

SIMULATOR FÖR TRÄNING AV ROBOTFÖRARE VID SPRUTBETONGFÖRSTÄRKNING

Förstudie

Börje Westerdahl

Mikael Johansson

Mattias Roupé

Simulator för träning av robotförare vid sprutbetongförstärkning

Förstudie



Börje Westerdahl

Mikael Johansson

Mattias Roupé

Sammandrag

Denna rapport undersöker möjligheten att ta fram en simulatormiljö för utbildning av robotförare vid sprutbetongförstärkning. Sprutbetong ingår så gott som alltid i den primära förstärkningen vid byggande av tunnlar och bergrum och utförs numera nästan alltid med robot. Det finns ingen statligt stödd utbildning för robotförare och all utbildning sker därför internt i de företag som är verksamma med bergförstärkning. Förutom teoretisk kunskap krävs en omfattande praktisk träning för att kunna utföra betongsprutningen på ett korrekt sätt. Idag sker denna träning ofta i produktion under ledning av en mer rutinerad robotförare eller som ren utbildning på en för ändamålet lämplig plats, t ex en tunnel som inte är i bruk. I båda fallen är träningen förenad med stora kostnader.

En övningssimulator som på ett realistiskt sätt kan återge betongsprutning skulle reducera kvalitetsfel, minska riskerna för olycksfall samt reducera kostnaderna för utbildningen avsevärt.

I andra sammanhang, såsom flyg- och körsimulatorer, har sedan många år tillbaks Virtual Reality (VR) används som utbildningshjälpmedel. Denna teknik har tidigare varit förenad med höga kostnader men de senaste årens snabba utveckling inom hårdvara för interaktiv datorgrafik har möjliggjort användning även i områden som är närbesläktad betongsprutning. Redan idag används VR för att öva robotarmsstyrning, bulstättning i tunnlar och styrning av tunnelfräsmaskiner. Även inom området Building Management används VR i utbildningssyfte för att simulera olika situationer som kan uppkomma under ett bygg- eller anläggningsprojekt.

Ett förslag till en tänkbar simuleringsmiljö har utarbetats utifrån den information som studerats inom området för sprutbetongförstärkning av bergrum tillsammans med Visualiseringsstudions erfarenheter inom interaktiv 3D-visualisering. Förslaget är på inget sätt definitivt, men påvisar de realistiska möjligheterna att praktiskt genomföra ett framtida projekt.

Nyckelord: sprutbetong, simulator, utbildning, robot

Abstract

A lot of tunnelling is currently going on and being planned in Sweden, primarily related to the development of rail and road infrastructure in major cities. Design and construction have to adapt to European standards and there is also a new situation as the market for contractors has changed, with an increasing international competition. An increasing market for tunnels and rock caverns means an increasing use of sprayed concrete for rock support and this in turn a need for well educated and skilled operators of spraying equipment. Most concrete spraying is fully mechanized. The operation of the equipment, the “robot”, is a qualified task which can be mastered only after considerable training, including basic knowledge of the requirements for rock support and related health and safety aspects.

The goal of this pilot project has been to investigate the feasibility to develop a simulator for training of operators for spraying concrete in rock tunnels. This should include advanced visualization and simulation tools to create an environment close to the real situation.

Already today Virtual Reality (VR) technologies are used for other training applications, like steering of a robot arm and to control a roof bolter in a tunnel. Also in the area of Construction Management, VR is used for training purposes simulating different situations during a construction project.

The investigation has demonstrated reasonable possibilities to develop necessary tools for a simulator, including steering of the robot arm and the spraying nozzle as well as the spraying process where the concrete adheres to the rough rock surface and builds up the reinforcing layer. Different ways for 3D visualization of the operator’s environment and the result of the spraying process have also been studied. The conclusion is that it seems realistic to proceed with the idea to build a simulator and a proposal for doing this in a stepwise project has been formulated based on this pilot investigation.

Keywords: shotcrete, simulator, training, robot

Förord

Att ge rätt utbildning för robotförare som utför sprutbetongförstärkning är en svår och kostsam uppgift i den verkliga världen. Att utbilda i den virtuella världen var en tanke som Tommy Ellison på BESAB födde och förankrade hos SveBeFo. Lars O Eriksson på Chalmers Tekniska Högskola förmedlade kontakten med Visualiseringsstudion vid Chalmers. Vid vårt första möte med Tommy Ellison, BESAB, Thomas Franzen, SveBeFo och Lars O Eriksson, Chalmers, kände vi att Tommys tanke var rätt.

Förstudien har genomförts av en projektgrupp på Visualiseringsstudion, Chalmers, bestående av Börje Westerdahl, (projektledare), Mikael Johansson och Mattias Roupé,

Vi på Visualiseringsstudion tackar för det ekonomiska stödet från SveBeFo och för förtroendet att få genomföra denna förstudie om möjligheterna att utveckla en simulator för utbildningen. Resultatet redovisas i denna rapport.

Göteborg i maj 2007

Börje Westerdahl

Projektledare

Innehållsförteckning

SAMMANDRAG	I
ABSTRACT	II
FÖRORD	III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	IV
1. INLEDNING	1
1.1. BAKGRUND	1
1.1.1. SYFTE, OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR	2
1.1.2. METOD	2
1.1.3. RAPPORTENS DISPOSITION	3
2. TRÄNING I VIRTUELLA MILJÖER	4
2.1. VIRTUAL REALITY PÅ OLIKA SÄTT	4
2.2. VIRTUELL TRÄNING I NÅGRA NÄRLIGGANDE OMRÅDEN	8
2.2.1. MANÖVRERING AV SPRUTBETONGROBOTARM	8
2.2.2. BULTSÄTTNING I TUNNEL.....	9
2.2.3. TUNNELFRÄSMASKIN	10
2.2.4. LASTTRUCKSIMULATOR	10
2.2.5. TRÄNINGSSIMULATOR HOS VOLVO CARS.....	11
2.3. BUILDING MANAGEMENT SIMULATION CENTER (BMSC)	11
3. VAD HÄNDER VID BERGYTAN?	14
3.1. EXPERIMENTELLT UPPMÄTTA VÄRDEN	14
3.2. EN FÖR VISUALISERING BERÄKNINGSTUNG LÖSNING	14
4. VILKA TYPER AV ROBOTAR OCH ROBOTARMAR FINNS?	17
4.1. SIKA	17
4.2. MEYCO EQUIPMENT	18
4.3. AMV ANDERSEN MEKANISKA VERKSTAD	25
4.4. NORMET	25
4.5. KLASSIFICERING AV ROBOTARMAR	26
5. HUR KAN MAN ÖVERFÖRA DEN JOYSTICKFÖRSEDDA FJÄRRKONTROLLENS SIGNALER TILL SIMULERINGEN?	27
6. EN FÖRESLAGEN SIMULERINGSMILJÖ	28
6.1. LÄMPLIG BERÄKNINGSMODELL	28
6.2. BERÄKNING SAMT VISUALISERING AV RESULTATET.....	29
6.3. VISUALISERING AV BETONGSTRÅLEN	33
6.4. VISUALISERING AV ROBOTARMEN.....	34

6.5. TRÄNINGSSIMULATOR.....	35
6.5.1. ENKEL TRÄNINGSSIMULATOR	36
6.5.2. AVANCERAD TRÄNINGSSIMULATOR	36
6.5.3. FÖRESLAGEN UTBILDNING	36
<u>7. SAMMANFATTNING</u>	<u>38</u>
<u>8. REFERENSER.....</u>	<u>40</u>
8.1. LITTERATUR.....	40
8.2. ELEKTRONISKA KÄLLOR.....	40
8.3. MUNTliga KÄLLOR.....	40

1. Inledning

Förstudien till projektet simulator för träning av robotförare för sprutbetongförstärkning har som mål att utreda förutsättningarna för att bygga en träningsmiljö i en virtuell värld helt skapad i en dator.

I detta kapitel presenteras först de motiv som ligger bakom förstudien och därefter studiens syfte och avgränsningar. I det avslutande avsnittet ges en beskrivning av rapportens upplägg.

1.1. Bakgrund

Sprutbetong ingår så gott som alltid i den primära förstärkningen vid byggande av tunnlar och berggrum. Betongsprutning utförs numera nästan alltid med robot. Robotföraren har till uppgift att utföra förstärkningen enligt föreskrifter med viss tjocklek och ofta i kombination med bergbultar som skall sprutas in på ett korrekt sätt. Vid betongsprutning skall sprutmunstycket hållas på ett konstant avstånd och helst vinkelrät mot bergytan, något som är en svår uppgift på grund av den sprängda bergytans oregelbundna form.

Det finns ingen statligt stödd utbildning för robotförare. All utbildning sker därför internt i de företag som är verksamma med bergförstärkning. Det är framförallt gruvorna och några företag i bygg- & anläggningsbranschen som arbetar med detta. Det pågår en omfattande utbyggnad av infrastrukturen i form av vägar och järnvägar. En allt större del av dessa kommer av miljöskäl och trafikekonomiska orsaker att förläggas i tunnlar. Slutförvaring av kärnbränsle skall göras i berggrum på cirka 500 m djup. Provanläggning skall byggas inom de närmaste åren, men huvuddelen av dessa berggrum kommer att byggas kring 2014-2020. Utbyggnad av kraftproduktion i form av vattenkraft och kärnkraft har varit låg under några decennier, men röster höjs nu för att åter satsa på dessa energislag, som i så fall kommer att ske till stor del under jord. Efterfrågan på metaller innebär en kraftig expansion för gruvnäringen, och utvinning på allt större djup.

Vid all byggnad av tunnlar och berggrum används sprutbetong som en viktig del av förstärkningen. Vägverket och Banverket skall investera 350 000 miljoner varav kanske 50 000 miljoner kronor i tunnlar under de närmaste 15 åren. Sprutbetongens andel av den totala investeringen i bergtunnlar ligger omkring 5-8 % av den totala kostnaden. Den totala sprutbetongvolymen skulle då bli 150-250 miljoner kronor per år. Till detta kommer SKB med kanske 50 miljoner per år från 2014. Gruvornas behov är troligen minst lika stort som anläggningssektorns.

Kostnaden för utbyggnaden av infrastrukturen är direkt avgörande för i vilken takt de nya trafiklederna kan färdigställas. Kostnadsökningar i pågående projekt innebär senarelagda byggstartar för nya projekt. Därför är det viktigt att hålla kontroll över kostnaderna. Ett ökat tryck i branschen ställer ökade krav på utbildning av personal. För SKB är det av yttersta vikt att kunna verifiera varje del av förstärkningen för att kunna garantera säkerheten i framtida kärnavfallslager. Gruvnäringen måste optimera förstärkningen för att behålla sin konkurrenskraft.

Sprutbetong är en teknik med starka svenska traditioner. Genom ökad internationalisering har utländska entreprenörer slagit sig in på den svenska marknaden och anpassar sig snabbt till svenska kvalitetskrav. Med våra höga arbetskostnader blir det allt svårare att konkurrera med priset som enda utslagsgivande faktor. I ljuset av detta finns ett behov av att åter ta ett steg för att förbättra företagets kunnande inom sprutbetongområdet. Ett viktigt led i detta är att erbjuda personal med bättre utbildning, vilket leder till högre kvalitet och bättre materialekonomi. Utbildning av robotförare är en trång sektor och behovet av välutbildad arbetskraft kommer att öka under de närmaste åren. För att kunna möta detta behov måste insatser för att öka yrkets status och förbättra rekryteringsbasen genomföras. Själva träningsmomentet är mycket kostsamt på grund av de höga materialkostnaderna. Utbildning måste av praktiska skäl ofta genomföras i projekt och resultatet av detta blir ofta byggfel som är dyra att åtgärda.

Det utvecklas nu robotar för betongsprutning med laserscanning som hjälpmedel för att säkerställa att sprutbetongen produceras på ett tekniskt riktigt sätt och som ger avsevärt bättre arbetsmiljö för

robotföraren. Dessa utrustningar kommer inte att kunna utföra alla typer av betongsprutning, särskilt när geometrin är svår som vid insprutning av dräner eller täcksprutning på bultar. På bergytor där automatiken inte klarar att göra ett fullgott jobb, måste robotföraren göra kompletteringar med manuell styrning av sprutmunstycket. Scanningteknik skall ses som ett hjälpmedel som förbättrar arbetsmiljön för personalen, men för att tekniken ska kunna användas effektivt blir behovet av välutbildad personal snarare större än tidigare.

Utbildningen bör vara indelad i en teoretisk del som omfattar orientering om bergmekanik, arbets säkerhet, hälsa och miljöaspekter samt viss maskinkunskap. Därutöver krävs en omfattande praktisk träning för att kunna utföra betongsprutningen på ett korrekt sätt. Denna träning genomförs ofta i produktion under ledning av en mer rutinerad robotförare. Den kan också göras som en ren utbildning på en för ändamålet lämplig plats, t ex en tunnel som inte är i bruk. I båda fallen är träningen förenad med stora kostnader. I det första fallet orsakas en mängd kvalitetsfel som måste korrigeras genom ytterligare sprutning eller i värsta fall borttagning av överflödig betong. I andra fallet utförs en mängd arbete utan ersättning. Maskinresurser och betong som används kostar stora belopp. Dessutom är det inte så lätt att finna lämplig plats för sådan träning, och om en plats finns så måste nödvändiga installationer förberedas.

Eftersom det krävs långvarig träning i olika situationer innan en robotförare kan anses vara tillräckligt välutbildad, så blir utbildningen mycket dyr för de företag som behöver arbetskraften. Kostnader på flera hundra tusen kronor upp till en miljon kronor är inget ovanligt. Ett sätt att effektivisera utbildningen av robotförare skulle kunna vara att utbilda i en simulerad miljö som skapas av en dator. En simulator kan beskrivas som en datorstödd övningsutrustning. Den som använder simulatorn hanterar reglage med verkliga funktioner, men resultatet visas genom animering eller annan teknik. Felaktiga manövrer får då inte några konsekvenser för någon annan än den som övar och leder inte till några kostnader för korrigerande sprutning. Simulatorteknik används i andra sammanhang som t ex flygutbildning – vem skulle vilja åka med en pilot som övar för första gången. Även läkare använder numera simulatorverktyg för att öva upp färdigheten på t ex tithålskirurgi.

För att underlätta utbildning av robotförare behövs en övningssimulator som på ett realistiskt sätt kan återge betongsprutning. Detta skulle reducera kvalitetsfel och minska riskerna för olycksfall samt reducera kostnaderna för utbildningen avsevärt. Med simulatorverktyg skulle yrkesstatusen höjas och rekrytering underlättas. Kostnaderna för personalförsörjning skulle på sikt sänkas och därmed även kostnaden för byggande av de statsfinansierade tunnlarna. Gruvorna skulle kunna öka sin konkurrenskraft. På så sätt skulle satsningen på att utveckla simulatorverktyget ge återbetalning till staten på satsade medel.

1.1.1. Syfte, omfattning och avgränsningar

Förstudiens syfte är att kartlägga förutsättningarna för att bygga en simulator för utbildning av robotförare för sprutbetongförstärkning.

Kartläggningen omfattar vad som styr kvalitén på sprutresultatet framme vid bergytan och vilken typ av utrustningar för robotutförd sprutbetongförstärkning som nu finns på marknaden. En avgränsning som gjorts för förstudien är att inga egna experiment skulle göras för att ta fram egna kriterier för vad som styr det färdiga sprutresultatet. Kriterierna har därför hämtats från litteratur.

Kartläggningen omfattar också en analys av olika visualiseringsmöjligheter som finns tillgängliga i dag och lämpligheten att använda dessa för olika moment i en utbildningssimulator. Inga praktiska prov har genomförts utan informationen är hämtad från litteratur och tidigare visualiserings erfarenheter.

1.1.2. Metod

Insamling av material har främst skett via Internet, sökning i Chalmers Biblioteks databaser och kontakter med företag som är verksamma i området.

1.1.3. Rapportens disposition

I nästa kapitel, kapitel 2, redovisas exempel på tainingsmiljöer i virtual reality som i dag används. Exempelen är tagna från miljöer som liknar den som förstudien hanterar.

I kapitel 3 beskrivs den kunskap vi i dagsläget har om hur betongstrålen beter sig framme vid bergytan. Vilka parametrar är viktiga för kvalitén av utfört arbete, för ekonomin etc.

