

SIMCO2

SIMCO2 Arbetspaket 3 - Utredning berggrum



Uppdrag: AP3 Bergrum
Uppdragsnummer: 30026086-003
Kund: Sinfra
1.0
Datum: 2022-04-29
Upprättad av: Joakim Hjulström
Dokumentreferens: https://swecogroup-my.sharepoint.com/personal/joakim_hjulstrom_sweco_se/documents/2111_ccs_sundsvall/utskick/2022-06-01_uppladdning_leverans/ap3_bergrum_simco2.docx

Innehållsförteckning

Förord	5
1. Sammanfattning	6
2. Inledning	7
2.1 SIMCO2 AP3	7
3. Svenska bergrum	8
3.1 De befintliga bergrummen	9
3.1.1 Gasolbergrummet.....	11
4. Geologiska och hydrogeologiska förutsättningar vid Sundsvalls Hamn	13
4.1 Geologiska förutsättningar	13
4.2 Hydrogeologiska förutsättningar.....	14
5. Koldioxidlagring i bergrum	16
5.1 Koldioxidens fysikaliska egenskaper	16
5.2 Konceptuell teknisk lösning	17
5.2.1 Drift av bergrummet.....	17
5.2.2 Tätninglösning 1 kylt bergrum	19
5.2.3 Tätninglösning 2 förvaring vid bergrummets omgivningstemperatur	20
5.3 Åtgärder i bergrummet	21
5.3.1 Lösning 1 kylt bergrum	21
5.3.2 Lösning 2 förvaring vid bergrummets omgivningstemperatur	22
6. Kostnadsbedömning.....	25
6.1 Beräknade kostnader	25
6.2 Antaganden och förutsättningar anläggningskostnader.....	25
6.3 Antaganden och förutsättningar driftkostnader	26
6.3.1 Beräkningsförutsättningar	26
6.3.2 Beräknat värmeinflöde (kylbehov).....	27
6.4 Bergrum A-D.....	29
7. Bergrummets lagringskapacitet.....	31
8. Riskanalys	32
9. Slutsatser.....	34

Förord

Sundsvall Energi AB har inom SIMCO2 AP3 anlitat Sweco för att undersöka förutsättningarna för att använda ett bergrum för lagring av koldioxid.

Även om Sweco anser att informationen de åsikter som anges häri är giltiga, måste alla parter förlita sig på sin egen kunskap och omdöme när den används. Swecos slutsatser, rekommendationer och kostandsbedömningar i detta uppdrag baseras på de förutsättningar som rådde då studien genomfördes.

1. Sammanfattning

Syftet med denna rapport har varit att undersöka möjligheterna att använda ett bergtrum under Sundsvalls Hamn för att lagra koldioxid. Bergtrummet har tidigare använts för förvaring av gasol.

Viktiga frågeställningar har varit vilka ombyggnationer som skulle behövas i bergtrummet, hur man säkerställer att det är tätt samt hur vatten i berggrunden ska hanteras.

Sweco föreslår två koncept för att säkerställa tätheten. Det första alternativet är förvaring vid moderat tryck och låg temperatur (15 bar (g) och -26,5 °C), och att man använder det frysta grundvattnet i berggrunden runt bergtrummet som ett naturligt tätskikt. Det andra alternativet är förvaring vid högt tryck och omgivningstemperatur (39 bar (g) och +5 °C), vilket bedöms kräva en stålinklädning av bergtrummet. För det kylda lagret har energiförlusten på grund av uppvärmning från omgivande berg beräknats till cirka 930 MWh/år. Detta kräver en kyleffekt på cirka 160 kW de första åren, men effektbehovet avtar med åren efter hand som det angränsande berget kyls av. Därtill har beräkningar avseende frysfrontens utbredningshastighet utförts.

Utöver detta ges ett konceptuellt förslag på vilka stödsystem som kommer krävas ovan mark på för att möjliggöra en säker och effektiv drift, samt en uppskattning av bergtrummetts effektiva lagringskapacitet.

2. Inledning

2.1 SIMCO2 AP3

En av vår tids stora utmaningar är att begränsa den globala uppvärmningen och i detta syfte pågår arbete med målsättningar och regelverk inom exempelvis FN, EU och Sveriges riksdag för att minska utsläppen av växthusgaser. Både globalt och nationellt pekas koldioxidinfångning och -lagring (CCS) ut som en nyckel teknik för att klara målen.

Inom projektet SIMCO2 har möjligheterna undersökts för att göra Sundsvall till en nod för infångning och mellanlagring av koldioxid i Sverige. I detta första steg har fokus legat på att hitta en lokal lösning för Sundsvall där koldioxid från Korstavverket som ägs av Sundsvalls Energi ska fångas in. Innan koldioxiden transporteras vidare för slutförvaring måste gasen mellanlagras inom området.

Föreliggande rapport redogör för resultaten från arbetspaket tre (AP3) av SIMCO2-projektet. Inom detta arbetspaket har möjligheterna undersökts för att mellanlagra koldioxid i ett djupt beläget bergrum under Sundsvalls hamn som tidigare använts för förvaring av gasol.

AP3 omfattar enbart själva bergrummet och schaktet med stigarledningar upp ur bergrummet till markytan.

Följande frågeställningar undersöks:

- Vad krävs tekniskt för att lagra koldioxid i bergrummet?
- Hur tätt är bergrummet?
- Hur fungerar det med vatten i berget?
- Vad skulle en förberedelse kosta?
- Vad räcker storleken på bergrummet till i lagringskapacitet?

Förutom bergrummet för gasollagring finns ytterligare fyra bergrum som använts för förvaring av olja inom hamnområdet. Baserat på resultaten från studien har möjligheterna för att använda dessa bergrum för mellanlagring av koldioxid bedömts översiktligt. Två av dessa är tömda på produkt och två används för förvaring av råolja och är därmed uppvärmda till ca +70 °C.

3. Svenska bergrum

Att bygga specifika oljebergrum för lagring är en vedertagen svensk teknik och det byggdes ett stort antal bergrum företrädesvis på 70- och 80-talet. Merparten av dessa bergrum byggdes för Sveriges strategiska försvar med avsikten att säkerställa tillgång på drivmedel i händelse av krig eller konflikt. Större delen av dessa lager är idag avvecklade och tagna ur drift. Det finns också några exempel på nedlagda gruvor som användes för oljelagring (bl.a. Harnäs utanför Ludvika och Resarö).

Det normala utförandet var att bergrummen byggdes 25 till 30 m höga och med en bredd av ca 20 m. Längden kunde variera men låg oftast mellan 100 och 200 m. Det helt dominerande byggsättet var att spränga ut bergrummet i tre "pallar": galleri (övre pallen med taket), mellanpall och bottenpall. Till varje nivå byggdes anslutningstunnlar: en tunnel till galleri, en tunnel som anslöt mitt på bergrummet och en tunnel som byggdes ned till botten på bergrummet. Detta innebar att varje pall blev 8 till 10 m hög. Pallhöjden bestäms till stor del av borrhullens kapacitet. Till bergrummet byggdes också ett vertikalt schakt med pumpgrop för rörinstallationer och pumpar, dels för pumpning av produkt och dels för att pumpa ut inläckande grundvatten. Bergrummets botten gjordes svagt lutande mot schaktet och pumpgropen, detta för att leda inläckande vatten (som har högre densitet och därför lägger sig under den lagrade produkten) till pumpgropen.

Bergförstärkningen av bergrummen var generellt tämligen minimal och utgjordes primärt av selektiv bultning av kritiska bergblock. Sprutbetong på bergytan för att förhindra sten utfall gjordes sällan eller aldrig. Enda området i ett oljebergrum som hade mer omfattande bergförstärkning var i och runt det vertikala schaktet, efter som ett stenutfall här kunde skada rörinstallationer och pumpar. Tätning med cement (injektering) av bergmassan utanför bergrummet utfördes normalt aldrig, detta var tämligen förståeligt eftersom lagringsprincipen bygger på att vatten ska läcka in i bergrummet och därigenom förhindra att produkt tränger ut i omgivande bergmassa.

Efter slutfört bygge förslöts bergrummen med betongpluggar i tillfartstunneln. Betongpluggar är normalt 6 till 10 m tjocka och kraftigt armerade och med förtagningar i berget för att klara explosionslast.

Principen för oljelagring bygger på att bergrummet är oinklätt med råa bergytan och att grundvatten tillåts att läcka in. Detta förhindrar produkt att läka ut ur bergrummet under förutsättning att grundvattentryck överskrider trycket inne i bergrummet och att det finns vatten i spricksystemen i bergmassan.

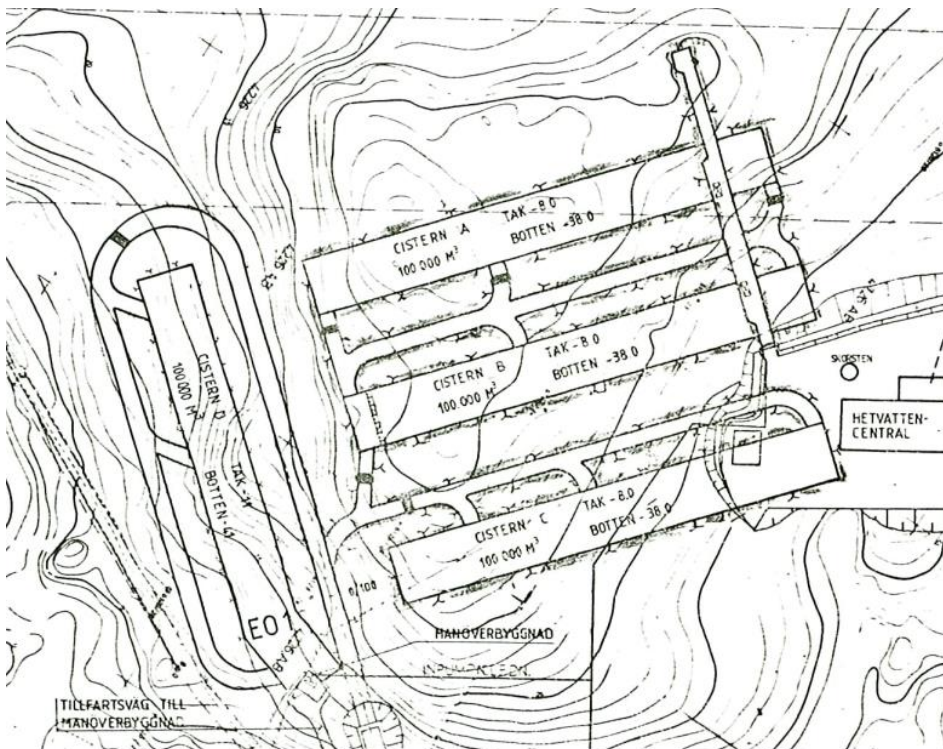
Två principer för lagring av produkt förekommer: lagring med eller utan vattenbädd. I lagring med vattenbädd är alltid bergrummet "fullt". När produkt pumpas ut fylls bergrummet med motsvarande mängd vatten och på motsvarande sätt pumpas vatten ut när bergrummet fylls med produkt. Denna lagringsprincip ger ingen eller minimal gasfas i bergrummet. Den andra principen tillåter att produktnivån varierar i bergrummet vilket ger varierande fyllnadsgrad i bergrummet och därmed uppstår en varierande gasfas i bergrummet.

