

# **En livsløpsanalyse av smådimensjon TBM**

A life cycle assessment of small dimensions TBM

**Trondheim mai 2023**

Ole Vasslid  
Ylva Danielsen

Intern veileder:  
Amund Bruland

Ekstern veileder:  
Sindre Log

Prosjektnr:  
2023 -29

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk

---

Rapporten er ÅPEN

## **Problemdefinering, prosjektbeskrivelse og resultatmål**

Prosjektets mål er å lage en modell som kan brukes til å estimere forventet utslipp ved boring i ulike bergtyper med smådimensjons tunnelboremaskiner (TBM). Denne modellen skal brukes til å gjennomføre en livsløpsanalyse av smådimensjons TBM. Prosjektet tar for seg materialforbruk, inkludert sikrings-, maskin- og kutterforbruk, transport av sikringsmateriale og persontransport til og fra anlegget. Dataene som benyttes i denne oppgaven blir laget ut fra prognosemodeller med data som hentes ut fra anleggsprogrammet Fullprof.

Livsløpsanalysen er begrenset til boringen av 1 m ferdigboret tunnel, og tar utelukkende hensyn til prosessene som gjennomføres inne i tunnelen.

Stikkord fra prosjektet:

- LCA
- TBM
- $CO_2$ -utslipp

---

## Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet for Institutt for bygg- og miljøteknikk (IBM) ved Norges tekniske og naturvitenskapelige universitet (NTNU). Formålet med denne oppgaven er å sammenligne  $CO_2$ -utslipp for ulike teoretiske tunneler boret med tunnelboremaskin (TBM) i størrelsene 1,8 m til 3,5 m i diameter. Dataene brukt for å lage prognosemodellene er hentet fra anleggsprogrammet Fullprof.

Oppgaven er utført hos institutt for bygg- og miljøteknikk våren 2023, med professor Amund Bruland som hovedveileder og Sindre Log fra SINTEF som ekstern veileder.

Vi synes det har vært spennende og lærerikt å få fordype oss i smådimensjons TBMer. Det finnes ikke mye data eller beregningsmodeller som passer for TBMer i denne størrelsen. Vi håper at modellen vi lager kan være et godt utgangspunkt for å videreutvikle kompetansen og kunnskapen for dette området. Det har vært en utfordrende prosess å anskaffe nødvendig data og avgrense oppgaven på en hensiktsmessig måte. Vi er overbevist om at denne oppgaven kan være et godt utgangspunkt for noe som vil komme til nytte i bransjen og evt. videre forskning innen området.

---

## Sammendrag

Energibehovet i verden er stadig økende, og det er noe vi i Norge må forholde oss til. I Norge er vi opptatte av å bevare naturen og det skal tas hensyn til i forbindelse med byggeprosjekter. Dette skaper utfordringer for videre utbygging og for norsk vannkraftindustri. En løsning på dette problemet er tunnelboremaskiner. Å bruke tunnelboremaskiner til å lage vanntunneler er både effektivt og lite inngripende i naturen, da inngrepet er begrenset til inn- og utløp. Lite påvirkning av naturen er viktig, men det å se på  $CO_2$ -utslippene til et slikt prosjekt er også en viktig faktor for miljøpåvirkningen.

I denne oppgaven har det blitt gjennomført en livsløpsanalyse av boreprosessen til en vannkraftsvertunnel. Det har blitt sett på hvordan ulike tunneldimensjoner, bergmasser, utslipp knyttet til transport av ansatte og sikringsforbruk påvirker  $CO_2$ -utslippene tilknyttet tunnelen. Alle de ulike faktorene har blitt beregnet hver for seg, blitt sammenlignet med hverandre før de ble satt sammen til et samlet utslipp.

Resultatene fra de ulike tverrsnittene og bergmassene blir satt sammen til samlede utslipp. Det samlede utslippet har blitt sammenlignet med et eksisterende, ferdigstilt prosjekt, Mork kraftverk, som har blitt boret med en liten TBM.

---

## Abstract

The world's energy demand is continuously increasing, and that is something we as Norwegians has to relate to as well. In Norway, we are concerned with great protection of nature against construction work. This presents challenges for the Norwegian hydropower industry. One solution to this problem is tunnel boring machines (TBMs). Using TBMs to create water tunnels is both efficient and minimally impact of the nature, with the intervention limited to the inlet and outlet areas. Minimizing the impact on nature is crucial and to consider the  $CO_2$  emissions of such a project is also an important factor in assessing its environmental impact.

Therefore, a life cycle assessment of the drilling process for a hydropower tunnel has been conducted. It has been studied how different factors such as tunnel dimensions, rock types, emissions associated with employee transportation, and consumption of support materials were examined to assess their impact on  $CO_2$  emissions related to the tunnel. Each of these factors was calculated separately and compared against each other before being combined to determine the overall emissions.

The results obtained from different cross sections and rock masses were collected to determine the overall emissions. These overall emissions were then compared to an existing completed project, Mork hydroelectric power plant, which was drilled with a small dimension TBM.

---

# Innhold

<b>Prosjektbeskrivelse, prosjektbeskrivelse og resultatmål</b>	<b>i</b>
<b>Forord</b>	<b>ii</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Begrepsforklaring</b>	<b>xi</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Formål . . . . .	1
1.3 Problemdefinering . . . . .	2
1.4 Avgrensning . . . . .	2
<b>2 Teori</b>	<b>4</b>
2.1 Vannkraft i Norge . . . . .	4
2.2 LCA . . . . .	4
2.3 Påvirkning av naturen . . . . .	5
2.4 Tunnelboremaskiner . . . . .	6
2.5 Mork Kraftverk . . . . .	8
2.6 Hardt fjell . . . . .	9
2.7 NTNU-modellen . . . . .	10
2.8 TBM-parametre . . . . .	10
<b>3 Metode</b>	<b>15</b>
3.1 Litteraturstudie . . . . .	15
3.2 Datainnsamling . . . . .	15
3.3 Analysemodell . . . . .	17

---

<b>4 Resultat</b>	<b>23</b>
4.1 Inntrengingshastighet . . . . .	23
4.2 Estimering av kutterlevetid . . . . .	26
4.3 Kutterforbruk . . . . .	28
4.4 Utslipp stål . . . . .	29
4.5 Sikring . . . . .	31
4.6 Utslipp ansatte . . . . .	32
4.7 Samlet $CO_2$ -utslipp . . . . .	34
<b>5 Diskusjon</b>	<b>35</b>
5.1 Prognosemodellene . . . . .	35
5.2 Påvirkningen av geologiske parametre . . . . .	39
5.3 Sikring . . . . .	39
5.4 Ansatttransport . . . . .	40
5.5 Tunnellengde . . . . .	41
5.6 Samlet $CO_2$ -utslipp . . . . .	42
5.7 Sammenligning med Mork Kraftverk . . . . .	43
5.8 Feilkilder . . . . .	44
<b>6 Konklusjon</b>	<b>45</b>
<b>7 Videre arbeid</b>	<b>46</b>
7.1 Videre arbeid med prognosemodeller . . . . .	46
<b>Referanser</b>	<b>47</b>
<b>Appendix</b>	<b>49</b>
A Excelark: DRI 30, CLI 5 . . . . .	49
B Excelark: DRI 50, CLI 12 . . . . .	50
C Excelark: DRI 70, CLI 25 . . . . .	51

---

D	Excelark: Total byggetid tunneltid . . . . .	52
E	Excelark: Stk. Forbruk . . . . .	53
F	Excelark: Materialmengde . . . . .	54
G	Excelark: CO2 Utslipp . . . . .	55
H	Excelark: Utslipp Tunnel . . . . .	56
I	Excelark: Utslipp Sikring . . . . .	57
J	Excelark: Utslipp Ansatte . . . . .	58
K	Excelark: Samlet Utslipp . . . . .	59
L	Q-systemet . . . . .	60



---

## Figurliste

1	<i>Kaksformasjon av en kutter(NTH 1983)</i> . . . . .	5
2	<i>Grafisk modell av en åpen TBM(Herrenknecht 2023)</i> . . . . .	7
3	<i>Grafisk modell av en enkeltkjold-TBM(øverst)(Robbins 2023a), og en dobbeltkjold-TBM med skjolda ute(nederst). (Ghella 2023)</i> . . . . .	8
4	<i>Grafisk fremstilling av gjennomsnittlig matekraft per kutter (Macias 2016)</i> . . . . .	12
5	<i>Grafisk fremstilling av borhodets rpm (Macias 2016)</i> . . . . .	12
6	<i>Gjennomsnittlig sporavstand (Bruland 2016)</i> . . . . .	13
7	<i>Grafisk fremstilling av antall kuttere(Macias 2016)</i> . . . . .	13
8	<i>Grafisk fremstilling av installert effekt(Bruland 2016)</i> . . . . .	14
9	<i>Prognosemodell for å finne maskinvekt, ved å se på sammenhengen mellom diameter og maskinvekt</i> . . . . .	19
10	<i>Prognosemodell utslipp per m boltelengde</i> . . . . .	21
11	<i>Prognosemodell av midlere netto inndrift DRI 70, CLI 25</i> . . . . .	23
12	<i>Prognosemodell av ukesinndrift DRI 70, CLI 25</i> . . . . .	24
13	<i>Prognosemodell av total byggetid 3 km tunnel DRI 70, CLI 25</i> . . . . .	25
14	<i>Prognosemodell av total byggetid 10 km tunnel DRI 30, CLI 5</i> . . . . .	25
15	<i>Prognosemodell av levetid kutterring DRI 70, CLI 25</i> . . . . .	26
16	<i>Prognosemodell av levetid hub DRI 70, CLI 25</i> . . . . .	27
17	<i>Prognosemodell av levetid lager DRI 70, CLI 25</i> . . . . .	28
18	<i>Levetid kuttere</i> . . . . .	36
19	<i>Midlere netto inndrift</i> . . . . .	37
20	<i>Ukesinndrift</i> . . . . .	38
21	<i>Sikringsutslipp for middels bergmassekvalitet for hver TBM-type</i> . . . . .	40
22	<i>Gjennomsnittlig utslipp hver TBM-type i middels bergmassekvalitet</i> . . . . .	41
23	<i>Utslipp TBM A</i> . . . . .	42

---

24	<i>Sammenligning mellom utslippet fra Mork Kraftverks 51 boring, versus TBM C med 3 km tunnallengde og middels bergmassekvalitet. . . . .</i>	43
25	<i>Sammenligning av samlet utslipp med TBM og bergmasse. . . . .</i>	45

---

## Tabelliste

1	<i>Sammenligning av ruhet i fullprofilboret og sprengt tunnel (Bruland 2016)</i> . . . . .	6
2	<i>Utslippstall fra vanntunnelen i Mork kraftverk, der TBM med tverrsnitt på 6,15 m<sup>2</sup> er brukt. (Standal et al. 2021)</i> . . . . .	9
3	<i>NTNU-modell parametre (Macias 2016)</i> . . . . .	10
4	<i>Geologiske parametre for tilfellene hardt, middels og mykt fjell</i> . . . . .	16
5	<i>Utvalg av nordiske TBM-er og oppgitt vekt (Hardangermaskin 2023) (ES-Posten 2020) (Robbins 2023b) (Anlegg&amp;Transport 2023) (MIP 2023) (Braa and Hopland 2017) (TU 2023) (Bane-Nor 2023)</i> . . . . .	19
6	<i>Konsekvenstabell for sikringsgrader til hver TBM og bergmassekvalitet</i> . . . . .	20
7	<i>Kutterringforbruk TBM ø 1,8 m</i> . . . . .	29
8	<i>Kutterringforbruk TBM ø 3,5 m</i> . . . . .	29
9	<i>Samlet CO<sub>2</sub> utslipp stål TBM A</i> . . . . .	30
10	<i>Utslipp stål CO<sub>2</sub>/m TBM A</i> . . . . .	30
11	<i>CO<sub>2</sub> utslipp stål TBM D</i> . . . . .	30
12	<i>CO<sub>2</sub> utslipp stål/m TBM D</i> . . . . .	31
13	<i>Utslipp fra sikring per meter tunnel, for hver bergmasse og TBM dimensjon</i> . . . . .	32
14	<i>Utslipp fra ansatte i TMB A, for hver tunnellengde og hver geologisk tilfelle</i> . . . . .	32
15	<i>Utslipp fra ansatte i TMB B, for hver tunnellengde og hver geologisk tilfelle</i> . . . . .	32
16	<i>Utslipp fra ansatte i TMB C, for hver tunnellengde og hver geologisk tilfelle</i> . . . . .	33
17	<i>Utslipp fra ansatte i TMB D, for hver tunnellengde og hver geologisk tilfelle</i> . . . . .	33
18	<i>Samlet utslipp for alle utslippsfaktorer, oppgitt i kgCO<sub>2</sub>/m</i> . . . . .	34

---

## Begrepsforklaring

TBM	Tunnelboremaskin, maskiner som brukes til å bore fullprofilstunneler
LCA	Livsløpsanalyse, en analyse og beregning av miljøbelastningen til et produkt/ en prosess
DRI	Drilling rate index, borbarheten i fjell, en verdi som sier noe om hvor lett eller vanskelig det er å bore i fjellet
CLI	Cutter life index, kutterlivindeks, en verdi som forteller hvor mye fjellet sliter på kuttere ved boring.
Konvensjonell drift	Boring og sprengning av tunnel, den mest brukte metoden for driving av tunnel
Fullprofilboring	Boring av tunnel med TBM
Stuff	Den innerste veggen, fronten, i en tunnel ved driving
Borekaks	Den knuste steinmassen som blir produsert av boring i fjell
Stikningsklasse	Beskriver bergets evne til å motstå deformasjon hvor stabilt det oppfører seg under ulike forhold.
I dagen	Utenfor berget

---

# 1 Innledning

I dette kapitlet presenteres bakgrunnen og formålet med oppgaven, samt definerer problemet oppgaven skal belyse.

## 1.1 Bakgrunn

Behovet for å bygge ut mer fornybar energiproduksjon er økende. Med Norges fjellrike natur er det viktig å utnytte den potensielle energien som finnes i naturen viktig. Den norske vannkraftsbransjen har den siste tiden fått et større fokus på å bygge ut flere mindre vannkraftverk for å kunne utnytte energien. For å kunne utvinne energien er man nødt til å lage flere lange, smale tunneler i naturen. Dette gjøres i naturområder som mange mener helst burde få forbli urørt. Ved å bruke TBM til å bore slike tunneler vil det bli mindre inngrep i naturen og prosjektet vil ha lavere  $CO_2$ -utslipp enn med vanlig konvensjonell drift.

Idag blir NTNU-modellen brukt til å estimere forventet levetid for de ulike delene av maskinene, forventet inndrift og kostnad for TBM-prosjekter. Modellen er basert på dimensjoner fra 3 til 12 meter. Ved å se på teoretisk data hentet fra denne modellen kan en lage prognosemodeller for å estimere forbruket for de dimensjonene modellen ikke inkluderer.

Målet med oppgaven er å samle inn nok data til å produsere gode prognosemodeller for inndrift og materialforbruk. Prognosemodellene skal brukes til å beregne  $CO_2$ -utslippet knyttet til teoretiske tunneler. Det langsiktige målet med oppgaven er at modellen kan videreutvikles til å omfatte en større del av prosessen ved tunnelboring, og kan være et hjelpemiddel for  $CO_2$  beregninger i bransjen.

## 1.2 Formål

Formålet med denne oppgaven er å lage en beregningsmodell som kan brukes til å beregne  $CO_2$ -utslipp for 1 meter boret tunnel ved bruk av TBM. Det ble gjort sammenligning av bergtype, inndrift og kutterslitasje for å finne det totale utslipp for 1 m boret tunnel i ulike bergmasser. Oppgaven belyser hvor de store utslippspostene i et slikt prosjekt er. Dette vil være til hjelp for å finne hvilke prosesser som det er størst gevinst i og finne miljøbesparende alternativer til.

For å lage gode prognosemodeller for beregninger er det viktig å innhente nok data. Det er derfor viktig å samle inn mye data om TBMer i ulike dimensjoner og dens egenskaper i ulike bergmasser. Dataene kan så systematiseres og brukes. Parametre som er viktig å ta hensyn til for å kunne beregne utslipp er inndrift, geologi og kutterforbruk.

---

### 1.3 Problemdefinering

Oppgaven tar for seg en livsløpsanalyse av boreprosessen for TBM i diameterene 1,8 m til 3,5 m. I dag finnes det ikke mye generell data på disse maskinene, og det er derfor nødvendig å lage prognosemodeller som kan brukes til å beregne forbruk knyttet til maskinene. Ut fra de beregnede dataene vil forbruket og  $CO_2$ -utslippet for 1 m boret tunnel bli beregnet. Dette har ikke vært mulig tidligere, da beregningsgrunnlaget ikke har vært tilgjengelig for allmenheten.

### 1.4 Avgrensning

Livsløpsanalysen begrenses til å bare ta for seg den første delen som går ut på å identifisere og kvantifisere belastningene på miljøet i boreprosessen.

For å begrense omfanget på oppgaven tar man ikke med det som skjer utenfor tunnelen. Dette betyr at det ikke tas hensyn til nødvendig riggplass eller transport av maskinen. Det antas også at TBMen starter i dagen uten sprengning eller støping ved tunnelporten. De faktorene som inngår er:

- Stålförbruk
- Sikringsförbruk
- Personalförbruk

I tillegg til disse faktorene er det to variabler som påvirker beregningene. Disse variablene er:

- TBM-dimensjonen

For å se på de mindre dimensjonene velges 1,8 m - 2,4 m - 3,0 m - 3,5 m.

1,8 m og 2,4 m er relevante dimensjoner for å søkelyset på små-TBMer. 3,0 m og 3,5 m er gode kontroll-dimensjoner, ettersom det finnes mye data på disse.

- Geologiske faktorer

Fjell er definert som hardt når det har en DRI mellom 20 og 80. For å gjøre modellen mest mulig relevant, og tilpasset de fleste norske bergarter har det blitt valgt en hard, en middels hard og en mykere variant av det harde fjellet, med borbarhet på 30, 50 og 70.

CLI påvirker kutteren sin levetid og er derfor relevant å ta med i beregningene med tanke på kutter- og stålförbruk. For å dekke store deler av de norske bergartene har det blitt valgt kutterlivindekser på 5, 12 og 25.

Kvarts er et svært hardt mineral som påvirker borbarheten. Det er derfor valgt et bredt spekter av kvarts fra 40 %, 20 % til 10 % kvartsinnhold.

Parametrene over begrunnes videre i beregningsdelen av oppgaven.

---

Med disse parametrene vil beregningene gi et bredt spekter med resultater som vil gi et innblikk av hvilke  $CO_2$ -utslipp som er å forvente av aktuelle prosjekter i dagens Norge.

En rekke faktorer er fastsatt i beregningene. Standardiserte og realistiske verdier er valgt for disse faktorene som ikke varierer. I tillegg er regnearket bygget opp på en måte hvor disse faktorene kan endres på et senere tidspunkt. Dette kan bli aktuelt dersom om det blir et tilgjengeligjort bedre datagrunnlag enn som er tilgjengelig under gjennomføringen av denne analysen.