I kapitel 4 och 5 redogörs för den utrustning som nu finns tillgänglig på marknaden i form av robotar, olika typer av robotarmar och hur fjärrkontrollens signaler kan överföras till simuleringen.

Kapitel 6 redovisar ett förslag till hur en simuleringsmiljö kan byggas upp.

Kapitel 7 sammanfattar förstudiens resultat och viktigaste slutsatser.

Slutligen i kapitel 8 redovisas de referenser som använts i rapporten.

2. Träning i virtuella miljöer

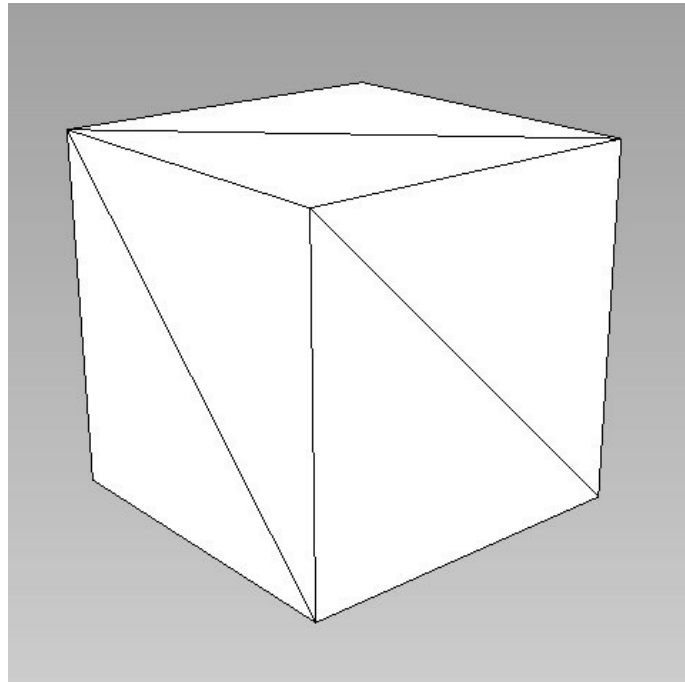
Det finns en omfattande erfarenhet av träning i virtuella miljöer. En sökning i Google med sökorden Training Virtual Reality gav 13 400 000 träffar. Nedan följer först en definition av Virtual reality, därefter en kort presentation av olika sätt att uppleva den och en beskrivning av hur virtuell träning används i några närliggande områden. Kapitlet avslutas med en presentation av en ny företeelse som kallas Building Management Simulation Center.

2.1. Virtual reality på olika sätt

Med begreppet Virtual Reality (VR) menas möjligheten att interaktivt röra sig i en värld representerad av en digital tredimensionell geometrisk modell. Till skillnad från animering eller film kan användaren själv förflytta sig var som helst inom denna virtuella värld. Själva interaktiviteten uppnås genom att bilden som representerar världen från en viss punkt (där betraktaren är placerad) uppdateras 20 till 60 gånger per sekund. De senaste årens snabba utveckling inom hårdvara för interaktiv datorgrafik har givit tekniken möjlighet att i allt högre grad kunna presentera realistiska och detaljerade virtuella världar. Virtual reality är alltså som vi definierar det en datorgenererad miljö som gör att användaren i bästa fall upplever att den är i en verklig värld.

Modellen

3D-modellen byggs upp av polygoner (trianglar) som bildar ytor och 3D-objekt. T.ex. en kub byggs upp av två trianglar på varje sida, dvs. 12 trianglar totalt. Upp till en viss nivå har datorn (grafikkortet) inga problem att hantera antalet polygoner, men därefter sjunker prestandan avsevärt. Man bör därför sträva efter att använda så få polygoner som möjligt vid uppbyggandet av en VR-modell.



Figur 1. 3D-modellens uppbyggnad av polygoner (trianglar) (Källa: Visualiseringsstudio Chalmers).

När modellen är uppbyggd importeras den i en applikation för realtidsvisualisering. Under simuleringen kan betraktaren hela tiden röra sig i modellen. Man kan se det som om man flyttar runt

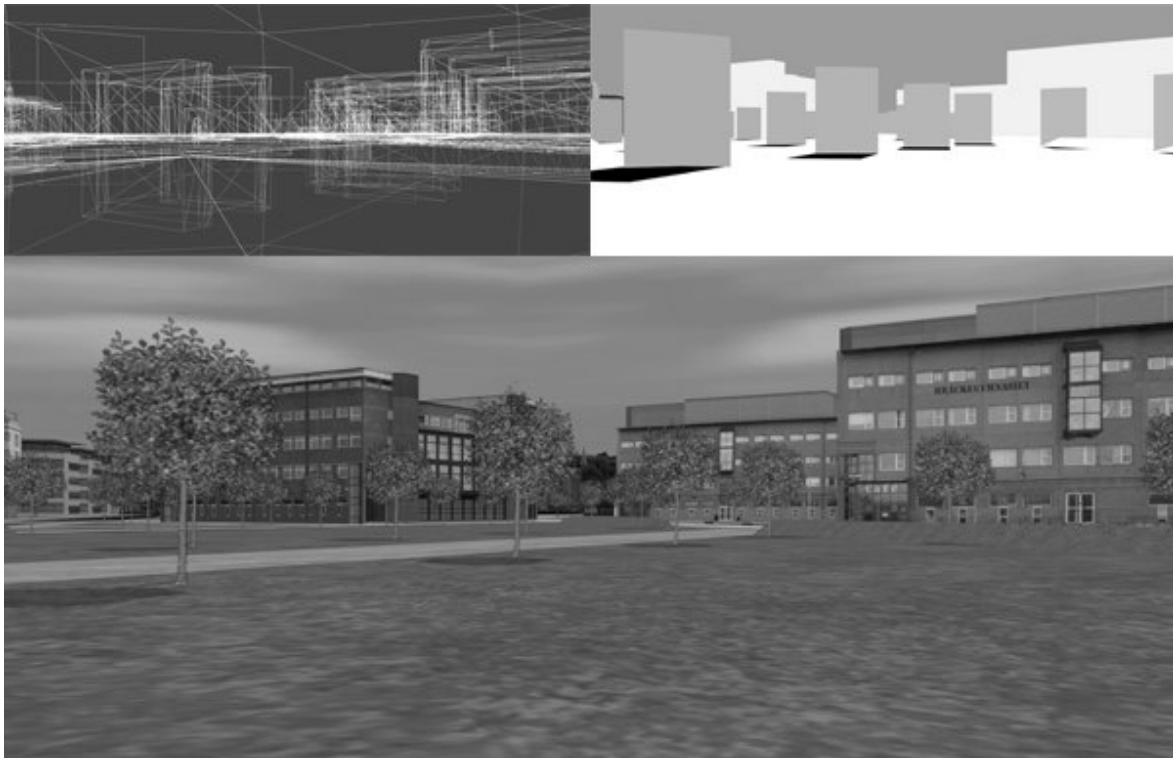
en kamera i modellen, där datorn hela tiden genererar (renderar) en bild av det kameran ser. Rent prestandamässigt genererar datorn minst 20 bilder i sekunden.

Det är just denna snabba bilduppdatering som är specifikt för VR och gör det möjligt att röra sig i modellen.

För att klara bilduppdateringen måste datorn ha ett grafikkort som ritar upp den virtuella världen på bildskärmen. Det är därför viktigt att datorn har ett bra grafikkort för denna typ av applikationer. Kraven på grafikkortets prestanda är beroende på hur mycket data som skall visas och bearbetas.

För att få den snabba bilduppdatering som krävs måste man göra avkall på vissa beräkningsintensiva funktioner, i det här fallet ljusberäkning. Materialmodeller och ljusberäkningsalgoritmer är förenklade, vilket gör att man inte uppnår full realism.

För att hålla nere antalet polygoner och öka realismen används ofta texturer. Texturer är bilder som "limmas" på en yta. Skall man t.ex. ha en tegelfasad på ett hus, applicerar man en bild av en tegelfasad på de aktuella ytorna. Genom att använda sig av texturer kan man öka prestandan på en modell avsevärt. I bildsekvensen nedan visas ett exempel på hur man jobbar med texturer för att få en realistisk modell trots ett lågt antal polygoner. Första bilden visar en trådmodell av den rena geometriska datan, polygonerna. Andra bilden visar polygonerna när de är "fyllda". Den tredje bilden visar hur det ser ut när man har applicerat texturer på ytorna.

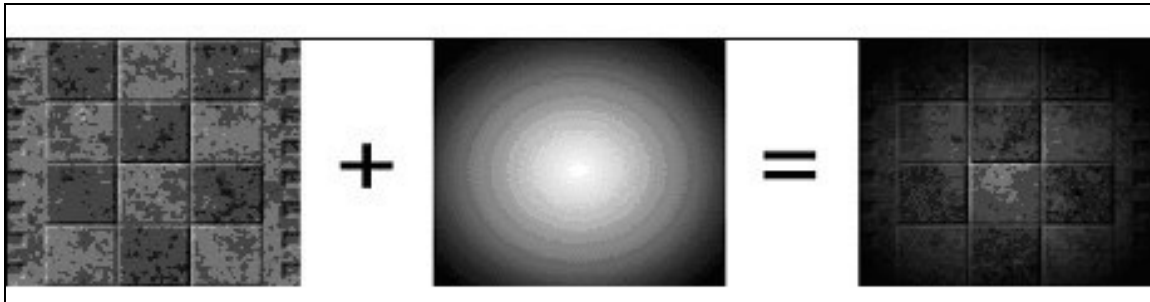


Figur 2. Trådmodell (överst till vänster), ytor (överst till höger) och texturer applicerad på ytor (nederst) (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Vissa programvaror gör det möjligt att applicera flera texturer på en och samma yta och används när man arbetar med så kallade lightmaps. Tekniken går ut på att man på förhand gör en ljusberäkning på hela modellen och sparar ljussättningen för varje yta i texturer. Dessa texturer adderas sedan till

de befintliga texturerna. Detta fungerar bara då ljuskällan är statisk och då modellen är uppbyggd av objekt med diffusa (matta) material.

Diffusa material reflekterar ljuset mer eller mindre oberoende av betraktarens position, vilket gör att man kan förberäkna detta. Resultatet blir att man får en skuggad modell med mer "liv" i ytorna trots ett lågt antal polygoner.



Figur 3. Skuggning med hjälp av lightmaps ger "liv" i ytor (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Den virtuella världen renderas, genereras, i datorn. Renderingen involverar processen att kalkylera scenen som skall visas (på en plan yta) för en virtuell kamera vy från en specifik punkt med en specifik orientering och med en specifik vinkel på synfältet så kallad Field of View (FOV). Tidigare har den centrala process enheten CPU:n använts för att rendera bilderna. Nu används också grafik processenheten GPU för att rendera den virtuella världen till en visningsskärm. Det tidigare sättet kallas software rendering och det senare hardware rendering. Hardware rendering är vanligtvis mycket snabbare än software rendering.

Visningsätt

De virtuella miljöerna kan upplevas med en PC bildskärm så kallad desktop VR eller med omslutande VR.

Desktop VR

Vid desktop VR används normalt en dator skärm som visningsmedium.



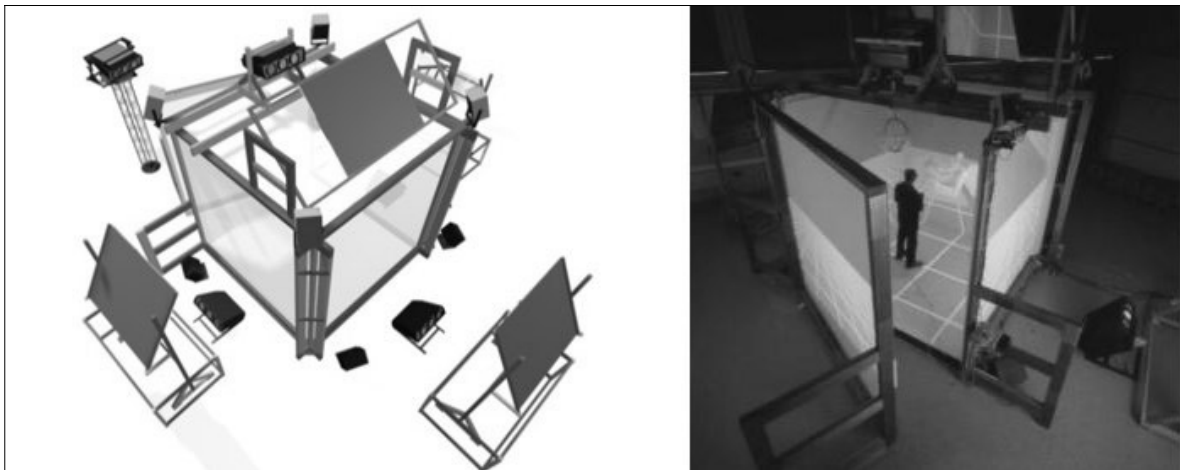
Figur 4. VR på PC bildskärm (Källa: <http://www.faw.unilinz.ac.at/save/hardware/fishtank.html> 2002-12-19).

Användaren ser på den virtuella miljön på datorskärmen. Nöjer man sig inte med bara 3D utan också vill se i stereo, dvs djupseende, så krävs tillbehör. I Visualiseringsstudion använder vi aktiv stereo när modellerna visas på en Powerwall. 3D-stereoeffekten fås genom att datorn hela tiden, om vartannat räknar fram två olika bilder, en för höger öga och en för vänster öga. Dessa två bilder är gradvis horisontellt separerade. Genom att använda sig av 3D-glasögon filtreras dessa bilder. Glasögonen har flytande kristaller i glaset, så att när "vänsterbilden" visas sluts glaset för höger öga och tvärtom. Datorn synkroniserar detta med hjälp av en IR-sändare som styr glasögonen. Med andra ord så ser vi bara bilden med ett öga åt gången, men det sker så snabbt att vi istället upplever en 3D-stereo känsla av det vi ser. En billigare lösning här är att använda glasögon med olika färg på vänster respektive höger öga. Visualiseringsprogrammet måste då också kunna producera färgseparerade bilder. Nu har också börjat säljas TV apparater som kan visa bilden i stereo utan att glasögon behöver användas.

Omslutande VR

Vid omslutande eller immersive VR skall användaren uppleva sig som omsluten av den virtuella miljön. Denna effekt kan erhållas på två sätt. Det ena är genom att använda ett multi bildskärms system och det andra genom VR glasögon/hjälm eller en så kallade Head Mounted Display.

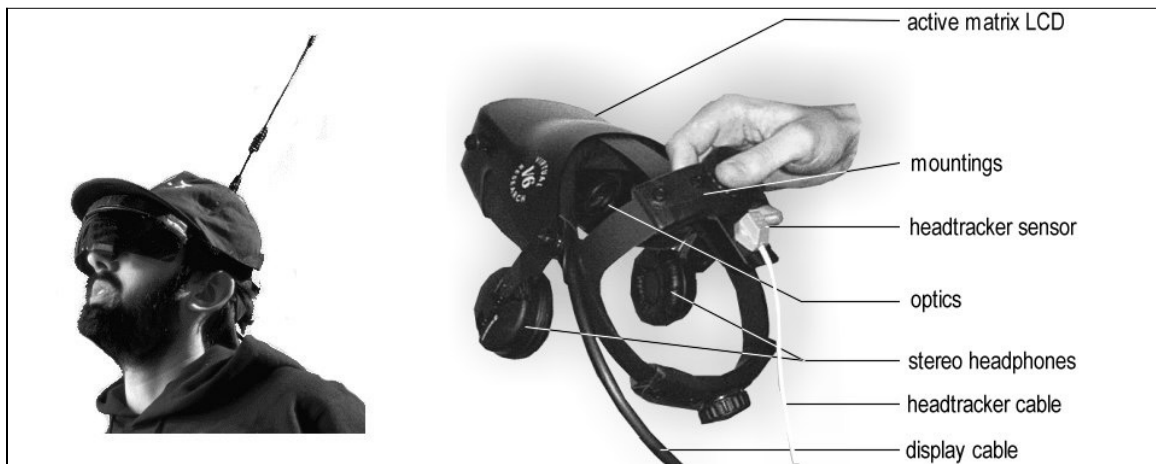
Med det multipla bildskärmssystemet ökar man synfältet (FoV) genom att använda flera bildskärmar. När man använder projektorer kan bilden projiceras framifrån eller bakifrån. Många simulatorer använder tre skärmar (framifrån, vänster vy, höger vy) för att öka synfältet (FoV). Den uppsättning där användaren är omgiven av skärmar brukar kallas cave eller kub.