I vissa berggrumsanläggningar byggdes också vattenorter (gallerier) ovanför bergrummen inklusive borrhål för infiltration av vatten mellan berggrum. Avsikten med detta var att säkerställa att det alltid finns vatten i bergmassans spricksystem runt ett bergrum.

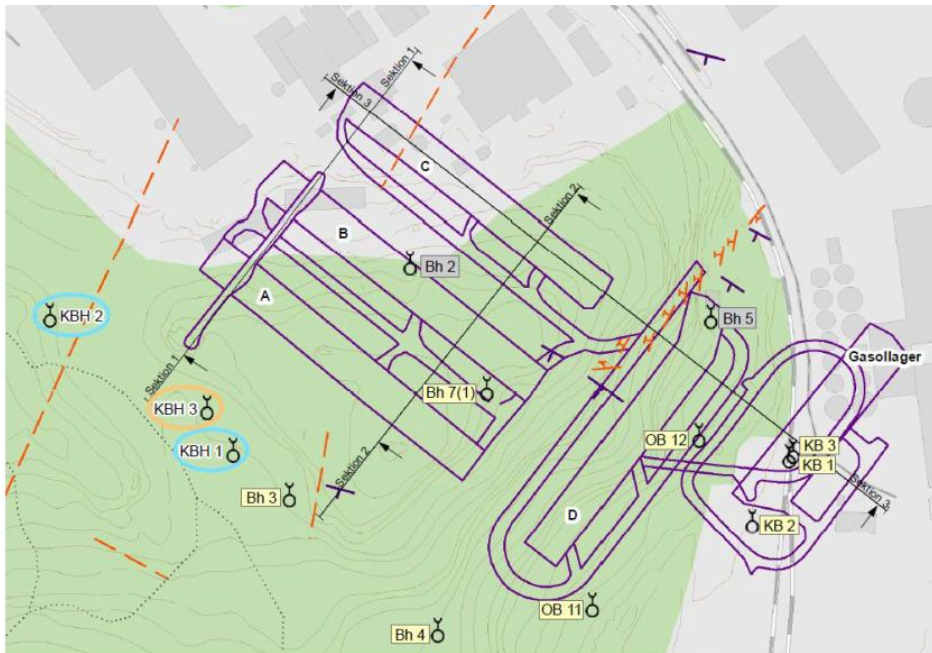
Plåtinklädda berggrum byggdes aldrig i Sverige för oljelagring när den strategiska byggprocessen pågick, dock byggdes några anläggningar med helt fristående cisterner i berggrum för lagring av produkt (bl.a. Kvarnholmen i Nacka och i Jönköping). Även i Norge förekommer oinklädda berggrum för oljelagring. I Saudiarabien har dock ett stort antal plåtinklädda berggrum byggts, men orsaken till detta ligger i avsaknaden av vatten i bergmassans spricksystem vilket möjliggör att produkt kan vandra ut i omgivande bergmassa. Det enda större plåtinklädda bergrummet som finns i Sverige är ett stålinklätt lager för naturgas i Getinge, Halland. Lagret i Getinge är dock inte byggt som ett bergrum utan som en vertikalt stående silo. Skillnaden mellan ett plåtinklätt bergrum/silo och en fristående cistern är att i ett plåtinklätt bergrum/silo sitter plåten dikt an mot berg/berg medan när en cistern byggs i ett bergrum är denna helt fristående med ett brett utrymme mellan berg och plåt.

3.1 De befintliga bergrummen

De fem bergrummen i Sundsvall ligger på två olika nivåer men är byggda efter de principer som tidigare beskrivits. Fyra berggrum, benämnda Bergrum A till D, som använts för lagring av oljeprodukter ligger med en taknivå på ca -8 (botten på -38) under medelhavsnivå och därmed tämligen ytligt. Vid oljelagring finns inget behov av att lagret ligger djupt bara att en tillräcklig bergtäckning finns som möjliggör bygge av bergrummet och att bergrummets tak ligger väl under lägsta grundvattennivån. Ovan berglager A-D varierar markytans höjd från +40 till +10.



Figur 1: Figuren visar placeringen av bergtrum A-D, samt djup till deras tak respektive botten. Bildkälla: Ritningsunderlag, Sundsvall Energi.



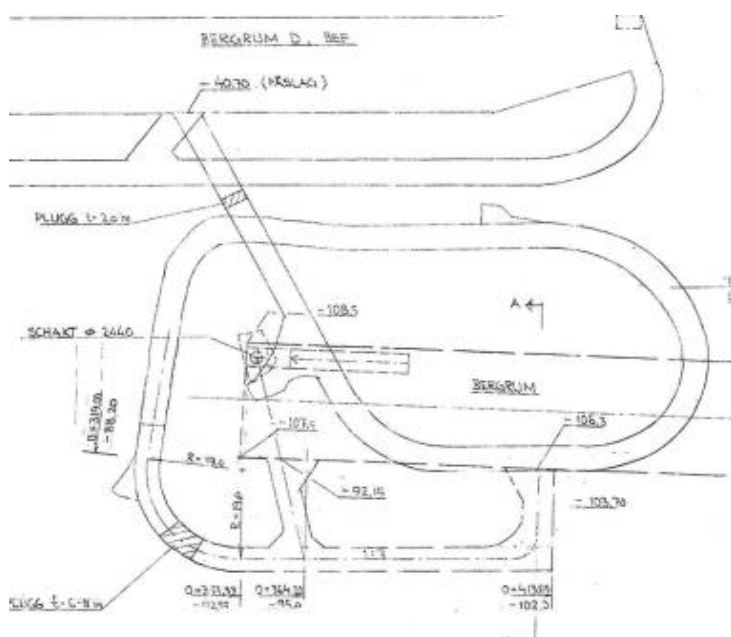
Figur 2: Placering av bergtrummen och tunnlar. Bildkälla: Sweco, 2016: *Sammanställning av tillgänglig hydrogeologisk information i anslutning till bergumsanläggning i Korsta*. Swecos uppdragsnummer: 1660331000.

3.1.1 Gasolbergrummet

Förutsättningarna för CO₂ lagring i Sundsvall är att utnyttja det befintliga bergrummet som tidigare använts för lagring av gasol. Detta bergrum ligger på ett djup av ca -86 (tak), med botten på ca -107 och har en volym på ca 60 000 m³. Ovanför lagret ligger markytan på ca +5. Orsaken att detta bergrum ligger djupare än oljebergrummen är att gasolen lagrades under ett tryck på ca 7 bar. På den nivå som detta lager ligger är grundvattentrycket ca 8 bar, väsentligt högre än gasolens lagringstryck vilket förhindrar att gasolen läcker ut ur bergrummet.

Detta gasolbergrum är förbundet med ett befintligt tomt oljebergrum (Bergrum D) genom en tillfartstunnel. Denna tillfartstunnel utgjorde byggtunnel vid bygget av bergrummet. Gasolbergrummet står i förbindelse med markytan via ett schakt. Schaktet är indelat i en övre del som går från markytan till ett bergutrymme i tillfartstunneln. Detta schakt har ett tvärsnitt på i storleksordningen 4x4 m¹. Schaktets mått bör bekräftas inför kommande projektering. I detta schakt är rör för gasolpumpning installerade och toppen på schaktet har en betongkonstruktion som förslutning genom vilket rören går. Från detta bergutrymme fortsätter ett undre schakt ner till gasolbergrummet.

Påslaget för tillfartstunneln till gasolbergrummet ligger i det tomma oljebergrummet på nivån -40,70, vilket motsvarar bergbotten. En betongplugg sitter ca 20 m in i tillfartstunneln till gasolbergrummet och har en tjocklek på ca 2 m. Denna betongplugg är troligen en sekundär betongplugg byggd dels för att förhindra att tillgänglighet till tillfartstunneln möjliggörs, dels som en barriär för att upprätthålla vattennivån i tunnelsystemet. Bergutrymmet för schaktet ned till gasolbergrummet ligger ca 60 m in i tillfartstunneln (bedömd nivå ca -50). En primär betongplugg för säkring av gasolen i bergrummet är byggd på nivå ca -83 och är 6 – 8 m tjock.



Figur 3: Visar tillfartstunnelns layout mellan det tomma oljebergrummet och gasolbergrummet

¹ Muntlig uppgift från representant för Sundsvalls Hamn.

Gasolbergrummet har förstärkts genom systembultning kring stigschaktet och väggarna mellan schakt och pumpgrop. Bergrummets tak har förstärkts oarmerad sprutbetong. Sprutbetongen är cirka 25 mm tjock, men är ännu tjockare där bergkvaliteten är sämre. Runt stigschakt och pumpgrop har berget förstärkts med nätarmerad sprutbetong. Lokalt längs den sträcka där inpumpningsledningen går har nätning med Gabionnät utförts. Cement- och plastinjektering har utförts i begränsad omfattning för att tätta bergrummet.²

De befintliga ledningarnas konstruktion eller kondition är inte känd i detalj.