Faktorene som har blitt fastsatt, og ikke kan endres på er, kutterdimensjon på 432 mm og  $CO_2$ -ekvivalenten til stål på 1,4.

---

## 2 Teori

Dette kapitlet vil gi leseren en innføring nødvendig teoretisk kunnskap om temaet i rapporten. Kapitlet tar for seg vannkraft, TBMs funksjonalitet og formål samt NTNU-modellen og dens parametre.

### 2.1 Vannkraft i Norge

Vannkraften har vært og er viktig for Norge. I Norge står vannkraft for 90 % av total strømproduksjon (SSB 2023). I tillegg til å være fornybar, har vannkraft vært tilgjengelig over store deler av landet. Dette har ført til stor utbygging av vannkraftsanlegg de siste 100 årene. Verdens energietterspørsel er stadig økende, og behovet for ny utbygging, og oppgradering av gamle anlegg er derfor fortsatt stor. Utviklingen gjør TBMer til et optimalt verktøy til utbygging av rørgater fra inntak til turbin. Eldre teknikker har basert seg mye på rørgater over bakken og nedgravde rørgater. Rørgater over bakken har kort levetid og bruker mye plass i naturen, mens nedgravde rørgater har store begrensninger på hvor de kan legges. Dette gjør det ønskelig å bygge vannveiene i fjell. Tradisjonell boring og sprengning har vært noe brukt tidligere. Dette medfører imidlertid unødvendig store tværsnitt og mye førings- og sikringsarbeid i ettertid. TBM tar derfor mer og mer over for tradisjonell boring og sprengning. (Statkraft 2023)

Overflaten langs en boret tunnel er som regel glattere og jevnere. Det fører til mindre friksjon og føringsarbeidet blir mindre omfattende. Resultatet er billigere og enklere boreprosesser for vanttunnelene hos kraftstasjonene, i tillegg til mindre utgifter og  $CO_2$ -utslipp tilknyttet sikring og foring. (Statkraft 2023)

### 2.2 LCA

I følge sphaera.com er en livsløpsanalyse (LCA) definert som en systematisk analyse av den potensielle miljømessige påvirkninger av produktet og oppgaven den utfører i løpet av hele dens brukstid. (Sphaera 2023)

En livsløpsanalyse blir ofte referert til som en "vugge-til-grav"-analyse. En LCA er delt og går hovedsaklig ut på å identifisere og kvantifisere belastningene på miljøet. Det inkluderer energi og bruk av råmaterialer og de tilhørende utslipp. Den andre delen av en LCA er å evaluere den potensielle miljømessige påvirkningen av de overnevnte faktorene. Siste delen av analysen handler om minimering av de miljømessige påvirkningene. Denne delen handler om å finne materialer og muligheter som har en mindre negativ påvirkning på miljøet enn den første løsningen. (EEA 2023)

#### 2.2.1 Ressursforbruk

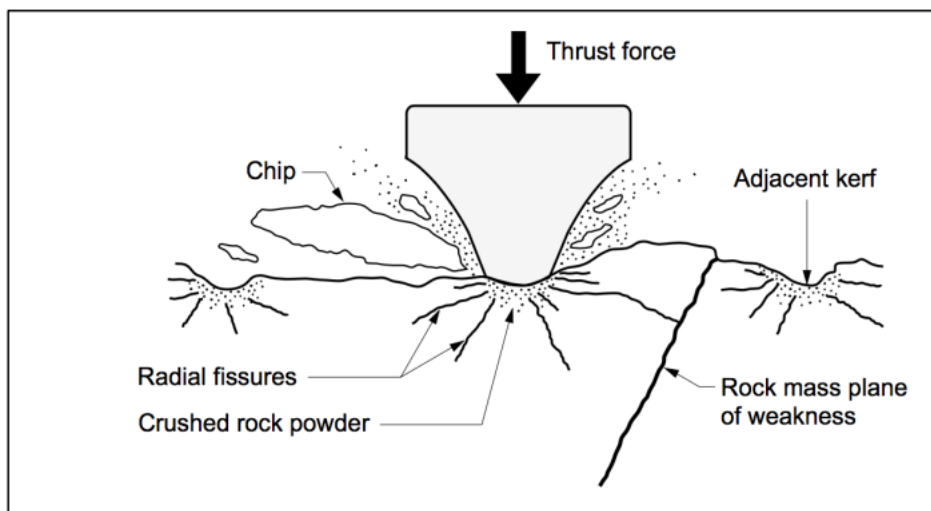
Det å ha et fokus på ressursforbruket i et prosjekt vil spare prosjektet for penger og samt reduksjon av  $CO_2$ -utslippene. Ved å gjennomføre en LCA i prosjekteringsfasen vil det bli et større fokus på ressursforbruket, og tilhørende  $CO_2$ -utslipp.



---

### 2.2.2 Fjellfragmentering

Fragmenteringsprosessen av fjellet er den geologiske faktoren som har størst innvirkning på inntrengingshastigheten og det er derfor en viktig faktor som spiller inn på kostnadene av prosjektet. Blir borkakset knust til større fraksjoner, indikerer det at berget har en god borbarhet. (Macias 2016)



Figur 1: Kaksformasjon av en kutter(NTH 1983)

### 2.3 Påvirkning av naturen

Det at et kraftverk fører til fysiske endringer i naturen er ikke mulig å unngå, men det å minimere disse endringene vil være positivt. Fysiske permanente endringer slik som bygging av kraftverket med dam og inntak, bygging av kraftlinje og etablering av veier og parkeringsplass til kraftverket vil være uunngåelig. I tillegg blir vannstanden i vassdragene som regel lavere av slik utbygging. (energidirektorat 2023)

For å minimere påvirkningen av naturen i ettertid av byggefasen, er boring av vanntunnel med TBM en god løsning. Da blir vannrør flyttet fra å ligge synlig over bakken til å ligge under bakkenivå, samtidig som større deler av naturen vil forbli urørt.

Det er også mulig å drive tunnelene med tradisjonell boring og sprenging, men dette vil også gi store unødvendige påvirkninger av naturen. Ved tradisjonell boring og sprenging vil det sprengte tversnittet bli større enn ved bruk av TBM. Det betyr at det vil bli mer masser som må kjøres ut til et massedeponi. Det vil også være nødvendig med en større riggplass og mer trafikk av maskiner inn og ut av området. Anleggsveiene må være dimensjonert for en høyere trafikk og utgjør derfor en større påvirkning av naturen. (energidirektorat 2023)

---

## 2.4 Tunnelboremaskiner

En tunnelboremaskin er en fullprofil boremaskin til tunnelboring. TBM kan bore i alle typer berg og løsmasser. Maskinen blir produsert på bestilling og tilpasset grunnforholdene for det aktuelle prosjektområdet. Det brukes ulike typer TBMer ut fra hvordan grunnforholdene er. Skal det bores i hardt fjell brukes en type maskin som kalles åpen TBM. I mykt berg, løsmasser eller hardt fjell med store svakhetssoner brukes enkelt- eller dobbeltskjoldsmaskiner. (Balci 2013)

### 2.4.1 Bruk av smådimensjons TBM

I Norge bygges det stadig flere småkraftverk. For å lage vanntunnelene som kreves i kraftverkene har det blitt vanligere å bruke TBM. I Norge finnes det tre smådimensjons TBMer i størrelsene 1,8 m til 3 m i diameter, som i hovedsak borer vanntunneler for små vannkraftverk i hardt fjell.

Bruk av TBM til å bore vannkraftstunneler vil gi noen fordeler. Ved å bruke fullprofilsboring vil tunnelveggene få en lavere ruhet enn ved sprengte vanntunneler. Det blir derfor mulig å utvinne mer energi ut fra samme vannmengde og fallhøyde. Vanntunneler boret med TBM kan dermed være mindre enn sprengte tunneler for å produsere samme mengde energi (Bruland 2016) slik som vist i tabell 1.

Tabell 1: *Sammenligning av ruhet i fullprofilboret og sprengt tunnel (Bruland 2016)*

Tverrsnittsareal	8m <sup>2</sup>
Sprengt tverrsnitt	
Absolutt ruhet, mm	-
Mannings tall	32,8
Boret tverrsnitt, skiftig fjell	
Absolutt ruhet, mm	4,5
Mannings tall	62,7
Boret tverrsnitt, homogent fjell	
Absolutt ruhet, mm	3,0
Mannings tall	65,8

### 2.4.2 Åpen TBM

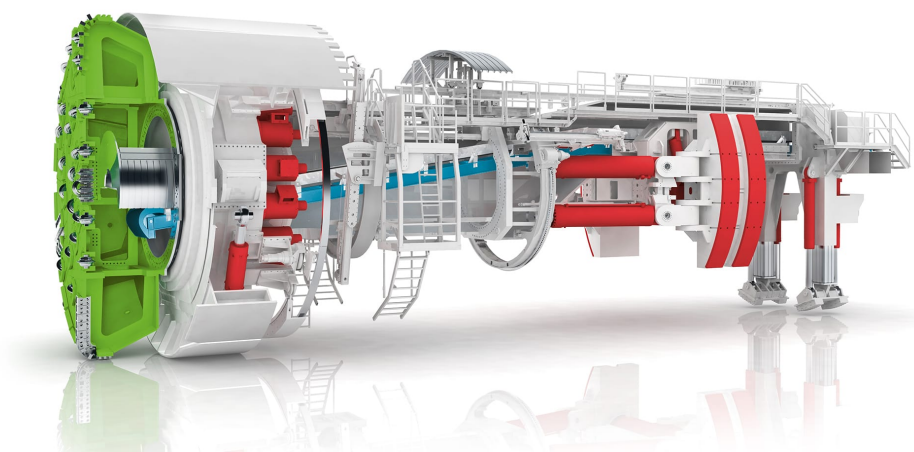
Åpen TBM er den typen som blir brukt i hardt fjell. Norge er kjent for å ha mye hardt og oppsprukket fjell og det er derfor denne typen TBM som er best egnet.

På grunn av stabiliteten i tunnelen er det ikke nødvendig med sikring eller press mot tunnelveggene

---

umiddelbart etter boring for at tunnelveggene skal holde seg oppe. TBMen trenger derfor ikke det beskyttende skjoldet som er satt på skjold-TBMene tiltenkt mykere fjell.

Den åpne TBMen er bygd opp med kuttere som blir dyttet inn mot fjellveggen med et hydraulisk trykk gjennom kutterne som igjen knuser fjellet foran. TBMen dytter seg selv fremover ved hjelp av et gripesystem der TBMen presser plater inn og låser seg mot tunnelveggen som tilater resten av maskinen og utvide seg i lengderetning og presse seg gjennom fjellet med hydraulisk trykk. Når maskinen har strukket seg fult ut stoppes boreprosessen og maskinen trekker seg sammen igjen og begynner med denne syklusen en gang til. (Balci 2013). Se figur 2 viser en slik TBM.



Figur 2: Grafisk modell av en åpen TBM(Herrenknecht 2023)

Borkakset som transporteres ut av tunnelen blir fraktet ut gjennom bakriggen. De vanligste typene bakrigg som blir brukt er transportbånd, skinnedrift og hjuldrift. Hvilken type bakrigg som passer best til de ulike tunnelene blir bestemt ut fra tunnelgeometrien, tunnellengden, stigning og kurveradius. (Log 2022)

### 2.4.3 Skjold-TBM

Både enkelt- og dobbeltskjolds-TBMer brukes som regel i mykt fjell eller løsmasser. Skjold-TBM kan også brukes i hardt fjell hvis det har blitt kartlagt mange og store svakhetssoner. Skjoldet fungerer som en stabiliserende støtte før det har rukket å blitt gjennomført sikringstiltak. Skjold-TBM brukes når fjellet ikke har nok styrke til å stå av seg selv rett etter boring slik som hardt fjell kan. Skjoldet hindrer derfor at tunnelen som bores raser sammen allerede ved stuff.

Enkeltkjolds-TBMer er utstyrt med ét skjold som skal beskytte maskinen og personell mot utrasinger, frem til tunnelveggene er tilstrekkelig sikret. Dobbeltkjolds-TBMer kommer til nytte i større svakhetssoner og gjør det mulig å beskytte maskin og personell samtidig som tunnelen sikres. I motsetning til enkeltkjold, muliggjør dobbeltkjold boring samtidig som det sikres. Dette øker effektiviteten, fredriften og løser derfor

---

problemene knyttet til å bore i større svakhetssoner og løsmasser. (Balci 2013)

På samme måte som med åpen TBM beveger skjold-TBMen seg fremover ved at maskinen strekker seg ut og trekker seg sammen. Kuttere blir også hos skjold-TBM presset inn mot stuff etter maskinen har festet seg ved å presse plater inn mot tunnelveggen. Maskinen skyver seg fremover ved å utvide seg i lengderetning. Maskinen stopper så å bore mens den trekker seg sammen og tar et nytt grep mot tunnelveggen lengre fremme. Denne syklusen fortsetter helt til tunnelen er ferdig. (Balci 2013) Figur 3 viser både enkelt- og dobbeltskjolds-TBM.



Figur 3: Grafisk modell av en enkeltskjold-TBM(øverst)(Robbins 2023a),  
og en dobbeltskjold-TBM med skjolda ute(nederst). (Ghella 2023)

## 2.5 Mork Kraftverk

Hafslund ECO hadde sommeren 2021 praktikanter som jobbet med bærekraft i anleggsprosjekter. Resultatet av dette ble rapporten; "Beregning av klimagassutslipp for anleggsprosjekter med G-res Tool". (Standal et

---

al. 2021) I denne rapporten ble klimagassutslippet etter Mork kraftverk utberegnet. Mork kraftverk er et vannkraftsanlegg i Lærdal Kommune og ble bygget med TBM til inntakstunnelen. Denne tunnelen er 3 km lang, og har et tverrsnitt på  $6,15 \text{ m}^2$ , TBM 1,8 m i diameter. (Standal et al. 2021) I tabell 2, under, viser resultatet av utslippsberegningene bak TBM-utgravingen i Mork.

Tabell 2: *Utslippstall fra vanntunnelen i Mork kraftverk, der TBM med tverrsnitt på  $6,15 \text{ m}^2$  er brukt. (Standal et al. 2021)*

Mengde utgravde masser	32 000 $\text{m}^2$
Utslipp graving/ boring av masser	20 000 kg $\text{CO}_2\text{e}$
Deponering av masser	28 132 kg $\text{CO}_2\text{e}$
Sum utslipp	48 132 kg $\text{CO}_2\text{e}$
Utslipp pr m	16,04 kg $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}$

Dette utslippet er meget lavt. Dette skyldes kort vei til deponi, samt TBM-en som brukes driftes på strøm. (Standal et al. 2021)

For å beregne det totale utslippet bak vanntunnelen pr. m, må en også inkludere materialbruken som går med til sikring og forbruk av kuttere samt maskinen.

## 2.6 Hardt fjell

Norske bergarter beskrives som hardt fjell. Hardt fjell beskrives internasjonalt som fjell som er krevende å bore, spreng og laste. Dette på grunn av de gode slitasje - og fasthetsegenskapene. Hardt fjell kategoriseres til å ha en DRI mellom 20 og 80, en kompresjonsstyrke fra 350 MPa til 25 MPa og en porøsitet under 10 %. Hardt fjell er likevel bra å drive tunneler i, grunnet høy stabilitet, og lite behov for sikring. (Bruland 2000a)

### 2.6.1 Q-systemet

Q-systemet er et bergklassifiseringssystem. Systemet bruker seks parametre til å klassifisere bergmassen rundt tunneler og bergrom, samt bergmasseklassifisering under feltarbeid i dagen. Systemet baserer seg på en Q-verdi beregnet fra de seks parametrene. Disse parameterene er oppsprekkingstall, RQD, tall for sprekkesett,  $J_n$ , sprekkeruhetstall,  $J_r$ , tall for sprekkefylling,  $J_a$ , sprekkevannstall,  $J_w$  og spenningsfaktor, SRF. Etter en ferdig utregnet Q-verdi benyttes et skjematisk diagram som knytter Q-verdien til ulike mengder og typer permanent sikring. Q-systemet kan derfor brukes som retningslinjer for hvilken mengde og type sikring som er nødvendig i det aktuelle prosjektet (undersøkelse 2023).

Noe av det Q-verdien er avhengig av er bergoverdekningen. Det betyr at samme fjell kan ha ulik Q-verdi nede ved stoff og oppe i dagen (undersøkelse 2023).

---

## 2.6.2 Sikringstiltak

Selv om fjellet er hardt, er det som regel behov for noe sikring. TBM-skapte tunneler har god selvbæring, på grunn av sin runde form, men i enkelte bergarter kan sprekkesettene lede til ustabilitet. Det er også fare for å støte på svakhetssoner, der sikring er nødvendig. Sikringsmetodene som blir mye brukt er spredt og systematisk bolting og fiberarmert sprøytebetong ved større stabilitetsproblemer.

## 2.7 NTNU-modellen

Francisco Javier Macias sin doktoravhandling "The NTNU prediction model for hard rock TBMs: Advanced rate and cutter wear" (Macias 2016), herav kalt NTNU-modellen. Modellen blir brukt til å designe TBMen og forutsi TBMs inndrift i et enkelt tunnelprosjekt. En slik modell er viktig i alt fra valg av TBMen sin utforming, og til planlegging og risikoanalyse av prosjekt. Gode valg bidrar til bedre og mer sikkert tidskjema og minsker sannsynligheten for budsjett- og tidsoverskridelser for prosjektetene. Modellen er utviklet med en kombinasjon av dataene samlet inn fra feltmålinger, geologisk ingeniørarbeid, kartlegging med et spesifikt mål og laboratorietesting.

Modellen er bygget opp med et diagram for hver parameter. Grafen i diagrammet er basert på analyser av resultatene fra de ulike undersøkelsene som ble gjort i doktorgradsavhandlingen. Ved å lese av de valgte verdiene i diagrammene vil en få ut det antallet eller den størrelse som er nødvendig.

NTNU-modellen er i endres ofte da den tilpasses til ny teknologi. Det er da parametrene for TBM som inntrengingen i berget og levetiden til kutterne som oppdateres. TBM teknologien er i stadig utvikling. For at NTNU-modellen skal forsette å være en relevant og pålitelig modell er den nødt til å oppdateres i takt med at teknologien utvikles og ny data samles inn. (Macias 2016)

## 2.8 TBM-parametre

### 2.8.1 Inndriftsparametre

I dette avsnittet beskrives parametrene som benyttes for å bestemme inndriften til TBMer i henhold til NTNU-modellen.