Figur 5. Omslutande VR – Cave (Källa: Medialab Chalmers)

Bilderna kan också projiceras på en kupol som kan variera i form och storlek. Med flera projektorer i kupolen kan användaren titta sig omkring precis som i den verkliga världen.

En VR hjälm eller Head Mounted Display (HMD) består av två miniatyrbildskärmar som är monterade framför användarens ögon med hjälp av någon form av hjälm eller glasögon. Speciell optik gör det möjligt för användaren att se miniatyrskärmarna.



Figur 6. Omslutande VR - VR glasögon (Källa: <http://www.faw.unilinz.ac.at/save/hardware/hmd.html> 2002-12-19).

VR hjälmarna är normalt utrustade med en utrustning som bestämmer användarens huvudposition så kalla Head Tracker. När användaren tittar sig omkring sänds information till datorn om huvudets position och orientering.

Objekt i den virtuella världen kan manipuleras med hjälp av t ex en datahandske. En datahandske mäter hur användarens finger böjs. Användaren kan greppa ett virtuellt objekt och placera det på en annan plats. Användaren kan också kasta objektet. Om datahandsken är av typen force-feedback så kan användaren deformera det virtuella objektet och känna att objektet ger ett motstånd till deformationen.

Det är också möjligt för olika användare att dela samma virtuella värld. Detta görs normalt genom att koppla ihop datorerna i ett nätverk. Varje användares dator sänder användarens position och orientering. De olika användarna kan se representationer av varje användare i den virtuella världen så kallade avatars. Man kan interagera med varandra, arbeta tillsammans eller konkurrera.

Det ovan nämnda har till största del handlat om hur vi visualiserar. Vi kan förbättra upplevelsen genom ökad detaljnivå, bättre skuggor, rörliga föremål i modellen som människor, bilar etc. Varje sådan förbättring gör oftast modellen tyngre för datorn att hantera. Till slut hinner inte datorn producera tillräckligt med bilder per sekund för att upplevelsen skall bli realistisk. Bildvisningen blir hackig och man kan uppleva visningen som obehaglig man kan t o m drabbas av illamående. Ett effektivare sätt att höja upplevelsen av att verkligen vara i den virtuella världen kan då vara att använda andra sinnen än synen. I dag används tex. hörseln med fördel. Har man bilar som åker i modellen så kan man höra när en bil närmar sig den position man står och man kan höra när den avlägsnar sig. Framtida system som skall upplevas realistiska kommer troligen att kunna förmedla saker som lukt, smak etc.

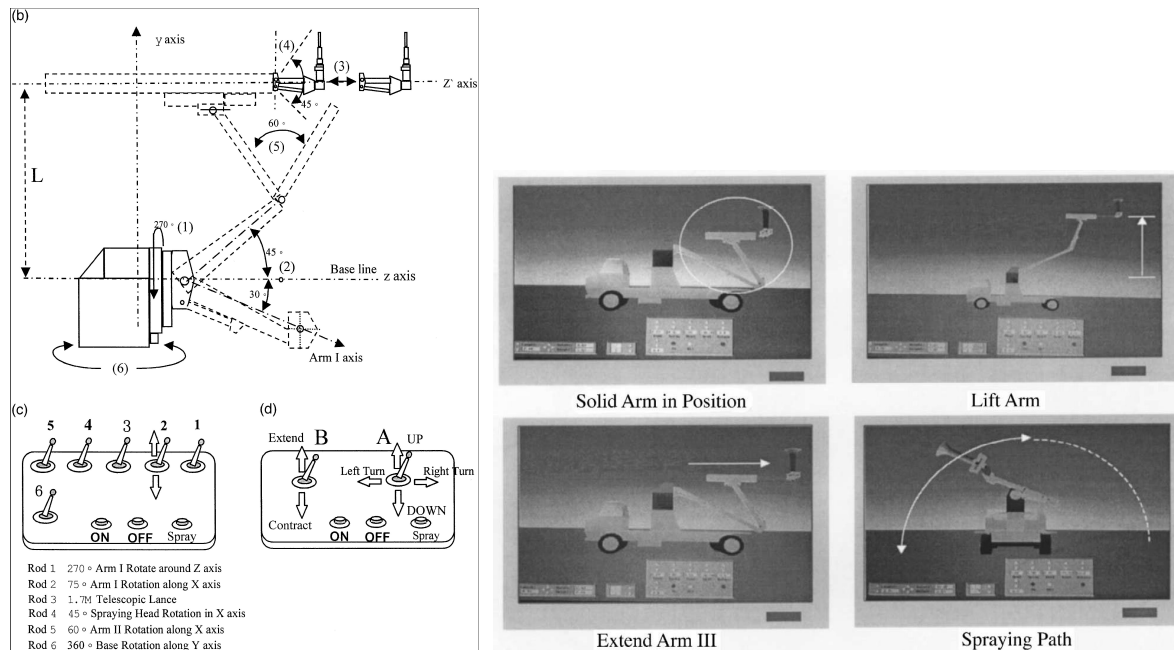
2.2. Virtuellt träning i några närliggande områden

Exempel på närliggande arbeten som man har utvecklat simulatorer för är manövrering av sprutbetongrobotarm, bultsättning i tunnel, tunnelfräsmaskin och lasttruck. Ett exempel ges också med erfarenheter från en träningssimulator på Volvo Cars.

2.2.1. Manövrering av sprutbetongrobotarm

I (Cheng et al., 2001) beskrivs hur man använder realtidsvisualisering för att förbättra robotarm och manöverutrustning. Man använde en robotarm som hade sex frihetsgrader. Ursprungligen hade man en manöverutrustning som hade sex joysticks. Utvecklingsarbetet resulterade i en manöverutrustning som bara hade två joysticks. Utprovnigen av utrustningen gjordes på en grafisk modell av roboten. I rapporten görs också en beskrivning av hur man utvecklade roboten från att vara semiautomatisk till att vara helt automatisk. Detta gjordes genom att man utvecklade

instrument som mätte den utsprängda ytan och en simuleringsmodell som kalkylerade sprutmunstyckets bana. Den automatiska sprutbetongroboten fick man sedan genom att integrera den grafiska modellen med robotens kontrollsystem.



Figur 7. Robotarm med sex frihetsgrader, manöverutrustning före och efter utveckling samt grafisk modell (Källa: Cheng et al., 2001)

Man konstaterar att realtidmodellen visade sig vara mycket användbar för utvecklingen av robotarmen och för utbildning. Genom simuleringen kunde operatören testa och manipulera roboten för olika arbetsplats förhållanden.

2.2.2. Bultsättning i tunnel

Simulatorn för bultsättning i tunnlar beskrivs i 5DT Fifth Dimension Technologies, Proofbolter. Simulatorn använder samma kontrollpaneler som den utrustningen som används i verkligheten. Detta är något som också gäller för vår tänkta simulator för robotförare för sprutbetong. Vi har möjlighet i vår simulator att arbeta med exakt den fjärrstyrutrustning som används av robotföraren i verkligheten.

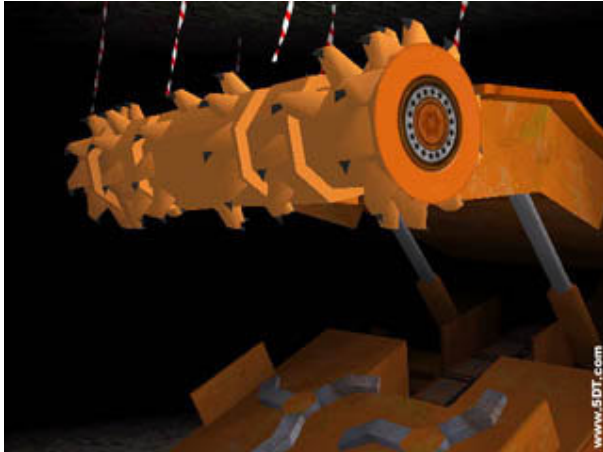


Figur 8. Simulator för bultsättning (Källa 5DT Fifth Dimension Technologies).

Bultsättningsmaskinerna sägs användas runt om i världen och har utbildat tusentals i hanteringen av maskinen. Man hänvisar till den realistiska upplevelsen som gör det lätt att gå från simulatoren till verklig arbetsplats.

2.2.3. Tunnefräsmaskin

En simulator för en tunnelfräsmaskin visas i 5DT Fifth Dimension Technologies, Pvrcoal. Tunnefrässimulatoren tränar operatören att kontrollera maskinen så att man kan öka produktiviteten samtidigt som man vidmakthåller en hög säkerhetsstandard. Tunnefräsens arbetsmiljö är tex i en virtuell kolgruva och använder kontrollreglage som är i utseende mycket lika den verkliga maskinen.



Figur 9. Tunnefrässimulator (Källa 5DT Fifth Dimension Technologies).

Operatören tränas för sitt arbete genom ett antal träningsscenarier med olika komplexitets och svårighetsgrader. Efter varje träningsstillfälle får eleven en komplett träningsrapport.

2.2.4. Lasttrucksimulator

En LastTrucksimulatoer beskrivs i 5DT Fifth Dimension Technologies, Phaultruck. Last truck simulatoren består av mock-up kabin som är monterad på stativ som kan röra sig. Kabinen omges av tre skärmar vilket ger eleven ett brett synfält närmare 180 grader. Eleven får samma utblick som i en verklig maskin. Kabinen är utrustad med reglage som liknar den verkliga maskinen.



Figur 10. Lasttrucksimulator med rörlig förarkabin (Källa 5DT Fifth Dimension Technologies).

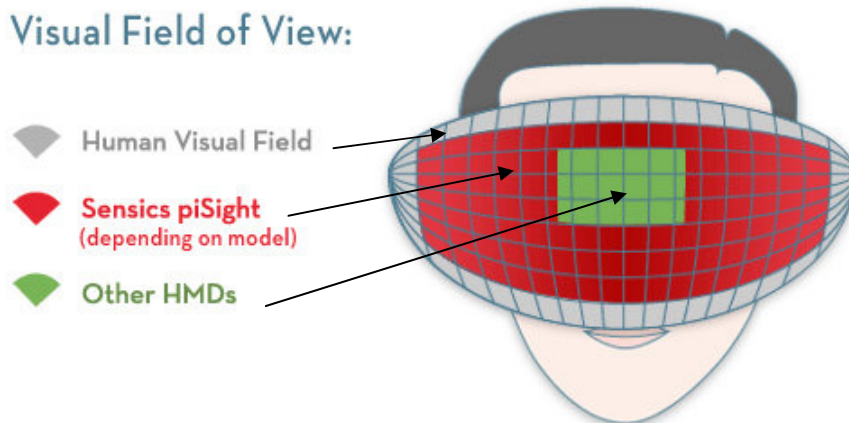
Trucken körs i en virtuell modell som är, säger man, mycket fotorealistic. Man kan också simulera tillfällen med nedsatt sikt t ex damm eller dimma. Känslan förhöjs ytterligare genom att sätet som

eleven sitter på rör sig för att simulera truckens rörelser och att man använder ljud som låter som den riktiga trucken.

2.2.5. Träningssimulator hos Volvo Cars

Volvo Cars gjorde kring 2001 en utvärdering av hur man skulle kunna utbilda sina montörer i VR, Virtual Reality. I utvärdering testade man olika slags utrustning så som VR-hjälm och verktyg som montören kunde använda i den virtuella världen.

Slutsatsen av undersökningen var att utrustningen var mycket speciell, för dyr och klumpig för att användas av så många. Utrustningen var i vissa fall inte tillräckligt färdigutvecklad och man ansåg att känslan att arbeta med verktygen som användes vid monteringen inte kunde överföras på ett realistiskt sätt. VR-hjälmen på den tiden hade inte tillräckligt stort synfält vilket gav en känsla av tunnelseende. I figur nedan visas en jämförelse av synfält mellan, en människas naturliga synfält, en nyutvecklad VR-hjälm och äldre VR-hjälmarna. VR-hjälmarnas synfält börjar närma sig människans naturliga men ännu är de nyare hjälmarna dyra. Sensics piSight som visas nedan kostar (april, 2007) ca 2 700 000 SEK för glasögon med FoV 177°, 640 000 SEK för FoV 134° och 250 000 SEK för FoV 88°. Troligen kommer dessa pris att sjunka relativt snabbt.



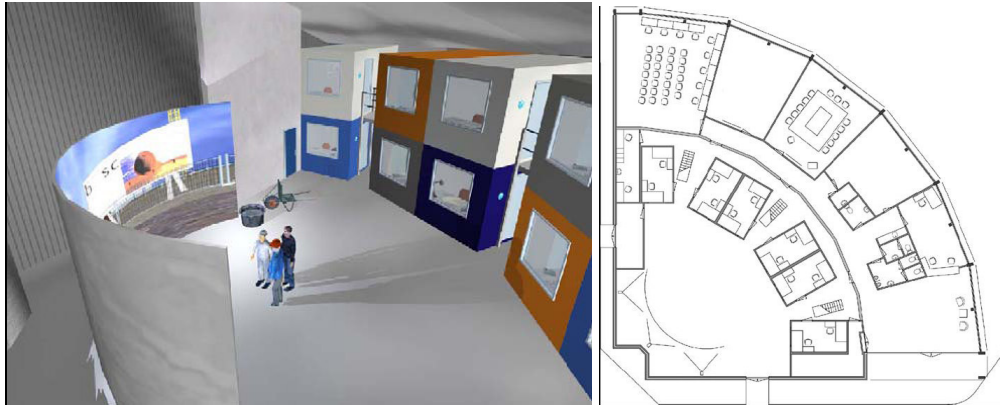
Figur 11. Figuren visar VR-hjälmens utveckling de senaste åren. I bilden visar "Other HMDs" synfältet på de gamla VR-hjälmarna (Källa: Sensics piSight).

Volvo har därför gått vidare med en lösning som bygger på att de använder en vanlig dator med monitor som står nere i fabriken bredvid monteringsbandets olika stationer. Montören kan därigenom gå och titta och lära sig nya eller repetera monteringsuppgifter. Tillgängligheten och enkelheten var orsaken till att de valde denna lösning. Vinsten av att använda en avancerad träningssimulator föll på att man inte kunde överföra monteringsverktygen på ett realistiskt sätt och tillgängligheten till utrustningen.

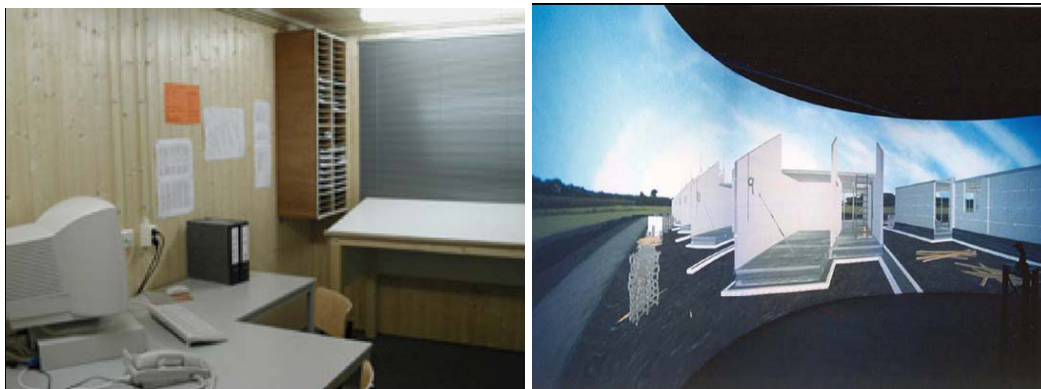
2.3. Building Management Simulation Center (BMSC)

Om man i en grupp av simulatorer samlar en mängd olika byggaktiviteter på ett ställe så har man skapat ett Building Management Simulation Center. Detta är inte en vanlig företeelse. Det första centret i världen finns i Eindhoven, Nederländerna.

I (de Vries et al., 2004) finns en beskrivning över detta center för management inom byggandet. Målet för centrat är att ha maximal kontroll över träningsförhållandena och att samla så mycket data som möjligt om den som tränar under själva träningen.



Figur 12. Simulerings hall (Källa: de Vries et al., 2004).



