

CO2-lagring i dedikerte bergrom

Stian Andre Løkken

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Eivind Grøv, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk



MASTEROPPGAVEN

Kandidatens navn: Stian Andre Løkken

Oppgavens tittel: CO2-lagring i dedikerte bergrom

English title: CO2-storage in manmade underground caverns.

Utfyllende tekst: I dag foregår i all hovedsak lagring av CO2 off-shore i gamle oljereservoar eller ved bruk av EOR(Enhanced Oil Recovery), og dette utgjør også det feltet der forskning blir utført på i Norge i dag. Dette er stor-skala lagring. Det finnes imidlertid muligheter for å kunne etablere lager i det landfaste Norge ved å anvende og utvikle teknologier som er vel kjente fra vannkraftprosjekter og olje-/gasslager som finnes. Om slike lager skal bestå av nybygde kaverner eller om man kan ta i anvendelse nedlagte gruverom er to ulike muligheter for å benytte menneskeskapte dedikerte bergrom for dette formålet som skal undersøkes i foreliggende MSc-oppgave.

Man har i stor grad antatt at kostnadene forbundet med lagring på land er for store, i forhold til stor-skala lagring off-shore. Denne oppgaven vil også undersøke kostnader for lagring av CO2 på land. Hva vil det koste per m3 CO2 som blir lagret og er dette konkurransedyktig ovenfor andre lagringsmuligheter. For at lagring på land skal være en mulighet må det undersøkes om sikring av bergrom som er nedkjølt og/eller trykksatt har tilstrekkelig levetid. Det er også behov for å undersøke hvilken eventuell innflytelse det vil ha på sikringen at denne er konstant i kontakt med CO2. I tillegg vil bergmassens reaksjoner under nedkjøling og/eller høye trykk med CO2 være av betydning og vil undersøkes i denne oppgaven.

Oppgaven leveres på norsk.

Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er prof. II Eivind Grøv, Institutt for geologi og bergteknikk.

Oppgaven skal leveres i 4 trykte eksemplarer samt pdf-versjon.

Studieretning: Teknisk geologi

Hovedprofil: Ingeniørgeologi/bergteknikk

Tidsrom: 15.01.2014-15.06.2014

Eivind Grøv
Faglærer

Forord

Denne masteroppgaven ble gjennomført våren 2014 ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er et resultat av et samarbeid med Norcem Brevik. Masteroppgaven er et forstudie for potensiell bruk av en gruvegang ved Dalen gruve i Brevik til lagring av CO₂ og er en videreføring av fordypningsprosjektet ”Lagring av CO₂ i dedikerte bergrom” som ble gjennomført høsten 2013 ved NTNU.

Jeg vil rette en spesiell takk til veileder og Prof. II Eivind Grøv for gode råd og behjelpelig litteratur. I tillegg vil jeg rette en stor takk til Ingrid Vik Jondahl og Norcem Brevik for all hjelp og bakgrunnsinformasjon om graven som har vært svært viktig for masteroppgaven. Til slutt ønsker jeg å takke Egil Ronæss og Frode Arnesen for deres gode råd og innspill.

Trondheim 10.06.2014

Stian Andre Løkken

Sammendrag

Reduksjon av CO₂-utslipp er et tema som opptar svært mange og dermed investeres det mye penger i forskning og utvikling av ny og mer energieffektiv teknologi. Et av disse områdene er fangst av CO₂. Norcem har et pågående pilotprosjekt i Brevik hvor fire forskjellige teknologier skal fange CO₂-utslipp fra sementproduksjon. Hvis en av teknologiene fungerer som ønsket i småskala testing kan det bli aktuelt å installere et storskala anlegg for videre fangst. Skulle dette være tilfellet vil det være behov for alternativer til lagring av CO₂.

Med tanke på de store utslippene som kommer fra sementproduksjonen hos Norcem vil det være behov for betydelig lagringskapasitet. Det beste alternativet vil da sannsynligvis være mellomlagring i et dedikert bergrom før videre transport til permanent lagring offshore. Siden Norcem har en stor gruve tilgjengelig, kan det være gode muligheter for omgjøring av en gruvegang til å lagre CO₂. Bergmassen i gruen har gode forutsetninger da den er av god kvalitet, ikke for høye eller lave bergspenninger og med forholdsvis lite innlekkasje av vann, der det har vært problemer er det blitt injisert. Gruvegangene har relativt god stabilitet med bra sikring i form av pilarer. De områdene hvor det har vært problemer med stabilitet er det utført bergsikring.

For at det skal være lønnsomt å lagre CO₂ er det nødvendig å komprimere ned til et nivå hvor mest mulig kan lagres. For å oppnå en lønnsomhet ved lagring av CO₂ må det lagres ved væskefase. Den beste metode for å oppnå dette i kalkstein er ved nedfrysing av bergrommet da en vanngardin kan oppløse kalkstein samtidig som en reaksjon med CO₂ kan akselerere denne oppløsningen. Det er et naturlig grunnvannstrykk rundt gruen på omtrent 11.5 bar, noe som betyr at det må fryses ned til under -36.5° C for å oppnå væskefase. Ved lagring av LPG, LNG og propan fryses det ned til omtrent -40° C, slik at erfaringen fra lignende situasjoner er tilstede.

Mengden sikring som anbefales er basert på bruk av Q-metoden. På bakgrunn av god bergmasse havnet bergrommet i sikringsklasse 3 for heng og 2 for vegg. Anbefaling for taket er systematisk bolting og fiberarmert sprøytebetong, mens for vegg anbefales spotbolting. Ved hjelp av nedfrysing økes stabiliteten og kvaliteten på bergmassen, samtidig beskytter det bergsikringen mot korrosjon slik at det ikke blir noen form for svekkelse i sikringen og levetiden økes betraktelig. For suksessfull nedfrysing er det nødvendig med injeksjon rundt hele bergrommet for å senke permeabiliteten.

De tre alternativene gir forskjellige lagringskapasiteter, der alternativ 1 gir mest volum per krone. Problemene for dette alternativet er at bunnen ikke har samme høyde i alle områder av bergrommet som gjør at det kan samle seg vann i en del av gruvegangen. Samtidig blir det vanskelig å spre det nedkjølte produktet ut i graven tilstrekkelig til å fryse ned bergmassen likt i alle områder. Alternativ 2 har høyest totalkostnader og størst volumkapasitet, men krever mer tid. Samtidig kan størrelsen være større enn behovet til Norcem. Alternativ 3 har lavest totalkostnader, men høyest kostnad per m³ lagringsvolum. Samtidig har det lavest totalvolum, men nok til å dekke ca. 2 måneder med utslipp fra Norcem. I tillegg vil det være litt mer isolert fra den andre delen av gruvegangen.

Lagring av CO₂ i dedikerte bergrom er en løsning som virker å kunne være realistisk å utføre ved Dalen gruve i fremtiden, men dette er avhengig av andre faktorer også. Som et fungerende kvotesystem for utslipp som gir et økonomisk incentiv til fangst og lagring, transport system til permanente lager etc. Av de tre alternativene virker alternativ 3 som det mest realistiske med tanke på totalkostnad, i tillegg gir det en viss fleksibilitet med at det kan utvides ved å bygge om en del til av gruvegangen ved behov.

Summary

The reduction of humans' carbon footprint on this planet is an important subject that is gathering momentum and more money is invested in research and development of more energyefficient technology. One of these areas is the capture of CO₂. Norcem has an ongoing pilotproject where four technologies will be tested. If one or more of these technologies will be a success then Norcem might be interested in investing in a permanent fullscale facility. If this were to happen they would need a way to store these emissions temporarily before transporting it to permanent offshore storage.

With regard to the large emissions from the concrete industry, Norcem would need a fairly large temporary storage. The best method might be the use of rock caverns dedicated to storing CO₂. Since Norcem has a large underground mine, they could be able to turn one of the mine galleries into a storage facility. It would most likely be a better solution than the use of steel tanks that would take up large areas as well as having a small capacity compared to a rock cavern.

The rock mass in the mines is of a very high quality, with stresses that are managable and water leakages that are quite small considering the mine is below Eidangerfjorden. The areas that have had problems with water have been grouted with success. The mines have been developed using the "Room and Pilar" method, this have left the mine very stable without much need of rock support. Some areas have been supported using rockbolts and shotcrete. The entire rockmass surrounding the cavern would need to be grouted to lower the permability of the rock, so that freezing of the rock mass would be as simple as possible. This would also reduce the leakage of water in to the cavern. If water freezes inside of the cavern it would steal storage capacity, which have been a problem in other cases.

For CO₂ storage to be beneficial, it needs to be compressed so a high amount can be

stored. To achieve this compression, CO₂ needs to be stored in a liquid phase. To achieve this in a limestone, freezing of the rock cavern is essential. A watercurtian could possibly dissolve the limestone and break the integrity of the cavern and CO₂ could start to leak out. A reaction between CO₂ and water, creating carbon acid, could accelerate the process. A natural groundwater pressure surrounds the rock cavern in the magnitude of about 13.5 bar, this means the maximum operating pressure inside the cavern would be 11.5 bar according to regulations in Norway. This would mean the temperature would have to be below -36.5 degrees Celsius to achieve a liquid phase of CO₂.

Based on the Q-method, the recommendations for rock support are systematic bolting and shotcrete in the roof and spotbolting in the walls. The thesis has three options for storage capacity with different challenges for each of them. And while price per m³ storage capacity is important, the needs of Norcem would also decide which alternative is the right one. For example, alternative three has the lowest total cost but the highest cost per m³ and might be the best choice given that the storage need does not exceed its capacity. This alternative has the capacity to store almost 2 months of Norcem Brevik's total CO₂ emissions.

Storage of CO₂ in dedicated rock caverns is a realistic solution that Norcem Brevik should consider if they decide to install a permanent carboncapturesystem. However carbon capture and storage is dependent on certain factors, as a functioning quotasystem for emissions that gives economic incentive for companies to capture and store carbon. There is also a need for a transport system to ship CO₂ from land to offshore permanent storage.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
Innholdsfortegnelse	x
Tabeller	xi
Figurer	xv
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Mål	3
1.4 Litteratur	3
1.5 Begrensninger	3
2 Hvorfor lagre CO₂ i Norge	5
2.1 Benyttelse av bergrom til lagring av CO ₂	5
2.2 Norcem Brevik og CO ₂	9

3	Anvendelse av Norcems anlegg	13
3.1	Kalksteinforekomsten i Brevik	13
3.2	Geologisk historie	17
3.3	Forvitring av Kalksteinen	20
4	Bergrommet, egenskaper og parametere	25
4.1	Lokasjon	25
4.2	Tidligere problemer med gruvegangen	27
4.3	Volum og Areal	28
4.4	Parametere i gruvegangen	31
4.4.1	Q-verdi	31
4.4.2	Sprekkesett og sprekeretning	34
4.4.3	Bergspenninger	36
4.4.4	Termisk ledningsevne	42
4.4.5	Spesifikk varmekapasitet	44
4.4.6	Termisk ekspansjonskoeffisient	46
4.4.7	Vannforhold	46
4.5	Trykk og Temperatur	47
4.6	Transport med rørledning	50
5	Sikringsmetoder	55
5.1	Bolter	55
5.2	Sprøytebetong	57
5.3	Sprøytebetongbuer	58
5.4	Injeksjon	59
5.5	Full utstøpning og betongplugg	61
5.6	Frysing	64
5.7	Instrumenter	65
6	Anslag på sikringsmengde	67
6.1	Geoteknisk kategori	67
6.2	Q-verdi og sikringskategori	68

6.3	Bolter	70
6.3.1	Alternativ 1	70
6.3.2	Alternativ 2	71
6.3.3	Alternativ 3	72
6.4	Sprøytebetong	72
6.4.1	Alternativ 1 og 2	73
6.4.2	Alternativ 3	73
6.5	Sprøytebetongbuer	74
6.6	Injeksjon	75
6.7	Full utstøpning	76
6.8	Frysing	76
6.9	Sonderboring	76
7	Kostnadsanslag	77
7.1	Priser	78
7.1.1	Bergsikring	78
7.1.2	Injeksjon	79
7.1.3	Betongplugger	79
7.1.4	Frysing	79
7.1.5	Sonderboring	79
7.1.6	Rørledning	80
7.2	Alternativ 1	80
7.3	Alternativ 2	81
7.4	Alternativ 3	82
7.5	Oversikt	83
8	Diskusjon	85
9	Konklusjon	89
	Bibliografi	91
	Vedlegg A	i

Vedlegg B

v

Vedlegg C

vi

Tabeller

4.1	Oversikt over volum og areal for de tre alternativene	31
4.2	Q-verdier fra gruvegangen	34
4.3	Bergartens mekaniske egenskaper, hentet fra SINTEF sin rapport i vedlegg A	37
6.1	Oversikt over antall bolter i hver av alternativene	72
6.2	Oversikt over volum av sprøytebetong for de tre alternativene	74
7.1	Oversikt over kostnader for de tre alternativene	83

Figurer

2.1	Et plott som viser de forskjellige fasene til CO ₂ under forskjellig temperatur og trykk.	6
3.1	Oversiktsbilde av Bjørntvet dagbrudd. Bildet er fra Norcem sin presentasjon av dagbruddet.	14
3.2	Illustrasjon av oppsette til Dalen gruve. Bildet er fra Norcem sin presentasjon av gruve.	15
3.3	Oversikt over gruvesystemet i Brevik som viser konsesjonsgrensen (lilla linje), Antatt kalksteingrense (striplete rød linje), driftsbegrensning (grønn striplete linje) og gruve (tynn rød linje). Bildet er fra Norcem sin presentasjon av gruve.	16
3.4	Illustrasjon av Oslofeltet hentet fra geoportalen.no. Helt til venstre i den svarte boksen ligger kalksteingruve.	17
3.5	Oversikt over formasjoner ved gruve ved hjelp av et vertikalprofil som Norcem har laget. Bildet er rotert for å kunne få med mer detaljer.	19
3.6	Overisk over formasjoner ved Eidangerhalvøya	20
3.7	Overisk over bergartene i de forskjellige formasjonene	21
3.8	Eksempel på frostsprengning fra Abisko i Sverige. Hentet fra Wikipedia. .	21

4.1	En oversikt over nivå 138 i gruen hentet fra Microstation kart motatt av Norcem.	26
4.2	En oversikt over nivå 138 i gruen med detaljer om hvor det har blitt boltet (grønne felt), blokkfall (rødt punkt) og forkastninger (stiplede linjer). Hentet fra Microstation kart motatt av Norcem.	28
4.3	En oversikt over alternativ 1 og 2, hvor de røde strekene omslutter området hvor det har blitt pallet. De fire grå strekene illustrerer hvor det vil være behov for betongplugger	29
4.4	Oversikt over alternativ 3 som stenges igjen av to betongplugger (tykke grå streker)	30
4.5	En oversikt over lokasjonene hvor Q-verdiene har blitt kartlagt i gruvegangen	35
4.6	Sprekkerose, hentet fra SINTEF sin rapport (Dahle (2005))	36
4.7	Faktorer for forskjellige utforminger på kaverner og tunneler hentet fra Hoek and Brown (1980)	38
4.8	Utformingen av gruvegangen. Bilde motatt av Norcem	39
4.9	Illustrasjon av modellen i Phase2 med oversikt over hvordan største hovedspenning påvirker gruvegangen	40
4.10	Graf som viser styrkefaktoren rundt gruvegangen	40
4.11	Illustrasjon av modellen i Phase2 med oversikt over hvordan største hovedspenning påvirker gruvegangen der man har pallet	41
4.12	Graf som viser styrkefaktoren rundt gruvegangen som har blitt pallet	41
4.13	Plott som viser korrelasjon mellom kvartsinnhold og varmeledningsevne, hentet fra Midttømme et al. (2000)	43
4.14	Plott som viser korrelasjon mellom tetthet og varmeledningsevne for kalkstein i Bærum, hentet fra Midttømme et al. (2000)	44
4.15	Boksplokk fra NGU sin rapport om bergartsmålinger i Bærum (Midttømme et al. (2000))	45
4.16	Oversikt over distanse fra nivå 138 til sementfabrikken	51

4.17	Vinklet borehull fra gruvegang til fabrikk. Den røde sirkelen viser hvor hullet starter i gruvegangen, mens blå sirkel viser hvor hullet kommer opp i dagen. Gul linjen viser kjørevei nede i gruvesystemet.	52
5.1	Bilde av CT-bolt hentet fra Vik Ørsta sin hjemmeside	56
5.2	Prinsippet av skjoldet som injeksjon danner rundt en tunnel, hentet fra NFF (2011)	60
5.3	Bilde av Penstockplugg og aksessplugg, hentet fra Bergh-Christensen (1989)	62
5.4	Graf som viser vannlekkasje mot grunnvannstrykk ved noen betongplugger i Norge, hentet fra Bergh-Christensen (1989)	63
6.1	Et diagram som viser anbefalt permanent sikring basert på Q-verdi og spennvidde/høyde i meter over ESR, hentet fra NGI (2013)	68
6.2	Tabell som viser ESR basert på type bergrom, hentet fra NGI (2013) . . .	69
7.1	Lichtenbergs analyse av kostnadene relatert til sikring av bergrom samt sonderboring for alternativ 1	81
7.2	Lichtenbergs analyse av kostnadene relatert til sikring av bergrom samt sonderboring for alternativ 2	82
7.3	Lichtenbergs analyse av kostnadene relatert til sikring av bergrom samt sonderboring for alternativ 3	83

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Lagring av CO₂ begynner å bli en veldig aktuell problemstilling, og er nødvendig for å kunne senke utslippene av CO₂ ned til akseptable nivåer i henhold til for eksempel Kyoto-avtalen. Kyoto-avtalen er en internasjonal avtale hvor mange av i-landene har gått med å kutte sine utslipp. Avtale ble i 2012 fornyet og det vedtas å kutte totalt 18% av klimagassutslippene i forhold til 1990-verdier innen 2020. Norge går inn for å redusere sine utslipp med 30% i forhold til 1990-verdier innen 2020. Behovet for energi øker i takt med befolkningen og bedring av velstand fører til at en reduksjon av utslipp vil være en stor utfordring.

Det kan være mye å hente på energieffektivisering da en del av energien tapes som varme til omgivelsene blant annet. Utfordringen vil ligge i investeringer fra privatpersoner for å forbedre isolasjon i egne hus, installering av elektroniske styringssystemer etc. Ikke alle har råd eller mulighet til å utføre dette.

Som et hjelpemiddel har lagring av CO₂ i grunnen blitt svært aktuelt og utføres allerede ved enkelte felt hvor man tar ut gass. Gassen renses for CO₂ og pumpes tilbake i reservoaret eller et annet reservoar. CO₂ benyttes også ved økt oljeuttak, ved å pumpe CO₂ ned i

oljereservoaret økes trykket i reservoaret og mer olje kan utvinnes.

Det foretas stadig ny forskning på fangstteknologi for CO₂. For eksempel utføres det et forskningsprosjekt i Brevik for fangst av CO₂ ved sementproduksjon. Dette er et samarbeid mellom Norcem/Heidelberg Cement og ECRA (European Cement Research Academy). Sementproduksjon står for ca. 4 prosent av CO₂-utslippene i verden (NRMCA (2008)) og denne forskningen vil dermed være viktig for en potensielt stor reduksjon av verdens CO₂-utslipp.

Som et supplement til dette er det behov for alternativer i forhold til lagring av CO₂ hvis forskningen viser seg å være en suksess. Om ikke som en permanent løsning, er det hvertfall behov for en midlertidig lagring før CO₂ kan transporteres til et permanent lager. Som et midlertidig lager vil nedlagte gruver være av stor interesse. I Brevik, hvor fangstforskninger skal utføres har Norcem gruveganger som har potensiale for lagring av CO₂.

1.2 Problemstilling

Én mulighet for lagring av CO₂ på land er bygging av bergrom dedikert til dette formålet, eller endring av bruksområdet til en nedlagt gruve. For at dette skal være mulig må bergrommet sikres på en tilfredsstillende måte slik at det oppnår en stabilitet over en lengre periode. Kanskje hundre år hvis det er tiltenkt som midlertidig lagringsmåte for CO₂. Hvis bergrommet er tiltenkt som en permanent løsning må levetiden være deretter også.

Som en følge av dette er det viktig å vite hvilke utfordringer som en sikring må kunne håndtere. I denne oppgaven ønsker jeg derfor å utrede: Hvilken innflytelse vil konstant kontakt med CO₂ ha på bergsikringen? Hvordan vil bergsikring holde seg når den blir nedfrost? Samtidig er det viktig å vite hvilken effekt dette også har på selve bergmassen. Ut i fra informasjonen som finnes, kan det anslås en levetid til et bergrom dedikert til CO₂-lagring?

Kostnader for et eventuelt prosjekt vil være en nøkkelfaktor. Hvis kostnaden per m³ CO₂

lagret blir for høy vil det ikke være noen som vil investere penger i et slikt prosjekt, spesielt hvis prisen er høyere enn mellomlagring i ståltanker. Derfor vil det være viktig å kunne gi et anslag på hvor mye det vil koste per m³ fast lagringsvolum. Deretter er det forutsetningene til hvordan CO₂ lagres som vil bestemme hvor store mengder som lagres.

1.3 Mål

Målene for oppgaven vil være å finne svar på:

- Hvilken effekt miljøet i og rundt bergrommet har på bergsikringen?
- Hvilken effekt miljøet i og rundt bergrommet har på bergmassen?
- Hvor lang levetid kan man anta at et bergrom for dette formålet vil ha?
- Hva vil kostnadene per m³ fast lagringsvolum være?

1.4 Litteratur

Litteraturen vil være basert på forskjellige publikasjoner som NFF (Norges Forening for Fjellsprengningsteknikk) har på sine nettsider. Spesielt vil er Publikasjon nr. 16 av interesse siden den handler om lagring av hydrokarbon-produkter i bergrom. Samtidig er det andre publikasjoner som har blitt benyttet for informasjon om injeksjon, betongplugger etc.

Annen litteratur vil komme i form av rapporter og artikler fra Norcem og SINTEF blant annet. I tillegg har det vært kontakt med personer som har erfaring fra prosjektering og konstruksjon av lignende typer anlegg.

1.5 Begrensninger

Hovedfokus til denne oppgaven vil være bergrommet som ligger i Dalen gruve, dens bergtekniske forhold og hva som kreves for at det skal være mulig å lagre CO₂ der. Oppgaven

handler ikke om CO₂-rensing og CO₂ som et stoff. Komprimering og klargjøring av fanget CO₂ som skal transporteres ned til bergrommet ligger utenfor denne oppgavens fokusområde. Oppgaven vil ikke fokusere på teori rundt hvordan prosesser og utførelse av for eksempel nedfrysing fungerer.

Hvorfor lagre CO₂ i Norge

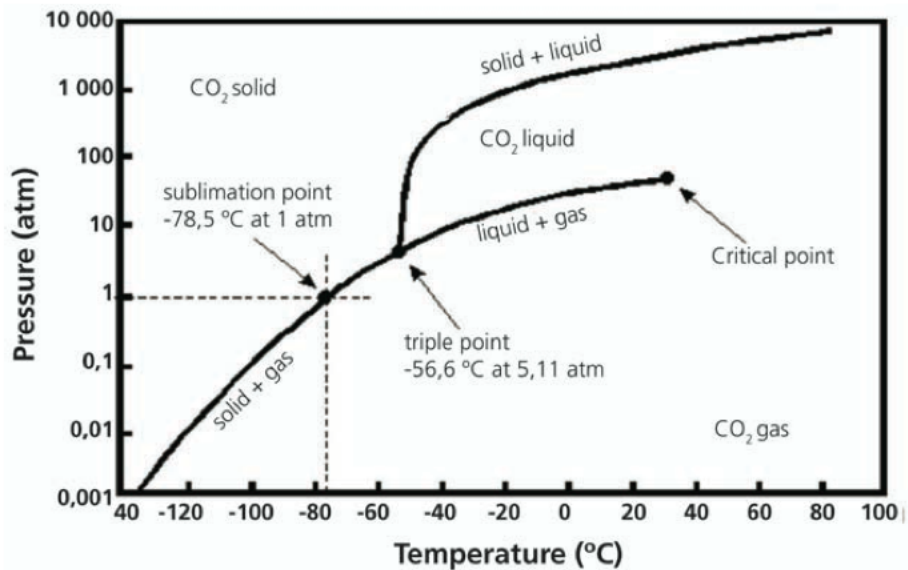
I dette kapitlet vil det bli gjort en liten oppsummering av Prosjektoppgaven som ble skrevet i høst ”Lagring av CO₂ i dedikerte bergrom” og hvorfor det utfra dette er av interesse å se videre på muligheten til å lagre CO₂.

2.1 Benyttelse av bergrom til lagring av CO₂

I Norge er det mye erfaring med å benytte bergrom til lagring av blant annet olje, gass, vann og andre viktige ressurser. Er det mulig å benytte disse erfaringene til lagring av CO₂ i undergrunnen? Å lagre gass har mange av de samme utfordringene som lagring av CO₂ har, det samme kan sies om luftputekammer i vannkraftverk som ligger i berg.

CO₂ har en god evne til å kunne komprimeres når det settes under trykk og lav temperatur. Denne egenskapen er avgjørende for om lagring av CO₂ kan vurderes. Hvis ikke CO₂ kan komprimeres med en betydelig grad, vil det ikke være aktuelt å investere penger til fangst eller lagring. CO₂ er ved overflaten en gass, men under gitte trykk og lave temperaturer endres fasene avhengig av størrelsen på trykket og temperaturen. Figur 2.1 viser hvor grensene for de forskjellige fasene er.