Tabell 3: *NTNU-modell parametre (Macias 2016)*

<b>Fjellparametre</b>	<b>Maskinparametre</b>	<b>Produksjonsparametre</b>
Oppsprekking	Matekraft	inntrenging
Borsynkindeks, DRI	Borhodets rpm	Inndrift
Porøsitet	Gjennomsnittlig sporavstand	
Sprekkeorientering	kutterdiameter og -form	
	Installert effekt	

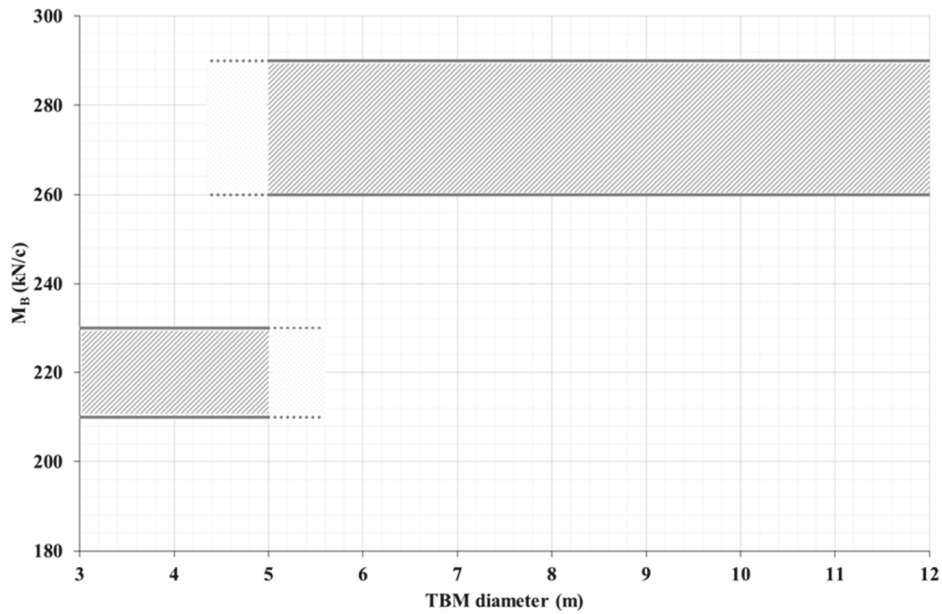
---

## 2.8.2 Fjellparametre

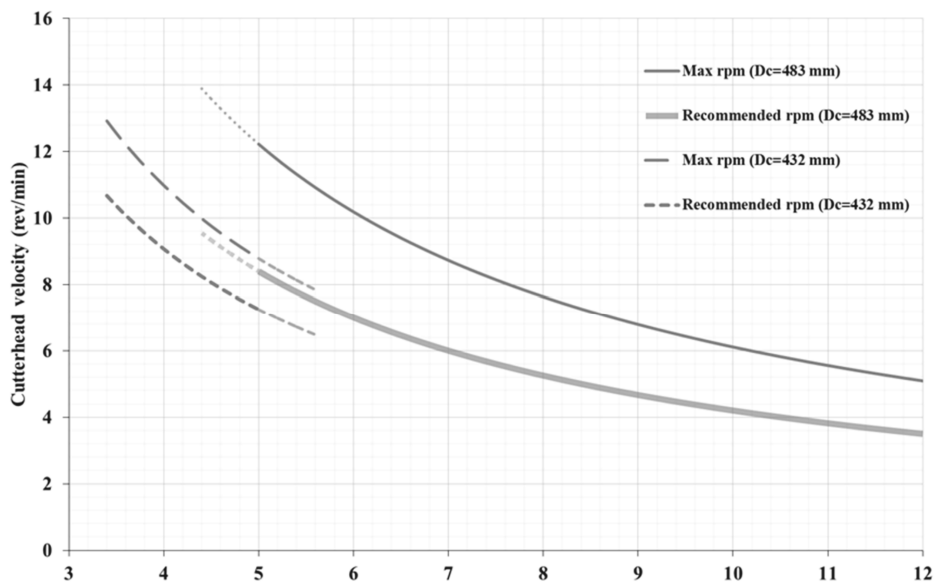
- Oppsprekking  
Stikk- og sprekkavstand mellom flater med liten skjærfasthet langs svakhetsflatene.
- Borsynkindeks, (DRI)  
Uttrykk for bergartens borbarhet. Bestemmes utifra bergartstype og oppsprekking.
- Porøsitet  
Prosent hullrom som utgjør volumet til en bergart. Høy prosent hullrom gir porøse bergarter som er enklere å bore i, enn i bergarter med lavere porøsitet.
- Sprekkeorientering  
Orienteringen på sprekkesett vil påvirke stabiliteten og styrken i berget. En liten vinkel mellom borretningen og maskinen vil resultere i svakt berg som lett kan borres gjennom. En større vinkel, opp mot og rundt 90 grader vil være mer krevende å bore i.

## 2.8.3 Maskinparametre

- Gjennomsnittlig matekraft for kutter  
Gjennomsnittlig matekraft for kuttere kan bli funnet gjennom figur 4. Figuren viser gjennomsnittlig matekraft per kutter basert på diameteren til TBM og kutter. Den gjennomsnittlige matekraften er kraften hver enkelt kutter tåler over tid, og altså ikke den maksimale kraft over et kortere tidsintervall. Når den gjennomsnittlige matekraften blir bestemt er det materialkvaliteten på stålringen som er den begrensende faktor. Selv om materialkvaliteten på stålringen ofte er det begrensende faktor må en også ta hensyn til kutterlageret og bæringen på kutterne. (Bruland 2000b)
- Borhodets RPM  
Borhodets RPM er invers proporsjonalt med diameteren på kutterhodet. Dette er fordi en er nødt til å beregne rullehastigheten til den rullende kutteren. Hastighetene blir da beregnet med en funksjon av diameteren på TBM, vist i figur 5. (Macias 2016)



Figur 4: Grafisk fremstilling av gjennomsnittlig matekraft per kutter  
(Macias 2016)

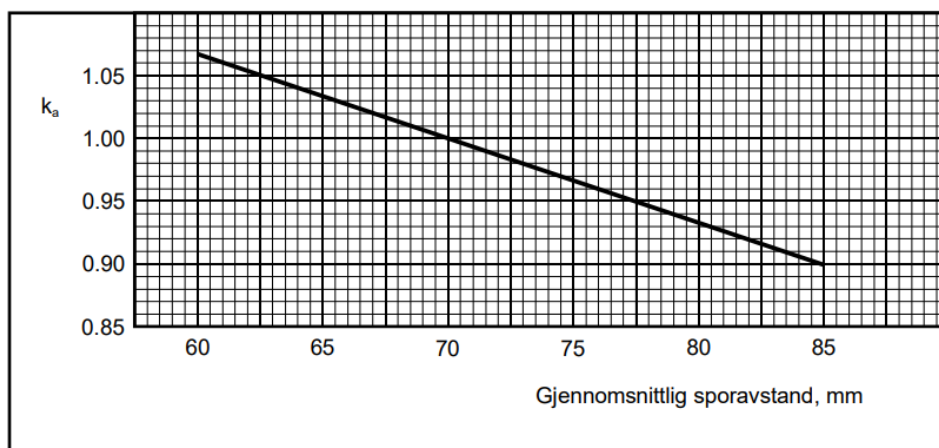


Figur 5: Grafisk fremstilling av borhodets rpm (Macias 2016)

- Gjennomsnittlig sporavstand

Gjennomsnittlig sporavstand er en korreksjonsfaktor som brukes for å beregne inntrengingen i mm/omdr. Korreksjonsfaktoren brukes i likningen  $M_{ekv} = M_B * k_d * k_a$ , hvor  $k_a$  er korreksjonsfaktoren for gjennomsnittlig sporavstand. Likningen gir ut matekraften kutterne tåler.





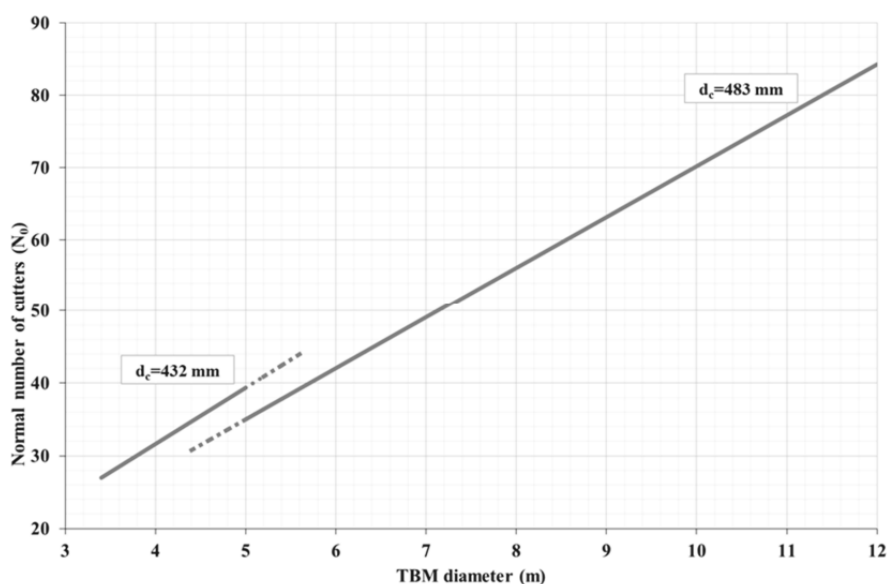
Figur 6: Gjennomsnittlig sporavstand (Bruland 2016)

- Kutterdiameter

I dag er kuttere med diameter på 483 mm de vanligste kutterne, men på smådimensjon TBM brukes helst 432 mm. Tidligere ble kutterdiameter på 394 mm mye brukt. Ved å øke kutterdiameteren til 483 mm økte også levetiden til kutterne. (Bruland 2000b)

- Antall kuttere

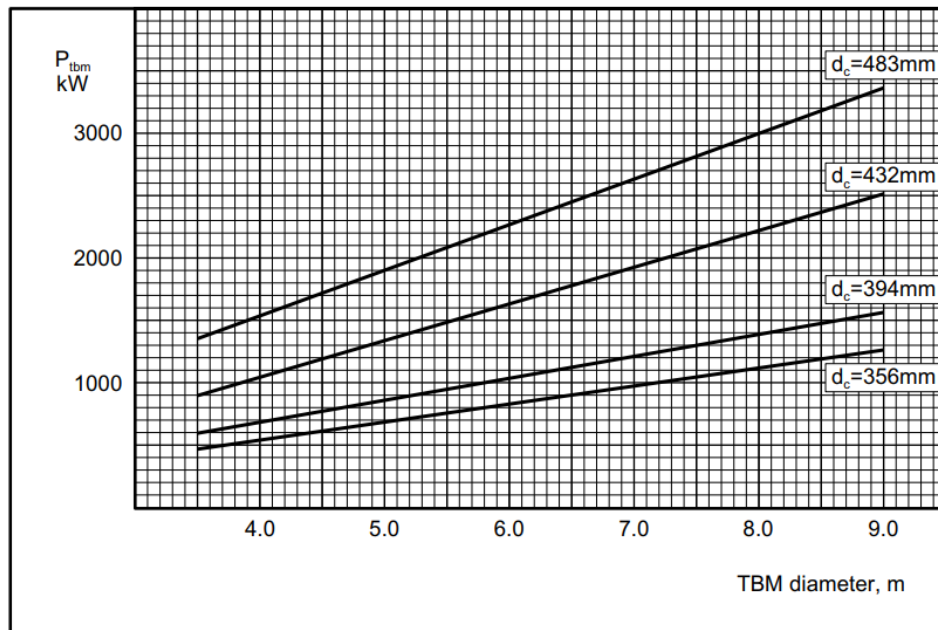
For å finne det optimale antall kuttere for den individuelle TBM må en bruke figur 7. Før antall kuttere blir bestemt må diameteren på kutteren være bestemt. Med informasjonen om kutterdiameter og TBM diameter vil en finne det optimale antall kuttere,  $N_0$ . Noen av TBMene som blir sett på i denne oppgaven er mindre enn 3 m i diameter, så denne grafen vil derfor bare være et utgangspunkt for videre beregninger. (Bruland 2000b)



Figur 7: Grafisk fremstilling av antall kuttere (Macias 2016)

- Installert effekt

Den installerte effekten er den effekten Maskinen klarer å jobbe i. Den blir funnet ut i fra figur 8



Figur 8: Grafisk fremstilling av installert effekt(Bruland 2016)

#### 2.8.4 Produksjonsparametre

- Inntrenging

Benevnes som millimeter per omdreining. Her påvirker matekraft effektiviteten på inntrengingen. Jo høyere matekraft jo større kaks produseres, som vises i inntrenginghastigheten. Stor kaks betyr et lavere energibehov. Det er som regel maskinens evner som begrenser inntrengingen.

- Inndrift

Benevnes som meter boret tunnel per time borehodet roterer med mating mot stoffen. Som faktor, avhenger inndrift av alle fjellparametre og maskinparametre nevnt over. Inndrift benyttes ofte til å måle fremgang over en lengre periode.

---

## 3 Metode

Dette kapitlet beskriver metodene anvendt i oppgaven. Metodene som er brukt vil bli forklart og styrker og svakheter vil bli diskuterte. Troverdigheten til kildene er viktig da de er avgjørende for kvaliteten til vurderingene gjort i oppgaven.

### 3.1 Litteraturstudie

For å få tak i den overnevnte teorien har det blitt gjennomført en omfattende litteraturstudie. Litteraturen er hentet fra ulike doktorgradsavhandlinger, rapporter, kompendier og ved søk på internett. Det akademiske nettstedet researchgate ble tidlig mye brukt.

Det ble brukt ulike nøkkelord for å finne frem til de relevante artiklene. Blant annet handlet de om TBM, hardt fjell, boring i hardt fjell og tunnelboring.

Mens litteratursøket ble gjennomført ble det stilt noen spørsmål til kildene som en enkel kvalitetssikring. Dette ble gjort for å sikre troverdige kilder av god kvalitet. Spørsmålene som ble brukt som kvalitetssikring er listet opp under:

- Er dette relevant?
- Vil dette være noe som kan bli brukt i oppgaven?
- Hva kan dette brukes til?
- Er det en pålitelig kilde?
- Er kilden oppdatert?

Proessen ble gjennomført for å få en større forståelse for TBM, hvordan det fungerer og hvordan en TBM kan brukes på optimalt vis. Litteraturstudiet ble i hovedsak gjennomført i perioden november 2022 - mars 2023. Etter dette begynte skriveprosessen parallelt med at det fortsatt ble søkt etter ny litteratur. De mest relevante kildene har vært doktorgraden til Francisco Javier Macias som ble publisert i 2016, og en rekke publiserte deler av doktorgraden til Amund Bruland, publisert i 2000. Det ble også brukt en rekke andre publiserte artikler, rapporter og bøker som kilder.

### 3.2 Datainnsamling

Innsamlingen av data har i hovedsak vært fra anleggsprogrammet Fullprof. I Fullprof er det mulig å legge inn faktorer slik som DRI, CLI, kvartsinnhold og andre liknende faktorer som påvirker boringen. Ved å legge inn sin valgte TBM diameter og de ulike bergparametrene vil programmet da gi ut ulike maskinparametre, slik som antall kuttere, midlere sporavstand, omdreiningstall og installert effekt.

---

Programmet gir også ut nødvendig informasjon om levetiden på kutterringen, huben og lagerene. Fullprof ga også ut midlere netto inndrift, ukesinndrift og total byggetid for tunnelen.

Fullprof har data til å kunne gi ut denne informasjonen om alle TBM diametere fra 3 m og oppover. TBM størrelsene denne oppgaven dekker er 1,8 m, 2,4 m, 3 m og 3,5 m. Det betyr at Fullprof ikke kan gi ut den nødvendige informasjonen om de to minste maskinene. Det ble derfor laget prognosemodeller i regneprogrammet Excel for hver av parametrene. Ved å lage linjediagrammer med likning med prognoser for hvordan grafene vil gå. Det er mulig å gjøre med både større og mindre diametere enn hva det har blitt samlet inn data på. I denne oppgaven ble det utelukkende bruk for å finne data på mindre dimensjoner en hva Fullprof ga ut. Etter prognosemodellene var laget ble de ønskede dimensjonene satt inn i prognoselikningen og beregnet for de tilhørende levetidene og inndriftene.

Total byggetid i timer ble så brukt for å finne det nøyaktige antall kuttere som er nødvendig for å bore tunnelen.  $CO_2$ -utslipp for de ulike tunnelene ble da funnet ut fra disse tallene.

### 3.2.1 Geologiske parametre

For å få et bredt utvalg av parametre velges det tre geologiske tilfeller som skal være representative for norske forhold. De geologiske parametrene fra lav til høy DRI, CLI, oppsprekningsgrad, stikningsklasse og kvartspersent. For å kunne skille tilfellene, kalles de hardt, middels og mykt fjell, til tross for at alle tilfellene regnes som hardt. Faktorene som skiller tilfellene vises i tabell 4 under.

Tabell 4: *Geologiske parametre for tilfellene hardt, middels og mykt fjell*

Faktorer	Hardt	Middels	Mykt
DRI	30	50	70
CLI	5	12	25
Stikklasse	1	2	3
Kvartsinnhold	40 %	20 %	10 %

Fallvinkelen settes til 20 grader for alle tilfellene. Dataene brukes i dataprogrammet Fullprof for videre beregninger. Mer om Fullprof under avsnitt 3.3.1.

### 3.2.2 Behandling av data

Alle beregninger og prognoser er laget i Excel. Programmet Excel ble valgt da det er et enkelt og oversiktlig program. Programmet er enkelt å bruke med store mengder tall og data og kan gjøre kompliserte beregninger enkelt, oversiktlig. Eventuelle endringer underveis gjøres også enkelt.

Analysen har blitt gjennomført ved å beregne mengder stål brukt under boring av tunneler i ulik lengde,

---

dimensjon og bergkvalitet. Mengde stål brukt har blitt beregnet og gjort om til  $CO_2$ -utslipp. Transporten av arbeidere til og fra anlegget blir også tatt med i  $CO_2$ -beregningene. Det har blitt brukt et likt antall arbeidere på alle ulike dimensjonene av TBMe. Totalt  $CO_2$ -utslipp fordeles på antall m tunnel slik at det tallet som kommer ut til slutt er  $kgCO_2/m$ .

### 3.2.3 Kvalitetssikring

For å sikre arbeidet som ble gjort med prognosemodeller er av god kvalitet har beregnede verdiene for kutterlevetider og ulike inndrifter blitt sammenlignet med de oppgitte fra Fullprof ved de to dimensjonene der det har vært mulig. Oppgaven ser på TBM med dimensjoner fra 1,8 m til 3,5 m i diameter, der det allerede fantes data for TBMe i dimensjon 3,0 m og 3,5 m i diameter. De innhentete dataene for disse maskinene har derfor blitt sammenlignet med de utregnede. De utregnede og de oppgitte verdiene har vært så lik hverandre i de minste dimensjonene at prognosemodellene har blitt vurdert til å være gode nok for de aktuelle dimensjonene.

For å sikre kvaliteten på teori og skrevet tekst i oppgaven har det blitt brukt mye kilder gjennom hele prosessen. Gruppen har vært opptatt av at kildene skulle være pålitelige, og dermed brukt mye tid på litteraturstudier som ble forklart i kapittel 3.1. Kildene finnes i kildelisten.

