

LCA-analyse av en ny, glassbasert vann- og frostsikringsløsning i tunnel

Åshild Bruun-Gundersen

VEILEDER

Reyn Joseph O`Born

Universitetet i Agder, 2022

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Masteroppgave ved UiA

(Denne siden holdes blank)

Obligatorisk egenerklæring

1.	Jeg/vi erklærer herved at min besvarelse er mitt eget arbeid, og at jeg ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none">- ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands.- ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.- ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.- har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.- ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det foreligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg har satt meg inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatteren har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjennelse.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av masterprogrammet for Bygg ved Universitetet i Agder. Masteroppgaven er den avsluttende oppgaven i emnet BYG508 og ble utarbeidet i siste semesteret.

Jeg vil begynne med en takk til min veileder Reyn Joseph O`Born for sitt smittende engasjement for sirkulære løsninger og LCA som metode for å beregne miljøpåvirkninger. Hadde det ikke vært for at det var nettopp han som var foreleser i BYG404 Livsløpsanalyse av konstruksjoner, så hadde trolig min masteroppgave sett helt annerledes ut. Flaks for meg at O`Born ville være min veileder! Jeg har fått helt super oppfølging og masse konstruktive og nyttige innspill underveis. Jeg vil også takke Foamrox som har bidratt stort til datainnsamling, noe som har vært helt avgjørende for å lykkes med LCA-analysene og masteroppgaven.

Å ta en mastergrad i voksen alder er mer krevende enn man skulle tro, særlig når det kombineres med en fulltidsjobb og familie. Jeg har stadig vært i tvil på hvor tiden skal hentes fra, men det har gått takket være heilagjengen hjemme som har stilt opp med tålmodighet, kaffe og oppmuntrende ord gjennom det siste halvannet året.

Jeg håper denne masteroppgaven kommer til nytte og kan bidra til å inspirere andre til å se muligheter for nye materialer og løsninger når veier og tunneler skal bygges. Det skjer mye spennende teknologiutviklingen ute i samfunnet og denne masteroppgaven peker på noen av mulighetene som ligger foran oss. Verden må bli mer sirkulær og jeg må tro på at det er mulig å nå verdens klima og miljømål gjennom utvikling av ny teknologi og innovasjon.

Summary

This master thesis addresses some opportunities of reducing the environmental impacts when planning and construction of a road tunnel. It includes a LCA for two different approaches of tunnel lining; a new solution of cellular glass boards (Foamrox) compared to a traditional concept of PE-foam and shotcrete. The case study is Torsbuåstunnelen in Arendal, Norway. The conducted LCA are in accordance with ISO 14040/44 standards and focus on greenhouse gas emissions associated with the material extraction, production of materials and transportation to site. Operation and maintenance of the solutions are not included. The lifetimes of the solutions are not calculated, due to lack of information and experience of the new solution of cellular glass boards.

Norway is committed to reduce greenhouse gas emissions by at least 50 % by 2030. This study could be interesting for stakeholders working to achieve this goal, and even contractors working to reduce greenhouse gas emissions when constructing tunnels.

The global warming potential (GWP) for Foamrox-solution is higher than the traditional solution of PE-foam and shotcrete. The Foamrox solution represents 2.115,6 ton CO_2 -eq for Torsbuåstunnelen, and the traditional solution of PE-foam and shotcrete represents 1.224,5 ton CO_2 -eq. One lane in the case tunnel is 750m long, which means the Foamrox solution represent 2,8 ton CO_2 -eq per meter tunnel, and the solution of PE-foam and shotcrete represents 1,6 ton CO_2 -eq pr meter. Transport, source of energy and amount of energy got significant impact on the total GWP. The wall elements are identical in both solutions, and the total GWP could be reduced by 115 ton CO_2 -eq by choosing a local production. Energy consumption in production phase is the main reason why Foamrox solution have the highest amount of GWP, and an optimized solution could reduce the GWP by 483,5 ton CO_2 -eq for this product.

There is a lack of research studies on the new solution of cellular glass boards as insulation material for tunnel lining. This study shows that the product has potential, but some optimizations still remains.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring	2
Publiseringsavtale.....	3
Forord	4
Summary	5
Figurliste	8
Tabelliste	9
Forkortelser	10
1. Innledning	11
2. Samfunnsperspektiv.....	13
2.1 Klimamål.....	13
2.2 FNs bærekraftsmål	16
3. Kunnskapsbakgrunn	18
3.1 Krav ved bygging av tunnel.....	18
3.1.1 Trafikksikkerhet	18
3.1.2 Brannsikkerhet	19
3.2 Tunneldriving.....	20
3.3 Krav til tunnelkledning	24
3.3.1 Nettarmert sprøytebetonghvelv med PE-skum	26
3.3.2 Betongelementer.....	29
3.3.3 Foamrox.....	30
3.4 Litteraturgrunnlag	31
4 Forskerspørsmål.....	33
5 Case/materialer.....	34
5.1 Case: Torsbuåstunnelen	34
5.2 Materiale: vann- og frostsikring av celleglassplater.....	35
6 Metode.....	38
6.1 Litteraturstudie.....	38
6.2 Life Cycle Assessment (LCA)	38
6.2.1 Hensikt og omfang.....	38
6.2.2 Livsløpsregnskap (LCI)	40
6.2.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA).....	46
6.2.4 Tolkning	46
7 Resultat	47

7.1	Resultat av litteraturstudie.....	47
7.1.1	Forskning på miljøpåvirkning av tunnelkledning.....	47
7.1.2	Forskning på celleglass	50
7.1.3	Studier av Polyurea membran.....	54
7.2	Resultat fra LCA-analysen.....	55
7.2.1	Resultat LCI – materialforbruk.....	55
7.2.2	Resultat av LCA-analyse.....	58
8.	Diskusjon	66
9.	Konklusjon.....	74
10.	Anbefalinger	75
11.	Bibliografi	76
12.	Vedlegg.....	80

Figurliste

Figur 1.1 Verdens lengste vegtunnel, Lærdalstunnelen, ref [8]	11
Figur 2.1 Klimagassutslipp i BAE-sektoren viser at bygging av bruer og tunneler utgjør 20% av Norges klimagassutslipp i anleggsvirksomheten, ref [19]	14
Figur 2.2 Utslipp fordelt på innsatsfaktor i byggefasen av prosjekt E39 Lyngdal vest – Sandnes, ref [20]	15
Figur 2.3 Beregnete klimagassutslipp fordelt på innsatsfaktorer i byggefasen i tonn CO2-ekv. for prosjekt E6 Kvithammer – Åsen.	15
Figur 2.4 Nasjonal transportplans overordnede mål [8]	16
Figur 2.5 FNs bærekraftsmål	17
Figur 3.1 Boring av injeksjonshull i Bærumstunnelen, ref [31]	20
Figur 3.2 Illustrasjon av boring, lading og sprengning.....	21
Figur 3.3 Illustrasjon av utlasting.....	21
Figur 3.4 Illustrasjon av rensk og sikring	21
Figur 3.5 Ventilasjonskanal og påhugg, Bærumstunnelen	22
Figur 3.6 TBM i Follobanen. Bilde: Jernbaneverket.....	22
Figur 3.7 Kjente og løsninger for tunnelkledninger.....	25
Figur 3.8 Tunnelklasse A-E, jfr. N500 kap 5.2-1.....	25
Figur 3.9 Normalprofil for T9,5, ref [32].....	26
Figur 3.10 Prinsippskisse for montering av PE-plater med sikringsbolter og dilatasjonsfuger	27
Figur 3.11 Anvisning til innfesting av bolter i fast berg	27
Figur 3.12 Prinsippskisse for vann- og frostsikringsløsning av nettarmert sprøytebetonghvelv med PE-skum og føringskant av betong	28
Figur 3.13 Prinsippskisse for vann- og frostsikringsløsning med helstøpt betonghvelv	29
Figur 3.14 Montering av betongelementer	29
Figur 3.15 Utforming av fundament for veggelementer i betong.....	30
Figur 3.16 Celleglassplater fra Glapor, bilde: fra Foamrox hjemmeside	30
Figur 3.17 Foamrox-plater, her i fabrikk i Froland med nylagt membran. Foto: privat	31
Figur 3.18 Konsept for gjennomgående betongutstøping	32
Figur 3.19 Bildet til venstre viser en ikke uvanlig kontur i en norsk samferdselstunnel, mens bildet til høyre viser en god kontur i en svensk forsøktunnel.....	33
Figur 5.1 Strekningen E18 Tvedestrand - Arendal, ref [43]	34
Figur 5.2 Oversikt Torsbuåstunnelen, ref vedlegg 1	35
Figur 5.3 Foamrox-hvelv	36
Figur 5.4 Geometri normalprofil Burbergtunnelen med Foamroxhvelv, ref: vedlegg 4	36
Figur 6.1 Systemgrenser for LCA-analysen.....	39
Figur 6.2 Flytskjema for Foamrox-hvelv, konsept B	40
Figur 6.3 Tunnelprofil T13,2 med kombinasjon av sprøytebetong og veggelementer, ref vedlegg 3 s.15	41
Figur 6.4 Geometri fundament til veggelementer, ref vedlegg 2 s.68.....	42
Figur 6.5 Analysemodell av sprøytebetonghvelv	43
Figur 6.6 Blekksprut, stålskive med påsveiset armering. Lengde diagonalt ca 600mm.....	43
Figur 7.1 Tunneler: fordeling av GWP pr innsatsfaktor.....	48
Figur 7.2 Potensielle miljøpåvirkninger for ulike tunnelprofiler	50

Figur 7.3 Resultat av LCA-analyse for ulike skummingsmidler.....	53
Figur 7.4 Energiforbruk ved produksjon av en celleglassplate á 1,25kg	53
Figur 7.5 GWP for NaOH-basert celleglassplate på 1m2x1cm, fordelt på ulike energikilder	53
Figur 7.6 Miljøpåvirkning av tunnel med tradisjonell tunnelkledning	58
Figur 7.7 Miljøpåvirkning av tunnel med Foamrox-hvelvløsning	60
Figur 7.8 Grafisk fremstilling av co2-utslipp fordelt på konsept A og B.....	62
Figur 7.9 Prosentvis fordeling av co2-utslipp i produksjon av Polyurea	63
Figur 7.10 Prosentvis fordeling av GWP for polyurea	63
Figur 7.11 Figur 7.9 LCA for en energioptimalisert løsning for produksjon av celleglassplater.....	64

Tabelliste

Tabell 3-1 Sammenstilling av noen fordeler og ulemper ved to byggemetoder for tunnel; konvensjonell metode og TBM.....	23
Tabell 6-1 Materialsammensetning celleglassplater.....	45
Tabell 7-1 Materialforbruk for veggelementer	55
Tabell 7-2 Materialforbruk for B45 MF40	55
Tabell 7-3 Materialforbruk, sprøytebetonghvelv	56
Tabell 7-4 Materialsammensetning av sprøytebetong B35	56
Tabell 7-5 Materialsammensetning av Foamrox-hvelv	56
Tabell 7-6 Transportberegninger i LCA-analysene	57
Tabell 7-7 Energibehov i produksjon.....	57
Tabell 7-8 Kategoriserte miljøpåvirkninger fra tradisjonell tunnelkledning	59
Tabell 7-9 Kategoriserte miljøpåvirkninger fra tunnelkledning med Foamrox-hvelv	61
Tabell 7-10 LCA-beregning av GWP for to ulike vann- og frostsikringsløsninger.....	62
Tabell 7-11 co2-ekv for celleglassplatene	63
Tabell 7-12 Oversikt mengde og co2-ekv for begge vann- og frostsikringsløsningene.....	64
Tabell 7-13 LCA for en energioptimalisert løsning for produksjon av celleglassplater	65
Tabell 7-14 Utslipp fra transport, konsept A.....	65
Tabell 7-15 Potensiale for reduksjon av GWP for veggelementer	65