² Bergab, 2013: *Gasollager Korsta – PM avseende berggrundsgeologiska och hydrogeologiska förhållanden*.
Bergab uppdragsnummer UG13119.

4. Geologiska och hydrogeologiska förutsättningar vid Sundsvalls Hamn

De geologiska och hydrogeologiska förutsättningarna har beskrivits i ett flertal tidigare rapporter av olika aktörer. Här återges resultaten översiktligt.

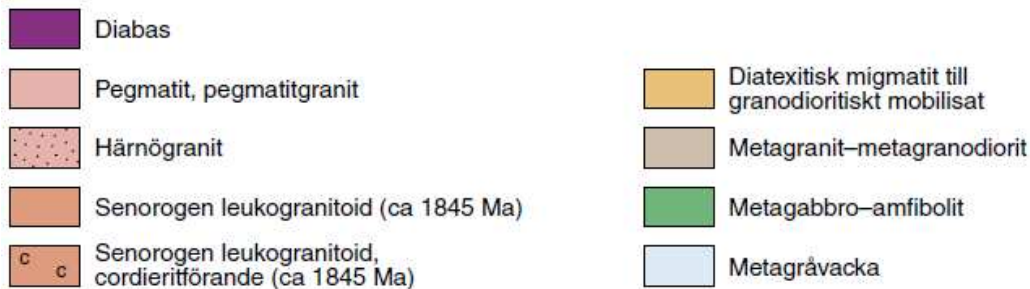
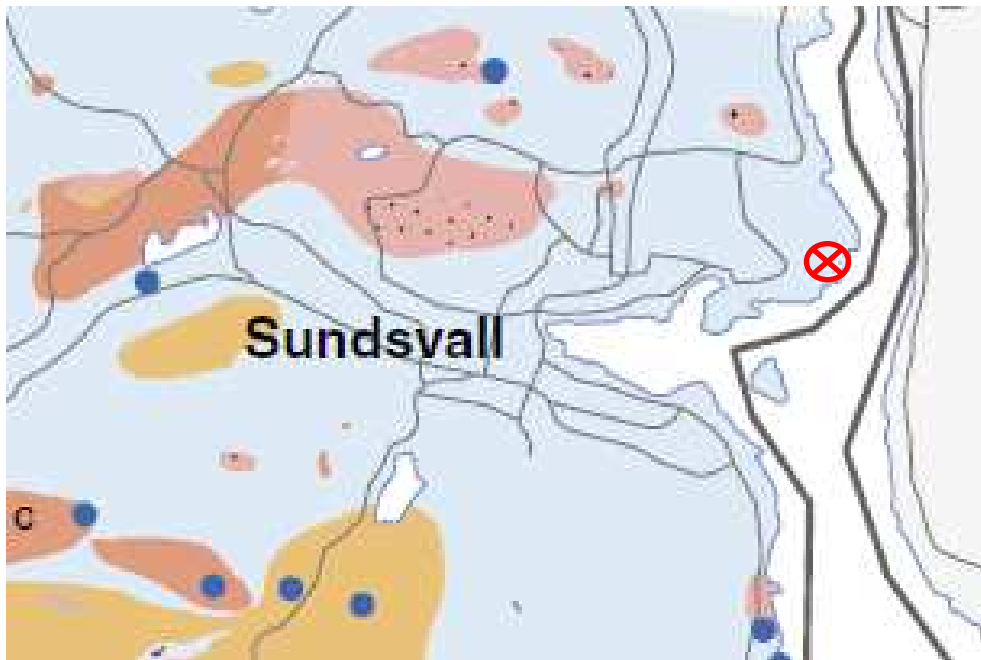
4.1 Geologiska förutsättningar

Inom hamnområdet är jordlagren tunna och berget går i dagen över stora delar av området. Jordarterna består av framför allt av morän, men i lågpunkter i terrängen förekommer även silt- och leravsättningar.

SGU redovisar på sin hemsida en bergartskarta för Sundsvall enligt Figur 4. Gasollagret (läge utmärkt med rött kryss) ligger i ett område där bergarten anges till metagråvacka, vilket överensstämmer med uppgiften i "SWECO, 2016, Sammanställning av tillgänglig hydrogeologisk information i anslutning till berggrumsanläggning i Korsta" där bergarten uppges vara vacka (glimmerrik, medelkornig gnejs). Metagråvackan genomkorsas av yngre gångbergarter, framför allt bestående av diabas.³

Bergets är uppsprucket i en öst-västlig riktning som följer bergets struktur. Dessutom finns tektoniska sprickor i en nord-sydlig riktning.³

³ Sweco, 2016. *Sammanställning av tillgänglig hydrogeologisk information i anslutning till berggrumsanläggning i Korsta*. Swecos uppdragsnummer: 1660331000.



Figur 4: Berggrundskarta enligt SGU.

När berggrummen byggdes kartlades sprickorna och man konstaterade då att sprickfrekvensen var låg och bergkvaliteten mycket bra.

4.2 Hydrogeologiska förutsättningar

Bergarterna som finns på platsen är sprickakviferer. Detta innebär att grundvattnen framför allt förekommer i sprickor i berggrunden och att själva berget i huvudsak är tätt. Detta innebär att den hydrauliska konduktiviteten varierar starkt beroende på sprickfrekvens och sprickriktning.

Lokalt runt gasollagret har berggrundens hydrauliska konduktivitet utvärderats i tidigare rapporter genom vattenförlustmätningar i samband med att lagret

byggdes. Man kunde då konstatera att berget är relativt tätt med låg genomsnittlig hydraulisk konduktivitet på cirka $1-3 \cdot 10^{-8}$ m/s.⁴

När gasollagret var i drift läckte cirka 1-2 m³ grundvatten per dygn⁵ in i gasollagret. Läckvattnet leddes kontinuerligt bort för att förhindra att lagret vattenfylldes. Eftersom vattentrycket var en del av lagrets tätning mättes grundvattennivån i flera observationsbrunnar för att säkerställa att berggrunden runt gasollagret hölls vattenmättad.

Grundvattennivåerna runt bergrummen övervakades kontinuerligt under tiden gasolbergrummet var i drift. De låg då på +12 till -2 beroende på årstid och exakt position inom område.⁴

⁴ Sweco, 2016. *Sammanställning av tillgänglig hydrogeologisk information i anslutning till bergrumsanläggning i Korsta*. Swecos uppdragsnummer 1660331000.

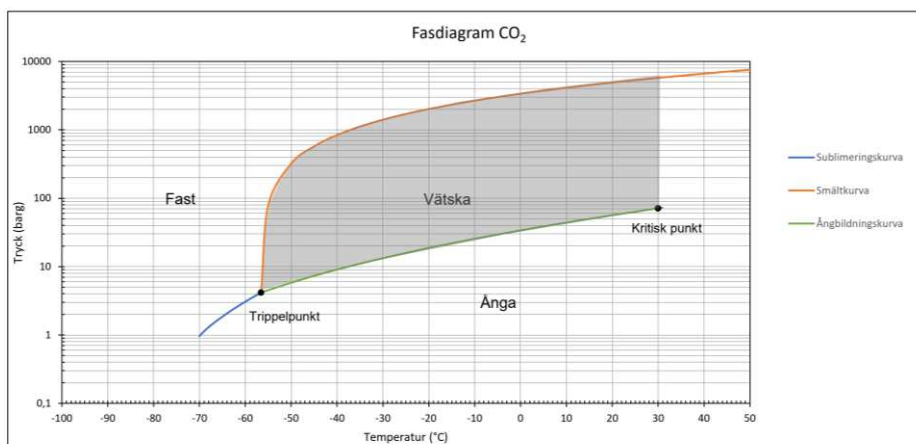
⁵ Midroc, 2013. *Miljöanmälan gasfriförklaring*. Midrocs uppdragsnummer 33320035.

5. Koldioxidlagring i bergrum

5.1 Koldioxidens fysikaliska egenskaper

Vid atmosfärstryck och normala temperaturer vid markytan uppträder koldioxid i gasfas. Vid vilka förhållanden ämnet genomgår fasomvandlingar framgår av fasdiagrammet i Figur 5. Det finns flera egenskaper som är viktiga att beakta. Vid mycket låga temperaturer ($< -56,5\text{ °C}$) förekommer inte koldioxid i vätskefas, utan övergår direkt från fast fas till gasfas. Vid atmosfärstryck (1,013 bar) sker övergången från gasfas till fast fas vid $-78,5\text{ °C}$ ⁶.

Den skuggade delen av diagrammet visar de intervall av teoretiskt gångbara tryck och temperaturer som kan användas vid förvaring av koldioxid i vätskefas i bergrummet.



Figur 5: Fasdiagram för koldioxid. Datakälla: <https://encyclopedia.airliquide.com/carbon-dioxide>

Bergrummets omgivningstemperatur har uppmätts vid tidigare studier⁷ och antas vara $+5\text{ °C}$. Denna temperatur ansätts vara den högsta temperatur som koldioxiden i bergrummet kommer förvaras vid. Vid $+5\text{ °C}$ måste trycket i bergrummet överstiga ca 38,7 bar (g) för att hålla koldioxiden i vätskefas.

Om man i stället kyler den lagrade koldioxiden kan den hållas i vätskefas vid betydligt lägre tryck. Med en temperatur på -55 °C är ett tryck på ca 4,5 bar (g) tillräckligt för att förhindra att vätskan kokar.

Om ämnets kritiska temperatur på $31,1\text{ °C}$ överstigs samtidigt som trycket är större än ca 72,9 bar (g) övergår koldioxiden i ett tillstånd som kallas superkritisk fas. Vid detta tillstånd betar sig koldioxiden som en gas men har en mycket högre densitet. Ämnets egenskaper i superkritiskt tillstånd har stor betydelse exempelvis för långa transporter i pipeline, men för ändamålen som undersöks i den här förstudien bedöms de dock vara av mindre betydelse.