## 3.3 Analysemodell

Planen for analysen var å hente ut data fra allerede ferdigstilte prosjekter der TBM har blitt brukt. Det ble bestemt at det ikke var nødvendig. Gruppen ville heller lage en generell analyse som rettet mot  $CO_2$ -utslipp og livsløpet til flere ulike TBM.

### 3.3.1 Fullprof

Programmet som ble brukt for å hente ut den nødvendige dataene for oppgaven var anleggsprogrammet Fullprof. Fullprof er et program som baserer seg på NTNU-modellen og det kan derfor brukes til å dimensjonere TBM. Ved å legge inn den ønskede størrelsen på den planlagte TBM vil Fullprof gi ut flere nødvendige faktorer maskinen må bygges etter. Faktorene som ble brukt i denne oppgaven er antall kuttere, levetiden til de ulike kutterdelene, midlere netto inndrift og ukesinndrift.

Fullprof gir også muligheten til å tilpasse de geologiske faktorene. Det er da mulig å legge inn bergarten sin DRI, CLI, kvartsinnhold, ulike sprekkesystemer, stikningsklasser og mengder kvarts i fjellet. Dette er parametre som påvirker levetiden til de ulike delene av kutterne, slik som levetiden til kutterringen, -huben og -lagerene samt inndriften til maskinen.

---

### 3.3.2 VegLCA

Statens vegvesen har en modell for beregning av klimagassutslipp fra vegprosjekt kalt VegLCA. (Vegvesen 2023) I VegLCA er det en egen del for tunnel, men kun for konvensjonell drift av veg-tunneler. Dette gjør den uegnet til å beregne utslippet av å bore fullprofilstunnel med TBM. VegLCA er derfor ikke egnet til å regne ut  $CO_2$ -utslipp for boring. Programmet ble uansett brukt, men til å beregne utslipp for tunnelsikring og transport av ansatte til og fra anlegget.

### 3.3.3 Q-systemet

Q-modellen er et system som brukes til å klassifisere bergmasser. Systemet bruker en Q-verdi basert på seks ulike parametre og anvendes til å bestemme den nødvendige bergsikringen. Gjennom et skjematisk sikringsdiagram brukes den beregnede Q-verdien til å finne sikringsbehovet (undersøkelse 2023).

Q-systemet ble brukt i denne oppgaven. Siden oppgaven ikke er knyttet til et spesielt prosjekt, men til variasjon i bergmassen ble Q-systemet brukt til å beregne Q-verdien for den teoretiske middels harde bergmassen. Verdiene for de seks parametrene ble valgt til å passe fjell med en del ru og ujevne sprekker med middels innsig av vann. Q-verdien for det hardeste og mykeste berget ble vurdert ut fra beregningene av Q-verdien for det middels harde fjellet.

### 3.3.4 Prognosemodeller

En mangel ved Fullprof er at den ikke gir ut data for tunneler med mindre diameter enn 3,0 m. Det ble derfor besluttet å lage prognosemodeller der det blir hentet data fra større TBM dimensjoner i Fullprof. Data ble hentet fra TBMer i størrelsen 3 m - 5 m i diameter og laget prognosemodeller ut fra disse dataene.

I vedlegg A, B og C er det laget prognosemodeller for de ulike maskinfaktorene og levetiden på kutterne, midlere netto inndrift og ukesinndriften basert på de ulike geologiske parametrene.

I vedlegg D ble det laget prognosemodeller for hvor lang tid det vil ta å bygge alle de ulike tunnelene. Det ble laget prognosemodeller for antall uker og timer det vil ta å drive tunnelen for alle kombinasjoner av mykt, middels og hardt fjell kombinert med 3 km, 5 km og 10 km tunnellengde. Levetiden for de ulike delene av kutterne var oppgitt i timer og det var derfor nødvendig å finne total byggetid tunnel i timer, selvom det er en tungvint måte å oppgi dette på.

### 3.3.5 Kutterforbruk

I vedlegg ?? har den nødvendige mengden kuttere blitt utregnet. Forbruket ble beregnet fra prognosemodellene som ble laget for levetiden til kutterdelene og inndriften til TBMen. Vedlegget gir en total oversikt over hvor mye av de ulike kutterdelene som er nødvendig, og viser også hvilken del det er nødvendig med flest av, og hvilken kutterdel som er den kritiske for levetiden.

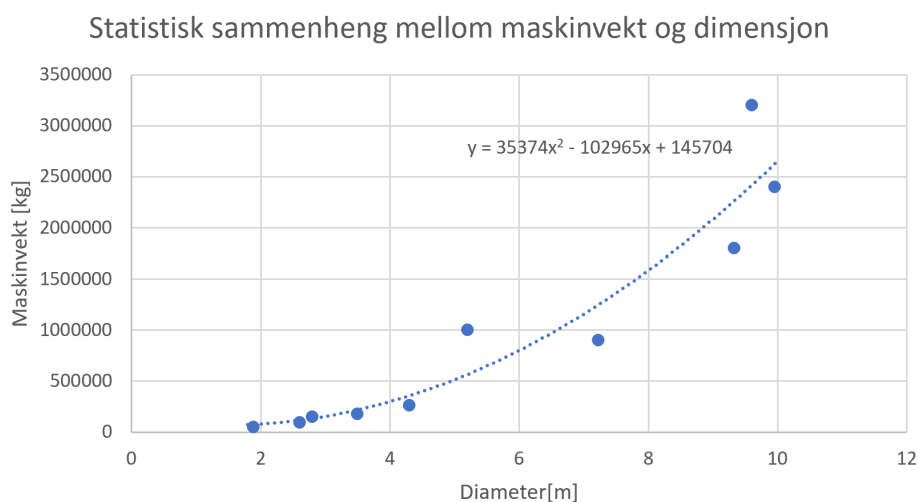
### 3.3.6 Materialmengde

I vedlegg F anslås maskinvekten på de ulike TBMe. Det ble laget en prognosemodell som baserer seg på vekten til brukte TBMer i Norge fra nyere tid. I Norge har det blitt brukt dimensjoner fra 1,89 m, til 9,96 m. Datasettene vises i tabell 5.

Tabell 5: Utvalg av nordiske TBM-er og oppgitt vekt (Hardangermaskin 2023) (ES-Posten 2020) (Robbins 2023b) (Anlegg&Transport 2023) (MIP 2023) (Braa and Hopland 2017) (TU 2023) (Bane-Nor 2023)

Selskap	TBM-Navn	Diameter [m]	Vekt [kg]
Hardangermaskin	Fortuna	1,89	46 000
	Mia	2,6	95 000
Hywer	Snøhvit	2,8	150 000
Robbins	Svartisen HP	3,5	180 000
	Svartisen HP	4,3	262 000
Skanska	Betzy	5,2	1 000 000
Robbins	Jern-Erna	7,23	900 000
Skanska	Ulrikke	9,33	1 800 000
	Åsa	9,6	3 200 000
Acciona Ghella	Dronning Eufemia	9,96	2 400 000

Under skrivingen av denne oppgaven, finnes det ingen god oversikt over TBMer som er brukt i Norden. Prognosemodellen, figur 9 baseres på disse dataene.



Figur 9: Prognosemodell for å finne maskinvekt, ved å se på sammenhengen mellom diameter og maskinvekt

Erfaringstall oppgitt av Sindre Log, anslår at ca. 98 % av maskinvekten er i stål. Dette tas med videre i

---

beregningene som en fastsatt faktor for utslippet til en TBM. Vektene fra prognosemodellen multipliseres med 98 % før det videre ganges med  $CO_2$ -ekvivalenten til stål, som er på 1,4 tonn  $CO_2$  per tonn stål. (IEA 2022)

### 3.3.7 Utslipp sikring

I vedlegg I beregnes all utslippet som eventuelt tunnelsikring vil stå bak. Sikringsgraden av fullprofilstunneler i norske bergarter er lav, da overflatene blir glatte og får god selvbæring. Det er derfor bare sporadisk i sprekker og enkelte svakhetssoner hvor det er behov for sikring. I samråd med Amund Bruland ble det bestemt at det skal sikres med endeforankrede bolter og fiberarmert sprøytebetong etter behov.

For å variere sikringsgraden, ble det laget en konsekvenstabell, tabell 6. Tabell 6 viser hvor mye hvert tverrsnitt skal sikres ut fra hvilken bergmasse det utsettes for. Bergmassene skilles mellom dårlig, middels og god, som forklart i tabell 6. Sikringsklassen er hentet fra Q-metoden. Sikringsgradene vises i tabell 6.

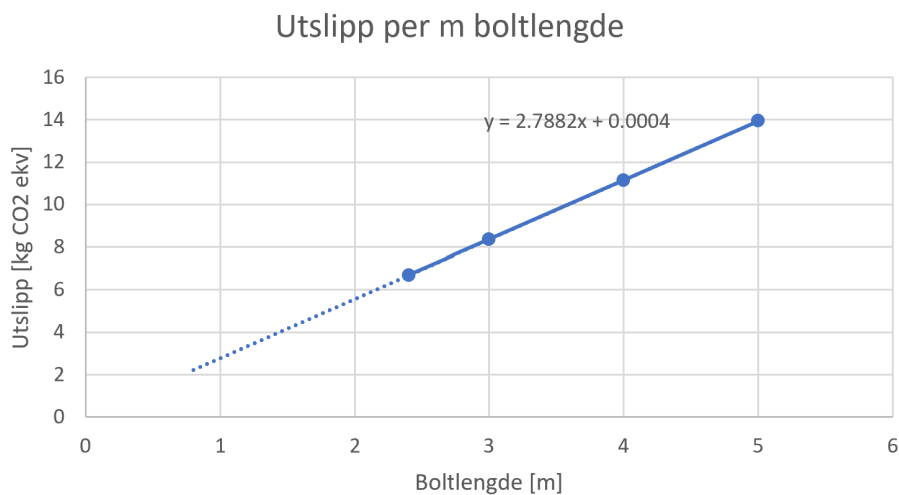
Tabell 6: *Konsekvenstabell for sikringsgrader til hver TBM og bergmassekvalitet*

<b>Bolt pr m</b>	<b>TBM A Bolt</b>	<b>TBM B Bolt</b>	<b>TBM C Bolt</b>	<b>TBM D Bolt</b>
Dårlig Bergmasse	0.1	0.3	1	1.5
Middels Bergmasse	0.05	0.1	0.3	1
God Bergmasse	0	0.05	0.1	0.3

Sprøytebetong er anslått til å være nødvendig i utelukkende dårlig bergkvalitet med tverrsnitt på 3,5 m. Det sikres med omtrent 10 m sprøytebetong per 100 m, med 0,06 m tykkelse. Utslippsberegningen for sprøytebetong blir gjort i VegLCA. Her plottes inn utregnet kubikk, slik at VegLCA kan angi utslippsmengden.

Boltelengdene for tverrsnittene 1,8 m, 2,4 m, 3,0 m og 3,5 m, blir satt til henholdsvis 0,8 m, 1,0 m, 1,5 m og 1,7 m. Bolttverrsnitt på 20 mm har blitt valgt. VegLCA er begrenset til bolter på 2,4 m, 3 m, 4 m og 5 m. Det ble laget en prognosemodell for å anslå utslippet for de ønskede boltelengdene. Prognosemodellen vises i figur 10.





Figur 10: Prognosemodell utslipp per m boltelengde

Transportutslippet til boltene ble også beregnet. Boltene blir produsert hos Østfold Stål, en anerkjent stålprodusent i Norge, og transportert til Mork kraftverk i Lærdal kommune. Boltene har derfor en lang reisevei.  $CO_2$ -utslippet for transporten må dermed beregnes. Det blir tatt utgangspunkt i Pretec-Norge sin EPD-rapport på M20 NC-bolter, da dette er en mye brukt kombinasjonsbolt. (Pretec 2023b) EPD-rapporten oppgir at en slik bolt veier 2,47 kg/m. (Pretec 2023a) Ved å bruke tall for transportutslipp fra EPD-Norge, kan en finne drivstoffbruket. Det blir oppgitt at transport av gods utgir 0,023 l/tkm (liter per tonn kilometer). (EPD-Norge 2023) Miljødirektoratet oppgir en  $CO_2$ -ekvivalent for diesel på 2,66 kg  $CO_2$ . (Miljødirektoratet 2023). Det blir antatt at boltene blir kjørt fra Østfold Stål til Mork kraftverk, ca 360 km. Dette tallet er hentet fra Google Maps. Det ble så beregnet utslippet for dieselmengden brukt under transport og fordelt på lengden av tunnelen.

### 3.3.8 Utslipp ansattransport

Vedlegg J tar for seg utslippet som kommer fra ansattes reise til og fra prosjektet. I samråd med Amund Bruland er det kommet frem til at de TBM-størrelsene som det er snakk om ikke varierer nok til at det er nødvendig med ulik bemanning på de ulike maskinene. Det ble beregnet 5 ansatte på et skift, i en 3-skiftsordning. Det er nødvendig med 5 administrerende roller som følger opp prosjektet på dagtid. Totalt vil dette bli 20 ansatte, og det regnes med at det da blir en reise i uken per ansatt. Reiseruten er fra Dale i Sunnfjord til Mork kraftverk, som er på 190 km med personbil. Man går ut fra at de ansatte bor på brakke på anlegget. Vedlegg D oppgir hvor mange uker totalt det tar å drive hver tunnel. Det legges inn i VegLCA som gir total utslipp for alle turene som inngår i løpet av hele tunnelprosjektet. Utslippstallet deles på aktuell tunnallengde slik at det kan brukes i samlet utslipp.

---

### 3.3.9 Utslipp tunnel

Vedlegg H viser  $CO_2$ -utslippet per meter for de ulike tunneldimensjonene, DRI-verdiene og lengde på tunneler. I dette regnearket har utslippet fra maskin og kuttere blitt tatt hensyn til.

### 3.3.10 Samlet utslipp

I vedlegg K summeres utslippsverdiene, fra vedlegg H, J og I. Dette utgir det samlede utslippet for hver TBM-dimensjon, bergmassekvalitet, geologitype og tunnellengde. Alle verdiene oppgis i  $kgCO_2/m$ . Analysen bruker gensik data for TBM for flere av parametrene knyttet til selve maskinen.

---

## 4 Resultat

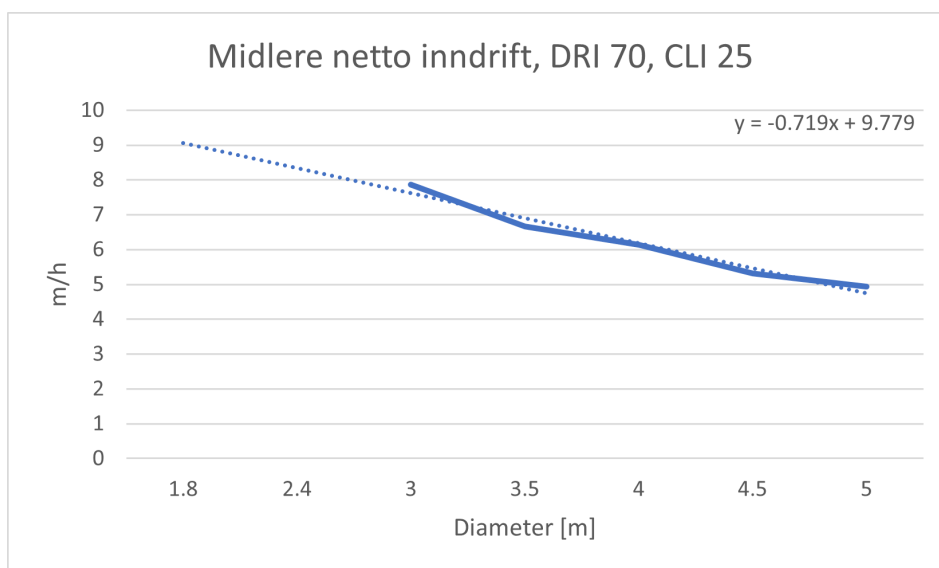
I dette kapittelet blir dataene og  $CO_2$ -utslippene for de ulike TBMene, tunnallengdene og bergkvalitetene presentert. Mye av dataene ble hentet fra Fullprof og ble brukt til å lage prognosemodeller i regneprogrammet Excel.

### 4.1 Inntrengingshastighet

Inntrengingen per time og den ukentlige inndriften, inntrengingshastigheten til TBM er vist i figurene under. For å se hvordan de ulike bergmassene påvirker inndriften til TBMene har det blitt beregnet prognosemodeller med tilhørende likninger. Prognosemodellene ble brukt til å finne inndriften for de dimensjonene Fullprof ikke gir ut. Det ble også beregnet totalt byggetid i antall uker på samme måte.

#### 4.1.1 Midlere netto inndrift

Midlere netto inndrift viser hvor langt maskinen borer på en time og gir en oversikt over hvor fort maskinen borer.



Figur 11: Prognosemodell av midlere netto inndrift DRI 70, CLI 25

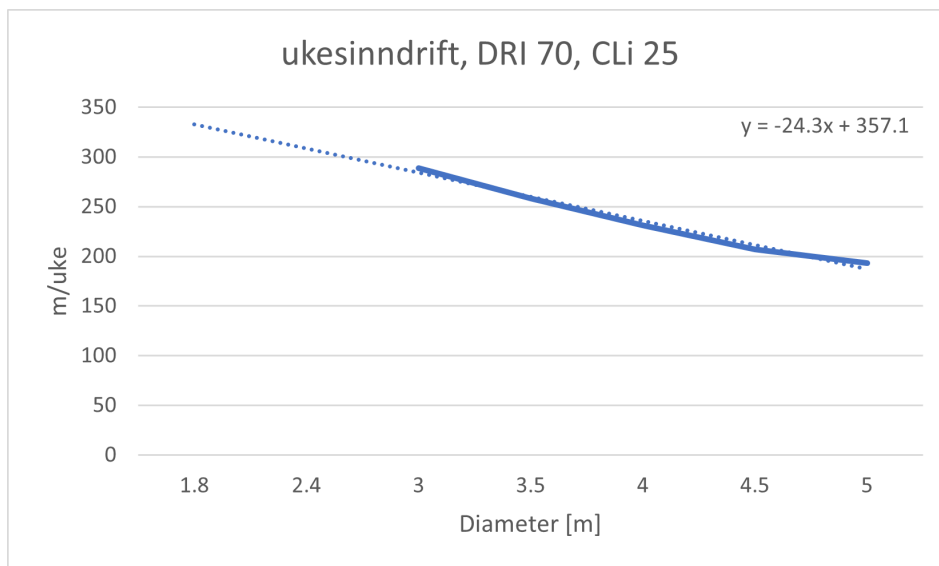
Figur 11 viser en estimert midlere netto inndrift for den harde bergmassen. Figuren viser en tykk heltrukket blå linje. Linjen er laget ut fra midlere netto inndrift hentet fra Fullprof for ulike dimensjoner av TBM. Med disse verdiene har Excel laget en prognose som viser hvordan grafen ville ha fortsatt med de mindre dimensjonene. Prognosen har en tilhørende likning  $y = -0.719x + 9.776$  som gir en diameter på 1,8 m en midlere netto inndrift for berg med DRI 70 og CLI 25 på 8,48 m/h. En TBM på 2,4 m i diameter vil ha en midlere netto inndrift på 8,05 m/h. For å få en helhet i beregningene ble de utregnede verdiene for TBMene med diameter 3,0 m og 3,5 m også bruk. De ble beregnet til 7,62 m/h og 7,26 m/h.