Forkortelser

BAE	Bygg, anlegg og eiendom. En ofte brukt betegnelse for sektoren.
CO2-ekv	CO2-ekvivalenter er en benevning som brukes for å kunne sammenligne de ulike klimagassenes evne til å varme opp atmosfæren. Utslipp av en gitt klimagass målt i CO2-ekvivalenter er et uttrykk for hvor mye CO2 som skal til for å gi tilsvarende oppvarming.
EPD	Environmental Product Declaration
FU	Functional unit/Funksjonell enhet
GWP	Globalt oppvarmingspotensial er et uttrykk for hvor sterk klimaeffekt gassen har, og brukes som omregningsfaktor. GWP for CO2 er per definisjon lik 1, mens metan har GWP på 28 og lystgass har 273.
LCA	Life Cycle Assessment. En metodikk for å beregne miljøpåvirkninger
LCI	Life Cycle Inventory. En oversikt over input og output i et produktsystem, som for eksempel råmaterialer, energi, og utslipp til land og vann. Dette er fase i LCA-analyser.
NTP	Nasjonal transportplan. Vedtas i Stortinget hvert 4de år og er en plan for hvordan det i perioden skal arbeide i retning av det overordnede målet for transportsektoren
SIITS	<i>Styring av sårbarheter i fremtidens integrerte intelligente transportsystemer</i> . Et samarbeidsprosjekt med blant annet Tryg Forsikring, Statens Vegvesen, Statens jernbanetilsyn, Universitetet i Stavanger, Sintef Digital, ITS Norway.
TBM	Tunnelboremaskin
ÅDT	Årsdøgntrafikk

1. Innledning

Tunneler har spilt en betydelig rolle som en del av det norske veinettet i godt over 100 år. De første vegtunnelene ble bygd på slutten av 1800-tallet, og i 2022 er det nå 1.900 tunneler i Norge på til sammen ca 1.000km [1]. Sammenlignet med andre land har Norge et meget stort antall vegtunneler. Det er bare Japan og Kina som har flere tunneler for vei og bane enn Norge [1]. Norge har, med sin helt spesielle geografi, en rekke utfordringer når det skal bygges vei. Spredt bosetting langs en lang kystlinje med dype daler og høye fjell, har gitt oss en helt spesiell spisskompetanse på bygging av tunnel. Norge har bygd:

- verdens lengste veitunnel (Lærdalstunnelen 24,5km lang) [2]
- verdens lengste og verdens dypeste undersjøiske tunnel (Ryfylketunnelen, 14,4km lang og 292m under havoverflaten) [3]
- verdens bratteste tunnel (Ofredalstunnelen med 15,5% stigning) [1]
- verdens høyeste tunnelmunning (Hardangerbrua) [4]

Lærdalstunnelen ble bygd for å lage en fergefri forbindelse på stamveien mellom Oslo og Bergen.

Figur 1.1 viser en av de tre fjellhallene inne i tunnelen, som med sin spesielle belysning var ment å skape mer positiv opplevelse for trafikantene [5].



Figur 1.1 Verdens lengste vegtunnel, Lærdalstunnelen, ref [8]

Stortinget har som ambisjon å binde Vestlandet sammen med en opprustet og ferjefri E39 mellom Kristiansand og Trondheim. Dette prosjektet alene strekker seg over 1100 km og skal krysse lange og dype fjorder [6]. Det understreker at behovet for å bygge tunnel også er sterkt til stede i fremtiden.

Selv om Norge kan kalle seg en tunnel-nasjon, kommer det med klimautfordringer. Bygging av tunneler krever store mengder stål og betong, samt sprengning og masseforflytning og er en av de mest energi- og materialintensive delene av et utbyggingsprosjekt innen samferdsel [7]. Denne masteroppgaven ser nærmere på klimagassutslippene fra bygging av vegtunneler og på potensialet for å redusere det fremover.

Norge har gjennom Parisavtalen av 2015 sluttet seg til en internasjonal avtale om klimapolitikk og målet om å begrense temperaturstigningen på jorda til godt under 2°C. [8] Denne avtalen forplikter Norge til å redusere sine utslipp med minst 50 % innen 2030, sammenlignet med 1990 nivået. Stortinget har definert følgende fem prioriterte innsatsområder i klimapolitikken; redusere utslippene i transportsektoren, utvikling av lavutslippsteknologi i industrien og ren produksjonsteknologi, CO₂-håndtering, styrke Norges rolle som leverandør av fornybar energi og miljøvennlig skipsfart [9].

Utslippene i transportsektoren er med det definert som et satsingsområde for å nå Norges klimaforpliktelser. Transportsektoren står for nesten en tredjedel av Norges klimagassutslipp [10]¹ og er en betydelig bidragsyter til Norges samlede klimagassutslipp. Dette er både knyttet opp til de direkte utslippene på anleggsområdet og til de indirekte utslippene knyttet til produksjon og transport av materiale. For å redusere klimagassutslipp fra bygging av infrastrukturen i et livsløpsperspektiv, definerer transportvirksomhetene i utredningsoppdrag i forbindelse med Nasjonal transportplan 2022-2033 (NTP) fire konkrete grep som bør gjøres [11]:

1. Valg av klimavennlige materialer
De største mengdene materialer som brukes i et anlegg er grus og pukk som har moderate utslipp, mens sement og stål har store utslipp. Bruke livsløpsvurderinger for å unngå materialer og konstruksjoner som gir høye utslipp både i utbyggingsfasen og i fremtidig drift og vedlikehold.
2. Kort materialtransport
Materialtransporten gir utslipp på veinettet eller sjøen. Gjennom å velge korteste materialer kan klimagassutslipp reduseres.
3. Redusere materialmengde
Alle materialer er begrensede ressurser som bør brukes nøysomt og effektivt. Legge til rette for å redusere materialbruken.
4. Redusere direkte utslipp fra anleggsmaskiner
De fleste arbeidsoperasjoner og logistikk løsninger kan effektiviseres, og maskinene kan bruke strøm, avansert biodrivstoff eller utslippsfrie drivstoff. Effektivisering av dagens maskinpark og dagens anleggsplass blant annet gjennom god oversikt over direkte utslipp og krav til redusert forbruk av diesel.

Denne Masteroppgaven har hovedfokus på å undersøke muligheter og potensiale for reduksjon av klimagassutslipp ved bygging av tunnel. Det blir sett særskilt på løsning for vann- og frostsikring, med vekt på de fire grepene transportetatene selv har foreslått for å redusere klimagassutslipp. I oppgaven vil det vurderes klimapotensialet for en ny vann- og frostsikringsløsning basert på resirkulert glass. Denne løsningen er produsert av Foamrox. Metodikken for å beregne energiforbruk og klimagassutslipp for nye veiprosjekter er LCA (Life Cycle Assessment) [12]. Det gjennomføres en LCA-analyse av to ulike vann- og frostsikringsløsninger, den nevnte løsningen fra Foamrox og en annen tradisjonell løsningene med PE-skum og sprøytebetong. Det er også drøftet hvordan avstand for materialtransport, materialmengde og direkte utslipp fra anleggsmaskiner påvirker klimagassutslippet for de to vann- og frostsikringsløsningene.

¹ NTP, kap 1.3.4

2. Samfunnsperspektiv

Dette kapitlet setter temaet for masteroppgaven i en større sammenheng, beskriver utfordringsbildet med klimagassutslipp i samferdselssektoren nærmere og hvordan bygging av tunneler påvirker Norges totale klimautslipp. Temaet vil også knyttes opp mot FNs bærekraftsmål.

2.1 Klimamål

Norge har gjennom Parisavtalen av 2015 sluttet seg til en internasjonal avtale om klimapolitikk og målet om å begrense temperaturstigningen på jorda til «godt under» 2°C [8]. Denne avtalen forplikter Norge til å redusere sine utslipp.

I 2019 inngikk Norge en klimaavtale med EU om å redusere ikke-kvotepliktige utslipp med 40% innen 2030 sammenliknet med 2005-nivå. I desember 2020 besluttet EU å forsterke sitt overordnede klimamål for 2030, med et nytt mål om å kutte nettutslippene med 55% fra 1990. Et forsterket klimamål krever forsterket klimaregelverk, og EU la frem en ny pakke med endringsforslag 14.juli 2021 kalt «Fit for 55» [13]. Hvordan Norge vil tilpasse sine regelverk for å nå dette forsterkede målet er ikke besluttet, men alle sektorer vil måtte tilpasse seg.

Felles oppfyllelse av klimamålet for 2030 med EU betyr at Norge blir en del av EUs klimarammeverk, som består av tre pilarer [14]. Hver pilar har sitt eget regelverk og egne mål. Kvotesystemet er regulert gjennom kvotedirektivet. Ikke-kvotepliktige utslipp omfattes av regelverk for innsatsfordelingsordningen (transport, jordbruk, oppvarming, avfall og deler av utslipp fra industri og petroleum), hvor Norges mål per i dag er 40% reduksjon innen 2030 sammenliknet med 2005. Den tredje pilaren er utslipp og opptak i skog- og arealbrukssektoren, med eget regelverk.

Norge har i utgangspunktet ansvar for klimagassutslipp på eget territorium og teller derfor bare sine direkte utslipp [15]. Prinsippet bak dette er at det er landet der utslippet skjer, som har myndighet til å regulere utslipp av klimagasser. For å unngå dobbelttelling av utslippsreduksjoner så skal hvert land bare telle sine direkte utslipp. Indirekte utslipp er direkte utslipp i et annet land.

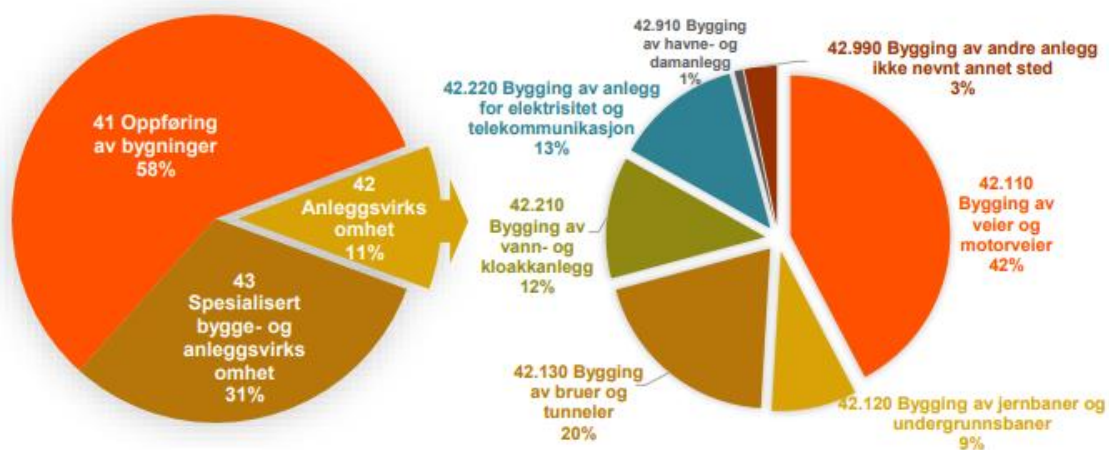
Dette prinsippet følges også i kommuner eller for enkeltstående prosjekter. For et vegutbyggingsprosjekt vil direkte utslipp da være de utslippene som skapes på anleggsplassen; sprenging, massetransport og drivstofforbruk fra maskiner og utstyr. De fleste direkte utslipp vil være utslipp i ikke-kvotepliktig sektor i det nasjonale klimagassregnskapet. De indirekte klimagassutslippene omfatter utslipp gjennom produksjon av materialer, drivstoff og energi som brukes i konstruksjoner.

Ved langsiktige investeringsbeslutninger i for eksempel bygg, oppvarmingssystemer eller infrastruktur, anbefaler Miljødirektoratet å se på hele verdikjeden gjennom livsløpet for å kunne sammenligne den totale klimabelastningen og energibruken av ulike alternativer [16]. Dette kan være nyttig for å styrke beslutningsgrunnlaget. For et vegutbyggingsprosjekt vil da det totale klimafotavtrykket være summen av utslipp fra alle innsatser av materialer og energi gjennom livsløpet, fra bygging til avhending ved endt levetid. Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen ISO har fastsatt to standarder med kriterier og veiledning om livsløpsanalyser (LCA).

