



Sveriges
lantbruksuniversitet

En jämförande studie av möjliga kraftkällor för fordon i SKB:s slutförvar

A comparative study of alternative power
sources for vehicles in SKB's deep repository

Christian Nyström

REFERAT

En jämförande studie av möjliga kraftkällor för fordon i SKB:s slutförvar

Christian Nyström

Svensk Kärnbränslehantering AB planerar att deponera använt kärnbränsle i ett slutförvar. Detta ska göras med den så kallade KBS-3-metoden där använt kärnbränsle försluts i kopparkapslar och bäddas in i bentonitlera på mellan 400 och 700 meters djup i urberget. I denna studie undersöks kraftkällor som kan användas i tre olika typer av fordon i slutförvaret: det fordonet som ska transportera transportbehållare med kapseln i rampen från markytan till en omlastningsstation på slutförvarsnivå, det fordon som ska transportera kapseln mellan omlastningsstation och deponeringstunnlar samt de fordon som ska arbeta med frakt av material på slutförvarsnivå. Fordon för frakt av material utgörs i denna studie av en standarddumper och en standardlastmaskin.

Studien syftar till att ge underlag för fördjupade utredningar inför slutligt val av kraftkälla för respektive fordonstyp. Kraftkällor diskuteras utifrån det arbete som fordonet ska utföra samt utifrån emissioner, värmeutveckling, brandrisk, service, utrymmesbehov och ekonomi. De undersökta kraftkällorna är dieselmotorn, elmotorn och bränslecellen. Kombinationer av dessa kallas hybrider som även de har undersökts som ett alternativ för fordonsdrift. Undersökta energibärare till kraftkällorna är diesel, rapsmetylester, syntetisk diesel, väte och el. Eftersom driftsättning av slutförvaret beräknas till omkring år 2017 undersöks kraftkällorna både i ett nuläges- och framtidsperspektiv.

Att använda dieselmotorer för drift i slutförvaret kommer att påverka närmiljön i form av emissioner och värmeutveckling, vilket kan påverka ventilationsbehovet. Vid användning av dieselmotorer vid drift i dagens gruvor utgörs brandrisken av hantering av diesel samt om det kommer diesel på heta ytor. Elmotorn är fri från emissioner och har en betydligt högre verkningsgrad än dieselmotorn och avger därför mindre värme. Eldrivna fordon använder batteri, kabel eller trolley för att förse kraftkällan med ström. Med kabel och trolley begränsas rörligheten för fordonet. Brandrisk med kabel utgörs av överslag i el-central och av kortslutning i kabel. Kostnader vid drift med elmotorer eller dieselmotorer kommer att påverkas av prisutvecklingen av el och bränsle.

Bränsleceller med vätgas som energibärare ger fordon fri rörlighet och emissionerna består endast av vatten. Att använda bränsleceller på fordon ligger emellertid många år framåt i tiden. Om bränsleceller används i slutförvaret är den mest lovande lagringsformen av väte så kallade metallhydrider som tankas ovan jord. Denna lagringsform minskar risken för vätgasexplosioner. Kombinationer av kraftkällor, i form av hybrider, kan utnyttja de olika kraftkällornas fördelar.

Nyckelord: fordon, underjordsfordon, kraftkälla, bränsle, bränslecell

*Institutionen för Biometri och teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet
Box 7032, SE-750 07 Uppsala*

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

A comparative study of alternative power sources for vehicles in SKB's deep repository

Christian Nyström

The Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) plans to dispose spent nuclear fuel in a deep repository. This will be done by using multiple barriers to guarantee safety. The spent nuclear fuel will be enclosed by a copper canister and embedded in bentonite clay and disposed in the rock 400-700 meter below the surface.

This study investigates the choice of power source for three different kinds of vehicles in the deep repository: vehicle for transporting transport cask containing canister from the surface to the reloading station at deep repository level, vehicle for transporting canister from reloading station to the deposition tunnels and vehicles for transports of different kinds of materials at deep repository level. A standard truck and a standard loader represent vehicles for transport of materials.

The study aims at giving a basis for further investigations. The choice of power source is analysed on the basis of what kind of work the vehicles perform and on the basis of emissions, heat, risk of fire, service, need of space and economy. The examined power sources are the diesel engine, the electric motor and the fuel cell. Combinations of power sources are called hybrids and are also seen as a power source alternative. Examined energy carriers are diesel, rape methyl ester, synthetic diesel, hydrogen and electric power. The disposing of spent nuclear fuel will begin around 2017. The power sources has therefore been analysed from both a present and a future point of view.

Using diesel engines in the deep repository will affect the local environment by its emissions. Compared to using electric motors it also emits more heat. Extra emissions and heat may affect the need of ventilation. Handling diesel and diesel spill on hot surfaces constitute the risk of fire for today's use of diesel in mines. The electric motor does not emit emissions and has a much higher efficiency compared to the diesel engine. The higher efficiency leads to less heat emission. Electric vehicles use batteries, cable or trolley to deliver power to the motor. With cable and trolley the vehicle mobility decreases. The fire risk using a cable constitutes of flash-over in power centrals and of short-cuts in the cable. The everyday economy using diesel engines or electric motors will be affected by the price of electric power and the price of the diesel engine fuel.

Fuel cell vehicles using pure hydrogen have total mobility and emit only water. The development of fuel cell vehicles needs more time to be commercial. If fuel cells were to be used in the deep repository the most promising way of storing hydrogen would be metal hydrides that are fuelled above ground. This way of storing hydrogen decreases the risk of detonation. If combinations of power sources, so called hybrids, are used, one can benefit of the advantages of the different power sources.

Keywords: vehicle, underground vehicle, power source, fuel, fuel cell

*Department of Biometry and Engineering, SLU, Swedish University of Agricultural Sciences
Box 7032, SE-750 07 Uppsala*

ISSN 1401-5765

FÖRORD

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Per Ernfors på Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) och till ämnesgranskare Magnus Lindgren på Institutionen för Biometri och teknik på Sveriges Lantbruksuniversitet för vägledning och stöd under arbetet med uppsatsen. Stig Pettersson på SKB och Bo Nirvin på SKB International Consultants AB har bidragit med kunskap och erfarenhet under arbetets gång, vilket har varit mycket uppskattat.

Jag vill även tacka de personer inom SKB och inom andra företag och organisationer som bidragit med information till uppsatsen och till de som på annat sätt hjälpt mig i uppsatsskrivandet.

Christian Nyström

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND	1
1.2 SYFTE.....	1
1.3 AVGRÄNSNINGAR	2
1.3.1 FORDON OCH KRAFTKÄLLOR.....	2
1.3.2 STYRANDE FAKTORER.....	2
1.4 ARBETETS UPPLÄGG.....	3
2 KRAFTKÄLLOR	5
2.1 DIESELMOTORER.....	5
2.1.1 Emissioner.....	5
2.1.2 Utveckling och framtid	6
2.2 ELMOTORN.....	7
2.2.1 Utveckling och framtid	8
2.3 BRÄNSLECELL.....	8
2.3.1 Utveckling och framtid	9
2.3.2 Bränslecellsprojekt.....	10
2.4 HYBRIDER.....	11
2.4.1 Utveckling och framtid	12
3 ENERGIBÄRARE OCH LAGRING.....	13
3.1 KOLVÄTEN	13
3.1.1 Erfarenheter	14
3.1.2 Framtiden	15
3.2 VÄTGAS.....	16
3.2.1 Framtiden	17
3.3 EL.....	17
3.3.1 Batteri.....	18
3.3.2 Kabel och Trolley.....	19
3.3.3 Erfarenheter	20
4 FORDON OCH AKTIVITETER	23
4.1 FORDON I RAMP	23
4.2 DRAGFORDON FÖR DEPONERINGSMASKIN.....	26
4.3 FORDON FÖR FRAKT AV MATERIAL	28
4.4 EMISSIONER	29
5 DISKUSSION.....	31
5.1 AKTIVITETER.....	31
5.1.1 Fordon i ramp.....	31
5.1.2 Dragfordon för deponeringsmaskin	32
5.1.3 Fordon för frakt av material.....	33
5.2 STYRANDE FAKTORER.....	34
5.2.1 Emissioner och värmeutveckling	34
5.2.2 Brandrisk.....	35
5.2.3 Service	35
5.2.4 Utrymme	36
5.2.5 Ekonomi.....	36
6 SLUTSATSER.....	37
REFERENSER.....	38

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, har fått i uppdrag av ägarna av de svenska kärnkraftverken att ta hand om deras radioaktiva avfall. SKB tar även hand om annat radioaktivt avfall, från till exempel sjukhus. Det finns tre olika typer av avfall. Dessa delas in i lågaktivt, medelaktivt och högaktivt avfall. Avfall som inte är lika långlivat och radioaktivt som det använda kärnbränslet slutförvaras idag på Slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR. Det använda kärnbränslet är planerat att förvaras på mellan 400 och 700 meters djup i berggrunden enligt den så kallade KBS 3-metoden. Denna metod innebär att använt kärnbränsle sluts in i kopparkapslar och bäddas in i bentonitlera. Just nu pågår undersökningar på två platser för att se om detta är möjligt och i så fall på vilken plats. Om allt går som planerat kommer slutförvaret att driftsättas omkring år 2017.

Under deponeringsperioden kommer ett flertal typer av transporter att äga rum i slutförvaret. Dessa är bland andra transporter av kapslar i speciella transportbehållare, bentonit, bergmaterial, återfyllnadsmaterial, betong, byggnadsmaterial, bränslen och även besökare. Det kommer alltså att behövas ett flertal olika typer av fordon. Då olika kraftkällor ger olika förutsättningar för respektive fordon är det nödvändigt att belysa konsekvenser av val av kraftkälla.

Beroende på använda kraftkällor ändras förutsättningar för driften av slutförvaret. Ventilation dimensioneras bland annat med avseende på emissioner och värmeutveckling. Dessutom kräver olika bränslen olika utrymmen samt ställer olika krav på förvaring och distribution. Brandrisk och servicebehov är även viktiga faktorer som kan komma att avgöra val av kraftkälla till aktuella fordon.

I rapporten används begreppen kraftkälla och energibärare. Med kraftkälla menas fordonets motor. I de fall bränslecellen diskuteras ses denna som kraftkälla, trots att den i sin tur driver en elmotor. Med energibärare menas det drivmedel som utgör energi till kraftkällan.

1.2 SYFTE

Denna uppsats syftar till att ge underlag för vidare studier inför val av kraftkälla till de fordon som ska arbeta i SKB:s slutförvar. Uppsatsen ämnar presentera motiv för de kraftkällor och energibärare till dessa som kan vara aktuella för drift i slutförvaret samt att motivera varför vissa kraftkällor och energibärare är mindre aktuella till olika aktiviteter i slutförvaret. Analys av kraftkällor och energibärare har gjorts utifrån ett antal styrande faktorer och med hänsyn till hur aktuella fordon kommer att arbeta.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

1.3.1 FORDON OCH KRAFTKÄLLOR

Denna studie fokuserar på transport av kapseln i transportbehållare och transport av berg- och återfyllnadsmaterial. Fordon för dessa aktiviteter benämns *fordon i ramp*, *dragfordon för deponeringsmaskin* och *fordon för frakt av material*. Med fordon i ramp avses det fordon som ska transportera kapseln med använt kärnbränsle ner till slutförvarsnivå. Detta fordon kommer att gå från mottagningsbyggnaden ovan jord eller från inkapslingsanläggningen till omlastningsplats på slutförvarsnivå och ska således kunna köras både ovan och under jord. Med dragfordon för deponeringsmaskin avses det fordon som ska transportera deponeringsmaskinen på deponeringsnivån. Deponeringsmaskinen ska kunna dras från omlastningsplats in i deponeringstunnel. Med fordon för frakt av material avses de fordon som arbetar med återfyllnad av slutförvaret samt bortförande av bergmaterial. I denna studie representeras dessa fordon av en typ av standarddumper och en typ av standardlastmaskin. För närmare detaljer kring aktiviteter och fordonsdata se kapitel 4.

De kraftkällor som undersöks i denna studie är dieselmotorn, elmotorn och bränslecellen. Kombinationer av dessa kallas hybrider som även de undersöks. Energibärare som tas upp är diesel, Fischer-Tropsch-diesel, Rapsmetylester, vätgas och el.

Då kraftkällor är bundna till en eller flera energibärare och eftersom energibärarna påverkar emissioner, brandrisk med mera, ligger fokus i studien på *användandet* av kraftkällan.

Kraftkällorna behandlas generellt med redogörelse för vilka kraftkällor som kan vara aktuella för olika transporter i slutförvaret. Ingående analys av olika modeller/typer av respektive kraftkälla har inte gjorts. Då vissa styrande faktorer (se nedan) är direkt knutna till kraftkällan behandlas dessa för godtyckliga modeller/typer av aktuell kraftkälla.

1.3.2 STYRANDE FAKTORER

Undersökta kraftkällor och energibärare har utvärderats utifrån följande styrande faktorer:

Emissioner	De emissioner som främst diskuteras är koldioxid (CO ₂), kolmonoxid (CO), kolväten (HC), kväveoxider (NO _x) och partiklar (PM).
Värmeutveckling	Värmeutveckling vid användning av kraftkällan.
Brandrisk	Brandrisk vid användning av kraftkällan och energibäraren eller hantering av dessa.
Service	Servicebehov och serviceintervall vid användning av kraftkällan. I detta ingår underhåll och reparation samt diskussion om kraftkällans livslängd.

Utrymme Utrymmesbehov vid användning av kraftkällan. Med utrymme avses vilka krav på utrymme användandet av kraftkällan ger upphov till i form av fasta installationer och lagring av material, bränsle med mera.

Ekonomi Kostnader för användning av olika kraftkällor.

De styrande faktorerna diskuteras kvalitativt. Med tanke på studiens övergripande karaktär har det inte varit möjligt att i detalj erhålla information om varje styrande faktor med avseende på respektive kraftkälla. Analys och slutsatser utifrån de styrande faktorerna ska ses som vägledande för vidare studier.

Eftersom drift av slutförvar ligger ett tiotal år fram i tiden har vid möjlighet kraftkällorna och de styrande faktorerna undersökts både i ett nuläges- och framtidsperspektiv. Driften av slutförvaret kommer att pågå under flera decennier, vilket innebär att flera framtida tidsperioder har varit intressanta att undersöka. Studien siktar på att redogöra vilken potential kraftkällan har idag, och belyser övergripande utvecklingspotential i ett 10-15-årsperspektiv. Försök har även gjorts att diskutera utsikterna för kraftkällorna för perioder ännu längre fram i tiden.

1.4 ARBETETS UPPLÄGG

Identifiering och undersökning av möjliga kraftkällor till fordon i slutförvaret har gjorts utifrån studier av rapporter och genom sökning på Internet. Sakkunniga har även bidragit med information. I möjligaste mån har information anskaffats både från institutioner såsom högskolor och universitet och från företag och andra organisationer.