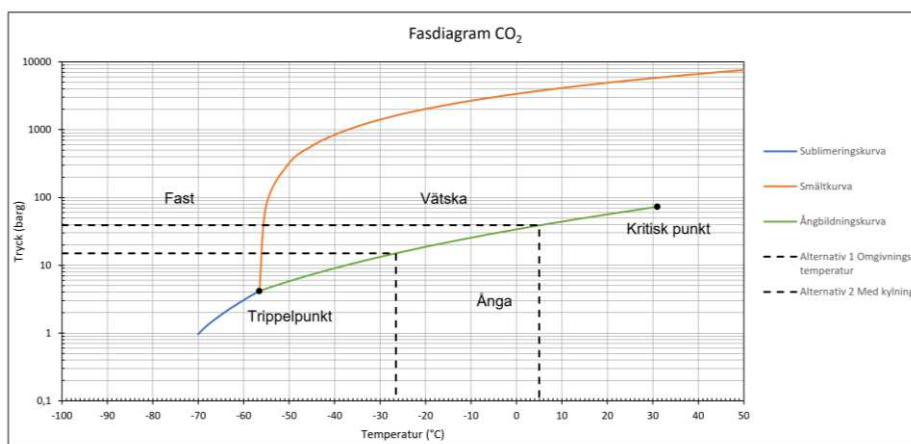
⁶ IPCC, 2005: *Carbon dioxide capture and storage*. Cambridge University Press. New York. ISBN-

⁷ Midroc, 2013. *Miljöanmälan gasfriförklaring. Bilaga 2*. Midrocs uppdragsnummer 33320035.

5.2 Konceptuell teknisk lösning

Som tidigare har konstaterats i denna rapport kan förvaring av CO₂ ske vid ett relativt stort spann av tryck och temperaturer. För den fortsatta undersökningen har två uppsättningar tryck och temperatur valts ut.

- 1) Lagring med mycket högt tryck, >39 bar (g) vid omgivningstemperatur, uppskattningsvis +5 °C
- 2) Lagring under moderat tryck 15 bar (g) och mycket låg temperatur -26,5 °C, vilket är samma förhållanden som transportfartyget kräver.



Figur 6: Fasdiagram för koldioxid, med alternativ 1 och 2 som streckade linjer. Datakälla: <https://encyclopedia.airliquide.com/carbon-dioxide>

För att kunna belasta bergrummet med ett tryck på 15–39 bar (g) måste bergrummet vara tätt. Enbart det statiska vattentrycket runt bergrummet kommer inte vara tillräckligt för att förhindra läckage. Två förslag på metoder för att åstadkomma detta ges i nedanstående stycken.

Dessutom föreslås en konceptuell teknisk lösning för att kunna fylla och tömma bergrummet samt för att kontrollera och övervaka tryck och temperatur.

5.2.1 Drift av bergrummet

Exakt utformning och drift av system för tömning och fyllning av bergrummet är inte till fullo utredda i denna rapport. Exakt placering av ledningarnas mynningar och deras dimension, tillsammans med gränsvärden för tryck, temperatur och fyllnadsgrad är avgörande parametrar för lagrets funktion och säkerhet. Seco rekommenderar att dessa frågor utreds i detalj i kommande projektering.

Det finns flera alternativa lösningar som skulle kunna fungera. Exempelvis skulle tömningen av bergrummet kunna utföras genom att pumpar anpassade för mediet installeras i bergrummet. Pumpar i bergrummet blir svåråtkomliga och komplicerade att utföra service och underhåll på. Av detta skäl är det troligen mer lämpligt att tömningen utförs genom att koldioxiden leds ut ur lagret med hjälp av

tryck som byggs upp i bergrummet. Trycket kan förslagsvis regleras med hjälp av pumpar vid markytan. Fördelarna med denna lösning är att inga rörliga delar behöver installeras i bergrummet utan alla stora komponenter som behöver service, underhåll och utbyte kan hållas vid markytan. Nackdelen är att flödet kan bli svårare att reglera och kan begränsas av trycket i bergrummet. Det är också viktigt att ta hänsyn till att det statiska vätsketrycket minskar när koldioxiden flödar upp genom stigarledningen. Detta kan göra att vätskan övergår i gasfas om inte tryck och temperatur anpassas för att undvika detta.

Bergrummet bör inte fyllas helt av koldioxid i vätskefas. Om stödsystem som håller vätskan vid ett konstant tryck och temperatur skulle falla riskerar vätskan att värmas upp och expandera. Det bör därför alltid finnas utrymme för termisk expansion utan att trycket i bergrummet når riskabla nivåer. Istället bör driften bergrummet anpassas så att det alltid finns en mindre andel gasfas ovanför vätskefasen.

För att övervaka och kontrollera tryck och temperatur i bergrummet kommer ett antal stödsystem krävas ovanför markytan. Variationer i tryck och temperatur kan till exempel uppstå vid tömning och fyllning av bergrummet och vid felaktig drift av förvätskningsanläggningen.

Det är därför lämpligt att bergrummet minst utrustas med följande system:

Tryckhöjningskrets:

Trycket i bergrummet kan höjas genom att koldioxid i gasfas tillförs i bergrummets topp. Alternativt kan koldioxid i vätskefas avledas från bergrummets botten och värmas upp, exempelvis i en uteluftsvärmeväxlare. Koldioxiden blir då varmare och förångas, innan den pumpas tillbaka till bergrummets topp. Denna process ökar trycket i bergrummet.

Tryckhöjning kan behövas exempelvis då bergrummet töms på koldioxid. Om fyllnadsgraden minskar kommer trycket sjunka om inte åtgärder vidtas för att motverka detta. Om trycket faller riskerar koldioxiden att koldioxiden förångas i bergrummet och i stigarledningen. Temperaturen i bergrummet kan teoretiskt sjunka så mycket att koldioxiden fryser och inte går att upp ur bergrummet. En annan nackdel med att trycket sjunker i bergrummet är att koldioxidflödet upp ur bergrummet minskar med fallande tryck.

Trycksänkingskrets/kylkrets:

Trycket i bergrummet kan minskas genom att koldioxid i gasfas avleds från bergrummets topp. Den avledda koldioxiden kan samlas upp vid markytan, behandlas i förvätskningsanläggningen och återföras till bergrummets botten. Alternativt kan koldioxiden släppas ut till atmosfären.

När koldioxid förångas kyls samtidigt bergrummet på grund av fasomvandlingsenergin. Eftersom värme hela tiden kommer ledas in i bergrummet från omgivningen behöver det kylas kontinuerligt medan koldioxid lagras i bergrummet. Genom att kontinuerligt låta en liten mängd koldioxid förångas i bergrummet kan tryck och temperatur hållas konstanta.

Trycket kan också behöva justeras nedåt medan bergrummet fylls.

Övervakningssystem:

Bergrummet behöver minst förses med tryck- och temperaturmätning i dess topp och botten, för att kunna övervaka förhållandena både i gas och vätskefasen.

Fyllning och tömning:

Processerna för fyllning och tömning behöver utredas i detalj i kommande projektering. Exempelvis kan koldioxid tillföras i bergrummets topp med pumpar som placeras vid markytan, för att vid tömning avledas från bergrummets nedre del via självtryck.

Säkerhetsutrustning:

Förutom ovan nämnda system för att kontrollera tryck och temperatur bör bergrummet även förses med säkerhetsventiler som vädrar ut koldioxid till luften om trycket stiger över en kritisk nivå. I detta skede går det inte att avgöra vilket tryck bergrummet maximalt kan belastas med. Sweco rekommenderar att det maximala tryck som kan tillåtas utreds i kommande projektering.

5.2.2 Tätningslösning 1 kylt bergrum

Gasolbergrummet är idag vattenfyllt vilket borgar för att spricksystemen runt bergrummet också är vattenfyllda. Gasolen hölls inne genom att det hydrostatiska trycket i spricksystemen översteg trycket i bergrummet. Om trycket blir för högt, eller om det hydrostatiska trycket blir för lågt, exempelvis genom att sprickorna dräneras på vatten, så fungerar inte denna princip.

Även om koldioxiden förvaras vid en låg temperatur krävs ett tryck som överstiger det förväntade hydrostatiska trycket. Den låga temperaturen gör dock att grundvattnet i spricksystemen runt bergrummet fryser till is och bildar en naturlig tätning som håller koldioxiden inne. Detta förutsätter att alla sprickor runt bergrummet är vattenförande vid driftsättning. Sweco menar att detta redan har bekräftats eftersom lagret har använts för gasollagring. En annan förutsättning är att vattnet i sprickorna har hunnit frysa ordentligt.

Frysning för anläggningsarbeten är en känd teknik som ibland används när bergförhållanden är ogynnsamma och bergmassan bergmekaniskt behöver stabiliseras. Som exempel har detta gjorts i Hallandsås-tunnlarna, Södra länken (Stockholm) och vid arbetet med Botniabanan. Sweco har dock inte kunnat hitta några tidigare projekt där tekniken prövats för koldioxidlagring i bergrum.

En nackdel med lösningen är att eftersom koldioxiden förvaras vid en temperatur som är mycket kallare än omkringliggande berg kommer en betydande uppvärmning av bergrummet ske från omgivningen. Detta innebär att bergrummet måste förses med någon typ av kylning för att kunna upprätthålla önskad temperatur. I denna rapport föreslår Sweco kylning genom förångning vid konstant tryck på ca 15 bar (g). Beräkningar som beskrivs mer ingående i kommande stycken visar att värmeförlusten stabiliseras på ca 70 kW (70 kJ/s) efter ett antal år. Vid konstant temperatur för vätskefas och gasfas och med en fasomvandlingsentalpi på 296,9 kJ/kg innebär det en förångningstakt på 0,24 kg/s. Detta motsvarar 19,2 m³/dygn (CO₂ (v)), eller ca 1 % av maximal volym CO₂ (v) per månad.

Fördelen är att bergrummet skulle kunna användas utan större ombyggnadsarbeten i själva bergrummet. En annan fördel är att detta är samma tryck och temperatur som transportskeppen använder sig av.