Det vil være mest gunstig, med tanke på komprimering, å kunne lagre CO₂ enten som en



Figur 2.1: Et plott som viser de forskjellige fasene til CO₂ under forskjellig temperatur og trykk.

væske, superkritisk væske eller som et solid. Å lagre som CO₂ som solid er krevende med tanke på temperatur og trykk, samtidig som det er ugunstig ved transport av CO₂ ned til bergrommet gjennom rør.

Det er flere alternativer for lagring av CO₂ i undergrunn. En metode som allerede benyttes er å pumpe CO₂ ned i olje- og gassreservoarer. Slike reservoarer har en naturlig karbonfelle som sørger for å holde CO₂ innesperret til evig tid. Det forskes på andre reservoarbergarter som viser egenskaper for potensielt å kunne lagre store mengder CO₂, blant annet gjøres det undersøkelser på et reservoar som ligger under Svalbard. En fordel med å lagre i disse reservoarene er at de vil være et permanent lager og de har enorme volum som dedikerte bergrom aldri vil kunne konkurrere med.

Forede bergrom er også en mulighet, men å dekke et helt bergrom i stål vil være problematisk for tetthet, samt svært kostbart. I tillegg må bergrommet sikres på en slik måte at ingen utfall kan skape skade i foringen. Det kan på mange måter sammenlignes med å lage et bergrom for å sette ståltanker der. Dette er en god ide hvis det er tilgjengelige

bergrom, som for eksempel en nedlagt gruve. Dette vil også spare bedriften for plass ved overflaten. Men er det behov for store volum er det en lite gunstig og realistisk metode for å lagre CO₂.

Et uforet bergrom har stort potensiale for lagring av CO₂. Spesielt hvis det blir sett på som en midlertidig lagringsmetode for CO₂. Det er mest realistisk å kunne bruke reservoar som en permanent løsning, men det må være alternativer på land hvor det går an å lagre CO₂ til det finnes gode løsninger og kontinuerlig pumping ned i reservoar.

Norge har som nevnt mye erfaring med lagring av blant annet olje, gass og vann. Man har også mye erfaring fra vannkraftverk hvor det lagres luft under trykk i luftputekammer. Å kunne bruke et kunstig grunnvannstrykk ved hjelp av en vanngardin er muligens et av de beste alternativene for lagring av gass. Luftputekammer ved Tafjord har oppnådd grunnvannstrykk på mellom 6.5 MPa og 7.7 MPa med vanngardin. Denne typen trykk vil kunne gi en betydelig komprimering av CO₂ samtidig som avhengigheten av en veldig lav temperatur for å oppnå en væskefase vil være redusert.

Det finnes mye erfaring fra olje og gass lagring, her brukes det også vanngardin for å sikre at det er et grunnvannstrykk rundt bergrommet som hindrer lekkasje av innholdet i bergrommet. Ved lagring av olje vil en viss prosentandel være gass som legger seg øverst, slik at de erfaringene som finnes fra lagring av olje også er veldig relevant for CO₂. Bergrommene som er bygget for disse bruksområdene er veldig store og kan ta store volum av olje og gass. Volumet på ett bergrom for lagring av råolje ved blant annet Mongstad var i overkant av 200.000 m³.

I Norge og Skandinavia finnes det også gode erfaringer med lagring ved frysetemperaturer. Blant annet finnes ett lager i Bergen for kjøtt og kjøttprodukter som er plassert i berg, her er temperaturen mellom -22° C og -28° C. Her var det en periode på 8 uker hvor nedkjølingsanlegget måtte skrus av uten at de opplevde en kritisk temperaturøkning før anlegget ble satt i drift igjen.

I Sverige bygde Skanska et bergrom for lagring av LPG med et volum på 20.000 m³, her var opererte de med en temperatur på -43° C i bergrommet. Dessverre ble det problemer i forbindelse med nedfrysing, problemene oppsto ved at vannet i sprekkene i bunnen av kavernen ikke ble nedfrost. Dette førte til at vannet kom inn fra bunnen av kavernen og ble til is i bergrommet. Isen fungerte som isolasjon for bergmassen og hindret nedfrysing som videre skapte en volumreduksjon i kavernen. Hvis det hadde blitt foretatt injeksjon i bunnen ville dette problemet mest sannsynlig vært unngått(Grøv and Ronæss (2003)).

Ved lagring av CO₂ vil lekkasje være et problem som må utelukkes fullstendig. Derfor er det enkelte parametere som kan foretrekkes for å skape en naturlig barriere mot lekkasje, for eksempel er det ønskelig en bergmasse som ikke er veldig oppsprukket slik at permeabiliteten blir lavest mulig. På den måten vil mengden CO₂ som kan lekke ut reduseres, samtidig som det vil gjøre nedfrysing av bergmasse enklere når vannet beveger seg saktere. I tillegg vil det ved bruk av vanngardin redusere vannmengden som benyttes for å opprettholde vanntrykket.

For utformingen og designen av kaverne vil det være fordeler ved å konstruere et helt nytt bergrom. Da kan den rette plasseringen velges og hele prosjektet kan designes utifra et spesifikt bruksområde. Ved omgjøring av eksisterende bergrom vil ikke denne muligheten være tilstede. Da må nye løsninger finnes basert på det utgangspunktet en har. I enkelte tilfeller vil det kunne være svært forutsetninger og kostnadene ved sprengning spares også inn. Mens ved andre tilfeller vil det kanskje kreve veldig mye arbeid og kostnader for å omgjøre bergrommet.

Valg og mengde av sikring vil være basert på Q-metode i Norge, en metode som benyttes til å klassifisere bergmasse med hensyn til stabilitet av tunneler og bergrom. Dette er dominerende metoden for klassifisering i Norge og den har vist seg effektiv som anbefaling til sikring av bergkonstruksjoner. I tillegg kan det benyttes numeriske modeller til å estimere hvor det kan oppstå problemer, disse kan også hjelpe med å beregne virkningen av det

innvendige trykket vil ha på vegger og tak i bergrommet. Erfaring til de som planlegger og bygger bergrommet vil også være en viktig egenskap som kan hjelpe med å sikre kavernen.

En kombinasjon av nedfrysing og høyt trykk vil kunne skape en dobbel barriere, som vil være å foretrekke. Men dette kan i enkelte tilfeller være problematisk. En av de to metodene kan benyttes alene, men ved frysing vil det uansett være behov for vann i sprekene og vannet må ha et grunnvannstrykk som er 2 bar høyere enn det innvendige trykket i kavernen etter DSB (Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap) sine retningslinjer.

Ved lagring av CO₂ må det tas hensyn til befolkningen rundt, her stilles samme krav som ved andre deponier i forhold til miljøet og påvirkning av de som bor i området. Generelt vil kan det være en del motstand for slike typer endringer i et lokalsamfunn, men siden global oppvarming er ett ganske viktig tema kan det være en fordel at dette er et positivt bidrag for miljøet. Selv om CO₂ ikke er giftig, er det i store mengder dødelig da det hindrer tilgang til oksygen. Det er derfor veldig viktig med sikkerhet mot lekkasje.

2.2 Norcem Brevik og CO₂

Norcem Brevik eies av Heidelberg Cement, et av verdens største produsenter av sement og ferdigbetong, de har over 50.000 ansatte fordelt utover kontorer i hele verden og er en svært viktig bedrift for bygg- og anleggsbransjen. Med tanke på størrelsen har de en kapasitet til å utgjøre en forskjell i verden der de velger å bruke sin kunnskap. Siden deres hovedvirksomhet er sement, er de også en stor aktør hva gjelder CO₂ utslipp.

Sementproduksjon står totalt for ca. 4% av verdens CO₂ utslipp. Dette utgjør omtrent 2 milliarder tonn CO₂ årlig. Disse utslippene kommer fra to kilder, bruk av brensel i sementovnen og den kjemiske prosessen. I følge Miljødirektoratet sin statistikk for utslipp i Norge er Norcem Brevik blant de 10 bedriftene som slipper ut mest CO₂ til luft og har størst utslipp av de bedriftene som ikke tilhører petroleumsvirksomheten. Norcem Brevik hadde i 2012 et totalt utslipp av CO₂-gass til luft på 762.000 tonn.

Som en følge av de store utslippene relatert til sementproduksjon har Heidelberg Cement og Norcem Brevik investert tid og penger i reduksjon av sine utslipp for å være en bidragsyter til et bedre miljø. I følge Heidelberg Cement sin hjemmeside har de siden 1990 til 2012 klart å redusere sine utslipp med hele 21%. De har klart dette ved å investere i energieffektive teknologier og produksjonsprosesser, samt ved å innføre kompositt sement slik at klinker-innholdet har blitt redusert og ved å øke forbruket av alternativt brensel. De har som mål innen 2015 at de skal ha redusert sine CO₂ utslipp med totalt 23% siden 1990.

Denne reduksjonen er også synlig hos Norcem Brevik, som siden 2001 har redusert sine CO₂-utslipp til luft med 140.000 tonn fra 902.000 tonn til 762.000 tonn. Dette utgjør en reduksjon på 15.5%. Dette er en god start på Norcem sin visjon om null utslipp. Et essensielt steg for å nå denne visjonen er CO₂-fangst prosjektet som de har satt i gang på Brevik.

Pilotprosjekt ved Brevik handler om forske på ulike teknologier for fangst av CO₂ fra sementproduksjonen. Prosjektet består av å teste fire forskjellige fangst-teknologier. Prosjektet er et samarbeid mellom Norcem, Heidelberg Cement og European Cement Research Academy (ECRA). Prosjektet har en kostnadsramme på 93 millioner kroner, hvor det har blitt utdelt 70 mill. kr. i støtte fra Gassnova sitt Climit-program, resten dekkes av Heidelberg Cement, teknologileverandørene og ECRA (Informasjon hentet fra Norcem/Heidelberg Cement sin nettside).

De fire fangst-teknologiene som skal testes er:

1. Amine-teknologi fra Aker Clean Carbon
2. Membranteknologi fra DNV GL, NTNU og Yodfat Engineers
3. Faststoff-Absorbent teknologi fra RTI (Research Triangle Institute)
4. Kalsiumsyklus fra Alstom Power

Det har blitt satt i gang testing av Membranteknologi og Faststoff-Absorbent teknologi, med tiden startes testingen av Amine-teknologi og Kalsiumsyklus. Fangst-teknologi prosjektet skal være avsluttet i mars 2017. For mer informasjon om teknologiene finnes det

lett tilgjengelig på Internett.

Hvis testene skulle være vellykkede og samtidig være kostnadmessig forsvarlig kan det for Norcem være aktuelt å investere i et permanent renseanlegg. Dette vil føre til et behov for å kunne lagre CO₂ i nærheten av utslippspunkt før transport til permanent lager. Med tanke på at de har en stor gruve vil det kunne være et godt alternativ å lagre CO₂ der. Ved å gi gruvegangen et nytt bruksområde kan den bli benyttet til lagring av CO₂. Å lagre på overflaten kan bli både kostbart og lite effektivt bruk av tilgjengelig areal. Med store årlige utslipp vil det være behov for mange ståltanker hvis overflaten skal benyttes til lagring, mens potensielt kan en mindre del av gruvegangen benyttes til midlertidig lagring før CO₂ transporteres videre til et permanent lager.

Anvendelse av Norcems anlegg

Dette kapittelet vil ha fokus på gruen i Brevik. En kort presentasjon av dagbrudd og en litt mer informasjon om selve gruen. Den geologiske bakgrunnen til området hvor gruen ligger og mulige problemer i forbindelse med mulige reaksjoner mellom bergmasse, vann og CO₂.

3.1 Kalksteinforekomsten i Brevik

I Porsgrunn kommune finnes en av Norges største kalksteinsforekomster. I denne forekomsten har Norcem drift på Bjørntvedt dagbrudd i Porsgrunn by og Dalen gruve i Brevik. Bjørntvedt dagbrudd har vært i produksjon siden 1954 og har en årlig produksjon på 700.000 tonn, totalt er det blitt produsert ca. 48 millioner tonn kalkstein fra dagbruddet siden produksjon ble satt i gang, mens det finnes ca. 11 millioner tonn i kjente reserver. I figur 3.1 kan er det en oversikt over dagbruddet (Norcem (2014)).

Dalen gruve startet med produksjon i 1960, siden da er det tatt ut omtrent 30 millioner tonn med kalkstein. Dalen er en av verdens største kalksteingruver. De kjente reservene er mellom 20 og 25 millioner tonn i det lisensierte området til Norcem. Det produseres årlig mellom 600 og 700 tusen tonn kalkstein fra gruen som benyttes i sementproduksjon. Hele gruvesystemet har en tunnellengde på rundt 250 km(Norcem (2014)). En illustrasjon



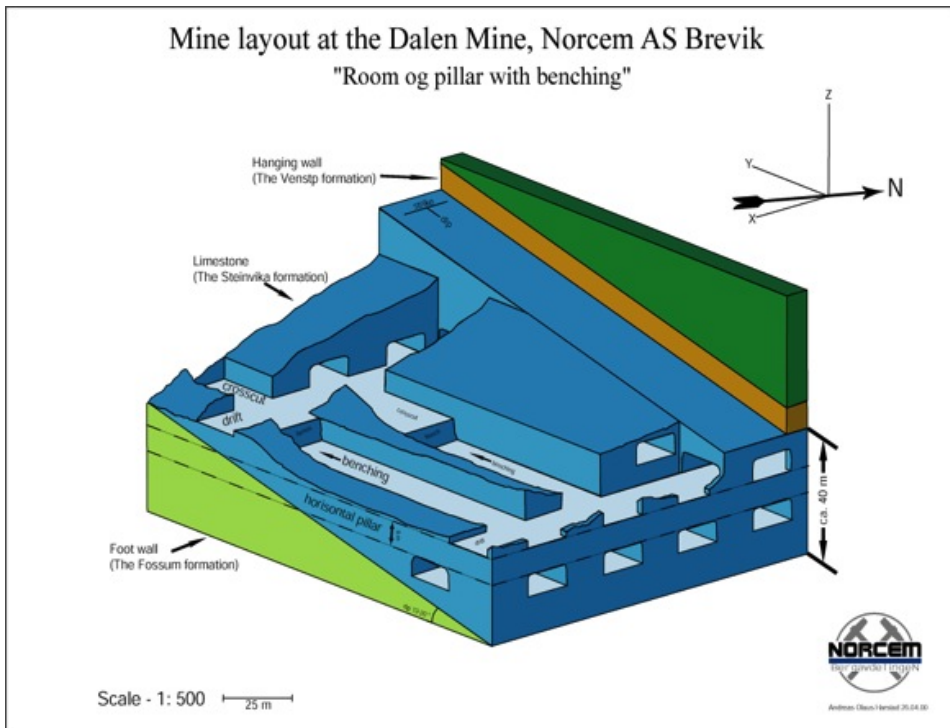
Figur 3.1: Oversiktsbilde av Bjørntvet dagbrudd. Bildet er fra Norcem sin presentasjon av dagbruddet.

av gruveoppbyggingen er tilgjengelig i figur 3.2.

Gruven drives etter rom og pilarprinsippet som vist i figur 3.2. Det drives tunneler som gjør at kalksteinen kan tas ut. Metoden benyttes for å drive på en sikker måte hvor ras som kan nå dagen skal unngås. Med denne metoden tas det ut 30% av materialet og lar det resterende stå igjen som pilarer for å sikre seg mot større ras. I 1976 gikk det et ras i en gruve helt opp til overflaten, det var dette som var bakgrunnen for å endre til dagens drivemetode(Norcem (2014)).

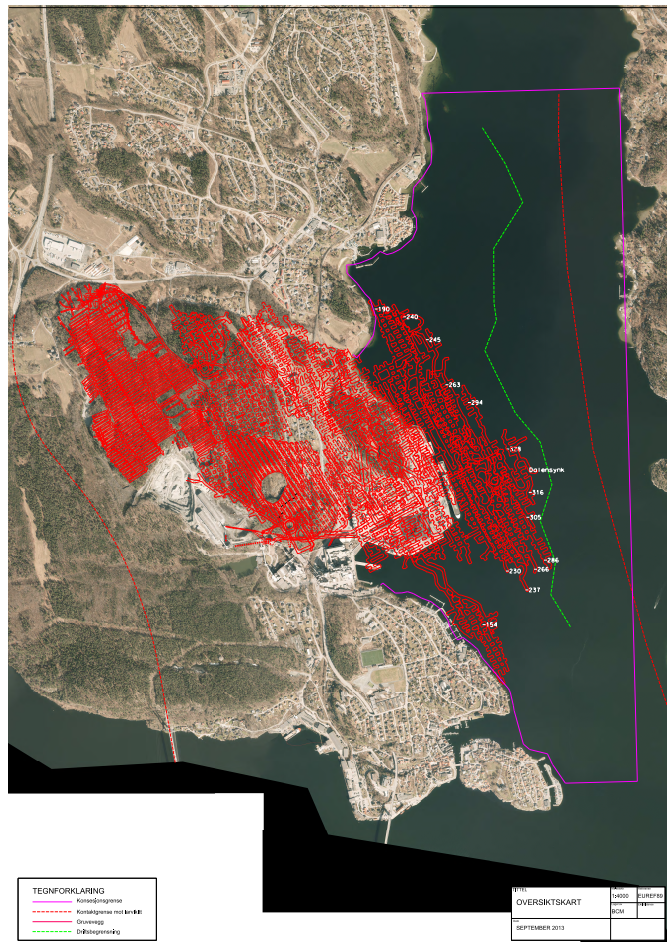
Det benyttes minimalt med sikring da det er en veldig god og homogen kalkstein. Ved nødvendighet benyttes det CT-bolter og sprøytebetong, dette er da basert på erfaring til de som jobber i gruen og ikke Q-metode eller andre metoder. I tillegg har det blitt injisert enkelte steder hvor det har blitt observert større innlekkasjer av vann. Det har også vært problemer med karst, noe som ikke er uventet med tanke på bergarten(Jondahl (2014b)).

I dag drives gruen under Eidangerfjorden. Tidligere ble gruen drevet under land, noe som har ført til mange kilometer med tunnel under Brevik. Et intrikat system med tunneler, hvorav en del av dette systemet kan egne seg som et potensielt lager for CO₂. Det har



Figur 3.2: Illustrasjon av oppsette til Dalen gruve. Bildet er fra Norcem sin presentasjon av gruve.

vært interesse for å kunne benytte deler av den nedlagte gruven til lagring av avfall. I dette testprosjektet lagres det giftig uorganisk avfall, hvor avfallet blandes til en slurry og pum-
pes ned i bergrommet og lagres til evigheten. Ved hjelp av membran og den kalkholdige
berggrunnen hindres lekkasje ut til omverdenen (Brastad (2013)).

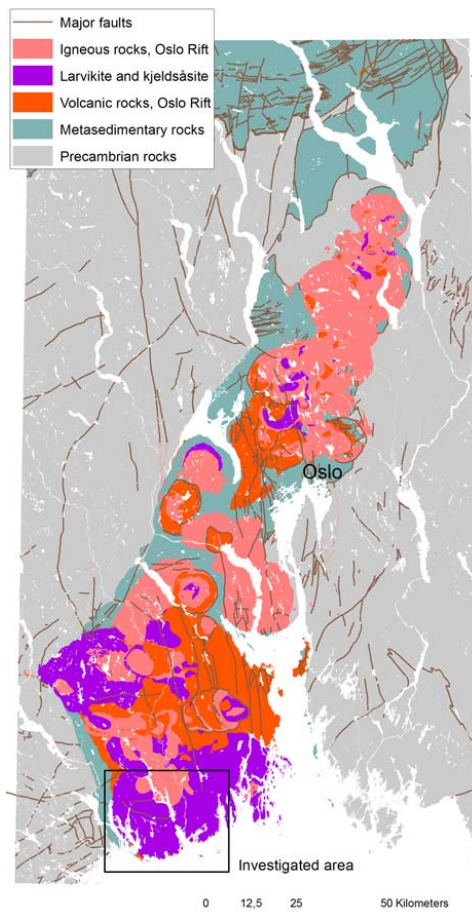


Figur 3.3: Oversikt over gruvesystemet i Brevik som viser konsesjonsgrensen (lilla linje), Antatt kalksteingrense (striplete rød linje), driftsbegrensning (grønn striplete linje) og gruven (tynn rød linje). Bildet er fra Norcem sin presentasjon av gruven.

Kalksteinen ligger i Steinvika formasjonen. Steinvika formasjonen består av en ca. 40 m tykk kalkstein fra ordovicisk tid (495-443 millioner år siden).

3.2 Geologisk historie

Gruven ligger i Oslo graben, dette er et innsunken geologisk område, feltet er mest kjent som Oslofeltet eller Osloriften. Selve riftdannelsen startet for ca. 310 millioner år siden og varte i omtrent 70 millioner år. Dannelsen er veldig kompleks og skjedde i 6 stadier i følge Ramberg (2007), for mer detaljert informasjon rundt utviklingen anbefales det å lese boken "Landet blir til: Norges Geologi". Oslofeltet strekker seg fra Langesund i sør til Brummundal i nord med en bredde på 45-75 km(Ramberg (2007)).

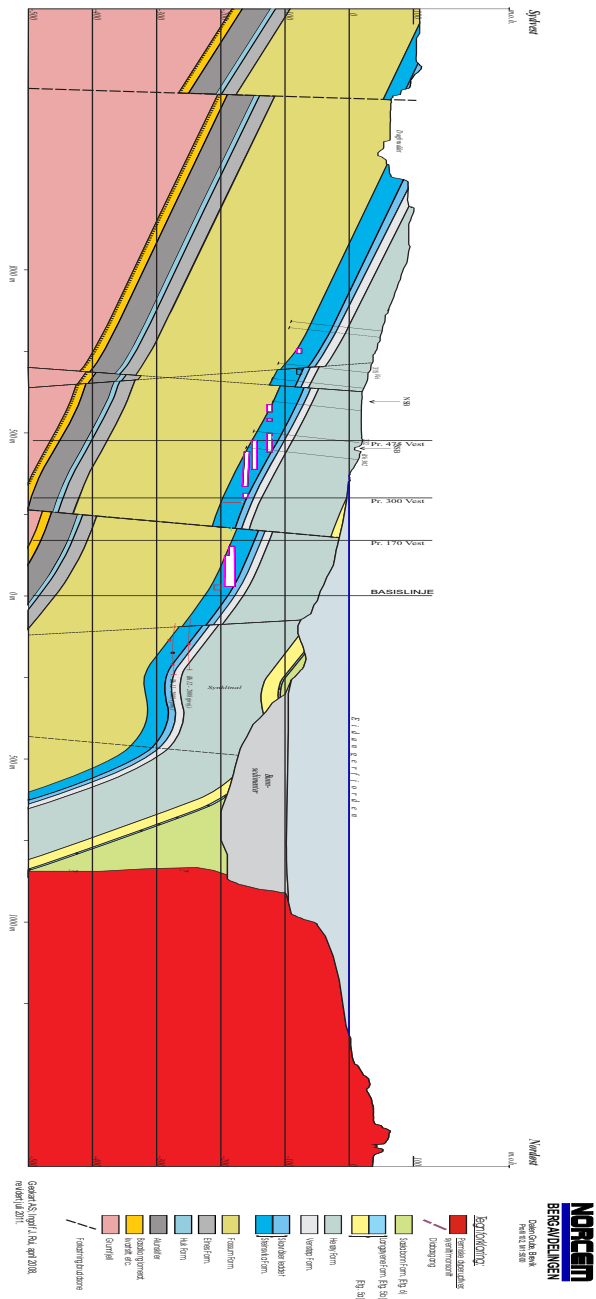


Figur 3.4: Illustrasjon av Oslofeltet hentet fra geoportalen.no. Helt til venstre i den svarte boksen ligger kalksteingruven.

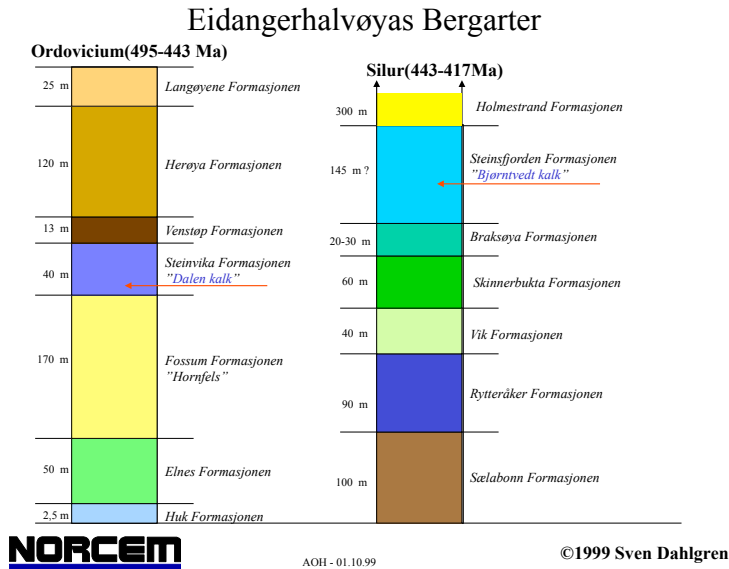
For over 500 millioner år siden var området under havet, her levde det mange forskjellige marine dyr hvor mange av disse hadde kalkskall. Koraller, brachiopoder og sjøliljer var blant de marine dyrene som levde langs bunnen. Når disse døde var de med på å danne tykke lag med kalkslam blandet med sand og leire. Over tid ble dette presset sammen til lag med kalkstein, sandstein og skifer. Kalksteinen som i dag tas ut i Brevik kalles ordovicisk kalkstein som gir en indikasjon på når den ble dannet (Ramberg (2007)).