---

Midlere netto inndrift for middels hard bergmasse med DRI 50, CLI 12 og for den harde bergmassen med DRI 30, CLI 5 finnes i vedlegg B og A. Begge er beregnet og fremstilt på lik måte som figur 11.

#### 4.1.2 Ukentlig inntrenging

En annen måte å måle inntrengingen til maskinene på er hvor langt maskinen borer på en uke. Ved å se på hvor langt maskinen borer på en uke i normal drift kan man estimere hvor lang tid boringen tar.



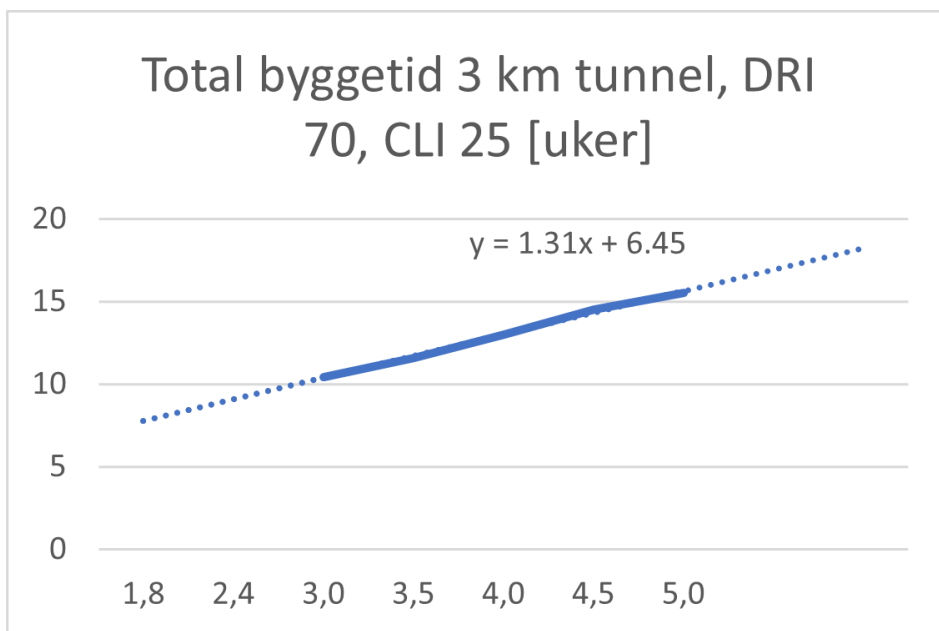
Figur 12: Prognosemodell av ukesinndrift DRI 70, CLi 25

Figur 12 viser den prognoserte grafen som kan brukes til å finne ukesinndriften i den myke bergmassen. Den heltrukne linjen viser grafen laget ut fra data hentet fra Fullprof. Den stiplede linjen viser prognosen av hvordan grafen ville startet. Grafen har en tilhørende likning  $y = -24,3x + 357,1$ . Prognosen viser at en TBM med diameter på 1,8 m i diameter vil bore 313 meter på en uke, mens en TBM på 2,4 m i diameter 299 m på en uke. For å få en helhet i beregningene brukes resultatene fra prognosemodellen på diameterene 3,0 m og 3,5 m og. Inndriften blir da 284 m/uke og 272 m/uke.

Prognosene for ukentlig inndrift for middels hard bergmasse med DRI 50, CLI 12 og for den harde bergmassen med DRI 30, CLI 5 finnes i vedlegg B og A. Begge prognosene er funnet på lik måte som prognosen i figur 12, og fremstilt på lik måte med en graf og tilhørende likning.

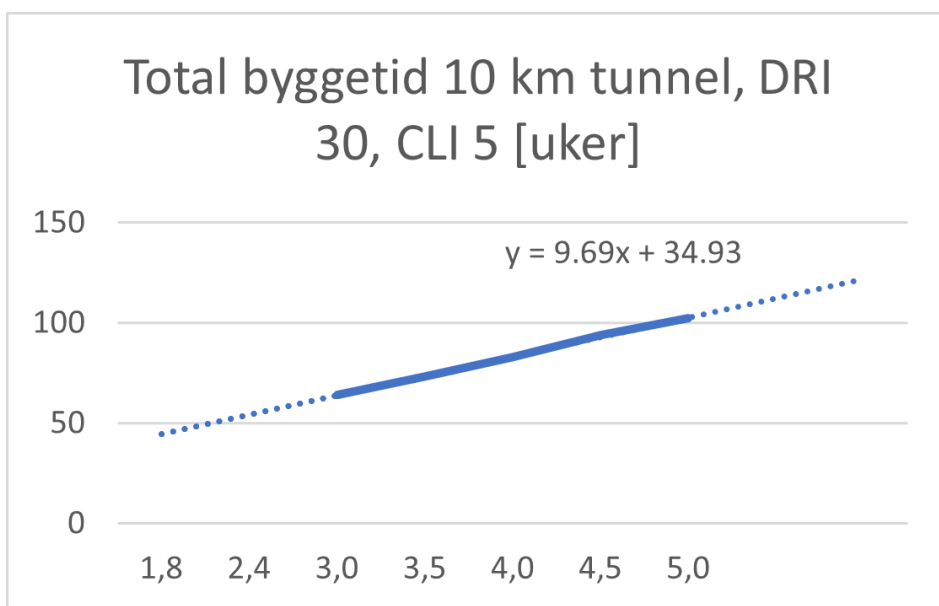
#### 4.1.3 Total byggetid

Den totale byggetiden er fra TBMen begynner å bore til den gjør gjennomslag.



Figur 13: Prognosemodell av total byggetid 3 km tunnel DRI 70, CLI 25

Figur 13 viser en graf som representerer byggetiden til en 3 km tunnel boret i hardt fjell, men med lettere bergfaktorer, med DRI 70 og CLI 25, altså den myke bergmassen. Fjellet er altså hardt, men i den myke delen av hardt fjell. Den stiplede linjen, prognosegrafen, har en  $y = 1,31x + 6,45$ . For en tunnel med 1,8 m i diameter i denne bergmassen vil det ta 8,8 uker å bore tunnelen. Med en maskin på 2,4 m i diameter vil det da 9,6 uker. Prognosen ble også brukt til å beregne byggetiden for dimensjonene 3,0 m og 3,5 m i diameter for å få mer helhetlige beregninger. Den totale byggetiden ble da beregnet til å være 10,4 uker og 11,0 uker.



Figur 14: Prognosemodell av total byggetid 10 km tunnel DRI 30, CLI 5

Figur 14 viser prognosemodell for total boretid av en 10 km lang tunnel i det myke tilfellet av fjell. Ut fra prognosemodellen er det mulig å regne ut den totale boretiden til tunneler i ulike dimensjoner. Likningen som må brukes er  $y = 4,34x + 21.64$  og ut fra denne likningen er boretiden for en 10 km lang tunnel med diameter på 1,8 m beregnet til 52,4 uker. En tunnel med diameter på 2,4 m vil ha en boretid på 58,2 uker. Prognosen ble også brukt til å regne ut byggetiden for dimensjonene 3,0 m og 3,5 m i diameter for å få mer helhetlige beregninger. Den totale byggetiden ble da beregnet til å være 64,0 og 68,8 uker.

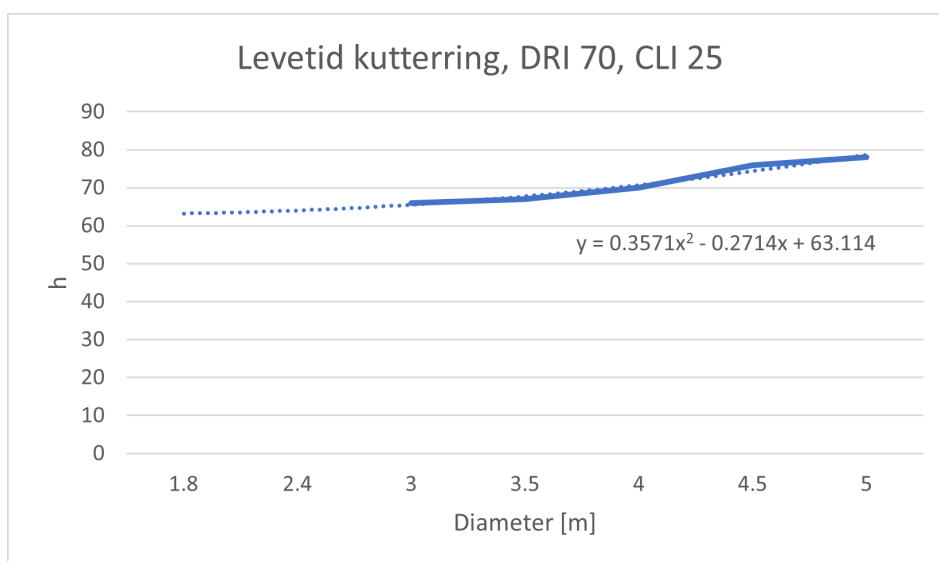
De resterende tunnelene har alle en byggetid et sted mellom tunnelen vist i figur 13 og figur 14. De resterende prognosemodellene finner en i vedlegg D.

## 4.2 Estimering av kutterlevetid

En kutter består av flere komponenter med ulik levetid. For å kunne estimere levetiden til kutterne må en se på levetiden til alle komponentene hver for seg for å finne ut hvilken som blir den begrensende komponenten. Komponentene som levetiden skal beregnes for er kutterringen, -huben og -lagerene.

### 4.2.1 Kutterring

Kutterringen er den delen av kutteren som roterer og bryter ned fjellet (Macias 2016). Det er derfor viktig at denne byttes ofte nok slik at ringens knusende egenskaper ikke svekkes for mye.



Figur 15: Prognosemodell av levetid kutterring DRI 70, CLI 25

Figur 15 viser hvordan levetiden til kutterringene i kutterne endrer seg med ulik dimensjon av tunnel i det myke fjellalternativet. Det er laget en prognose av hvordan levetiden til kutterringene vil være utover de dataene som er hentet fra Fullprof. Prognosen har følgende likning

$y = 0,3571x^2 + 0,2714x + 63,114$ . Ved å sette inn dimensjonen 1,8 m for  $x$  vil en få ut at kutterringen har

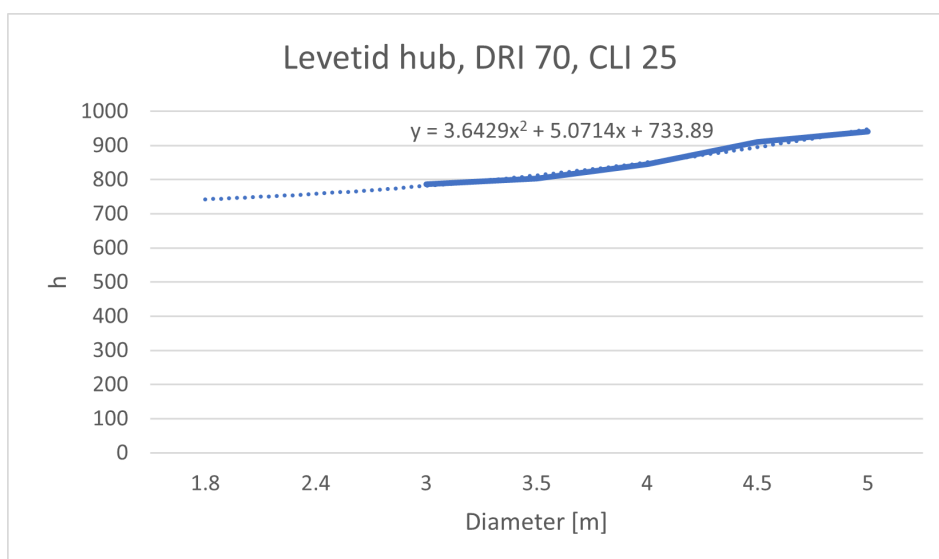
en levetid på 65 timer. For  $x = 2,4$  m, vil kutterringsen ha en levetid på 66 timer. Prognosen ble også brukt til å regne ut byggetiden for dimensjonene 3,0 m og 3,5 m i diameter for å få mer helhetlige beregninger. Levetiden til kutterringsene på TBM 3,0 m og 3,5 m i diameter for DRI 70, CLI 25 blir da 67 timer og 68 timer.

Det er i tillegg laget prognosemodeller for middels hard bergmasse med DRI 50, CLI 12 og for den harde bergmassen med DRI 30 og CLI 5. De er funnet og beregnet på lik måte som prognosemodellen i figur 15, og fremstilt på lik måte med en prognosert graf og tilhørende prognoselikning.

Levetiden for kutterringsen for middels hard bergmasse med DRI 50, CLI 12 og for den harde bergmassen med DRI 30 og CLI 5 finnes i vedlegg B og A.

#### 4.2.2 Kutterhub

Kutterhuben er det som holder kutterringsen på plass. Kutterhuben er med på å videreføre det hydrauliske trykket fra maskinen ut til kutterringsen og videre ut mot bergmassen slik at den blir knust og maskinen får bevegde seg fremover.



Figur 16: Prognosemodell av levetid hub DRI 70, CLI 25

Figur 16 viser prognosemodellen som brukes til å beregne levetid til kutterhuben i den myke bergmassen. Prognosen har en tilhørende likning  $y = 3,6429x^2 + 5,0714x + 733,89$ , der dimensjonen på TBMen i meter settes inn for  $x$ . Ved å sette  $x$  som 1,8 m vil kutterhuben få en levetid på 755 timer. Ved  $x = 2,4$  m vil kutterhuben få en levetid på 767 timer. Prognosen ble også brukt til å regne ut byggetiden for dimensjonene 3,0 m og 3,5 m i diameter for å få mer helhetlige beregninger. Levetiden til kutterhuben for dimensjonene 3,0 m og 3,5 m blir da beregnet til 782 timer og 796 timer.

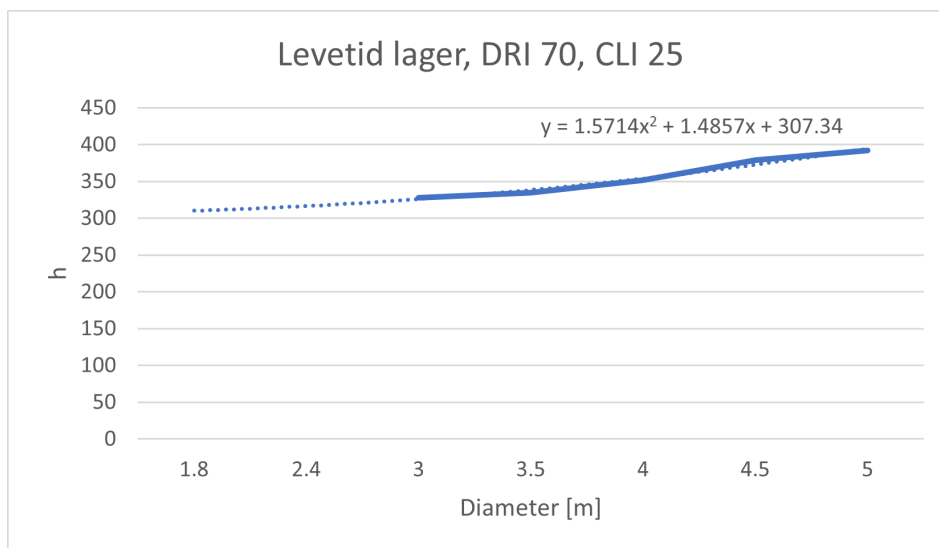
Det er også laget prognosemodeller for kutterhuben som kutter i middels hard bergmasse med DRI 50, CLI

---

12 og for den harde bergmassen med DRI 30, CLI 5 finnes i vedlegg B og A. Prognosene er funnet ved hjelp av samme fremgangsmåte som prognosemodellen i figur 16. I vedleggene A og B finner en prognoserte grafer med tilhørende likninger brukt til å regne ut levetiden.

### 4.2.3 Kutterlager

Kutterlageret er med på å stabilisere kutterne til maskinen. Det holder også vekten til selve kutteren på plass og justerer kutteren til en optimal posisjon.



Figur 17: Prognosemodell av levetid lager DRI 70, CLI 25

Figur 17 viser prognosemodellen for levetiden til lagrene på kutterne i det myke bergmasse-alternativet. Prognosegrafen har en likning  $y = 1,5714x^2 + 1,4857x + 307,34$ . Ved å bruke denne likningen for å finne levetiden til kutterlagrene til TBM med diameter 1,8 m og 2,4 m vil det gi en levetid på 315 timer og 320 timer. Prognosen ble også brukt til å regne ut byggetiden for dimensjonene 3,0 m og 3,5 m i diameter for å få mer helhetlige beregninger. Utreget levetiden for lagerene på maskinene ved dimensjon 3,0 m og 3,5 m blir på 326 timer og 332 timer.

Levetiden for kutterlageret for kuttere som kutter i middels hard bergmasse med DRI 50, CLI 12 og for den harde bergmassen med DRI 30, CLI 5 finnes i vedlegg B og A. Det er laget prognosemodeller for disse bergmassene, og brukt samme fremgangsmåte som prognosemodellen i figur 17.

### 4.3 Kutterforbruk

For å finne kutterforbruket har det blitt tatt utgangspunkt i den komponenten i kutteren med kortest levetid. Levetiden til denne komponenten har blitt brukt som dimensjonerende levetid for hele kutteren. Det å finne kutterforbruket har vært viktig for å kunne beregne stålforkbruket i tunnelene. Stålforkbruket benyttes til å



---

regne ut  $CO_2$ -utslippet.

I en kutter er det kutterringen som blir den begrensende faktoren, og derfor den som blir tatt hensyn til ved utregning av kutterforbruket.

Tabell 7: *Kutterringforbruk TBM  $\varnothing$  1,8 m*

---

<b>TBM A - <math>\varnothing</math> 1,8 m</b>			
Kutterringforbruk [stk]:			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	868	1445	2887
DRI 50, CLI 12	308	514	1028
DRI 70, CLI 25	247	410	825

---

Tabell 7 viser en oversikt over kutterforbruket basert på levetiden til kutterringen for tunneler med lengder 3 km, 5 km og 10 km for de ulike bergmassene i oppgaven. Kutterringforbruket har blitt beregnet ut fra total boretid for hver tunnel, levetiden til kutterringene i de ulike bergmassene og antall kuttere på TBMen. Tabellen viser hvordan kutterringforbruket øker med lengden på tunnelen, samt i de ulike bergmassene.