Driftsättning:

Lösningen med kyld förvaring kräver extra försiktighet när bergrummet ska tas i drift för förvaring av CO₂ eftersom vattnet i omkringliggande berggrund ännu inte kommer vara fruset. Detta innebär att trycket i bergrummet måste hållas lågt under uppstartfasen för att undvika att CO₂ läcker ut genom sprickor i bergrummet. Genom att tillföra flytande CO₂ till bergrummet kommer den att förångas och sänka temperaturen i bergrummet så att vattnet i sprickorna efterhand fryser. Trycket justeras ned vid behov genom att släppa ut koldioxid i gasfas.

För att säkerställa att bergmassan är ordentligt frusen innan bergrummet belastas med det planerade drifttrycket och för övervakning under driftskedet bör ett antal borrhål för temperaturövervakning borrar runt bergrummet. Avståndet mellan borrhål och bergrummets vägg föreslås vara cirka 5 meter och borrhålen bör mätas in för att veta exakt på vilket avstånd från bergsväggen det är placerat. För detta ändamål bedöms kärnborring vara en lämplig metod.

Hur lång tid det tar för frysfronten att nå 5 meter ut i bergmassan beror bland annat på marktemperatur, temperaturen i bergrummet, bergart och porositet i bergmassan. Beräkningar visar att om temperaturen i bergrummet är -26,5 °C tar det i storleksordningen tre månader för frysfronten att nå 5 meter utanför bergrummet.

5.2.3 Tätninglösning 2 förvaring vid bergrummets omgivningstemperatur

Förvaring vid omgivningstemperaturen +5 °C och ett tryck på minst ca 39 bar (g). Fördelen med detta alternativ är att ingen energitransport sker mellan berget runt bergrummet och koldioxiden eftersom temperaturerna hålls lika. Detta ger potentiellt en lägre driftkostnad eftersom ingen kylning eller uppvärmning behövs nere i bergrummet.

Med tanke på det höga tryck som krävs för att hålla koldioxiden i vätskefas vid omgivningstemperatur är det inte realistiskt att tro att enbart det hydrostatiska trycket är en tillräcklig barriär. Sweco bedömer att bergrummet måste kläs in med stål för att säkerställa att det är tätt för förvaring vid högt tryck.

Att bygga ett stålinklätt bergrum är ingen okänd teknik. Gasollagret i Getinge är byggt enligt denna princip och vätagaslagringsprojekten som nu planeras i Sverige bygger också på detta koncept. Men principerna för dessa lagringsutrymmen är att cylindriska bergrum, silos, byggs, inte långa skepp. Ett cylindriskt bergrum är bergmekaniskt bättre än ett långt skepp. Ett långsmalt bergrum som är stålinklätt klarar dock de relativt "modesta" trycken på runt 100 bar men inte samma mycket höga tryck som ett cylinderformat bergrum klarar.

Svårigheten är dock själva bygget av stålinklädningen, som utförs genom att tjocka skivor av plåt svetsas samman. När stålkonstruktionen är utförd fylls utrymmet mellan berg och baksida plåt med betong. Normalt sitter också en dränering mot berget för att förhindra att vattentryck uppstår mot plåten. Betongfyllning bakom plåten krävs därför för att plåten måste ligga dikt an mot underlaget för att klara de höga trycken, inklusive tryckvariationerna.

Att komplettera ett befintligt oinklätt bergtrum med stålklädnad är en komplicerad process och kostnaderna är svårbedömda eftersom sådan konvertering aldrig tidigare gjorts i Sverige. De bergtrum som byggdes i Saudiarabien med stålklädnad var redan från början designade och byggda för detta koncept vilket är en väsentlig skillnad.

Den flytande koldioxiden behöver hålla +5 °C när den pumpas ner för att undvika energiförluster eller oavsiktlig uppvärmning av berggrunden. Detta kräver en förvätskningsanläggning vid markytan som troligen även behöver vara utrustad med kylning.

5.3 Åtgärder i bergtrummet

5.3.1 Lösning 1 kylt bergtrum

Om CO₂ lagras under moderat tryck men vid mycket låg temperatur bedömer Sweco att det kan vara möjligt att använda en tätning som bygger på att grundvattnet i bergmassan fryser till is. I denna rapport har Sweco valt att undersöka förvaring vid 15 bar (g) och -26,5 °C.

Ingen bergmassa kommer att vara sprickfri och tillräckligt tät för att förhindra läckage av gas eller vätska så länge trycket i bergtrummet är högre än det omgivande grundvattentrycket. Men om vatten i spricksystem fryser till is kommer isen att fungera som tätning, förutsatt att det finns vatten i spricksystemen.

Om lagring kan ske i ett oinklätt bergtrum behövs ingen fysisk access till bergtrummet, förutom till schaktet för rör och pumpinstallationer som förbinder gasolbergtrummet med markytan. Både schaktets övre och undre del behöver komma åt, varför tillfartstunneln kommer behöva tömmas på vatten. Trots detta innebär det ett väsentligt enklare arbete för att förbereda bergtrummet för lagring av koldioxid jämfört med att alternativ 2.

Utförande:

För att få tillgång till gasolbergtrummet via schaktet för rörinstallationer och därmed kunna installera nya rör krävs först att allt vatten fram till den sekundära pluggen i tillfartstunneln pumpas bort. Både rampen och det tomma oljebergtrummet töms på vatten. Den volym som behöver pumpas bort är troligen lite över 400 000 m³, vilket är en ansenlig mängd vatten. Därefter tas betongpluggen bort och vatten pumpas ut ur tillfartstunneln ned till nivå ca -55. När detta är utfört kan arbete runt schaktet utföras. För att säkerställa arbetsmiljön måste alla tunnlar och bergutrymmen mellan markytan och fram till tillfartstunneln säkerhetsmässigt ses över och hela tillfartstunneln mellan det tomma oljebergtrummet fram till toppen på schaktet som går ned i gasolbergtrummet bergskrotas och eventuellt bergbultas, detta görs som ett inledande arbete. Därefter kan arbeten med att avlägsna befintliga rör göras och förberedelser för ny rördragning påbörjas samtidigt som gasolbergtrummet där CO₂ ska lagras läns pumpas.

Från bergutrymmet i tillfartstunneln förläggs nya ledningar genom schaktet till markytan. Rör kläs med isolering. Betongkonstruktioner i schakt över gasolbergtrummet kompletteras med nya betongkonstruktioner. Den sekundära

betongpluggen återbyggs på samma plats som tidigare och blir en slutlig förslutning. När betongkonstruktionen i schaktet till gasollagret kompletteras är det också lämpligt att injektera bergmassan runt övre delen av schaktet med cementbaserat injekteringsmedel.

I anslutning till CO₂ lagret krävs att ett antal observationshål för att mäta temperaturen runt bergrummet borras och att mätutrustning installeras i borrhålen. Dessa borrhål utförs som styrd borrhållning för precision och mäts in med X, Y, Z koordinater.

Kostnadsberäkningen grundar sig på att arbetet går att genomföra med följande moment:

- Se över arbetsmiljön i ramp och oljebergbergrum 1 månad á 50 000:- /arbetsdag, totalt 1 000 000:-
- Material bult och sprutbetong, totalt 100 000:-
- Bortbilning av sekundär betongplugg. Totalt 500 000:-
- Säkra arbetsmiljön i tillfartstunnel och bergutrymme i tunneln vid schakt ner till gasollager 500 000:- inklusive material.
- Ta bort befintliga rör för gasolpumpning i tunnlar och schakt och öppna upp betongkonstruktioner i schakt till gasolbergrum, totalt 1 000 000:-
- Nya rör mellan markyta, genom befintliga schakt och ned till underkant gasolbergrum. (140 m á 5 000 kr/m), totalt 700 000.- Rörstöd och ventiler 300 000:- Totalt 1 000 000:-
- Isolering för rör. Totalt 80 000:- (80 m á 1 000:-)
- Arbeta med installationer av rör 2 mån á 50 000:-/dag, totalt 2 000 000:-
- Ventilation och hantering av vatten, totalt 3 000 000:-
- Ny sekundär betongplugg + komplettering av betongplugg i schakt och injektering runt övre delen av schaktet, totalt 1 500 000:-
- Borrhållning av fyra mätborrhål (styrda och inmätta borrhål) + installation av temperaturgivare och ingjutning, (borrhål 120 m st. á 2 500 kr/m). Totalt 1 500 000:-

Ovan nämnda priser avser ett utförande där tömning och fyllning av bergrummet utförs utan installation av pumpar med kringutrustning i schakt eller bergrum.

5.3.2 Lösning 2 förvaring vid bergrummets omgivningstemperatur

Om ett befintligt bergrum ska konverteras med stålplåtinklädnad krävs före montering av plåt följande moment, vilka är svåra att kostnadsbedöma exakt:

- Ta bort befintliga pluggar i tillfartsrampen
- Säkra bergrummet för block- och stenufall genom bergskrotning, kompletterat med bult och sprutbetong

- Om lagring av tjockolja skett i bergrummet måste tak, väggar och golv tvättas rena. Tvättningen görs med ånga och kemiska lösningsmedel. Bergrummen behöver tvättas dels för att säkerställa en god arbetsmiljö för plåtmontörerna, dels för att klara vidhäftning när sprutbetong appliceras på bergytor.

Att ta bort befintliga betongpluggar är kanske ingen större svårighet även om dessa är kraftigt armerade, men i samband med detta krävs att rampen säkras mot stenutfall. Detta görs genom först bergskrotning och sedan bultning och applicering av sprutbetong för att säkra arbetsmiljön. Möjligen krävs också att rampen breddas för att senare kunna ta in större fordon, som kranbilar.