Figur 13. Elevens platskontor och visualiserings-skärmen som visar arbetsplatsen som man kan vandra runt i (Källa: de Vries et al., 2004).



Figur 14. Skådespelare agerar tillsammans med den virtuella miljön, avbryter eleven, ställer frågor och i kontrollrummet övervakas elevens agerande (Källa: de Vries et al., 2004).

Efter kursen säger de som övat att realismen i träningen har varit överväldigande och att träningen är väldigt intensiv. I simulatören kombineras skådespelare, ljud effekter och virtuella miljöer för att lära arbetsledare sitt yrke. Elevens agerande övervakas i ett kontrollrum. Simulatören utforskar konsekvenserna av beslut och låter eleven se vad som händer när de gör misstag. Jämfört med tex en flygsimulator som handlar om samspel mellan människa och maskin så handlar BMSC istället om mänskliga processer i arbetsledning.

En liten känsla för hur simulatören upplevs kan fås från uttalandet från en elev.

I had only been a site manager for 10 minutes and I was panicking. First, I had to phone a subcontractor to ask when bricklaying would start. They didn't know. Then my carpenter came into

the office to say he wouldn't work with the foreman any more. Then my boss was on the phone to say the health inspectors were on their way, the site was in a mess and if I didn't sort it out, my job would be on the line.

Nu planeras ytterligare ett liknade träningcentrum, det andra i världen, i Coventry University Technology Park, Cheylesmore, England. Centret planeras att vara klart hösten 2008.

Träningshallen kommer även här att utrustas med en biografliknande böjd skärm på vilken man skall kunna visualisera byggarbetsplatser i olika stadier.

3. Vad händer vid bergytan?

Kapitlet inleds med experimentellt uppmätta värden om vad som händer med den sprutade betongen när den träffar bergytan. I detta kapitel redovisas också en beräkningstung metod för att teoretiskt simulera hur sprutbetong uppför sig.

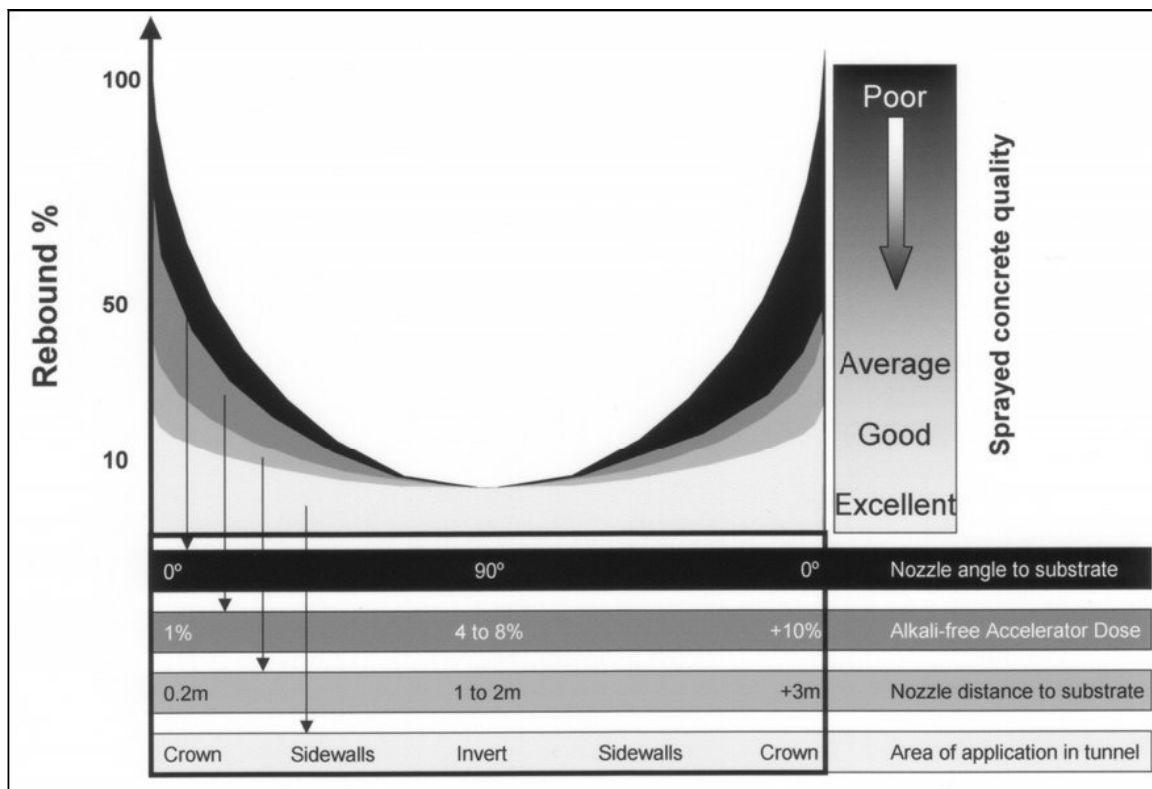
3.1. Experimentellt uppmätta värden

I (Melbye, 2001) konstateras att huvudorsaken till dålig sprutbetongkvalitet och ökade förstärkningskostnader är återslaget eller spillet av betong.

Mängden återslag delar man upp i fyra huvudfaktorer. Faktorerna är:

- Sprutmunstyckets vinkel mot ytan
- Sprutmunstyckets avstånd till ytan
- Mängden acceleratortillsats
- Riktningen på yta som förstärks (vägg, tak etc)

I figur nedan sammanfattas påverkan av de fyra faktorerna.



Figur 15. De fyra huvudfaktorernas påverkan på återslag (Källa: Melbye, 2001)

Munstycksvinklar mindre än 70° orsakar stora återslagvärden och dåligt kompakterad betong. Detta leder oundvikligen till lägre hållfasthet och dålig beständighet på betongen. Avståndet till sprutyta bör vara 1 – 2 meter. Man säger att om sprutmunstycket är för nära sprutyta kommer betongstrålen att slita loss delar av den redan sprutade betongen. Om sprutmunstycket är för långt från sprutyta resulterar det i mycket återslag, dålig kompaktering av betongen och låg hållfasthet.

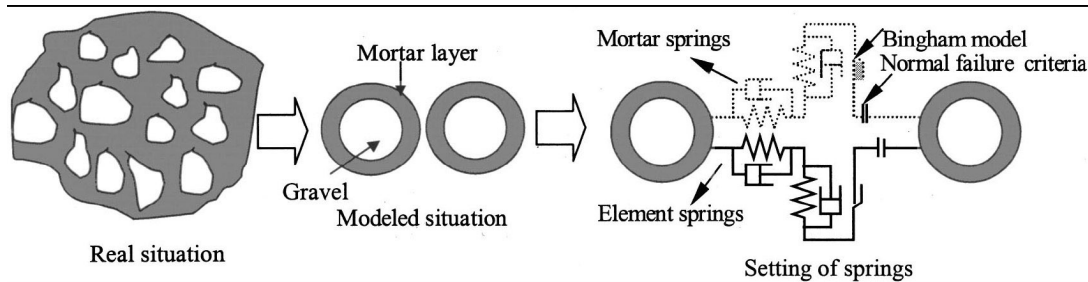
3.2. En för visualisering beräkningstung lösning

I (Puri and Uomoto, 2002) finns en beskrivning av hur man kan bygga upp en simulering av sprutbetong. Tekniken som beskrivs i artikeln är mycket beräkningstung för datorn och är i dagsläget

troligen inte möjlig att använda för realtidsvisning. Den utveckling som dock sker på grafikkort och spelkonsoler etc. gör att den kanske inom en snar framtid kan användas.

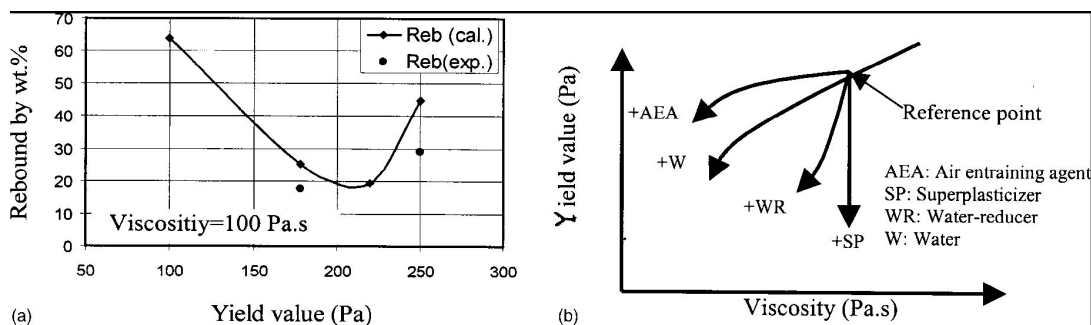
Simuleringen bygger på något som kallas Distinct Element Modeling (DEM). Prototypen byggs upp av ett antal stela klot. När betong med mycket fina partiklar simuleras uppstår beräkningsproblemet för datorn. Ju finare partiklar desto mer tid behövs i datorns CPU och simuleringen blir ej realistiskt genomförbar i realtid.

(Puri and Uomoto, 2002) använder en två fas modell för sprutbetongen som består av en inre gruskärna som är omgiven av cementbruk. Materialmodellen kallas en Binghammodell.



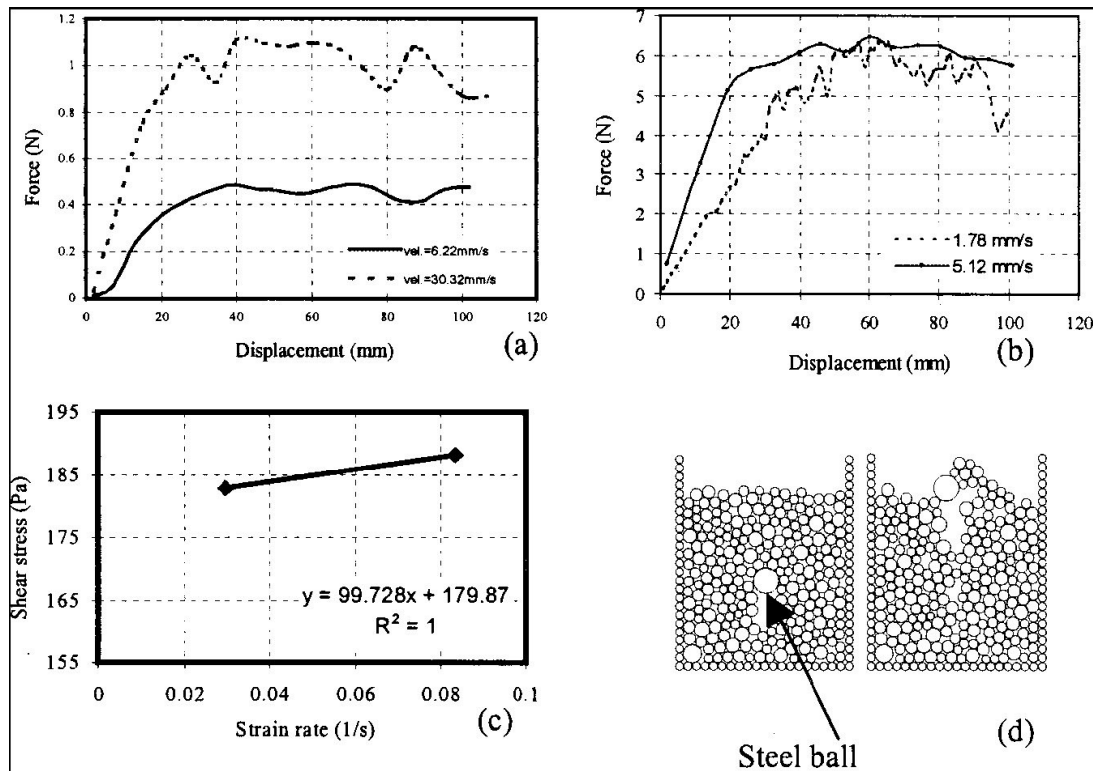
Figur 16. DEM modell för sprutbetong (Källa: Puri and Uomoto, 2002).

Ett problem är att bestämma de DEM parametrar som skall användas i modellen. Bingham modellen används för färsk betongs deformations- och flytegenskaper, reologi. Man har då använt två reologiska konstanter som på engelska heter yield value och rate of slumping. För sprutbetong säger man att just yield value har visat sig vara viktig för få betongen att fastna på ytan, väggen. Man visar ett samband mellan återslag av sprutbetong som funktion av yield value, se figur nedan.



Figur 17. Återslagets beroende av yield value och hur de reologiska egenskaperna yield value och viskositet påverkas av tillsatsmedel (Källa: Puri and Uomoto, 2002).

Egenskapen yield mäts med en metod som kallas Solid Sphere Uplift Viscometer. Metoden innebär att en kula lyfts upp ur ett kärl med betong och man registrerar kraft och förskjutning se figur nedan.



Figur 18. Bestämning av yield värde med Solid Sphere Uplift Viscometer (Källa: Puri and Uomoto, 2002).

Slutsatser som dras är att DEM en bra metod för simulering av sprutbetong. Man säger att det nu är möjligt att förutse hur en sprutbetongkonsistens kommer att fungera utan att göra praktiska experiment.

4. Vilka typer av robotar och robotarmar finns?

Antalet tillverkare av robotar för sprutning av betong är relativt begränsad. För att exemplifiera olika typer av robotar har information via Internet samlats in. Det var stor variation om vilken information man kunde få fram via Internet. Utförligast information fanns från fabrikket Meyco. De fabrikket vi samlat information från är Sika (Aliva och Putzmeister), Meyco, Normet, AMV (Andersen Mekaniska Verkstad AS). Dessa maskiner kan vi se verksamma i Sverige. Ytterligare maskintillverkare finns i Japan, Syd Korea etc. Dessa maskiner är i dag sällsynta i Sverige.

Flertalet av robotarna är till stor del självförsörjande och består av betongpump, doserutrustning för tillsatsmedel, kompressor, acceleratortank, vattentank för rengöring, högtryckstvätt för rengöring etc. Maskinerna fjärrstyrs med fjärrkontroll via kabel eller radio.

Det finns två huvudtyper av robotar. Den ena robottypen innebär att robotföraren sitter på roboten och följer sprutningen från en stationär plats. Med den andra robottypen kan robotföraren förflytta sig runt sprutområdet och bär sin fjärrkontroll med sig.

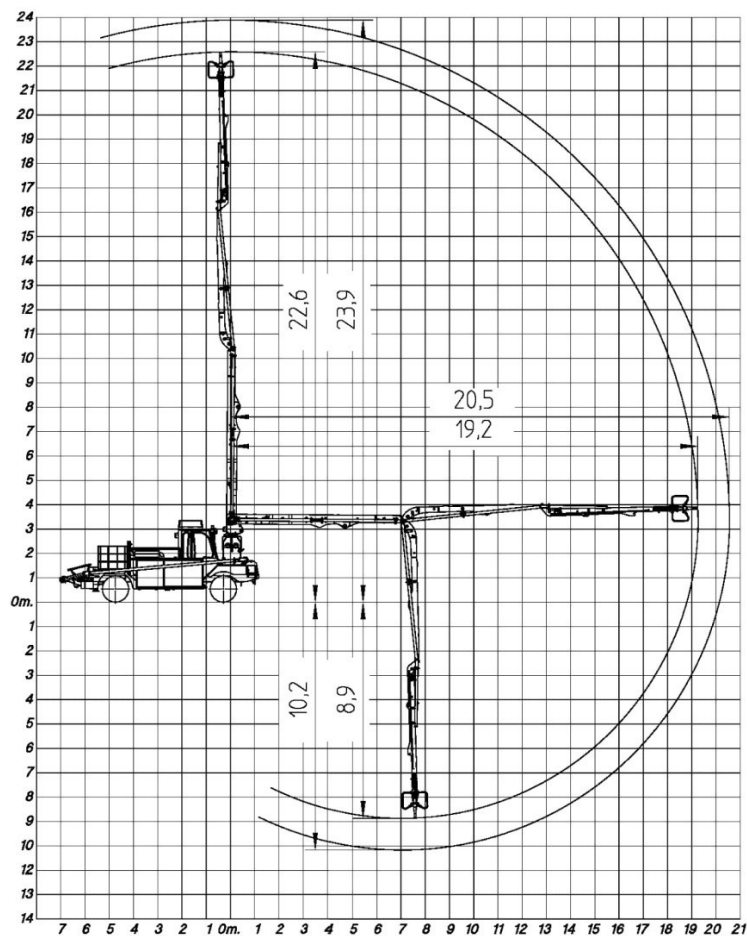
Nedan visas några exempel på robottyper som används.