För att inte utesluta alternativ av den anledning att kraftkällan, eller kraftkällan i kombination med en särskild energibärare, inte tidigare har använts på fordon under jord har målsättningen varit att beakta kraftkällor och drivmedel till fordon i ett mer allmänt perspektiv. Fordon såsom bilar, bussar och lastbilar har beaktats liksom underjordsfordon såsom lastmaskiner och dumprar. De kolvätebaserade energibärare som redovisas och analyseras i föreliggande rapport är utvalda efter en inledande studie. Urvalsprocessen för kolvätebaserade energibärare redovisas i Bilaga 1.

2 KRAFTKÄLLOR

Denna studie tar upp tre typer av kraftkällor: dieselmotorn, elmotorn och bränsleceller. Dieselmotorn och elmotorn används idag för olika typer av transportfordon. Bränsleceller är i dagsläget ämne för forskning inom fordonsindustrin och spås kunna bli ett intressant alternativ till dagens förbränningsmotorer.

Det finns emellertid ytterligare ett intressant sätt att driva aktuella fordon. Genom att kombinera olika kraftkällor kan fordonet dra nytta av de enskilda kraftkällornas fördelar. Då fordonet drivs av en kombination av kraftkällor kallas det hybrid.

2.1 DIESELMOTORER

Det finns flera olika typer av dieselmotorer: motorer med direkt insprutning, förkammarmotorer och virvelkammarmotorer. I motorer med direkt insprutning sprutas bränslet in direkt i det heta förbränningsrummet och antänds snabbt och fullständigt. I de andra två typerna startar förbränningen i en förkammare respektive virvelkammare och sprider sig sedan till cylindern där förbränningen fullbordas (Malmström & Wetterblad, 1999). I dagsläget används nästan uteslutande dieselmotorer med direkt insprutning.

Verkningsgraden på en dieselmotor är i gynnsammaste fall 45 procent (Hellberg, 2000). Resten av den insatta kemiska energin försvinner i form av värme med avgaser, strålning, kylvatten och friktion (Malmström & Wetterblad, 1999).

2.1.1 Emissioner

Förbränningsmotorer förbränner energibärare med kolväten tillsammans med syret i luften. Kvar i avgaserna från motorn blir framförallt koldioxid, vattenånga och kväve (Malmström & Wetterblad, 1999). Kvävet i luften deltar inte i förbränningen men en liten del omvandlas till kväveoxider. Till detta kommer att koloxid bildas, vilket är en giftig gas.

Enligt Johan Sporre på Scania (pers. kom., Sporre, 2005) följer teknikutvecklingen för industrimotorer¹ och motorer som används i lastbilar varandra men med olika tidsperspektiv. Motorer som används för lastbilar för transporter på vägar är inte reglerade på samma sätt som de motorer som används inom industrin. För lastbilsmotorer finns Euro-stegen² medan det finns andra system för industrimotorer. Industrimotorer kan delas in i envarvs- och allvarvsmotorer. Envarvsmotorer, det vill säga motorer som körs på ett varvtal för att till exempel generera el, kommer inte att bli reglerade förrän från 2007 medan allvarvsmotorer har varit emissionsreglerade sedan slutet av 1990-talet. År 2011 kommer allvarvsmotorer att komma upp i Euro-5 nivå vad gäller NOx och partiklar och använda motsvarande tekniker.

¹ Industrimotorer används i maskiner för bland annat byggnation, anläggning, jordbruk och skogsbruk.

² "EURO" används ofta som beteckning för avgaskravnivå för fordon och motorer. EURO är ingen officiell beteckning men används ofta i sammanhanget. (www, Naturvårdsverket, 2006)

I tabell 1 redovisas de avgaskrav som kommer på mobila maskiner/traktorer fram till slutet av år 2014. Det som redovisas är hur många g/kWh som får släppas ut av CO, HC, NO_x och PM. Kategorierna kallas Steg och representeras av ett antal delsteg.

Tabell 1. Avgaskrav för mobila maskiner/traktorer från 2006-01 till 2014-10 (Källa: EU, 2004)

Steg-kategori	Motor-effekt kW	Från och med	CO ¹ (g/kWh)	HC ¹ (g/kWh)	NO _x ¹ (g/kWh)	PM ¹ (g/kWh)
Steg IIIA	130-560	2006-01	3,5	4,0	4,0	0,2
Steg IIIA	75-130	2007-01	5,0	4,0	4,0	0,3
Steg IIIA	37-75	2008-01	5,0	4,7	4,7	0,4
Steg IIIA	19-37	2007-01	5,5	7,5	7,5	0,6
Steg IIIB	130-560	2011-01	3,5	0,19	2,0	0,025
Steg IIIB	75-130	2012-01	5,0	0,19	3,3	0,025
Steg IIIB	56-75	2012-01	5,0	0,19	3,3	0,025
Steg IIIB	37-56	2013-01	5,0	4,7	4,7	0,025
Steg IV	130-560	2014-01	3,5	0,19	0,4	0,025
Steg IV	56-130	2014-10	5,0	0,19	0,4	0,025

¹ CO = Koloxid; HC = Kolväten; NO_x = Kväveoxider; PM = Partiklar.

Koldioxid är inte reglerat i dessa Steg-kategorier. Mängden koldioxid kan emellertid uppskattas med att det vid förbränning bildas 3250 g CO₂/kg bränsle (diesel) (Tillman m.fl., 1991).

2.1.2 Utveckling och framtid

Inom lastbilssektorn drivs mycket av utvecklingen av dieselmotorer av emissionskrav som sätts liknande som med Steg I-IV. För lastbilar kallas stegen Euro. Under oktober 2005 börjar Euro 4-lagstiftning gälla för nya motorer, och från oktober 2008 gäller Euro 5. Det som görs på Scania för att sänka utsläppsnivåerna är dels att recirkulera avgaser med en teknik som kallas EGR (Exhaust Gas Recirculation) och dels att efterbehandla avgaser med tillsats (www, Scania, 2005).

EGR-teknik används för att Scania Euro 4-fordon ska kunna drivas på vanlig diesel utan tillsatser (www, Scania, 2005). Det fungerar så att en del av avgaserna kyls av och leds tillbaka till motorn. På så sätt sänks förbränningstemperaturen vilket leder till sänkta kväveoxidutsläpp. Ett högt insprutningstryck minskar sedan utsläpp av partiklar.

För att uppnå Euro 4 på de starka V8-motorerna kommer Scania även att använda SCR-teknik (Selective Catalytic Reduction) (Nordström, 2005). Tekniken innebär att motorns avgaser efterbehandlas med följden att utsläppen av kväveoxider minskar. En urealösning, AdBlue™, sprutas in i motorns avgassystem. På så sätt kan en kemisk reaktion kontinuerligt upprätthållas i katalysatorn. Urealösningen och kväveoxiderna omvandlas till kvävgas och vatten. En nackdel med SCR är att en extratank med urealösning måste användas på fordonet.

HCCI står för Homogeneous Charge Compression Ignition och kan översättas som homogent laddad kompressionständning. Denna typ av motor finns ännu ej på marknaden men forskning pågår, bland annat i Lund och i Stockholm.

HCCI-motorn fungerar som en blandning av ottomotorn och dieselmotorn (www, lth, 2005). Likt ottomotorn används en blandning av bränsle och luft. Till skillnad från ottomotorn antänds inte blandningen med hjälp av en gnista utan självantänds, likt bränslet som sprutas in i en dieselmotor. HCCI-motorn komprimerar alltså en fullständigt blandad bränsle/luft-blandning (homogen bränsle/luft-blandning). För självantändning krävs ett högt kompressionsförhållande. Blandningarna som används är kraftigt utspädda för att inte antända för fort. Detta görs antingen genom att recirkulera avgaser eller med luftöverskott, eller både och. För HCCI-motorn används alltid fullt luftflöde in i motorn.

Fördelarna med HCCI-motorn är flera: Den ger hög verkningsgrad redan på låga laster och den ger mycket låga utsläpp av kväveoxider (www, lth, 2005). Den har inte heller samma problem med utsläpp av sot som en traditionell dieselmotor har. Anledningen till att utsläppen av kväveoxider är så låga är att förbränningstemperaturen är låg, vilket den är i hela förbränningsrummet. Det är bland annat den låga förbränningstemperaturen som leder till en av HCCI-motorns nackdelar, nämligen höga utsläpp av kolväten. Detta är en följd av att allt bränsle inte brinner fullständigt. En annan nackdel med HCCI-motorn är att det är svårt att reglera tändtidpunkten.

Enligt Urban Johansson (pers. kom., Johansson, 2005) på Powertrain Development på Scania ligger fokus inom motorutveckling på Scania på emissionslagstiftning i olika länder. Fortsatt handlar det om att få bästa tänkbara bränsleförbrukning. Verkningsgraden på dieselmotorn kommer inte att göra några stora kliv i framtiden, det är framförallt den totala transporteffektiviteten som Scania satsar på. Denna påverkas till exempel av luftmotstånd och körsätt. En trolig utveckling för dieselmotorer är att olika typer av förbränning kommer att användas i samma motor. Eftersom HCCI-teknik har problem med för höga ljudnivåer och för höga tryck vid förbränning är det möjligt att dieselförbränning används vid full last och HCCI-förbränning vid lägre laster.

Dieselmotorer kommer successivt att gå mot HCCI-teknik (pers. kom., Johansson, 2005). Att ha en ren HCCI-motor ligger långt fram i tiden. Utvecklingen för lastbilar, lastmaskiner och liknande kommer förmodligen att innebära att HCCI-teknik kommer att "smyga" sig in på området. Liknande kommer att hända på bensinmotorsidan, tror Urban Johansson. Därför kommer dieselmotortillverkare fortfarande att kalla sina dieselmotorer med HCCI-teknik för dieselmotorer.

2.2 ELMOTORN

En elmotor omvandlar elektrisk energi till rörelseenergi. Det går att dela upp elmotorer i växelströmsmotorer och likströmsmotorer. En växelströmsmotor består i princip av en spole och två magnetpoler (www, NE, 2005). Spolen är lindad på en rotor (en järncylinder) som ligger mellan de två magnetpolerna. När strömmen som tillförs spolen kommer in i magnetfältet uppstår en kraft som driver runt rotorn. I och med detta har mekanisk energi skapats ur elektrisk energi.

Exempel på tyngre fordon som i dagsläget kan drivas med elmotor är bilar, bussar, lastmaskiner och lastbilar. Elmotorn kan även användas tillsammans med en annan typ av motor. Då kallas fordonet för hybrid. En fördel med elmotorn är att den kan användas som generator för att ta tillvara på bromsenergi (Hellberg, 2000).

Under de mest gynnsamma förhållanden omvandlar en elmotor 95 procent av elenergin till mekanisk energi (Hellberg, 2000). Detta kan jämföras med dieselmotorn som omvandlar maximalt 45 procent av dieselns energiinnehåll till mekanisk energi. I realiteten är emellertid verkningsgraden för båda typer av motorer lägre än den maximala verkningsgraden.

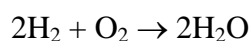
2.2.1 Utveckling och framtid

Elmotorer kan delas upp i kommutatormotorer och motorer utan kommutator³ (Ehsani m.fl., 2004). Kommutatormotorer kan sägas utgöras av den traditionella DC-motorn som tack vare mogen teknik och en enkel reglering är vanligast för användning i elektriska drivsystem. På senare tid har emellertid elmotorer utan kommutatorer blivit intressanta. Fördelar med dessa är bland annat högre effektivitet, högre effekttäthet samt att de är tillförlitligare och kräver mindre underhåll.

2.3 BRÄNSLECELL

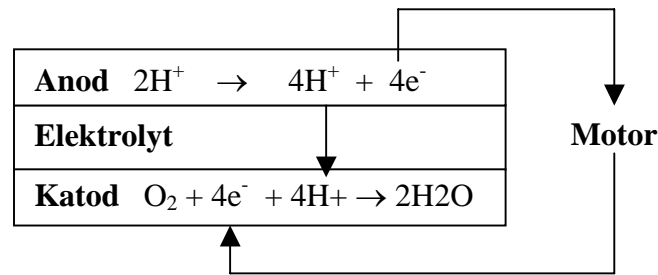
Vanligtvis definieras en bränslecell som en elektrokemisk apparat som kontinuerligt omvandlar tillsatt bränsle till elektrisk energi (och värme) så länge reaktanter tillförs till elektroderna (Larminie & Dicks, 2003).

Den grundläggande principen för bränsleceller är att väte förbränns i följande reaktion (Larminie & Dicks, 2003);



Reaktionen medför att bränslecellen kan ta tillvara elektrisk energi. Bränslecellen består av en anod, en katod och en elektrolyt. Bränsle, i form av vätgas, tillförs anoden och delas upp i protoner (H^+) och elektroner (e^-). Elektrolyten tillåter endast H^+ att passera till katoden så elektronerna leds till den belastning bränslecellen har, till exempel en motor, och vidare till katoden. Samtidigt tillsätts syre till katoden som tillsammans med protonerna och de ditledda elektronerna bildar vatten (H_2O). Principen visas i Figur 1.

³ Kommutatorer är ledande segment i slutet av motorns rotor (Young & Freedman, 2000).



Figur 1. Principen för en bränslecell. (Omgjord från Larminie & Dicks (2003), Figur 1.3, sida 3)

Cellspänningen för en bränslecell är i vila 1.23 V och vid belastning mellan 0,6-1 V. Den teoretiska verkningsgraden på en bränslecell är 83 %, men i praktiken rör det sig om lägre värden beroende på typ av bränslecell (www, Chalmers, 2005).

Det finns flera olika typer av bränsleceller. PEM-bränslecellen är den som tas upp i denna studie. PEM står för Proton Exchange Membrane. Dessa drivs på ren vätgas och verkningsgraden är 80 procent (Waara, 2004). Arbetstemperaturen är 80 °C. Det finns även andra typer av bränsleceller, med olika förutsättningar för olika applikationer. PEM-cellen bedöms kunna användas på mobila enheter.

2.3.1 Utveckling och framtid

De aktörer, såsom personer och företag inom fordonsindustri och bränslecellsprojekt, som Waara (2004) har varit i kontakt med i samband med studien *Förstudie – Bränslecellsanvändning under jord* är positiva till bränslecellsteknologin. De anser att teknologin behöver 10-15 år på sig för att bli kommersiellt intressant. Waara summerar även hur läget är i olika sektorer: bilsektorn, transportsektorn och gruvsektorn.

De flesta biltillverkare har idag antingen färdiga bilar eller prototyper med bränslecellsteknologi. Vissa satsar på PEM-cellen som APU (Auxiliary Power Units) och andra använder den för att driva fordonet. Waara (2004) upplever att forskningen inom bilsektorn är livaktig och långt framskriden vad gäller PEM-celler. Enligt Waara (2004) finns ingen utveckling för framdrivning med hjälp av bränsleceller inom lastbilssektorn. Volvo visar intresse för APU:s för lastbilar.