I tillegg til Kalkstein, sandstein og skifer ligger det Hornfels i området, samt finnes Larvikitt nordøst for gruen. Under i figur 3.5 kan du se et vertikalprofil som viser de forskjellige formasjonene og noen bergarter ved gruen i Brevik. Det røde representerer Larvikitt. Det blå viser Kalksteinen som tas ut, mens det lyseblå også er en kalkstein som er av for dårlig kvalitet til at det kan benyttes i sementproduksjon (Jondahl (2014b)).

Som nevnt ligger kalksteinen i Steinvika formasjonen, som er lett synlig på figur 3.5 hvor en kan se hvite deler i profilet hvor det har blitt tatt ut kalkstein. Profilet viser alle formasjonene fra grunnfjellet og opp til dagen. En bedre oversikt over formasjonene og bergartene i disse er vist i figur 3.6 og figur 3.7.



Figur 3.5: Oversikt over formasjoner ved gruva ved hjelp av et vertikalt profil som Norcem har laget. Bildet er rotert for å kunne få med mer detaljer.

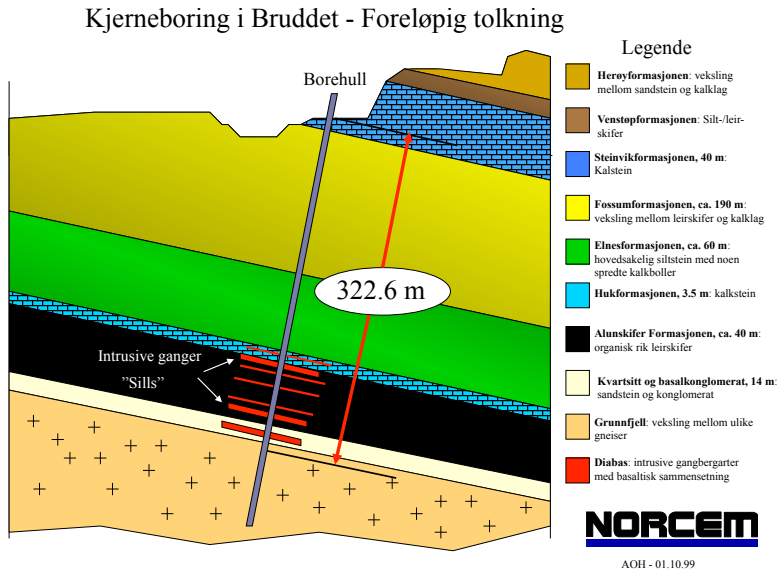


Figur 3.6: Overisket over formasjoner ved Eidangerhalvøya

3.3 Forvitring av Kalksteinen

Det vil være en del fokus på sikring og dens levedyktighet i et miljø hvor det er CO₂ og vann i kombinasjon. En annen ting som i større grad vil kunne påvirkes er selve bergmassen. Med tanke på alle de forskjellige bergartene som har blitt svakere på grunn av forvitring vil dette også være et viktig tema ved lagring av CO₂. Naturlig forvitring skjer over en lengre periode. Det finnes to typer forvitring: Mekanisk forvitring og kjemisk forvitring(Brattli (2009)).

Mekanisk forvitring skjer når mekaniske prosesser påvirker berget. For eksempel nedfrysing av bergarten vil kunne føre til frostsprengning ved at vannet som finnes i bergmassens sprekker fryser. Når vann fryser øker volumet og utøver et ekstremt trykk på bergarten som igjen kan føre til at den sprekker opp. Under istiden i Norge vil dette ha ført til mekanisk forvitring på norsk berg, men siden isbreene beveget seg over og skrapte med seg disse svakheten i berget er det generelt lite overflateforvitring i Norge.



Figur 3.7: Overiskrt over bergartene i de forskjellige formasjonene



Figur 3.8: Eksempel på frostsprengning fra Abisko i Sverige. Hentet fra Wikipedia.

En annen type mekanisk forvitring er termal utvidelse som skjer i områder med store temperatur svingninger. For eksempel i et ørkenklima hvor det er svært varme dager og veldig kalde netter. Bergarten utvides når den varmes opp, deretter kjøles den ned og krymper slik at sprekker kan oppstå. Planterøtter er også en form forvitring ved at planter vokser ned i bergsprekker.

Ved frysing av bergrom er dette en av utfordringen i forhold til sikring av bergrommet. Siden det vil være vann i bergmassen rundt bergrommet må det tas høyde for dette når det prosjekteres for sikring. Ved bruk av injeksjon kan permeabiliteten i berget reduseres og dermed mengden vann som er i sprekken. Dette fører til at problemer med frostsprengning kan reduseres. Ved tunneler i samferdselsprosjekter benyttes det frostsikring for å redusere problemet, dette vil være mot sin hensikt i et prosjekt som dette siden en nedfrosset bergmasse er ønskelig.

Kjemisk forvitring er en kjemisk reaksjon mellom mineralene i bergmassen og grunnvannet som kan føre til en endring av mineralogien. Det deles hovedsakelig inn kjemisk forvitring i tre kategorier:

- Oppløsning og hydratisering
- Hydrolyse
- Oksidering

Oppløsning av uorganiske salter ved hydratisering er en av de enkleste reaksjonene i vann. Her brytes saltene ned ved at ionene hydratiseres. Hydrolyse skjer når vannet deltar aktivt i reaksjonen, som regel fører dette til at reaksjonshastigheten også øker (Brattli (2009)). Oksidering skjer på samme måte som når jern rustet, et stoff reagerer med luft og mister et elektron. Dette skjer som regel ved at Fe^{2+} går over til Fe^{3+} som igjen vises som en rødbrun farge på bergarten.

I et prosjekt som dette hvor bergarten er en kalkstein, er oppløsning det som kan bli mest utfordrende. Siden det vil være vann i sprekken vil dette over tid kunne løse opp kalkstei-

nen og skape større sprekker som kan bryte ned integriteten til bergrommet. I tillegg kan CO₂ reagere med vann og bli til karbonsyre (Zumdahl (2007)) som skaper et miljø som kan øke hastigheten på oppløsning av kalkstein.

Her kan injeksjon og nedfrysing av bergrommet være en motvirkende effekt på oppløsningen. Samtidig som det vil være med å gi bergrommet lengre levetid. Ved hjelp av injeksjon vil permeabiliteten senkes, noe som fører til mindre gjennomgang av vann i sprekke- kene. Dette vil gjøre det enklere å fryse vannet i sprekke- kene som sørger for en tett barriere. Samtidig vil det redusere gjennomstrømning av vann og lekkasje av CO₂ fra sprekke- kene i bergrommet.

Det finnes også andre bergarter i området som kan påvirkes av miljøet, hvorav den mest nærgående er Hornfels. Hornfels inneholder mye kalk og kan på samme måte bli utsatt for forvitring. Men siden frysing benyttes vil kontakt med CO₂ reduseres og det kan antas at denne forvitringen ikke vil øke som en følge av CO₂-lagring. Ved hjelp av sonderboring vil det være mulig å kunne oppdage eventuelle områder med hornfels. Det kan også gi et bedre bilde av vannforhold, karsthuler etc. rundt bergrommet.

Kapittel 4

Bergrommet, egenskaper og parametere

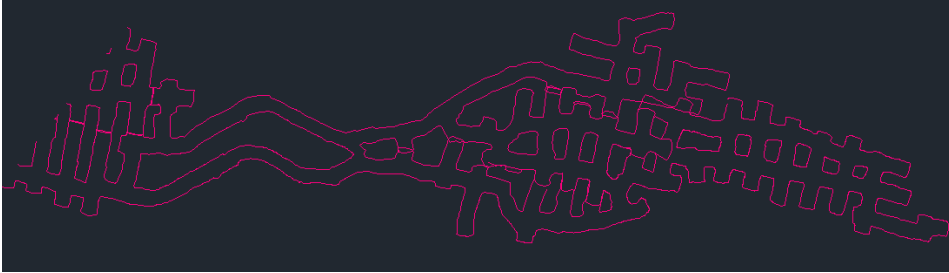
Kapittelet vil handle om den delen av gruen som vil være et alternativ til lagring av CO₂ og hvilket volum det kan forventes å være tilgjengelig basert på de alternativene som er tilgjengelig. Samtidig vil de bergmekaniske egenskapene vurderes og hvordan disse vil påvirke bruk av rommet til lagring av CO₂ og hvilke problemer som tidligere har blitt opplevd.

4.1 Lokasjon

Siden det er en stor grue med veldig mange grueganger så kan det være vanskelig å velge ut den delen av gruen som passer til lagring av CO₂. Det er fordeler ved å velge en del av gruen som tilfredsstillter visse parametere. Valget av gruegang er ikke basert på hvorvidt det faktisk er mulig å lagre CO₂ der, men som det alternativet som per i dag er mest realistisk å kunne benytte.

Den delen av gruen som har blitt valgt ut som et potensielt område for lagring av CO₂ er nivå 138. Området ligger under Eidangerfjorden på nivå -138 m, figur 4.1 viser grue-

gangene i denne delen av gruen. En ser også rom og pilar prinsippet med tunneler og pilarer mellom de (Jondahl (2014b)). Ved å lagre et stykke under bakken oppnås et naturlig trykk rundt bergrommet som vil være med å komprimere CO₂ slik at det kan lagres en større mengde. I tillegg er bergrommet under vann, slik at det vil ha vann i sprekke- ne rundt bergrommet. Dette vannet vil hindre en lekkasje av CO₂ ut av bergrommet hvis grunnvannstrykket er større enn trykket inne i kavernen.



Figur 4.1: En oversikt over nivå 138 i gruen hentet fra Microstation kart motatt av Norcem.

En parameter som vil være avgjørende for lagring av CO₂ er permeabiliteten til berget. Hvis det finnes områder i denne delen av gruen hvor vann trenger inn i stor mengde kan det by på problemer med nedfrysing av bergmassen. Dette vannet vil kunne fryse inne i kavernen og stjele større mengder av lagringsvolumet (Grøv and Ronæss (2003)). Ved et slikt tilfelle kan det benyttes injeksjon i bergmassen for å senke permeabiliteten til et lavere nivå. Hvis permeabiliteten er lav nok vil det være enklere å fryse ned bergmassen og vannet i sprekke- ne slik at det en barriere mot lekkasjer kan oppnås.

I dag drives det videre nedover i forekomsten, men ved hjelp av betongplugger kan bergrommet isoleres fra de delene av gruen hvor driften vil fortsette. Hvis CO₂-gass slipper ut i gruen kan det få fatale konsekvenser for de som jobber der. Det er samtidig viktig at det å lagre CO₂ i dette området ikke kommer i veien for videre drift av gruen.

Noe som også har betydning er distanse fra gruen til utslippspunkt. Hvis distansen er stor betyr det lange strekninger med rørledning for å transportere CO₂ til bergrommet. Disse rørene må være tette og består av stål for å kunne tåle trykket som benyttes for å pumpe

inn CO₂. En rørledning er veldig kostbart, spesielt arbeidet krever mye tid og penger.

4.2 Tidligere problemer med gruvegangen

Selv om det hadde vært å foretrekke med en gruvegang uten noen problemer, er det lite sannsynlig å finne et slikt eksemplar innenfor gruveindustrien. Eierne er ute etter å maksimere fortjenesten sin ved å ta ut så mye som mulig av forekomsten uten å risikere uhell for de som arbeider i gruen. Det er derfor de benytter seg av ”Rom og Pilar metoden”. Dette betyr ikke at mindre utrasinger eller blokkfall ikke skjer, men vil hindre større ras som kan nå dagen(Jondahl (2014b)). Som en følge av dette må gruvegangene sikres tilstrekkelig mot potensielle utrasinger, blokkfall, lekkasjer etc. hvis området skal kunne benyttes til lagring av CO₂.

I gruen benyttes et minimum av sikring som kreves for å hindre et større ras. I denne delen av gruen er det gjort noe sikring i enkelte svakere områder i form av CT-bolter som har blitt gyst. Det finnes ett område i nivå 138 som har blitt boltet en del, mens resten av nivået er uten bolter i henhold til oversikten over denne delen av gruen. Områder med bolting er vist ved grønne felt på figur 4.2.

Det har også vært tilfelle av blokkfall på nivået, dette vises på figur 4.2 som et stort rødt punkt. I tillegg er det en del sprekker og slepper i enkelte områder på nivået, der disse er observert har det blitt utført bolting hvis det har blitt ansett som nødvendig. Sprekker er potensielle utslippspunkt ved CO₂-lagring og må tettes tilstrekkelig for å unngå lekkasjer. På figur 4.2 vises disse som hvite og røde streker.

Slepper kan potensielt ha to sider, i det at de kan ha en tetningseffekt (slik som injeksjon) samtidig som de kan by på store problemer i form av utrasing og trykk på sikring. Disse effektene kommer av svelleegenskaper til enkelte leirmineraler når de får tilgang til vann. Det er sjelden sett som et positivt tegn med svelleleire ved konstruksjon i berg, siden det har vært årsaken til ras i mange tunneler. Men med tilstrekkelig sikring er det mulig å unngå eventuelle problemer som kan oppstå.



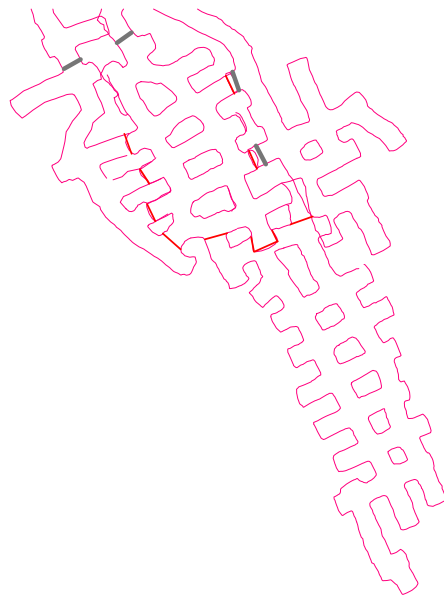
Figur 4.2: En oversikt over nivå 138 i gruen med detaljer om hvor det har blitt boltet (grønne felt), blokkfall (rødt punkt) og forkastninger (stiplede linjer). Hentet fra Microstation kart motatt av Norcem.

4.3 Volum og Areal

Det har ikke blitt utført noen eksakt beregning for å finne volum eller areal til nivå -138. Det har blitt avgrenset et passende område for lagring av CO₂, noe som gjør at det må lages et anslag på volum og areal ut ifra den informasjonen som finnes. Det er viktig å vite volumet slik at det kan beregnes hvor mye CO₂ som potensielt kan lagres.

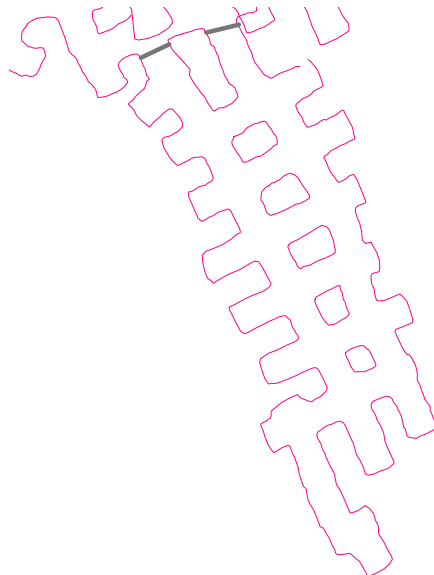
Ved hjelp av Microstation har Norcem fått laget et estimat på volumet til den delen av gruvegangen som vurderes i denne oppgaven. Slik det fremstår i dag er deler av gruvegangen blitt pallet ut (sprengt bunnen 7 m ekstra nedover), mens deler har den originale høyden på 8 m fra bunn til tak. I dette tilfellet gir Microstation et volumestimat på ca. 290.000 m³ (Jondahl (2014a)). Estimaten vil ikke være helt nøyaktig, men godt innenfor et avvik som kan aksepteres i denne oppgaven.

Det kan være nødvendig å sprengte ut den delen av gruvegangen som ikke er pallet slik at det blir en bunn som er på omtrent samme nivå gjennom gruvegangen. Dette vil hindre at vann for eksempel samler seg i en del av gruen og skaper problemer for fryseprosessen. Hvis dette skulle være nødvendig vil det naturligvis gi en økning på lagringsvolum. Det totale volumet vil da bli 390.000 m³, noe som er en betydelig økning. Estimaten er basert på samme utregning, men hvor hele gruvegangen har en høyde på 15 m.



Figur 4.3: En oversikt over alternativ 1 og 2, hvor de røde strekene omslutter området hvor det har blitt pallet. De fire grå strekene illustrerer hvor det vil være behov for betongplugger

Et siste alternativ er å benytte den sørlige delen av gruvegangen. Her er høyden fra tak til bunn 8 m over hele området. Da vil det ikke være noe behov for å sprengne ut, samtidig vil det kun være behov for to betongplugger. Derimot vil volumet være på omtrent 100.000 m³, noe som er betydelig mindre enn ved de to andre alternativene. Ved behov kan andre deler av gruvegangen omgjøres senere, men da vil kostnaden totalt være høyere enn ved å utvikle et større bergrom med en gang. Et mindre volum vil potensielt kunne benyttes som et prøveprosjekt og gir fleksibilitet ved at det senere gir mulighet for utvidelse.



Figur 4.4: Oversikt over alternativ 3 som stenges igjen av to betongplugger (tykke grå streker)

Arealet er viktig å vite siden det vil hjelpe med å estimere mengden sprøytebetong og injeksjon blant annet. Arealet for tak og bunn vil være like hverandre for de to første alternativene. Arealet til tak og bunn vil totalt utgjøre omtrent 52.000 m² for alternativ 1 og 2. Ved å benytte den sørlige delen av gruvegangen vil arealet for bunn og tak være totalt 12.000 m².

Tabell 4.1: Oversikt over volum og areal for de tre alternativene

Alternativ	Tak/Bunn (m ²)	Vegg (m ²)	Totalt (m ²)	Volum (m ³)
1	26.000	31.800	83.800	290.000
2	26.000	46.900	98.900	390.000
3	6.000	11.500	33.500	100.000

Arealet for veggene må deles disse opp i tre områder. Det første området er den sørlige delen av gruvegangen, som også kan isoleres som alternativ 3. Her er det et veggareal på ca. 11.500 m² med 8 meters høyde. Hvis høyden økes til 15 m så øker veggarealet til ca. 21.600 m². Beregningen er gjort ved å måle opp lengden til vegger og pilarer ved hjelp av AutoCAD for å begrense usikkerheten så mye som mulig.

Det andre området er den midterste delen av gruvegangen, hvor det har blitt pallet. Her er veggarealet ca. 15.000 m² for alternativ 1. Hvis resten av gruvegangen må palles vil veggarealet synke noe for denne delen av gruvegangen, ned til ca. 14.300 m². For det siste området, som er den vestlige delen av gruen, samt en liten del av den midterste så er veggarealet ved alternativ 1 ca. 5.800 m². For alternativ 2 vil arealet bli ca. 11.000 m². For en bedre oversikt tabell 4.1.

4.4 Parametere i gruvegangen

4.4.1 Q-verdi

Under befaringen av gruvegangen var hovedmålet å identifisere potensielle problemområder samt oppnå kvantitative verdier slik at det er mulig å få en Q-verdi for gruvegangen. Under befaringen ble det oppdaget enkelte områder som potensielt kan by på problemer, men disse kan utbedres ved hjelp av sikring og injeksjon. Ved befaring ble skjemaet som er å finne i vedlegg C benyttet for å finne parametre til Q.

Bergmassen var veldig konsistent i den grad at det ikke var mye endringer fra de forskjellige lokasjonene hva gjaldt antall sprekker og sprekkesett. Store deler av gruen var veldig tørre, det var svært lite vannlekkasje i gruvegangen. I noen områder kom det drypp

fra tak, mens det i et område ble observert en større vannlekkasje fra taket. Under befaringen ble det gjort observasjoner på 11 forskjellige lokasjoner i gruvegangen som vises i figur 4.5.

Lokasjon 1: Her ble det observert at bolting hadde blitt utført fordi det var en slette i taket som kunne føre til ras. Lite vann ble observert, men noen drypp var det. Bergmassen virket veldig solid, det var ikke noe tegn til andre svakheter. I tabell 4.2 er det en oversikt over Q-verdi og de parametrene som ble observert i gruvegangen. Her drives det videre på synk.

Lokasjon 2: Her var det ikke utført noen form for sikring og det var kun få drypp fra tak. Det vil ikke drives videre da de forventer å møte på problemer med vann lenger inn. I tunnelen til venstre for lokasjon 2 på figur 4.5 er det blitt utført bolting (se figur 4.2), her ble det i tillegg injisert på grunn av problemer med vannlekkasjer fra en oppknust sone.

Lokasjon 3: Her er det sikret med bolter i påvente av forkastning ved videre driving. Også her, i likhet med lokasjon 1, er det en solid bergmasse uten noe store innlekkasjer av vann. Noen drypp fra taket observert.

Lokasjon 4: I dette området har det blitt pallet ut 7 meter ekstra mellom bunn og tak, slik at det kunne utvunninnes mer av forekomsten. Det observeres en slette i taket som har ført til at taket er blitt sikret med bolter. Svært lite vann, ikke observert drypp i umiddelbar nærhet til området.

Lokasjon 5: I dette området har det også blitt pallet ut 7 meter ekstra. Her observert fukt på veggene. Vannet kommer fra en sprekk i taket, men det er lite vann som trenger inn. Området har ingen form for sikring.

Lokasjon 6: I dette området er det ikke pallet og området virker veldig tørt. Ingen observeres fra tak eller vegg. Det har blitt fjernet en del av ventilasjonsanlegget, det som

henger igjen kan skjule noen drypp men det er lite sannsynlig da det er relativt tørt på grunnen.

Lokasjon 7: Området virker veldig tørt og det ingen tegn til drypp. På kartet blitt registrert blokkfall i dette området. Sannsynligvis har blokkfallet skjedd på bakgrunn av sleppe. Taket viser til tross for dette ingen tegn til at det har falt ut noe, det er heller ingen sikring i området.

Lokasjon 8: På vegg observeres det vann med en mørkebrun til svart farge som virker å komme ut fra sleppe/sprekk oppe på vegg. Det har ikke blitt sikret, hverken i tak eller på vegg.

Lokasjon 9: Ingen sikring i området, men her observeres det store mengder vann som kommer inn fra ett hull i taket. Det er fra dette området mesteparten av vannet som ligger langs bunnen av gruvegangen stammer fra. Vannet renner videre nedover i gruvegangen. Det observeres i tillegg andre drypp fra taket. Kartet til Norcem viser forkastningszone som går gjennom området.

Lokasjon 10: Her ligger det mye vann på bunn og vannet har gult og svart utfall. Vannet kommer opp fra bunnen og noe fra vegg. Lite drypp fra tak.

Lokasjon 11: Helt inne ved hjørnet er det rustfarge på veggen hvor det renner vann.

Som nevnt er det veldig like forhold i bergmassen ved alle lokasjoner, forskjellen ligger stort sett i endring av vannforhold. I tabell 4.2 finnes en oversikt over de observerte verdiene til parametrene i Q-verdien som har blitt målt ved de fleste lokasjonene.

Det må tas hensyn til menneskelige feil ved avgjørelse av parametere i Q-systemet. Det ble for eksempel kun observert ett tydelig sprekesett under befarings, med noen mer tilfeldige sprekker ellers. Dette er noe som også stemmer relativt bra med SINTEF sin observasjon

Tabell 4.2: Q-verdier fra gruvegangen

Lokasjon	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q
1	95	3	2	0,75	1	1	84
2	-	-	-	-	-	-	-
3	90	3	2	0,75	1	1	80
4	85	3	2	0,75	1	1	76
5	90	3	2	0,75	1	1	80
6	85	3	2	0,75	1	1	76
7	90	3	2	0,75	1	1	80
9	85	3	2	0,75	0,66	1	50
10	85	3	2	0,75	0,33	1	25

gjort i forbindelse med bergspenningsmålinger som ble utført i Juni 2005. Her ble det gjort strøk- og fallmålinger i området hvor bergspenningsmåling skulle utføres.

Ved hjelp av følgende formel kan Q-verdier finnes basert på de parameterne som har blitt registrert fra befarings (NGI (2013)):

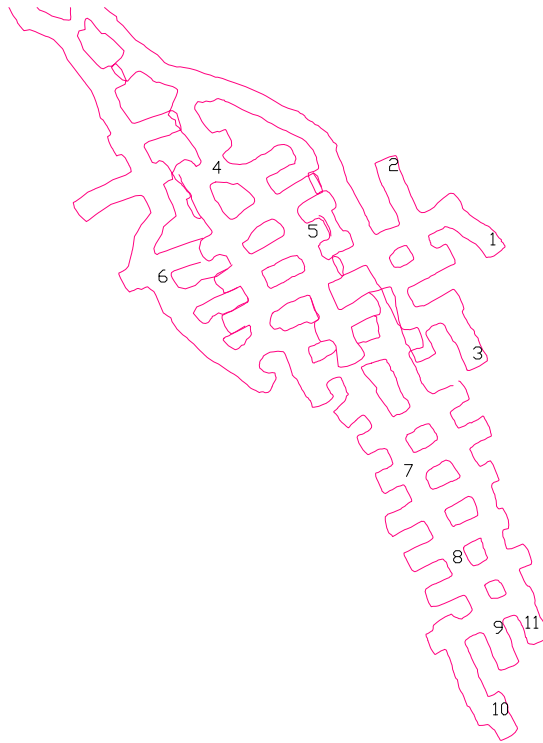
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.1)$$

Q-verdien for disse målingene ble relativt høye noe som bekrefter at det er en veldig solid bergmasse, se tabell 4.2. I tillegg viser det at gruvegangen kan være et bra alternativ å benytte for lagring i forhold til stabilitet av bergrommet.