Tabell 8: *Kutterringforbruk TBM  $\varnothing$  3,5 m*

---

<b>TBM C - <math>\varnothing</math> 3,0 m</b>			
Kutterringforbruk [stk]:			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	1225	2044	4082
DRI 50, CLI 12	408	683	1363
DRI 70, CLI 25	350	582	1168

---

Tabell 8 viser oversikten over forbruket av kuttere ut i fra levetiden til kutterringen. Forbruket er basert på den totale boretiden for tunnelene, levetiden for kutterringene i de aktuelle bergmassene og antall kuttere på TBMen. Tabellen viser hvordan kutterforbruket øker med tunnellengden og DRI- og CLI-verdiene synker.

Kutterforbruket for TBM B,  $\varnothing$  2,4 m og TBM C,  $\varnothing$  3,0 m finner en i vedlegg ???. De har blitt beregnet på samme måte som kutterforbruket i tabell 7 og figur 8.

#### 4.4 Utslipp stål

For å finne utslippet fra stålforbruket må man først finne det totale forbruket av stål, inkludert maskin og kuttere for så å regne utslippet fra det. Stålforbruket fra kutterforbruket ble vist i kapittel 4.3 og den brukte stålmengden i maskinene.

Tabell 9: Samlet  $CO_2$  utslipp stål TBM A

<b>TBM A - ø 1,8 m</b>			
Stålutslipp per tunnel [ $kgCO_2$ ]			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	13567	22593	45142
DRI 50, CLI 12	9099	15194	30361
DRI 70, CLI 25	7592	12629	25386

Tabell 9 viser samlet utslipp for stålbruken for en TBM med diameter 1,8 m for de tre tunnelene på 3 km, 5 km og 10 km og de ulike kombinasjonene med de ulike bergmassene. Utslipet inkluderer utslippet for stålet i TBMen vektet mot total økonomisk levetid for maskinen delt på den totale boretiden for de ulike tunnelene, og det totale kutterforbruket for hver tunnel. Utslipet er et samlet utslipp for tunnelene.

Tabell 10: Utslipp stål  $CO_2/m$  TBM A

<b>TBM A - ø 1,8 m</b>			
Stålutslipp per tunnel [ $kgCO_2/m$ ]			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	4.52	4.52	4.51
DRI 50, CLI 12	3.03	3.04	3.04
DRI 70, CLI 25	2.53	2.53	2.54

Figur 10 viser det samme utslippet som figur 9, men med benevningen  $kgCO_2/m$ . Figur 10 gir en bedre sammenlikning utslippene i forhold til hverandre da det er snakk om samme lengde på alle kombinasjonene.

Tabell 11:  $CO_2$  utslipp stål TBM D

<b>TBM D - ø 3,5 m</b>			
Stålutslipp per tunnel [ $kgCO_2$ ]			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	48586	80829	161658
DRI 50, CLI 12	30697	51236	102472
DRI 70, CLI 25	25618	42844	85688

Figur 11 viser en figur de samlede utslippene for stålforbruket for alle kombinasjoner av tunnel med den harde, den middels harde og den myke bergmassen kombinert med tunnel på 3 km, 5 km eller 10 km. Utslipet vises i  $kg CO_2$  for ferdigborete tunneler.

Tabell 12:  $CO_2$  utslipp stål/m TBM D

<b>TBM D - ø 3,5 m</b>			
Stålutslipp per tunnel [ $kgCO_2/m$ ]			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	16.20	16.17	16.17
DRI 50, CLI 12	10.23	10.25	10.25
DRI 70, CLI 25	8.54	8.57	8.57

Tabell 12 viser utslippene for alle kombinasjoner av lengden på tunneler og de ulike bergmassene. Tabellen viser utslippet for 1 m boret tunnel. Ved å fastsette en bestemt lengde å regne utslipp på vil en vil det bli enklere å sammenligne hvordan bergmasse og lengde på tunnel påvirker utslippet.

Utslippene for TBM B og TBM C har blitt beregnet på lik linje som TBM A og TBM D og kan finnes i vedlegg F.

## 4.5 Sikring

### 4.5.1 Q-systemet

Q-systemet ble brukt til å beregne sikringsmengde for de tunnelene i de ulike bergmassekvalitetene.

Vedlegg L viser hvordan de ulike Q-verdiene har blitt utregnet og la et grunnlag for de ulike sikringsmengdene som har blitt anvendt. Når det gjelder TBM A, TBM B og TBM C så har alle tunnelene havnet i sikringskategori 1, usikret eller spredt bolting. Det betyr at berget står sterkt nok på egenhånd til at systematisk sikring ikke vil være nødvendig, men at det heller boltes der behovet er.

TBM D er den maskinen som borer de største tunnelene, og derfor de tunnelene som har størst behov for sikring. Tunnel D blir sikret med systematisk bolting og spredt bruk av fiberarmert sprøytebetong. Tunnel D havnet i sikringskategori 3 slik som denne sikringsmengden indikerer.

Boltelengden har blitt bestemt ut i fra Q-systemet i vedlegg I. Boltelengden varierer noe mellom de ulike tunnelene.

### 4.5.2 Utslipp sikring

Utslippet fra sikringen kommer fra stålmengden i boltene, utslippet fra produksjon av sprøytebetong og transporten av bolter og betong til anleggsplassen.

Tabell 13: *Utslipp fra sikring per meter tunnel, for hver bergmasse og TBM dimensjon*

$[kgCO_2/m]$	<b>Tunnel A</b>	<b>Tunnel B</b>	<b>Tunnel C</b>	<b>Tunnel D</b>
Dårlig Bergmasse	0.23	0.85	4.26	19.90
Middels Bergmasse	0.11	0.28	1.28	17.48
God Bergmasse	0.00	0.14	0.43	14.10

Tabell 13 viser all utslipp knyttet til sikring av tunnelene. Sikringsmengden er basert på Q-systemet og en vurdering av det estimerte sikringsbehovet. Det har i hovedsak blitt brukt bolter som sikring, men også noe feltnvis sprøytebetong i tunnel D. Det er synlig i utslippet til denne tunnelen.

Utslippene for sikringen er oppgitt i  $kgCO_2/m$ . Dette gjør man for enklere kunne utføre en sammenligning av utslippstallene på tvers av tunnallengder.

#### 4.6 Utslipp ansatte

Utslipet fra ansatte i hver tunnallengde, geologisk tilfelle og TBM-type, vises i tabell 14 - 17. Alle utslippstall er oppgitt i  $kgCO_2/m$ , og hentet fra vedlegg J.

Tabell 14: *Utslipp fra ansatte i TMB A, for hver tunnallengde og hver geologisk tilfelle*

<b>TBM A</b>			
Utslipp ansatte $[kgCO_2/m]$			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	4.35	4.40	4.32
DRI 50, CLI 12	2.99	2.94	2.94
DRI 70, CLI 25	2.45	2.45	2.45

Tabell 15: *Utslipp fra ansatte i TMB B, for hver tunnallengde og hver geologisk tilfelle*

<b>TBM B</b>			
Utslipp ansatte $[kgCO_2/m]$			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	4.89	4.89	4.81
DRI 50, CLI 12	3.26	3.26	3.18
DRI 70, CLI 25	2.72	2.61	2.69

Tabell 16: *Utslipp fra ansatte i TMB C, for hver tunnallengde og hver geologisk tilfelle*

<b>TBM C</b>			
Utslipp ansatte [ $kgCO_2/m$ ]			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	5.44	5.38	5.30
DRI 50, CLI 12	3.53	3.42	3.42
DRI 70, CLI 25	2.99	2.94	2.85

Tabell 17: *Utslipp fra ansatte i TMB D, for hver tunnallengde og hver geologisk tilfelle*

<b>TBM D</b>			
Utslipp ansatte [ $kgCO_2/m$ ]			
	3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	5.98	6.03	6.03
DRI 50, CLI 12	3.81	3.91	3.83
DRI 70, CLI 25	3.26	3.26	2.10

Alle TBMene er i samme størrelsesområde, med differanse på 1,7 m i diameter fra den minste til den største maskinen. Maskinene har derfor likt antall ansatte under driving. Hver TBM har 3 skift med 5 per skift ansatte til å drifte TBMen 5 ansatte til administrativt arbeid på dagtid. Totalt er det 20 ansatte på hver TBM. Det er lagt til rette for en turnus på 2 uker. Det utgjør en reise i uka per ansatt under hele boreperioden. Reiseavstanden på 190 km har blitt beregnet fra Dale i Sunnfjord til Mork kraftverk. Programmet VegLCA ble anvendt til å finne utslippet.

Det totale utslippet for alle reisene, til og fra anlegget, ble beregnet ut fra den totale boretiden, funnet i kapittel 4.1.2. Utslippet ble så delt på lengden til tunnelene for å finne utslipp  $kg CO_2/m$  per for ansatte.

Tabell 14, 15, 16, 17 viser hvor mye utslipp alle ansatte på anlegget totalt har per m boret tunnel i  $kgCO_2/m$ .

## 4.7 Samlet CO<sub>2</sub>-utslipp

Tabell 18: Samlet utslipp for alle utslippsfaktorer, oppgitt i kgCO<sub>2</sub>/m

<b>TBM A - ø 1,8 m</b> [kgCO <sub>2</sub> /m]				<b>TBM B - ø 2,4 m</b> [kgCO <sub>2</sub> /m]			
	3 km	5 km	10 km		3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	60.9	60.9	60.8	DRI 30, CLI 5	74.2	74.1	74.0
DRI 50, CLI 12	24.5	24.5	24.5	DRI 50, CLI 12	29.9	29.9	29.8
DRI 70, CLI 25	19.7	19.7	19.8	DRI 70, CLI 25	23.9	23.7	23.9
<b>TBM C - ø 3,0 m</b> [kgCO <sub>2</sub> /m]				<b>TBM D - ø 3,5 m</b> [kgCO <sub>2</sub> /m]			
	3 km	5 km	10 km		3 km	5 km	10 km
DRI 30, CLI 5	93.0	93.1	92.9	DRI 30, CLI 5	133.6	133.5	133.5
DRI 50, CLI 12	35.9	35.9	35.8	DRI 50, CLI 12	61.7	61.9	61.8
DRI 70, CLI 25	29.9	29.8	29.8	DRI 70, CLI 25	51.8	52.0	50.8

Tabell 18 viser en oversikt av samlet utslipp for alle kombinasjoner av de ulike bergmassene og tunnallengde. Her er utslipp fra stålförbruk, sikringsmaterial og transport av ansatte lagt sammen. Utslipet er fordelt på lengden av hver tunnel og er oppgitt i kgCO<sub>2</sub>/m. Alle verdier er hentet fra vedlegg K.

---

## 5 Diskusjon

I dette kapitlet blir resultatene fra kapittel 4 Resultater diskutert og sammenlignet med hverandre.

Flere prognosemodeller og beregninger for små dimensjons TBM har blitt presentert i denne oppgaven. Ved å bruke data fra både NTNU-modellen, Q-metoden, Fullprof, VegLCA og flere selvstendige rapporter, har det blitt gjort å beregne hvordan forbruket til fullprofilstunneler i mindre dimensjoner kan se ut. Videre evaluering av resultatene viser hvordan stålforbruk og  $CO_2$ -utslipp varierer stort ved å variere bergparametrene som inngår i LCA.

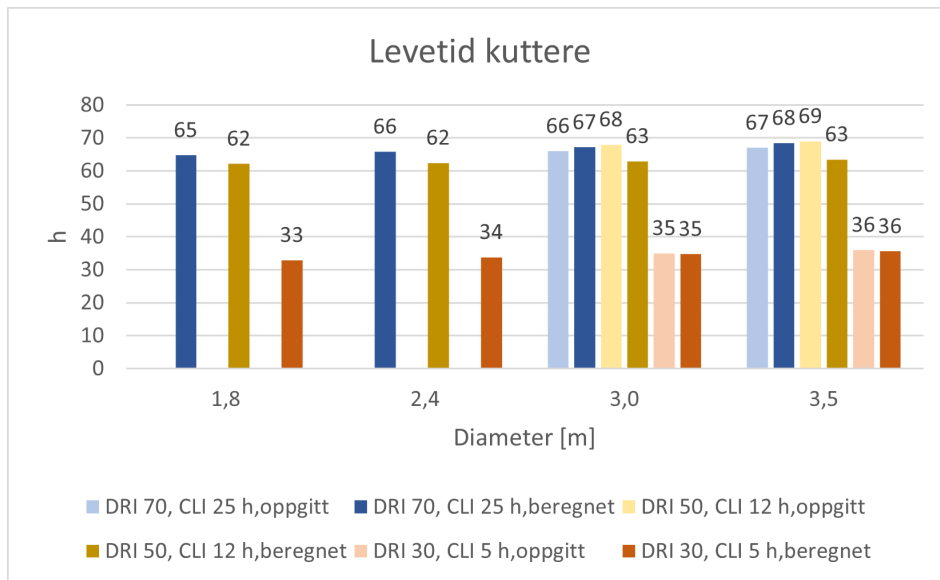
### 5.1 Prognosemodellene

Opgaven er basert på flere prognosemodeller for TBM som borer i hardt fjell. Prognosene har blitt laget for smådimensjons TBM. Prognosene for de ulike bergmassene har blitt sammenlignet med hverandre for å kunne få en forståelse av hvordan de ulike bergmassealternativene påvirker faktorer som inndrift og kutterforbruk. Evalueringen av disse modellene viser at resultatene fra prognosene stemmer godt med resultatene fra NTNU-modellen og Fullprof ved små dimensjoner av TBM. Ved økende dimensjoner vil avviket fra fra prognosene i forhold til Fullprof og NTNU-modellen øke.

Resultatene og sammenligningene av prognosemodellene for de ulike faktorene vil bli presentert i de neste underkapitlene.

#### 5.1.1 Levetid kuttere

Kuttere består av flere komponenter med ulik levetid, og det er derfor den komponenten med lavest levetid som blir den dimensjonerende for selve kutteren sin levetid. Kutteren må dermed byttes når denne komponenten er slitt ut. Ut fra kapittel 4.2 kommer det frem at det er kutterringen som blir den dimensjonerende komponenten. Slitasjen av kutterne vil være med å påvirke  $CO_2$ -utslippet ved at stålforbruket i prosjektene påvirkes.



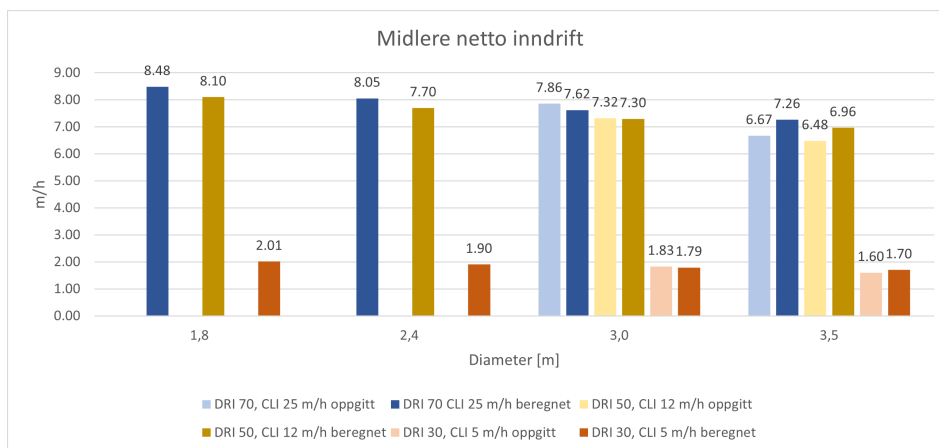
Figur 18: Levetid kuttere

Figur 18 viser en sammenlikning av kutterlevetiden på alle dimensjoner i de ulike bergmassealternativet. Vedsammenlikning av levetiden for kuttere som borer i bergmassen med DRI 70, CLI 25 og kuttere som borer i bergmassen DRI 50, CLI 12 er det ikke særlig stor forskjell i levetidene. Differansen mellom levetiden for bergmasse med DRI 50, CLI 12 og bergmasse med DRI 30, CLI 5 er større. Ser man på dimensjonen 1,8 m i diameter vil det være en differanse på 3 timer i levetiden mellom kutterne som kutter i DRI 70, CLI 25 og DRI 50, CLI 12, noe i praksis betyr svært lite. Det legges til grunn for noe usikkerhet i figuren, som betyr at levetiden for kuttere i disse bergtypene i praksis kan være den samme. For kutterlevetiden for DRI 3, CLI 50 er differansen på 29 timer i hvis den sammenlignes de to andre bergmassene. Det betyr at levetiden har blitt halvert. Dette begrunnes med at det er en veldig lav CLI som betyr at kutterne vil slites mye og fort. Ved lav CLI og rask nedsliting av kuttere vil kutterforbruket øke. Det betyr at prosjektet vil få et høyere forbruk av stål og et høyere utslipp knyttet til stålforbruket som vil vises i de totale  $CO_2$ -utslippene.

I figuren er levetid for diameterene 3,0 m og 3,5 m oppgitt. Disse er hentet ut fra Fullprof, som baserer seg på NTNU-modellen. Som fremkommet i figur 18 ligger de oppgitte verdiene på en litt høyere levetid enn de utregnede med prognosemodellene. Årsaken til dette er korreksjonsfaktorer som NTNU-modellen og Fullprof tar hensyn til. Dette er noe som prognosemodellene ikke har fanget opp. For å få en bedre prognosemodell kunne man ha brukt dataene fra flere dimensjoner i Fullprof. I hennhold til figuren øker differansen mellom beregnet levetid og oppgitt levetid i takt med at dimensjonene øker. Den beste måten å få et bedre beregnet resultat vil derfor være å få lagt inn en korreksjonsfaktor i prognoselikningen.



### 5.1.2 Midlere netto inndrift

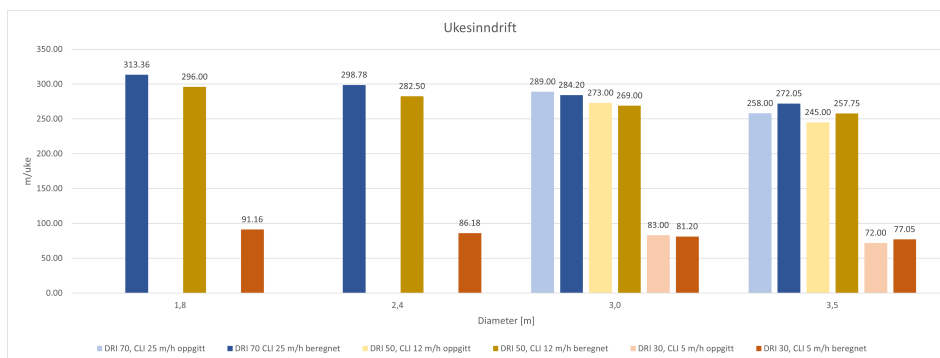


Figur 19: Midlere netto inndrift

Den midlere netto inndriften i figur 19 er hvor langt en TBM klarer å bore på 1 time. Med en lav midlere netto inndrift vil den totale boretiden per tunnel bli lengre. En lav midlere netto inndrift vil resultere i et høyere forbruk av kuttere og flere timer avskrevet på den økonomiske levetiden til maskinen. Det vil føre til et høyere totalt  $CO_2$ -utslipp knyttet til maskinen. Slik som vist i figur 18 er også inndriften ganske lik for alle TBMen i bergartene med DRI 70, CLI 25 og DRI 50, CLI 12. Fjellet DRI 70, CLI 25 er også mye oppsprukket, mens fjellet DRI 50, CLI 12 er mindre oppsprukket. Oppsprekningen gjør det lettere for maskinene å bore seg gjennom fjellet. Minsker en DRI til 30 ser en at inndriften synker med litt over 6 m/time. DRI verdien øker med 20 for hver bergmasse, likevel er det bare 0,28 m/time som skiller bergmassene med DRI 70 og DRI 50, og 6,32 m/time som skiller DRI 50 og DRI 30 for TBM 1,8 m i diameter. I fjellet med lav DRI er det i tillegg en lav CLI. Det betyr at kutterne slites fortere. Den lave inndriften skyldes ikke bare et lite borbart fjell, men også at maskinen oftere må stoppes for å få byttet kuttere. Selv om en høy DRI betyr at fjellet er lett borbart viser figuren altså at DRI-verdiene ikke har en lineære økning i takt med inndriften for boringen. Dette forklares med variasjon i CLI, stikningsgrad og kvartsinnhold i berget.