4.1.Sika

Sika med huvudkontor i Schweiz tillverkar sprutbetongutrustningar också under namnen Putzmeister och Aliva. Nedan visas två varianter.



Figur 19. Sika PM-622PCD och Putzmeister PM500P (Källa: Sika)

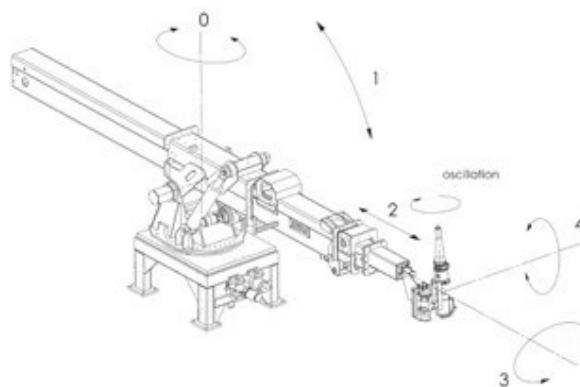


Figur 20. Sika PM-622PCD:s räckvidd med Z-spraying boom SA19 (Källa: Sika)

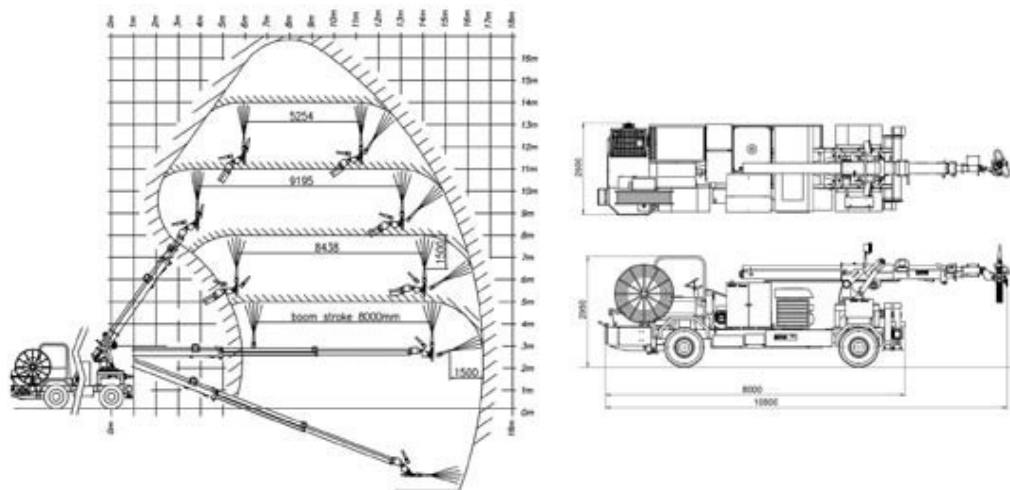
4.2.Meyco Equipment

Meyco har också sitt huvudkontor i Schweiz. Meyco har ett flertal storlekar och typer av robotar som visas nedan.

Figur nedan visar Meyco Potenza.



Figur 21. Meyco Potenza med fem rörelseriktningar plus munstycks oscillation (Källa: Meyco).

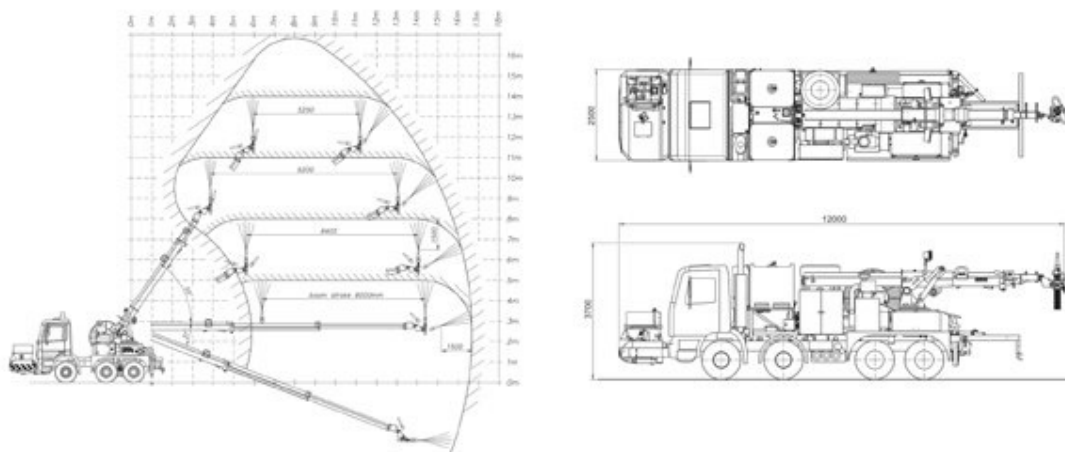


Figur 22. Meyco Potenzas räckvidd (Källa: Meyco).

Figur nedan visar Meyco Roadrunner som är möjlig att köra på allmän väg och kan ekipaget kan därför för egen maskin ta sig från olika förstärkningsplatser.



Figur 23. Meyco Roadrunner (Källa: Meyco).

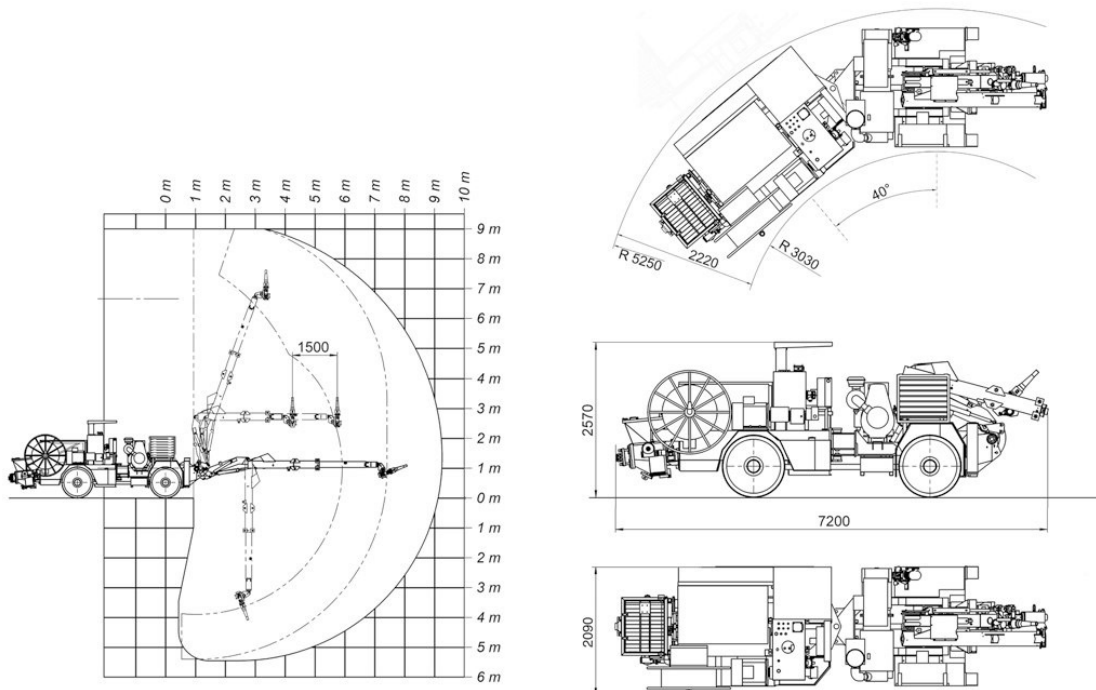


Figur 24. Meyco Roadrunners räckvidd (Källa: Meyco).

I figure nedan visas Meyco Cobra som är speciellt utvecklad för gruvindustrin.



Figur 25. Meyco Cobra (Källa: Meyco).

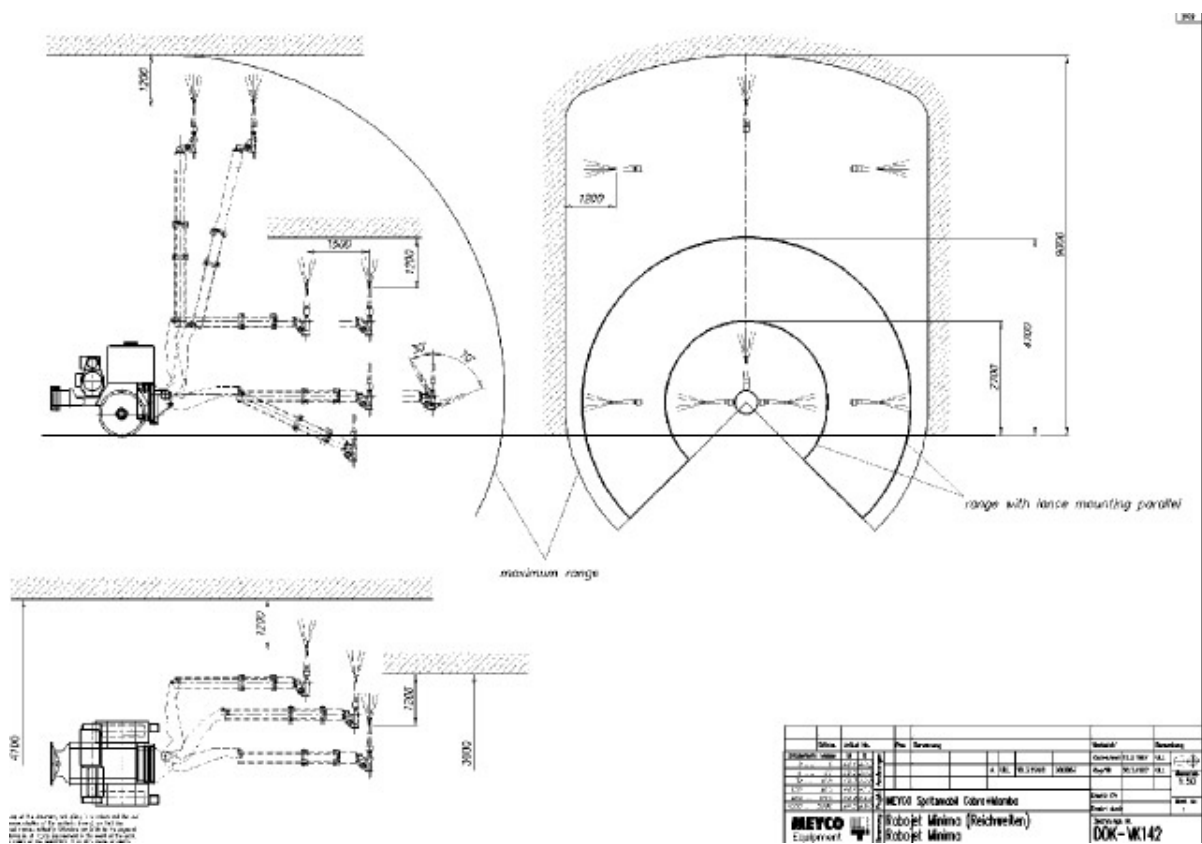


Figur 26. Meyco Cobra:s räckvidd (Källa: Meyco).

Figur nedan visar Meyco Mamba som också är utvecklad för gruvindustrin.



Figur 27. Meyco Mamba (Källa: Meyco).

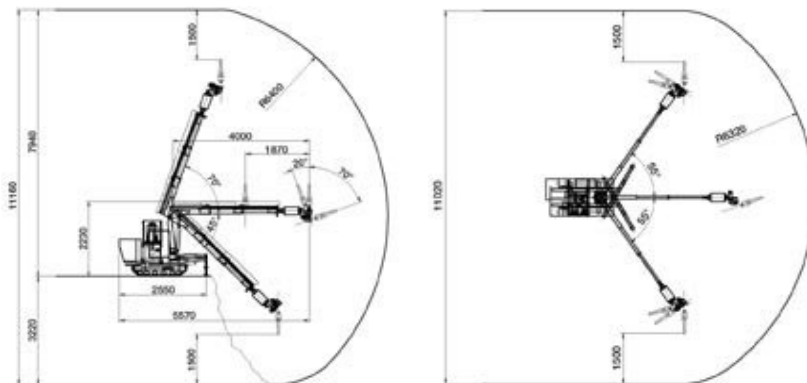


Figur 28. Meyco Mamba:s räckvidd (Källa: Meyco).

Figur nedan visar en mindre robot.

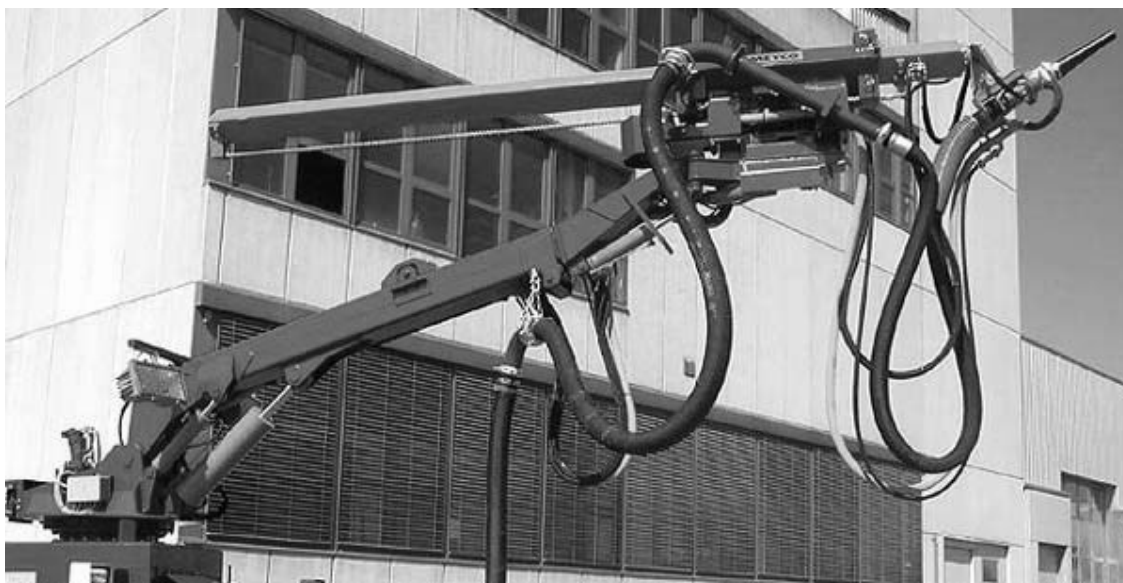


Figur 29. Meyco Oruga (Källa: Meyco).