4.4.2 Sprekkesett og sprekkeretning

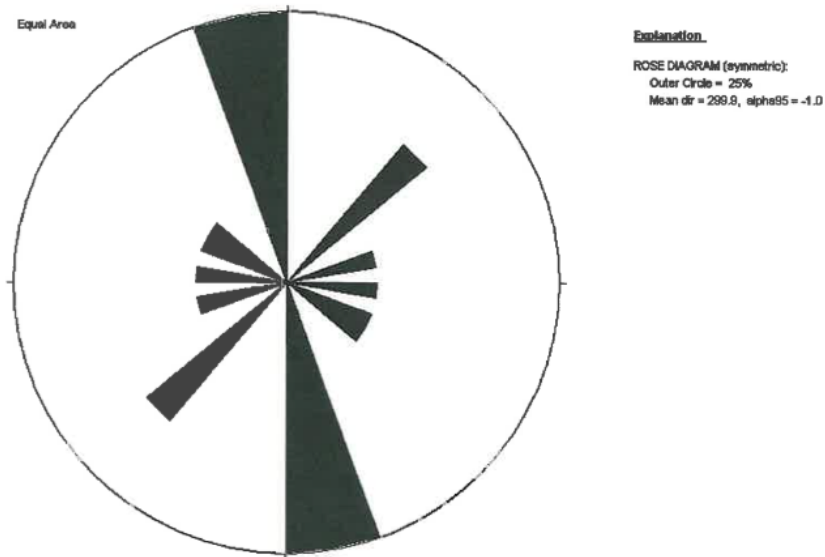
Under befaringsen ble det ikke gjort noen målinger av strøk og fall siden SINTEF allerede hadde utført dette i 2005. SINTEF utførte måling av strøk og fall da det ble gjort bergspenningsmålinger som stemmer veldig bra med de observasjonene som ble gjort under denne befaringsen. Ett tydelig sprekkese sett som har retning omtrent nord-sør med steilt fall. De andre sprekkeene er noe mer tilfeldige.

I rapporten til SINTEF fulgte det med en sprekkeroserose, se figur 4.6, basert på området



Figur 4.5: En oversikt over lokasjonene hvor Q-verdiene har blitt kartlagt i gruvegangen

hvor de utførte bergspenningsmålinger. Her er det mulig å se en veldig tydelig sprekkeretning som også ble gjenkjent under befaringen. De andre sprekkene var mer tilfeldige og ikke gjentakende fra lokasjon til lokasjon.



Figur 4.6: Sprekkerose, hentet fra SINTEF sin rapport (Dahle (2005))

4.4.3 Bergspenninger

SINTEF, avdeling for berg og geoteknikk, har utført bergspenningsmålinger for Norcem på nivå 138 i graven, rapporten ble ferdigstilt i Juni 2005, resultatene finnes i Vedlegg A. Målingene ble utført for å undersøke om drift på den andre siden av en større forkastningsone forårsaket en vesentlig endring av spenningsregimet i graven(Dahle (2005)). Det ble også gjort bergspenningsmålinger for en pilar på nivå 212, men det vil ikke bli lagt noe vekt på disse målingene i denne oppgaven.

For å kunne beregne bergspenninger så ble det ved nivå 138 boret ut kjerneprøver for å finne de mekaniske egenskapene til bergarten, disse finnes også i Vedlegg A. De meka-

Tabell 4.3: Bergartens mekaniske egenskaper, hentet fra SINTEF sin rapport i vedlegg A

Målested	E-modul (GPa)	Poissons forhold	Trykkfasthet (MPa)	Lydhastighet (m/s)	Tetthet (kg/m ³)
Nivå -138	72	0,17	125	5888	2813

niske egenskapene er satt opp i tabell 4.3.

For å kunne få målt de tre hovedspenningsretningene ble det utført tredimensjonale bergspenningsmålinger. Resultatene fra rapporten i til SINTEF er som følgende (Dahle (2005)):

Største hovedspenning, $\sigma_1 = 12.3 \text{ MPa} \pm 2.7 \text{ MPa}$

har trend 352° fra N og stup 0° , noe som betyr at den er horisontal

Mellomste hovedspenning, $\sigma_2 = 6.9 \text{ MPa} \pm 3.4 \text{ MPa}$

har trend 263° fra N og stup 9° , noe som betyr at den er tilnærmet horisontal

Minste hovedspenning, $\sigma_3 = 5.6 \text{ MPa} \pm 1.7 \text{ MPa}$

har trend 83° fra N og 81° stup, noe som betyr at den er tilnærmet vertikal

Resultatene viser at de horisontale spenningene er større enn den vertikale, noe som ikke er uventet i Norge. Skulle det vært omvendt må det være betydelig større overdekning. De målte spenningene er større enn de teoretiske som ble beregnet av SINTEF, noe som viser at en ikke kan stole blindt på teoretiske utregninger. De teoretiske spenningene ble beregnet til:

- $\sigma_v = 3.8 \text{ MPa}$
- $\sigma_h = 0.7 \text{ MPa}$










Konklusjonen til rapporten er at spenningsbildet ikke har endret seg vesentlig på bakgrunn av drift på den andre siden av forkastningssonen(Dahle (2005)).

Problemene som kan oppstå på bakgrunn av spenningene er som forventet. Siden de hori-

sontale spenningene er større enn de vertikale kan det i hovedsak by på problemer i taket av gruvegangen. Problemene som kan oppstå er sprekkdannelse og i verste fall blokkutfall. Det første er mest tenkelig da trykkfastheten til bergarten er ganske høy, 125 MPa i henhold til tabell 4.3. Dette betyr at det er lite sannsynlig at spenningene vil gi store problemer, med sikring bergrommet være veldig stabilt.

En annen mulig konsekvens er strekkproblemer i vegg siden de horisontale spenningene er større enn de vertikale. Siden formen på gruvegangen ikke er sirkulær finnes det ingen enkel formel for å beregne hvilken effekt spenningene kan forårsake. Hoek og Brown har kommet frem til en praktisk måte å estimere hvilke spenningsproblemer som kan oppstå i tak og vegger basert på hvilken form kavernen har (Hoek and Brown (1980)).

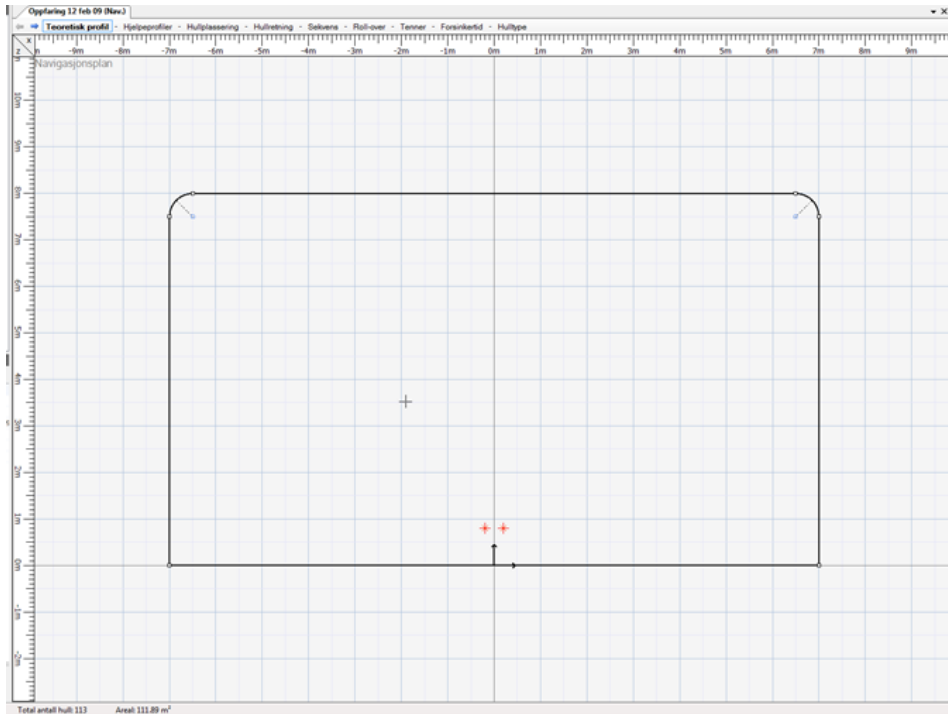
Problemet er at formen på denne gruvegangen ikke er representert på figur 4.7, figur 4.8 viser utformingen. Derfor vil det være nødvendig å benytte seg av et program som kan utføre en analyse og gi et svar på om det vil oppstå noen problemer. Eksempel på et slikt program er Phase2.

VALUES OF CONSTANTS A & B									
									
A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8
B	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	5.0	1.9	3.9

Figur 4.7: Faktorer for forskjellige utforminger på kaverner og tunneler hentet fra Hoek and Brown (1980)

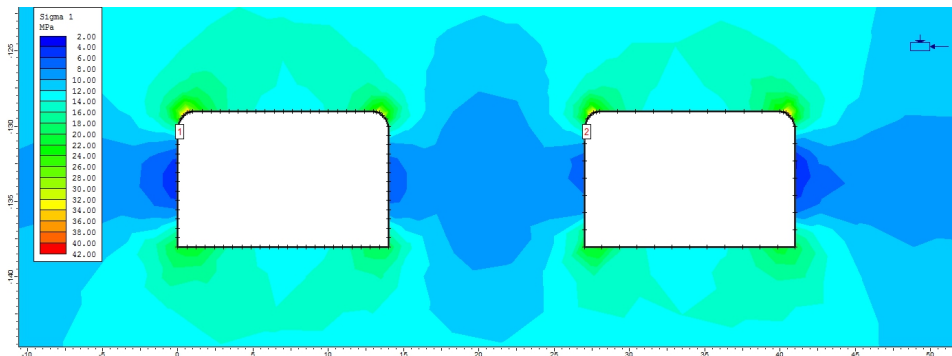
Ved hjelp av SINTEF sin rapport og Nilsen and Myrvang (2010) er de nødvendige verdiene og parametere som kan benyttes i Phase2 tilgjengelige. For de parameteren som ikke

er oppgitt, er RocLab et program som er behjelpelig med å estimere parametere ut i fra bergartstype. Det er viktig å nevne at modellen ikke nødvendigvis vil representere verdiene ved alle de forskjellige lokasjonene i gruvegangen siden parametere som vann vil ha en påvirkning på egenskapene til bergarten.

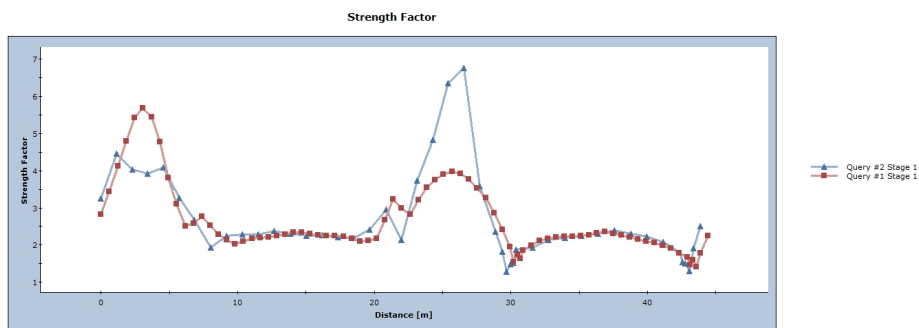


Figur 4.8: Utformingen av gruvegangen. Bilde motatt av Norcem

Figur 4.9 viser et snitt av gruvegangen i Phase2 hvor det ikke har blitt pallet, her er det mulig å se hvordan største hovedspenning påvirker gruvegangen. Den viser at den største påvirkningen kommer i hjørnene av hengt. Men som figur 4.10 viser, er styrkefaktoren > 1 rundt hele gruvegangen, slik at det ikke er forventet noen store problemer av de oppgitte spenningene. Problemene kan oppstå hvis det er et område med for eksempel litt svakere berg.

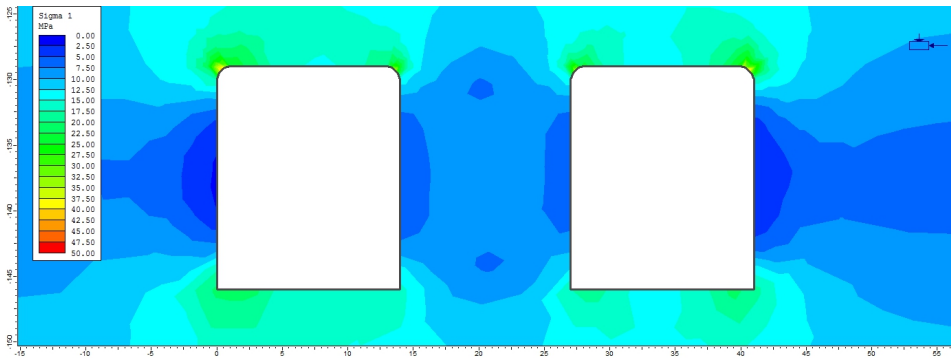


Figur 4.9: Illustrasjon av modellen i Phase2 med oversikt over hvordan største hovedspenning påvirker gruvegangen

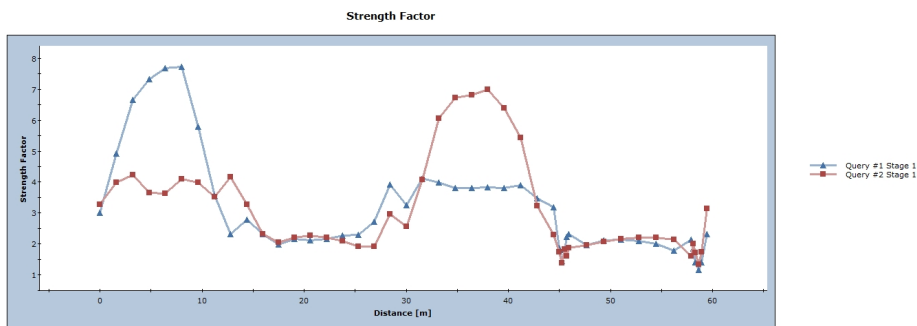


Figur 4.10: Graf som viser styrkefaktoren rundt gruvegangen

I området hvor det har blitt pallet er veggene høyere, utover det er utformingen lik. På figur 4.9 og 4.11 er det mulig å se likheten i hvordan den største hovedspenningen fordeler seg. De største spenningene samler som forventet seg i hjørnene av hengt her også. Figur 4.12 viser at styrkefaktoren er > 1 i dette tilfellet også.



Figur 4.11: Illustrasjon av modellen i Phase2 med oversikt over hvordan største hovedspenning påvirker gruvegangen der man har pallet



Figur 4.12: Graf som viser styrkefaktoren rundt gruvegangen som har blitt pallet

Sammenligner en disse resultatene med verdiene til trykkfasthet fra rapporten til SINTEF viser dette i begge tilfellene at spenningene ikke er høye nok til å gi store problemer i heng. Det bør legges til at det har skjedd blokkfall i gruvegangen på nivå 138, men her var en ugunstig sprekeretning svært medvirkende til blokkfallet (Nilsen and Myrvang (2010)).

I forhold til strekkspenninger er det ut ifra modellen ikke ventet å oppleve noen problemer. Noe som kan stemme bra med tanke på at Nilsen and Myrvang (2010) ikke har nevnt strekkspenning som et problem i sin rapport. Forholdet mellom den største og minste hovedspenningen er ikke stor nok til å skape et strekkproblem i veggene. Samtidig er strekkfastheten 5 MPa i henhold til Nilsen og Myrvang sin rapport, dermed må strekkspenninger overstige denne verdien for at dette skal bli et problem.

Når det tas hensyn til den mengden sikring som finnes i gruvegangen, vil ikke resultatene fra Phase2-modellen være noen overraskelse. Hadde det vært noe behov for å sikre gruvegangen hadde dette blitt utført under driving. I dag er det områder i gruvegangen som er sikret ut av nødvendighet samtidig som den resterende delen av gruvegangen viser stabile forhold og lite tegn til behov for sikring. Derimot vil det være behov for sikringstiltak hvis bruksområde for gruvegangen endres til noe som har høyere krav til stabilitet.

Samtidig kan det også nevnes potensielle strekkproblemer knyttet til nedfrysing av bergrommet. Som forklart tidligere økes volumet til vann når det fryses, samtidig som det krymper for bergmassen når temperaturen synker. Dette kan skape problemer med strekkspenning i bergmassen, men med tilstrekkelig sikring bør problemer som dette unngås. Samtidig er kvaliteten på bergmassen såpass god at det ikke nødvendigvis vil gi noen problemer. Det finnes mange nedfryste bergrom som ikke har opplevd noen problemer under drift. De problemene som har oppstått har som regel vært vann som fryser til is inne i kavernen (Arnesen (2014c)).

4.4.4 Termisk ledningsevne

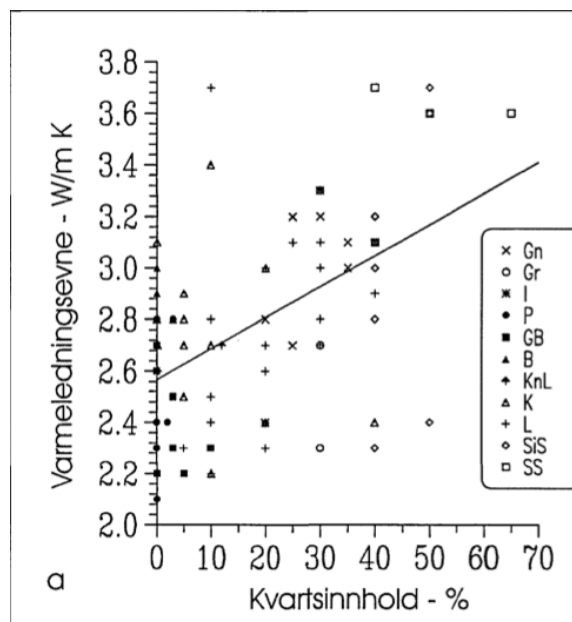
En viktig parameter når bergrom skal fryses er den termiske ledningsevnen til bergmassen. Bakgrunnen for dette er å vite hvor raskt bergmassen fryses ned, hvor mye energi som krever for å fryse ned bergmassen og hvor raskt nullisoterminen vil bevege seg utover i berget.

For å finne den termiske ledningsevnen til bergmassen må det utføres laboratoriumstest på en bergartsprøve. Testen er forholdsvis kostbar og kostnaden øker i takt med nøyaktig-

het. NGU, SINTEF og NTNU blant annet har laboratorier hvor dette kan utføres.

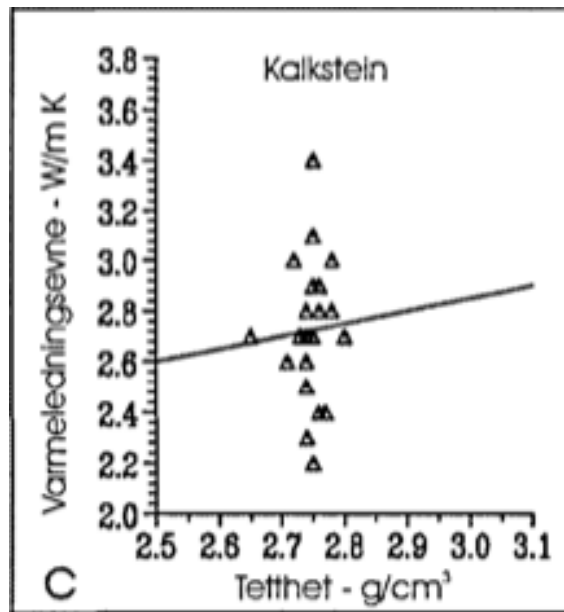
I dette tilfelle vil det bli estimert en verdi basert på innholdet av kvarts (kvarts har god termisk ledningsevne) i bergarten, samt hvilke verdier som har blitt målt på kalkstein i områder innenfor Oslofeltet. Selve verdien vil derfor ha en viss usikkerhet. I figur 4.13 vises et plott som viser korrelasjon mellom kvartsinnhold og varmeledningsevne hos bergarter i Bærum i henhold til Midttømme et al. (2000).

Norcem gjør mineralogiske tester på hver stoff. Disse viser gjennomsnittlig kvartsinnhold på ca. 13% for hele gruve. For nivå -138 vise et innhold på ca. 11%, se Vedlegg B. I følge Midttømme et al. (2000) er det også en korrelasjon mellom tetthet og varmeledningsevne, se figur 4.14. Tettheten til kalksteinen er på 2813 kg/m^3 ifølge SINTEF sin rapport om bergspenningsmålinger, se vedlegg A.



Figur 4.13: Plott som viser korrelasjon mellom kvartsinnhold og varmeledningsevne, hentet fra Midttømme et al. (2000)

NGU har gjort tester på varmeledningsevne for flere bergartstyper blant annet i Bærum, som er innenfor Oslofeltet. I Bærum har de utfra sine målinger laget et boksplokk for verdi-



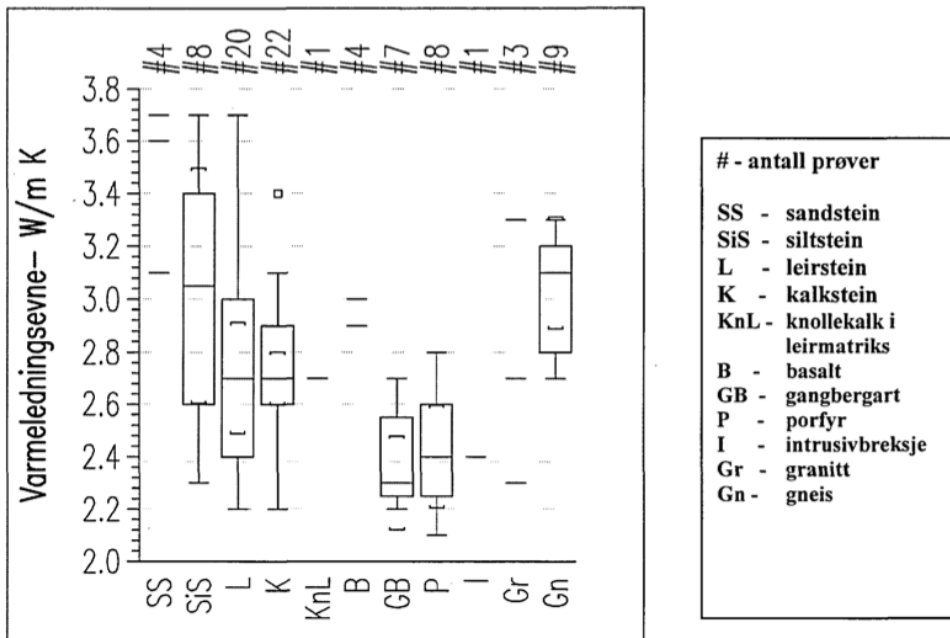
Figur 4.14: Plott som viser korrelasjon mellom tetthet og varmeledningsevne for kalkstein i Bærum, hentet fra Midttømme et al. (2000)

ene, plottet kan sees i figur 4.15. Her er de fleste verdiene innenfor 2.6 til 2.9 W/mK (Watt per meter Kelvin). Hvis kvartsinholdet for kalksteinen i Dalen gruve benyttes, samt tettheten kan en utfra NGU sine resultater i Bærum anta at det ikke er veldig urealistisk med verdi for termisk ledningsevne på ca. 2.8 W/mK.

Siden det også er en annen bergart i området som vil bli påvirket av nedfrysing vil det være nødvendig å utføre tester på denne også. Siden det ikke er utført noen test på denne bergarten vil det være vanskelig å estimere en termisk ledningsevne. Hornfels er veldig fin-kornet og den inneholder kvarts og kalk. Det vil ikke være helt urimelig å anta at verdiene er nære det til kalksteinen.

4.4.5 Spesifikk varmekapasitet

Den spesifikke varmekapasiteten er en egenskap som vil være viktig når bergrommet skal fryses ned siden det vil hjelpe å vite hvor mye energi som kreves for å endre temperaturen



Figur 4.15: Bokplott fra NGU sin rapport om bergartsmålinger i Bærum (Midttømme et al. (2000))

(Moran et al. (2011)) i bergmassen. Men det er også viktig å vite sikkerheten denne egenskapen gir om noe skulle skje med nedkjølingsanlegget.

Berggrunnen i Norge har en typisk varmekapasitet som ligger mellom 2.2 og 2.4 MJ/Km³ i henhold til Brekke (2002). Noe som stemmer bra med målinger på kalkstein gjort i Danmark av GeoEnergi.org med hensyn på potensiale for grunnvarme. Her ble det målt verdier fra 2.1 til 2.4 MJ/Km³.

