de Broissia, M., de Moulin, P., BYTP, Gudberlet, F., HTC. Recommendation for measurement principle and appropriate data Transmission. (2007).
- D 2.1.3.5 Frenzel, C., Köppl, F., Herrenknecht AG, García, J.L., Martos, A., González, A., (FCC) & Gerdo Dalhuizen (FCC) Intermediate report of new cutters (2008).
- D 2.1.3.7 Delplace, L., Köppl, F., Herrenknecht AG, Labras, C., CIMNE, Pfeiffer, M., HT, Capilla, F., FCC. Final report on New Cutting Technology. (2009).
- D 2.1.4.1 Bäßler, K., Edelmann, T., Herrenknecht AG. TBM auxiliary. State of the Art. (2006).
- D 2.1.4.2 Bäßler, K., Edelmann, T., Herrenknecht AG. TBM auxiliary prototype tested. (2007).
- D 2.2.1.1 Sifferlinger, N.A., Lammer, E., Voest-Alpine Bergtechnik (VAB). Roadheaders basic processing system. Including specifications and users manual. (2006).
- D 2.2.1.2 Lammer, E., SANDVIK, Chmelina, K., Maierhofer, A., GEODATA. Control system software for online acquisition of machine data and machine position (Version for testing). (2008).
- D 2.2.2.1 Moser, P., Heiss, C., Schöffmann, E., Egger, F., MUL. Report on interaction between method and rock mass. Basic model available. 2006.
- D 2.2.4.1 Rojek, J., Oñate, E., Labra, C., Zarate, F., International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Akerman; J., Voest-Alpine Bergtechnik (VAB). Wear mechanism prototype intermediate. (2006).
- D 2.3.1.1 López, R.A., AITEMIN, Luco, F.L., Río, O., IETcc. Report of the SoA on monitoring and mix-design specification and QC of concrete at the fresh state. (2006).
- D 2.3.1.2 Luco, L.F., Río, O., IETcc-CSIC, Rodrigues, A., AITEMIN. Devices and Methods for assessing shotcrete performance (2007).

- D 2.3.1.3 Rodríguez, A., Nabulsi, S., AITEMIN, Río, O., IETcc. Coupled influence of mix properties and execution shotcreting parameters (2008).
- D 2.3.2.1 Rodríguez, A., Fondeur, G., AITEMIN, Rivas, J.L., López, C., SIKA. State of Art Report on Shotcreting Machine Monitoring, Control and Admixture Dosing (2006).
- D 2.3.2.2 Rodríguez A., Fondeur, G., AITEMIN, Rivas, J.L., López, C., SIKA. System for SM Automation (2007).
- D 2.3.2.3 Lopez-Cortijo, C., Sánchez –Blanco, M., Rivas, J.L., SIKA, Nabulsi, S., Rodríguez, A., AITEMIN. Interim progress report for Task 2.3.2 (2008).
- D 2.3.2.4 Nabulsi, S., Rodriguez, A., AITEMIN Remotely Monitored and Operated Shotcreting Machine (2008).
- D 2.4.1.1 Luis Fernandez-Luco, Olga Río (IETcc), Joerg Schreyer (STUVA), José L. Rivas (SIKA) State of the Art. Report highlighting needs on standards and in technological research and operational innovations. (2006).
- D 2.4.1.2 New materials. New mixers to be applied to underground constructions. (2006).
- D 2.4.1.3. Specification on parameters for material modelling. (2006).
- D 2.4.1.4. Rivas, J.L., SIKA. Shotcrete simplified mix design rules program. (2008).
- D 2.4.3.1 Río, O., IETcc-CSIC, Oliver, M., IETcc-CSIC, Rivas, J.L. Manzanedo, B., SIKA, Capilla, F., FCCCo, Dalhuizen, G., FCCCo. SoA on backfill injection material and control monitoring execution systems. (2007).
- D 2.4.3.2. Río, O., IETcc-CSIC, Rebolledo, N., IETcc-CSIC, Castillo, A., IETcc-CSIC. Proposal for backfill mortar characterization under performance based approach. (2008).
- D 2.5.2.1 Pegon, J-L., Gégout, P., BYTP, Rivas, J.L., SIKA. Soft ground tests & definition of suitable parameters. (2006)
- D 2.5.2.2 P. Gégout, BYTP , Rivas J.L., SIKA. Additives for EPB shields. Mock up. (2006).