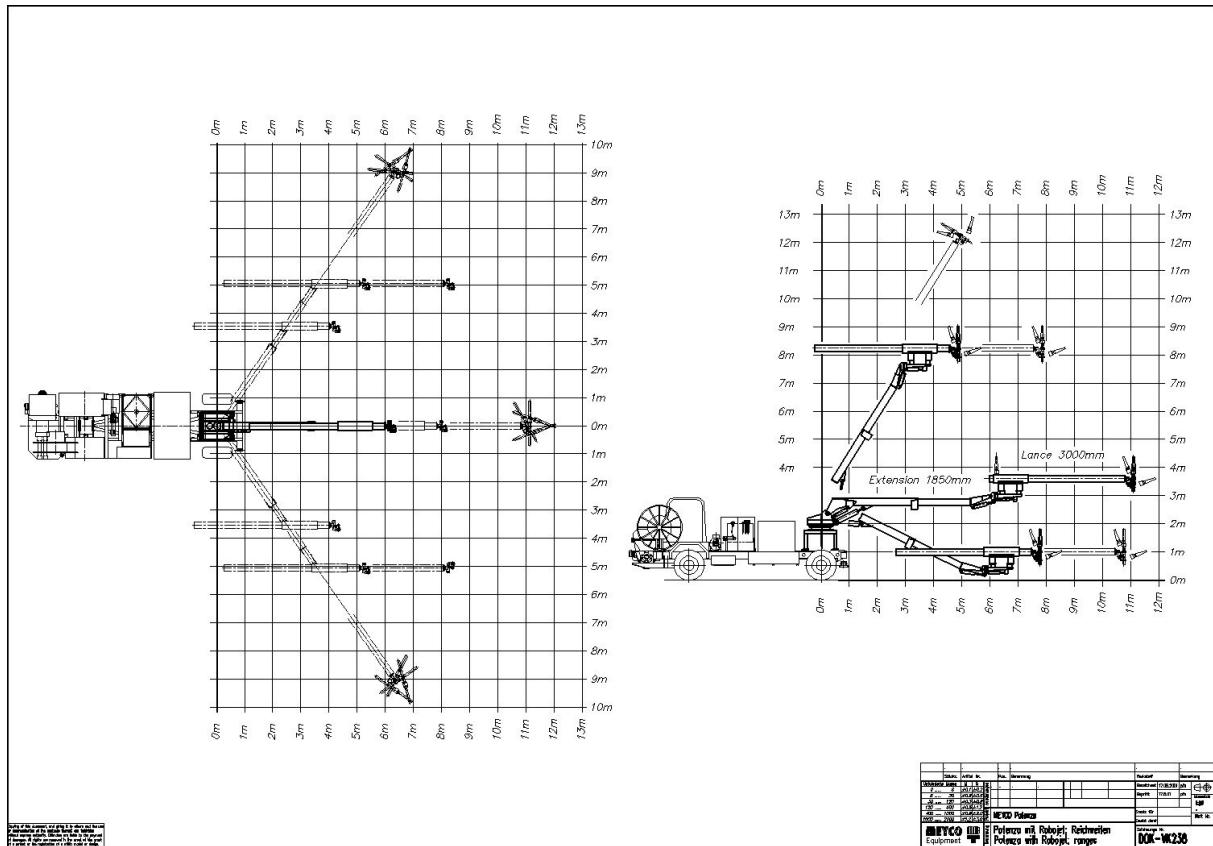


Figur 30. Meyco Oruga:s räckvidd (Källa: Meyco).

Figur nedan visar Meyco Robojet som kan placeras på olika typer av transportfordon

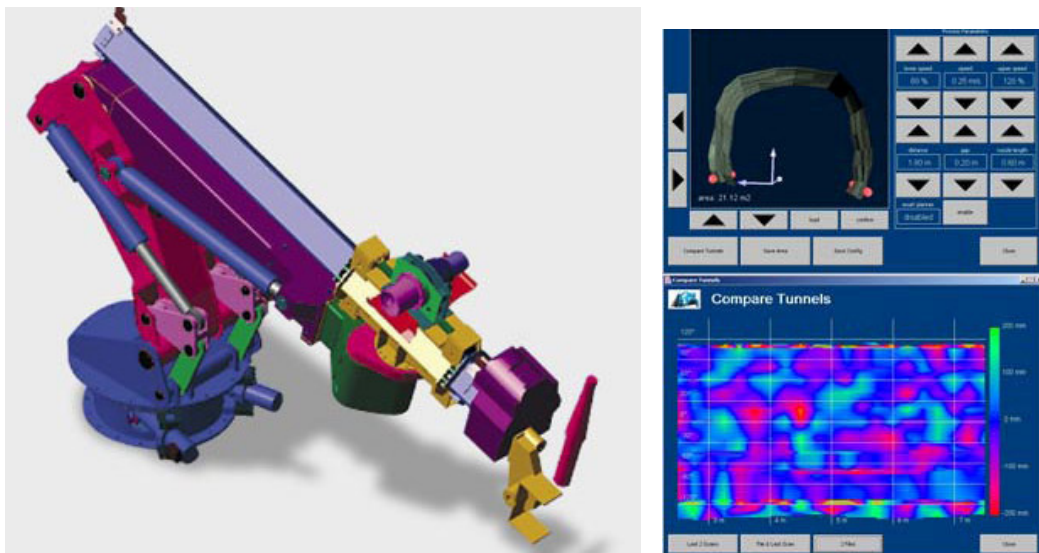


Figur 31. Meyco Robojet (Källa: Meyco).



Figur 32. Meyco Robojet:s räckvidd (Källa: Meyco).

Figur nedan visar den senaste utvecklade roboten från Meyco, Meyco Logica. Roboten är utvecklad i ett samarbete mellan industri och akademi. Roboten har 8 rörelsegrader och säger man ett kontrollsystem anpassad till människan. Systemet kan hålla avståndet till bergytan på ett förbestämt avstånd och vinkel samtidigt som den rör sig med en förbestämd hastighet. Roboten har också ett kontrollsystem som kan registrera tjockleken som sprutas.



Figur 33. Meyco Logica med kontrollpanel (Källa: Meyco).

För Meyco Logica har en 3D simulator för träningsändamål där man riskfritt kan utbildas. Simulatorens utrustning inkluderar original fjärrkontroll, operatörens kontrollpanel och en tunnelprofil som visas i bilden nedan.



Figur 34. Simulator för att utbildas på Meyco Logica (Källa: Meyco).

4.3.AMV Andersen Mekaniska Verkstad

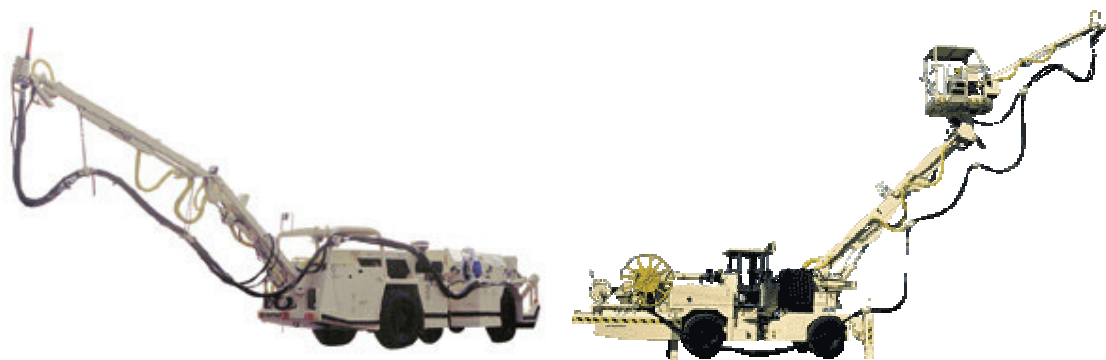
AMV, Andersen Mekaniska Verkstad, har sitt huvudkontor i Norge. AMV robotarna finns i ett stort antal konfigurationer. Vissa robotar kan förses med air-conditioned kabiner för robotföraren. Nedan visas fyra olika konfigurationer.



Figur 35. Exempel på AMV robotar (Källa: AMV).

4.4.Normet

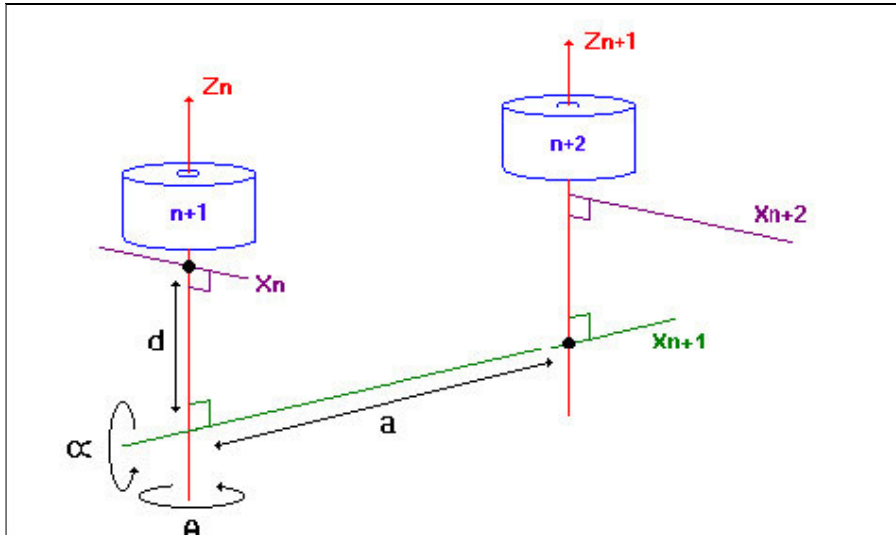
Normet är en tillverkare från Finland. I figur nedan visas Normet Spraymec 6050 som kan nå 6 meter upp och Normet Spraymec 9150 med 15 meters räckvidd.



Figur 36. Normet Spraymec 6050 och Spraymec 9150 (Källa: Normet).

4.5. Klassificering av robotarmar

För att få en enhetlig beskrivning av robotarmarnas rörelsemönster föreslås att de klassificeras enligt den så kallade Denavit-Hartenberg metoden (D-H metoden) (A. Rodríguez López et.al., 2005). D-H metoden har blivit ett standardsätt att representera en robot och modellera dess rörelse. Metoden börjar med att systematiskt bestämma och beteckna ett (x,y,z) koordinatsystem för varje robotled. Det är sedan möjligt att relatera en led till nästa och till slut ha en fullständig beskrivning av en robots geometri.



Figur 37. Denavit-Hartenberg parametrar (Källa: A. Rodríguez López et.al., 2005)

5. Hur kan man överföra den joystickförsedda fjärrkontrollens signaler till simuleringen?

Kontrollen av robotsprutningen sköts med hjälp av en joystick försedd fjärrkontroll. Olika leverantörer av sprutbetongrobotar har olika fjärrkontroller men systemen är principiellt lika. Fjärrkontrollen är i de flesta fall kopplade till en PLC (Programmable Logic Controller) som är en elektronisk komponent med datorliknande egenskaper. En PLC kan programmeras för att leverera specifik ut-data beroende på olika in-data, och användas även för att styra industriella processer i många andra sammanhang. I de flesta fall tillhandahåller också leverantörer av hydrauliska styrsystem och sprutbetongrobotar en möjlighet att koppla PLC:n till en vanlig persondator (via seriell- eller USB-port) för styrning och loggning av systemen. För att koppla fjärrkontrollen till den tänka simulatoren finns därför två alternativ;

- 1) Koppla fjärrkontrollen eller PLC direkt till ”simuleringsdatorn” via seriell port
- 2) Utnyttja leverantörens möjlighet att koppla PLC:n till ”simuleringsdatorn”

Alternativ 2 är det som är enklast rent praktiskt under förutsättning att leverantören kan tillhandahålla ett programmerings-interface till sin produkt. Efter kontakt med JPC Hydraulik, som bl.a. jobbar med ombyggnad av befintliga fjärrkontroller, uppskattades priset för komponenter (PLC) och programvara (programmerings-interface) för ett generellt styrsystem tillhandahållet av Sauer Danfoss till ungefär 20.000 SEK.

Alternativ 1 är praktiskt genomförbart men en tidsuppskattning för detta är svårt att göra i nuläget. Finns mycket information att tillgå från leverantörerna av fjärrkontrollerna kan arbetet underlättas men brist på densamma kan leda till att extra tid behöver läggas på att tolka och härleda de signaer som fjärrkontrollen levererar.

För att summera så är en koppling av fjärrkontrollen/fjärrkontrollerna till ”simuleringsdatorn” fullt möjlig men tillvägagångssättet behöver utredas mer. Finns möjlighet att från leverantörerna få fri eller ekonomiskt fördelaktig tillgång till deras programmerings-interface är detta det bästa alternativet.

6. En föreslagen simuleringsmiljö

Utifrån den information som studerats inom området för sprutbetongförstärkning av berggrum tillsammans med Visualiseringsstudions erfarenheter inom interaktiv 3D-visualisering har ett förslag till en tänkbar simuleringsmiljö utarbetats. Förslaget är på inget sätt definitivt, men påvisar de realistiska möjligheterna att praktiskt genomföra ett framtida projekt.

6.1.Lämplig beräkningsmodell

Eftersom en korrekt, beräkningsintensiv analys av hur mycket betong som fastnar vid bergytan inte kommer vara möjlig att utföra i realtid med dagens hårdvara föreslås ett empiriskt alternativ utifrån experimentellt uppmätta värden. Idén utgår från att genom egna mätningar eller andra empiriska resultat få fram ett antal grundvärden och därefter interpolera linjärt mellan dessa beroende på enklare inparametrar i realtid. Studerar vi exempelvis parametern flöde kan en beräkningsmodell användas på följande sätt:

Genom mätning på plats i verkligheten görs ett antal studier. Vid flöde X mäts den betongmängd som fastnar. Sedan görs samma mätningar med exempelvis flöde 2X, 3X, 4X, och så vidare. För enkelhetens skull antar vi här att resultatet påvisar ett linjärt förhållande. I simuleringsmiljön används sedan ett lämpligt intervall som anses vara stabilt och utför en linjär interpolering för att få fram resultatet (betongens vidhäftning). Antag att flödet F1 ger en vidhäftning på V1 enheter och att flödet F2 ger en vidhäftning på V2 enheter. En ökning av grundflödet F1 med 30% av intervallet ger då följande vidhäftning:

$$\text{VIDHÄFTNING} = V1 + 0.3 \cdot x (V2-V1)$$

På liknande sätt kan sedan ytterligare parametrar användas. Följande listar de parametrar som kan anses påverka betongens slutgiltiga vidhäftningsmängd:

A - Bergytans geometriska "ostruktur" per kvadratmeter.

B - Vinkel mot bergytans huvudplan.

C - Sprutavstånd.

D - Betongegenskaper (viskositet).

E - Sprutmunstycke (radiell spridning).

F - Tjocklek på befintligt betonglager.

G - Flöde.

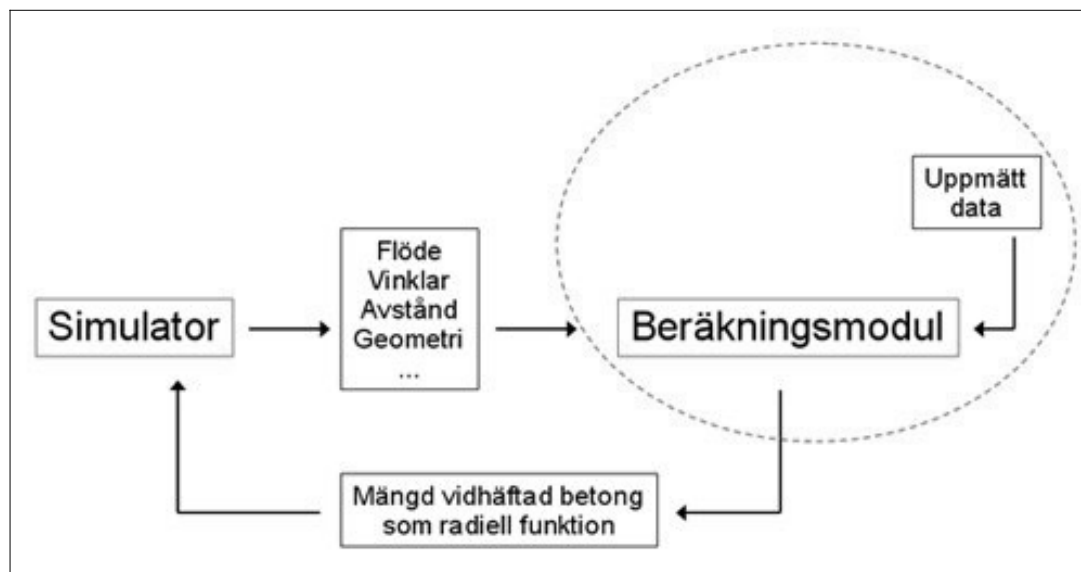
H - Acceleratortillsats

I - Riktning på yta (vägg, tak, golv etc)

Mängd vidhäftad betong blir alltså en funktion av ovanstående parametrar, dvs;

$$\text{MÄNGD VIDHÄFTAD BETONG} = f(A,B,C,D,E,F,G,H,I)$$

Genom en mjukvarudesign som tar tillgängliga parametrar och levererar mängd vidhäftad betong kan den föreslagna beräkningsmetoden praktiskt förädlas samtidigt som den tillåter en förenklad version i början (se figur nedan).