I hennhold til figur 18 ligger de oppgitte verdiene litt høyere enn de beregnede på TBMen med dimensjon på 3 m i diameter. I motsetning til figur 18 ligger de oppgitte verdiene litt under de beregnede på TBM med 3,5 m i diameter. Årsaken kan være at likningen NTNU-modellen beregner sin inndrift ut fra har noen korreksjonsfaktorer prognosemodellen ikke har klart å fange opp. Selv om det er noe forskjeller mellom beregnet og oppgitt inndrift er de ikke urovekkende store.

### 5.1.3 Ukesinndrift



Figur 20: Ukesinndrift

Figur 20 viser en sammenstilling av ukesinndriften for boring av tunnel i alle de tre ulike tunnallengdene, samt de ulike tunneldimensjonene. Midlere netto inndrift gir en god oversikt over hvor fort TBMen borer, og kan gi en god indikasjon hvordan boringen går over korte strekninger. Over lengre strekninger blir det vanskelig å se hvordan prosjektet ligger an i forhold til fremdriftsplanen. Ukesinndriften er en målemetode for inndriften som gir et bedre bilde på hvordan prosjektet ligger an i forhold til fremdriftsplanen. Ukesinndriften påvirkes mindre mye av korte uforutsette stopp eller korte strekninger med uforutsett geologi.

Ukesinndriften er basert på en 3-skifts turnus med 101 timer med drift per uke for alle tunnelene. Forholdstallet mellom inndriftene er derfor det samme som i figur 19. I likhet med den midlere netto inndriften ligger det myke og det middels harde bergmassealternativet relativt likt på inndriften for alle de 4 tunneldimensjonene. I ukesinndriften skiller harde bergmassealternativet seg ut med en veldig lav inndrift i alle tunneldimensjonene i forhold til de to resterende bergmassealternativene. Årsaken til dette er at en CLI på 5 sliter mye på kutterne og de må byttes oftere enn kutterne som kutter i bergmassene med CLI 12 og CLI 25. Dette medfører mer stopp i boringen, samtidig som den lave DRIen på 30 fører til at boringen alene har en lav inndrift.

Ved en lav ukesinndrift vil prosjektene ta lengre tid å gjennomføre. Det betyr at mer av den økonomiske levetiden til maskinen blir avskrevet per prosjekt. Dette fører til et høyere utslipp knyttet til maskinen. Forutsatt at levetiden til kutterne ikke øker samtidig som inndriften synker vil det generere et høyere kutterforbruk. Det betyr at stålforbruket går opp. Utslippet knyttet til stål vil øke på grunn av det økte kutterforbruket og en lengre brukstid for maskinen.

Ved en lavere inndrift vil prosjektet ta lengre tid. Det betyr at alle arbeidere er nødt til å reise flere turer til og fra anlegget noe som genererer et høyere  $CO_2$ -utslipp.

---

## 5.2 Påvirkningen av geologiske parametre

De valgte bergmassekvalitetene er valgt for at analysen skal inkludere så mye som mulig av bergtypene som finnes i Norge. Det er valgt et alternativ for hvert ytterpunkt av bergmasseparametrene og et alternativ midt mellom. Det er tatt med et alternativ med ekstremt hardt og lite borbart fjell og et alternativ med relativt mykt, mye oppsprekt og lettere borbart fjell og et alternativ mellom disse. I Norge finnes nesten utelukkende hardt fjell og derfor ble borbarheten variert i fra DRI 30 til DRI 70. CLI ble variert fra CLI 5 til CLI 25.

De geologiske parametrene utgjør den store variasjonen mellom resultatene. Det er kommet tydelig frem i verdiene for kutterforbruk og inntrengingshastighet. CLI påvirker i hovedsak levetiden til kutteren.

Inntrengingshastigheten blir påvirket av DRI. Dermed vil tilfellet med lavest DRI, sammen med som lavest CLI, ha høyest utslipp.

### 5.2.1 Borbarhet

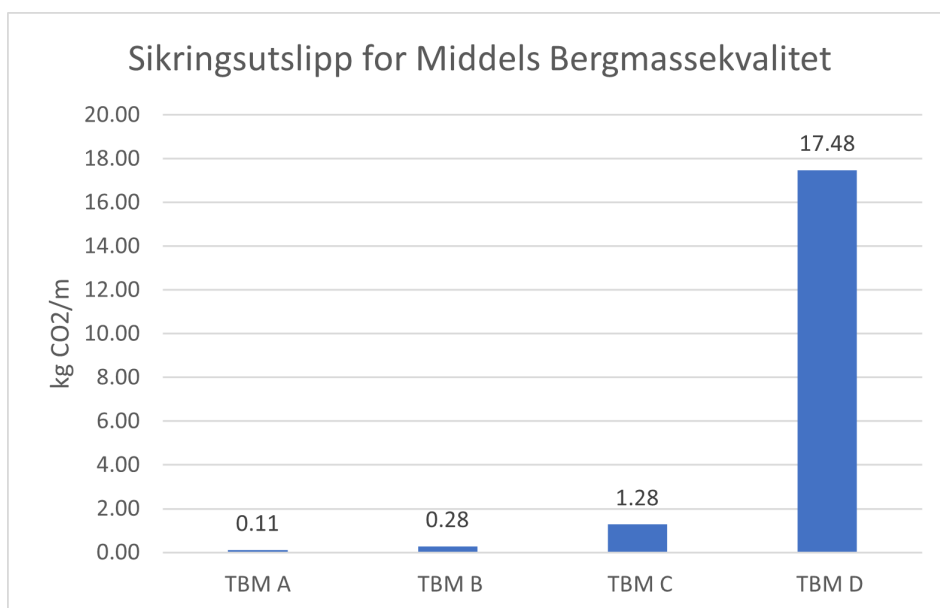
Borbarheten, DRI, har stor innvirkning på inndriften i tunnelene. Med en lav borbarhet betyr det at fjellet er vanskelig å bore i. Boringen tar derfor lengre tid, noe som kommer tydelig frem på inndriften i figur 19 og figur 20. Ut fra resultatene i figurene kommer det frem at borbarheten ikke har en lineær økning i inndrift. Med en lav inndrift og med samme levetid på kutterne vil det da føre til et høyere kutterforbruk, og derav også et høyere  $CO_2$ -utslipp. Den totale boretiden vil også øke som fører til flere reiser til og fra anlegget for de ansatte, og derav et høyere utslipp.

### 5.2.2 Kutterlevetidsindeks

Kutterlevetidsindeksen, CLI, påvirker slitasjen av kutterstålet. En lav CLI betyr at fjellet sliter mye på kutterne og kutterne må byttes ofte. Borbarheten i fjellet blir ikke påvirket av CLI verdien. CLI påvirker likevel inndriften gjennom frekvensen av borestopp for bytting av kuttere. Den lave DRIen sammen med den lave CLIen forklarer den lave inndriften i bergmassen DRI 30, CLI 5 i figur 19 og figur 20. Med en lav kutterlivsindeks vil kutterne slites forttere, og kutterforbruket vil øke. Det vil da føre til et høyere stålforbruk som vil påvirke  $CO_2$ -utslippet negativt.

## 5.3 Sikring

Sikringsbehovet ble bestemt ut fra bergmassekvalitetene og dimensjonen på tunnelene. Tabell 13 viser en liten forskjell mellom sikringsutslippet for de ulike tunnelene. Små tunneltverrsnitt krever lite sikring. TBM D har det største tverrsnittet som har blitt sett på i denne oppgaven, og krever også sprøytebetong som sikringsmiddel. TBM D er utslippet atskillig høyere utslipp tilknyttet sikring, på grunn av bruk av sprøytebetong.



Figur 21: Sikringsutslipp for middels bergmassekvalitet for hver TBM-type

Figur 21 viser det økende  $CO_2$  utslippet per m i tverrsnittene for middels bergmassekvalitet.

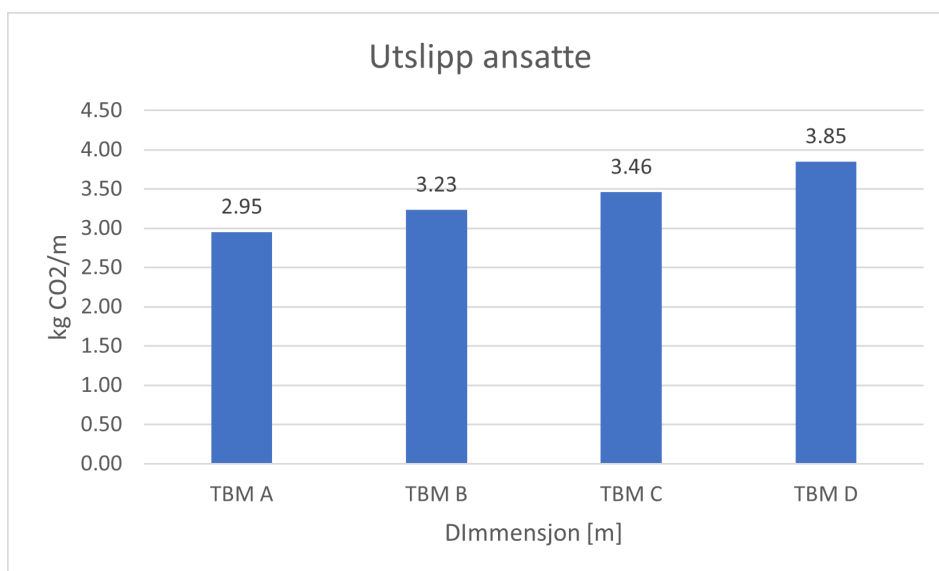
TBM A, TBM B og TBM C har alle moderate  $CO_2$  utslipp knyttet til sikring av tunnelene. TBM D skiller seg ut, med et høyere utslipp. I tunnelene boret av TBM A, TBM B og TBM C er det utelukkende brukt bolting som sikringsmetode. Ved bruk av sporadisk bolting blir det utelukkende boltet der det er nødvendig, slik som løse enkeltblokker, mindre svakhetssoner og felt med usikre steinblokker. Boltmengden øker med tverrsnittet, derav det gradvis økende  $CO_2$  utslippet for de 3 minste tunnelene.  $CO_2$ -utslippet fra boltene kommer fra stålproduksjonen og transport av bolter fra fabrikk til anleggsområdet.

Det ekstra utslippet i tunnelen til TBM D skyldes sporadisk bruk av sprøytebetong kombinert med en del mer bolting enn de resterende tunnelene.

Ut fra figur 21 kommer det frem at det er en  $CO_2$ -gevinst i å holde seg til tverrsnitt på 3,0 m i diameter eller mindre. Det vil ikke være nødvendig med bruk av sprøytebetong som sikringsmiddel, og de høye  $CO_2$ -utslippene knyttet til betongen kan unngås.

## 5.4 Ansatttransport

Ansatte har lite ekstra utslipp knyttet til jobb under arbeidstiden. Kraftverkene TBMene borer tunnelene for bygges ofte et stykke utenfor tettbebygde strøk og derfor bor de ansatte på brakker på anleggsområdet. Utslippene som har blitt beregnet knyttet til de ansatte kommer fra transport til og fra anleggsområdet.



Figur 22: Gjennomsnittlig utslipp hver TBM-type i middels bergmassekvalitet

Figur 22 viser det gjennomsnittlige utslippet av alle tunnallengdene for hver TBM dimensjon. Utslippet er beregnet fra programmet VegLCA og det er beregnet en reise til eller fra anlegget i uken siden de ansatte er 2 uker på jobb om gangen. Utslippet har blitt beregnet ut fra antall turer som er nødvendig under hele boreperioden og kan derfor knyttes direkte til inndriften i hver tunnel.

I beregningen av utslippet har det blitt lagt til grunn at alle de 20 ansatte kjører egne biler på fossilt brensel fra Dale i Sundfjord, der Hywer har sitt hovedkontor, til Mork kraftverk, en distanse på 190 km. For å kutte dette CO<sub>2</sub>-utslippet betydelig kan flere av de ansatte kjøre sammen til og fra anlegget. Det er også mulig bytte ut de bilene som går på fossilt brensel med elektriske biler, og oppmuntre til samkjøring. Når alle de ansatte bor så konsentrert som i en liten by som Dale ville de vært et enkelt tiltak å fylle opp bilene. Det vil føre til at utslippet på denne posten kan kuttes ned til 20-25 % av hva det er i dag avhengig av hvilke typer bilder de ansatte kjører.

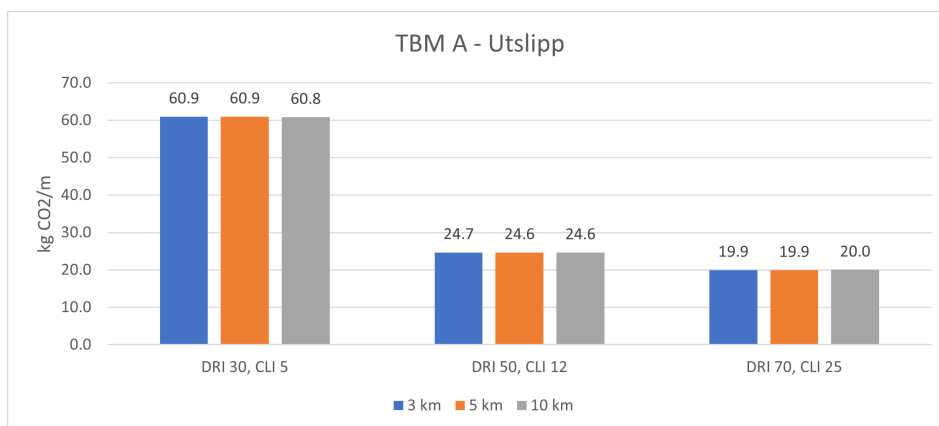
## 5.5 Tunnellengde

Det ble valgt å se på 3 ulike tunnallengder for å se om tunnallengden påvirker CO<sub>2</sub>-utslipp per m. Det var forventet noe variasjon i utslipp mellom de ulike tunnallengdene, men dette viste seg å ikke stemme.

Utslippet mellom de ulike tunnallengdene varierer lite på grunn av at alt utslipp blir fordelt på antall m tunnel. Som vist flere av tabellene i kapittel 4, er det minimal forskjell i utslipp mellom de ulike tunnallengdene.

Ut fra tabell 18 ser en at tunnallengden ikke har så mye å si på utslipp per meter. Maskinene har alle en økonomisk levetid som er hvor lenge maskinene kan bore før kostnadene for reparasjon blir så høye at det vil lønne seg økonomisk å kjøpe ny. Brukstiden til maskinen blir altså avskrevet. I de kortere tunnelene brukes mindre av den økonomiske levetiden opp og maskinene kan derfor brukes til flere prosjekter. Hele

$CO_2$ -utslippet fra maskinproduksjonen skal derfor ikke å bli med i LCA beregningene. For de lengre tunnelene må mer av utslippet fra produksjonen tas med i  $CO_2$  regnestykket da mer av den økonomiske levetiden blir brukt. Til gjengjeld blir utslippet per m det samme da utslippet blir fordelt på lengden av tunnelen, som blir vist i figur 23.



Figur 23: Utslipp TBM A

## 5.6 Samlet $CO_2$ -utslipp

Tabell 18 i kapittel 4.7 viser oversikt over de ulike utslippene for alle kombinasjoner av tunneldimensjoner, bergmassekvaliteter og tunnellengder. Utslippene inkluderer utslipp for stålforbruk, maskinener og kuttere, transport av ansatte, sikringsforbruk og transport av sikringsmateriale. Det samlede utslippet ble fordelt på antall meter tunnel for å få sammenlignbare tall for alle tunnelene.

Som tabellen viser er det ingen merkbar økning i  $CO_2$  utslipp ved økning av tunnellengdene. Endingen av  $CO_2$  utslipp påvirkes ved endring av bergmasse. De største utslippene knyttes til utslipp fra forbruket av stål. Mye av stålforbruket kommer fra kuttere. Kutterne er en forbruksdel av maskinene. I vedlegg F er det vist at selve maskinen, TBM D, DRI 30, CLI 5, bare står for 16.17 kg  $CO_2/m$ . Sikringen står for opp til 14 kg  $CO_2/m$ , vist i vedlegg I. Utslippene fra de ansatte, vist i vedlegg J, ligger på 6 kg  $CO_2/m$ . Det resterende utslippet blir på litt over 90 kg  $CO_2/m$  som kommer fra forbruket av kuttere.

Kutterne er det som står for det største  $CO_2/m$ -utslippet. Det vil derfor være hensiktsmessig å utvikle kutterringer med en lengre levetid, slik at kutterforbruket og stålforbruket reduseres. Redusert forbruk av kuttere vil redusere  $CO_2$ -utslippet betydelig.