För att säkra bergrummet för block- och stenutfall inklusive tvättning krävs åtkomst till alla bergytor. Tvättning behövs sannolikt inte för gasollagret, utan gäller framför allt de bergrum som har använts för förvaring av råolja, diesel eller dylika petroleumprodukter. Med tanke på bergrummens höjd, ca 30 m, är det inte möjligt att utföra arbetet med på botten av bergrummet stående mobil utrustning. Detta skulle innebära en alltför riskfylld arbetsmiljö och för stora höjder för att vara praktiskt genomförbart. Det troligen enda realistiska alternativet är att låta bergrummet vara vattenfyllt och successivt sänka av vattennivån och att utföra tvättning och säkring av bergrummet från flytande arbetsflottar som bär personal och utrustning. Detta har exempelvis utförts i Värtan, Stockholm, när ett av Fortums råoljelager konverterades till flislager, dock utfördes ingen inklädnad. Men detta arbete var en tidskrävande procedur och därmed kostsam.

När sedan bergrummet är bergtekniskt säkrat och rengjort ska inklädnad med tjockplåt göras, vilket kommer att kräva ett flertal stora kranar och ställningar. Detta kommer att innebära höga höjder och tunga lyft, särskilt komplicerat kommer det att vara att montera takplåtar för valvet. Den byggprincip som troligen är mest lämplig är att först bygga ett "stålskelett" av vertikala och horisontella balkar som fäst mot berget. På detta stålskelett svetsas sedan plåtarna. Denna tekniska lösning är utförd på plåtklädda produktlager i Saudiarabien och därmed en beprövad byggmetod. Men detta gjordes i Saudiarabien inte som en konvertering utan ingick i den ursprungliga lösningen.

Montering och hopsvetsning av plåt i ett långsgående bergrum skiljer sig utförandemässigt från att klä in en silo med tjockplåt, som i Getinge.

Montering av plåt i en silo görs enligt följande princip, när hela silon är utsprängd:

- Först svetsas plåt för hela takkupolen samman
- När takkupolen av plåt är klar jackas denna upp med domkrafter och plåt svetsas samman runt hela silon väggar och svetsas samman med kupolen.
- När första "ringen" är klar jackas denna upp tillsammans med takkupolen och en ny ring byggs på till dess att kupolen nått taket på silon. När varje ring är sammansvetsad har den stöd och behöver inte särskilt externt stöd
- Bottensektionen av plåt byggs när tak och väggar är täckta med plåt.
- Efter det att hela silon är plåtklädd görs gjutning mellan berg och baksida plåt, med eller utan redan monterad dränering.

Den stora fördelen med att bygga och plåtinkläda en silo är att inga stora kranar behövs för monteringen. Sammanfattningsvis är en plåtinklädd silo väsentligt mycket mindre komplicerad att bygga än att på motsvarande sätt klä in ett långt bergum.

Sweco bedömer sammanfattningsvis att ovanstående lösning kan utföras genom följande moment:

- Vidgning (strossning) av tillfartstunnel och bortbilning av betongpluggar: Totalt ca 4 000 000:-
- Arbete med bergsäkring av bergum (6 yrkesarbetare inklusive flottar och maskiner i 2 månader 50 000:-/dag) Totalt ca 2 000 000:-, osäker bedömning kan vara högre.
- Material, sprutbetong och bult (6 000 m² sprutbetong á 500 kr/m² + 950 bult á 800 kr/st.) Totalt ca 4 500 000:-
- Ventilation och hantering av vatten. Totalt 2 000 000:-
- Montering av plåt inklusive stålskelett (10 500 m² á 6000 kr/m²) Totalt ca 63 000 000:- Denna siffra är ytterst osäker och kan vara flera 1000 kr högre per m² än bedömt men också lägre.
- Membran för dränering av vatten (10 500 m² á 500 kr/m²) Totalt ca 5 000 000:-
- Bakfyllning mellan plåt och berg med självkompakterande betong (5000 m³ á 5000 kr/ m³) Totalt ca 25 000 000:-
- Nya betongpluggar i tillfartstunnel och schakt, totalt ca 1 000 000:-
- Ta bort befintliga rör för gasolpumpning i tunnlar och schakt och öppna upp betongkonstruktioner i schakt till gasolbergum, totalt 1 000 000:-
- Nya rör mellan markyta, genom befintliga schakt och ned till underkant gasolbergum. (140 m á 5 000 kr/m), totalt 700 000.- Rörstöd och ventiler 300 000:- Totalt 1 000 000:-
- Isolering för rör. Totalt 80 000:- (80 m á 1 000:-)
- Arbete med installationer av rör 2 mån á 50 000:-/dag, totalt 2 000 000:-

6. Kostnadsbedömning

6.1 Beräknade kostnader

Kostnaderna i tabellen avser de utföranden som beskrivs i ovanstående stycken 5.2.2, 5.2.3 samt 5.3 och gäller med de antaganden som beskrivs i stycke 6.2 och 6.3.

Tabell 1: Bedömda kostnader och antaganden.

Antagande	Nyckeltal	Kommentar	Referens
Investeringskostnad alternativ 1	20 MSEK	Förvaring vid cirka -26,5 °C och ca 15 bar (g).	Uppskattad kostnad
Investeringskostnad alternativ 2	120 MSEK	Förvaring vid cirka 5 °C och ca 39 bar (g). Fullständig inklädning med stålplåt.	Uppskattad kostnad
Energiförlust under drift	Ca 930 MWh/år	Beräknat medelvärde de första 10 åren. Uppvärmning från omkringliggande berg vid stationära förhållanden. För att hålla en konstant temperatur i bergrummet kompenseras denna energiförlust genom att en liten del koldioxid tillåts förångas. Motsvarande mängd energi måste tillföras vid markytan för att förvätska koldioxiden och återföra den till bergrummet.	Beräknat energiflöde
Kyleffektbehov	År 1: ca 160 kW År 10: ca 70 kW	Effektbehov för att hålla konstant temperatur i bergrummet, alternativt motsvarande effekt för att kondensera till vätska den gas som förångats för att kyla bergrummet.	Beräknat energiflöde
Underhållskostnad alternativ 1	1,7 MSEK/år	Antas vara 1,5% av investeringskostnaden.	Uppskattad kostnad
Underhållskostnad Alternativ 2	0,5 MSEK/år	Bergrummet antas vara väsentligen underhållsfritt. Avser övervakning och tillsyn av observationsbrunnar, stigarledning och givare i bergrummet.	Uppskattad kostnad
Antagen teknisk livslängd CO₂-ledningar upp ur bergrum	>25 år		Knoope 2015

6.2 Antaganden och förutsättningar anläggningskostnader

Kostnaden för åtgärder i bergrummet har beräknats för två olika uppsättningar av tryck och temperatur. Det första innebär förvaring vid omgivningstemperatur som antas vara ca +5 °C och ca 39 bar (g). För att detta ska vara tekniskt möjligt utan läckage bedömer Sweco att bergrummet måste kläs in invändigt med stålplåt. Det andra alternativet innebär att koldioxiden förvaras vid – 26,5 °C och 15 bar (g). Tekniken bygger på att frysa grundvattnet i spricksystemen runt bergrummet och på detta vis skapa en naturlig barriär som håller inne koldioxiden.

Denna kostnadsberäkning avser en teknisk lösning där tömning utförs genom att koldioxid leds upp ur bergrummet genom självtryck, utan att pumpar installeras i bergrummet. Hur fyllnings- och tömningsprocessen utformas på ett sätt som är optimalt för de aktuella förutsättningarna behöver utredas i kommande projektering. Sweco antar också att behov av kylning tillgodoses genom förångning av koldioxid i lagret. Det förutsätts att minst två ledningar installeras genom ett befintligt schakt från markytan ned till bergutrymmet som avslutas i lagrets topp och botten. Därtill krävs en ledning för grundvatten som inte kommer användas under lagrets drift, utan under byggnation och uppstart. Det förutsätts också att samtliga befintliga installationer i schaktet kommer behöva demonteras och ersättas med nya.

För det kylda lagret förutsätts att inga förstärkningsåtgärder behöver vidtas i själva bergrummet, undantaget schaktet och delen av bergrummet i schaktets direkta närhet.

Sweco har dessutom antagit att bergrum D, tillfartsramp och gasolbergrummet är helt fyllda med grundvatten. För kostnadsberäkningen antas att grundvattnet inte är oljeskadat och därför inte behöver hanteras ytterligare utöver att pumpas upp.

Markytan ovanför lagret bedöms ligga på en nivå av ca +5.

De beräknade kostnaderna bedöms ha en noggrannhet på +/- 50%, med reservation för fluktuerande stålpriser.

6.3 Antaganden och förutsättningar driftkostnader

För att hålla CO₂ i vätskefas vid trycket 15 bar (g) krävs att vätskan håller en temperatur på -26,5 °C. Omgivande berg är avsevärt varmare, vilket medför ett värmefflöde från berg till vätskan i lagret. Vätskan behöver därför kylas kontinuerligt. I nedanstående stycke görs en uppskattning av värmeinflödet från omgivande berg som då kyls ned efterhand. När omgivande berg bli kallare minskar värmeinflödet.

6.3.1 Beräkningsförutsättningar

Omgivande bergets begynnelsestemperatur

Årsmedeltemperatur i luften är enligt SMHI:s statistik för Sundsvall under 1961–90 lika med +3,6 °C. Området är i medeltal snötäckt under ca 150 dagar. En grov tumregel för uppskattning av markytans temperatur är att med utgångspunkt från luftens årsmedeltemperatur lägga till 1,5 °C för varje 100 dagar med snötäcke. (Snötäcket isolerar marken under vintern). Erfarenheter från andra mätningar tyder på att värdet snarare bör vara 1,2–1,3 °C per 100 dagar snötäcke. Detta medför en årsmedeltemperatur vid markytan på ca +5,5 °C.

Temperaturen stiger i svenskt urberg normalt med ca 1,3–1,7 °C per 100 m djup under markytan beroende på geotermiskt värmefflöde och värmeledningsförmåga i berget. Lågt geotermiskt värmefflöde och hög

värmeeledningsförmåga ger lägre temperaturgradient. Temperaturen på gasollagrets medeldjup (100 m) bör då enligt dessa uppgifter ligga kring intervallet +6,8 °C till +7,2 °C. Här väljs ett värde på +7,0 °C för att inte underskatta värmeinflödet.