Inom gruvsektorn har Waara varit i kontakt med Sandvik-Tamrock som visar intresse för bränslecellsteknologin och utvecklingschefen ser ett bränslecellsdrivet fordon i företagets flotta inom tio år (Waara, 2004). På grund av mönster i effektuttag tror man att bränsleceller lämpar sig bättre för truckar än för lastmaskiner. Sandvik-Tamrock tror mer på ett hybridfordon med bränsleceller än på rena bränslecellsfordon. Man planerar för forskning och utveckling inom bränslecellsområdet.

En för denna studie viktig slutsats i Waaras rapport (Waara, 2004) är att det i en underjordsgruva inte går att driva en lastmaskin på 315 kW med vätgasmatade bränsleceller. Effektregeringen är för långsam och bränslecellen klarar inte de effekttoppar som en lastmaskin behöver. Därför måste ett hybridssystem användas och bränslecellen kan då

dimensioneras ner för optimal underhållsladdning av batterier eller superkondensatorer. Om så blir fallet behöver ej överskottsenergi eldas upp i resistorer.

Waara (2004) har även varit i kontakt med bränslecellstillverkaren Ballard. Ballard använder endast PEM-celler. De säger att livstiden för en PEM-cell är ca två år men att de arbetar med att förlänga PEM-cellens livstid.

2.3.2 Bränslecellsprojekt

2.3.2.1 Underjordslok

Fuelcell Propulsion har i samarbete med Vehicle Projects LLC tagit fram ett bränslecellsdrivet fyratonslok för gruvdrift (Miller & Barnes, 2002). Grunden för bränslecellsloket är ett batterilokomotiv och jämförs med detta. Batteriloket lagrar energi med ett 52-cells bly-syrabatteri. Bränslecellerna är av typen PEM och får väte av en lågtemperaturmetallhydrid. Metallhydriden är lättare än bly-syrabatteriet och bränslecellsversionen av loket är 30 % lättare än loket som drivs av batteri. Hydriden lagrar 1,4 viktprocent väte vilket ger tre kg väte på metallegeringsvikten 213 kg. Med en genomsnittlig effekt på 6 kW räcker detta i åtta timmar. Förväntad laddningstid är ungefär en timme. Tömd hydridbädd på loket går att byta till en laddad. År 2002 hade loket endast testats på ytan men skulle provas i en gruva. Projektet visar på låga parasitförluster och låga ljud. Enligt Miller & Barnes (2002) kan bränslecellsfordon trots de tysta PEM-bränslecellerna ge upphov till en del ljud på grund av lufthanteringssystemet. För det framtagna loket är ljudnivån emellertid låg. Inom projektet har flera riskbedömningar/tester genomförts.

Både batteriloket och bränslecellsloket ger nollutsläpp. Det framtagna bränslecellsloket har högre nettokraft, bättre energilagring, högre gravimetrisk energi och effektdensitet, högre volymetrisk effektdensitet och snabbare laddning (Miller & Barnes, 2002). Den har lägre volymetrisk energidensitet och den är något mer högljudd. Då vikten inte är av betydelse drar Miller & Barnes slutsatsen att en ideal lagring av energi för applikationer för underjordslok är i form av säker och kompakt metallhydrid.

Fuelcell Propulsion Institute och Vehicle Projects LLC har planer på att bygga ett större lok för underjordsanvändning (Miller & Barnes, 2002). Detta skulle vara på 10-25 ton. Dessutom finns planer på att bygga ett lok i full storlek för militära ändamål.

2.3.2.2 Bränslecellsbussar

Ett pågående projekt inom EU, CUTE (Clean Urban Transport for Europe), är Europadelen av världens största bränslecellsbussprojekt och inbegriper bränslecellsdrivna vätgasbussar för kollektivtrafik. Stockholm är en av tio städer som testar bussarna. Elmotorn drivs av en 200 kW bränslecells-enhet (PEM-bränsleceller) med vätgas i trycksatta behållare (www, Miljöbilar, 2006). CUTE-projektet inbegriper inte bara själva bussarna utan även tankstation och verkstad för bussarna.

I Waara (2004) uppskattar kontakt på Åf (Ångpanneföreningen) att priset för driften av bussarna är ungefär dubbelt så stor som konventionell dieseldrift. Kostnaden beror helt och

hållet på det elpris man för tillfället har. Verkningsgraden med den traditionella drivlinan är onödigt låg. Version 2, som kommer att byggas som en hybrid med ackumulatorer eller superkondensatorer samt utan konventionell drivlina, tros ha en fördubblad verkningsgrad. Priset per kilometer närmar sig då dieseldrift.

I Stockholm har två heltidsanställda tekniker underhållit de tre bussarna (Waara, 2004). Tillgängligheten har varit 95 % (dieselbussarna har 99 % tillgänglighet). Inga större problem eller haverier har funnits. Enligt representant på Evobus har problemen som uppstått att göra med den höga luftfuktigheten i Stockholm. Detta har gett problem med den elektroniska styrningen av bränslecellerna.

Representanter från Åf och från Stockholms Miljöförvaltning tror att bränslecellsdrivna bussar kan bli kommersiella om 10 (-15) år (Waara, 2004). Dagens teknologi är för dyr och komplicerad och har för kort livslängd. De menar att kommande buss måste vara en hybridversion för att ge bättre ekonomi.

2.3.2.3 HyTRAN

HyTRAN (Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Road Transportation) är ett konsortium som har som övergripande mål att med tanke på kostnad och prestanda föra bränslecellsteknologin mot en kommersiellt genomförbar lösning (Ekdunge, 2005). Volvo är koordinator för programmet och tidsramen är 2004-2008. Sammanlagt deltar nitton aktörer fördelade på sju länder.

HyTRAN har som mål att utveckla två bränslecellssystem, ett 80 kW bränslecellssystem samt ett 5 kW bränslecellssystem som får vätgas genom dieselomvandling. Båda använder PEM-bränsleceller. 80 kW-systemet är tänkt för fordonsdrift medan 5 kW-systemet är tänkt att driva APU (Auxiliary Power Units).

2.3.2.4 Scania

Scania håller koll på vad som händer inom bränslecellsforskningen men gör inget aktivt, vare sig vad gäller APU eller framdrivning. Urban Johansson (pers. kom., Johansson, 2005) tror inte att bränslecellsteknologin är något som kommer att användas inom lastbilsområdet de närmaste 25 åren. Han tror att bränsleceller måste börja användas på andra områden innan det kan bli aktuellt för fordon.

2.4 HYBRIDER

Med hybrid avses fordon som drivs både med förbränningsmotor och med elmotor och batteri (Hellberg, 2000). Med hybriddrift kan förbränningsmotorn arbeta vid den belastning som är mest effektiv. En annan fördel är att elmotorn kan användas som generator och lagra energi vid inbromsning. Nedanstående information om hybriddrift är hämtad ur Kommunikationsforskningsberedningens rapport "El- och hybriddrift av buss och lastbil" (Hellberg, 2000). I kapitel 5 diskuteras även möjligheten av använda hybrider med bränsleceller samt med trolleydrift.

Det är inte självklart att tunga fordon med hybriddrift kan bli energieffektivare än ett motsvarande dieseldrivna fordon. Med ett genomtänkt och optimerat hybridsystem kan emellertid emissionerna minskas. Driftkostnader kan även sänkas genom att laddning av batteri sker från nätet istället för att ladda via fordonets generator.

Det finns två typer av hybrider: seriehybriden och parallellhybriden. En seriehybrid drivs av en elmotor. Förbränningsmotorn och elmotorn ligger i serie där förbränningsmotorn driver en generator som i sin tur driver elmotorn. Den vanligaste varianten av seriehybrid får kraft från två källor: förbränningsmotorn och ett kemiskt batteri. Eftersom förbindelsen mellan förbränningsmotor och drivhjul inte är mekanisk kan man ha mer eller mindre konstant belastning på motorn. Detta ger förutsättningar för låga emissioner. Fordonet kan även konstrueras så möjlighet finns att köra emissionsfritt begränsade sträckor. Mer än halva effekten måste tas från batterierna så batterier som används måste ha hög effekttäthet. De stora batterierna ger hög vikt och höga kostnader för drivsystemet.

I parallellhybriden drivs hjulen antingen av en förbränningsmotor, en elmotor eller både och. Vid normal drift drivs drivhjulen av förbränningsmotorn men då extra kraft behövs används elmotorn. Jämfört med seriehybriden påverkas förbränningsmotorn i en parallellhybrid mer av körcykeln. Detta medför att emissionerna ofta blir högre. Minskat effektbehov gör emellertid batterierna mindre som i sin tur leder till minskad vikt och minskade kostnader. Om seriehybriden i första hand ger lägre emissioner ger parallellhybriden lägre bränsleförbrukning.

2.4.1 Utveckling och framtid

Scania utvecklar hybrider med dieselmotorer som genererar ström för en elektrisk drivmotor som vid inbromsning kan lagra energi i superkondensatorer (pers. kom., Johansson, 2005). Hybrider är intressant för exempelvis bussar och distributionsbilar som då kan köras med mindre och lättare motorer. På tunga transporter tyder allt på att dieselmotorn kommer att fortsätta att användas, även på hybridapplikationer. På 10-15 års sikt tror Urban Johansson att det finns hybridapplikationer för tung drift. Då medeleffektuttaget är högre är det emellertid inte lika intressant att använda hybridlösningar för tung drift.

Ett projekt som är av särskilt intresse för denna studie är Fuelcell Propulsion Institute, Vehicle Projects med fleras projekt där en lastare som ska drivas av bränsleceller, elmotor och batterier tas fram (www, Fuelcell Propulsion Institute, 2005). Målen med projektet är, förutom att ta fram en bränslecellslastare för gruvor, att utveckla ett tanksystem baserat på elektrolys av vatten samt att utreda systemets produktivitet och säkerhet i en gruva.

3 ENERGIBÄRARE OCH LAGRING

De energibärare som har undersökts är indelade i kolväten, vätgas och el. Inom gruppen kolväten beaktas diesel (framförallt diesel miljöklass 1), rapsmetylester och syntetisk diesel. För vätgas behandlas vätgaslagring i så kallade hydrider. En hydrid är i detta sammanhang ett material som kan lagra väte för att sedan kunna släppa det ifrån sig. Inom gruppen el redovisas olika sätt att leverera el till ett fordon. Här behandlas batterier, kabel och trolley. Med trolleydrift menas att fordonet får ström av en kontaktledning via en strömavtagare.

3.1 KOLVÄTEN

Diesel Miljöklass 1 (MK1) är den renaste kommersiella dieseln för vägtransport. Jämfört med tidigare använda dieslar har den bättre cetantal (Malmström & Wetterblad, 1999). De naturliga smörjegenskaperna som äldre dieslar hade finns inte längre eftersom svavelinnehållet är mindre och aromaterna borttagna. Därför är tillsatser nödvändiga.

Fischer-Tropsch-diesel är en syntetisk diesel som tillverkas av syntesgas. För att få syntetisk diesel framställs gas av en energirik råvara som innehåller kol (Aldén m.fl., 2002). Detta kan till exempel vara slam, brunkol eller träflis. Gasen renas till syntesgas, $\text{CO} + \text{H}_2$, som sedan kan omvandlas till långa molekyler av kol och väte som kallas paraffiner. Fischer-Tropsch-bränslen kan även tillverkas ur naturgas. Då kallas processen Gas-To-Liquids-process.

Rapsmetylester, RME, tillverkas ur rapsolja och kan användas i dieselmotorer utan att dessa behöver byggas om. Vid användning av RME minskar effekten med 5-10 procent jämfört med om diesel används, och mängden kväveoxider ökar (Malmström & Wetterblad, 1999). RME späder ut motoroljan mer än vid dieseldrift, särskilt vid låg belastning på motorn. Bränslet går att blanda med andra bränslen. Jämfört med andra dieselbränslen stelnar RME lättare i kyla.

Energiinnehållet mellan de tre bränslena skiljer sig något åt. För senare beräkningar i denna studie har emellertid energiinnehållet i diesel MK1 använts. Detta är 43,1 MJ/kg (www, Preem, 2006).

Risken för brand vid lagring och tankning av Fischer-Tropsch-diesel, diesel och rapsmetylester är likartad (pers. kom., Källberg, 2006). Samtliga dessa bränslen kan användas i underjordsanläggningar. En förutsättning är dock att en riskbedömning utförs där de speciella risker en brand kan innebära i en underjordsanläggning beaktas. Även på den tekniska utformningen ställs speciella krav för att den skall kunna anses betryggande, till exempel avluftningens utformning och placering.

De förhållandevis låga tändtemperaturerna (i storleksordningen 250 grader C) för dessa produkter innebär en brandrisk om de kan komma i kontakt med heta ytor på fordon i samband med tankning (överspolning) (Pers. kom., Källberg, 2006).

3.1.1 Erfarenheter

3.1.1.1 Scania

Scania tillåter RME-inblandning i diesel med 5 procent, både i lastbilmotorer och i industrimotorer. Bli inblandningen för hög stiger kväveoxidutsläppen (NO_x). Johan Sporre (pers. kom., Sporre, 2005) på Scania Industri- och Marinmotorer menar att det skulle gå att optimera en motor så att NO_x-emissioner inte ökar jämfört med dieselanvändning. Att enbart använda RME som bränsle kan leda till försämrad livslängd på motorn. RME har sämre smörjande förmåga än diesel och har relativt dåliga köldegenskaper.

Scania tycker att syntetisk diesel är intressant och kommer att utföra prov för att säkerställa att detta kan användas utan driftstörningar. Johan Sporre (pers. kom., Sporre, 2005) menar att fördelar med syntetisk diesel är att det kan framställas ur ickefossil råvara, att det har potential att användas direkt i befintliga motorer och att det redan finns ett distributionssystem eftersom bränslet är flytande.

3.1.1.2 Flottförsök med Eco-Par

Nedanstående jämförelse av Eco-Par och diesel MK1 är hämtad ur en rapport (Aldén m.fl., 2002) som redovisar ett försök där en uppsättning fordon (därav ”flott”-försök) körs på den syntetiska dieseln Eco-Par och diesel MK1.

Under perioden oktober 2000 till december 2001 testades Fischer-Tropsch-diesel-bränslet Eco-Par på ett tiotal fordon med syftet att ”utvärdera Eco-Par som drivmedel för dieselfordon under verkliga förhållanden och utan någon som helst modifiering av motorerna”. Målen var bland andra att visa att bränslet fungerar i dieselfordon utan att modifiering av motorerna var nödvändig och att emissionerna var lägre än för diesel MK1 (från förbränning i en dieselmotor).

Det Eco-Par som användes var tillverkat av naturgas. De fordon som ingick i projektet var en lastmaskin, två traktorer, en buss, en lastbil och två personbilar. För de tyngre fordonen (inte personbilarna) varierade årsmodellerna mellan 1982-1993, personbilarna var från 1993 och 1999. Som en sidogren i projektet ingick även ett antal hyrbilar.

Driftproblem med Eco-Par framkom inte under projektet. Förändring av prestanda för fordonen i studien har inte noterats och bränsleförbrukningen för Eco-Par har varit jämförbar med diesel MK1⁴, bortsett från bussen som visade på högre bränsleförbrukning med Eco-Par. Det som presenteras i rapporten av förare och arbetsledares erfarenheter från användningen av Eco-Par kan sammanfattas med att de är nöjda med Eco-Par. De upplever oförändrad prestanda med Eco-Par jämfört med diesel.