Selv om Norge kun er forpliktet til å redusere sine direkte utslipp, er klimautfordringene globale, og tiltak i Norge som også kan bidra til å redusere de indirekte utslippene vil bidra til å redusere de globale klimagassutslippene. I 2022 utførte Menon et prosjekt på oppdrag for Samferdselsdepartementet for å gi økt innsikt i hvordan indirekte utslipp av klimagasser defineres, hvordan transportvirksomhetene hensyntar indirekte utslipp og omfanget av disse. Rapporten viser til at god informasjon om indirekte utslipp kan øke bevisstheten og synliggjøre lavhengende frukter. Beregninger tyder på at de indirekte utslippene er to-fire ganger høyere enn de direkte utslippene [17].

Infrastrukturprosjektene til transportvirksomhetene er en betydelig del av anleggsvirksomheten i Norge. Per i dag er statistikkgrunnlaget og kunnskap om endring av utslipp fra anlegg ufullstendig. Fordelingen av direkte og indirekte utslipp vil variere mellom ulike anlegg. I vei- og jernbaneprosjekter står dieselforbruket for om lag 10-30 % av utslippene. Materialproduksjonen står for det meste av de resterende utslippene [11].

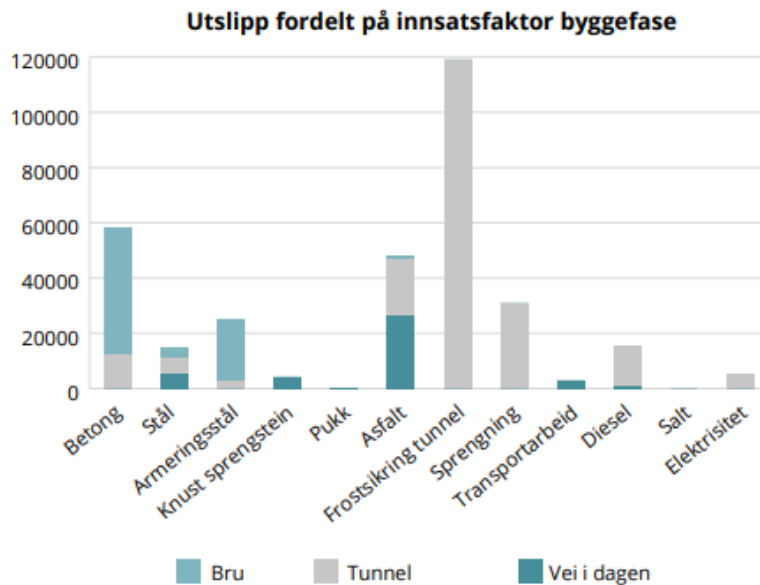
Ifølge Norsk Geoteknisk Institutt står Bygg- og anleggsnæringen for 16 % av Norges klimagassutslipp, 25 % av råstoffene og 25 % av alt avfallet [18]. Dette er en næring som er nødt til å ta ansvar for å jobbe kontinuerlig med nye måter å gjøre ting på, for å etterlate et minst mulig miljøavtrykk. Transportetatens utredning av 2018 [11] peker på at de direkte utslippene fra anleggsarbeid er estimert til å være på cirka 600 000-700 000 tonn CO_2 -ekv. per år (SSB/Miljødirektoratet). Asplan Viak sin undersøkelse av 2019 på oppdrag for Byggenæringens Landsforening, viser at det totale klimagassutslipp som kan tilskrives bygg, anlegg og eiendomssektoren (BAE) var 14,7 millioner tonn CO_2 utslipp i 2017 [19]. Prosentvis fordeling av dette er vist i figur 2.1. Anleggsvirksomheten står for 11% av BAE-næringens totale utslipp, hvorav bygging av veier utgjør 42% av dette, mens bruer og tunneler utgjør 20%.



Figur 2.1 Klimagassutslipp i BAE-sektoren viser at bygging av bruer og tunneler utgjør 20% av Norges klimagassutslipp i anleggsvirksomheten, ref [19]

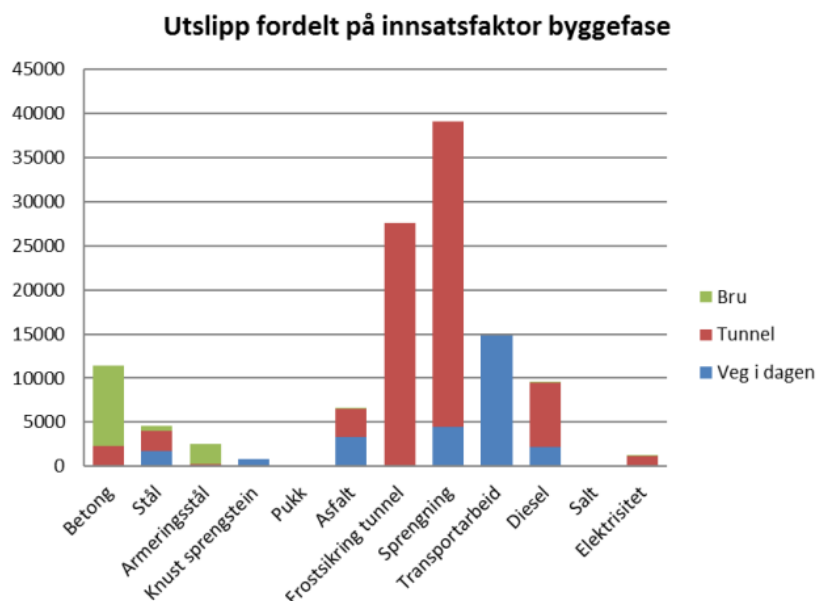
Zero og Nye Veier inngikk i 2018 et partnerskap for å identifisere gode klimaløsninger i anleggsektoren. Dette arbeidet resulterte i en sjekkliste [20], hvor det blant annet ble beregnet klimagassutslipp for strekningen E39 Lyngdal vest – Sandnes med fire felts motorvei, som er gjengitt i figur 2.2. Figuren viser klimagassutslipp fra ulike innsatsfaktorer i veiprojektet, og for denne

strekningen er det vann- og frostsikring i tunnel utgjør det største klimafotavtrykket, etterfulgt av betong og asfalt. Hvis denne eksempelstrekningen er representativ for samferdselsprosjekter, peker vann- og frostsikring seg ut som et vesentlig område for å lykkes med reduksjon av klimagassutslipp i samferdselsprosjekter.



Figur 2.2 Utslipp fordelt på innsatsfaktor i byggefase av prosjekt E39 Lyngdal vest – Sandnes, ref [20]

I et kunnskapsgrunnlag for NTP 2022-2033 har transportetatene beregnet klimagassutslipp fordelt på innsatsfaktorer i byggefase i tonn CO_2 -ekv. for prosjekt E6 Kvithammer-Åsen som vist i figur 2.3 [21]. Denne strekningen er 19km lang, hvorav 12 km er i tunnel. For denne strekningen er sprengning og frostsikring i tunnel de største innsatsfaktorene for prosjektets totale klimagassutslipp. Sprengning vil utgjøre om lag 35.000 tonn CO_2 -ekv, mens frostsikring utgjør om lag 27.000 tonn CO_2 -ekv.



Figur 2.3 Beregnede klimagassutslipp fordelt på innsatsfaktorer i byggefase i tonn CO_2 -ekv. for prosjekt E6 Kvithammer – Åsen.

Reduksjon av klimagassutslipp ved frostsikringsløsning i tunneler vil ha vesentlig betydning for veiprojekters samlede CO₂-utslipp. Det er derfor interessant å se nærmere på potensialet for å løse frostsikring i tunnel på en annen måte enn hvordan man tradisjonelt har gjort dette i Norge.

Nasjonal transportplan 2022-2033 (NTP) bygger opp under Norges klima- og miljømål gjennom blant annet å redusere klimagassutslipp, arealbeslag, støy, lokal luftforurensning og forringelse av naturmangfold. Det er i planen satt konkret mål om 40% reduksjon av klimagasser fra bygging av vei frem mot 2030 [10]. Det er imidlertid ikke fastsatt klare beregninger av hvor mye klimagassutslipp som er forventet i inneværende NTP. Vegsektoren (Nye Veier og Statens vegvesen) har utviklet standardiserte beregningsverktøy for klimagassbudsjettberegning. Nye veier bruker klimagassberegning for tidligfase utviklet av Niras og Statens vegvesen har tidligfaseverktøyet Effekt som gir et anslag for klimagassutslippene fordelt på direkte og indirekte utslipp. Disse metodene har til sammen blitt brukt til å beregne utslippene fra ca. 30 prosjekter. I tillegg er det laget klimagassregnskap for noen få prosjekter [21].

Figur 2.3 illustrerer de fem likestilte målene i inneværende NTP, som skal gi retning for ressursbruken i planperioden. Disse målene er *Mer for pengene*, *Effektiv bruk av ny teknologi*, *Bidra til oppfyllelse av Norges klima- og miljømål*, *Nullvisjon for drepte og hardt skadde* og *Enklere reisehverdag og økt konkurransevne for næringslivet*.



Figur 2.4 Nasjonal transportplans overordnede mål [10]

2.2 FNs bærekraftsmål

Høsten 2015 vedtok FNs medlemsland 17 mål for bærekraftig utvikling frem mot 2030, heretter kjent som FNs bærekraftsmål [22], se figur 2.3. Bærekraft skal være styrende for alt vi gjør og er et veikart for den globale innsatsen for en bærekraftig utvikling ved at de viser miljø, økonomi og sosial utvikling i sammenheng.



Figur 2.5 FNs bærekraftsmål

Samarbeidsprosjektet SIITS (*Styring av sårbarheter i fremtidens integrerte intelligente transportsystemer*) definerer mobilitet og transport som både en del av problemet og en del av løsningen når verden skal nå bærekraftsmålene [23]. Fremtidens transportsystemer må forsterke sine positive bidrag og redusere sine negative. Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i en av de store driverne til klimafotavtrykk i vegbygging, nemlig tunneler. Dersom man kan dokumentere løsninger for bygging av tunnel med økt gjenbruk og med bærekraftig materialproduksjon og reduserte klimagassutslipp, vil dette bidra positivt til Norges mål om å etterleve bærekraftsmålene. Tiltak som reduserer miljøpåvirkning av vegtunneler vil bidra til å nå bærekraftsmål 9, 12 og 13.

Bærekraftsmål 9: Bygge robust infrastruktur, fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og bidra til innovasjon. Infrastruktur er den underliggende strukturen som må være på plass for at et samfunn skal fungere.

Delmål 9.4 er et mål om å innen 2030 oppgradere infrastruktur og omstille næringslivet til å bli mer bærekraftig, med mer effektiv bruk av ressurser og mer utstrakt bruk av rene og miljøvennlige teknologiformer og industriprosesser, der alle land gjøre en innsats etter evne og kapasitet.

Bærekraftsmål 12: Sikre bærekraftige forbruks- og produksjonsmønstre

Delmål 12.5 Innen 2030 redusere avfallsmengden betydelig gjennom forebygging, reduksjon, materialgjenvinning og ombruk.

Bærekraftsmål 13: Handle umiddelbart for å stoppe klimaendringene og bekjempe konsekvensene av dem. Tunneler må bygges i tråd med dette målet og gjennom blant annet å ta i bruk nye materialer med lavere klimagassfotavtrykk.

Infrastruktur er den underliggende strukturen som må være på plass for at et samfunn skal fungere. De neste 12 årene skal det i Norge investeres 1.200 milliarder kroner i infrastrukturtiltak for å utvikle og ta vare på gode og fremtidsrettede transportløsninger i hele landet [10]. Dette må gjøres på en måte som også bidrar til betydelig reduserte avfallsmengder, bærekraftige produksjonsmønstre og med reduserte klimagassutslipp, i tråd med bærekraftsmål 12 og 13.