På bakgrunn av dette er det ikke urimelig å anta en verdi på ca. 2.3 MJ/Km³ for kalksteinen i Dalen gruve. Det er ikke gjort noen test for å undersøke verdien, men i likhet med termisk ledningsevne er dette også noe som må utføres hvis det er aktuelt å gå videre med problemstillingen. På samme måte som termisk ledningsevne er det nødvendig å teste varmekapasiteten til hornfels, men også her vil det være rimelig å anta lignende verdier.

4.4.6 Termisk ekspansjonskoeffisient

Dette er en verdi, som i likhet med varme kapasitet og ledningsevne, må oppdages ved hjelp laboratoriumstester. Denne avgjør i hvilken grad bergmassens volum vil synke når den fryses ned. En større ekspansjonsverdi gir opphav til større strekkspenninger. Men det er flere parametre som er med å avgjøre om det vil oppstå problemer med termisk induerte strekkspenninger, som overdekning, geometrien til kavernen, nedkjølingsperiode og in-situ spenninger (Lu (2007)).

Hvis nullisotermen brer seg utover lenger enn strekkspenningene gjør vil det ikke oppstå noen lekkasje siden sprekkene fortsatt vil være fylt av vann og barrieren rundt bergrommet vil fortsatt være intakt. Det er ikke sikkert at termisk ekspansjon fører til nye sprekker, men det kan være med å forstørre de som er der.

I denne oppgaven vil det på bakgrunn av den gode bergmassen anta at termisk ekspansjon ikke vil være et problem. I henhold til Arnesen (2014c) vil en nedfrysing av bergmassen gjøre den mer stabil. Enkelte prosjekter hvor bergrommet er fryst ned har konstruert uten noen stor grad av bergsikring.

4.4.7 Vannforhold

En annen faktor som vil ha påvirkning på blant annet nedfrysing er vannforholdet rundt bergrommet. Selv om gruvegangen er relativt tørr, med unntak av enkelte områder med litt innlekkasje av vann, kan det være ganger eller huler med vann som finnes rundt gruvegangen. Siden det kreves mye energi for å senke eller øke temperaturen på vann (mer enn hva det kreves for en bergmasse) vil potensielle ganger med vann kreve lenger tid og mer energi for å fryses ned. Dette vil også påvirke tiden det tar for nullisotermen å bevege seg utover i bergmassen.

Hastigheten og mengden på gjennomstrømning av vann avgjør hvor vanskelig det vil være å fryse ned. Høyere hastighet og mengde gjør det mer utfordrende. Effekten blir det samme, nullisotermen vil ikke bevege seg tilstrekkelig utover i området hvor det er mye gjen-

nomstrømning av vann. Dette vil kunne være et stort problem om vannet beveger seg inn i bergrommet. Det vil da kunne spise opp volum ved at vannet kommer inn i bergrommet og omdannes til sørpe og is (Grøv and Ronæss (2003)).

En mulighet for å oppdage problemer med vann er å sondebore systematisk i gruvegangen. Spesielt bør det undersøkes nærmere i områder med vannlekkasje. I disse områdene må det uansett injiseres, men sondeboring kan gi svar på om større tiltak må foretas i disse områdene. Hvis vannføringen er stor kan det hindre at injeksjonsmiddelet blir effektivt mot vanninntrengning og det kan være nødvendig å ta i bruk et annet injeksjonsmiddel som ofte er mer kostbart eller har større påvirkning på miljøet.

4.5 Trykk og Temperatur

Forholdet mellom trykk og temperatur er ekstremt viktig ved lagring av CO₂ siden dette bestemmer tettheten til CO₂ og hvilken fase stoffet vil lagres i. En høyere tetthet vil tillate å lagre en større mengde CO₂ per m³. Optimalt ville vært å lagre CO₂ som et solid (tørr-is) siden dette gir den høyeste tettheten. Men å lagre CO₂ som et solid er problematisk, spesielt det å transportere tørr-is ned til bergrommet. Samtidig må de være veldig lave temperaturer for å oppnå en solid fase av CO₂. Figur 2.1 viser hvor grensene for de forskjellige fasene er.

Hvor høyt trykket kan være i bergrommet vil være bestemt ut ifra grunnvannstrykket. Om en ønsker å lagre brannfarlig væske i uforede bergrom må grunnvannstrykket omkring lageret tilsvare maksimalt innvendig trykk pluss minimum 5 meter vannsøyle som sikring mot lekkasjer ...Dette er, som tidligere nevnt, retningslinjer som er satt av DSB (Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap)(DSB (1994)). CO₂ er ikke et brannfarlig stoff, men det er et stoff som har andre påvirkninger (miljømessige og farlig for mennesker i stor konsentrasjon) slik at reglene vil derfor mest sannsynlig være de samme.

Grunnvannstrykket ved nivå -138 kan beregnes ut fra følgende formel:

$$P = \rho \times g \times h \quad (4.2)$$

Hvor ρ er tettheten til vann, g er tyngdeakselerasjonen og h er høyden til vannsøylen. I dette tilfellet er vannsøylen opp til havnivå siden gruvegangen ligger under Eidangerfjorden.

Tettheten til vann har i vårt tilfelle en liten usikkerhet. Det har ikke blitt utført noe test for å sjekke vannets tetthet. Det er i tillegg 138 meter med vann som inneholder forskjellig mengde salt slik at det må benyttes en verdi som kan reflektere gjennomsnittet for hele vannsøylen. Forskjellen på tettheten til ferskvann og saltvann er ikke veldig stor, noe som gjør at forskjellen i trykk ikke blir veldig stor. Tettheten for ferskvann er 1.000 kg/m^3 , mens for saltvann er tettheten 1.025 kg/m^3 (Zum Dahl (2007)).

For ferskvann vil det med en høyde på 138 m bli et trykk 13,5 bar. Ved saltvann med en høyde på 138 m blir trykket 13,8 bar. Selv om denne forskjellen er liten, vil det ved et anlegg i produksjon kunne lagre en noen ekstra tonn med CO_2 ved å vite rimelig eksakt hvor det interne trykket kan ligge i forhold til grunnvannstrykket. Det maksimale innvendige trykket kan i henhold til norsk regelverk ligge på mellom 11,5 og 11,8 bar.

Ved hjelp av en vanngardin med påsatt vanntrykk kan trykket som omslutter bergrommet økes. Men dette er mer aktuelt for en bergart som ikke løser seg opp i vann over tid. Dermed er en avhengig av å fryse ned bergrommet til en lav temperatur for å kunne komprimere CO_2 til det nivået hvor kostnadene per m^3 blir lavest mulig.

Uten noen form for nedkjøling vil temperaturen i gruvegangen forholde seg stabilt til enhver tid på ca. 6° til 7° C (et anslag basert på befarings). Det har ikke blitt utført noen temperaturmålinger i gruvegangen siden disse uansett vil være litt usikre med tanke på at det utføres arbeid i graven som tilfører varme.

Samtidig viser verdier for tetthet at hvis det skal være lønnsomt å lagre CO_2 må dette

gjøres i væskeform. Ved gassform vil ikke tettheten være høy nok til å forsvare kostnadene forbundet med det å gjøre om en gruvegang.

Ved gassform er det ikke mulig å oppnå en komprimering på noe særlig mer enn 1/15 fra standard trykk og temperatur (1 atm og 20° C). Ved standard trykk og temperatur vil tettheten være 1.98 kg/m³, mens ved trykk på 11.5 bar og -36° C vil tettheten være 30.4 kg/m³. Dette er i henhold til kalkulatorer som er tilgjengelig for alle på Internett.

Det finnes programmer der ute som kan gi et eksakt bilde av hvordan CO₂ oppfører seg under forskjellig trykk og temperaturer. Men siden de kalkulatorene og tabellene som ligger ute for alle viser like verdier ut ifra oppgitt trykk og temperatur vil de bli benyttet i denne oppgaven. Det vil uansett være behov for å involvere en eller flere personer med kunnskap om CO₂ og termodynamikk hvis det skulle være aktuelt å ta et prosjekt som dette videre.

Ved å lagre CO₂ som en væske vil man kunne oppnå en langt større komprimering av CO₂, nærmere 1/600. Ved et trykk på 11.5 bar og en temperatur på -36.5° C har CO₂ en tetthet på 1102.7 kg/m³. Noe som er en bemerkelsesverdig økning for en temperaturstigning på kun 0.5° C.

Basert på de tre alternativene for volum vil det være mulig å lagre følgende mengder med CO₂ ved væskeform (med en ca. verdi for $\rho = 1.100 \text{ kg/m}^3$):

- Alternativ 1: ca. 320.000 tonn CO₂
- Alternativ 2: ca. 429.000 tonn CO₂
- Alternativ 3: ca. 110.000 tonn CO₂

I henhold til SSB sin statistikk over Norges utslipp utgjør alternativene en ganske stor andel med tanke på at det er snakk om et bergrom alene. I følge SSB sin statistikk slipper Norge årlig ut nesten 50 millioner CO₂ og CO₂-ekvivalenter(SSB (2014)).

I henhold til miljødirektoratet sin informasjon slapp Norcem Brevik i 2012 ut over 700.000

tonn CO₂. Et bergrom kan dermed ta en stor andel av disse utslippene og vil være av spesiell interesse som et midlertidig lager. Det vil være svært vanskelig å benytte seg av ståltanker for å kunne oppbevare store mengder CO₂. Spesielt hvis man skulle ha behov for å oppbevare CO₂ over en lengre periode.

4.6 Transport med rørledning

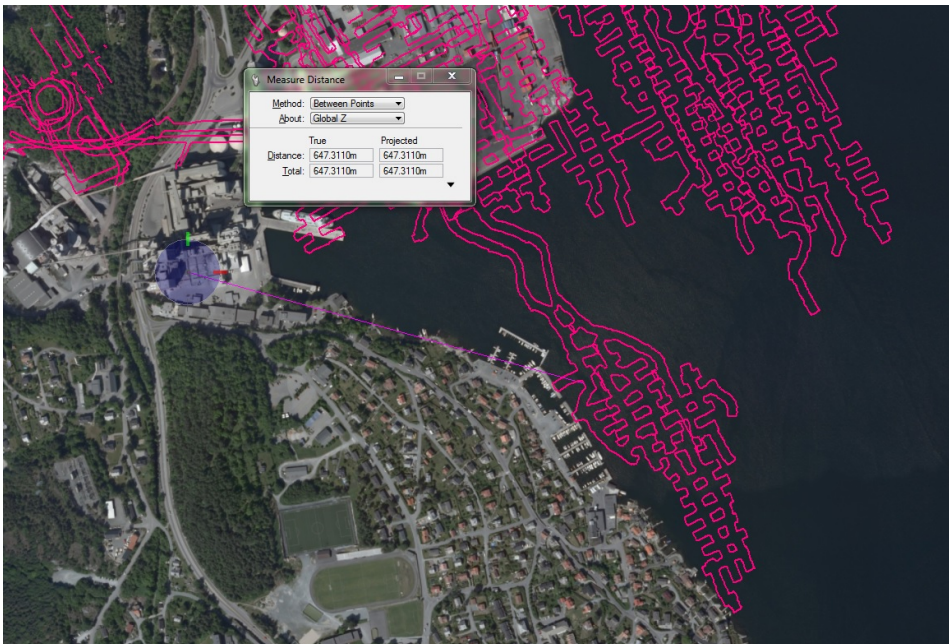
Det må være mulig å transportere CO₂ ned til bergrommet på en effektiv måte. Dette kan gjøres ved hjelp av en rørledning som kan pumpe CO₂ ned til bergrommet på samme måte som olje og gass transporteres.

Ved å ha en kortest mulig rørledning vil kostnadene holdes lavest mulig. Samtidig vil det være en fordel å kunne ha rørledningen tilgjengelig i tilfelle det er behov for vedlikehold. Problemet med å ha den lettere tilgjengelig er at den kan være i veien for dagens drift slik at skader kan oppstå.

Den korteste ruten vil være direkte fra fabrikk og gjennom et borehull i bergmassen ned til nivå 138. Rørledningen vil være isolert fra drift av gruen og dermed vil ikke vanlig drift kunne påføre skade. Samtidig er den trygg fra skade og hærverk fra andre mennesker. Kostnaden kan bli ganske høy for å bore såpass langt i berg. Horisontalt er det ca 650 m, mens vertikalt er det omtrent 140 m opp til fabrikk. Dette gir en lengde på 665 m hvis korteste vei mellom fabrikk og bergrom velges. Problemet med dette alternativet vil være å bore igjennom et område hvor de tidligere hadde store problemer med innlekkasjer av vann og dårlig bergkvalitet.

Et annet alternativ ville vært følge kjøreveien ut fra nivået og opp til fabrikk, lengden vil da bli ca. tre kilometer, men her må rørledningen krysse en vei. Her ville det også vært problemer med trafikk i gruen som øker sannsynligheten for en skade på rørledningen.

Et bedre alternativ vil være å legge en rørledning i tunnelsystemet frem til der hvor utslippspunktet ligger ovenfor. Derfra kan det bores et nesten vertikalt hull opp til fabrikk,



Figur 4.16: Oversikt over distanse fra nivå 138 til sementfabrikken

se figur 4.17. Med raskeste vei fra bergrommet til borehullet vil det bli omtrent 1300 meter med rørledning. For denne oppgaven antas dette som beste løsning.

Rørledningen må være en del av et rørsystem i bergrommet som festes i taket og gir dekning til hele bergrommet. Fra dette rørsystemet må det være rør som går ned til bunnen for å sikre en jevn fordeling av produktet i hele kavernen. Rørsystemet må kunne transportere CO₂ inn og ut av bergrommet. Det vil også være behov for en trykkontrollsjakt for å sørge for konstant trykk i kavernen (Ronæss (2007a)). Dette vil sørge for at det ikke skjer en endring av fase eller at trykket blir for høyt slik at det overgår retningslinjene til DSB.

Rørdimensjonen er avhengig av flere faktorer og vil derfor være vanskelig å bestemme i en slik oppgave uten mer informasjon. En faktor som er viktig vil være mengde CO₂ (tonn/time) som vil overføres via rørledningen. I en rapport utviklet av Sweco (Ronæss (2007b)) har utført beregninger hvor et rør med en dimensjon på 10 tommer kan transportere 125 tonn/time. Et problem er at disse beregningene er gjort på bakgrunn av blant



Figur 4.17: Vinklet borehull fra gruvegang til fabrikk. Den røde sirkelen viser hvor hullet starter i gruvegangen, mens blå sirkel viser hvor hullet kommer opp i dagen. Gul linjen viser kjørevei nede i gruvesystemet.

annet trykk og temperaturer som kan være helt annerledes enn hva som være tilfelle ved lagring hos Norcem. Det vil antas at 10 tommer vil benyttes for å lettere kunne estimere en kostnad. Men det må poengteres at dette er noe som må undersøke videre ut ifra de betingelsene CO₂ har før og etter transport ned til bergrommet.

En annen faktor vil være trykkfallet som kan forventes fra injeksjonspunkt ned til bergrommet (Ronæss (2007b)). Denne faktoren må beregnes ut i fra blant annet lengde, mengde CO₂ og trykket som CO₂ har når det skal transporteres. Det vil være viktig å sørge for at trykkfallet ikke er stort nok til at CO₂ potensielt endrer fase. Her vil valg av riktig rørdimensjon være viktig. Spørsmålet vil være om lengden er stor nok til at det blir signifikante trykkendringer. Rørledninger ved transport av gass og olje har ofte en langt større distanse som kan føre til trykkendring.

Derfor er det i denne oppgaven prøvd å benytte seg av et gjennomsnittstall for kostnad per meter rørledningen. Skulle det være aktuelt å gå videre med et slikt prosjekt er dette

et felt som må undersøkes videre av mennesker med den riktige kunnskapen og erfaringen for å få bestemt den beste og mest praktiske løsningen.

Kapittel 5

Sikringsmetoder

Dette kapittelet vil handle om hva som skjer med sikringen i et bergrom som er i konstant kontakt med CO₂. I tillegg er potensielt vann og nedfrysing andre variabler som kan påvirke sikringen over tid. Ut ifra dette vil det være mulig å gi et anslag på hvor lang levetid et bergrom dedikert til CO₂-lagring vil ha?

5.1 Bolter

Boltene som installeres i tunneler og andre bergrom består av stål. Hensikten med en bergbolt er å ta opp strekkbelastningene og dermed hindre potensielle utfall av blokker. Stål har korrosjon som en åpenbar svakhet som kan by på problemer i en del miljøer (Zumdahl (2007)). Et miljø som består av CO₂ og tilgang på vann kan derfor bli problematisk. Lave temperaturer kan være med og redusere korrosjonsproblemer.

Det finnes flere typer bolter å velge mellom, men en type som har blitt populær er CT-bolten, se figur 5.1. En kombinasjonsbolt som gir umiddelbar arbeidssikring og som senere kan gyses for å gi permanent sikring. Boltene har også en korrosjonsbeskyttelse som gjør den optimal til bruk i undersjøiske tunneler hvor miljøet er aggressivt og det er et behov for å redusere korrosjon. Boltene ble utviklet nettopp for denne grunnen. For mer informasjon om CT-bolten er det mye informasjon på Vik Ørsta sin nettside.



Figur 5.1: Bilde av CT-bolt hentet fra Vik Ørsta sin hjemmeside

Det er flere forhold som kan føre til korrosjon av stål. I dette tilfellet er det konstant tilstedeværelse av CO_2 og mulig kontinuerlig tilførsel av vann som kan føre til korrosjon av stålet i bolten. En annen parameter som spiller inn er temperaturen. I dette tilfellet vil det være et bergrom som er fryst ned. Korrosjon skjer oftere ved høye temperaturer, derfor kan en nedkjøling av bergrommet redusere mengden korrosjon til det minimale. Det er en uskreven regel at korrosjonsraten dobler seg for hver økning på 10°C (MTI (2008)).

I henhold til Nyborg (2009), Nyborg and Dugstad (2002) og Dugstad (2006) bidrar CO_2 til problemer med korrosjon av stål. I oljebransjen benyttes karbonstål som er lett korroderende, men det kan antas at disse problemene også vil gi problemer for stål i bergbolter. Det er derimot andre forhold i et rør som frakter olje, det er andre komponenter som kan være med å korrodere stålet som for eksempel H_2S . I oljebransjen benyttes karbonstålet fordi den har en evne til å danne en korrosjonsbeskyttende film.

Spørsmålet vil være i hvilken grad miljøet vil påvirke bergboltene. Spesielt med tanke på at CT-bolten har korrosjonsbeskyttelse. Hvis bruk av vanngardin unngås og det benyttes nedkjøling i stedet vil det fryse vannet rundt bergrommet. Dette vil hindre eller i det

minste redusere reaksjonen mellom vann og CO_2 som skaper karbonsyre, reaksjonen kan sees i ligning 5.1. CO_2 for seg selv er ikke korroderende, men i kontakt med vann vil det kunne øke hastigheten til korrosjonen av stål.



Levetiden for en CT-bolt under disse omstendighetene er vanskelig å estimere uten grundige undersøkelser og testing. I en undersjøisk tunnel estimeres levetiden for CT-bolten til minst 50 år, men det antas at denne er betydelig lenger. Det har blitt nevnt lengde 150 år, men dessverre er det ingen som har dokumentert dette, noe som gjør det vanskelig å sette en bestemt levetid. Hvis en tar hensyn til nedfrysing, som hindrer korrosjon og annen degradering av stålet i boltene vil levetiden være like langt som bergrommet holdes frosset(Arnesen (2014c)).

5.2 Sprøytebetong

Sprøytebetong er en sikringsmetode som er svært utbredt, det benyttes i nesten alle prosjekter siden det er billigere enn full utstøpning, samtidig som fiberarmert sprøytebetong gir god sikring. Sprøytebetong er i dag stort sett alltid tilsatt fiber for å gjøre den seigere og sterkere. I et tilfelle med CO_2 -lagring vil stålfiber kunne være et problem med tanke på korrosjon, men siden det finnes plastfiber som kan benyttes vil ikke det utelukke sprøytebetong basert på korrosjon.

Et problem som vil være av stor betydning er sprøytebetongens potensielle reaksjon med CO_2 over en lengre tidsperiode. Det er lite forskning på dette område som gjør at det blir vanskelig å gi et svar på hva en kan forvente av reduksjon i fasthet og styrke til sprøytebetong. I henhold til Luna et al. (2006) vil det oppstå en karbonatisering når CO_2 reagerer med kalsiumhydroksid og danner kalsitt og vann. En fordel med dette er at kalsitten som produseres kan være med å tette porehull i sprøytebetongen som kan senke permeabiliteten i sprøytebetongen. Det vil derimot ikke være tett nok til å benytte som en sikring mot lekkasjer.

På bakgrunn av usikkerheten om hvordan sprøytebetongen vil holde seg over lang tid i et slikt miljø kan en vurdere om det kun skal brukes som arbeidssikring. En annen ting er at lag med sprøyte betong vil senke volumet til bergrommet som igjen fører til redusert mengde CO₂ som kan lagres. Derfor vil det naturligvis være best å unngå å bruk av sprøytebetong, i tillegg blir kostnadene for bergrommet lavere. Men sprøytebetong er en viktig form for bergsikrings og vil være vanskelig å unngå.

Fra rapportene om Mongstad og Sture sine kaverner for lagring av olje var levetiden antatt til minimum 40 år i følge Midtlien (1989). Ved Mongstad ble det benyttet sprøytebetong som sikring ved siden av bolter Høsøien (1989). Det vil være av interesse å se i hvor stor grad sprøytebetongens egenskaper er redusert når lagrenes levetid anses som nådd. Lagrene har vært i bruk i over halvparten av deres antatte levetid, men de vil mest sannsynlig stå til den dagen det ikke er noe videre behov for de.

Her vil også nedfrysing spille en stor rolle. Når bergrommet fryses ned vil det holde på fastheten til sprøytebetongen. Ved lagring av for eksempel Propan har det blitt benyttet sprøytebetong under nedfrosne forhold. Med temperatur ned mot -40° C vil det være lite som kan påvirke sprøytebetongen. Vannet rundt bergmassen vil være helt nedfrosset og dermed ikke skape noe miljø for korrosjon. Da skal det samtidig være mulig å benytte seg av stålfiber for å øke seigheten og styrke. Ut ifra andre prosjekter kan det antas en levetid på minimum 40 år, og sannsynligvis lengre enn dette. Med nedfrysing kan sprøytebetong i likhet med bolter bli stående så lenge bergrommet er frosset uten noe reduksjon av styrke (Arnesen (2014c)).

5.3 Sprøytebetongbuer

Sprøytebetongbuer er i all hovedsak kun aktuelt hvis slepper, forkastninger eller andre svake partier skal sikres. Områder hvor det er behov for litt tyngre sikring uten å benytte seg av en dyrere og mer tidkrevende full utstøpning. Det vil derimot være gunstig å prøve å unngå de delene av gruvegangen som har behov for denne typen sikring. Både med tanke

på kostnader forbundet med sikringen, samt usikkerheten rundt lekkasje ved svakere områder som er vanskeligere å tette.

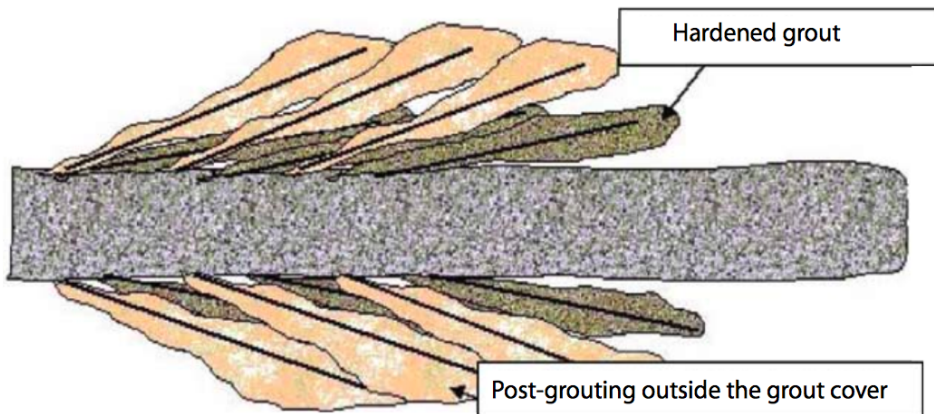
Det kan derimot være aktuelt å sikre med sprøytebetongbuer i nærheten av områder hvor det har vært problemer tidligere. Spesielt hvis disse kan være en fare for integriteten til den delen av gruvegangen som blir benyttet til lagring CO₂. Bergrommet skal bli stående en lang periode og dermed må en være sikker på at det ikke har sprekker som utvikler seg fra utsiden og inn. Levetiden vil være basert på de samme parameterne som for sprøytebetong, siden det er dette som benyttes.

5.4 Injeksjon

Injeksjon benyttes for å senke permeabiliteten i bergmassen og på den måten tette bergrommet. Bruk av injeksjon vil ikke kunne unngås i et slikt prosjekt, men det er ønskelig å begrense det så mye som mulig da det er en kostbar prosess. Siden bergrommet allerede er sprengt ut vil det kun være mulig med etterinjeksjon. Forinjeksjon ville vært å foretrekke da det registrert bedre resultater og erfaringer viser at etterinjeksjon er mer kostbart og tidkrevende (NFF (2011)). En fordel er at det er relativt tørt, noe som kan være et godt utgangspunkt for etterinjeksjon.