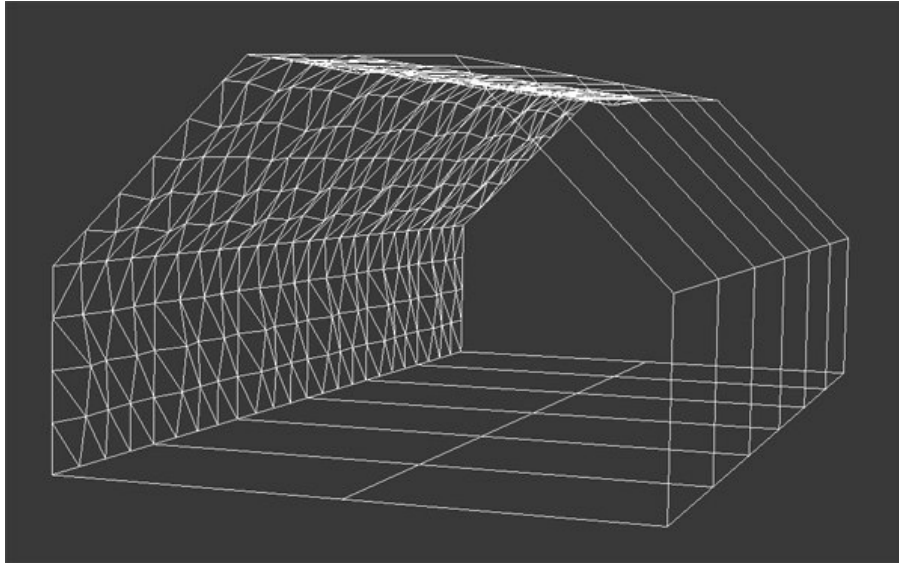


Figur 38. Simuleringsmodell (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Ett första försök kan till exempel innehålla information om parametrarna B och C för att med tiden utvecklas vidare. På detta sätt blir inte beräkningsmodellen låst utan kan hela tiden utvecklas. Svårigheten här får nog anses vara insamlandet av empirisk data. Viss data finns att tillgå från exempelvis (Melbye, 2001), men denna kan komma att behöva kompletteras/verifieras för att kunna integreras i simulatormiljön. Initiellt bör två eller tre parametrar väljas ut som genom erfarenhet visat sig påverka vidhäftningen mest. I fallet med två parametrar låses först parameter ett för att mäta när parameter två varierar och vice versa. I vidare arbete kan sedan ytterligare parametrar studeras.

6.2. Beräkning samt visualisering av resultatet

I den föreslagna simulatormiljön kommer själva bergytan/bergrummet representeras som en triangulerad yta i tre dimensioner (se figur nedan). Skapandet av bergytan/bergrummet kan med fördel göras med hjälp av en 3D-scanner eller utifrån sektionsdata, och i övningssyfte kan en eller ett par olika alternativ användas. På sikt kan dock framtida projekt "provsprutas" om en 3D-scanning av det aktuella bergrummet genomförs eftersom 3D-modellen är "frikopplad" från det övriga simuleringssystemet.



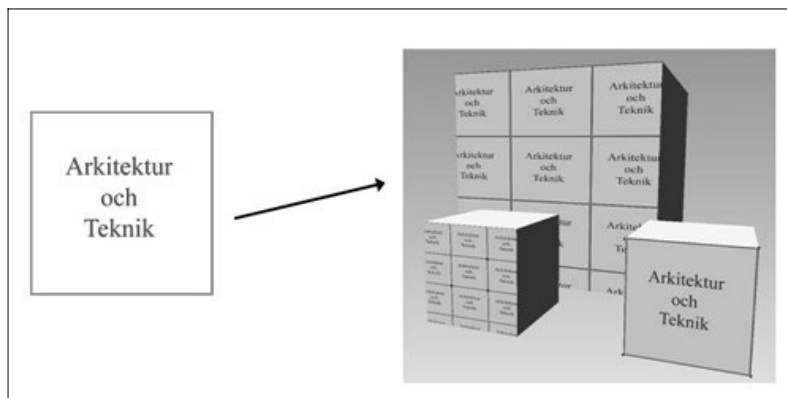
Figur 39. Triangulerat bergtrum (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Simuleringsystemet är en dynamisk miljö som enklast kan brytas ner i två processer:

Process 1 - Beräkning/framtagande av ett tidsberoende resultat/tillstånd.

Process 2 - Visualisering av resultatet/tillståndet.

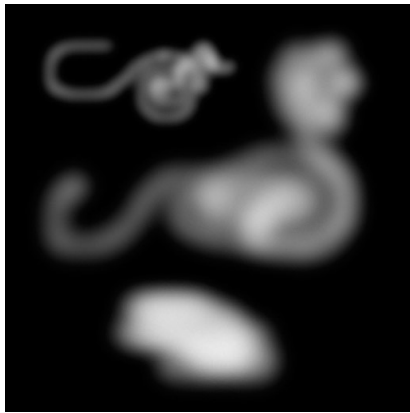
Eftersom slutmålet är att kunna visualisera resultatet bör process 2 studeras först och ligga till grund för hanteringen av process 1. För 3D-grafik i realtid finns en teknik benämnd texturering, vilken innebär att en digital bild "klistras" på en geometrisk yta för att ge upplevelsen av ett realistiskt material (se figur nedan).



Figur 40. Yta som textureras med bilden Arkitektur och Teknik (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

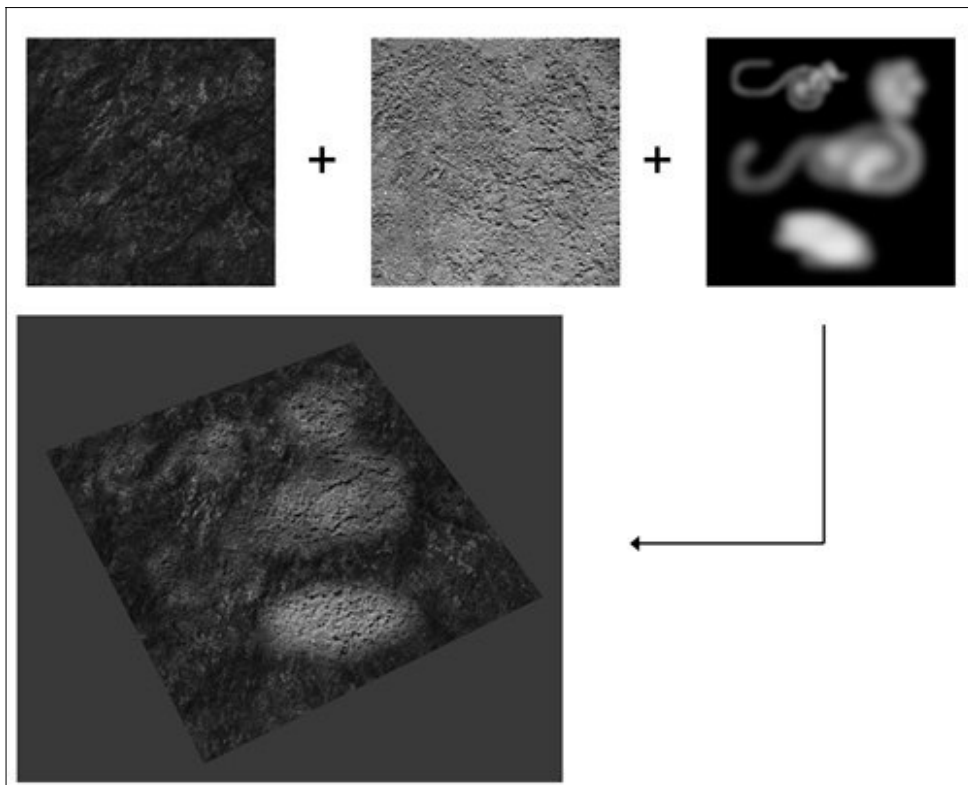
Den senaste generationens grafik hårdvara har dock möjlighet att hantera dessa texturer, inte bara som bildinformation, utan också som generell, dynamisk information. Detta är en intressant egenskap som ger oss möjlighet att hantera exempelvis mängd vidhäftad betong i texturer under simuleringens gång. Genom att använda en textur som en Concrete Density Map (CDM) kopplar vi

mängden vidhäftad betong till den geometriska modellen av bergytan. I en CDM betyder svart ingen betong medans vitt betyder mycket betong (se figur nedan).

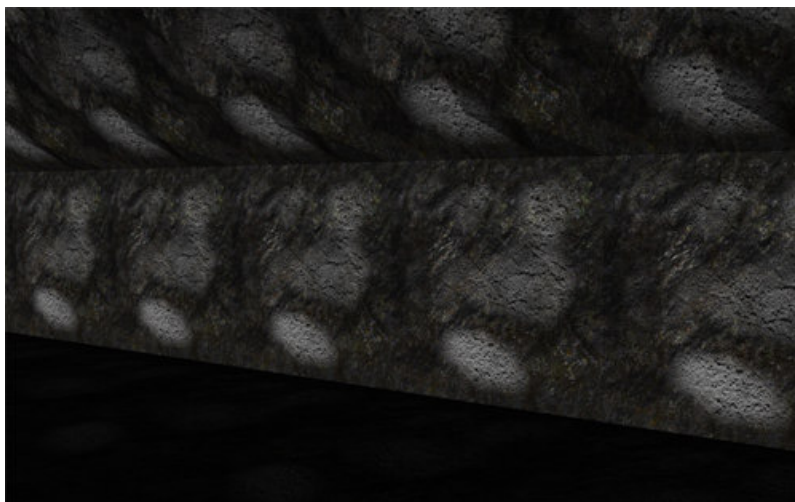


Figur 41. Concrete Density Map (CDM) (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Under simuleringens gång kan sedan informationen i CDM:en ”konverteras” till önskat visuellt resultat. Genom att mixa digitala bilder av bergytan med eller utan sprutbetong baserat på värdet i CDM:en kan en realistisk visuell representation åstadkommas (se figur 42 och 43).

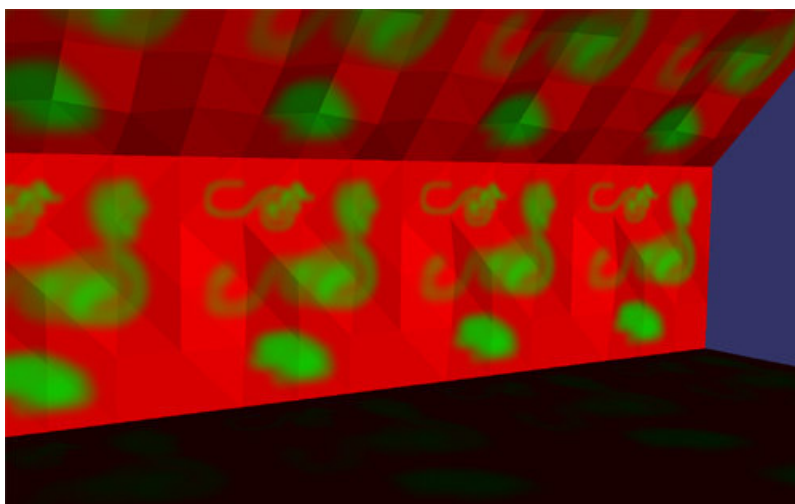


Figur 42. Mixning av digitala bilder av bergytan med eller utan sprutbetong (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).



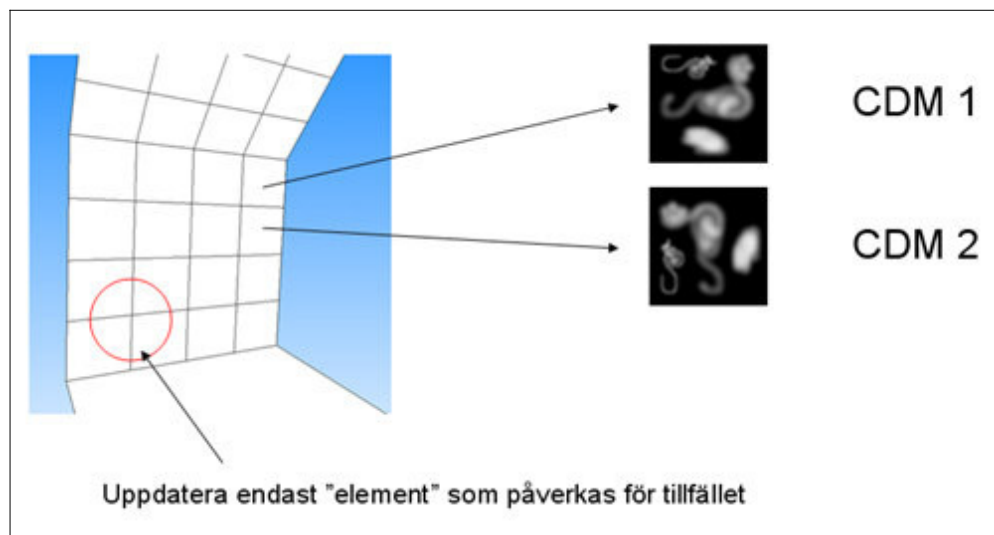
Figur 43. Visuell presentation (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Ett annat alternativ är att använda samma presentationsteknik som utnyttjas vid visualisering av FEM-beräkningar och representera mängd vidhäftad betong med en färgskala (se figur nedan).



Figur 44. Vidhäftad betong visualiseras med en färgskala (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Process 2 (Visualisering av resultatet/tillståndet) behöver aktuell betongtjocklek i form av värden i en textur för att genomföras. Resultatet av process 1 (Beräkning/framtagande av ett tidsberoende resultat/tillstånd) skall alltså bli värden i en textur, liknande den i figur 44 (Concrete Density Map). Som tidigare nämnts kommer empirisk data att användas för att beräkna den mängd betong som fastnar vid ytan beroende på sprutavstånd, flöde, etc. När detta är beräknat adderas resultatet till CDM:en på den position på bergytan som påverkas. Då en CDM i grund och botten är en bild bestående av bildpunkter/pixlar kommer behovet av "upplösning" på beräkningarna bestämma storleken på bilden. Dagens grafikhårdvara har dock en inbyggd begränsning när det gäller storleken på enstaka texturer/bilder vilket gör att den geometriska modellen av bergrummet kommer att behöva delas upp i mindre "element" med var sin CDM (se figur nedan)



Figur 45. Den geometriska modellen delas upp i mindre "element" (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Uppdelningen av bergrummet i mindre "element" främjar också den, i viss mån, beräknings-/prestandakrävande processen att hitta och uppdatera de för stunden påverkade CDM:erna. Eftersom beräkningsmodellen ger oss radiell spridning utifrån den absoluta träffpunkten av betongstrålen behöver endast de element som befinner sig inom sprutradien uppdateras. De beräknade tillskotten adderas sedan till elementens CDM:er.

6.3. Visualisering av betongstrålen

Eftersom visualiseringen av betongstrålen ej är kopplat till själva beräkningen av vidhäftad betong kan ett dynamiskt partikelsystem användas. Partikelsystem är en idag ofta utnyttjad teknik inom interaktiv 3D-grafik för att representera exempelvis eld och rök (se figur nedan).



Figur 46. Visualisering av eld och rök med ett dynamiskt partikelsystem (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

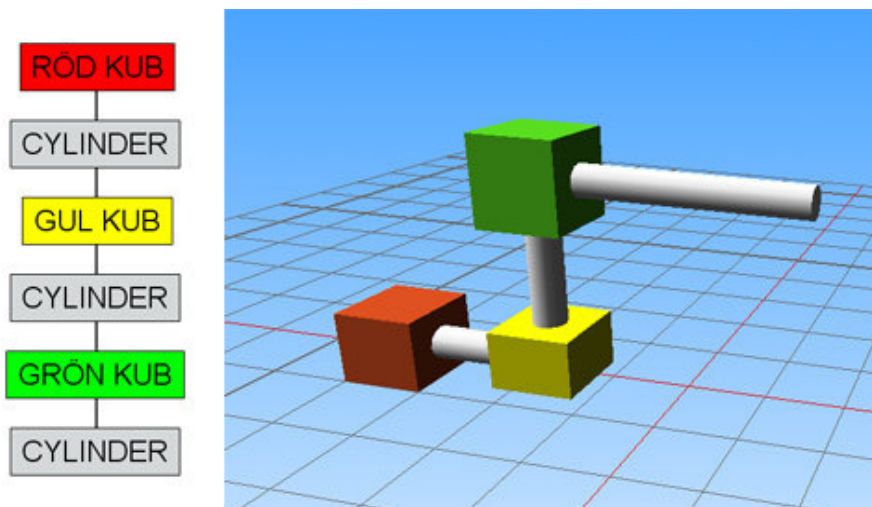
Enkelt beskrivet går tekniken ut på att visualisera flertalet mindre, texturerade geometrier vars positioner kontinuerligt uppdateras för att på så sätt skapa en illusion av ett flödande medium. Ett

partikelsystem är frikopplat den övriga delen av simulatoren på så sätt att endast flöde samt munstyckets position och riktning behövs som indata. Dock kan betongstrålen bli något mer komplex att hantera om även återslaget skall visualiseras, eftersom man då behöver ta hänsyn till ”responsen” från bergytan och beräkningsmodellen. Visualisering av återslag ligger därför längre fram i projektet.