3. Kunnskapsbakgrunn

Dette kapittelet gjengir kjent og relevant kunnskap om planlegging og bygging av tunnel, som ligger til grunn for masteroppgaven. Det blir her beskrevet hvordan tunneler bygges i Norge og hvorfor, hvilket regelverk som ligger til grunn for de valg og vurderinger som må tas i planleggings- og byggefasen av en tunnel og hvilke ulike hensyn som må vektlegges ved valg av materialer og utforming av tunneler. Det blir videre beskrevet ulike løsninger for tunnelhvelv, både kjente og velutprøvde løsninger, men også et helt nytt konseptet med celleglassplater fra Foamrox. Det er også innhentet forskningsartikler og fagartikler for å belyse utfordringer med ulike løsninger for tunnelhvelv og bergsikring, og miljøpåvirkningene av disse. Denne kunnskapsbakgrunnen danner grunnlaget for å vurdere handlingsrommet som finnes for å kunne redusere klimagassutslipp ved bygging av tunneler.

3.1 Krav ved bygging av tunnel

Lowverket som regulerer hvordan tunneler skal bygges i Norge er veinormal N500 *Vegtunneler* [24] og EUs tunnelsikkerhetsdirektiv [25]. EUs tunnelsikkerhetsdirektiv trådte i kraft for medlemslandene 30.4.2006 og ble besluttet å også innlemmes i EØS-avtalen. Tunnelsikkerhetsforskriften ble implementert i Norge 15.mai 2007 [25]. Forskriften gir minimum sikkerhetskrav til eksisterende og nye vegtunneler over 500 meter på alle riksveger, og har som formål å sikre laveste tillatte sikkerhetsnivå for trafikanter i tunneler. Forskriftene stiller krav om å forebygge kritiske hendelser som kan sette menneskeliv, miljøet og tunnelanlegg i fare og til å sørge for vern i tilfelle av ulykker.

I Norge har Vegdirektoratet hjemmel til å fastsette utfyllende bestemmelser. Vegnormal N500 *Vegtunneler* [24] gir supplerende bestemmelser om planlegging og prosjektering av vegtunneler, for både vegtunneler i berg og andre bærende konstruksjoner med funksjon som vegtunnel. N500 gir krav til geologiske forundersøkelser, ytre miljø, geometrisk utforming, sikkerhet og beredskap, skilt og signaler, tunneldriving og bergsikring, tunnelkledninger, drenering, vegfundament og vegdekke, tekniske anlegg og sikkerhetsdokumentasjon. Vegnormal N500 *Vegtunneler* kan ikke fravikes hvis fraviket kommer i strid med bestemmelser i tunnelsikkerhetsforskriftene.²

3.1.1 Trafikksikkerhet

Et av hensynene som ligger til grunn i lowverket er trafikksikkerhet. Tunneler har som regel lavere ulykkesrisiko enn sammenlignbare veier i dagen, men risikoen for alvorlig ulykker kan i noen tilfeller være høyere [26]. Statens vegvesens Trafikksikkerhetshåndbok [26] beskriver at det generelt er svært lite trafikk i de fleste tunnelene i Norge. Det går i gjennomsnitt 4-5.000 kjøretøy pr dag (ÅDT) i en norsk tunnel, mens gjennomsnittet i Europa er omtrent 10 ganger så høyt.

I perioden 2005-2015 skjedde 58 dødsulykker i norske tunneler, med til sammen 100 innblandede kjøretøy og 63 drepte. Undersøkelser viser at det skjer færre ulykker i tunneler enn ute i dagen. Toløpstunneler har som regel lavere ulykkesrisiko enn ettløpstunneler, og tunneler i spredtbygde strøk har i gjennomsnitt lavere ulykkesrisiko enn tunneler i byer. De fleste ulykkene skjer i tunnelåpningen. I åpningen er det også størst problem med overgang i lysforhold, dugg på frontruta samt av og til vann og is i kjørebanelen. For å øke sikkerhet og det estetiske møtet med en tunnel, er

² N500, kap 1.1.

det lagt mye arbeid i å utforme tunnelportalene, samt belysning i overgangssonen (dagsonen) [26]. Det verste scenariet for tunnelulykker er brann i kjøretøy med påfølgende stor tunnelbrann med mye røyk. Heldigvis har det aldri skjedd noen store brannulykker i norske vegtunneler.

Norske vegtunneler skal være tilrettelagt for selvredning ved brann eller annen hendelse. Det vil si at trafikantene selv tar seg ut av tunnelen ved en hendelse, enten med kjøretøy eller til fots. Krav til trafiksikkerhet er regulert av N500 kap 5 om sikkerhet og beredskap, og inneholder blant annet krav om beredskapsanalyser og beredskapsplaner, risikoanalyser, sikkerhetstiltak og sikkerhetsutrustning.

3.1.2 Brannsikkerhet

Et annet viktig hensyn som ligger til grunn i lovverket er brannsikkerhet. Tunneler er definert som særskilt brannobjekt etter brann- og eksplosjonsvernlovens § 13, ettersom den med sin beskaffenhet eller den virksomhet som foregår i dem, antas å medføre særlig brannfare eller fare for stor brann, eller hvor brann kan medføre store samfunnsmessige konsekvenser. Brannsikkerhet i veitunneler er derfor hjemlet i Brann- og eksplosjonsvernloven, den tilhørende Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn og i Internkontrollforskriften (HMS). Det er utarbeidet retningslinjer om saksbehandling og ivaretagelse av brannsikkerhet i veitunneler som beskriver samarbeid mellom vei-eiere og brannvernmyndighetene, gjennomføring av risikoanalyser, ansvar og samarbeid ved øvelser, beredskapsplaner og innsatsplaner. Det er eier av særskilte brannobjekter som er ansvarlig for at bygningen tilfredsstiller de krav som stilles i forskriften.

Rundt år 2000 var det tre store tunnelbranner i Alpene, der mange mennesker omkom [27]. Ulykkene i Mt Blanc, St Gotthard og Tauern tunnelene medførte et mye strengere sikkerhetsdirektiv i EU. Dette direktivet ble implementert i Norge i 2007. Direktivet skjerpet kravene til utforming og brannsikring. Særlig kravene til brannsikkerhet inkludert rømming ble strengere.

De fem største tunnelbrannene i Norge ble dokumentert av SVVs rapport i 2017 [28].

- Brann i Oslofjordtunnelen 29.mars 2011. Vann- og frostsikringsløsningen i tunnelen var PE-skum påsprøytet 6cm betong. En polsk registrert semitrailer med 30 tonn papirruller sto i brann i lavbrekket av tunnelen. Fire personer ble sendt til sykehus for behandling. Tunnelen ble gjenåpnet dagen etter.
- Brann i Oslofjordtunnelen 23.juni 2011. Polsk registrert vogntog lastet med 22tonn returpapir fikk motorhavari og 5,5km av tunnelen ble fylt av røyk. 32 personer ble kjørt til sykehus for behandling. Det ble registrert 1-3cm avskalling i sprøytebetonghvelvet.
- Brann i Gudvangatunnelen den 5.august 2013 startet i et polskregistrert vogntog. 28 personer ble utsatt for så store røykskader at de måtte behandles på sykehus.
- Brann i Gudvangatunnelen 11.aug 2015 startet i en turistbuss. Fire personer ble sendt til sykehus for behandling.
- Brann i Skatestraumtunnelen 15.juli 2015 startet i en tankbil med 35.500 liter bensin. Draget mellom kjøretøy og tilhenger brast ved kjøring nedover i tunnelen, tilhengeren løsnet og kjørte inn i tunnelveggen og kollisjonen medførte at det gikk hull på tanken og bensin lekket ut. Bensinen ble antent av at en campingbil kjørte inn til tilhengeren. Tilhengeren, campingbilen og en annen personbil begynte å brenne, samt all bensinen. Den høye varmen førte til at store deler av sprøytebetongen løsnet og det begynte å brenne i PE-skummet. Det

var 17 personer i tunnelen da det begynte å brenne. Tankbilsjåføren fikk snudd biler på vegg ned i tunnelen. Alle de 17 ble evakuert. Av disse var fem lettere skadd.

Brannutvikling i PE-skum oppstod også i Eidsvolltunnelen i 2012, da en personbil kjørte inn i tunnelveggen og traff betongelementene med en sånn kraft at de ble skjøvet bakover og avdekket isolasjonen (PE-skum). Da bilen begynte å brenne tok også isolasjonen fyr [29].

Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler for perioden 2008-2015 [30] viser at det i perioden har vært 303 branner og tilløp, hvorav 33 involverte skader på tunnel. Tunge kjøretøy er overrepresentert i vegtunnelbranner og 42% av brannene oppsto i undersjøiske tunneler (selv om disse kun utgjør 5% av alle vegtunnelene i Norge).

3.2 Tunneldriving

For tunneler i berg vil det være i hovedsak to byggemetoder å velge mellom. Enten konvensjonell drift med boring og sprengning, eller drift med tunnelboremaskin (TBM). Dette delkapittelet beskriver disse to byggemetodene og gir en oversikt over noen av fordelene og ulempene ved hver av dem.

Konvensjonell tunneldriving

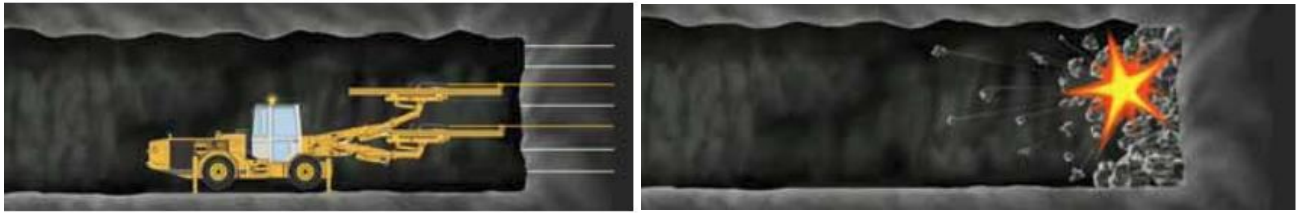
Konvensjonell boring og sprengning har vært den dominerende byggemetoden i Norge. Metoden er beskrevet prinsipielt i rapport av 2014 i forbindelse med KVVU Oslo-Navet [31] og gjengitt i dette delkapittelet.

Foran tunnelfronten foretas det en forinjeksjon for å tette berget slik at innlekkasje av vann i tunnelen reduseres, se figur 3.1. Når grunnvann tappes ut av sprekkene, fører det til at poretrykket lokalt reduseres avhengig av hvor stor lekkasjen er i forhold til nytt tilsig av grunnvann. Reduksjon av poretrykk i berg forplanter seg opp i overliggende løsmasse med påfølgende setninger som resultat. Det er her viktig å ha kontroll på innlekkasjen i tunnelen samtidig som man måler det aktuelle poretrykket, for å ha kontroll på setningsrisikoen i terrenget over tunnelen. Injeksjonsomfanget tilpasses dette. Deretter injiseres mikrosementbasert masse inn i hullene under stort trykk tilpasset aktuell bergoverdekning. Injeksjonsmassen trenger inn i små sprekker i berget og tetter disse slik at grunnvannstrøm i tunnelen stoppes eller begrenses kraftig.



Figur 3.1 Boring av injeksjonshull i Bærumstunnelen, ref [31]

Etter at forinjeksjonen er herdet, bores ca 100 hull som er fem meter dype. Hullene fylles med sprengstoff, som vist i figur 3.2. Sprengingen tilpasses tilstanden på fjellet og det omkringliggende miljøet så skader på hus unngås.



Figur 3.2 Illustrasjon av boring, lading og sprengning

De utsprengte bergmassene lastes opp på dumpere eller direkte på lastebil og kjøres til deponi eller andre steder i anlegget, som vist i figur 3.3.