Det viktige ved injeksjon er å tette igjen den ytre delen av bergrommet, den delen som ikke har blitt påvirket av sprengning. Denne ligger ca. 0.5 - 1.5 m utenfor konturen. Hele periferien rundt bergrommet må dekkes, som et skjold, for å oppnå en tettere bergmasse. Figur 5.2 viser hvordan dette skjoldet fungerer og ser ut rundt bergrommet.

En forskjell fra forinjeksjon vil være at alle injeksjonshull i hele bergrommet bores før det injiseres. Deretter starter injeksjonen i det hullet som er lokalisert lengst fra de største lekkasjene, dermed injiseres den delen av gruvegangen som har mest vannlekkasje helt til slutt. Denne metoden skal hindre at innlekkasjen flytter seg til en annen del av bergrommet (NFF (2011)). Effekten av dette er en senkning av permeabiliteten rundt bergrommet slik at det blir mindre motstand fra vann mot nedfrysing av bergmassen.



Figur 5.2: Prinsippet av skjoldet som injeksjon danner rundt en tunnel, hentet fra NFF (2011)

Ved injeksjon vil det være spørsmål knyttet til hvordan injeksjonsmiddelet vil holde seg over tid i et bergrom som er nedfrost med konstant CO_2 -innhold. Hvor det viktigste vil være om injeksjonsmiddelet kan senke permeabiliteten uten at dette endrer seg over de neste 50 - 100 årene. Også her vil det være av interesse å se om tiden har hatt noe innvirkning på injeksjonen som ble foretatt på oljelagrene ved Sture og Mongstad.

Det er viktig å velge hvilken type injeksjonsmiddel som bør benyttes. Vanligvis benyttes det en form for sement (mikrosement, industrisement) som har en lavere kostnad enn kjemisk injeksjonsmiddel. Sement har også mindre påvirkning på miljøet en enkelte av de kjemiske midlene. Derimot kan de kjemiske midlene ha egenskaper som gjør de mer effektive å benytte seg av ved CO_2 -lagring. En kombinasjon kan være å foretrekke for å oppnå best mulig resultat.

Ved nedfrosset tilstand kan det antas en relativt lang levetid, sannsynligvis lenger enn sprøytebetong. Injeksjonsmiddelet vil i storgrad være isolert fra CO_2 og vannet vil være frosset og kan derfor ikke erodere injeksjonsmassen. Ut ifra dette er det rimelig å anta en levetid på minimum 40 år, men i likhet med bolter og sprøytebetong kan injeksjonen holde seg effektiv så lenge det er nedfrost.

5.5 Full utstøpning og betongplugger

Det vil være en fordel å kunne unngå full utstøpning av bergrommet på bakgrunn av kostnadene knyttet til det, tidsbruken er også en faktor. Det kan derimot være at full utstøpning vil være nødvendig, for eksempel knyttet til en stor sleppe eller et veldig svakt område som følge av en forkastning. I et prosjekt som dette vil integriteten til bergrommet være det aller viktigste.

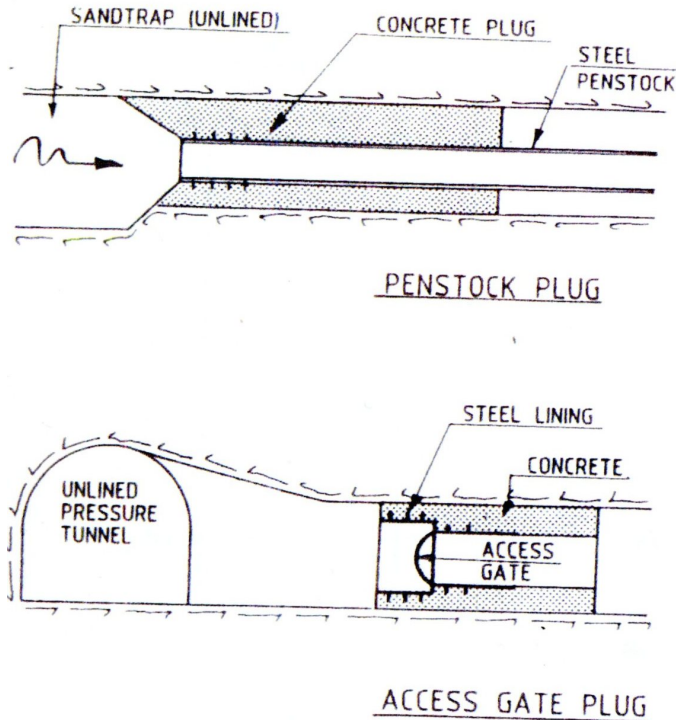
Det vil uansett være behov for betongplugger for å sikre mot lekkasjer fra utgangene av bergrommet. Slik at noe betongarbeid vil det uansett være. Minimum to plugger må konstrueres, med en tykkelse på mellom 5 og 10 meter. Dette vil være avhengig av hvilket alternativ som velges. Ved alternativ 1 og 2 vil det være behov for fire betongplugger til å tette bergrommet. Ved alternativ 3 vil det være behov for 2 betongplugger.

I prosjekter som går på lagring av gass, olje, vann etc. i bergrom er ofte lekkasjeproblemer knyttet til at betongpluggen ikke er helt tett. Og i dette tilfelle med flere betongplugger vil det være en økt risiko for en lekkasje. Derfor er det viktig å følge de beste eksemplene for å kunne unngå dette.

I Norge er det en del erfaring med bruk av betongplugger i blant annet vannkraftverk, samt i lagring av olje og gass. I henhold til Bergh-Christensen (1989) er lengden på disse pluggene alt fra 2,5% til 11% av vanntrykket. I dette tilfelle er grunnvannssøylen på nesten 140 m. Noe som gir en lengde fra 3,5 m til 15,4 m for en betongpluggen i denne oppgaven. I dag benyttes det i Norge mellom 2% og 5% av vanntrykket som lengde, men en betongplugg bør aldri være kortere enn 5 m (Broch (1999)).

I henhold til Bergh-Christensen (1989) finnes det to type plugger, "Penstockplugg" og "Access Gate Plug", se figur 5.3. Samme artikkel nevner at en Aksessplugg også tradisjonelt er kortere enn en Penstockplugg noe som kan utgjøre en kostnadsforskjell. Begge pluggene har en foring av stål. Eksempler på vannkraftverk med aksessplugg er Nyset-Steggje, Mel og Tjodan hvor disse hadde en lengde som var mellom 3,5% og 4,6% av

grunnvannstrykket (Bergh-Christensen (1989)). En annen fordel som Aksessplugg har er at det finnes en mulighet til å benytte seg av en inngang inn til bergrommet helt frem til anlegget er i drift.

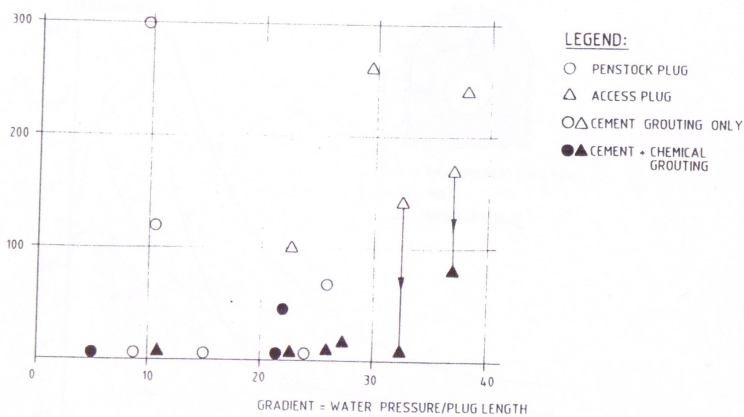


Figur 5.3: Bilde av Penstockplugg og aksessplugg, hentet fra Bergh-Christensen (1989)

Som tidligere nevnt har betongplugger ofte vært en gjenstand for lekkasjer i disse typer prosjekter. Bakgrunnen for dette er at temperaturen og volumet til betong synker i takt. Spesielt ved temperaturer godt under 0°C vil volumreduksjon kunne være stor. Dette fører til at betongpluggen ikke får fullstendig kontakt med bergoverflaten og vann kan for eksempel lekke inn i bergrommet. Det som da skjer er at vannet fryser og reduserer volumet tilgjengelig for lagring. I andre tilfeller kan dette føre til en CO_2 lekkasje ut av bergrommet, men vannet fryses i sprekken og tetter betongpluggen etter noe tid. Samtidig

må trykket i kavernen være høyere enn grunnvannstrykket for at CO₂ skal kunne lekke ut av vannfylte sprekker.

For å hindre og stoppe lekkasjer benyttes injeksjon for å tette de områdene hvor det er gap, sprekker etc. I begynnelsen ble det brukt sementinjeksjon med lavt til medium trykk (5-30 Bar). Men som figur 5.4 viser var ikke dette alltid bra nok. Konsekvensen av dette var å prøve en kombinasjon av sementinjeksjon og kjemisk injeksjon (polyurethan, epoxy) som ble utført med høyt trykk (50-100 Bar). Figur 5.4 viser at en kombinasjon av de to injeksjonsmidlene har i de aller fleste tilfeller en bedre virkning enn sementbasert injeksjon alene. I tillegg har det betydelig forbedret eldre plugger som kun hadde benyttet sementbasert injeksjon.



Figur 5.4: Graf som viser vannlekkasje mot grunnvannstrykk ved noen betongplugger i Norge, hentet fra Bergh-Christensen (1989)

Det er en fordel med en god og solid bergmasse der betongpluggen skal plasseres. Det er viktig at det har blitt sprengt ut forsiktig slik at bakbrytning og sprengningsinduserte sprekker i bergmassen minimeres. Det vil være nødvendig med mer detaljerte undersøkelser, som geologisk logging og permeabilitetstester, i området som betongpluggene skal plasseres i (Midtlien (2007)).

Det vil være viktig å fjerne alle løse blokker og bergfragmenter med rensk før betongplugg-

gene skal støpes. Det må også tas hensyn til den nærmeste bergmassen til betongpluggen som vil ha en noe høyere permeabilitet enn den intakte bergmassen når injeksjonssystemet skal designes.

Forinjeksjon benyttes før betongarbeidet påbegynnes. Dette gjøres ved at det bores hull og disse fungerer som en gardin hvor det deretter injiseres med høyt trykk. Så installeres rør og slanger, deretter kan betongarbeidet starte. Disse rørene og slangene vil stå for etterinjeksjon slik at hull og gap mellom betongen og bergmassen minimeres. Det vil være viktig å installere stålrør som kan fjerne luft når det fylles opp med betong. Et annet rørsystem må også installeres, et som kan kjøle ned betongpluggen under betongherding slik at sprekker i betongen kan unngås. Disse rørene kan senere benyttes til aktiv nedkjøling av bergrommet.

Etter at betongen har blitt kjølt ned utføres det kjemisk injeksjon med høyt trykk mellom bergmasse og betong, samt mellom betong og stålforing. Dette gjøres gjennom spesielle slanger som installeres mellom kontaktflatene før betongarbeidet startes. Til slutt utføres en kontroll/konsolideringsinjeksjon i hull som er boret gjennom betongen og inn bergmassen (Bergh-Christensen (1989)). Når det opereres med svært lave temperaturer ved lagring av gass og væske er det i henhold til Aasen et al. (2007) viktig at hovedpluggene forsegles tilstrekkelig.

Dette er en metode som er basert på norske bergforhold og da er ikke dette nødvendigvis samme metode som benyttes i andre land. Det kreves mye undersøkelse før en betongplugg designes, men for denne oppgaven vil det være rimelig å anta en tykkelse på ca. 7 m. Dette utgjør ca. 5% av grunnvannssøylen og skal kunne håndtere trykket innvendig i kavernen.

5.6 Frysing

Selv om frysing i et prosjekt som dette har som mål å komprimere CO₂ i stedet for å benytte det til sikring, har frysing av bergrom en god effekt på bergmassen i den grad at

det øker stabiliteten. Ved konstruksjon av Oslofjord-tunnelen ble nedfrysing benyttet for å styrke bergmassen slik at det var mulig å drive videre gjennom en svakhetssone(Nilsen and Broch (1999)).

En god strategi for et bergrom kan være å kjøle ned bergrommet ved hjelp av et nedkjølingsanlegg (med for eks. luft) til -25° C for deretter å stoppe alle innlekkasjer i bergrommet. Så kan nedkjølt CO_2 benyttes til å kjøle videre ned til ønsket temperatur. Et bra system må være på plass for å håndtere varmen som må ledes vekk fra bergrommet, dette kan for eksempel være kaldt vann(Arnesen (2014b)). Dette er en problemstilling som krever mye undersøkelse og ekspertise slik at den beste løsningen kan velges. Men lignende løsninger har blitt benyttet på andre nedkjølte lager med suksess.

Nedfrysingen er veldig tidkrevende, for en hall med volum på 200.000 m^3 er tidsforbruket minimum 3 mnd(Arnesen (2014c)). Slik at i alternativ 1 og 2 kan det være snakk om 4-6 mnd for nedkjøling og det anbefales å utføre frysing på vintertid. Nedfrysing kan potensielt vare i evig tid men det krever vedlikehold ved kontinuerlig tilførsel av nedkjølt materiale for å holde temperaturen i bergrommet konstant. Samtidig må det benyttes utstyr som sprer kulden til alle deler av bergrommet.

Før nedfrysing vil det være viktig å installere termistorer i bergmassen til å overvåke temperaturen rundt bergrommet. Disse kan for eksempel installeres i borehull etter sonderboring. Det vil være viktig å plassere de i flere distanser fra bergrommet slik at det er mulig å måle hva temperaturen er i ulike distanser fra bergrommet. Dette gjør det mulig å oppdage områder som det kan være problemer i.

5.7 Instrumenter

Selv om installering av måleinstrumenter ikke regnes som en form for sikring, er de nødvendige for å ha oversikt over hva som skjer i og rundt bergrommet. Som nevnt vil det være behov for termistorer til å måle temperaturen i og rundt bergrommet. Det vil også være behov for instrumenter som kan måle volumet og nivået nede i bergrommet, hvilken

fase CO₂ befinner seg i, vannmengde etc. Levetiden til slike instrumenter er vanskelig å anslå, men de må kunne gi rett informasjon under hele levetiden da de er veldig viktige for sikkerhet i forhold til lekkasje av produktet.

Kapittel 6

Anslag på sikringsmengde

For å kunne finne kostnadene til ombyggingen av bergrommet må sikringsmengdene anslås. I Norge er Q-metoden dominerende for bestemmelse av sikringsmengder og vil følgelig bli det systemet som benyttes i denne oppgaven. Ved befaring ble det registrert parametere til Q-metoden og beregnet Q-verdi, disse finnes i tabell 4.2. Mengden bergsikring vil basere seg på disse verdiene for alle de tre alternativene. Bruk av Q-metoden er godt forklart i håndboken som NGI har laget, den finnes på NGI sin nettside, NGI (2013).

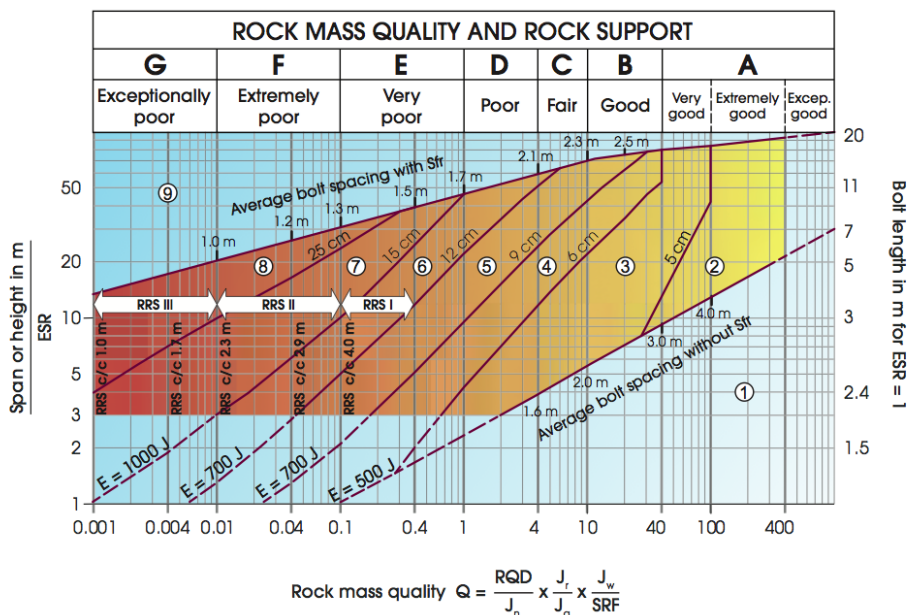
6.1 Geoteknisk kategori

Alle prosjekter i berg skal klassifiseres i Geoteknisk kategori som omtales i Eurokode 7. Hensikten med Eurokode 7 er å ha en oversikt over at ingen aktuelle grensetilstander overskrides for prosjekter som betegnes som en ”geoteknisk dimensjonerende situasjon” hvor fagområdet bergteknikk er underlagt. Disse grensene er definert i NS-EN 1990 (Eurokode 1) (Nilsen et al. (2011)).

Siden oppgaven er et forstudie for å se på muligheten til å benytte en gruvegang i Brevik for lagring av CO₂ har det ikke blitt gjort noen geoteknisk klassifisering. Dette er mer aktuelt på et senere tidspunkt om det skal utføres en mer detaljert prosjektering.

6.2 Q-verdi og sikringskategori

Ved å studere Q-verdiene i tabell 4.2 er det tydelig at Q-verdien er høy for hele gruvegangen. Lokasjon 9 og 10 har riktignok en noe lavere Q-verdi, men på 25-50 er det fortsatt en høy verdi. Bakgrunnen for de litt lavere Q-verdiene er en større mengde innlekkasje av vann i området. Derfor vil mengden sikring være forholdsvis lik for hele bergrommet med unntak av områdene i nærhet til lokasjon 9, 10 og 11 som kan ha behov for noe mer bergsikring.



Figur 6.1: Et diagram som viser anbefalt permanent sikring basert på Q-verdi og spennvidde/høyde i meter over ESR, hentet fra NGI (2013)

I henhold til figur 6.1 vil hele bergrommet havne i sikringskategori 3. Ved lokasjon 9, 10 og 11 vil det være en kortere distanse mellom boltene og et litt tykkere lag med sprøytebetong enn for de andre lokasjonene hvor det er en litt høyere Q-verdi. Sikringskategoriene er basert på Q-verdien mot spennvidde/høyde i meter over ESR (Excavation Support Ratio). I denne oppgaven har det blitt antatt en ESR verdi på 0,5, kategori G, basert på at det er et

viktig bergrom uten noen mulighet for vedlikehold under drift av anlegget. I tillegg er det tenkelig at bergrommet har en lang levetid, kanskje hundre år eller mer, se figur 6.2.

7 Type of excavation		ESR
A	Temporary mine openings, etc.	ca. 3-5
B	Vertical shafts*: i) circular sections ii) rectangular/square section * Dependant of purpose. May be lower than given values.	ca. 2.5 ca. 2.0
C	Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (exclude high pressure penstocks) water supply tunnels, pilot tunnels, drifts and headings for large openings.	1.6
D	Minor road and railway tunnels, surge chambers, access tunnels, sewage tunnels, etc.	1.3
E	Power houses, storage rooms, water treatment plants, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portals, intersections, etc.	1.0
F	Underground nuclear power stations, railways stations, sports and public facilities, factories, etc.	0.8
G	Very important caverns and underground openings with a long lifetime, ≈ 100 years, or without access for maintenance.	0.5

Figur 6.2: Tabell som viser ESR basert på type bergrom, hentet fra NGI (2013)

Spennvidden til bergrommet er ca. 14 m og vil bli benyttet for alle alternativene. I taket gir dette en sikringsklasse på nevnte 3 for hele bergrommet. I følge figur 6.1 kan sikringsklassen havne i grenseland mellom 2 og 3 for enkelte områder, men siden sikkerheten til bergrommet er veldig viktig er det rimelig å anta at sikringsklasse 3 bør benyttes.

Når det kommer til sikring av vegg benyttes høyden til veggen i stedet for spennvidden til gruvegangen. I tillegg benyttes en faktor for å bestemme Q-verdien til veggen, da den er høyere enn verdien for taket. Når Q-verdien er høyere enn 10 multipliseres denne verdien med en faktor på fem(NGI (2013)). Den nye Q-verdien benyttes deretter på samme måte i Q-diagrammet og sikringsklasse for vegg bestemmes. I denne gruvegangen havner veggene i sikringsklasse 2 for hele bergrommet.

Dette betyr at i taket vil det være behov for systematisk bolting og fiberarmert sprøytebetong. Avstanden mellom boltene vil variere noe avhengig av Q-verdien for området.

Tykkelsen på sprøytebetong vil i henhold til Q-diagrammet være 5-6 cm. I veggene vil det være stedvis bolting etter behov, men ingen anbefaling til sprøytebetong. I vanlige tunneler brukes som regel sprøytebetong i veggene, men dette er ikke nødvendigvis noe krav i dette tilfellet da det ikke er noen mennesker som skal oppholde seg i bergrommet når det er i drift.

6.3 Bolter

I forrige delkapittel ble det bestemt hvilken sikringsklasse gruvegangen tilhører, mengdene i de forskjellige områdene er fortsatt avhengig av Q-verdi. Når det gjelder bolter i taket er det i en stor del av bergrommet en stabil Q-verdi, men området sør i gruvegangen har noe mer innlekkasje av vann slik at det vil være behov for flere bolter i dette området. For veggene vil det være spotbolting over hele gruvegangen, men også her vil det være behov for flere bolter i den sørlige delen av gruvegangen.

I henhold til verdien som fås for spennvidde/høyde i meter over ESR vil dette gi en anbefaling av lengde på boltene. Her vil det i mesteparten av gruen være anbefalt med 7 m lange bolter. I 8 m høye vegger vil det holde med 5 m lange bolter.

6.3.1 Alternativ 1

I alternativ 1 er det en del av gruen som har en høyde på 15 m, mens resten har en høyde 8 m og spennvidden er 14 m i hele gruvegangen. For alternativ 1 er det en total ”tunnellengde” på ca. 1.800 m. Hvorav disse er fordelt på ca. 1.600 m med en Q-verdi fra 76-80, ca. 50 m for en Q-verdi på 50 og ca. 150 m for en Q-verdi på 25.

Distansen mellom boltene vil avgjøre antall av bolter som skal installeres, i dette tilfellet vil det for den største delen av gruvegangen være 4 m mellom boltene. Dette gir 4 bolter i taket langs spennvidden, noe som igjen gir 1 bolt i taket per meter tunnel i seksjonen med en gjennomsnittlig Q-verdi på ca. 78. Dette gir ca. 1.600 bolter for i taket for denne seksjonen. For en Q-verdi på 50 vil det være en boltedistanse på ca. 3.5 m. Dette gir

5 bolter i taket langs spennvidden, noe som igjen gir 1.2 bolter i taket per m gruvegang. Mengden bolter i taket blir da 60 for en Q-verdi på 50. For den siste delen av taket (Q-verdi = 25) er distansen mellom boltene på 3 m. Antallet bolter i denne seksjonen utgjør 180 bolter. I taket vil det da være totalt ca. 1.840 bolter.

For å bestemme antallet bolter det skal være i vegg må lengden på veggen være kjent, samt høyden. I vegg er det anbefalt sikringsklasse 2 og dermed spotbolting. Dette gjør det litt vanskelig å anslå antall bolter i vegg, men en kan med rimelighet anta at en viss mengde bolter per meter. Hvor disse evt. settes og hvor mange det blir i virkeligheten er opp til en kontrollingeniør å bestemme.

For den sørlige delen av gruen er vegg lengden på ca. 1450 m, dette inkluderer da pilarer. Det er rimelig å anta et gjennomsnitt med en bolt for hver fjerde meter. Antall bolter for vegg i den sørlige delen vil da være ca. 363. I den midtre delen, hvor høyden er 15 m, vil lengden av veggen for alternativ 1 være ca. 760 m inkludert pilarer. Samtidig vil det være ca. 65 m med vegg som har en høyde på 8 m. I den delen høyden er 15 m kan det være rimelig å anta 2 bolter for hver fjerde meter. Antall bolter vil da være ca. 380 for vegg i den delen av gruen med 15 m høyde og ca. 16 bolter for den delen med 8 m høyde. For den vestlige delen, samt den delen ellers i gruen som har 8 m høyde er det en total vegg lengde på ca. 730 m som med 1 bolt for hver fjerde meter gir ca. 183 bolter.

Dette gir for alternativ 1 ca. 2.780 bolter i vegg og tak. Fordelt på ca. 1.840 i tak og ca. 940 bolter i vegg.

6.3.2 Alternativ 2

I likhet med alternativ 1 vil det være 1.840 bolter i taket for dette alternativet siden arealet i taket og lengden av gruvegangen er likt. Men siden høyden vil være 15 m gjennom hele gruvegangen i dette tilfellet vil det være nødvendig å anslå en mengde for boltene i veggen.

For den sørlige delen vil lengden av veggene fortsatt være ca. 1.450 m, men høyden vil

bli 15 m. Dette betyr at det vil være ca. 725 bolter som skal installeres i veggene til den sørlige delen. Den midtre delen som har hatt en høyde på 15 m hele tiden, med unntak av ca. 65 m av vegg som har 8 m høyde, har en vegg lengde på ca. 780 m. Antall bolter i denne delen vil da være 380 bolter. Den resterende delen av gruvegangen har fortsatt en vegg lengde på ca. 730 m og med 15 m høyde vil antallet bolter være ca. 365.