- D 2.5.2.3 Rivas, J.L., SIKA, Gégout, P., BYTP. Mock up construction and validation tests for simulating additives use in Earth Pressure Balanced Machines. (2007).
- D 2.5.2.4 Gégout, P., Vallon, F., BYTP, Rivas, J.L., Videra, O., SIKA. In-situ rules and tests for choice of additives according to the geological conditions. (2008)
- D 2.5.2.6 Rivas, J.L, Sánchez-Blanco, M., Videra, O., SIKA. Specification on new foams and special additives list. (2008).
- D 2.5.2.7 Rivas, J.L., Videra, O., Jimenez, A., SIKA. New software. Calculation of foams dosage, including specifications and user's manual. (2008).
- D 2.5.2.8 Capilla, F., Avilés, J., Dalhuizen, G., FCC. System protocol neutralisation of effluent PH with CO₂. (2007).
- D 2.5.2.9. Rivas, J.L., Sánchez-Blanco, M., Videra, O., López-Cortijo, C., SIKA. Additive for EPB shields, results of lab tests. (2007).
- D 2.5.3.1. – Martos, A., FCC, Pascual, J.A., UEE. Characteristics of new elements. Blasting Technologies. (2006).

- D 2.6.1.1 Kessler, D., STUVA. Risk catalogue for TBM operations. (2005).
- D 2.6.1.2 Bäßler, K., Wiedenmann, T., Herrenknecht AG. Innovative mix of safety measures for TBM, intermediate report. (2007).
- D 2.6.1.3. Wiedenmann, T., Herrenknecht AG. Report Safety. (2008).
- D 2.6.1.4. Wiedenmann, T., Herrenknecht AG. Software program for TBM fire scenarios. (2008).
- D 2.6.2.1 Mieres Royo, J.M., ACCIONA Infraestructuras. Requirements report for safety compartments. (2006).
- D 2.6.2.2 Rojas, F.B., ACCIONA Infraestructuras. Report of materials for safety compartments. (2006).
- D 2.6.2.3 Álvarez-Castro, A., ACCIONA Infraestructuras, Rodríguez, A., Del Valle, J., AITEMIN. Design of Compartments. (2007).
- D 2.6.3.1 Del Valle, J., Espada, F., Rodríguez, A., AITEMIN. Development of devices and software for safety signalling devices. (2007).
- D 3.1.1.1 Report on new methodologies for seismic exploration (softground). (2007)
- D 3.1.2.1 Report on modelling results and specifications of adapted seismic prototype (hard rock). (2006)
- D 3.1.2.2 Report on prototype test for seismic in-tunnel measurements (2007)
- D 3.1.2.2 Appendices – APPENDIX of: Report on prototype tests for the system specified in D3.1.2.1. (2007)
- D 3.1.2.3 Seismic measurements on site: Report on training site personnel while testing the prototype. (2007)
- D 3.1.3.1 Preliminary report: Specification list concerning ground behaviour control ahead of the TBM advance (2006)
- D 3.1.3.2 Report: Sensing cable design, manufacturing, set-up and test (2006)
- D 3.1.3.3 Report: Sensing cable design, manufacturing, set-up and test (2007)
- D 3.1.3.7 Design and manufacturing of a 3D low diameter sensing cable (< 30mm) (2007)
- D 3.1.5.1 Preliminary report: specification for the tunnel face scanner (hard- and software). (2006)
- D 3.1.5.2 Hardware platform and software development of tunnel face scanner (2007)
- D 3.1.5.3 Report on site tests of the tunnel face scanner (2007)
- D 3.1.6.1 Initial 3D geostatistical block model of logged TBM driving data ready for transfer to UCIP (2007)
- D 3.1.6.2 Prediction of geotechnical conditions ahead of the tunnel face (2008)
- D 3.1.7.1 Report: Specification list for integrated rock and soil characterization methodologies (2006)
- D 3.1.7.2 Intermediate report: A methodology for deep exploration without core extracting using a combination of scanning devices developed for geotechnical assessment or rock properties (2007)

- D 3.1.7.3 Report for an enhanced methodology for deep exploration (2008)
- D 3.2.1.1. Chmelina, K., GEOD. Report on requirements for a mobile mapping system. (2006)
- D 3.2.1.2 Rodríguez, A., Fondeur, G., Ángel, A., AITEMIN Intermediate report: Application of real time scanning Ladar to on-line tunnel shape-displacement monitoring. (2007).