Figur 3.3 Illustrasjon av utlasting

Løst fjell pigges ned med en hydraulisk hammer, som gjerne er festet til en gravemaskin, som vist i figur 3.4. Blokker og sprekker i tunneltaket sikres med 3-4 meter lange bolter. Boltene gyses fast med betong i borehullet. Fjellet sikres med minst 8 cm tykt lag av fiberarmert sprøytebetong.



Figur 3.4 Illustrasjon av rensk og sikring

Deretter drives tunnelen gjennom det tette berget i sprengningssekvenser før ny forinjeksjon foretas. Lengden av hver sprengningssekvens vil avhenge av stedlige forhold og gitte krav til rystelser, men en typisk sekvenslengde vil være ca 5 meter. En normal fremdrift ved omfattende grad av forinjeksjon, kan typisk ligge i området 15-20 meter i uka.

For å ventilere ut avgasser fra dieselmaskiner, støv og sprenggasser kreves det store ventilasjonsanlegg. Viftene plasseres i tunnelåpningen og pumper luft inn til stoffen ved hjelp av fleksible ventilasjonskanaler, mens avgassene presses ut gjennom tunneltverrsnittet, som vist i figur 3.5.



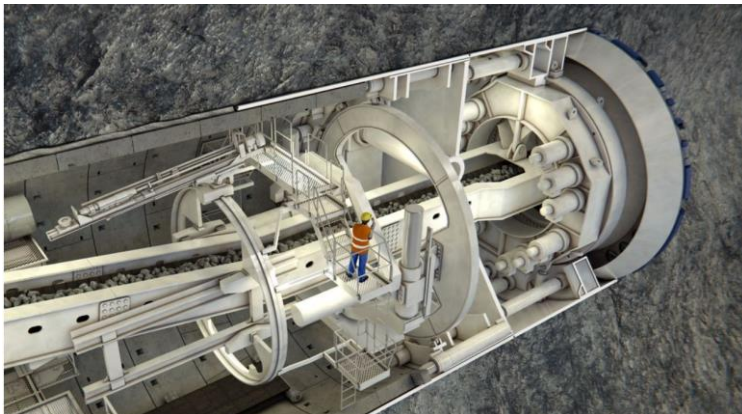
Figur 3.5 Ventilasjonsskanal og påhugg, Bærumstunnelen

Alternativ tunneldriving (TBM)

Tunnelboremaskin (TBM) er en maskin som brukes til å grave eller bore tunneler med et sirkulært tverrsnitt gjennom jord, stein eller fjell. Tunneldiameteren kan variere fra 1 til 19,25 m, som er den største i dag. Moderne TBMer består av det roterende bore-hodet, etterfulgt av et system som skyver borehodet fremover og mekanismer som tar hånd om den utgravde massen. Det som skiller de norske maskinene fra TBM-ene brukt til store samferdselsprosjekter i utlandet, er hvor hardt berg de skal drive.

I 2015 signerte Jernbaneverket kontrakt med Acciona for tunnelboring av Follobanen mellom Oslo og Ski, som blir nordens lengste jernbanetunnel (19,5km) og drives med fire samtidige tunnelboremaskiner. Follobanen ble åpnet for trafikk 11. desember 2022. Ulrikstunnelen i Bergen ble laget med TBM (ferdig 2017). Før det var det bare drevet fire veitunneler i Norge med TBM: Svartistunnelen (7,6km), Fløyfjellstunnelen (2 løp à 3,2 og 3,6 km), Eidsvåg tunnelen (0,95km), alle bygget for over 30 år siden.

TBM-ene brukt på Follobanen er av type Double shield, som vist på figur 3.6. Hver av de 4 TBM-ene på Follobanen hadde en vekt på 2.400 tonn og gravde ut tunneltverrsnitt med diameter 9,96m med en hastighet på ca 45 meter i uka (avhengig av lekkasjepotensialet til enhver tid).



Figur 3.6 TBM i Follobanen. Bilde: Jernbaneverket

I 2014 utarbeidet Statens vegvesen en rapport for å se på mulighetene for å bruke fullprofil tunnelboremaskin (TBM) til driving av veitunneler i Norge. På daværende tidspunkt var omkring 250 km tunnel i Norge fullprofilboret, mesteparten av dette vannkrafttunneler boret på 80-tallet [32]. Rapporten viser til at en viktig faktor ved valg av drivemetode er geologien i området. Bergartens styrke, seighet, mineralsammensetning og porøsitet, oppsprekking, spekkefylling og spenninger i bergmassen, vannforhold og eventuelle svakhetssoner vil alle påvirke drivingen i tunnel.

Tabell 3-1 er en sammenstilling av noen av fordelene og ulempene ved disse to byggemetodene, konvensjonell tunneldriving og TBM, som er hentet fra rapportene som er omtalt i dette delkapittelet [32] og [31]. Oversikten er basert på faglige vurderinger fra kun to rapporter på bestilling fra Statens vegvesen og gir ikke nødvendigvis totalbildet. Tabellen er ment for å illustrere noen av de ulike fordelene og ulempene.

	Fordeler	Ulemper
Konvensjonell tunneldriving	<ul style="list-style-type: none"> - Krever relativt små riggområder - Tunneldriving kan starte opp ganske raskt etter at påhuggsområdet er sikret - Fleksibel byggemetode som kan benyttes ved alle bergforhold. - Fleksibel drivemetode for å ivareta ulike behov for utvidelser av tunneltverrsnittet (havarilommer, nisjer mv) - Erfaring og etablert kompetansemiljø i Norge 	<ul style="list-style-type: none"> - Normal fremdrift 15-20m/uka - Rystelser oppstår ved salvesprengning
TBM	<ul style="list-style-type: none"> - Lav byggetid (6-30meter pr 20t for normal tunnelproduksjon) - Kan drives i nærmest alle typer løsmasser - Reduserte vibrasjoner under tunneldriving - Gunstigere tunnelkontur kan øke levetid og redusere sikringsomfang og vedlikehold av tunnelen - Arbeidsforhold inne i tunnelen under driving kan være bedre, grunnet fravær av skytegass fra sprengstoff og avgasser fra dieselmotoren - Avrenningsproblematikk fra uomsatt sprengstoff reduseres/er ikke til stede 	<ul style="list-style-type: none"> - Manglende kunnskap og erfaring i bransjen i Norge - Lite fleksibelt for å takle uforutsette forhold og raske endringer i geologi - Lite fleksibelt for varierende tverrsnitt (ramper, havarilommer, nisjer ol) - Innkjøpskostnaden for TBM er høy - TBM borer ut sirkulært tverrsnitt, som gjør at om lag 1/4 av tunnelen må fylles opp til vegbyggingsformål. Dette bidrar til økt kostnad og klimagassutslipp, med mindre tverrsnittet utenfor kjørebanelen utnyttes til andre formål (f.eks. rømning, kabler eller annet som kan legges under kjørebanelen)

Tabell 3-1 Sammenstilling av noen fordeler og ulemper ved to byggemetoder for tunnel; konvensjonell metode og TBM

3.3 Krav til tunnelkledning

Dette delkapittelet gir en kunnskapsbakgrunn for å vurdere hvilke begrensninger som settes for valg av tunnelkledning. Det blir videre gitt beskrivelse av kjente og velutprøvde løsninger som brukes i vegtunneler i dag. De overordnede kravene som stilles for tunnelkledning har betydning for om den nye hvelvløsningen av glass fra Foamrox kan godkjennes som tunnelkledning, noe som vil bli tatt opp i diskusjon senere i kapittel 8.

Krav som stilles til tunnelkledning er gitt i håndbok N500 kap.8 [24]. Det overordnede målet er at vegtunneler skal sikres mot vann og is, slik at det ikke skal være lekkasjevann eller isdannelse i trafikkrommet, i nødutganger, i nisjer til tekniske bygg eller i ventilasjonssjakter (krav 8.1.1-1). I denne masteroppgaven er det beskrevet hvordan forinjeksjoner skal utføres under tunneldriving for å tette berget slik at innlekkasje av vann i tunnelen reduseres i kap 3.2. Det er imidlertid ofte ikke mulig å stoppe all innlekkasje av vann i berget, og gjenstående lekkasjer i vegger og heng skal derfor samles ved at det monteres en vanntett tunnelkledning som fører vannet ned til grøft og frostfritt ut av tunnelen via drencsystemet (krav 8.1.1-2). Dette kan gjøres på flere måter og beskrives videre i dette delkapittelet.

Kravet til frostisolasjon slår først inn ved frostmengde $F_{10} \geq 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$ (krav 8.1.2-2). F_{10} er definert som den frostmengden som statistisk sett overskrides én gang i en 10-årsperiode. Frostmengde og årsmiddeltemperatur baseres på kart: <http://www.vegvesen.no/kart/visning/frostsonkart> og <http://www.vegvesen.no/kart/visning/arsmiddeltemperatur>. Frostisolasjonen for tunnelkledning skal dimensjoneres etter $F_{10}(\text{h}^\circ\text{C})$ ved tunnelåpningene. Der det kan dokumenteres lavere frostmengde innover i tunnelen kan frostmengden inne i tunnelen, $F_{10T}(\text{h}^\circ\text{C})$, legges til grunn. Vegtunneler med lengde inntil 500 m dimensjoneres for frostmengden utenfor (krav 8.1.2-1).

Tunnelkledning for vann- og frostsikring skal ihht krav 8.1.1-4 oppfylle definerte krav til laster gitt i kap 8.3, oppfylle definerte krav til brannmotstand gitt i kap 5.4 og dokumenteres ihht kap 8.2. Håndbok N500 stiller således funksjonskravene til vann- og frostsikringsløsning og ikke materialkrav. Det betyr at leverandører av vann- og frostsikringsløsninger ikke er pålagt å følge tradisjonelle løsninger av tunnelkledning gitt at den nye løsningen dokumentert tilfredsstillende de nevnte kravene til laster og brannmotstand.

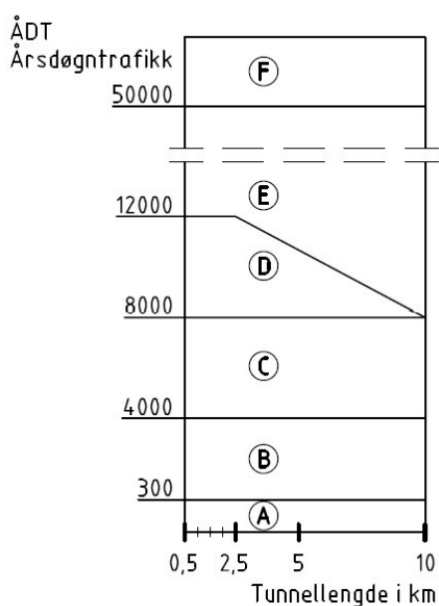
Dersom det velges å benytte kjente og etablerte løsninger for tunnelkledning i vegtunneler, skal disse bygges ihht kap 8.1 og 8.4 (krav 8.4.1-1). Disse løsningene har vært en del av regelverket for tunnelkledninger til vann- og frostsikring i vegtunneler gjennom flere tiår. Løsningene er benyttet som standard, de er velprøvde og erfaringsgrunnlaget er omfattende. I det videre vil de kjente og etablerte løsningene fra N500 bli beskrevet.

Kjente og etablerte løsninger for tunnelkledning er gitt i N500 tabell 8.4.1-1 og vist på figur 3.7. De ulike vann- og frostsikringsløsningene avhenger av tunnelklasse og frostmengde på stedet. Definisjon av frostmengde er omtalt tidligere i dette delkapittelet. Figur 3.7 viser at for tunnelklasse A og B kan det etableres hvelv av nettarmert sprøytebetong, mens for tunnelklasse C kan det etableres veggelementer av betong i innkjøringssonen i tillegg. For tunnelklasse D og E anbefales en vann- og frostsikringsløsning med veggelementer av betong med nettarmert sprøytebetong i heng. For den høyeste tunnelklassen, F anbefales helhvelv av betongelementer. For alle tunnelklassene kan det også anvendes kontaktstøpt hvelv.