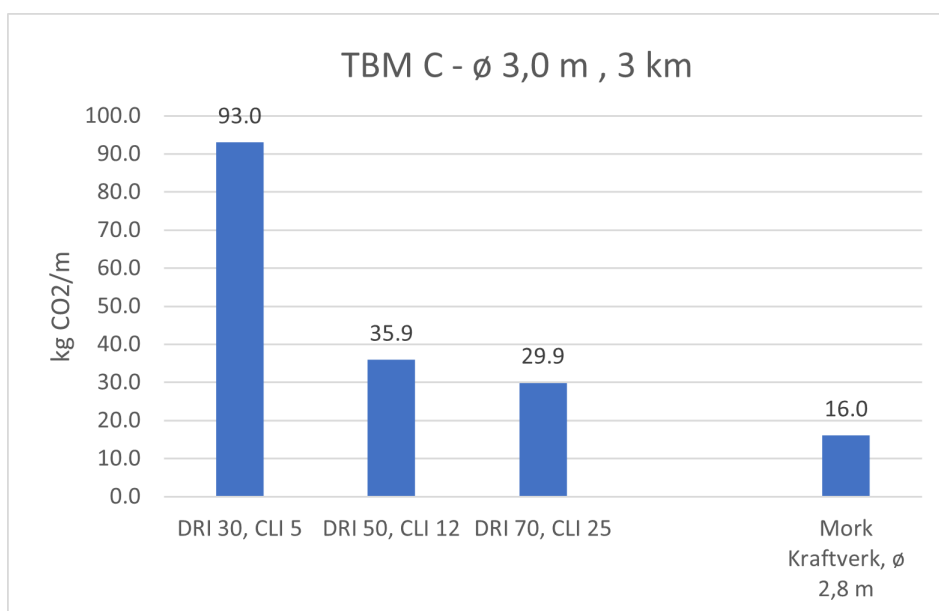
Utslippet fra sikring er minimalt på de 3 minste tunnelene med dimensjon 1,8 m, 2,4 m og 3,0 m i diameter. Utslippet utgjør ikke noe merkbar forskjell i det totale utslippet. Er bergmassen er hard nok og har en begrenset mengde sprekker vil bolting være tilstrekkelig sikring, og  $CO_2$ -utslippet tilknyttet sikringen vil holdes lavt. Ved behov for sprøytebetong vil utslippene knyttet til sikring ha merkbar økning, og vil påvirke det samlede utslippet. Betong har en utslippsfaktor på 1. Det betyr at 1 tonn betong slipper ut 1 tonn med  $CO_2$ . Mengden betong som blir brukt i den mykeste bergmassen i tunnel D vil derfor påvirke det totale

utslippet betydelig.

Utslipp knyttet til ansatte vil litt påvirkning på det totale utslippet. Maksinene er i samme størrelsesområde og har samme bemanning, som forklart i kapittel 4.6. Det som utgjør forskjell ved utslippene knyttet til de ansatte blir antall turer til og fra anlegget. Antall turer til og fra anlegget blir bestemt ut fra total boretid i uker. Utslippene knyttet til ansatte vil derfor påvirke det samlede utslippet ulikt på de ulike tunnelene ut fra hardheten på berget og lengden på tunnelen.

## 5.7 Sammenligning med Mork Kraftverk

I bærekraftsrapporten til Hafslund det gjennomført en LCA for Mork kraftverk. Denne rapporten inneholder data som kan brukes i en sammenligning med TBM C i denne oppgaven. I følge rapporten hadde boringen av tunnelen til Mork kraftverk et utslipp på 16,04 kg  $CO_2/m$ . (Standal et al. 2021)



Figur 24: Sammenligning mellom utslippet fra Mork Kraftverks 51 boring, versus TBM C med 3 km tunnellengde og middels bergmassekvalitet.

Figur 24 viser utslippene knyttet til boreprosessen av prosjektet på Mork kraftverk sammenlignet med utslippene til denne oppgavens tunneler i middels hard bergmasse.

TBMen i denne oppgaven som er nærmest i størrelse til TBMen "Snøhvit" som ble bruk ved boring av Mork kraftverk er TBM C på 3,0 m i diameter. Utslippene fra Mork kraftverk er nesten halvparten av utslippene fra den teoretiske TBM C. Dette skyldes de ulike faktorene som har blitt tatt hensyn til. Som nevnt i kapittel 2.5, tar ikke rapporten til Hafslund høyde til stålforbruk, sikring eller persontransport, slik som blir gjort i denne oppgaven. Hafslund har derimot tatt med faktorer som ikke har blitt inkludert i denne oppgaven, slik som deponering av masser og frakt av maskiner til anlegget. Stålforbruket har ikke blitt inkludert i Hafslund sin rapport. Stålforbruk er står for det høyeste  $CO_2$ -utslippet i denne oppgaven. Dette er med på

---

forklare hvorfor denne oppgaven har kommet frem til et høyere utslipp enn utslippene ved Mork kraftverk.

En annen faktor denne oppgaven har vist at har en stor påvirkning på  $CO_2$ -utslippene er bergmassekvaliteten. Det stod ingenting om hvordan berget som ble boret i på Mork er, og det er derfor vanskelig å vite hvilken DRI- og CLI-verdier fjellet hadde, oppsprekkningsgraden, stikningsgraden og kvartsinholdet. Dette er alle geologiske parametre som påvirker boringen, og dermed også påvirker  $CO_2$ -utslippet. De ulike bergmassekvalitetene i denne oppgaven er to ekstremer på hver sin side av verdiene for hardt fjell, med DRI 30 og CLI 5, med lite oppsprukket fjell, og DRI 70 og CLI 25, med høy oppsprekkningsgrad, og en mellomting med DRI 50 og CLI 12 med middels oppsprekkningsgrad. Uten å vite disse verdiene for fjellet som ble boret i på Mork kraftverk vil det være vanskelig å vite akkurat hvilken bergmassekvalitet som det er best å sammenligne med.

## 5.8 Feilkilder

En av feilkildene i oppgaven er at mye av  $CO_2$ - utslippene beregnet kommer fra data hentet ut fra prognosemodeller, A, B og C øker differansen mellom de beregnede verdiene fra prognosemodellene og de oppgitte verdiene fra Fullprof mens dimensjonene øker. Det betyr at prognosemodellene ikke fungerer optimalt ved alle TBM dimensjoner. Ved å legge inn eksisterende data fra flere maskindimensjoner vil resultatet bli mer nøyaktige prognosemodeller også for større dimensjoner TBM. Ved et større datagrunnlag kan prognosemodellene klare å plukke opp korreksjonsfaktorer som kan gjøre resultatene mer nøyaktige.

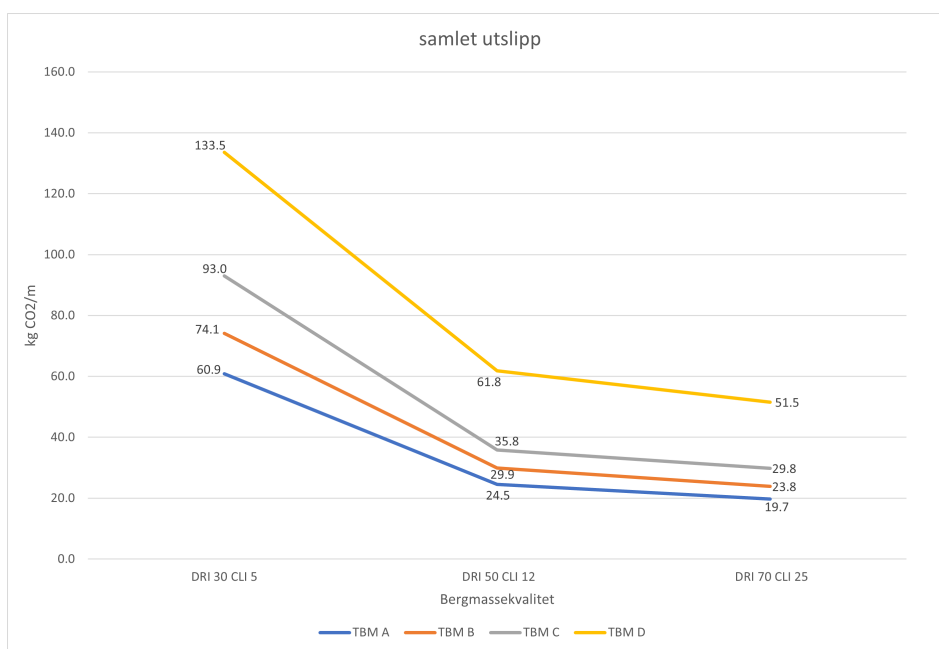
En annen feilkilde er at i livsløpsanalysen kan gruppen kun basere seg på  $CO_2$ -ekvivalenter som er tilgjengelige. Ekvivalentene er av varierende alder og vil dermed gi minskede nøyaktigheten på utslippstallene i LCAen.



## 6 Konklusjon

Oppgaven har sett på  $CO_2$ -utslipp ved boring av tunneler med smådimensjons TBM. Det har blitt utført en livsløpsanalyse som har tatt for seg boreprosessen ved 1 m boret tunnel. Det har blitt sett på 4 ulike TBMer i ulike dimensjoner, som har blitt kombinert med i 3 ulike bergmasser. Livsløpsanalysen har blitt gjennomført i Excel ved å lage prognosemodeller for for å regne ut kutterforbruk og inndrift i de ulike tunnelene. Utslippene fra kutterforbruket og maskinen ble beregnet som stålutslipp. Utslipp for sikring og utslipp knyttet til transport av ansatte ble beregnet hver for seg.  $CO_2$ -utslippene for 1 m boret tunnel ble funnet ved å legge sammen alle tre delutslippene.

Det ble konkludert med at lengde på tunnel, sikringsmengde og transport av ansatte har lite å si på utslippene per m boret tunnel. Hoveddelen av utslippene kommer fra stålforbruk, i hovedsak kuttere, vist i figur 25.



Figur 25: Sammenligning av samlet utslipp med TBM og bergmasse.

Resultatene fra denne oppgaven ble vurdert opp mot Hafslund ECOs utslippsrapport for anleggsprosjekter. Denne sammenligningen viste seg å ha liten verdi, da faktorene inkludert i analysen ikke var sammenlignbare og til dels ukjente. Gruppen mener likevel at den utførte analysen er troverdig. Differansen i utslippene mellom Hafslund sin rapport og denne oppgaven forklares med utslippet tilknyttet stålforbruket som er inkludert i denne oppgaven.

Gruppen valgte å ikke gjøre analysen spesifikk for ett prosjekt for å gjøre resultatene relevante for flere prosjekter. Dette med tanke på at dette ikke er en LCA av et enkelt prosjekt, men en tilnærming som skal kunne dekke en generell tilnærming til smådimensjons TBM.

---

## 7 Videre arbeid

I dette kapitlet deler gruppen sine tanker om mulige temaer for videre arbeid, for å komplementere eller bygge videre på modellen.

LCAen begrenser seg til det som inngår i selve boringen og utbyggingen av én meter boret fullprofilstunnel. Å utvide modellen til å omfatte flere faktorer vil gjøre modellen mer nøyaktig. Disse faktorene vil da kunne analysere alle utslipp som genereres i et prosjekt. Noe av det som ikke har blitt tatt med i beregningene er utslipp fra transport og rigg av TBM, bygging av anleggsvei, klargjøring av oppstillingsplass, driving av tunnelporten, transport av masser til deponi, nedrigging av TBM og oppstillingsplass. Ved å legge disse momentene til i beregningene vil en få ut et mer helhetlig  $CO_2$  utslipp som tar for seg hele prosessen ved å lage en tunnel.

### 7.1 Videre arbeid med prognosemodeller

I oppgaven ble det bare brukt data fra 5 ulike TBM dimensjoner for å beregne levetiden til kutteren. Ved å legge inn data fra flere dimensjoner vil prognosemodellene bli bedre og gi mer nøyaktige resultater. For å kvalitetssikre prognosemodellene kunne en også verifisere de estimerte tallene fra prognosemodellen opp mot reelle tall fra næringen. Dette er arbeid som ikke ble prioritert i denne oppgaven. En slik verifikasjon vil gi økt troverdighet til prognosemodellen.

Denne oppgaven har utelukkende benyttet NTNU-modellen til å beregne og estimere levetiden på kutteren. Det finnes flere metoder for å finne levetiden til kutteren. Det kunne derfor ha blitt laget prognosemodeller ut fra disse for å sammenligne med oppgavens prognoser. Kutterforbruket er en stor del av utslippene til et TBM-prosjekt, og det vil derfor være fornuftig å øke levetiden til disse.

---

## Referanser

- Anlegg&Transport (2023). *TBM-maskinen i gang på vanntunnelen*. URL: <https://www.at.no/anlegg/tbm-maskinen-i-gang-pa-vanntunnelen/729512> (visited on 25th Apr. 2023).
- Balci Bilgin, Copur (2013). *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. CRC press.
- Bane-Nor (2023). *Slik bygde vi Blixtunnelen*. URL: <https://www-banenor-no.banenor.no/prosjekter/alle-prosjekter/follobanen-dobbeltspor-oslo-ski/om-follobanen/slik-bygde-vi-blixtunnelen/> (visited on 25th Apr. 2023).
- Braa, J and R Hopland (2017). *The New Ulriken Tunnel*. NTNU.
- Bruland, Amund (2000a). *Hard Rock Tunnel Boring Vol. 1 - Background and Discussion*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/266321465\\_Hard\\_Rock\\_Tunnel\\_Boring\\_Vol\\_1\\_-\\_Background\\_and\\_Discussion](https://www.researchgate.net/publication/266321465_Hard_Rock_Tunnel_Boring_Vol_1_-_Background_and_Discussion) (visited on 13th Apr. 2023).
- (2000b). *Hard Rock Tunnel Boring Vol. 3 - Advance Rate and Cutter Wear*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/272357593\\_Hard\\_Rock\\_Tunnel\\_Boring\\_Vol\\_3\\_-\\_Advance\\_Rate\\_and\\_Cutter\\_Wear](https://www.researchgate.net/publication/272357593_Hard_Rock_Tunnel_Boring_Vol_3_-_Advance_Rate_and_Cutter_Wear) (visited on 25th Mar. 2023).
- (2016). *Anlegsteknikk GK Kompendium*. NTNU.
- EEA (2023). *Life cycle assessment*. URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/life-cycle-assessment> (visited on 19th Apr. 2023).
- energidirektorat, Norges vassdrags- og (2023). *Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk*. URL: [https://publikasjoner.nve.no/veileder/2010/veileder2010\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2010/veileder2010_01.pdf) (visited on 19th Apr. 2023).
- EPD-Norge (2023). *Envioiremental product declaration NC-bolt M20 Pc-coat*. URL: [https://www.epd-norge.no/getfile.php/1332456-1683102502/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5konstruksjoner/NEPD-4427-3691\\_NC-bolt-M20-Pc-Coat-.pdf](https://www.epd-norge.no/getfile.php/1332456-1683102502/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5konstruksjoner/NEPD-4427-3691_NC-bolt-M20-Pc-Coat-.pdf) (visited on 5th May 2023).
- Ghella (2023). *Legacy Way Project (formerly Northern Link)*. URL: <https://ghella.com/en/projects/legacy-way-project-formerly-northern-link> (visited on 19th Apr. 2023).
- Hardangermaskin (2023). *TBM, Tunnel Boring*. URL: <https://hardangermaskin.no/tunnel/> (visited on 25th Apr. 2023).
- Herrenknecht (2023). *Gripper TBM*. URL: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/gripper-tbm/> (visited on 19th Apr. 2023).
- IEA (2022). *Iron and Steel, tracking report*. IEA.
- Log (2022). *Fullprofilboring av tunneler*. Forelesning.
- Macias, Francisco Javier (2016). 'Hard Rock Tunnel Boring'. In: URL: <https://tex.stackexchange.com/questions/175106/make-phd-citations-say-dissertation-rather-than-thesis> (visited on 22nd Mar. 2023).
- Miljødirektoratet (2023). *Tabeller for omregning fra energivare til utslipp*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabeller-for-omregning-fra-energivarer-til-kwh/> (visited on 25th Apr. 2023).
- MIP (2023). *Jern-Erna*. URL: <https://www.mip.no/jern-erna/> (visited on 25th Apr. 2023).
- NTH (1983). *Hard Rock Tunnel Boring, Project Report 1-83*. Norges Tekniske Høgskole.

- 
- ES-Posten (2020). *E-service – nå med eget TBM-team*. Entreprenørservice.
- Pretec (2023a). *Environmental product declaration, NC bolt M20 Pc-Coat*. EPD-Norge.
- (2023b). *Kombinasjonsbolt – NC-bolt*. URL: <https://pretec.no/produkt/kombinasjonsbolt-nc-bolt/> (visited on 5th May 2023).
- Robbins (2023a). *SINGLE SHIELD TUNNEL BORING MACHINES*. URL: <https://www.robbinstbm.com/products/tunnel-boring-machines/single-shield/> (visited on 14th Apr. 2023).
- (2023b). *Svartisen Hydroelectric Project*. URL: <https://www.robbinstbm.com/projects/svartisen-hydroelectric-project/> (visited on 25th Apr. 2023).
- Sphera (2023). *what is life cycle assessment (LCA)*. URL: <https://sphera.com/glossary/what-is-a-life-cycle-assessment-lca/> (visited on 18th Apr. 2023).
- SSB (2023). *Elektrisitet*. URL: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet> (visited on 19th Apr. 2023).
- Standal, C. P. S., V. H Hoch-Nielsen and S. H. Günther (2021). *Beregning av klimagassutslipp for anleggsprosjekter med G-res Tool*. Hafslund ECO.
- Statkraft (2023). *Vannkraft*. URL: [https://www.statkraft.no/var-virksomhet/vannkraft/?gclid=EAlaIQobChMlpu7s6-mw\\_gIVZI9oCR1Etw3AEAAAYASAAEgJitfD\\_BwE](https://www.statkraft.no/var-virksomhet/vannkraft/?gclid=EAlaIQobChMlpu7s6-mw_gIVZI9oCR1Etw3AEAAAYASAAEgJitfD_BwE) (visited on 17th Apr. 2023).
- TU (2023). *Her har de brukt over 20 år på 9 kilometer tunnel*. URL: <https://www.tu.no/artikler/her-har-de-brukt-over-20-ar-pa-9-kilometer-tunnel/233515> (visited on 25th Apr. 2023).
- undersøkelse, Norges Geologiske (2023). *Bruk av Q-systemet*. URL: [https://prod.ngi.no/globalassets/dokumenter/forskning-og-radgivning/handbok-q-systemet-norsk-nov-2015-nettutg\\_oppdatert2-juni-2022.pdf](https://prod.ngi.no/globalassets/dokumenter/forskning-og-radgivning/handbok-q-systemet-norsk-nov-2015-nettutg_oppdatert2-juni-2022.pdf) (visited on 12th May 2023).
- Vegvesen, Statens (2023). *Bruk av VegLCA*. URL: <https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/klima-miljo-og-omgivelser/utslipp-av-klimagasser/bruk-av-veglca/> (visited on 6th May 2023).

---

## Appendix

### A Excelark: DRI 30, CLI 5

(Digitalt vedlegg)

---

**B Excelark: DRI 50, CLI 12**

(Digitalt vedlegg)

---

## **C Excelark: DRI 70, CLI 25**

(Digitalt vedlegg)

---

## **D Excelark: Total byggetid tunneltid**

(Digitalt vedlegg)



---

## **E Excelark: Stk. Forbruk**

(Digitalt vedlegg)

---

## **F Excelark: Materialmengde**

(Digitalt vedlegg)

---

## **G Excelark: CO2 Utslipp**

(Digitalt vedlegg)

---

## **H Excelark: Utslipp Tunnel**

(Digitalt vedlegg)

---

## **I Excelark: Utslipp Sikring**

(Digitalt vedlegg)

---

## **J Excelark: Utslipp Ansatte**

(Digitalt vedlegg)

---

## **K Excelark: Samlet Utslipp**

(Digitalt vedlegg)

---

## **L Q-systemet**

(Digitalt vedlegg)