⁴ Bränsleförbrukning har endast mätts för bussen, lastbilen och de två bilarna. Traktorerna är inte med eftersom de inte kör längre sträckor och för att arbetsmomenten gör jämförelsen mellan de två bränslena svår. (Aldén m.fl., 2002)

Två emissionstester gjordes där FT-dieseln Eco-Par jämfördes med diesel MK1. I ett av testerna användes en tung Euro 2-dieselmotor med DNOx-system⁵. Mätningen gjordes enligt ESC (European steady state cycle) och det som mättes var kväveoxider (NOx), kolmonoxid (CO), kolväten (HC) och sot. I det andra testet mättes emissionerna från en testbil i personbilsstorlek. Reglerade emissioner som mättes var NOx, PM, CO och HC. I detta test mättes även oreglerade emissioner, såsom aldehyder och polyaromater (PAH). Emissionerna mättes enligt körcykel ECE 83.05.

Emissionstestet för Euro 2-dieselmotorn visade på lägre värden med Eco-Par jämfört med diesel MK1 för de fyra reglerade emissionerna. I rapporten konstateras att för den mindre dieselmotorn var det endast partiklar som visade en klar minskning för Eco-Par jämfört med diesel MK1. CO ökar något för Eco-Par. Enligt rapporten gav Eco-Par, med några få undantag, genomgående lägre värden för de uppmätta oreglerade emissionerna med den mindre dieselmotorn.

3.1.2 Framtiden

I rapporten "Med hållbarhet i tankarna" listar Ahlvik & Brandberg (2002) två framtida scenarier med drivmedel som kan tillverkas av även förnybara råvaror och som kan komma att fungera som alternativ till dagens drivmedel för konsumtion i stor skala. De listade scenarierna är produktion av alkoholer och produktion av syntetiska råvaror. Vätgas förpassas till nischapplikationer (många av nischapplikationsdrivmedlen begränsas av svårigheter för distribution).

Ahlvik & Brandberg (2002) menar att det senare scenariot innebär att syntetiska kolväten produceras och distribueras flytande. Drivmedlet skulle först fungera som kvalitetsförbättrande komponent för dieselolja och sedan som självständigt bränsle för framtida optimerade DI- och HCCI-dieselmotorer och även som bränsle för elektrokemiska bränsleceller (som vätebärare). Att satsa på att RME ska ersätta diesel i stor skala på lång sikt avråder författarna till, bland annat med hänvisning till ekonomiska förutsättningar och låga volymer.

Tabell 2 visar vad produktion och distribution av syntetisk diesel kan tänkas kosta 2010 och 2020 och jämförs med dagens kostnad för diesel och RME. I tabellen anges priset per distribuerad produkt i kronor per dieselevivalent vilket innebär att bränslet har jämförts med diesel med hänsyn till det energiinnehåll som bränslet i fråga har.

Det är inte bara priset som är intressant att undersöka vad gäller syntetisk diesel. I framtiden kan den ge stora miljövinster genom att likt RME vara koldioxidneutral. Förgasningssteget till syntesgas med biomassa som grund är ännu inte fullt utvecklat och demonstrerat i kommersiell skala (Ahlvik & Brandberg, 2002). Grundat på kunskaper från pilotanläggningar och drift av kommersiella anläggningar med näraliggande råvaror, till exempel brunkol, bedöms emellertid förgasningssteget moget för utveckling och demonstration i kommersiell skala.

⁵ DNOx-system är ett efterbehandlingssystem för dieselavgaser som utvecklas och säljs av det företag (STT Emtec AB) som gjorde testerna med Euro 2-dieselmotorn. Systemet reducerar kväveoxider med 50% och partiklar med över 95%. (Aldén m.fl., 2002)

Tabell 2. Kostnadsuppskattningar för produktion och distribution av Fischer-Tropsch-diesel (Ahlvik & Brandberg, 2002, Tabell omgjord från Tabell 6, sida 39)

Kostnader för biodrivmedel (Inkl. distribution exkl. skatt)	Tids- ram	Prod. pris kr/l	Pris, distribuerad produkt kr/liter dieselekv.	Anmärkning
Dieselolja	2001	2	2,84 ¹	Medelpris 2001
F-T-diesel, bio-syn	2010 2020		7,6 6,3	Grov skattning Grov skattning
RME	2000	6,5	7,4	Faktisk kostnad

¹ Priset för dieselolja har beräknats för en tänkt distribution till privatkund i stor skala (vilket inte är fallet idag där den största andelen av dieseloljan distribueras till storkunder) (Ahlvik & Brandberg, 2002).

RME och Fischer-Tropsch-diesel kan tillverkas ur ickefossil råvara. Detta är intressant ur fler perspektiv än att det ger miljövinster. Bland annat EU driver frågor om att komma ifrån beroendet av olja. Johan Sporre på Scania (pers. kom., Sporre, 2005) menar emellertid att olja under många år framåt kommer att vara en betydande grund för transporter inom Europa. Bränslet är effektivt med högt energiinnehåll, god tillgänglighet och enkel hantering. ”Dieselmotorn har en fantastisk utvecklingspotential för att möta kommande emissionsregler och krav på effektiva transportlösningar även med fossila bränslen som bas”, menar Johan Sporre.

På frågan om alternativa drivmedel till dieselmotorer menar Urban Johansson på Scania (pers. kom., Johansson, 2005) att det inte är konsumtionen som är problemet, utan produktionen. Om det går att producera ett bränsle ekonomiskt och konkurrenskraftigt kommer Scania att hitta sätt att förbränna det. Det Scania gör är att förbereda sig för alternativa bränslen genom att titta på hur motorer klarar inblandningar av alternativa drivmedel.

3.2 VÄTGAS

Väte har ett energiinnehåll på 120 MJ/kg (Waara, 2004). Detta kan jämföras med diesel MK1 som har 43,1 MJ/kg. Till skillnad från diesel, som redan används i miljöer som kan liknas med ett framtida slutförvar, innebär det en del problem att använda vätgas i underjorden. Vätgas är en brandfarlig gas och det sätt som verkar aktuellt att lagra gasen på för att kunna använda den i ett slutförvar är så kallad hydridlagring.

En hydrid är ett material som består av element, såsom till exempel metaller, och väte (www, HERA, 2005). Hydrider kan användas för lagring av väte. I denna studie tas endast metallhydrider upp, detta på grund av att de redan har använts på fordon i olika projekt. Det finns emellertid andra material än metaller som kan lagra väte, såsom glas- och kolmaterial.

En metallhydrid är en metallegering som under vissa tryck och temperaturer kan binda väte (www, HERA, 2005). När vätgasmolekyler möter metallegeringsmaterialet delas de upp på atomär nivå och binder till den speciella struktur metallegeringen har. På detta sätt lagras vätet. Vid processen frigörs värme och för att frigöra vätet tillförs istället värme.

Waara (2004) har i och med sin rapport, som tidigare refererades till, varit i kontakt med Hera Hydrogen Storage Systems. Företaget anger att deras hydrider i dagsläget (år 2004) kan lagra 1 kg väte per 133 kg hydridbädd, det vill säga 0,75 procent. I kommande prototyp kommer denna siffra att vara 1 procent, om 2-3 år uppskattas lagringskapaciteten till 3 procent eller mer och när ”generation 2” kommer uppskattas den till 5 procent eller mer. När denna senare generation tros komma anges inte.

På uppdrag av Fuel Cell Propulsion Institute har Westinghouse gjort en preliminär säkerhetsbedömning av vätgastankad underjordsutrustning (Couatts & Thomas, 1998). Här bedöms det möjligt att konstruera bränslecellsdrivna underjordsfordon för drift i kolgruva. Så länge mängden väte som kan frigöras är begränsad till 1 kg kan säkerhetsåtgärderna hålla nere risken till samma nivå (”moderat risk”) som för i nuläget använda dieselfordon. Om mer än 3 kg väte frigörs föreligger överhängande risk för detonation. I bedömningen har två tankningssätt utvärderats, det ena är att en tankbil delvis kommer ner i gruvan och det andra är att bränslebädden är flyttbar och tankas ovan jord. Med tanke på att tankbilen innebär en risk för att mer än 3 kg väte frigörs anses det att flyttbara bränslebäddar är att rekommendera.

Vätgas har förmåga att tränga in i metaller och på sikt orsaka materialpåverkan (Waara, 2004). Material till vätgasanläggning måste därför väljas med omsorg. En annan viktig egenskap hos vätgas är att den är luktlös varför risk för kvävning finnes.

Waara (2004) har varit i kontakt med Räddningsverket som säger att de inte skulle godkänna en lagringsstation av vätgas under jord, detta med anledning av risk för gasläckor. Däremot skulle produktion under jord för omedelbar konsumtion kunna gå bra (exempelvis produktion av vätgas till mekanisk verkstad).

Med vätgas som bränsle blir ett bränslecellsfordon helt fri från emissioner (bortsett från vatten) och lagring av vätgas ombord på fordonet ger bäst verkningsgrad på systemet. Det finns emellertid en rad andra bränslen till bränslecellsfordon (Hellberg, 2000). Bränslen såsom bensin eller diesel kan omvandlas till en väterik gasblandning som i sin tur driver bränslecellerna. Verkningsgraden sjunker då samtidigt som systemet inte blir emissionsfritt.

3.2.1 Framtiden

Väte är den energibärare som många sätter sitt hopp till vad gäller energifrågan. Ämnet finns i rikliga mängder och är energirikt. Det finns emellertid ett antal ganska stora hinder på vägen och väte som energibärare till fordon ligger därför många år framåt i tiden. Med tanke på att det är mycket dyrt att distribuera förvätskade gaser och kryogena vätskor och att det krävs stora investeringar för att distribuera gasformiga bränslen i rörsystem bedömer Ahlvik & Brandberg (2002) att dessa bränslen blir hänvisade till lokala fordonsflottor.

3.3 EL

Energibärare till elmotorn är el. För att el ska komma till nytta krävs att denna levereras till kraftkällan på något sätt. Detta kan göras genom att ha batterier ombord på fordonet, genom att använda en kontaktledning eller genom att använda en kabel.

3.3.1 Batteri

En battericell består av en positiv och en negativ elektriskt ledande elektrod som skiljs åt av en elektrolyt (Åhman, 1999). Vid urladdning av cellen reduceras den positiva elektroden medan den negativa oxideras. Vid elektroderna finns strömtilledare som leder strömmen dit den ska användas. Elektrolyten får bara leda joner och för att undvika självurladdning ska den samtidigt vara en bra isolator.

För att beskriva ett batteris egenskaper används ett antal parametrar. De som tas upp i denna uppsats är energieffektivitet, specifik energi, energidensitet och specifik effekt.

Med energieffektivitet menas ”den andel inmatad energi som kan nyttiggöras vid urladdning” (Åhman, 1999, sida 6). Denna parameter påverkas framförallt av spänningsförluster och kapacitetsförluster (Åhman, 1999). Spänningsförlust uppstår bland annat på grund av inre resistans. Med kapacitetsförluster menas att parasitprocesser tar ström från nyttiga processer. Ett exempel är när ett batteri med vattenlöslig elektrolyt laddas. Där går det åt ström till elektrolys av vattnet till vätgas och syre.

Den teoretiska specifika energin definieras i Åhman (1999) som kvoten av ändringar i den fria energin och summan av molekylvikterna på reaktanterna. På detta sätt kan den maximala energin som fås i en reaktion beräknas. Teoretisk specifik energi kan inte uppnås i praktiken men används ibland som potential för lagringskapacitet. Den praktiska specifika energin mäts i Wh/kg, vilket även kan uttryckas som energidensitet, Wh/m³.

Ett batteri kan momentant ge mycket mer effekt än vad som kan ges under en lång period. Specifik effekt är ett mått på hur mycket effekt per viktenhet (W/kg) som kan ges av batteriet (Åhman, 1999). Måttet är starkt beroende av hur urladdat batteriet är och anges därför som W/kg vid 80 % DoD (depth of discharge), det vill säga W/kg när batteriet är tömt till 80 procent.

3.3.1.1 Batterityper

Blybatterier har länge använts på fordon. Enligt KFB-rapport 2000:44 (Hellberg, 2000) har blybatteri lågt energiinnehåll vilket ger kort räckvidd. Detta gör det oattraktivt för elfordon, trots att det är relativt billigt. Enligt rapporten finns det inget som talar för att räckvidden kommer att kunna ökas tillräckligt mycket.

Nickel-metallhybridbatterier lagrar 2-2,5 gånger mer energi per viktenhet än blybatteriet. Enligt KFB-rapport 2000:44 (Hellberg, 2000) är det denna batteriteknik som uppvisar bäst egenskaper för batterifordon och hybrider på medellång sikt. Det som talar emot att batteriet får stort genomslag är att kostnader för att tillverka dem är höga, vilket de även beräknas vara i framtiden.

Litiumbatterier lagrar mycket energi, väger lite, kan laddas många gånger och har en verkningsgrad på över 95 procent. Litiumbatterier är enligt batterikonsortiet United States Advanced Battery Consortium (USABC) den starkaste kandidaten som framtidens batteri till fordon (Hellberg, 2000). Det återstår emellertid mycket utvecklingsarbete för att litiumbatterier ska kunna bli konkurrenskraftiga alternativ för drift av bilar.

Flera företag har tagit fram litium-metal-polymerbatterier som har en specifik energi på över 100 Wh/kg och energidensitet på över 100 Wh/l. Tekniken som till exempel Batscap och Avestor använder sig av gör batteriet fritt från vätskor och gelar (www, Batscap, Avestor, 2005). Det består av fyra tunna filmer som utgör katod, anod, strömledare och elektrolyt. De nämnda företagen har båda tagit fram litium-metal-polymerbatterier som applicerats på elbilar.

Tabell 3 sammanfattar batterierna i siffror. Litiumbatterier verkar i dagsläget vara det bästa alternativet prestandamässigt.

Tabell 3. Olika typer eller tekniker för batterier med information om dess energiinnehåll, kraft och antal cykler. Värden inom parantes är förväntade värden för kommersiella batterier (Källa: www, Avestor, 2005)

Batterityp/Teknik	Specifik energi (Wh/kg)	Energidensitet (Wh/l)	Specifik kraft (W/kg)	Cyklar
Bly-syra	36	86	180	600
Litium-jon	138	210	430	550
Litium-metal-polymer (prototyp Avestor)	121 (120)	143 (160)	241	300 (800)
Nickel-metall-hybrid	63	150	200	800

Vid laddning av bly-syrabatterier bildas gas (väte). För att inte koncentrationen av gas ska öka till explosionsfarlig nivå krävs att ventilationen för laddningsplatsen är tillräcklig⁶ (www, Tudor, 2005). Lokalen bör även vara målad med syrafast färg på golv och väggar och brandsläckare och ögonspol ska finnas. Gasbildning av övriga batterityper har inte undersökts.