Tunnel-klasse	Vann-/ frostsikringskonstruksjon	Vannsikring og frostisolasjon
A og B	Hvelv av nettarmert sprøytebetong, montert over føringskant av betong	Frostisoleres med PE-skum ved $F_{10} \geq 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$, kan utføres uisolert, med membran type III (tabell), ved $F_{10} < 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$
C	Hvelv av nettarmert sprøytebetong med føringskant av betong Veggelementer av betong i innkjøringssonene, med sprøytebetong i heng	Frostisoleres med PE-skum ved $F_{10} \geq 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$, kan utføres uisolert, med membran type III (tabell), ved $F_{10} < 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$ Veggelementer frostisoleres med XPS
D og E	Veggelementer av betong, med nettarmert sprøytebetong i heng	Veggelementer frostisoleres med XPS. Frostisoleres med PE-skum ved $F_{10} \geq 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$, kan utføres uisolert, med membran type III (tabell), ved $F_{10} < 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$
F	Helhvelv av betongelementer	Frostisolasjon av XPS bak betongelementer Vannsikring med membran type III
Alle	Kontaktstøpt vann-/ frostsikringshvelv med membran, Alternativ, prosjektspesifikk løsning	Membran type II

Figur 3.7 Kjente og løsninger for tunnelkledninger

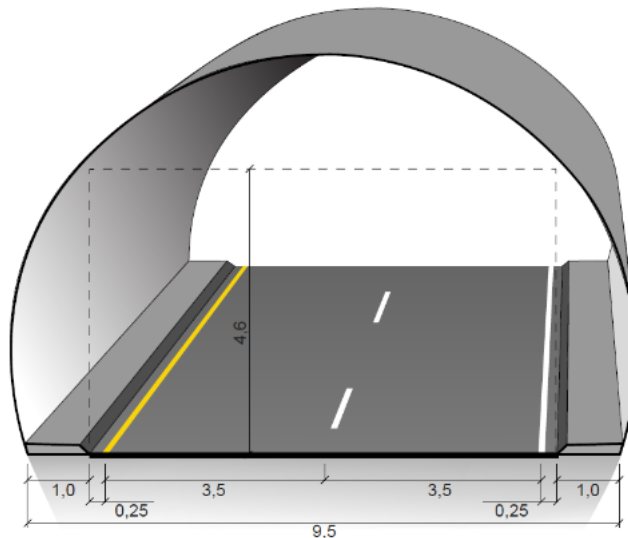
Tunnelklasse er en terminologi i håndbok N500 som klassifiserer vegtunneler over 500m fra A til F, avhengig av trafikkmengde og tunnellengde, som vist på figur 3.8 (ref kap 5.2).



Trafikkmengde angis som den årsgjennsnittetrafikken, ÅDT, som forventes 20 år etter at tunnelen er åpnet for trafikk. For en tunnel med forventet ÅDT på 8-12.000 er det tunnelens lengde som avgjør om tunnelklassen fastsettes som klasse E eller D, som vist på figur 3.8 med et knekkpunkt ved 2,5 km. Dersom forventet ÅDT er for eksempel 9.000 og tunnelen bygges med lengde over 2,5 km, vil tunnelklassen fastsettes som en klasse E.

Figur 3.8 Tunnelklasse A-E, jfr. N500 kap 5.2-1

Tunnelklassen bestemmer dessuten sikkerhetstiltak og sikkerhetsutrustning i vegtunneler, normalprofilen, antall tunnellop og behov for havarinisjer, snunisjer og nødutganger (ref veiledning til krav 5.2-1). Normalprofil er terminologien for det geometriske tverrsnittet av en tunnel og er for de ulike tunnelklasser beskrevet i N100, tillegg B [33]. Eksempelvis tunnelprofil T9,5 som ofte er valgt for toløpstunneler vist i figur 3.9, angir 3,5 m bredde for hvert kjørefelt, fri høyde 4,6 m innvendig i tunnel samt 1 meter bredde på rømningsvei.



Figur B.8 — Tunnelprofil T9,5. Bruks ev. for toløpstunneler (mål i m).

Figur 3.9 Normalprofil for T9,5, ref [33]

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015, har angitt «Gode løsninger for vann- og frostsikring i tunneler» som gir en orienterende beskrivelse med tilhørende tegninger av tre hvelvkonstruksjoner; nettarmert sprøytebetong med nedre føringskant i betong, nettarmert sprøytebetonghvelv med veggelementer og betongelementhvelv [34]. Disse tre løsningene er gjengitt i kap 3.3.1 – 3.3.3.

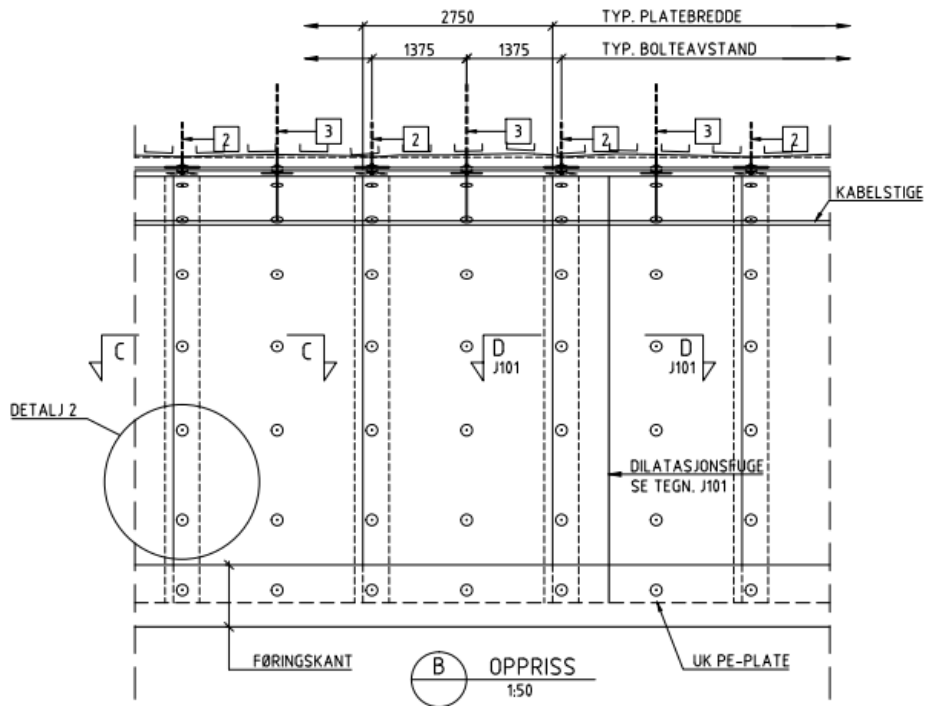
3.3.1 Nettarmert sprøytebetonghvelv med PE-skum

For tunnelklasse A-C anbefales ulike kombinasjoner av nettarmert sprøytebetonghvelv frostisolert med PE-skum eller XPS, etablert med føringskant av betong [34].

PE-skum leveres i kompakte eller laminerte matter produsert ved ekstrudering. De finnes vanligst i tykkelse 45 mm. Platene skal være bestandige mot avgasser, olje og salt, og ikke være skummet opp med klorfluorkarboner (CFC). Nødvendig tykkelse på PE-platene dimensjoneres avhengig av frostmengde på aktuelt sted. PE-skum er polyetylen, en type polymer som brukes i mange vanlige plastartikler. PE-skum smelter ved 120-130 grader celsius og gir fra seg en giftig gass ved høye temperaturer. Det må derfor brannsikres med sprøytebetong [34].

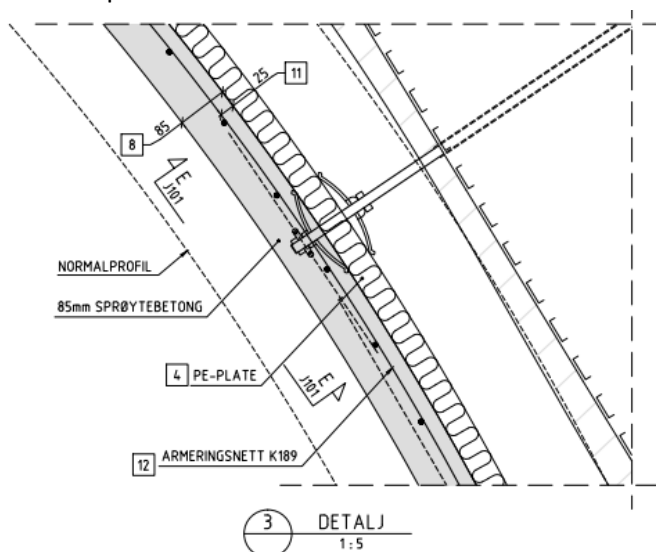
Nettarming monteres og festes inn til PE-platene med spesielle armeringsstoler som skrues inn i PE-platene. For å sikre armeringsoverdekning på 25 +5 mm mot PE-platene, monteres armeringsstolene i mønster 600 x 600 eller tettere avhengig av stedlige forhold. Ved skjøting av armeringsnett benyttes min. 1 rute overlapp (200mm).

Hvelvløsningen med PE-skum og nettarmering festes med **Festebolter** inn i berget. Festebolter utføres med dimensjonene $\varnothing 16$, varmforsinket og pulverlakkert med epoxy og kvalitet B500NC. Figur 3.10 illustrerer en kjent monteringsløsning, med avstand mellom bolteradene i lengderetning er typisk 1375 mm tilpasset standard PE-platebredde 2750 mm. Generell bolteavstand i bolterader i tverretningen er også 1375 mm.



Figur 3.10 Prinsippkisse for montering av PE-plater med sikringsbolter og dilatasjonsfuger

Boltene skal monteres vinkelrett på valgt montasjeprofil, hvor borhullsdypde og boltelengde tilpasses slik at boltene ikke stikker utenfor ferdig sprøytet flate. Figur 3.11 viser innfestingsbolter som bores minimum 1.000 mm inn i fast berg og forankres ved gysing i full lengde. Det benyttes ekspanderende mørtel iht prosess 33.2 i håndbok R761.