- D 3.2.1.2. Rodríguez, A., Fondeur, G., AITEMIN. SoA Report on shape measuring and 3D imaging technologies. (2007)
- D 3.2.1.4 Forkert, G., Chmelina, K., GEOD. Intermediate report: Development of hard- and software components for a mobile mapping system. (2007).
- D 3.2.1.5 Rodríguez, Á., Palacios, R., AITEMIN. Hard- and software specification for low cost 3D Ladar scanner. (2007).
- D 3.2.1.6 Forkert, G., Chmelina, K., GEOD. Site test of the above-ground mobile mapping system. (2007).
- D 3.2.1.7 Rodríguez, A., Fernández, M., Nabulsi, S., AITEMIN. Low cost 3D Ladar scanner for tunnel shape-deformation monitoring during construction stage. (2008).
- D 3.2.1.8 Rodríguez, A., Espada, F., Nabulsi, S., AITEMIN Low cost 3D Ladar scanner for surface deformation monitoring during construction stage. (2008).
- D 3.2.1.9 Chmelina, K., GEOD. Site test of the underground mobile mapping system. (2008).
- D 3.2.3.1 Chmelina, K., GEOD. Specification of augmented reality visualization of monitoring data. (2007).
- D 3.2.3.2 Chmelina, K., GEOD. Virtual and Augmented reality applications for UCIS-data. (2008).
- D 3.2.4.1 Grossauer, K., TUG-IRMT. Requirement specification to a knowledge based expert system. (2006)
- D 3.2.4.2 Grossauer K., Radoncic, N., TUG-IRMT. Knowledge based library gained from displacement data evaluation. (2007).
- D 3.2.4.3 Grossauer, K., TUG-IRMT, Chmelina K., Maierhofer, A., GEOD. Intermediate report: Prototype of knowledge based library. (2007).
- D 3.2.4.4 Grossauer, K., TUG-IRMT. A method for the application of the knowledge based library to real project data. (2008).
- D 3.3.1.1 Pfeiffer, M., HT, Thewes, M., Kessler D., STUVA. Requirement Specification of Software that Generates TBM Steering Parameters. (2006).
- D 3.3.1.2 Kassel, A., (HK) Analysis of driving behavior and relevant TBM parameters. (2006).
- D 3.3.1.3 Oberste-Ufer, K., RUB-ICE. Demo version of basic steering software. (2008).
- D 3.3.2.1 Heim, A., Herrenknecht AG. Analysis of TBM and ground interaction for steering optimisation. (2007).
- D 3.3.3.1 Kessler, D., STUVA. Specification of an incident management system. (2008).

- D 4.1.1.1 Hontoria, E., GEOCISA, Klaus Chmelina GEOD, Andrade C., IETcc. Preliminary report on data bases for maintenance and service. (2006).
- D 4.1.1.2. Hontoria, E., Iñigo, L., GEOSICA, Estada, J., GLÖTZL, Martínez, I, Rebolledo, N., IETcc. Two new sensors with reduced power consumption, long life and to allow an automated and remote reading (2007).
- D 4.1.1.3 Hontoria, E., Carnicero, G., Paarmann L. I., GEOCISA. Installation of the sensors in a real tunnel project with periodical readings. (2008).
- D 4.1.2.1 Hontoria, E., Marqueta, A., GEOCISA, Glözl, R., GLÖTZL. Mock-up of the database structure for maintenance and service. (2006).
- D 4.1.2.2 Hontoria, E., Paarmann L. I., GEOCISA, Chmelina, K., GEODATA. Specification of communication link between database and monitored tunnel (2007).
- D 4.1.2.3 Hontoria, E., Carnicero, G., Contreras, J., Paarmann L. I., GEOCISA. Demonstration for automated feeding of database and comparison with historical data Stored. (2008).
- D 4.1.2.4 Hontoria, E., J., Paarmann L. I., GEOCISA. Demonstration decisions taken for structural state assessment in an automated way with information gathered from monitoring and historical stored data. (2008).