3.3.2 Kabel och Trolley

Med trolleydrift, eller drift med strömskena, menas att ström tas till fordonet från en kontaktledning via en strömvtagare. Trolleydrift används bland annat på mycket stora dumprar vid dagbrott där fordonen har kapaciteter på 1000-tals kW. Det finns även tillämpningar för underjordsanvändning av trolley. Här används de till dumprar och lok.

Med kabeldrift avses att el levereras till fordonet via en kabel. Kabeln sitter på fordonet virad runt en trumma.

⁶ Ventilering enligt anvisning i Svensk Standard SS-EN 50272-3 C1, utgiven av Svenska Elektriska Kommissionen.

3.3.3 Erfarenheter

3.3.3.1 Lastmaskiner

I Kirunagruvan används 14 stora eldrivna lastmaskiner av märke TORO 2500 (pers. kom., Levin, 2005). Dessa lastar 25 ton i skopan. Gruvan har dessutom två mindre elektriska lastmaskiner som lastar 15 ton samt två stycken dieseldrivna lastmaskiner som lastar 21 ton.

Anledningen till att Kirunagruvan använder elektriska lastmaskiner är bland annat att arbetsmiljön, i form av lägre emissioner, blir bättre (pers. kom., Levin, 2005). Ventilationskostnader minskas dessutom avsevärt. En fördel under själva arbetet är att de elektriska lastmaskinerna kan arbeta nära den optimala verkningsgraden. Om dieseldrivna lastmaskiner skulle användas till samma last som den som de eldrivna TORO 2500 tar skulle dieselmotorn behöva vara mycket större.

Nackdelen med de elektriska lastmaskinerna är den sämre flexibiliteten jämfört med dieseldrivna lastmaskiner (pers. kom., Levin, 2005). Lastmaskinerna drivs med hjälp av kabel och när de behöver flyttas används mobila dieselgeneratorer. Detta går emellertid smidigt. Trumman med kabel väger 3 ton, är 330 meter och sitter på fordonet.

Det ställs högre krav på underhållspersonal (kompetenskrav) om eldrivna lastmaskiner används (pers. kom., Levin, 2005). Underhållet inkluderar inte bara fordonen utan även högspänningsteknik i gruvan. Jämfört med dieseldrivna lastmaskiner kräver de elektriska mer underhåll eftersom de bär på mer kringutrustning, till exempel trumman med kabel. Det är betydligt mindre underhåll på själva elmotorn med tillhörande system jämfört med dieselmotorer.

Den ekonomiska livslängden är större på den eldrivna lastmaskinen än på den dieseldrivna (pers. kom., Levin, 2005). För dieseldrivna lastmaskiner krävs motorbyte efter 12000-15000 timmar. Kirunagruvan har haft sina stora elektriska lastare i 10 år och har inte behövt byta ut elmotorerna i dessa. Att använda eldrivna lastmaskiner innebär en högre kapitalkostnad men i längden blir kostnaden inte högre än om dieseldrivna lastmaskiner används, snarare billigare, menar Levin.

Värmeutvecklingen är lägre för de eldrivna lastmaskinerna jämfört med de dieseldrivna (pers. kom., Levin, 2005). Brandrisken är emellertid lika stor för de olika typerna av lastmaskin. För de eldrivna utgörs brandrisken av om det blir överslag i el-central och om det blir kabelbrand på grund av kortslutning i kabel. För dieseldrivna lastmaskiner utgörs brandrisken av själva dieseln och om den kommer på heta ytor.

Det dieselbränsle som används är diesel miljöklass 3 (pers. kom., Levin, 2005). Detta lagras i tankstationer på tre m³.

3.3.3.2 Batteridrift och trolleydrift

För tunga fordon används batterier bland annat för lok. GIA Industri tillverkade batteridrivna lok fram till år 2005 och uppskattade att de drog ungefär 10 gånger sin egen vikt (pers. kom.,

Liimatainen, 2005). Det innebär att ett lok på 15 ton har en kapacitet att dra ungefär 150 ton, beroende på lutning. Batterierna till ett 15-tonslök, som var GIA Industris största batteridrivna lok, hade en laddningstid på 10 timmar och en arbetstid på ungefär åtta timmar. Batteripaketet var utbytbara.

Eldrivna lok finns även i Kirunagruvan (pers. kom., Levin, 2005). Dessa tar ström både från blybatterier och från kontaktledning. Strömavtagaren kan liknas vid de som vanliga tåg använder. Batterierna laddas i loket under drift.

Kiruna Electric är en eldriven dumper med trolleydrift som tillverkas av GIA Industri AB i två versioner, en som tar en last på 35 ton och en som tar 50 ton (www, GIA Industri AB, 2005). På ritbordet finns även en dumper som lastar 80 ton (pers. kom., Ramström, 2005). Förr tillverkades GIA:s Kiruna Electric så att den kunde köras med batteridrift utanför trolleybanan. Nu tillverkas den med tillhörande dieselmotor på 80-85 kW, vilket ger eldrift med en hastighet på 5-7 km/h utanför trolleybanan.

Kiruna Electric körs på två elmotorer på vardera 315-350 kW (optimeras) och tar ström från trolleyledning (pers. kom., Ramström, 2005). Jämfört med dieselmotor finns mycket mer kraft när elmotor och trolley används. Med el och trolley är det möjligt att ha konstant kraft med full last i lutning.

Strömavtagaren tas av trolleyledningen från förarhytten (pers. kom., Ramström, 2005). När den ska hitta banan igen justeras positionen automatiskt. Vid byte till stickspår från huvudbanan görs detta genom att ta av strömavtagaren och köra fordonet med diesel till stickspåret för att sedan ta upp strömavtagaren. Strömskenorna går att montera ner för att sedan monteras upp på annan plats. Trolleyledningen har transformatorer var 1000 meter. Vid överbelastning bryter ledningen på 200 millisekunder.

Zinkgruvan använder en Kiruna Electric 1050E som har fungerat över all förväntan. Den köptes 1989 och går fortfarande. Elektriska dumprar är enligt Ronnie Ahlm (pers. kom., 2005), som arbetar som arbetsledare i Zinkgruvan för Zinkgruvan Mining AB, oslagbara i ramp där de kan gå med högre hastighet än dieseldrivna dumprar. Miljöaspekter värdesätts mycket och den går tyst. Strömavtagaren på dumpern är hydraulisk med givare för lägeskontroll och föraren tar upp och ner den från hytten. Under ett arbetspass plockas strömavtagaren ofta upp och ner. Batterierna är nickelkadmiumbatterier med vatten. Dessa laddas via kontaktledningen under körning eller via kabel vid parkering. Ahlm uppskattar att den elektriska dumpern kan gå ca en kilometer på batteri med full last (45-50 ton) på plan backe. Att gå i ramp med batteri skulle inte gå bra. Ett batteripaket håller 7-8 år.

SKB använde under en period ett rampfordon med både diesel- och eldrift i SFR (Slutförvar för radioaktivt driftavfall). Elsystemet utgjordes av trolley och strömskenor. Leif Lagerstedt, projektingenjör på SKB, menar att den ursprungliga anledningen till att använda eldrift var att minska emissioner (pers. kom., Lagerstedt, 2006). När transporter planerades för SFR hade inte utvecklingen kommit lika långt som idag vad gäller katalysatorer, partikelfilter med mera för dieseldrivna fordon. Idag utgör emissioner ett mindre viktigt argument vid val mellan el- och dieselfordon än vad det gjorde under den tiden, menar Lagerstedt.

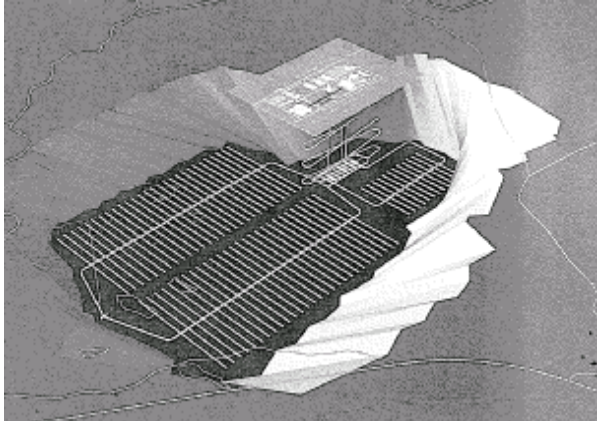
Trolleydriften i SFR förde med sig vissa problem. Den höga luftfuktigheten i kombination med salt från grundvattnet orsakade problem i form av överslag, vilket ökade brandrisken, och beläggning på strömskenor (pers. kom., Lagerstedt, 2006). Därför ansågs det inte bra att

använda trolleydrift och driften med elsystemet användes sällan och till slut monterades strömskenor med mera ned.

Andra nackdelar med trolley och strömskena var och är att systemet med kraftmatning och upphängning är dyrt, kräver mycket underhåll och tar mycket plats (pers. kom., Lagerstedt, 2006). Lagerstedt menar att vid tidigare planering av det kommande slutförvaret var det tänkt att det skulle gå mycket transporter i rampen, inte bara kapslar utan även bergmaterial. Om en hiss kommer att användas för bergmaterial kommer transporter i rampen att minska. Om rampfordonet för kapseln är det enda transportfordonet som kommer att gå i rampen blir det svårare att motivera eldrift, menar Lagerstedt.

4 FORDON OCH AKTIVITETER

I kapitel 4 kommer ett antal aktiviteter i slutförvaret att beskrivas och beräkningar kommer att utföras för fordon i ramp, dragfordon för deponeringstunnel samt för fordon för frakt av material. I figur 2 visas en ”flygbild” över hur slutförvaret kommer att utformas.



Figur 2. Överblick över slutförvaret. På bilden syns deponeringsområden med transporttunnlar som binder dem samman. Den fem kilometer långa rampen går från mottagningsbyggnad ovan jord ner till omlastningsplats på omkring 500 meters djup.

Vid markytan nära slutförvaret kommer det att finnas en mottagningsbyggnad⁷ där transportbehållare och kapsel med det använda kärnbränslet lastas på det fordon som ska transportera det ner i rampen. Nere på slutförvarsnivå kommer kapseln med det använda kärnbränslet att lastas till en deponeringsmaskin som dras av ett dragfordon. Detta fordon transporterar kapseln till en deponeringstunnel via transporttunnlar. Deponeringstunnlarna är ungefär 300 meter långa och i var och en kommer 35-40 kapslar att deponeras. Byggnade av tunnlar samt återfyllnad av dessa kommer att ske parallellt med det att kärnbränsle deponeras, fast i olika delar av slutförvaret.

4.1 FORDON I RAMP

Rampen sträcker sig från markytan till -500 meter. Den är 5000 m lång, har en lutning på 1:10 och är asfalterad (SKB, 2002). Rampfordonets hastighet och massa har uppskattats och visas i *Fordons- och rampdata* nedan.

Det fordon som studeras i denna studie för transport i rampen är det fordon som ska transportera transportbehållare med kopparkapsel med använt kärnbränsle från nollnivå till 500 m under markytan. Det ska även kunna köras ovan jord.

För att få en uppfattning om vilken kapacitet som kommer att krävas för det aktuella fordonet har nedanstående beräkningar genomförts. Beräkningarna avser endast resultera i en ungefärlig storleksordning av effektuttag som kommer att krävas. Detta för att kunna jämföra olika kraftkällors och energibärares lämplighet att användas för rampfordonet.

I vanliga fall kommer detta fordon att gå utan last uppför rampen, men nedan görs beräkningar både för fallet där fordonet går ner för rampen med last och tillbaka utan last samt för fallet där fordonet är lastat både på upp- och nerväg. Detta för att behov av att transportera tillbaka en kapsel kan uppstå.

⁷ Om inkapslingsanläggning och slutförvar lokaliserar på samma plats kommer kapseln att lastas på rampfordonet i inkapslingsanläggningen. I detta fall kommer en mottagningsbyggnad inte att behövas.

Fordons- och rampdata

m_1 = massa fordon	100 000 kg (massa fordon exklusive kapsel)	
m_2 = massa fordon	130 000 kg (massa fordon inklusive kapsel)	
v = hastighet fordon	2,78 m/s (10 km/h)	
μ = rullfriktionskoeff.	0,013 (däck-asfalt)	(Ehsani m.fl., 2004)
g = tyngdacceleration	9,81 m/s ²	
Lutning ramp	1:10	

En motor har två krafter att övervinna när den ska driva ett fordon: luftmotståndet och friktionen mot underlaget. Då luftmotståndet är starkt beroende av hastigheten, som i detta fall är låg, antas detta vara försumbart. Kvar står att övervinna rullmotståndet (f_r).

$$f_r = \mu N \quad (1)$$

där μ är friktionskoefficienten och N är normalkraften. Normalkraften betecknas

$$N = mg \quad (2)$$

där m är fordonets massa och g är tyngdaccelerationen. Den kraft (F_h) som behövs för att övervinna rullmotståndet är följaktligen

$$F_h = f_r = \mu N = \mu mg \quad (3)$$

Effektbehovet beräknas enligt ekvation (4). P_h är den effekt som behövs för horisontell drift och v är fordonets hastighet.

$$P_h = F_h v \quad (4)$$

Detta resulterar i följande

$$P_h = F_h v = \mu mg v \quad (5)$$

Ekvation (5) beräknar effekten vid hjulen på plan mark. Eftersom det finns transmissionsförluster mellan motor och hjul kommer det att behövas mer motoreffekt än det beräknade värdet. Detta redovisas i senare beräkningar.

Fordonet ska även förflyttas 1 m i vertikalled per 10 meter i horisontalled. Då krävs att den effekt som behövs för att lyfta fordonet adderas till ovanstående beräkningar. Den hastighet som fordonet har i vertikalled, v_v , är 10 procent av hastigheten i horisontalled (lutning 1:10 = 10 procent). 10 procent av 2,78 m/s är 0,278 m/s. Motverkande krafter utgörs i detta fall av fordonets massa och gravitationen.