Bergets värmeeledningsförmåga

Värmeinflödet till gasollagret är proportionellt mot bergets värmeeledningsförmåga, vilken bestäms av bergart och dess mineralkomposition. Som tidigare beskrivits i stycke 4.1 består berggrunden vid Korstavverket av metagråvacka (glimmerrik, medelkornig gnejs).

Jan Sundberg anger i sin avhandling "Thermal properties of soils and rocks", Geologiska Institutionen, Göteborgs Universitet, 1988, uppgifter om värmeeledningsförmågan för torra bergartsprover i Västernorrlands län:

Tabell 2: Termiska egenskaper för berggrunden i Västernorrlands län. Efter Sundberg, J., 1988: *Thermal properties of soils and rocks*.

Bergart	Antal prov	Medelvärde	Standardavvikelse
Granit	56	3,55	0,248
Granodiorit	17	3,30	0,224
Tonalit	25	3,04	0,247
Kvartsdiorit	5	2,58	0,072
Omv sedimentärt	27	3,74	0,52

Vacka är en omvandlad sedimentär bergart. För uppskattning av värmeinflödet till gasollagret väljs värmeeledningsförmågan till 3,75 W/mk.

Volymetrisk värmekapacitet för kristallint berg uppvisar en måttlig variation. Här antas att värdet är 2,2 MJ/m³,K.

Beräkningsmetod

Värmetillflödet uppskattas med hjälp av formler från "Claesson et al, 1985, Markvärme – En handbok om termiska analyser, Del I". Här används formel 5.1.45 för korta tider, formel 5.1.52-54 för stationära förhållanden och formel 5.1.63 för långa tider.

6.3.2 Beräknat värmeinflöde (kylbehov)

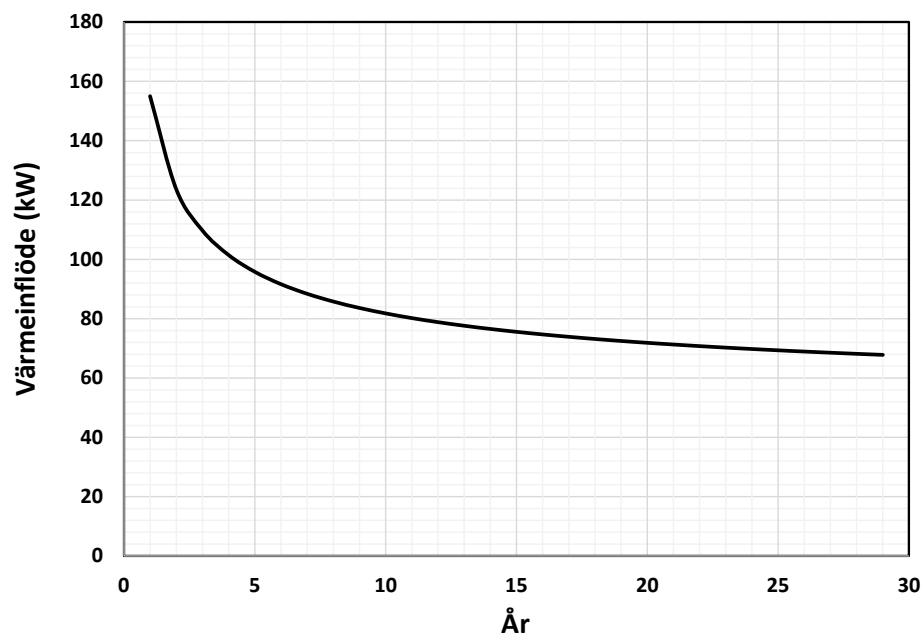
Indata till beräkningen anges i nedanstående tabell:

Tabell 3: För beräkningarna i stycke 6.3 har följande indata använts.

Längd	L	115	m
Bredd	B	24	m
Höjd	H	20	m
Medeldjup	D _m	100	m

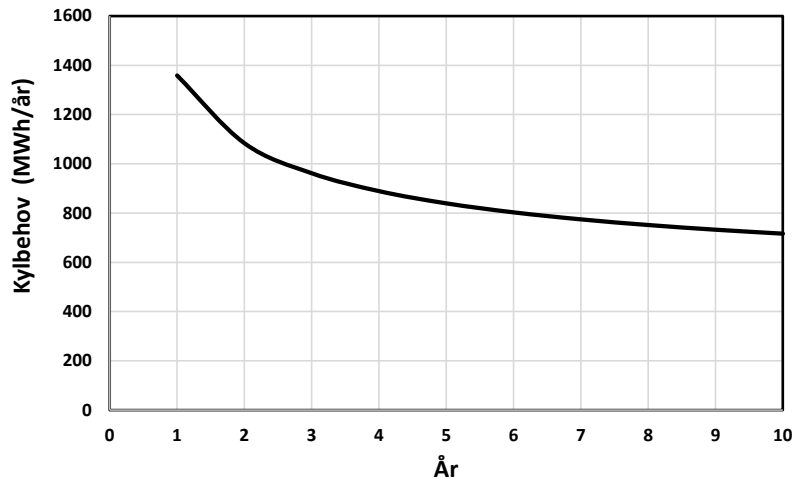
Värmeledningsförmåga	λ	3,75	W/mk
Vol värmekapacitet	C	2 200 000	J/m ³ ,K
Initial markttemperatur	T ₀	7,0	°C
Årsmedel lager	T _m	-26,5	°C
Area	A	11 080	m ²
Volym	V	55 200	m ³
Kantlängd	L _e	636	m

Uppskattat värmeinflöde (kW) under 30 år visas i Figur 2. Värmeinflödet stabiliseras efter hand på ca 70 kW.



Figur 7: Uppskattat värmeinflöde (kW) under 30 år.

Uppskattat värmeinflöde (kW) kan uttryckas som ett årligt kylbehov. Se Figur 3.



Figur 8: Uppskattat årligt kylbehov (MWh/år) under 30 år.

6.4 Bergrum A-D

Inom uppdraget ingick även att översiktligt bedöma möjligheterna för att använda de mer ytligt belägna bergrummen A-D, som tidigare använts för oljelagring, för koldioxidlagring.

Sweco bedömer att dessa bergrum inte är lämpliga att användas för förvaring av CO₂. Eftersom de ligger ytligare är det statiska mottrycket betydligt mindre jämfört med gasolbergrummet. Om de skulle användas för kyld förvaring ökar därför risken för läckage och det maximala tryck som kan tillåtas i bergrummet minskar. Närheten till de uppvärmda lagren skulle också dels öka energibehovet både för kylning och uppvärmning, och dels öka riskerna vid en eventuell driftstörning av kylsystemet.

Att stålkläda ett ytligt förlagt bergrum är knappast försvarbart eftersom kostnaderna för detta överskrider kostnaderna för att bygga ett helt nytt djupförlagt bergrum.

Konvertering av ett befintligt bergrum var oljelagring skett

Följande är en bedömd kostnad för att konvertera ett oljebergrum till ett tjockplåtsinklätt lager för lagring av CO₂ under högt tryck. Bedömningen är dock osäker eftersom priset på stål är ytterst fluktuerande baserat på den extrema prisökning som varit under senaste åren. Följande kostnader avser ett bergrum som är 168 m långt 30 m högt och 20 m brett.

- Vidgning (strossning) av tillfartstunnel och bortbilning av betongpluggar: Totalt ca 2 000 000:-
- Arbete med bergsäkring av bergrum inklusive tvättning (6 yrkesarbetare inklusive flottar och maskiner i 4 månader 50 000:-/dag) Totalt ca 4 000 000:-, osäker bedömning kan vara väsentligt högre

- Material, sprutbetong och bult (10 000 m² sprutbetong á 500 kr/m² + 1 200 bult á 800 kr/st) Totalt ca 6 000 000:-
- Ventilation och hantering av vatten. Totalt 2 000 000:-
- Montering av plåt inklusive stålskelett (17800 m² á 6000 kr/m²) Totalt ca 106 000 000:- Denna siffra är ytterst osäker och kan vara flera 1000 kr högre per m² än bedömt men också lägre.
- Membran för dränering av vatten 17 800 m² á 500 kr/m²) Totalt ca 9 000 000:-
- Bakfyllning mellan plåt och berg med självkompakterande betong (9500 m³ á 5000 kr/ m³) Totalt ca 48 000 000:-
- Nya betongpluggar i tillfartstunnel och schakt Totalt ca 1 000 000:-

Den bedömda totalkostnaden för att klä ett befintligt oljelager med tjockplåt: totalt ca **178 000 000 kr**.

Nybyggnation av ett bergrum

Kostnader för att bygga ett nytt djupförlagt bergrum med taket -80 och botten på -110.

- Ramp med påslag till bergrum (1100 m med en diameter av 25 m² inklusive nödvändig förstärkning med bult och sprutbetong 1000 kr/m³) totalt 28 000 000:-
- Bergschakt inklusive nödvändig förstärkning med bult och sprutbetong av ett bergrum med en volym av 100 000 m³ (1000 kr/m³) Totalt 100 000 000;. Det utsprängda berget är en resurs som kan säljas till en krossverksamhet för minst 10 000 000:-.
- Borra ett raiseschakt (ett vertikalt schakt) till bergrummet för rörinstallationer 80 m med en diameter av 6 m (25 000 kr/m) Totalt 2 000 000:-
- Betongpluggar för förslutning av schakt och tillfartstunnel. Totalt 2 000 000:-

Den bedömda totalkostnaden för att bygga ett nytt oinklätt bergrum för CO₂ lagring: totalt ca **132 000 000 kr**

Kostnadsbedömningen visar att det är mindre dyrt att bygga ett nytt djupförlagt bergrum än att konvertera ett befintligt bergrum med tjockplåt. Kostnadsriskerna med att bygga ett nytt bergrum är väl avgränsade och kalkylerbara, medan att konvertera ett bergrum kan bli väsentligt högre än bedömt. Det torde knappast finnas någon entreprenör som skulle vara villig att lämna ett fastpris för konvertering av ett befintligt oljelager till ett tjockplåtslager, vilket beror på svårkalkylerbara risker.