Dette gir en boltemengde for alternativ 2 på ca. 3.310 bolter. Hvor 1.840 bolter vil være i taket og ca. 1.470 vil være i vegg.

6.3.3 Alternativ 3

For alternativ 3 har er lengden på gruvegangen på ca. 610 m innenfor en q-verdi på ca. 78. I denne delen blir antall bolter ca. 610. Det er en del av gruvegangen med lengde ca. 50 m som har en Q-verdi på ca. 50. Med ca. 1.2 bolt per meter gir dette ca. 60 bolter. Det er også en seksjon med Q-verdi på ca. 25, Lengden av dette området er ca. 150 m som gir ca. 180 bolter.

For vegg er antallet bolter det samme som ved den sørlige delen i alternativ 1, ca. 363 bolter. Antall bolter i alternativ 3 blir da ca. 1.210. I tabell 6.1 er det en oversikt over antall bolter i de forskjellige alternativene.

Tabell 6.1: Oversikt over antall bolter i hver av alternativene

	Tak	Vegg	Totalt
Alternativ 1	1840	940	2780
Alternativ 2	1840	1470	3310
Alternativ 3	850	363	1210

6.4 Sprøytebetong

I henhold til hvor bergrommet havner på Q-diagrammet i figur 6.1, vil sprøytebetongen ha en tykkelse på 5-6 cm. Hvor mesteparten av gruvegangen vil ha 5 cm tykkelse, mens de to svakere områdene har ca. 5.5 cm tykkelse. Alternativ 1 og 2 vil ha samme mengde

sprøytebetong i taket. Som nevnt vil det ikke være behov for sprøytebetong i veggene, men vanligvis er det en overgang mellom tak og vegg hvor det sprutes. I dette tilfellet, siden det er veldig god kvalitet på bergmassen vil det antas at 1 m overlapp ned på vegg holder.

6.4.1 Alternativ 1 og 2

Siden arealet i taket er likt vil disse to alternativene ha den samme mengden sprøytebetong. For den delen av bergrommet med Q-verdi på ca. 25 er arealet ca. 2.100 m² og med en tykkelse på ca. 5.5 cm utgjør dette et volum på ca. 116 m³. Den delen av gruvegangen med en Q-verdi på ca. 50 har et areal på ca. 700 m² og sprøytebetongmengden vil være ca. 39 m³. I henhold til tabell 4.1 har taket et areal på ca. 26.000 m² dermed er det resterende arealet, med en Q-verdi på ca. 78, på ca. 23.200 m² og med en tykkelse på ca. 5 cm vil mengden sprøytebetong være på ca. 1.160 m³. Totalt utgjør dette ca. 1.300 m³ sprøytebetong for taket.

For å beregne mengden sprøytebetong som skal påføres vegg må total lengde for vegg bestemmes. I dette tilfelle vil det være rett å benytte total vegg lengde for alternativ 2, siden det i alternativ 1 er ca. 65 m meter "ekstra" gruvegang med 8 m høye vegger som er overgangen mellom den delen av gruvegangen som er pallet og ikke pallet. Fra kapittel 6.3.2 er lengden av vegg kjent, den er 2.960 m hvor ca. 150 m er med Q-verdi på 25 og ca. 50 m med en verdi på 50. Dermed er sprøytebetongmengden på ca. 150 m³. Totalt vil mengden sprøytebetong være ca. 1.450 m³ for alternativ 1 og 2.

6.4.2 Alternativ 3

Fra tabell 4.1 har alternativ 3 et takareal på ca. 6.000 m² og fra alternativ 1 og 2 er arealet for den delen av gruvegangen med lavere Q-verdi på ca. 2.800 m². For den delen av taket med Q-verdi på ca. 78 vil mengden sprøytebetong være ca. 190 m³. I den resterende delen av taket vil mengden sprøytebetong være ca. 155 m³. Totalt vil mengden sprøytebetong utgjøre ca. 350 m³ for taket.

I vegg vil det være samme mengde sprøytebetong som i alternativ 1 og 2 for den delen

med Q-verdi på 50 og 25, dermed vil også volumet være ca. 11 m^3 . Den resterende delen av alternativ 3 har en vegg lengde på 1.250 m og med en tykkelse på 5 cm vil mengden sprøytebetong være ca. 62.5 m^3 . Dermed vil det totale volumet sprøytebetong i alternativ 3 være ca. 425 m^3 . En enkel oversikt over sprøytebetongmengder er vist i tabell 6.2.

Tabell 6.2: Oversikt over volum av sprøytebetong for de tre alternativene

Alternativ	Tak (m^3)	Vegg (m^3)	Totalt (m^3)
1	1.300	150	1.450
2	1.300	150	1.450
3	350	75	425

6.5 Sprøytebetongbuer

I henhold til sikringsklassene er det ingen anbefaling til bruk av sprøytebetongbuer. Dermed vil det i en ideell situasjon ikke benyttes. Det kan derimot ikke utelukkes for et slikt prosjekt, spesielt da det krysser forkastninger som potensielt kan by på problemer. I denne delen av bergrommet har det ikke gitt noen store problemer, men det kan være forkastningen i nærheten av lokasjon 9 (se figur 4.5) som er bakgrunnen for at området har en større lekkasje av vann enn andre deler av gruvegangen.

Til tross for disse forkastningene virker det ikke som om det er nødvendig med noen sprøytebetongbuer siden bergkvaliteten er såpass god. I tillegg vil injeksjon benyttes ved lokasjon 9 som vil kunne tette lekkasjen i stor grad. Det har ikke blitt benyttet sprøytebetongbuer ellers i gruen, og det har vært dårligere områder enn hva som er tilfelle i denne delen av gruvegangen.

Det er derfor rimelig å anta at det ikke vil benyttes noen sprøytebetongbuer for denne gruvegangen. Skulle det derimot vise seg å være behov er det mest sannsynlig bare snakk om ett område som er aktuelt. I verste fall er det snakk om totalt 4-5 steder i gruvegangen

som kan være aktuelle. Lokasjon 9, samt ved inngangen til den sørlige delen (inngang ved alternativ 3) da det går en forkastning gjennom dette området.

6.6 Injeksjon

Det er svært vanskelig å anslå mengden injeksjon det vil være behov for uten å ha eksakte tall på blant annet vannlekkasje og permeabilitet. Men ved hjelp av artikler om injeksjon i Norge på lignende bergarter vil det kunne bli gjort et grovt estimat av hva som kan forventes. Vegvesenet har laget en teknologisk rapport basert på erfaringer fra tunnelarbeid i Asker (Andersson (2005)) som har tall over injeksjonsmengder per borehull etc. Der er det snakk om, for kalkstein, ca. 3-500 kg per borehull.

På nivå 138 i gruen er det tidligere blitt injisert gjennom en 200 m lang forkastnings-sonen hvor det var problemer med vannlekkasje og oppknust berg. Her ble det estimert et forbruk på ca. 1.200 tonn industrisement, 800 pakkere og 1.600 kg mauringsmasse. Det ble boret 25 injeksjonshull med en lengde på 25 m og en overlapp for hver 15. meter. Dette utgjør ca. 1.500 kg injeksjonsmasse per borehull for dette området.

Området i denne oppgaven er større enn hva som var tilfelle med forkastningssonen, men har mindre innlekkasje. På bakgrunn av dette er det mer realistisk å benytte seg av informasjonen fra vegvesenet siden vannforholdene ligner mer fra tunnelen i Asker er likner mer enn hva tilfellet var ved forkastningssonen. Slik at 400 kg injeksjonsmasse per borehull kan antas å være realistisk.

For alternativ 1 er det omtrent 1.900 m med "tunnel" hvor det vil bli ca. 3.000 injeksjonshull. Tas det hensyn til at det er mange tverrslag og deler av bergrommet ikke er pallet kan antallet injeksjonshull reduseres til ca. 2.000. Med ca. 400 kg injeksjonsmasse/borehull blir dette ca. 800 tonn injeksjonsmasse for alternativ 1. For alternativ 2 er høyden 15 m over hele bergrommet og antall injeksjonshull vil være ca. 2.300. Dette utgjør ca. 920 tonn injeksjonsmasse for alternativ 2.

For alternativ 3, er det ca. 450 m "tunnel" hvor det vil være ca. 500 injeksjonshull og ca. 200 tonn injeksjonsmasse. Disse mengdene har en viss usikkerhet med tanke på at det er basert på et gjennomsnitt for hva som har blitt benyttet i en vegtunnel i Asker med lignende vannforhold og bergart (kanskje med en litt annen mineralogisk sammensetning). Mengdene som benyttes vil først være mulig å vite eksakt under selve utførelsen. Noen områder vil kanskje kreve mer, mens andre kan kreve svært lite for å oppnå en tilfredsstillende tetting rundt bergrommet.

6.7 Full utstøpning

I likhet med sprøytebetongbuer er det ikke gitt noe anbefaling om full utstøpning på bakgrunn av sikringsklassen. Under befaring var det heller ingen områder som utpekte seg til å være så svake at det var behov for full utstøpning. Men det kan heller ikke utelukkes at det kan være et behov for full utstøpning i et område, men dette er svært lite sannsynlig ut i fra observasjonene under befaring. Det vil riktignok være behov for mye betong til betongpluggene.

6.8 Frysing

Det finnes ikke noe eksakt mengde for frysing, men temperaturen bør være omtrent -40° C. Dette gjør at en væskefase kan oppnås samtidig som det finnes en buffer å gå på hvis noe skulle føre til en senkning av temperatur.

6.9 Sonderboring

For å undersøke bergmassen rundt bergrommet vil det være behov for systematisk sonderboring. Ut fra erfaring sonderbores det ca. 30-40 m per løpemeter i vanlige tunnel prosjekter. Slik at dette vil benyttes også i denne oppgaven.

For alternativ 1 og 2 utgjør dette ca. 60.000 m sonderboring totalt. For alternativ 3 er det omtrent 14.000 m sonderboring.

Kapittel 7

Kostnadsanslag

I dette kapitlet er målet å kunne komme frem til en kostnad for de tre alternativene. Estimeringen av kostnader vil baseres på eldre rapporter, samt grove estimat basert på samtaler med personer som har erfaring med prosjektering og konstruksjon av lignende anlegg. Dessverre er det få kostnadsrapporter fra lignende prosjekter tilgjengelig for offentligheten, dette gjør at det blir noe grove kostnadsestimater med en viss usikkerhet. For å få en så god analyse som mulig benyttes Lichtenbergs metode for å anslå kostnadene.

Lichtenbergs metode er trinnavis, det vil si at prosjektet gjennomgås i flere trinn med stadig mer detaljer og nøyaktighet. Metoden benyttes for å komme seg frem til et kostnadsoverslag som ligger innenfor fastsatte krav om nøyaktighet. For en utredningsplan, som er nivået denne oppgaven befinner seg på, er kravet til nøyaktighet +/- 40% (Graarud et al. (2011)).

Kostnadene for sikring baserer seg på de mengdene som ble estimert i kapittel 6. Kort oppsummert antas det at hele bergrommet, for alle alternativer, ligger i svært bra bergmasse slik at det ikke er noe behov for store mengder sikring for å opprettholde stabilitet i bergrommet. En mindre del av bergrommet har en litt lavere verdi, men er godt innenfor sikringsklasse 3 i henhold til Q-diagrammet i figur 6.1.

Selv om store deler av bergrommet ikke viser tegn til noe behov for injeksjon, er dette et krevende prosjekt som krever en tettest mulig barriere. Derfor vil det være behov for injeksjon rundt hele bergrommet. Det vil også senke permeabiliteten slik at det blir lettere fryse ned bergmassen, noe som fører til en kostnadsreduksjon.

7.1 Priser

For å kunne anslå kostnader relatert til et prosjekt som dette er nødvendig å ha informasjon om prisene til de forskjellige enhetene som skal benyttes. Priser for bolter og sprøytebetong er lettere tilgjengelig enn for betongplugger, frysing etc. Derfor vil den største usikkerheten til kostnadene være knyttet til blant annet frysing av bergrommet.

7.1.1 Bergsikring

Prisene til de forskjellige alternativene av bergsikring er basert på kostnader Norcem hadde relatert til sikring av de delene av gruvegangene som har behov for dette, samt rapporter fra vegtunneler etc. Lite sikring benyttes i gruvedriften hos Norcem på grunn av god bergmasse, men i områder der det er behov har de benyttet bolter og sprøytebetong. I områder med større vannlekkasjer har det blitt benyttet injeksjon. Prisen for bergsikring vil inkludere arbeidet som gjøres for å utføre oppgaven.

Norcem sine kostnader for bolting utgjør ca. 450 kroner gjennomsnittlig for hver bolt. For sprøytebetong ligger kostnadene på ca. 5.000 per m³ inkludert stålfiber. Norcem har ingen informasjon om kostnader knyttet til sprøytebetongbuer, men ut ifra priser benyttet i vanlige vegtunneler kan det beregnes ca. 10.000 kr per meter. Full utstøpning er relativt kostbart, tidkrevende og sannsynligvis noe det ikke vil være behov for. Kostnadene forbundet med utstøpning kan i likhet med sprøytebetongbuer finnes ved hjelp av priser fra rapporter om vegtunneler og antas å være ca. 50.000 per meter med tunnel.

7.1.2 Injeksjon

Kostnader relatert til injeksjon vil være basert på tall fra Norcem. Mengdene og prisene de har benyttet vil være mest realistisk for prosjektet siden dette stammer fra injeksjon gjort i samme gruve og dermed under lignende forhold. Kostnadene for injeksjon med arbeid ligger på ca. 8.000 kr per tonn med injeksjonsmasse inkl. boring, arbeid etc.

7.1.3 Betongplugg

En betongplugg inneholder som tidligere nevnt mer enn bare betong, derfor er kostnadene til betongplugg i denne oppgaven inkludert arbeid, stål, injeksjon etc. Prisen for betongplugg er vanligvis i region 0.8 - 1.5 millioner kroner og har en tykkelse på mellom 5 og 10 meter (Arnesen (2014a)). I denne oppgaven vil det være behov for 2-4 betongplugg avhengig av hvilket alternativ som blir benyttet.

7.1.4 Frysing

Det vil være behov for å kjøle ned bergrommet til ca. -40°C for å kunne oppnå en væskefase for CO_2 når det tas hensyn til det maksimale trykket i kavernen. Dette gir også en buffer om det skulle skje noe senkning av temperatur. Dette er lignende temperaturer som benyttes ved lagring av propan og LPG blant annet, slik at kostnadene knyttet til nedfrysing kan baseres på kostnader fra den type prosjekter.

I henhold til Arnesen (2014c) er det ikke urimelig med en kostnad på mellom 3 og 5 millioner kroner for et bergrom med 200.000 m^3 i volum. Dermed kan det basert på denne informasjonen antas en pris for alternativ 1 på mellom 5 og 7 millioner kroner, 7-9 millioner kroner for alternativ 2 og 2-3 millioner kroner for alternativ 3.

7.1.5 Sonderboring

Kostnadene knyttet til sonderboring er de samme som for de fleste andre prosjekter hvor det benyttes og ligger på ca. 75 kr per meter boret. Dette er avhengig av hardheten til

bergmassen, men siden Norcem forteller at kalksteinen er lett å bore i vil det ikke være mer kostbart enn andre prosjekter.

7.1.6 Rørledning

Kostnadene knytte til en rørledning vil ha en stor usikkerhet siden utgangspunktet for mengder, trykk etc. av CO₂ som skal transporteres ikke er kjent. Derfor vil kostnadene være et veldig grovt estimat i forhold til hva som har vært benyttet for rørledninger ved lagring og transport av olje og gass.

Ved å se på priser for stålrør på internett fås en liten indikasjon på hva det kan koste per m rørledning. Dette estimatet er basert på et stålrør med diameter på 10 tommer. I henhold til informasjon fra internasjonale selskaper (for eks. alibaba.com) koster det fra ca. 5.000 kr per tonn med stålrør. Sellens (1996) beregner at et stålrør med 10 tommer diameter veier ca. 60 kg/m. Dette betyr at det vil være behov for ca. 78 tonn med stålrør, noe som gir en kostnad fra ca. 400.000 kr for stålrørene alene.

I tillegg er det installasjonskostnad, boring, fester etc. som utgjør den aller største delen av kostnadene. Det er derfor ikke urimelig å anta en kostnad på ca. 150 kr/kg med ferdig installert rørledning med rørsystem i bergrommet. For 1.300 meter med rørledning kan det antas en kostnad på ca. 12 millioner kroner. Denne verdien har en stor usikkerhet siden eksakt rørdimensjon ikke er kjent. Samtidig er det ikke tatt med beregninger i forhold til kvantumsrabatter etc. Mer nøyaktig undersøkelser må foretas hvis det er ønskelig å gå videre med prosjektet.

7.2 Alternativ 1

For alternativ 1 fås en estimert kostnad på bergsikring og sonderboring på ca. 24.8 millioner kroner med en usikkerhet på +/- 1.6 millioner kroner. Skjemaet for Lichtenbergs metode vises i figur 7.1. I tillegg vil det være en kostnad knyttet til nedfrysing av bergrommet. Denne kostnaden antas å ligge på ca. 6 millioner kroner. Samtidig er det antatt en

	Enhet	Nedre Grense	Antatt Verdi	Øvre Grense	Middel- verdi	MV - Kr	Standardavvik		S ² (NOK)
							S	S (NOK)	
Bolter	stk	2000	2780	3500	2768		300	135000	18225000000
	kr/stk	400	450	500	450	1245600	20	55360	3064729600
Sprøytebetong	m ³	1000	1450	2000	1470		200	1000000	1E+12
	kr/m ³	4500	5000	5500	5000	7350000	200	294000	86436000000
Sprøytebetongbuer	m	0	0	40	8		8	80000	6400000000
	kr/m	8000	10000	12000	10000	80000	800	6400	40960000
Full utstøpning	m	0	0	10	2		2	100000	10000000000
	kr/m	40000	50000	60000	50000	100000	4000	8000	64000000
Injeksjon	tonn	650	800	1100	830		90	720000	5,184E+11
	kr/tonn	6500	8000	9500	8000	6640000	600	498000	2,48004E+11
Betongplugger	stk	4	4	4	4		0	0	0
	kr/stk	800000	1200000	1500000	1180000	4720000	140000	560000	3,136E+11
Sonderboring	m	50000	60000	70000	60000		4000	312000	97344000000
	kr/m	65	75	100	78	4680000	7	420000	1,764E+11
Sum Kostnader (NOK) =							24815600	($\sum S^{2,0.5}$) =	1574159,677

Figur 7.1: Lichtenbergs analyse av kostnadene relatert til sikring av bergrom samt sonderboring for alternativ 1

kostnad for rørledning på ca. 12 millioner kroner.

Det finnes også kostnader relatert til rigg og drift, disse er vanligvis estimert til 20-30% av sprengningsprisen (Nilsen (2009)). Nå blir det ikke utført noen form for sprengning på dette alternativet slik at det blir vanskelig å estimere kostnadene forbundet med rigg og drift. I tillegg utføres det jo allerede arbeid i graven slik at området er rigget opp for arbeid. Så å anta en kostnad på ca. 50% av sikring og sonderboring når det tas hensyn til de fasiliteter som allerede er på plass virker ikke helt urealistisk. Kostnad for Rigg og drift blir da ca. 12.5 millioner kroner.

Det finnes også måleinstrumenter etc. som må installeres, men kostnadene antas å være betydelige mindre enn de for blant annet frysing, injeksjon og betongplugger. De vil derfor anses som å være en del av disse kostnadene. Dette gir en total kostnad for alternativ 1 på ca. 55 millioner kroner. Med en lagringskapasitet på ca. 290.000 m³ utgjør dette en kostnad på ca. 190 kr/m³.

7.3 Alternativ 2

Ved alternativ 2 er det behov for å sprengte vekk ca. 100.000 m³ med bergmasse. Norcem opererer i dag med en kostnad på ca. 105 kr/tonn berg som sprenges og fraktes til lager. En del av bergarten som skal sprenges i dette tilfellet er hardere enn kalksteinen noe som

fører til en økning i pris. I denne oppgaven antas en prisøkning på ca. 50%. Dette vil være ca. 155 kr/tonn som er ca. 435 kr/m³ berg som tas ut (gitt tetthet på ca. 2.800 kg/m³).

Skjemaet i figur 7.2 viser kostnadene for sprengning, sikring og sonderboring. Dette utgjør 68.8 millioner kroner. Rigg og drift kan i dette tilfelle beregnes ut ifra sprengningskostnad. Hvis 30% benyttes blir kostnad ca. 12.9 mill. kroner. Dette er veldig nære kostnad i alternativ 1 og dermed kan det antas at disse er realistiske for denne oppgaven.

	Enhet	Nedre Grense	Antatt Verdi	Øvre Grense	Middel- verdi	MV - Kr	S	Standardavvik S (NOK)	S ² (NOK)
Sprengningsarbeid	m ³	85000	100000	110000	99000		5000	2180000	4,7524E+12
	kr/m ³	375	435	500	436	43164000	25	2475000	6,12563E+12
Bolter	stk	2900	3310	3500	3266		120	54000	2916000000
	kr/stk	400	450	500	450	1469700	20	65320	4266702400
Sprøytebetong	m ³	1000	1450	2000	1470		200	1000000	1E+12
	kr/m ³	4500	5000	5500	5000	7350000	200	294000	86436000000
Sprøytebetongbuer	m	0	0	40	8		8	80000	6400000000
	kr/m	8000	10000	12000	10000	80000	800	6400	40960000
Full utstøpning	m	0	0	10	2		2	100000	10000000000
	kr/m	40000	50000	60000	50000	100000	4000	8900	64000000
Injeksjon	kg	650	920	1100	902		90	720000	5,184E+11
	kr/kg	6500	8000	9500	8000	7216000	600	541200	2,92897E+11
Betongplugger	stk	4	4	4	4		0	0	0
	kr/stk	800000	1200000	1500000	1180000	4720000	140000	560000	3,136E+11
Sonderboring	m	50000	60000	70000	60000		4000	312000	97344000000
	kr/m	65	75	100	78	4680000	7	420000	1,764E+11
Sum Kostnader (NOK) =						68779700		(Σ S ²) ^{0,5} =	3658796,264

Figur 7.2: Lichtenbergs analyse av kostnadene relatert til sikring av bergrom samt sonderboring for alternativ 2

Frysing antas å koste omlag 8 mill. kroner i dette alternativet siden volumet er en del større. Pris for rørledning og rørsystem antas å være ca. 12 mill. kroner. For alternativ 2 vil da totalkostnad være ca. 101.7 millioner kroner. Kostnad per m³ vil da være ca. 260 kr.

7.4 Alternativ 3

I figur 7.3 viser en kostnad for bergsikring og sonderboring på ca. 13.8 millioner kroner. Antatt kostnad for frysing er på ca. 2.5 millioner kroner og pris for rørledning antas å være ca. 12 millioner. Hvis det settes en rigg -og driftskostnad til 30% av prisen for bergsikring og sonderboring blir dette ca. 7 millioner kroner.

Totalkostnad for dette alternativet blir ca 35.3 millioner kroner. Med en lagringskapasi-

	Enhet	Nedre Grense	Antatt Verdi	Øvre Grense	Middel- verdi	MV - Kr	S	Standardavvik S (NOK)	S ² (NOK)	
Bolter	stk	2000	2780	3500	2768		300	135000	18225000000	
	kr/stk	400	450	500	450	1245600	20	53360	3064729600	
Sprøytebetong	m ³	1000	1450	2000	1470		200	1000000	1E+12	
	kr/m ³	4500	5000	5500	5000	7350000	200	294000	86436000000	
Sprøytebetongbuer	m	0	0	40	8		8	80000	6400000000	
	kr/m	8000	10000	12000	10000	80000	800	6400	40960000	
Full utstøpning	m	0	0	10	2		2	100000	10000000000	
	kr/m	40000	50000	60000	50000	100000	4000	8000	64000000	
Injeksjon	tonn	150	200	250	200		20	160000	25600000000	
	kr/tonn	6500	8000	9500	8000	1600000	600	120000	14400000000	
Betongplugg	stk	2	2	2	2		0	0	0	
	kr/stk	800000	1200000	1500000	1180000	2360000	140000	280000	78400000000	
Sonderboring	m	10000	14000	17000	13800		1400	109200	11924640000	
	kr/m	65	75	100	78	1076400	7	96600	9331560000	
Sum Kostnader (NOK) =							13812000		(Σ S ²) ^{0.5} =	1124227,241

Figur 7.3: Lichtenbergs analyse av kostnadene relatert til sikring av bergrom samt sonderboring for alternativ 3

tet på ca. 100.000 m³ utgjør dette en kostnad på ca. 350 kr per m³.

7.5 Oversikt

Tabell 7.1 viser en oversikt over kostnadene for hvert alternativ. Fra tabellen vises det at alternativ 1 gir mest lagringsvolum for hver krone som brukes. Samtidig er alternativ 3 det som krever den minste investeringen totalt. Det kan diskuteres hvilke av disse som utgjør den beste investeringen siden det vil være avhengig av hvilket behov Norcem kan ha. Bare fordi kostnaden per m³ er lavere betyr ikke nødvendigvis at det er beste alternativ.

Tabell 7.1: Oversikt over kostnader for de tre alternativene

Alternativ	Volum CO ₂ (m ³)	Kostnad (Mill NOK)	kr/m ³
1	290 000	55	190
2	390 000	101.7	260
3	100 000	35.3	350

Diskusjon

Siden de globale utslippene av CO₂ fortsatt kommer til å være et hett debattertemne i mange år fremover, er det viktig å kunne komme med alternativer for hvordan de kan reduseres. Norcem sine gruveganger kan dekke et behov for mellomlagring av CO₂ om Norcem skulle velge å satse videre på CO₂-rensing.