6.4. Visualisering av robotarmen

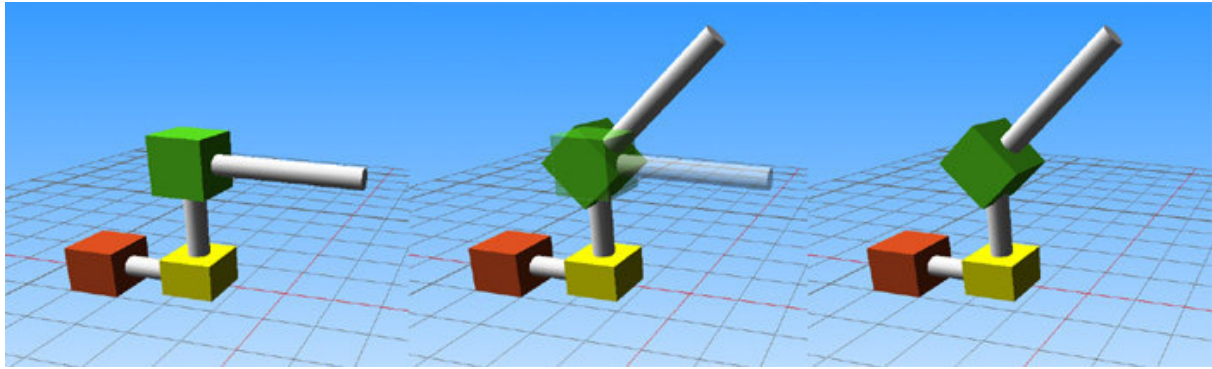
För att en visualisering av roboten/robotarmen skall vara möjlig behöver en 3d-modell av den skapas i lämpligt 3D-modelleringsprogram (3D Studio MAX, MultiGen Creator). Precis som med den geometriska modellen av bergrummet är 3D-modellen av roboten/robotarmen ”frikopplad” den övriga simuleringsmiljön vilket gör att olika robotar/robotarmar enkelt kan kopplas till simulatoren. Till skillnad från bergytan behöver dock modellen av robotarmen också innehålla information om leder och stelkroppar för att en realistisk simulering av dess frihetsgrader skall kunna genomföras/visualiseras. För 3D-grafik i realtid är en vanligt förekommande teknik att jobba med hierarkiska transformationer, där transformationen för en komponent är lika med summan av dess ”föräldrars” transformationer. Genom att ”arrangera” en robotarms ingående komponenter i en logisk hierarki skapas därför ett system som hanterar robotens möjliga rörelser. Nedan beskrivs kortfattat hur ett antal komponenter är arrangerade i en hierarki, och på så sätt påverkar varandras positioner och rotationer;

En röd, gul och grön kub är tillsammans med tre cylindrar arrangerade geometriskt och hierarkiskt enligt figur nedan.



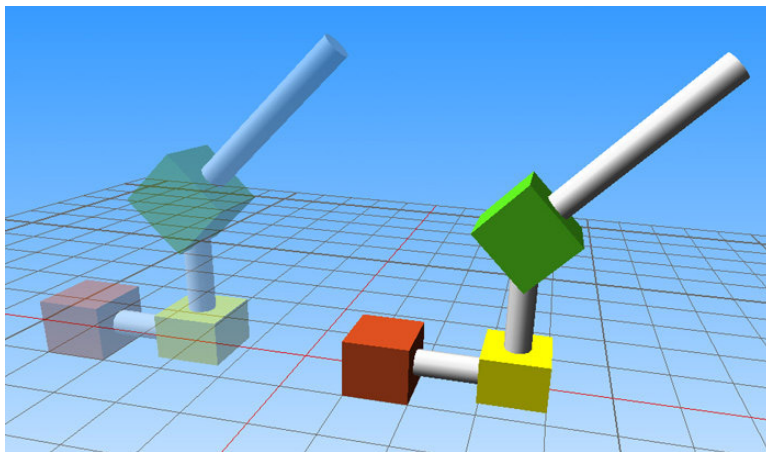
Figur 47. Röd kub är förälder till alla andra komponenter. Grön kub är förälder till en cylinder (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

En transformation applicerad på en komponent kommer att påverka den komponentens ”barn”. En rotation applicerad på den gröna komponenten kommer alltså att påverka modellen enligt figur nedan.



Figur 48. Grön kubs rotation påverkar endast cylinderns position och rotation (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Eftersom den röda kuben är "förälder" till alla andra komponenter kommer en transformation på den röda kuben påverka alla andra komponenters positioner och rotationer enligt figur nedan.



Figur 49. Röd kubs ändrade position påverkar alla andra komponenters position (Källa: Visualiseringsstudion Chalmers).

Som tidigare nämnts finns ett system för att klassificera en robotarms rörelsemönster (D-H metoden). Denna metod har en naturlig koppling till hur hierarkiska transformationer behandlas inom interaktiv 3D grafik och lämpar sig väl för att beskriva olika robotarmars rörelsemönster i den föreslagna simulatormiljön.

6.5. Träningssimulator

Med träningssimulator menas här det systemet då beräkningsmodell, visualisering och interaktionen med användaren knyts samman för att bilda en komplett träningsmiljö. Förutsättningarna är i viss mån lika med de som fanns hos Volvo Cars då visioner om att utbilda montörer i VR skulle utredas. Eftersom en robot för sprutbetong styrs av en joystick försvinner dock problemet som Volvo hade med att överföra interaktionen med monteringsverktygen på ett realistiskt sätt. I dag finns dessutom möjligheten att använda VR-hjälmarna med större synfält. Detta gör att vi har bättre förutsättningar att skapa en mer avancerad träningssimulator. Nedan följer en genomgång av två olika system, med dess respektive för- och nackdelar, samt ett förslag hur dessa skulle kunna kombineras i utbildningssammanhang.

6.5.1. Enkel träningssimulator

Med enkel träningssimulator menas bärbar dator eller PC kopplad till den joysticken som används av robotföraren i verkligheten. Robotföraren ser och kan manipulera robotarmen med hjälp av joysticken. Det visuella visas på en monitor eller med en vanlig datorprojektor. Det visuella resultatet av betongsprutningen visas så som förklarades i kapitel 6.2 - 6.4.

Fördel:

- Enkel utrustning.
- Billig lösning.
- Kan användas hemma med joystick och bärbar dator vilket gör att robotföraren kan lära sig att använda och behärska joysticken till roboten i lugn och ro.

Nackdel:

- Svårt att återskapa arbetsmiljön dvs. kan ej gå och röra sig på naturligt sätt i den virtuella miljön.
- Svårt att få känslan av närvaro.

6.5.2. Avancerad träningssimulator

Med avancerad träningssimulator menas att robotföraren har en VR-hjälm på sig och därigenom är helt innesluten i den virtuella världen. Med hjälp av ett trackersystem kan man sedan hålla reda på robotförarens orientering och blickfång i den virtuella världen. Detta resulterar i att robotföraren kan röra på huvudet för att ändra vyn i den virtuella världen. Robotföraren kan till och med gå för att uppdatera vyn i den virtuella världen.

Fördel:

- Känslan av närvaro
- Röra sig i den virtuella världen på ett "naturligt sätt"
- Öka intresset för att bli robotförare
- PR – High tech inom tunnelbyggnad.
- Närmare verkligheten

Nackdel:

- Ingen standardutrustning.
- Dyr lösning.
- Går ej att använda hemma.

6.5.3. Föreslagen utbildning

Både enkel och avancerad träningssimulator har sina för och nackdelar. Därför tror vi att det bästa hade varit att bygga upp utbildningen i tre steg. Det första steget är att lära känna och behärska

joysticken. I det andra steget lär man sig behärska sprutavstånd och sprutvinkel. Det tredje steget slutligen är ett slutprov där upplevelsen är så realistisk som möjligt.

Trestegsutbildning:

Steg 1.

Robotföraren lär sig först att hantera joysticken i den enkla träningsimulatorn. Här kan robotföraren lära sig i lugn och ro.

Steg 2.

Robotföraren går vidare till steg 2 när han/hon behärskar att styra roboten virtuellt med hjälp av joysticken. Denna delen av utbildningen går ut på att robotföraren skall lära sig att behärska sprutavståndet och sprutvinkeln. Detta sker också i den enkla träningsimulatorn. När robotföraren har klarat vissa uppgifter med tillräcklig kvalitet får de gå vidare till sista övningen i steg 3.

Steg 3.

Här sker slut övningar och slutprovet i den avancerade träningsimulatorn innan man är klar för att testa sin färdighet i verkligheten.

7. Sammanfattning

Sprutbetong ingår så gott som alltid i den primära förstärkningen vid byggande av tunnlar och berggrum och utförs numera nästan alltid med robot. Utbildning av kompetenta robotförare för sprutbetongförstärkning är en mycket dyr utbildning. Utbildningen görs nu av de företag som behöver den kompetensen och kan kosta upp till en miljon kronor. Utbildningen sker i tunnlar eller liknande och under övervakning av erfarna robotförare. Mycket av det material som förbrukas under utbildningen kasseras och man kan ha svårt att få en korrekt återföring av vad som är bra sprutresultat etc. Andvändningen av sprutbetongförstärkning och kravet på förstärkningens kvalitet kommer att öka i framtiden. Kvalitetskravet höjs speciellt när förstärkningen används för kommande slutförvaring av kärnbränsle. Bra utbildad arbetskraft kommer att vara en stark konkurrensfaktor för svenska entreprenörer kontra utländska i ett område med en stark svensk tradition.

Kartläggningen av robottyper visar att det finns två huvudtyper. Den ena robottypen innebär att robotföraren sitter på roboten och följer sprutningen från en stationär plats. Med den andra robottypen kan robotföraren förflytta sig runt sprutområdet och bär sin fjärrkontroll med sig.

I denna förundersökning undersöks möjligheten att utföra utbildningen av robotförare i en virtuell miljö som skapas av en dator. Virtuella miljöer byggs upp med hjälp av polygoner och upplevelsen av realismen kan ökas med hjälp av t ex foton som klistras på polygonerna. Datorns kapacitet har ökat dramatiskt de senaste åren men är fortfarande en trång sektor för visning av virtuella miljöer. Innehåller den virtuella miljön för många polygoner etc. blir visningen av miljön ryckig och upplevs inte som realistisk. Datorn bör producera minst 20 bilder per sekund för att upplevas som icke ryckig. Upplevelsen av realism kan också påverkas av hur man visar de virtuella miljöerna. Visas miljön på en PC bildskärm kan upplevelsen ökas genom att man går från att bara se 3D modellen till att också visa modellen i stereo dvs. med ett djupseende. Detta kräver dock speciella glasögon. Ett annat och dyrare sätt att öka realismen i upplevelsen av en virtuell miljö är att omsluta den som vistas i miljön. Detta kan göras genom att fler bildskärmar omger betraktaren eller genom att betraktaren förses med en VR hjälm eller Head Mounted Display (HMD). Begränsningen med HMD har tidigare varit att man bara klarat att visa en mindre del av en människans normala synfält. Den senaste utvecklingen på HMD har dock givet utrustning som ligger nära det synfältet som en normalseende har i verkligheten. Nackdelen är att den fortfarande är mycket dyr.

Virtuell träning finns beskriven för en stor mängd områden i litteraturen och på Internet. För tunnelförstärkning närliggande områden finns exempel på virtuell träning från bulvsättning i tunnel, drivning av tunnel med hjälp av tunnelfräsmaskin och en körsimulator för en lasttruck. Exempel finns också från utveckling av robotarmer och fjärrkontroller för sprutbetongförstärkning där en virtuell modell av robotarmen använts. Liknande har också använts för att träna robotförare på en speciell robotarmtyp. En ny företeelse för byggbranschen för träning i den virtuella världen är ett så kallat Building Management Simulation Center (BMSC). Det första i världen invigdes i början av 2000 talet i Eindhoven, Nederländerna. I simulatorn kombineras skådespelare, ljudeffekter och virtuella miljöer för att lära arbetsledare sitt yrke.

Huvudorsaken till dålig sprutbetongkvalitet och ökade förstärkningskostnader är återslaget eller spillet av betong. Hur stor del av betongen som blir spill styrs av fyra huvudfaktorer. Faktorererna är sprutmunstyckets vinkel mot ytan, sprutmunstyckets avstånd till ytan, mängden acceleratortillsats och riktningen på ytan som förstärks dvs om det är vägg eller tak etc. Försök har gjorts med så kallad Distinct Element Modeling (DEM) för att simulera vad som händer med sprutbetongen när den träffar bergytan. DEM har fungerat bra för att beskriva förloppet. Problemet med DEM-metoden är att den är mycket beräkningsintensiv för datorn speciellt om mindre fraktioner i betongen skall simuleras. Metoden är därför inte möjlig för realtidsvisualisering med dagens datorkapacitet men kan i en framtida användning troligen ge en mycket realistisk simulering.

Eftersom en korrekt, beräkningsintensiv analys av hur mycket betong som fastnar vid bergytan inte kommer vara möjlig att utföra i realtid med dagens hårdvara föreslås ett empiriskt alternativ utifrån experimentellt uppmätta värden. Det föreslagna simuleringssystemet är en dynamisk miljö som består av två steg. I det första steget beräknas mängden vidhäftad betong i den virtuella tunneln och i det andra steget visualiseras resultatet.

En träningssimulator föreslås där beräkningsmodell, visualisering och interaktion med användaren sammanlänkas för att ge en komplett träningsmiljö. Utbildningen görs i tre steg. I det första steget tränas robotföraren att hantera joysticken. Visualiseringen sker då på en bärbar dator eller PC kopplad till joysticken. I steg två som också sker på bärbar dator eller PC tränas robotföraren att behärska sprutavstånd och sprutvinkel. Steg tre är slutövningen och slutprovet där upplevelsen är så realistisk som möjligt och i denna använder därför robotföraren en VR-hjälm.

8. Referenser

8.1.Litteratur

- CHENG, M.-Y., LIANG, Y., WEY, C.-M. & CHEN, J.-C. (2001) Technological enhancement and creation of a computer-aided construction system for the shotcreting robot. *Automation in Construction*, 10, 517-526.
- DE VRIES, B., VERHAGEN, S. & JESSURUN, A. J. (2004) Building Management Simulation Centre. *Automation in Construction*, 13, 679-687.
- MELBYE, T. (2001) Sparyed Concrete for rock support. MBT International Underground Construction Group, Division of MBT (Switzerland) Ltd.
- PURI, U. C. & UOMOTO, T. (2002) Characterization of distinct element modeling parameters for fresh concrete and its application in shotcrete simulations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 137-144.
- RODRIGUEZ LÓPEZ, A., FONDEUR, G., RIVAS, J.L., LÓPEZ, C. (2005) State of Art Report on Shotcreting Machine Monitoring, Control and Admixture Dosing. IP011817-2 TUNCONSTRUCT, Technology Innovation in Underground Construction.

8.2.Elektroniska källor

Andersen Mek. Verksted AS <http://www.amv-as.no/engelsk/PRODUKTER/sroboter/index.htm>
(27 april 2007)

Meyco <http://www.meyco.basf.com/Meyco/EN/Equipment/MEYCO+Product+Range/>
(27 april 2007)

Sika <http://www.sika.ch/en/stm.htm> (27 april 2007)

5DT Fifth Dimension Technologies, Proofbolter <http://mining.5dt.net/products/proofbolter.html>
(27 april 2007)

5DT Fifth Dimension Technologies, Pvrcoal <http://mining.5dt.net/products/pvrcoal.html>
(27 april 2007)

5DT Fifth Dimension Technologies, Phaultruck <http://mining.5dt.net/products/phaultruck.html>
(27 april 2007)

8.3.Muntliga källor

JPC Hydraulic

SveBeFo

Box 47047
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • Fax 08-651 13 64
info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--K27--SE

tbk.