7. Bergrummets lagringskapacitet

Nedanstående uppgifter om bergrummets kapacitet bygger på antaganden om en bredd på 24 m, längd på 115 m och höjd 20 m samt att bergrummet har formen av ett rätblock. I verkligheten har bergrummet ett välvt tak och en höjd som varierar över bergrummets sträckning. Innerväggen är dessutom troligtvis ojämn. Det antas vidare att stålinklådningen för alternativ 2 bygger 0,5 m på bergrummets insida. Detta är ett konservativt antagande för att inte överskatta volymen. Bergrummets väggar är sannolikt ojämna och kan sträcka sig utanför, men troligtvis inte innanför teoretisk sektion.

Detta innebär att bergrummet har en total volym på ca 55 200 m³ för alternativ 1 och ca 49 800 m³ för alternativ 2. Hela denna volym kan inte användas för förvaring av CO₂.

Ur säkerhetssynpunkt behöver det alltid finnas en mindre andel gasfas ovanför vätskefasen som kan ta upp volymförändringar på grund av termisk expansion. Annars finns det en risk för att trycket snabbt kan öka till riskabla trycknivåer vid oväntade temperaturförändringar. Fyllnadsgraden som kan tillåtas i bergrummet uppskattas till 66-90%. Fyllnadsgraden mäts vid planerat driftryck och – temperatur. Vilken fyllnadsgrad som kan tillåtas beror på vilket tryck som tillåts innan bergrummets säkerhetsventiler öppnar, på hur högt man bedömer att temperaturen i bergrummet maximalt kan stiga till samt på hur mycket man låter nivån i bergrummet stiga vid expansion.

För det oinklädda bergrummet bör avledningsröret för koldioxid i vätskefas monteras en bit upp i bergrummet för att undvika att partiklar från bergrummets botten följer med upp ur bergrummet, vilket också innebär en minskad effektiv förvaringsvolym. För dessa beräkningar antas att röret monteras 3 meter från bergrummets botten.

Baserat på ovanstående antaganden betyder det att bergrummet med alternativ 1, kyld förvaring, får en användbar kapacitet på 28 000 – 41 000 m³ beroende på vilken fyllnadsgrad som tolereras (66-90%). Vid -26,5 °C och 15 bar (g) motsvarar detta ca 30 000 – 44 000 ton. På samma sätt får det alternativ 2, stålinklätt lager en användbar kapacitet på 33 000 – 45 000 m³. Vid +5 °C och 39 bar (g) motsvarar det ca 29 500 – 40 000 ton.

8. Riskanalys

I rumstemperatur vid atmosfärstryck är koldioxid en färglös gas som anses vara doftlös förutom i höga koncentrationer. Ämnet återfinns i atmosfären i en koncentration på cirka 410 ppm. Gasen är tyngre än luft vilket gör att den kan ansamlas i brunnar, sänkor och andra lågpunkter i terrängen vid stora läckage. Eftersom gasen kan tränga undan luft kan den orsaka kvävning. I denna rapport beskrivs en process där koldioxiden hanteras under relativt högt tryck och låg temperatur, vilket kan innebära risk för explosioner och även frostsador om människor exponeras direkt för ett större läckage. Även vid något lägre koncentrationer (> ca 0,5-1,5%) kan koldioxid innebära en hälsorisk. Exempelvis kan det orsaka dåsighet, huvudvärk, yrsel, förhöjt blodtryck och andningsbesvär⁸.

Enligt Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden kan 10 000 ppm tolereras vid korttidsexponering och 5 000 ppm vid långtidsexponering⁹.

Tabell 4: Identifierade risker med driften av bergrummet och förslag på åtgärder för att hantera dessa.

Riskhändelse	Konsekvens	Åtgärdsförslag
Felfunktion eller driftstörning på stödsystemet för bergrummet	Tryck och temperatur kan inte regleras på rätt sätt. Tryck kan stiga till katastrofala nivåer. CO ₂ -utsläpp, personskada, dödsfall	Maximal fyllnadsgrad begränsas. Bergrummet utrustas med minst dubbla säkerhetsventiler som förhindrar att trycket når riskabla nivåer.
Slitage, ledningsbrott, läckage i ledningar eller andra komponenter vid markytan	Okontrollerat läckage av CO ₂ . CO ₂ -utsläpp, personskada, dödsfall.	Regelbunden besiktning och service. Gaslarm och ventilation i driftutrymmen. Planera avledning av gas så att den inte kan samlas i utrymmen där människor vistas.
Tätskikt i bergrum fallerar vid alternativ 1, kylförlust	Okontrollerat läckage av CO ₂ , potentiellt till platser utanför anläggningsområdet. CO ₂ -utsläpp, personskada, dödsfall.	Lagret får enbart tas i drift när berggrunden runt lagret är ordentligt frusen, minst 5 meter utanför berggrunds väggen. Vid driftsättning sker höjning av tryck långsamt. Kontinuerlig övervakning av temperatur i bergrum och observationsbrunnar, kopplat till larm. Kontinuerlig övervakning av tryck i bergrummet för att upptäcka eventuella förluster, kopplat till larm.

En annan frågeställning som har uppkommit och avfärdats är konsekvensen av att sprickorna runt bergrummet inte är vattenfyllda när bergrummet börjar kylas.

⁸ IPCC, 2005: *Carbon dioxide capture and storage*.

⁹ AFS 2018:1 Hygieniska Gränsvärden.

Detta skulle innebära att inget grundvatten skulle kunna frysa i sprickorna, och därmed att tätningen genom frysning inte skulle fungera som planerat.

Under 1970 och -80 talet när utbyggnaden var som mest intensiv av bergrum för oljelager i Sverige diskuterades problematiken rörande vattenbalansen i bergmassans spricksystem runt ett bergrum grundligt. Om inte vattenbalansen upprätthölls under bygget, så antogs det finnas ett behov för att spricksystemen efteråt skulle behöva återfyllas med vatten. Detta innebar att ett flertal anläggningar under bygget upprätthöll "vattenbalansen" i spricksystem genom att före bergrumsbygget bygga vattenfyllda tunnlar eller borra borrhål för vatteninfiltration. Erfarenheter från drift och avveckling av oljelager visar att denna risk, att spricksystem tömdes på vatten och att dessa senare återfylldes, inte varit en realitet. Bland annat har Statens Oljelager (nu SGU) som ansvarade för avveckling av Statens lager, gjort mycket omfattande studier på om produkt förorenat bergmassan runt ett oljelagerlager. Dessa undersökningar visar inte på någon omfattande produktvandring ut ur ett bergrum. Detta indikerar att spricksystemen är, men också har blivit återfyllda med vatten efter ett bergrumsbygge.

Bergrummet har dessutom tidigare använts för förvaring av gasol. Om det hade funnits sprickor som inte var vattenfyllda så skulle gasolläckage uppstått.

9. Slutsatser

I den här rapporten har Sweco gett två förslag på tekniska lösningar för att lagra koldioxid i gasolbergrummet under Sundsvalls hamn. Det mest kostnadseffektiva bedöms vara lagring vid låg temperatur och moderat tryck. Då behöver ingen omfattande ombyggnation av bergrummet utföras. Konceptet är att koldioxidens låga temperatur gör att grundvattnet i berggrunden runt bergrummet kommer att frysa, vilket förhindrar att koldioxid läcker ut genom sprickor i berggrunden. Det förhindrar också att grundvatten läcker in i bergrummet, vilket innebär att inget läckvatten behöver bortledas. Detta är annars vanligt vid förvaring av petroleumprodukter. Det är viktigt att bergrummet inte belastas med ett högt tryck innan grundvattnet är ordentligt fruset, varför ett antal observationsbrunnar behöver borrar runt bergrummet, så att det går att säkerställa hur långt frysfronten har rört sig.

Beräkningar visar att det tar cirka 3 månader för frysfronten att sträcka sig 5 meter bort från bergrummet, om temperaturen i bergrummet hålls på $-26,5\text{ °C}$. Efter ett år visar beräkningarna att frysfronten har spridit sig cirka 10 meter. Därefter avtar spridningshastigheten tills att stationära förhållanden nås.

Det är viktigt att påtala att så vitt vi vet är frysning för att hålla inne koldioxid i bergrum en oprövad teknik. Frysning är dock en beprövad teknik vid underjordsbyggande där den används för att stabilisera berg av dålig kvalitet och för att förhindra inläckage av grundvatten. Det utfördes även forskning om förvaring av petroleumprodukter i frysta bergrum under 1900-talets andra hälft.

Sweco har bedömt kostnaden för åtgärder i bergrummet och i schaktet som förbinder bergrummet med markytan i stycke 6.1.

Vid förvaring vid $-26,5\text{ °C}$ och 15 bar (g) bedömer Sweco att gasolbergrummet under Korstaverket har en lagringskapacitet på 28 000 – 41 000 m³ koldioxid, vilket vid dessa drifförhållanden motsvarar ca 30 000 – 44 000 ton. Det stora spannet beror framför allt på vilken maximal fyllnadsgrad som tillåts, vilket i sin tur framför allt är avhängigt hur säkerhetsutrustningen konstrueras.

Nedan följer en lista över punkter som behöver utredas i kommande skeden:

- Bekräfta genom bergmekaniska beräkningar att bergrummet klarar den belastning som 15 bar (g) innebär. Fastställ vilket det högsta trycket som kan tolereras ur ett bergmekaniskt perspektiv är.
- Undersökning av befintliga ledningar i schaktet som går från gasolbergrummet och markytan. Måste alla bytas ut eller kan någon återanvändas?
- Placering av ledningarnas mynningar och deras dimension, tillsammans med gränsvärden för tryck, temperatur och fyllnadsgrad är avgörande parametrar för lagrets funktion och säkerhet. Sweco rekommenderar att dessa frågor utreds i detalj i kommande projektering.
- Vilken process för fyllning och tömning av lagret som är optimal under de aktuella förutsättningarna, samt behov av pumpar och ventiler och deras placering.
- Utvidgad riskanalys.
- Genomgång av vilken lagstiftning som den här typen av tryckbärande anordningar omfattas av.
- Verksamhetens miljöpåverkan och tillståndsprocess.