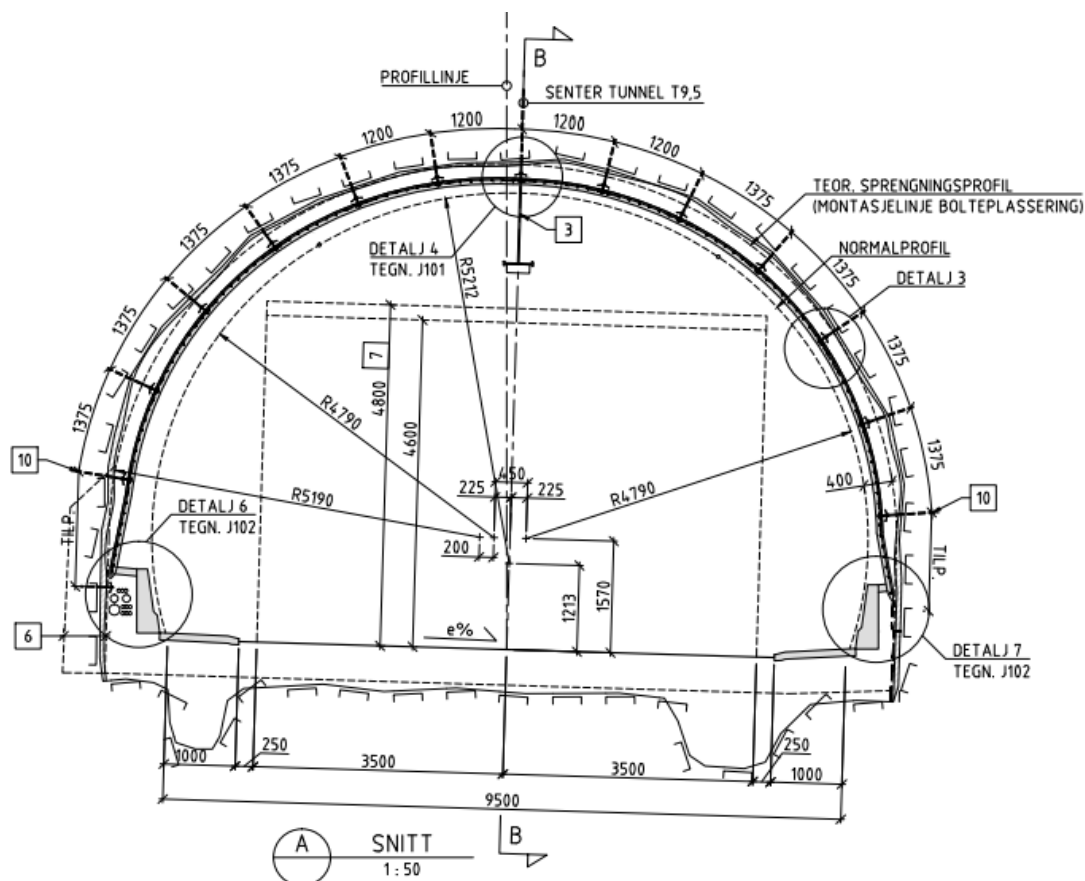


Figur 3.11 Anvisning til innfesting av bolter i fast berg

Sprøytebetong med tykkelse 85 mm påføres i minimum 3 lag, hvor første lag sprøytes ut mot armeringsnettets og resterende tykkelse påføres i to lag med tilnærmet lik lagtykkelse. Nysprøytet flate skal sikres mot uttørking. Sprøytebetongtykkelsen må økes lokalt der hvor armeringsnettets er skjøtet, slik at det oppnås samme overdekning mot tunnelsiden som for tilstøtende flater. Sprøytebetongen skal utføres med fasthetsklasse B35, bestandighetsklasse M45 og med tilsetning av monofilament polypropylenfiber iht krav i håndbok R761.

For å sikre lastoverføring mellom sprøytebetonghvelvet og festebolten som er forankret i berget, monteres det «blekkspruter» (stålplate med påsveiste armeringsjern) på hver festebolt for PE-hvelvet. Denne monteres og festes med mutter til på bolten etter at armeringsnettets er montert.

Denne løsningen er vist ved tunnel med T9,5 normalprofil, se figur 3.12. Ved montering av PE-platene benyttes standard bredde 2750 mm som monteres butt i butt, med boltemønster 1375x1375mm. I senter av tunnelen er boltemønsteret tettere og gitt ved c/c 1200 mm. Toleransen er +- 50mm for ferdig konstruksjon inkludert sprøytebetong.

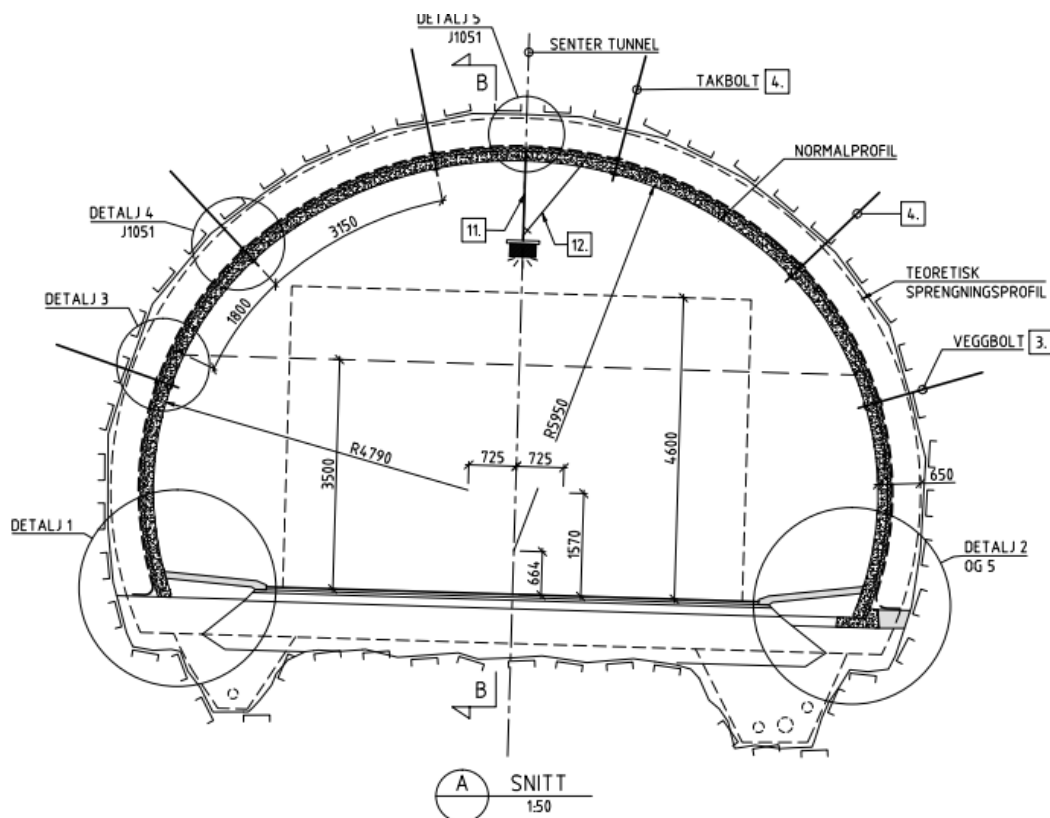


Figur 3.12 Prinsippskisse for vann- og frostsikringsløsning av nettarmert sprøytebetonghvelv med PE-skum og føringskant av betong

Føringskant dimensjoneres for en høyde minimum 800mm, som vist i figur 3.12 detalj 6. Føringskanten armeres med 2 ϕ 12 mm à 12 m lengde med kvalitet B500NC. Krav til betong i føringskanten er fasthetsklasse B45, bestandighetsklasse MF40, men det er ikke krav om tilsetning av PP-fiber. Ved frostmengde $F_{10} \geq 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$ må drengveggen mot grøften frostsikres.

3.3.2 Betongelementer

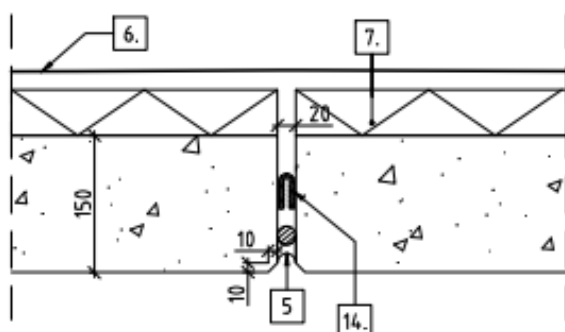
For tunnelklasse F anbefales det etablert helhvelv av betongelementer [34]. For denne vann- og frostsikringsløsningen er det tatt utgangspunkt i et normalprofil T10,5 se figur 3.13. Veggelementene monteres oppå fundament (detalj 2), og festes i berget med gjengestenger som bores inn minimum 1 meter i fast berg (detalj 3). Tykkelse på vegg og takelementene er 1500 mm. Veggelementene har høyde 3,7m, elementlengden er 5,085 m som er tilpasset lengde 5 m på standard armeringsnett. Standard takelement har bredde 2590 mm.



Figur 3.13 Prinsippkisse for vann- og frostsikringsløsning med helstøpt betonghvelv

Materialkrav til elementene er fasthetsklasse B45, Bestandighetsklasse MF40 og tilsetning av monofilament polypropylenfiber som angitt i håndbok R761. Betong er i seg selv et ikke-brennbart materiale med god isoleringsevne, men ved tilsetning av PP-fiber forbedres betongens egenskap til å virke som en passiv brannbeskyttelse ved at man forhindrer utviklingen av eksplosiv avskalling [35].

Elementene monteres uavhengig av hverandre og fugeforsegles, som vist på figur 3.14.

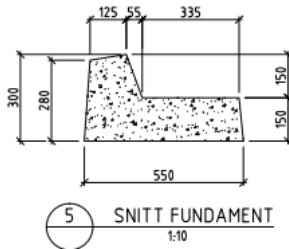


Nominell fugebredde er 200mm for alle fuger med unntak av langsgående fuge mellom vegg- og takelementer som tilpasses ihht gitte krav til fugetoleranser, ref håndbok R510.

Figur 3.14 Montering av betongelementer

Elementene skal beskyttes membran mot berg, som skal være godkjent PE/PP-membran. I tak skal denne monteres med overlapp ca 600mm. Membranen henges normalt midlertidig opp mot veggen før veggelementene monteres. Alternativt monteres membran i hele tverrsnittet før oppstart av elementmontasjen.

Fundament for veggelementene er vist ved figur 3.15. Betongkvaliteten for fundamentet er B45, bredde angis til 550mm og høyde 300mm.



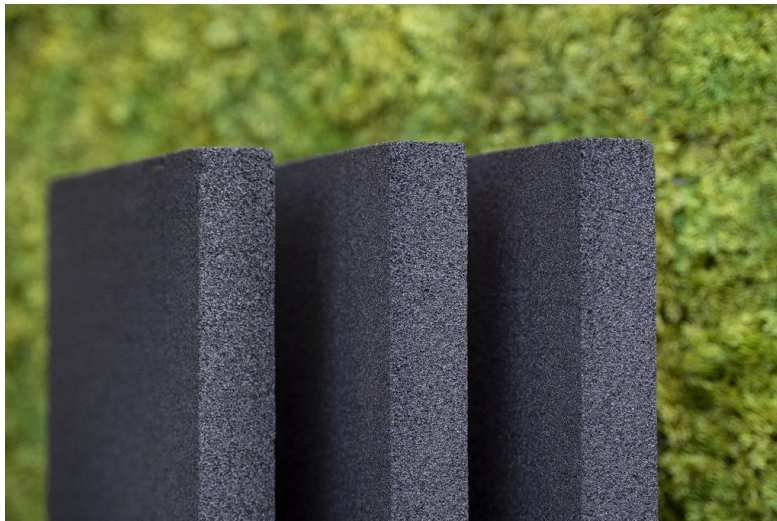
Figur 3.15 Utforming av fundament for veggelementer i betong

3.3.3 Foamrox

En alternativ tunnelkledning som ikke er nevnt blant de «kjente og etablerte løsningene» i håndbok N500 er en løsning basert på glass som hovedkomponent. Tunnelkledningen er utviklet av Foamrox, en industribedrift i Froland kommune (Agder fylke) med spesialisering innen brann, vann og frostsikring. I 2022 vant Foamrox årets Sivapris innenfor bærekraft og innovasjon.

Produktet er isolasjonsplater forsterket med en membran. Skumglassplatene består av resirkulert glass, mens membranen er en polyurea. Produktet har lav vekt, gode termiske egenskaper (selvslukkende og tilfører ingen energi ved brann, vann- og damptett og har ingen fuktabsorpsjon), høy brannmotstand (godkjent brannklassifisering E160), lave klimagassutslipp og lang levetid, ifølge Foamrox egen hjemmeside. [36]

Celleglassplater fra Glapor er vist i figur 3.16. Produktet er laget av 100% resirkulert glass og er et porøst og lett materiale som enkelt kan formes ved bruk av håndsag og rasp. For å sikre at produktet blir vann- og frostsikkert, sprayes det på et lag med polyurea utenpå.



Figur 3.16 Celleglassplater fra Glapor, bilde: fra Foamrox hjemmeside

Celleglassplater produseres hos Glapor i Tyskland og fraktes til Foamrox fabrikk i Froland/Norge. Der blir platene sprayet med coating/polyurea. Figur 3.17 er vist hvordan Foamrox-platene blir produsert i Foamrox fabrikk. Her er celleglassplatene nettopp blitt sprayet med coating.