Gruvegangen ligger også godt til geografisk i forhold til transport av CO₂ til et permanent lager, i og med at fabrikken ligger rett ved Eidangerfjorden. Siden videre transport mest sannsynligvis kun er aktuelt via en sjøvei er dette en stor fordel. Å konstruere en rørledning fra et bergrom i innlandet, til et permanent lager offshore vill vært veldig problematisk med tanke på at de store kostnadene

Med tanke på de bergtekniske forholdene er det lite som tyder på at det skal være noe problem å kunne benytte nivå 138 til lagring av CO₂. Det er høy kvalitet på bergmassen, det er lite oppsprekking og det er lite vannlekkasje med tanke på at det ligger under Eidangerfjorden. Det kan derimot være nødvendig at en person med mer erfaring fra kartlegging og Q-metoden går gjennom gruvegangen for å få helt korrekte parametre.

Det kan stilles et spørsmåltegn ved verdiene relatert til bergartens termiske egenskaper siden disse er estimert på bakgrunn av informasjon fra prosjekter andre steder i Norge.

Hvis det en gang blir realitet av oppgaven er det nødvendig med korrekte verdier for å finne eksakte kostnader knyttet til nedfrysing. Dette gjelder også for de bergartene som er i nærhet til bergrommet.

Med sikring basert på Q-metode vil det ikke være noe fare for utrasing eller problemer med ustabilitet i bergrommet. Når bergrommet også fryses ned vil det være svært stabilt og dette kan potensielt gjøre at mindre sikring kan benyttes. Bergsikringens levetid vil forlenges da det under fryste forhold er lite som kan påvirke sikringen. Det er vanskelig å si hvor mye det kan reduseres, men i følge Arnesen (2014c) har det blitt konstruert lagerrom med for eksempel kun sprøytebetong som bergsikring. Det kan være verdt å undersøke i og med at bergmassen er såpass god som den er.

Andelen av kostnaden til sikringen som er størst knyttes til injeksjonsdelen som er svært viktig for nedfrysing av bergmassen. Ved lav permeabilitet og vannføring i sprekkene vil kostnadene for nedfrysing redusere. Bakgrunnen for dette er at det krever mer energi å fryse ned vann (og spesielt vann som beveger seg) enn å fryse ned bergmasse. I tillegg vil det redusere hastigheten på en evt. lekkasje av CO₂

Dette er bra siden vann har en oppløsende effekt på kalkstein. Over tid kan dette føre til at det blir huleganger og karsthuler i bergmassen, derfor er vanngardin utelukket for i denne oppgaven. CO₂ alene er ikke korroderende, men det er et stoff som kan reagere med vann og resultatet av dette er karbonsyre som kan akselerere oppløsningen av kalkstein. Nedfrysning blir derfor viktig siden det hindrer at vann strømmer gjennom sprekker å løser opp kalksteinen.

Det som kan være et problem tilknyttet nedfrysing er at det ikke vil være store tykkelser av bergmasse som skiller deler av bergrommet fra resten av gruvegangen. Dette kan føre til at det blir frost i den andre delen av gruvegangen, dette vil gi et energi tap ved nedfrysing. I tillegg er det kort vei for en evt CO₂-lekkasje til andre deler av gruvegangen. Den sørlige delen av gruen er mer isolert fra resten av gruvegangen som kan gjøre at

alternativ 3 kan ha en mindre risiko for CO₂-lekkasje.

Samtidig må behovet for lagringsvolum være en sentral faktor, hvis 100% CO₂-fangst ikke kan oppnås er det ikke sikkert behovet for volum er noe større enn det som kan oppnås med alternativ 3. Ved behov er det mulig å utvide til den andre delen av bergrommet senere.

En utfordring med alternativ 1 er at det finnes to deler av gruvegangen med gulvplan på forskjellige høyder. Dette kan på problemer med vann som vil renne til en del av gruen og isolere bergmassen mot nedfrysing. Samtidig vil det være vanskelig å fordele produktet tilstrekkelig slik at det kan bli områder hvor nedkjølt produkt ikke kommer til for å få fryst ned bergmassen til ønsket temperatur.

Dette kan derimot potensielt løses ved at det bygges to betongplugger ekstra og disse installeres som ved alternativ 3. Samtidig må den resterende delen av gruvegangen som har for høyt gulvplan sprenges ut. Det vil øke kostnadene en del, kanskje så mye at det kan være bedre å gå for alternativ 2, avhengig av behovet til Norcem naturligvis.

Alternativ 2 har en ganske høy kostnad, å bruke 100 millioner kroner er en betydelig investering. Det vil sannsynligvis være mer fornuftig å starte med alternativ 3 som et slags pilotprosjekt slik at det kan vurderes om det er en god løsning. Det finnes flere gruveganger i gruen som kan ha potensiale for lagring av CO₂. Det drives også dypere ned i gruen, et bergrom som ligger dypere vil ha et høyere trykk som omslutter gruen. Problemet med dette vil være i forbindelse med videre drift i gruen, men det kan være verdt å undersøke muligheten.

Lagring i gruvegang er mest sannsynlig eneste måte det vil fungere for Norcem. Dette vil være avhengig av mengden CO₂ som fanges fra sementproduksjon, hvis det er snakk om en liten andel av utslippene deres kan det gå med ståltanker. Men siden CO₂-utslippene er på ca. 762.000 tonn i året er det ikke mulig å dekke volumbehovet med ståltanker selv

for en litt mindre andel. De er dyre, de tar mye plass og de vil ikke klare å lagre nok. En stor ståltank rommer kanskje 500 m^3 , mens det minste alternativet i denne oppgaven kan ta rundt 100.000 m^3 . Ut i fra trykk og temperatur satt i denne oppgaven utgjør 100.000 m^3 det samme som 110.000 tonn CO_2 . Dette er nesten 2 måneder med CO_2 -utslipp for Norcem.

Konklusjon

Selv om det hadde vært ideelt å kunne benytte en nedlagt gruve som et permanent lager er det lite realistisk. Derimot er det et svært godt alternativ for midlertidig lagring før det transporteres videre til et permanent lager (offshore i gamle reservoarer eller lignende). Et midlertidig lager kan være et viktig knutepunkt for mange bedrifter eller en sentral løsning for en bedrift som har litt høye CO₂-utslipp. Med de årlige CO₂-utslippene til Norcem er det ikke realistisk å kunne se på noen av disse alternativene som noe annet enn et midlertidig lager hvis de skulle klare å fange en del av utslippet. Med en kostnad på mellom 190 og 350 kr/m³ lagringsvolum er det forsvarlig fremfor bruk av ståltanker som også tar mye plass i overflaten.

Effekten som frysingen har på bergsikringen og bergmasse kan gi en betydelig levetid. Nedfrysingen vil beskytte mot vannet og mest sannsynlig også CO₂ sin potensielle virkning. Den minste levetiden til et slikt bergrom vil være 40 år, men så lenge bergrommet er nedfrost vil det være stabilt. Kostnadene knyttet til et slikt prosjekt er ganske høye, men alternativ 3 gir lavest totale kostnader. Det alternativet som gir mest for pengene er alternativ 1, men her finnes problemer knyttet til høydeforskjell for bunnen gjennom gruvegangen. Alternativ 2 har en langt høyere kostnad og trolig et langt større volum enn hva som kreves for et midlertidig lager. Hvilket valg som passer best bestemmes av de forutsetninger man har, hvor mye CO₂ blir fanget, hvor lang tid skal det lagres før videre transport etc. Det

mest realistiske alternativet er nok kanskje alternativ 3 på bakgrunn av lave total kostnader og moderat lagringskapasitet.

Lagring av CO₂ i dedikerte bergrom er en løsning som virker å kunne være realistisk å utføre ved Dalen gruve i fremtiden, men dette er avhengig av andre faktorer også. Spesielt er det viktig at fangst-teknologi prosjektet som foregår der i dag viser gode resultater og samtidig har en kostnadsramme som gjør det forsvarlig å benytte. I tillegg er man avhengig av et fungerende transport system for CO₂ ut til permanente lager offshore. Generelt for fangst og lagring av CO₂ er man avhengig av et kvotesystem for CO₂ som gjør det lønnsomt for bedrifter å kutte utslipp, fange utslipp og lagre de.

Bibliografi

Aasen, O., Ronæss, E., Woldmo, O., 2007. Application of concrete plugs in the oil and gas industry. NFFs Publikasjon nr. 16 Underground Constructions for the Norwegian oil and gas industry.

Andersson, H., 2005. Injeksjon - erfaringer fra jong - askertunnelene. Teknologirapport nr. 2424.

Arnesen, F., 2014a. Epost.

Arnesen, F., 2014b. Epost-kommunikasjon 3/6-14.

Arnesen, F., 2014c. Samtale.

Bergh-Christensen, J., 1989. High pressure concrete plugs for hydropower projects - review of design and operational experiences in norway.

Brastad, O., Februar 2013. Norcems gruver kan bli nasjonal miljøløsning. Varden 19. februar 2013.

Brattli, B., 2009. Fysisk og kjemisk hydrogeologi.

Brekke, E., 2002. Termisk responstesting. Prosjektoppgave.

Broch, E., 1999. Sharing experience with concrete plugs in high-pressure tunnels.

Dahle, H., 2005. Bergspenningsmålinger ved dalen kalksteingruve norcem, brevik.

-
- DSB, 1994. Veiledning om oppbevaring av brannfarlig væske i stasjonære lagertanker.
- Dugstad, A., 2006. Fundamental aspects of CO₂ metal loss corrosion part i: Mechanism. CORROSION NACEexpo 2006.
- Graarud, E., Drevland, F., Torp, O., Øvstedal, E., Saxebøl, G., Enersen, G., 2011. Anslagsmetoden. Håndbok 217.
- Grøv, E., Ronæss, E., 2003. Report on third partys review of scanraff lpg-storage.
- Hoek, E., Brown, E. T., 1980. Underground excavation in rock, 527.
- Høvsøien, N., 1989. Crude oil caverns at mongstad, norway. NFFs Publikasjon nr. 9 Underground Storage.
- Jondahl, I. V., 2014a. Epost-kommunikasjon 15/5-14.
- Jondahl, I. V., 2014b. Samtale ved befaring 255.03.14.
- Lu, M., 2007. Thermal behaviour of rock in relation to underground gas storage.
- Luna, M., Arcos, D., Enviros, L. D., 2006. Effects of grouting, shotcreting and concrete leachates on backfill geochemistry.
- Midtlien, N. O., 1989. Design of crude oil storage in rock caverns at sture, norway. NFFs Publikasjon nr. 9 Underground Storage.
- Midtlien, N. O., 2007. Cavern storage excavation - sture. Publikasjon 16 av NFF.
- Midttømme, K., Hilmo, B. O., Skarphagen, H., Nissen, A., 2000. Kartlegging av energipotensialet i berggrunnen på kartblad bekkestua, bærum kommune. varmeledningsevne til bergarter.
- Moran, M. J., N, H., Shapiro, Boettner, D. D., Bailey, M. B., 2011. Principles of engineering thermodynamics, 7th edition.
- MTI, 2008. Temperature and corrosion rate.... more complex than you think.
- NFF, 2011. Post-excavation grouting. NFFs Publikasjon nr. 20 Rock Mass Grouting in Norwegian Tunneling.

-
- NGI, 2013. Using the q-system - rock mass classification and support design.
- Nilsen, B., 2009. Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg.
- Nilsen, B., Broch, E., 1999. Ingeniørgeologi gk kompendium.
- Nilsen, B., Lindstrøm, M., Mathiesen, T. K., Holmøy, K. H., Olsson, R., Palmstrøm, A., 2011. Veilder for bruk av eurokode 7 til bergteknisk prosjektering.
- Nilsen, B., Myrvang, A., 2010. Vurdering av bergteknisk sikkerhet av driften ved norcem dalen gruve.
- Norcem, 2014. Presentasjon av virksomheten i norcem brevik.
- NRMCA, 2008. Concrete co2 fact sheet.
- Nyborg, R., 2009. Pipeline corrosion prevention by ph stabilization or corrosion inhibitors. Rio Pipeline Conference and Exposition 2009.
- Nyborg, R., Dugstad, A., 2002. Flow assurance of wet gas pipelines from a corrosion viewpoint. 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
- Ramberg, I. B., 2007. Landet blir til Norges geologi. Norsk Geologisk Forening.
- Ronæss, E., 2007a. Caverns, operational experience. Publikasjon 16 av NFF.
- Ronæss, E., 2007b. Co2 videre behandling etter fangst og rensing fra naturkrafts gasskraftverk på kårstø, mulig bruk av haugland næringspark.
- Sellens, R., 1996. Economical pipe sizes.
- SSB, 2014. Utslipp av klimagasser, 2013, foreløpige tall.
- Zumdahl, S., 2007. Chemical principles. 6th Edition.

GRUNNLAG: *ISRM Suggested Method for Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials*

Oppdragsgiver: Norcem Brevik A/S Dato: 02.06.05
Prosjektnummer: 50253600
Saksbehandler i lab: Trond

Bergart: Kalkstein
Prøvemerkning: Hull nr 1
Kjernediameter: 61,0 mm
Belastningsretning: Uspesifisert
Vanninnhold: Uspesifisert

Kjerne nr.	Trykkfasthet [MPa]	Bruddvinkel
1-1	105,9	20
1-2	83,8	22
1-3	97,8	22
1-7	173,2	20
1-8	147,6	20
1-9	176,3	18
1-10	81,5	20
1-11	153,4	21
1-12	62,1	20
1-13	168,1	21
Gjennomsnitt:	125,0	20
Standardavvik:	43,18	1,2

SINTEF Teknologi og samfunn
Berg og geoteknikk

GRUNNLAG: ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity

Oppdragsgiver: Norcem Brevik A/S Dato: 02.06.05
Prosjektnummer: 50253600
Saksbehandler i lab: Trond

Bergart: Kalkstein
Prøvemerkning: Hull nr 1
Kjerner diameter: 61,0 mm
Belastningsretning: Uspesifisert
Vanninnhold: Vanntettet

Kjerne nr.	Romvekt [kg/m ³]	Lyd hastighet [m/s]
1-1	2744	6208
1-2	2737	5741
1-3	2765	5913
1-7	2898	6000
1-8	2874	6008
1-9	2860	5792
1-10	2776	6100
1-11	2837	5355
1-12	2809	5742
1-13	2827	6025
Gjennomsnitt:	2813	5888
Standardavvik:	55,9	242,5

Vedlegg B

Resultater fra mineralogisk test av bergart i Dalen gruve.

Average:	Period 2013-01-01 to 2013-12-31																
Series:	jb	Stein Gruve															
Process:																	
Tags	xcao	xso2	xai2o3	xfe2o3	xna2o	xk2o	xmgo	zalk	lso3	xkm	fdato	xso3	fd	toi	komment	toi	
Count	239	239	239	239	239	239	239	239	239	239	0	0	239	239	231	0	0
Standarddeviation	11.77	8.57	1.94	1.33	0.25	0.50	0.98	0.51	0.28				0.53	0.07	5.04		
Average	80.90	12.91	2.44	1.56	0.31	0.57	2.15	0.69	0.51				0.64	0.54	37.57		
Variance	138.42	73.53	3.75	1.77	0.06	0.25	0.97	0.26	0.08				0.28	0.00	25.44		
Range	87.24	64.65	15.18	10.87	1.76	4.72	10.29	3.42	1.55	0.00	0.00	3.42	0.34	53.97	0.00	0.00	
Min	9.16	0.54	0.28	0.21	0.03	0.06	0.47	0.07	0.04	0.00	0.00	-0.17	0.30	4.53	0.00	0.00	
Max	96.40	65.19	15.46	11.08	1.79	4.78	10.75	3.49	1.59	0.00	0.00	3.25	0.64	58.40	0.00	0.00	
JB-00220-2013.08.15.14:15	79.47	11.80	3.06	2.16	0.29	0.62	2.41	0.70	0.31		15.08.13		0.25	14.15	38.63	P138-490S	
JB-00221-2013.08.15.14:16	88.16	5.77	1.28	0.75	0.18	0.30	1.93	0.38	0.39		15.08.13		0.40	14.16	41.24	154-490	
JB-00222-2013.08.15.14:17	82.78	10.73	2.33	1.19	0.26	0.65	2.13	0.69	0.58		15.08.13		0.67	14.17	38.43	154-500	
JB-00223-2013.08.15.14:18	66.76	21.92	3.36	2.01	0.27	1.04	4.16	0.95	0.30		15.08.13		0.31	14.18	34.87	328-N	
JB-00224-2013.08.15.14:20	85.96	7.64	1.64	0.98	0.22	0.45	1.95	0.51	0.38		15.08.13		0.54	14.20	40.10	P138-490	
JB-00225-2013.08.15.14:21	78.87	12.18	3.00	1.92	0.45	0.60	2.74	0.84	0.53		15.08.13		0.84	14.21	37.80	P138-49V	
JB-00226-2013.08.16.12:35	82.75	13.77	2.06	1.34	0.28	0.48	2.02	0.60	0.64		16.08.13		0.83	12.35	36.47	240-83 Ø	
JB-00227-2013.08.16.12:37	87.82	6.13	1.31	1.10	0.16	0.37	1.85	0.40	0.52		16.08.13		0.78	12.37	40.81	240-83V	
JB-00228-2013.08.16.12:38	81.47	13.10	2.87	1.45	0.34	0.67	1.96	0.78	0.32		16.08.13		0.30	12.38	37.42	Brevik-synk	
JB-00229-2013.08.20.13:36	83.83	10.88	1.59	1.08	0.21	0.45	1.95	0.50	0.50		20.08.13		0.56	13.36	38.54	245-VN	
JB-00230-2013.08.20.13:39	86.38	9.08	1.55	1.02	0.11	0.45	1.23	0.40	0.24		20.08.13		0.05	13.39	40.28	245-N	
JB-00231-2013.08.21.12:59	88.03	7.51	1.24	0.61	0.14	0.31	1.60	0.34	0.18		21.08.13		-0.03	12.59	40.85	263-95VS	
JB-00232-2013.08.23.13:42	83.06	12.20	3.03	0.61	0.24	0.39	1.64	0.50	0.19		23.08.13		-0.04	13.42	38.62	294-N	
JB-00233-2013.08.23.13:43	91.70	4.74	0.85	0.74	0.10	0.25	2.08	0.27	0.36		23.08.13		0.29	13.43	41.79	154-490	
JB-00234-2013.08.23.13:44	82.46	12.96	2.33	1.26	0.24	0.71	2.06	0.71	0.41		23.08.13		0.56	13.44	38.74	154-500	
JB-00235-2013.08.26.13:59	82.17	11.32	2.49	1.29	0.35	0.44	2.37	0.64	0.58		26.08.13		0.65	13.59	38.31	P 138-490	
JB-00236-2013.08.26.14:01	86.59	7.48	1.51	1.40	0.21	0.37	1.98	0.46	0.67		26.08.13		0.79	14.01	39.63	P 138-40 V Ø	
JB-00237-2013.08.26.14:02	78.33	12.47	3.06	1.93	0.45	0.55	3.08	0.80	0.57		26.08.13		0.73	14.02	37.62	P 138-49 ØS	
JB-00238-2013.09.02.13:25	89.56	6.36	1.05	0.60	0.11	0.27	1.03	0.29	0.13		02.09.13		-0.07	13.25	41.66	245-N	
JB-00239-2013.09.02.13:27	84.87	9.66	1.74	1.09	0.09	0.31	2.14	0.30	0.32		02.09.13		0.44	13.27	39.48	240-830	

Vedlegg C

Feltskjema for Q-metoden som ble benyttet under befaring.

RQD (Rock quality designation, %)		J_n (Joint set number)	
Very poor	0 - 25	Massive, no or few joints	0.5 - 1
Poor	25 - 50	One joint set	2
Fair	50 - 75	One joint set + random joints	3
Good	75 - 90	Two joint sets	4
Excellent	90 - 100	Two joint sets + random	6
<i>Notes:</i>		Three joint sets	9
(i) where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q.		Three joint sets + random	12
(ii) RQD intervals of 5 i.e. 100, 95, 90 etc., are successfully accurate.		Four or more joint sets, heavily jointed, sugar cube etc	15
		Crushed rock, earthlike	20
		<i>Note:</i> For tunnel intersections, use (3 x J _n) and for portals use (2 x J _n)	
J_r (Joint roughness number)			
<i>(a) Rock wall contact</i>		<i>(b) Rock wall contact before 10 cm shear</i>	
Discontinuous joints	4	Rough or irregular, undulating	1.5
Rough or irregular, undulating	3	Smooth, undulating	1
Smooth, undulating	2	Slickensided, undulating	0.5
Slickensided, undulating	1.5		
<i>© No rock wall contact when sheared</i>			
Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact			1
Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact			1
<i>Notes:</i> (i) Description refers to small-scale features and intermediate scale features, in that order (ii) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m. (iii) J _r = 0.5 can be used for planner, slickenside joints having lineations, provided these are oriented for minimum strength. (iv) J _r and J _a classification is applied to the joint set that is least favorable for stability both from the point of view of orientation and shear resistance, $\tau \approx \sigma_n \cdot \tan^{-1} (J_r/J_a)$			
J_a (Joint alteration number)			
<i>(a) Rock wall contact (no mineral fillings, only coatings)</i>		<i>φ_r (appr.)</i>	J_a
Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling i.e., quartz/epidote		-	0.75
Unaltered joint walls, surface staining only		25 - 35	1
Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay free disintegrated rock etc.		25 - 30	2
Silty or sandy clay coatings, small clay fractions (non-softening)		20 - 25	3
Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talk, gypsum, graphite etc., and small quantities of swelling clay		8 - 16	4
<i>(b) Rock wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)</i>			
Sandy particles, clay free disintegrated rock etc.		25 - 30	4
Strongly over-consolidated non-softening clay mineral fillings (continuous, but < 5mm thickness)		16 - 24	6

Medium or low over-consolidated non-softening clay mineral fillings (continuous, but < 5mm thickness)	12 - 16	8
Swelling clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, but < 5mm thick)	6 - 12	8 - 12
<i>(c) No rock wall contact when sheared (thick mineral fillings)</i>		
Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay	6 - 24	6, 8 - 12
Zones or bands of silty or sandy clay, small clay fraction (non-softening)	-	5
Thick, continuous zones or bands of clay	6 - 24	13 - 20

J_w (Joint water reduction factor)	Approx. P (bars)	J_w
Dry excavations or minor inflow, i.e., < 5 l/min locally	< 1	1
Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	1 - 2.5	0.66
Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	2.5 - 10	0.5
Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	2.5 - 10	0.33
Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	> 10	0.2 - 0.1
Exceptionally high inflow or pressure continuing without noticeable decay with time	> 10	0.2 - 0.1

Notes: (i) The last four factors are crude estimates. Increase J_w if drainage measures are installed. (ii) Special problems caused by ice formation are not considered. (iii) For general characterization of rock masses distance from excavation influences. The use of $J_w = 1, 0.66, 0.5, 0.33$, etc. as depth increases from say 0-5, 5-25, 25-250 to >250m is recommended, assuming that RQD/J_w is low enough (0.5-25) for good hydraulic connectivity.

SRF (Stress Reduction Factor)

<i>(a) Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass</i>	SRF
Multiple occurrence of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock at any depth	10
Single weakness zone containing clay or chemically disintegrated rock (depth ≤ 50 m)	5
Single weakness zone containing clay or chemically disintegrated rock (depth > 50m)	2.5
Multiple shear zones in competent rocks (clay free), loose surrounding rock at any depth	7.5
Single shear zone in competent rocks (clay free), (depth of excavation ≤ 50 m)	5
Single shear zone in competent rocks (clay free), (depth of excavation > 50m)	2.5
Loose, open joints, heavily jointed or sugar cube etc. at any depth	5

Note: Reduce these values of SRF by 25 - 50 % if the relevant shear zones only influence but do not intersect the excavation.

<i>(b) Competent rock, rock stress problems</i>	σ_c / σ_1	σ_1 / σ_c	SRF
Low stress, near surface, open joints	> 200	< 0.01	2.5
Medium stress, favorable stress condition	200 - 10	0.01 - 0.3	1
High stress, very tight structures. Usually favorable to stability, may be unfavorable for wall stability	10 - 5	0.3 - 0.4	0.5 - 2
Moderate slabbing after > 1 hour in massive rock	5 - 3	0.5 - 0.65	5 - 50
Slabbing and rock burst after a few minutes of excavation	3 - 2	0.65 - 1	50 - 200
Heavy rock burst and immediate dynamic deformations	< 2	> 1	200 - 400

Notes: (i) For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$ and when $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$. (ii) For general characterization of rock mass, overburden from excavation influences. The use of SRF 5, 2.5, 1 and 0.5 is recommended as depth increases from say 0-5, 5-25, 25-250 to > 250m respectively.

<i>© Squeezing rock: plastic flow of incompetent rock under the influence of high rock pressure</i>	σ_1 / σ_c	SRF
Mild squeezing rock pressure	1 - 5	5 - 10
Heavy squeezing rock pressure	> 5	10 - 20
<i>(d) Swelling rock: chemical swelling activity depending on pressure of water</i>	SRF	
Mild swelling rock pressure	5 - 10	
Heavy swelling rock pressure	10 - 15	