Den effekt som behövs för att lyfta fordonet är följaktligen

$$P_v = F v_v = mg v_v \quad (6)$$

Det totala effektbehovet vid hjulen är således

$$P = P_h + P_v \quad (7)$$

Med en verkningsgrad på 90 procent på transmission mellan motor och hjul (ASAE, 1999) kommer det att krävas följande effektuttag beroende på last och lutning:

Plan mark utan last:	$P_h = F_h v = \mu m_1 g v = 35 \text{ kW}$ Med transmissionsförlust = 39 kW (53 hk)
Plan mark med last:	$P_h = F_h v = \mu m_2 g v = 46 \text{ kW}$ Med transmissionsförlust = 51 kW (69 hk)
Uppför ramp utan last:	$P = P_h + P_v = F_h v + F_v v = \mu m_1 g v + m_1 g v_v = 308 \text{ kW}$ Med transmissionsförlust = 342 kW (465 hk)
Uppför ramp med last:	$P = P_h + P_v = F_h v + F_v v = \mu m_2 g v + m_2 g v_v = 401 \text{ kW}$ Med transmissionsförlust = 445 kW (605 hk)

Om fordonet åker i 10 km/h kommer färden ner för rampen att ta 30 minuter, och lika långt för färden upp. Den effektiva driften av kraftkällan kommer alltså vara ungefär en timme. Huvuddelen av energiförbrukningen kommer att äga rum på uppvägen då 342 respektive 445 kW behövs under 30 minuter. Med antagandet att vägen till rampen, både ovan och under jord, inte lutar och att dessa sträckor tar tio minuter vardera samt att det inte krävs mer än 10 kW motoreffekt vid nedfärd i rampen erhålls följande beräkningar. I den första beräkningen antas att fordonet endast fraktar kapseln på nervägen, medan det i den andra beräkningen antas att kapseln även transporteras uppför rampen.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$51 \cdot 1/6 \text{ kWh} + 10 \cdot 0,5 \text{ kWh} + 342 \cdot 0,5 \text{ kWh} + 39 \cdot 1/6 \text{ kWh} = 191 \text{ kWh} = 688 \text{ MJ}$$

$$51 \cdot 1/6 \text{ kWh} + 10 \cdot 0,5 \text{ kWh} + 445 \cdot 0,5 \text{ kWh} + 51 \cdot 1/6 \text{ kWh} = 245 \text{ kWh} = 882 \text{ MJ}$$

Det kommer alltså sammanlagt att krävas 688 respektive 882 MJ för att driva rampfordonet ner i slutförvaret och sedan upp. Detta förutsätter att kraftkällans verkningsgrad är 100 procent. Eftersom så inte är fallet för någon av de undersökta kraftkällorna kommer energiförbrukningen i realiteten att vara högre. I tabell 4 redovisas bränslebehovet i kilogram för olika kraftkällor beroende på verkningsgrad. Dessutom beräknas vikten på metallhydrider för vätagaslagring.

Vikt för bränsle beräknas ur kvoten av energibehovet (688 respektive 882 MJ) och det energiinnehåll bränslet i fråga har. I och med att verkningsgraden för de olika kraftkällorna är olika varierar mängden bränsle beroende på verkningsgraden. När bränsleceller används kommer även en elmotor att ingå i systemet. Verkningsgraden för bränslecell och elmotor beräknas då som produkten av de enskilda verkningsgraderna. I tabell 4 antas att dagens verkningsgrad för dieselmotorer är 35 procent och att den kan utvecklas till 45 procent för ett framtida användande. Den mängd vätgas som går åt till ett bränslecellsdrivet fordon har även beräknats samt vikten på kommande metallhydrider. Även verkningsgraden på elmotorn har varierats.

Tabell 4. Åtgång av bränsle per transporterad kapsel för ett dieseldrivet och ett bränslecellsdrivet rampfordon samt vikten av metallhydrider

Kraftkälla	Energibärare	Diesel ¹ (kg)	Väte ² (kg)	Hydrid (kg) 0,75 vikt-%	Hydrid (kg) 3 vikt-%	Hydrid (kg) 5 vikt-%
<u>Transport utan kapsel uppför ramp</u>						
Förbränningsmotor VG ³ 35 %		46	-	-	-	-
Förbränningsmotor VG 45 %		35	-	-	-	-
Bränslecell VG 80 %+elmotor VG 80 %			9	1194	299	179
Bränslecell VG 80 %+elmotor VG 95 %			8	1006	251	151
<u>Transport med kapsel uppför ramp</u>						
Förbränningsmotor VG ³ 35 %		58	-	-	-	-
Förbränningsmotor VG 45 %		45	-	-	-	-
Bränslecell VG 80 %+elmotor VG 80 %		-	11	1531	383	230
Bränslecell VG 80 %+elmotor VG 95 %		-	10	1289	322	193

¹ Energiinnehållet i diesel antas vara 43,1 MJ/kg.

² Energiinnehållet i vätegas antas vara 120 MJ/kg.

³ VG står för verkningsgrad.

De olika verkningsgraderna i tabell 4 kan ses som olika scenarier för den mängd bränsle dieselmotorfordon och bränslecellsfordon kommer att behöva för att utföra det som fordonet i ramp behöver prestera. Dagens förbränningsmotorer har i gynnsamma fall en verkningsgrad på 45 procent. Dessa beräkningar ska bedöma hur mycket energi som behövs för fordonet under ett arbetspass. I dagsläget går det inte att förvänta sig att verkningsgraden i genomsnitt är 45 procent. I ett nulägesperspektiv bedöms därför den genomsnittliga verkningsgraden vara 35 procent. I ett framtidsperspektiv kan tänkas att det går att uppnå 45 procent. Den teoretiska verkningsgraden för en bränslecell är 83 procent och PEM-celler antas ha en verkningsgrad på 80 procent. Med anledning av att bränslecellsfordon inte används i dagsläget har beräkningar gjorts endast för verkningsgraden 80 procent. För elmotorn antas verkningsgraden i dagsläget vara 80 procent och för framtida modeller 95 procent.

4.2 DRAGFORDON FÖR DEPONERINGSMASKIN

Dragfordonet för deponeringsmaskinen består av en dragare. Ekipaget ska gå från omlastningsplatsen till deponeringstunnlarna, en sträcka på som mest tre kilometer (sträckan varierar mellan noll och tre kilometer beroende på vilket deponeringsområde som används). Under färden från omlastningsplatsen till deponeringstunneln ska dragaren förse vagnen med ström. Nedanstående beräkningar tar emellertid inte hänsyn till denna strömtillförsel. Vid deponering, i deponeringstunneln, kommer ström att tas från fast eluttag.

Bruttovikt för dragare och vagn kommer att vara 100 ton (SKB, 2002). Maximal lutning fram till deponeringstunnlarna kommer att vara 1:100. I deponeringstunnlarna kommer lutningen att vara upp till 1:50 (pers. kom., Ernfors, 2005-2007). Underlaget kommer att vara betong, singelbädd eller sprängd, och eventuellt vajersågad, bergyta (pers. kom., Ernfors, 2005-2007). Hastigheten på fordonet kommer att begränsas till 10 km/h (2,78 m/s). På grund av att underlaget inte är bestämt genomförs två beräkningsscenarier: en med rullfriktionskoefficient motsvarande den som bildäck har mot asfalt och en som motsvarar underlaget ”grusväg”. För

bildäck mot asfalt är rullfriktionskoefficienten 0,013 och för grusväg är den 0,05 (Ehsani m.fl., 2004).

Fordons- och underlagsdata

m = massa	100 000 kg
v = hastighet	2,78 m/s (10 km/h)
μ = rullfriktionskoeff.	0,013 och 0,05
g = tyngdacceleration	9,81 m/s ²
Lutning	1:100 och 1:50

Beräkningsproceduren är densamma för dragfordonet för deponeringsmaskinen som för rampfordonet.

$$P_h = F_h v = f_r v = \mu N v = \mu m g v \quad (8)$$

$$P_v = F_v v_v = m g v_v \quad (9)$$

$$P = P_h + P_v \quad (10)$$

Ekvation (8), (9) och (10) ger att med asfalt som underlag och en lutning på 1:100 kommer effektbehovet vid hjulen för deponeringsfordonet att vara 63 kW. Med transmissionens verkningsgrad kommer motorn att behöva vara i storleksordningen 70 kW.

Vid lutning 1:50 med asfalt som underlag ger beräkningar att motorn behöver avge 100 kW.

Vid lutning 1:100 och med rullfriktionskoefficient för grusväg (0,05) ger beräkningar att motorn behöver avge en effekt på 182 kW.

Vid lutning 1:50 och med rullfriktionskoefficient för grusväg (0,05) ger beräkningar att motorn behöver avge en effekt på 212 kW.

Den motoreffekt som behövs är således mellan 100 kW och 212 kW (136 hk resp. 288 hk). Det bör påpekas att lutningen 1:50 inte kommer att köras långa sträckor.

Fordonet ska som mest tillryggalägga 2x3 km vilket med en hastighet på 10 km/h innebär att körtiden är 36 minuter (0,6 timmar). Längsta sträckan i deponeringstunneln är 300 m. Med antagandet att denna sträcka körs med hastigheten 5 km/h tar denna sträcka knappt 4 minuter (0,067 timmar).

Med underlag motsvarande asfalt kommer följande energi att behövas:

$$70 \text{ kW} \cdot 0,6 \text{ timmar} + 100 \text{ kW} \cdot 0,067 \text{ timmar} = 48,7 \text{ kWh} = 48,7 \cdot 3,6 \text{ MJ} = 175 \text{ MJ}$$

Med underlag motsvarande grusväg kommer följande energi att behövas:

$$182 \text{ kW} \cdot 0,6 \text{ timmar} + 212 \text{ kW} \cdot 0,067 \text{ timmar} = 123,4 \text{ kWh} = 123,4 \cdot 3,6 \text{ MJ} = 444 \text{ MJ}$$

Likt för rampfordonet kan diesel- och vätgasbehovet beräknas samt den vikt som en metallhydrid skulle ha. I och med att underlaget kommer att påverka fordonets energibehov har bränslebehovet beräknats för två fall: om underlaget kan jämföras med asfalt och om underlaget kan jämföras med grusväg. Resultatet visas i tabell 5. I tabellen antas att dagens verkningsgrad för dieselmotorer är 35 procent och att den kan utvecklas till 45 procent för ett framtida användande. Den mängd vätgas som går åt till ett bränslecellsdrivet fordon har även beräknats samt vikten på kommande metallhydrider. Även verkningsgraden på elmotorn har varierats.

Tabell 5. Åtgång av bränsle per transporterad kapsel för ett dieseldrivet och ett bränslecellsdrivet dragfordon samt vikten av metallhydrider

Kraftkälla	Energibärare		Hydrid (kg)		
	Diesel ¹ (kg)	Väte ² (kg)	0,75 vikt-%	3 vikt-%	5 vikt-%
Underlag motsvarande asfalt					
Förbränningsmotor VG ³ 35 %	12	-	-	-	-
Förbränningsmotor VG 45 %	9	-	-	-	-
Bränslecell VG 80 % + elmotor VG 80 %	-	2,3	304	76	46
Bränslecell VG 80 % + elmotor VG 95 %	-	1,9	256	64	38
Underlag motsvarande grusväg					
Förbränningsmotor VG 35 %	29	-	-	-	-
Förbränningsmotor VG 45 %	23	-	-	-	-
Bränslecell VG 80 % + elmotor VG 80 %	-	5,8	771	193	116
Bränslecell VG 80 % + elmotor VG 95 %	-	4,9	649	162	97

¹ Energiinnehållet i diesel antas vara 43,1 MJ/kg.

² Energiinnehållet i vätgas antas vara 120 MJ/kg.

³ VG står för verkningsgrad.

Vid drift på asfalt beräknades det gå åt 48,7 kWh för dragfordonet. Om detta lagras i ett litium-metall-polymerbatteri med dagens kapacitet på 121 Wh/kg och 143 Wh/l kommer batteripaketet att väga omkring 400 kg och ha en volym på ca 340 liter. Med den förutspådda energidensiteten 160 Wh/l kommer batterivolymen att vara omkring 300 liter.

Vid drift på grusväg eller motsvarande kommer det att gå åt 123,4 kWh. Detta motsvaras i dagsläget av 1020 kg batteri av typen litium-metall-polymer. Volymen blir omkring 860 liter. För det framtida värdet har batteriet en volym på ungefär 770 liter.

4.3 FORDON FÖR FRAKT AV MATERIAL

Det kommer att finnas ett antal olika fordon för att lasta och transportera bergmaterial i slutförvaret. Denna studie undersöker en standarddumper och en standardlastmaskin.

Standarddumperns motor är i storleksordningen 184 kW (250 hk). Denna ska kunna röra sig nere i slutförvaret mellan deponeringstunnlarna och den centrala arean.

Standardlastmaskinen ska motsvara en elektrisk TORO 1400. Denna lastmaskins motor är 160 kW (218 hk). Lastmaskinen ska kunna röra sig i deponeringstunnlarna och emellan dessa och den centrala arean. En dieseldriven TORO 1400 har en motoreffekt på 243 kW.

Bränsleförbrukning kan beräknas med hjälp av följande riktvärde: 250 g diesel/kWh (Heywood, 1988).

Med tanke på att fordonet inte konstant går på maximal effekt kan en belastningsfaktor användas. För hjullastare ligger denna på 0,5 och för dumprar på 0,4 (Persson & Kindbom, 1999).

För dumpern blir bränsleåtgången $250 \cdot 184 \cdot 0,4 \text{ g/h} = 18 \text{ kg}$ i timmen.

För den dieseldrivna lastmaskinen blir bränsleåtgången $250 \cdot 243 \cdot 0,5 = 30 \text{ kg}$ i timmen.

4.4 EMISSIONER

Som redovisades i kapitel 2 finns det avgaskrav för mobila maskiner/traktorer. Med hjälp av dessa går det att få en uppfattning om vilka utsläppsmängder det kommer att röra sig om för de fordon som är aktuella i denna studie.

Med hjälp av beräknade kWh för respektive fordon kan antal kg emissioner per aktivitet beräknas. Resultatet för fordon i ramp och för dragfordon för deponeringsmaskin redovisas i tabell 6. Mängderna är beräknade med kraftkällornas potentiella verkningsgrad. Detta för att bedöma framtida emissionsmängder. I tabellen anges CO₂ i kilogram medan övriga emissioner anges i gram. I beräkningarna antogs att de aktuella fordonen kommer att ha motorer på över 100 kW. Utsläppen, i g/kWh, är för kolmonoxid 3,5, för kolväten 0,19, för kväveoxider 0,4, och för partiklar 0,025. Beräkningarna är gjorda med ett framtidsperspektiv vad gäller verkningsgrader. I normala fall kommer kapseln att transporteras nerför rampen men inte uppför. Därför har beräkningar gjorts endast för detta fall för rampfordonet.

Mängden koldioxid beräknas med hjälp av uppskattningen att det bildas 3250 g CO₂ per kg bränsle.

Tabell 6. Emissionsmängder av koldioxid (CO₂), koloxid (CO), kolväten (HC), kväveoxider (NO_x) och partiklar (PM) för fordon i ramp och dragfordon för deponeringsmaskin

	kWh	Bränsle (kg)	CO ₂ (kg)	CO (g)	HC (g)	NO _x (g)	PM (g)
Fordon i ramp	191	35	114	669	36	76	5
Dragfordon för deponeringsmaskin (asfalt)	49	9	29	172	9	20	1
Dragfordon för deponeringsmaskin (grusväg)	123	23	75	431	23	49	3

I tabell 6 visas tydligt att val av underlag i slutförvaret påverkar emissioner. I tabell 7 beräknas emissioner från lastmaskinen och dumpern. Med anledning av att data av den dagliga körtiden inte finns tillgänglig beräknas mängderna per timme. Antagandet har gjorts att genomsnittseffekten är $0,4 \cdot 184 \text{ kW} = 74 \text{ kW}$ för dumpern och $0,5 \cdot 243 \text{ kW} = 122 \text{ kW}$ för lastmaskinen.