- D 4.1.3.1. Hontoria, E., GEOCISA. Evaluation for at least two smart sensors for tunnel inspection embedded in structure (2006).
- D 4.1.3.2 Calvo, I., Alonso., J, ACCIONA Infraestructuras, S.A. Specification of parameters needed to assess the required maintenance operations to be performed in each moment. (2006)
- D 4.1.3.3 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS, Leismann, F., STUVA. Prototype for monitoring tunnel situation with minimal interference with operation. (2007).
- D 4.1.3.4 Martin, E., DRAGADOS, Álvarez-Castro, A., ACCIONA, Leismann, F., STUVA. Demonstration of data acquisition with minimal interference and assessment of the tunnel situation. (2007).
- D 4.1.4.1 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS, Leucker, R., STUVA. Design of a real time information communications system. (2007).
- D 4.1.4.2 Kosek, Z., AMBERG, Hontoria, E., Vos, S., GEOCISA, Martínez, I., IETcc. Specification of methods for determining the state of the tunnel lining and surrounding ground. (2007).
- D 4.1.4.3 Martin, E., DRAGADOS, Martinez, I., Rebolledo, N., IETcc, Leismann, F., STUVA, Hohermuth, M., Opplinger, J., AMBERG. Demonstration of non destructive investigation methods in a tunnel lining. (2007).
- D 4.1.5.1 Oppliger, J., Heiniger, T., AMBERG. Specification of mobile collection of data and transmission. (2006).
- D 4.1.5.2 Martín, E., DRAGADOS. Report for development of recording tunnel conditions assessment data. (2006).
- D 4.1.5.3 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS. Demonstrator for mobile fast recording of inspection data. (2006).
- D 4.1.5.4 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS. Prototype for data recording and transmission to control centre for data acquisition device. (2006).

- D 4.2.1.1 Rivas, J.L., SIKA, Mieres, J.M., ACCIONA, Schreyer, J., STUVA. Procedures for maintenance and repair in tunnels with new materials with sample testing and laboratory specimens (2006).
- D 4.2.1.2 Botello, F., ACCIONA, Rivas, J.L., SIKA. New repair technologies, evaluation of feasibility repair system. (2006).
- D 4.2.1.3 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGAGOS, Leucker, R., Leismann, F., STUVA, Larive, C., CETU. Prototype of repair technologies studied for low-permeability concretes and fibre reinforced polymers. (2007)
- D 4.2.1.4 Larive, C., CETU, Álvarez-Castro, A., ACCIONA, Leucker, R., Leismann, F., STUVA, Martin, E., DRAGADOS, Rivas, J.L., SIKA. Demonstration for application tests developed to define the type of material that can be used in each case. (2007).
- D 4.2.1.5 Alvarez-Castro, A., ACCIONA, Rebolledo, N., Andrade, C., IETCC. Training course on new repair technologies developed. (2008).
- D 4.2.2.1 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS, Rivas, J.L., SIKA. Prototype of tools to be used in robotic vehicle for automatic performance of maintenance and service operations. (2006).
- D 4.2.2.2 Larive, C., CETU, Álvarez-Castro, A., ACCIONA, Leucher, R., Leismann, F., STUVA. Preliminary report on the requirements and validation of new equipment for maintenance and repair. (2007).
- D 4.2.2.3 Martin, E., DRAGADOS, Larive, C., CETU, Álvarez-Castro, A., ACCIONA, Leismann, F., STUVA. Feasibility of automation of electrochemical repair methods for dewatering, chloride extraction, realkalinisation & cathodic protection. (2007).
- D 4.2.2.4 Oliver, S., DRAGADOS, Luis Rivas, J., SIKA, Alvarez, A., ACCIONA, Leucker, R., STUVA, Rival, F., CETU. Application of repair prototypes using new service methods. (2008).
- D 4.2.2.5 Martin, E., DRAGADOS, Larive, C., CETU, Álvarez-Castro, A., ACCIONA, Leismann, F., STUVA. Recommendations for minimum disturbance of service methods during regular operation -Rev 1 -. (2008).
- D 4.2.2.5 Martin, E., DRAGADOS, Jiménez, A., SIKA, Leismann, F., STUVA. Recommendations for minimum disturbance of service methods during regular operation -Rev 2 -. (2009).
- D 4.3.1.1 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS, Iñigo Paarmann, L., GEOCISA, López, C., SIKA, Leismann, F., STUVA. Design for a platform for the robotic inspection vehicle, autonomous and with operational procedures. (2007).
- D 4.3.1.2 Martín, E., DRAGADOS, Rivas, J.L., SIKA, Leismann, F., STUVA, Hontoria, E., GEOCISA. Preliminary design of a robotic vehicle (IRIS) to develop simple inspection operations inside tunnels without traffic interference & Feasibility of collecting data from geophysical technologies with a moving vehicle. Inspection operations performed by IRIS assisted by other inspection Devices. (2009).
- D 4.3.1.3 Martín, E., DRAGADOS, Rivas, J.L., SIKA, Hontoria, E., GEOCISA, Leismann, F., STUVA. Feasibility for using the latest technologies in geophysical investigation methods with IRIS. (2007).

- D 4.3.2.1 Muñoz-Cobo Cique, G., DRAGADOS, López, C., SIKA, Leismann, F., STUVA. Report of new service methods and testing for minimal interference with tunnel operations. (2007).
- D 4.3.3.1 Martin, E., DRAGADOS, Rivas, J.L., Jimenez, A., SIKA, Celak, J., KOPEX, Hontoria, E., GEOCISA, Leucker, R., STUVA. IRIS capabilities, tests definitions, possible test places and selection of sites for testing. Execution and results of different tests. Alternative for rail system in the test tunnel. (2009).
- D 4.3.4.2 Martin, E., DRAGADOS, Rivas, J.L., Jimenez, A., SIKA, Celak, J., KOPEX, Leucker, R., STUVA. Final demonstration of IRIS working under real conditions in a Tunnel. (2009).
- D 4.4.1.1 Andrade, C., Martínez, I., IETcc, Hontoria, E., GEOCISA, Oppliger, J., Hohermuth, M., AMBERG. First report for the service life model and calculation procedures to evaluate tunnel conditions. (2006).
- D 4.4.1.2 Leucker, R., STUVA, Choquet, C., Rival, F., Larive, C., CETU, Oppliger, J., Hohermuth, M., Hunt, C., AMBERG. Report for Structural Integrity of Tunnels Frame for an European data base.(2006).
- D 4.4.1.3 Oppliger, J., Janasek, K., AMBERG. Prototype of software for ESITml database. (2007).
- D 4.4.2.1 Schreyer, J., STUVA, Hohermuth, M., AMBERG. Mock up for the operation of the evaluation of tunnel situation, procedures to be implemented and economic ratios for tunnel operation and maintenance. (2006).
- D 4.4.2.2 Leucker, R., Leismann, F., STUVA, Andrade, C., Martinez, I., IETcc, Choquet, C., Larive, C., Rival, F., CETU, Hohermuth, M., Hunt, C., AMBERG. Report for Service Life Cost Model. (2006).
- D 4.4.2.3 Muñoz-Cobo Cique, G., Carrero Novillo, M., DRAGADOS, Martínez, I., Andrade, C., IETcc, Hohermuth, M., AMBERG, Vervuurt, A., Polder, R., Leismann, F., Leucker, R., STUVA. Prototype for Model Concepts for Life Cost Calculations. (2007).
- D 4.4.2.4 Leucker, R., Leismann, F., STUVA. Demonstration of maintenance and service cost ratios. (2007).
- D 4.4.3.1 Hohermuth, M., Shiao, Y., AMBERG, Leucker, R., Leismann, F., STUVA, Robert, V., Larive, C., Rival, F., (CETU). Report on maintenance of tunnels and underground works, procedures and standards in Europe. (2008).
- D 4.4.3.2 Shiao, Y., Winkler, N., AMBERG, Hohermuth, M., AMBERG, Leismann, F., STUVA, Larive, C., Rival, F., CETU. Specification of design, construction and operation parameters concerning their influence on maintenance (2008).
- D 4.4.3.3 Leismann, F., STUVA, Larive, C., Rival, F., CETU, Shiao, Y., Winkler, N., Hohermuth, M., AMBERG. Optimization of maintenance interventions. (2008).