Tabell 7. Emissionsmängder per timme av koldioxid (CO₂), koloxid (CO), kolväten (HC), kväveoxider (NO_x) och partiklar (PM) för dumper och lastmaskin

	kWh	Bränsle (kg)	CO ₂ (kg)	CO (g)	HC (g)	NO _x (g)	PM (g)
Dumper	74	18	59	259	14	30	2
Lastmaskin	122	30	98	427	23	49	3

5 DISKUSSION

5.1 AKTIVITETER

5.1.1 Fordon i ramp

Fordonet som ska transportera kapseln nedför rampen har det största effektbehovet av de fordon som är aktuella i denna studie. Det är visserligen på nervägen som den är tyngst lastad, men det är uppför rampen som effektbehovet är som störst. Förbrännings- och elmotorer kommer utan problem att kunna driva rampfordonet. I och med en lägre verkningsgrad kommer en större del av tillsatt energi att förloras i form av värme om en dieselmotor används jämfört med om en elmotor används. Det finns inga kända projekt för framdrivning av så pass tunga fordon på hjul med bränsleceller.

Det alternativ för lagring av vätgas för bränsleceller som verkar aktuellt att använda för underjordsfordon är hydridbäddar. Att driva rampfordonet med bränsleceller innebär att hydridvikten, förutsatt att den lagrar 5 viktprocent, kommer att bli ungefär 200 kg. Jämfört med de omkring 50-60 kg diesel som kommer att behövas om förbränningsmotor används innebär vätgaslagring med hydrid en betydligt tyngre lagring av energi. Det är emellertid inte ovanligt för en lastbil att bära mer än 200 kg diesel. Relativt rampfordonets totala vikt på 130 ton kommer vikten av energibärare att bli liten vare sig dieselmotor eller bränslecell används.

När kapseln transporteras ned i slutförvaret kommer fordonet inte att behöva mycket drivkraft på grund av lutningen. Däremot kommer det att behöva bromsas. Med ett fordon som drivs med förbränningsmotor kommer bromsningen att innebära att värme frigörs från bromsanordningen. I princip bromsas 350 kW bort under 30 minuter, vilket är 175 kWh. Detta innebär en energiförlust från systemet och en värmeutveckling som eventuellt behöver ventileras bort.

En elmotor kan emellertid ta tillvara denna energi och lagra den i ett batteri eller ladda tillbaka energi genom trolleyn till det fasta nätet. Den lagrade energin kan sedan användas för att hjälpa till att driva fordonet upp för rampen. Om batterier klarar att lagra så pass mycket energi under så pass kort tid bör utredas vidare.

Om batteri används för att lagra energi krävs att någon form av hybrid används. Det finns ett flertal tänkbare hybrider för ändamålet: förbränningsmotor/elmotor/batteri, förbränningsmotor/bränslecell/elmotor/batteri och bränslecell/elmotor/batteri.

I dagsläget finns erfarenheter av kombinationen förbränningsmotor/elmotor/batteri, vilket kan vara en fördel. Följden av att använda denna typ av hybrid blir lägre värmeutveckling och det kan även bli lägre emissioner och/eller lägre bränslekostnader. Batterikapaciteten kan dimensioneras efter det utrymme som finns till förfogande och den energi som kan tas upp vid inbromsning. Batterierna kan laddas ovan jord under det att fordonet inte används. Eftersom batterierna sannolikt inte klarar att lagra all den inbromsade energin vid nedfärd kommer energi att förloras i form av värme.

Eventuella vätgasutsläpp från en batteriladdningsstation borde inte utgöra stora problem eftersom laddningen kan ske ovan jord. En ytterligare fördel är att fordonet kan konstrueras så

att det är möjligt att driva fordonet uppför rampen utan batteristöd, om det skulle uppstå problem med batteri eller elmotor(er).

Kombinationen förbränningsmotor/elmotor/trolley skulle även den fungera för rampfordonet. Ett sådant fordon kan jämföras med GIA Industris Kiruna Electric. Deras största version, som finns på ritbordet, lastar 80 ton. Detta är i paritet med de krav som ställs på SKB:s rampfordon som ska lasta kapsel och transportbehållare. Med den här kombinationen av kraftkällor är det möjligt att ta tillvara på förlorad energi vid bromsning genom att med hjälp av elmotorn återladda el till nätet.

Det skulle vara möjligt att, förutom att minska värmeutvecklingen, ytterligare minska emissioner och bränsleförbrukning genom att använda en kombination av förbränningsmotor/elmotor/bränslecell/batteri. Huruvida detta är praktiskt möjligt måste utredas vidare. Hybriden bränslecell/batteri är den renaste varianten. Med denna kombination kan värmeutveckling minskas som tidigare och om hydridbädd används kommer utsläppen bestå av vatten. Att använda hybrider med bränsleceller ligger emellertid ett antal år fram i tiden.

För att minska energiförluster i form av värmeutveckling skulle även en kombination av trolley och batteri kunna användas. Genom att ladda batterier på nervägen kan dessa minska på eluttaget från trolleyn på uppvägen och/eller använda den lagrade energin för drift där det inte finns kontaktledning. Detta skulle bli samma typ av fordon som trolley/batterimodellen av Kiruna Electric. En ytterligare fördel med denna kombination av kraftkälla-energibärare är att inte flera olika typer av kraftkällor används, utan bara elmotorer, vilket kan tänkas underlätta service och underhåll. Denna kombination innebär även möjlighet att återladda el till nätet vid nedfärd.

5.1.2 Dragfordon för deponeringsmaskin

Dragfordonet kommer att gå på relativt slät mark men kommer att dra en tung last. Alla undersökta kraftkällor kan i dagsläget användas för detta fordon.

Det finns förutsättningar för att dragfordonet kan använda el genom trolley som energibärare. Det finns inga krav på att fordonet behöver röra sig fritt, utan sträckorna är väl planerade och följer transporttunnlarna. Problem uppstår emellertid när fordonet ska in i deponeringstunneln. Dessa tunnlar används bara till 35-40 deponeringar och fylls sedan igen. Om trolley används innebär det att en kontaktledning måste monteras upp och ner för varje tunnel. En lösning är att använda en kabel från det att fordonet kommer in i deponeringstunneln. Detta innebär att en trumma som kabeln kan viras runt måste finnas på fordonet. Trumman med kabel utgör en extravikt för fordonet.

Med batterier som energilagringsskälla för elmotorer kommer batteripaketet att väga omkring 400 kg. Detta är betydligt mer än framtida lagringsvikter av väte med hydrid och mer än lagring av diesel, Fischer-Tropsch-diesel och RME. Fördelen är att batterier redan idag används på tyngre fordon vilket gör att erfarenhet av liknande teknik finns. Det blir heller inte några emissioner, förutom för laddning av vissa typer av batteri. En laddningsstation enligt gällande krav måste byggas.

Bussarna i CUTE använder bränsleceller som levererar en effekt i den storleksordning som krävs för att driva detta fordon. Detta tyder på att det redan idag skulle gå att tillverka ett dragfordon som drivs på bränsleceller. Beräkningarna är gjorda utifrån att det är konstant lutning och att dragaren transporterar kapseln även på vägen tillbaka från deponeringstunneln. Detta gör att det förmodligen inte kommer att krävas fullt så stor motoreffekt och så mycket energi som beräknats. För att minska på hydridbäddens och bränslecellsstackarnas storlek och massa kan batterier hjälpa till med effekttoppar. Detta kan bli särskilt effektivt om lutningar endast är tillfälliga.

Överhuvudtaget kan hybriddrift för dragfordonet ge många fördelar. Beroende på vad som värdesätts kan bränsleförbrukning eller emissioner minskas med en seriehybrid eller en parallellhybrid av förbrännings- och elmotor. Om motorerna ligger i serie drivs fordonet av en elmotor som får ström av en generator som drivs av förbränningsmotorn. Som nämnts i kapitel 2 är en vanlig variant att seriehybriden får energi även från ett batteri. Det går att ha mer eller mindre konstant belastning på förbränningsmotorn vilket ger förutsättningar för låga emissioner. Dragfordonet skulle kunna konstrueras så att det går att köra emissionsfritt med batterier under de korta sträckor som det befinner sig i deponeringstunnlarna.

5.1.3 Fordon för frakt av material

Om lastmaskinen drivs av en förbränningsmotor kommer fordonet att få fri rörlighet och kunna arbeta under långa pass. Nackdelen är förbränningsmotorns emissioner och en låg verkningsgrad.

Vid eldrift av lastmaskiner verkar det vara kabel som är mest aktuell för att leverera ström. Ellastmaskiner är kraftfulla och har uppenbara miljöfördelar såsom att den är emissionsfri och att den låter mindre. Kabeln utgör vissa rörlighetshinder.

Rena bränslecellslastare verkar inte vara aktuellt att utveckla i dagsläget. Bränslecellshybrider med batterier och/eller superkondensatorer måste anses tekniskt möjligt att utveckla, inte minst för att det redan nu pågår ett långt gånget projekt inom området. Följden blir emissionsfria lastare med full rörlighet.

Dumprar drivs traditionellt av diesel eller av el med trolley. Likt för lastmaskinen är fördelarna med att driva fordonet med förbränningsmotor den fria rörligheten och nackdelarna är att motorn har sämre verkningsgrad än elmotorn samt emissionerna.

Såttillvida det är möjligt att sätta upp strömskenor på lämplig höjd i slutförvaret borde eldrift med trolley vara ett bra alternativ för dumpern. Strömskenor kan monteras i de stora transporttunnlarna som kommer att finnas under långa perioder. Fordonet kan konstrueras så att övriga sträckor, som inte har strömskenor, kan köras med hjälp av batteri eller diesel. Med tanke på att deponeringstunnlarna är relativt trånga borde det inte vara nödvändigt att dumpern behöver gå in i deponeringstunnlarna. Därför behövs inte strömskenor där.

5.2 STYRANDE FAKTORER

5.2.1 Emissioner och värmeutveckling

Dieselmotorn kommer att avge emissioner av bland annat koldioxid, kolmonoxid, kolväten, kväveoxider och partiklar. Den hårdare emissionsregleringen på lastbilstransporter avspeglas mer och mer på industrimotorer. Emissioner kommer i och med reglering med all säkerhet att minska för industrimotorer.

Det finns en viss skillnad i emissioner beroende på vilket kolvätebaserat bränsle som används. I flottförsöket med den syntetiska dieseln Eco-Par hade den tyngre dieselmotorn något lägre emissioner av kväveoxider, kolmonoxid, kolväten och sot med Eco-Par jämfört med diesel MK1. I denna rapport har endast detta flottförsök tagits upp och det är oklart om dess resultat går att generalisera. För att säkerställa att syntetisk diesel verkligen har lägre emissioner måste fler tester göras och/eller granskas.

Ytterligare tester måste även göras för att säkerställa att det går att använda syntetisk diesel till dieselmotorer utan driftstörningar. I en mer övergripande emissionsdiskussion kan tilläggas att om syntetisk diesel kommer att kunna tillverkas ur ickefossil råvara kommer bränslet att vara koldioxidneutralt. RME är även det koldioxidneutralt. Testresultat från förbränning av RME har inte redovisats i denna studie. Om RME används rent i motorer som inte är optimerade för RME ökar mängden kväveoxider.

Att syntetisk diesel kan komma att bli koldioxidneutralt är en av anledningarna till att bränslet har stor potential att bli ett framtida dominerande bränsle. Fler indikationer på att syntetisk diesel är ett framtidsbränsle är att det inledningsvis går att producera ur naturgas och att distributionssystem för flytande bränsle redan finns.

Om en förbränningsmotor används kommer denna att avge emissioner. Dragfordonet och rampfordonet kommer inte att köras mer än någon timme per dag. Beroende på hur mycket övrig trafik som kör med förbränningsmotorer i slutförvaret kommer dessa fordons emissioner att vara mer eller mindre betydelsefulla. Om det är så att till exempel dumprar och lastmaskiner körs frekvent med diesel i området så är det inte emissioner av CO, CO₂, NO_x, PM med flera som ska avgöra huruvida förbränningsmotorer eller andra kraftkällor ska användas för rampfordonet och dragfordonet för deponeringsmaskinen. Om emissionerna utgör ett problem, till exempel i deponeringstunnlarna, eller om det är önskvärt att hålla nere emissioner av CO, CO₂, NO_x, PM med flera finns emellertid fördelar med att driva dragfordonet med elmotor eller som hybrid.

Om bränsleceller kommer att användas verkar den troliga lagringsformen att vara hydridlagring med påfyllning ovan jord. I och med att vätgasen är luktlös kommer förmodligen vätgasdetektorer att behövas. Om detta ska finnas både på fordon och i slutförvaret måste vidare utredas. Utsläpp av vätgas från batteriladdning, både i laddningsstation och vid laddning vid drift, måste även det undersökas vidare.

Beräkningar i kapitel 4 visade att det går att minska på emissioner genom att använda underlag med lägre rullfriktionskoefficient. Vidare studier med exakta

rullfriktionskoefficienter för de tänkta underlagen skulle ge mer exakt information om hur pass mycket det går att minska emissioner med hjälp av detta.

Om energi inte kan tas till vara till batteri eller till det fasta nätet kommer det att bildas en större mängd värme när fordonen bromsas i rampen eller nere i slutförvaret. För själva kraftkällorna kommer dieselmotorn att avge mest värme på grund av den sämre verkningsgraden. Minst värme kommer troligtvis att avges från det fordon där kraftkällan/kraftkällorna har bäst verkningsgrad. Då ett underjordsfordon som helt eller delvis drivs med bränsleceller har flera olika källor till värmeutveckling är det svårare att avgöra vilken värmeutveckling ett sådant fordon kommer att ha. PEM-bränsleceller har en arbetstemperatur på 80 °C. Till detta kommer elmotorns värmeutveckling.

5.2.2 Brandrisk

Brandrisken för dieseldrivna och eldrivna lastmaskiner verkar vara liknande men av olika anledningar. Brandrisken vid dagens användning av diesel utgörs av om bränslet kommer i kontakt med varma ytor samt att hantering av diesel i sig medför vissa brandrisker. Vid användning av eldrivna lastmaskiner utgörs brandrisken av överslag i el-central och av kortslutning i kabeln. Brandriskerna kan antas vara liknande för andra dieseldrivna respektive eldrivna fordon i samma miljö.

Erfarenheter från SFR visade att hög luftfuktighet i kombination med salt från grundvattnet orsakade problem vid trolleydrift i form av överslag. Detta ökade brandrisken.

Risken för brand är likartad vid lagring och tankning av diesel, Fischer-Tropsch-diesel och RME.

5.2.3 Service

Om eldrivna fordon används krävs att personal har kompetens både inom de system som finns i själva fordonet, och även inom relaterade områden, till exempel inom högspänningsutrustning. Om fordonen i denna studie vore de enda maskiner/fordon som krävde högspänning, skulle det förmodligen gå att underlätta service och underhåll genom att använda sig av fordon med enbart förbränningsmotorer. Om så inte är fallet och det ändå kommer att finnas kompetens bland dem som arbetar i slutförvaret borde inte detta extra kompetenskrav utgöra problem.

I och med kringutrustning i form av till exempel kabel och el-central kräver eldrivna lastmaskiner mer underhåll än dieseldrivna lastmaskiner. Det sker emellertid fler motorbyten på en dieseldriven lastmaskin än på den eldrivna. Erfarenheter från den elektriska dumpern i Zinkgruvan visar på lång livslängd och i Kirunagruvan har de stora elektriska lastmaskinerna gått utan motorbyte i tio år. Livslängd är naturligtvis kopplat till hur väl maskiner servas och ses över.

Bränslecellsstackar har idag problem med livslängd; de räcker bara två år. Det går att förvänta sig att denna teknik kommer att ta lång tid på sig för att bli kommersiellt intressant. Även den

dag tekniken börjar användas kommer det förmodligen att ta ytterligare många år innan alla tekniska problem är lösta och bränslecellsfordon behöver liknande omfattning service och underhåll och ha liknande livslängd som dagens fordon med förbrännings- och elmotorer.

Närmare i tiden för drift av tunga fordon är hybrider med förbrännings- och elmotor. Även hybridtekniken är ung, varför tekniska problem till en början kan förväntas. Fler kraftkällor kan innebära en mer komplicerad teknik vilket förmodligen leder till ett ökat krav på kompetens vid underhåll och service.

5.2.4 Utrymme

Om flytande bränsle används i slutförvaret kommer det att behövas tankstationer. Dessa kan placeras på slutförvarsnivå. Vätgas får ej lagras under tryck i så pass slutna rum som slutförvaret utgör, varför lagring och eventuell produktion av vätgas förmodligen kommer att behöva placeras ovan jord. De installationer som krävs vid eldrift av fordon är bland annat elcentraler, strömskenor och uttag för kabeldrift.

Strömskenor kommer att behöva placeras på en lämplig höjd i tunnarna. Att montera strömskenor i bergtaket kan därför komma att påverka höjden och därmed mängden uttagna bergmassor. Beroende av hur berguttag från slutförvaret kommer att optimeras blir detta därför mer eller mindre aktuellt. Denna typ av problem är rimligtvis mest aktuell i deponeringstunnarna.

Vid eldrift med kabel tillkommer utrymmes- och viktkrav för trumman med kabel.

5.2.5 Ekonomi

Att använda förbränningsmotor innebär att den dagliga kostnaden starkt påverkas av priset på det bränsle som används. Råoljepriset ökar förmodligen framöver vilket sannolikt leder till att det både är intressant och möjligt att använda sig av alternativa drivmedel. De som diskuterats i denna uppsats är RME och syntetisk diesel. Prisutvecklingen för dessa bränslen påverkas bland annat av möjligheten till produktion och distribution i stor skala.

Om eldrivna fordon blir lönsammare eller inte beror bland annat på hur mycket som kan sparas på minskad ventilation och vilken skillnad det kommer att vara på elpriset och priset på det bränsle som används till dieselmotorerna. Ventilation kommer att finnas i slutförvaret med eller utan emissioner från fordon. Frågan är då hur stor del av ventilationsbehovet som är styrt av fordonsemissioner.

6 SLUTSATSER

I denna studie kan konstateras att den stora nackdelen med dieselmotorn är jämförelsevis stora emissioner och låg verkningsgrad. Eftersom dieselmotortillverkare är under ständig press att minska emissioner kommer dieselmotorer att hinna utvecklas innan år 2017 då slutförvaret driftsätts. En stor skillnad mellan idag och i framtiden kommer därför att vara lägre emissioner. Verkningsgraden, och därmed värmeutvecklingen, kommer sannolikt inte att förändras i samma grad. Fördelen med elmotorn är idag den höga verkningsgraden som oavsett utvecklingstakt även i framtiden kommer att överstiga dieselmotorns verkningsgrad. Prisutvecklingen för el och bränsle påverkar driftkostnaderna.

Det fordon som ska gå i rampen kommer att förlora mycket energi i form av värme vid inbromsning. Då en elmotor kan ta tillvara denna energi är kraftkällan ifråga intressant vid val av kraftkälla till rampfordonet. Kraftförsörjning i form av kontaktledning till fordonet är emellertid utrymmeskrävande och kräver investeringar. Trolleydrift med elmotor i kombination med batteri och förbränningsmotor ger fordonet viss rörlighet utanför de områden där kontaktledning finns.

Det fordon som passar bäst för både hybrid- och bränslecellsteknik kommer sannolikt att vara dragfordonet för deponeringsmaskinen. Hybridteknikutvecklingen med förbränningsmotor och elmotor går sannolikt snabbare än utvecklingen för bränslecellsteknik varför detta alternativ i dagsläget kan tänkas vara mer intressant att titta närmare på. Dragfordonet för deponeringsmaskin bör kunna konstrueras så att det går emissionsfritt i deponeringstunnlarna.

Eftersom transporttunnlarna inte återfylls före den slutliga återfyllningen av slutförvaret kan det vara intressant att undersöka möjligheten att installera kontaktledning i transporttunnlarna. Då kan eventuellt både dragfordonet för deponeringsmaskinen och dumprar för frakt av material använda dessa. Om lastmaskiner ska drivas med el- eller förbränningsmotor beror mycket på vilken rörlighet de behöver.

För de tre fordonsaktiviteter som har tagits upp i denna studie är det fordon för frakt av material som sannolikt kommer att användas flest antal timmar per dag. Rampfordonet och dragfordonet för deponeringsmaskinen kommer under en arbetsdag att användas en relativt liten tid varför deras andel av emissioner i slutförvaret starkt kommer att påverkas av drift av övriga fordon. Minskade emissioner kan innebära minskade ventilationskostnader. Det bör emellertid undersökas hur stor del av ventilationsbehovet som styrs av fordonsemissioner jämfört med övriga ventilationsbehov.

Elmotorn bedöms i dessa slutsatser vara ett intressant alternativ till förbränningsmotorn. Noteras bör att denna studie i första hand relaterar val av kraftkälla till aktuella fordonstyper. Om kostnader för investering, drift och underhåll av det kompletta systemet hade undersökts och ett fullständigt systemtänkande tillämpats är det troligt att elmotoralternativet hade bedömts annorlunda.

Referenser

Skriftliga referenser

ASAE, 1999, *Agricultural Engineers Yearbook of Standards*, Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, Michigan, USA.

Ahlvik, P., Brandberg, Å, 2002, *Med hållbarhet i tankarna : Introduktion av biodrivmedel*, Vägverkets publikationsnummer 2002:83, ISSN: 1401-9612.

Aldén, B., Eklund, A., Larsson, T., 2002, *Flottförsök med Eco-Par® - framtidens drivmedel för dieselfordon*. Projektrapport.

Finns tillgänglig på <http://www.framtidsbranslen.se/rapporter.htm>

Coutts, D.A., Thomas, J.K., 1998, *Preliminary Safety Evaluation For Hydrogen-fueled Underground Mining Equipment*, Dokument WSRC-TR-98-00331, Westinghouse Safety Management Solutions, Inc.

Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S.E., Emadi, A., 2004, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-3154-4.

Ekdunge, P., 2005, HyTRAN Integrated Project on "Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Road Transport", PDF-presentation, General Assembly Hydrogen and Fuel Cell Platform, Brussels 2005-03-18. Presentationen finns tillgänglig på Internet-sidan European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform:

<https://www.hfpeurope.org/uploads/700/813/HYTRAN.pdf>

EU, 2004, Directive 2004/ 26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. Official Journal of the European Union L 146, pp 1-110.

Hellberg, H., 2000, *El- och hybriddrift av buss och lastbil*, KFB-Rapport 2000:44, ISBN 91-88371-99-9.

Heywood, J.B., 1988, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill international editions, Singapore.

Larminie, J., Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd edition, ISBN 0-470-84857-X, John Wiley & Sons Ltd.

Malmström, M., Wetterblad, B., 1999, *Fordonslära - Traktorer och redskapsbärare*, Natur och Kultur/LTs förlag, ISBN 91-27-35290-0.

Miller, A., R., Barnes, D., L., 2002, *Fuelcell Locomotives*, Paper presented by A.R. Miller to the European Fuelcell Forum "Fuelcells 2002", Lucerne, Switzerland, 4 July 2002.

Finns tillgänglig på www.fuelcellpropulsion.org/publications.htm

Nordström, P., 2005, *SCR eller EGR: Scania minskar emissionerna med renare förbränning*, Mekanisten, 2:2005, sida 8-9.

Persson, K., Kindbom, K., 1999, *Kartläggning av emissioner från arbetsfordon och arbetsredskap i Sverige*, IVL Rapport B 1342.

SKB, 2002, *Deep repository for spent nuclear fuel*, R-02-23, Facility description – Layout E, Spiral ramp with one operational area.

Tillman, A-M.; Baumann, H.; Eriksson, E.; Rydberg, T., 1991, *Miljön och förpackningar. Livscykelanalyser för förpackningsmaterial - beräkning av miljöbelastning*. SOU 1991:77 Appendix.

Waara, R., 2004, *Förstudie Bränslecellsanvändning under jord*, Uppdragsbeställning från Gellivare Hard Rock Research.

Sammanfattning finns att hämta på www.ghrr.nu/dokument.asp

Young, H. D., Freedman, R. A., 2000, *University Physics – With modern physics*, Addison Wesley Longman, Inc., 10:e upplagan, ISBN: 0-201-60336-5.

Åhman, M., 1999, *Teknik för energieffektiva personbilar*, KFB-Meddelande 1999:22, KFB (Kommunikationsforskningsberedningen) Stockholm, ISSN 1401-1271.

Internet

Avestor, www.avestor.com , 16 juni 2005.

Batscap, www.batscap.com , 6 juni 2005.

Chalmers, <http://fy.chalmers.se/ef/Brcell.htm> , 29 juli 2005.

Fuelcell Propulsion Institute, www.fuelcellpropulsion.org/mine_loader.htm , 19 juli 2005.

GIA Industri AB, www.gia.se , 21 juni 2005.

HERA, http://www.herahydrogen.com/en/tech_hydrides.html , 31 juli 2005.

Lth, Lunds Tekniska Högskola, www.vok.lth.se/~ce/Research/hcci/hcci_se.htm , 29 augusti 2005.

Miljöbilar, http://www.miljobilar.stockholm.se/templates/MIS_Article_2066.aspx , 7 februari 2006.

Naturvårdsverket,
<http://www.naturvardsverket.se/index.php3?main=/dokument/teknik/trafik/trafikdok/avgasarb.htm> , 6 februari 2006.

NE, <http://www.ne.se>, 2005.

Preem, Produktblad för Diesel med 5 % RME,
http://www.preem.se/templates/ProductInformation_1301.aspx, 11 december 2006.

Scania, Informationsblad. http://www.scania.com/Images/R32480_EngineTech_ENG_tcm10-62331.pdf , Edition 04.09 enXX1595167, 2005.

Tudor, www.tudor.se , 16 juni 2005.

Personlig kommunikation

Ahlm, Ronnie, Zinkgruvan Mining AB, Arbetsledare i Zinkgruvan, samtal den 12 september 2005.

Ernfors, Per, SKB, Projektingenjör, kontinuerliga samtal under 2005-2007.

Johansson, Urban, Senior Vice President, Powertrain Development, Scania, samtal 20 september 2005.

Källberg, Krister, Räddningsverket, E-post, 21 juni 2006.

Lagerstedt, Leif, Vattenfall Power Consultant (Projektingenjör på SKB), samtal den 15 maj 2006.

Levin, Jan, Underhållsingenjör för mobila fordon i Kirunagruvan, LKAB, samtal september 2005.

Liimatainen, Seija, Area Manager, GIA Industri AB, samtal den 1 juni 2005.

Ramström, Hans, Area Manager, GIA Industri AB, samtal den 15 juni 2005 och den 12 september 2005.

Sporre, Johan, Manager Product Planning and Technical Documentation, Scania Industrial & Marine Engines, samtal den 14 september 2005.

BILAGA 1 INLEDANDE URVAL AV KOLVÄTEBASERADE ENERGIBÄRARE

På grund av de speciella förhållanden som råder vid arbete under jord har ett urval av möjliga kolvätebaserade energibärare för underjordsfordon kunnat göras. Ett första kriterium för olika bränslen har varit brandfarlighet. Vätskor med klass 1 enligt Sprängämnesinspektionens vägledande förteckning över brandfarliga gaser och vätskor (SÄIFS, 1998) har valts bort från studien. Detta av den anledningen att brandfarlig vätska klass 1 endast i undantagsfall får användas under jord (SveMin, 2004). Brandfarliga gaser enligt SÄIFS (1998) har valts bort med antagandet att samma gäller för dessa.

Tabell A sammanfattar identifierade bränslen och redovisar information om brandfarlighet för dessa. Identifierade bränslen är de bränslen som har förekommit vid inledande studier för föreliggande rapport. Blandbränslen har inte tagits med på grund av att blandningar antas variera så pass mycket över åren att jämförande studier mellan dessa blir meningslösa. Blandbränslenas egenskaper förmodas vara ett mellanting av egenskaperna från de enskilda bränslena.

Tabell A. Lista över identifierade kolvätebaserade bränslen samt om dessa är brandfarliga (Källa: SÄIFS, 1998)

	Vätska/Gas	Brandfarlig gas/vätska	Klass
Bensin	Vätska	Ja	1
Dieselbrännolja ¹	Vätska	Ja	2b, 3
Dimetyleter (DME)	Gas	Ja	-
Etanol	Vätska	Ja	1
Metan	Gas	Ja	-
Metanol	Vätska	Ja	1
Gasol	Gas	Ja	-
Propan	Gas	Ja	-

¹ Endast brandfarlig om flampunkten är 100 grader Celsius eller lägre.

I tabellen framgår att det bara är diesel (dieselbrännolja) som bör användas under jord. Förutom diesel undersöks även två andra bränslen som fungerar i dieselmotorer. Dessa är rapsmetylester (RME) och syntetisk diesel. RME har valts att undersökas eftersom det redan i nuläget används som fordonsbränsle och som inblandning i fordonsbränsle. Raps är också den vanligaste råvaran i Europa för animaliska och vegetabiliska fetter i omförestrad form (Ahlvik & Brandberg, 2002). Det finns dock fler vegetabiliska fetter som i omförestrad form kan användas som bränsle.

Resultatet från inledande studier är att aktuella kolvätebaserade energibärare för denna studie är diesel, syntetisk diesel och RME.

Referenser Bilaga 1

Ahlvik, P., Brandberg, Å, 2002, *Med hållbarhet i tankarna : Introduktion av biodrivmedel*, Bilaga 3, Vägverkets publikationsnummer 2002:83, ISSN: 1401-9612.

SveMin, 2004, *Brandskydd i gruv- och berganläggningar*, Fabricii Tryckeri AB. (SveMin: Föreningen för gruvor, mineral och metallproducenter i Sverige).

SÄIFS, 1998, *Vägledande förteckning (SÄIFS 1998:6) över brandfarliga gaser och vätskor*, Sprängämnesinspektionens författningssamling.