Figur 3.17 Foamrox-plater, her i fabrikk i Froland med nylagt membran. Foto: privat

Coatingen heter Rayston Fire E, produseres i Spania av Krypton Chemicals, og leveres fra Kinera AS i Norge. Coatingen er en brannhemmende membran. Kjemikaliene leveres i et sett av 2stk 200liters fat. Hvert av disse fatene (comp A og Comp B) inneholder en «flytende» blanding av forskjellige kjemikalier. I fabrikk til Foamrox vil innholdet i disse to fatene tas inn i en spesiell maskin, som under trykk og temperatur blander alt sammen, og dette sprayes på glasselementene. Kjemikaliene blir til herdeplasten Polyurea. Figur 3.14 viser celleplatene med coating. Tettheten på belegget er 1,17kg/l.

Dersom etterspørselen etter produktet blir stor nok, ønsker Foamrox å bygge en ny lokal fabrikk i Norge for å produsere celleglassplater av lokalt resirkulert glass. Dette vil redusere miljøpåvirkning av produktet ytterligere, fordi det lokale renovasjonsselskapet vil ha redusert behov for transport av det glasset de samler inn, samtidig som Foamrox vil kunne ha tilgang til kortreiste materialer og bruke 100% ren norsk energi ved produksjonen fremfor energimixen som benyttes i Tyskland.

3.4 Litteraturgrunnlag

I dette delkapittelet er det innhentet fagartikler og forskningsartikler for å beskrive utfordringer med ulike etablerte vann- og frostsikringsløsninger. Dette danner et bilde av hvorfor det er flere grunner til å se på nye løsninger for vann- og frostsikring i tunnel, i tillegg til klimagassutslipp.

Det finnes lite forskning på klima- eller miljøpåvirkningen av PE-skum i tunnel. Chen Minglong m.fl gjorde et studie i 2018 om miljøproblemet med mikroplast i hav og den potensielle risikoen dette utgjør for marine organismer. Denne studien fra Kina viser at PE-skum utgjorde den høyeste andelen

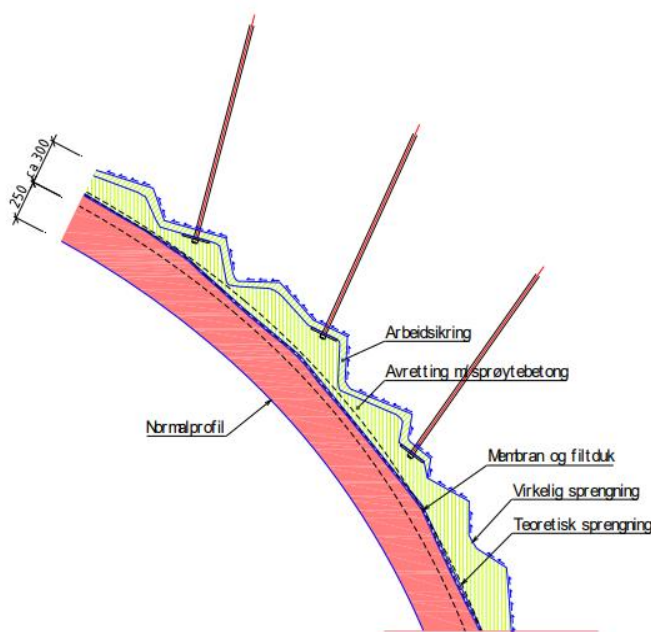
av mikroplast (38,6%) i vannprøvene, og det ble antatt at grunnen til det er at PE-skum har en mer porøs struktur som gjør at det enklere brytes ned av sol, vind og erosjon [37].

SINTEFs rapport av 1994 dokumenterte at bruk av PE-skum i tunneler vil øke sannsynligheten for eskalering av brannspredning og øke trusselen mot eventuelle mennesker som befinner seg i tunneler under brann [38].

Statens vegvesen har lenge hatt som mål å avvikle bruken av PE-skum som vann- og frostsikringsløsning i tunnel. Hovedgrunnen til det er at materialet er svært brannfarlig.

Vegdirektoratet pekte allerede i 1998 på at «*det må være et mål å ytterligere begrense og kanskje avskaffe brennbare materialer i tunneler*» [39]. I 2004 satte Vegdirektørens ledermøtet som mål å avvikle bruken av brennbart isolasjonsmateriale (PE-skum) som vann- og frostsikring i nye tunneler. Det ble iverksatt et forskningsprogram som innen utgangen av 2006 skulle gi materialer som er ubrennbare og som er godt egnet til vann- og frostsikring. [40].

I 2012 utarbeidet Statens vegvesen en strategi for bygging av nye vegtunneler som pekte på at mange av dagens vann- og frostsikringskonstruksjoner har vært prosjektert og bygget med utilstrekkelig kvalitet og har vist seg å ha vesentlig kortere levetid enn ønskelig [41]. Rapporten, som ble utarbeidet i forbindelse med «Etatsprogrammet Moderne vegtunneler» peker også på at norsk tunneldriving skiller seg fra andre lands tunnelmetoder, fordi i motsetning til Norge har mange tunneler i Europa dårlige grunnforhold med behov for solide bergsikringskonstruksjoner som kan oppta kreftene fra overliggende berg/løsmasser. Konklusjonen var at full utstøping (gjennomgående



Figur 3.18 Konsept for gjennomgående betongutstøping

betongutstøping i heng og vegger) med membran, vil redusere omfang av øvrige sikringsmidler og også erstatte tradisjonelle vann- og frostsikringsløsninger. Figur 3.18 viser denne anbefalte løsningen som innebærer full utstøping av betong inntil sprengt fjell. Denne løsningen skal ha vesentlig økt sikkerhet for brann, begrenset behov for drift og vedlikehold og en sannsynlig levetid på mer enn 100 år. Forutsetning for dette er at det utføres mer nøyaktig boring og forsiktig sprengning i konturen. En slik løsning benyttes for de fleste nye tunneler i Sveits.

Konseptet med «helstøpt tunnelhvelv» ble videre undersøkt i forbindelse med Statens vegvesen FoU-program «Varige konstruksjoner» i perioden 2012-2015 [42]. Rapporten konkluderte med at konturkvaliteten i norske samferdselstunneler er et godt stykke fra å være optimal og dermed medfører unødvendig høyt spesifikt sprengstoffbruk, unødvendig store utslipp av nitrogen og ammonium til miljøet, unødvendig mye rensk, unødvendig utkjøring og deponering av masser som

jerne inneholder miljøfiendtlig plast, og ikke minst unødvendig stort volum av bergsikring. Figur 3.19 illustrerer en ikke uvanlig kontur i norsk samferdselstunnel sammenlignet med en god kontur.



Figur 3.19 Bildet til venstre viser en ikke uvanlig kontur i en norsk samferdselstunnel, mens bildet til høyre viser en god kontur i en svensk forsøkstunnel

Til tross for at Statens vegvesen lenge har hatt som mål å avvikle bruken av brennbart isolasjonsmateriale som vann- og frostsikringsløsning i tunnel, har forskning pt ikke kommet opp med noen kostnadseffektive alternativer. Foamrox har utarbeidet et produkt med hovedkomponent av glass, som kan være et mer klimavennlig og kostnadseffektivt alternativ vann- og frostsikringsløsning i tunnel. Denne løsningen er ikke utprøvd og det foreligger ingen forskning på denne løsningen som vann- og frostsikringshvelv.

4 Forskerspørsmål

Forskerspørsmålet i denne masteroppgaven er som følger:

Hva er potensialet for reduksjon av klimagassutslipp ved bygging av tunnel med en ny type vann- og frostsikringsløsning av resirkulert glass?

Prosjektets begrensninger

Oppgaven fokuserer på norske veitunneler bygd i fjell. Beregninger av klimagassutslipp blir utført for alle prosessene frem til produksjon av hvelvløsningene. Montering av hvelvløsningene, drift- og vedlikeholdsfase og avslutning ved produktets endte levetid er ikke inkludert, på grunn av tidsbegrensning av masteroppgaven.

5 Case/materialer

5.1 Case: Torsbuåstunnelen

Casen i denne masteroppgaven er Torsbuåstunnelen på E18 Tvedestrand – Arendal, som er lokalisert ved Harebakken, helt vest i kartskissen i figur 5.1. Prosjektet E18 Tvedestrand – Arendal var det første ferdigstilte veiprojektet til Nye Veier AS om åpnet for trafikk i 2019, som vist på figur 5.1. Dette samferdselsprosjektet inkluderte bygging av 22 km ny firefelts vei med skiltet hastighet på 110km/t, bygging av 4 tunneler, 9 kulverter og driftsunderganger. Tunnelen har to løp, hver med lengde 750 m, med forventet trafikkmengde på ÅDT³ 21.000 [43]. I forbindelse med prosjektet ble 8 millioner kubikk fast fjell og 3 millioner kubikk løsmasse flyttet på. Kostnadsrammen var 3,2 milliarder kroner. Totalentreprenøren på prosjektet var AF Gruppen [44].

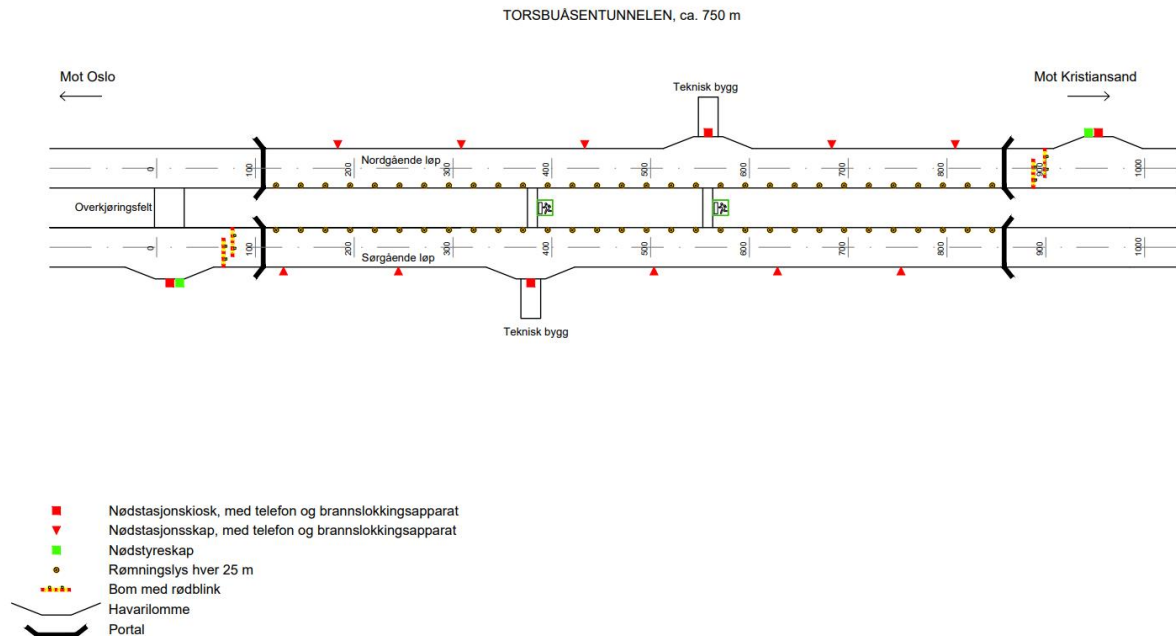
Tunnelen ble bygd som tunnelklasse E, basert på trafikkmengde og lengde, noe som gir et tunneltvversnitt på T13,2. Den dimensjonerte og utførte tunnelkonstruksjonen på dette prosjektet er en med kombinasjon av prefabrikkerte rektangulære veggelementer med overliggende sprøytebetonghvelv.



Figur 5.1 Strekningen E18 Tvedestrand - Arendal, ref [43]

³ ÅDT- Årsdøgnetrafikk. vil være et gjennomsnittstall for daglig trafikkmengde. Trafikktall her er anslått for året 2040.

Et oversiktskart over tunnelen er vist i figur 5.2, ref vedlegg 1. Torsbuåstunnelen har to løp, hvert av løpene har en havarinisje med teknisk bygg.



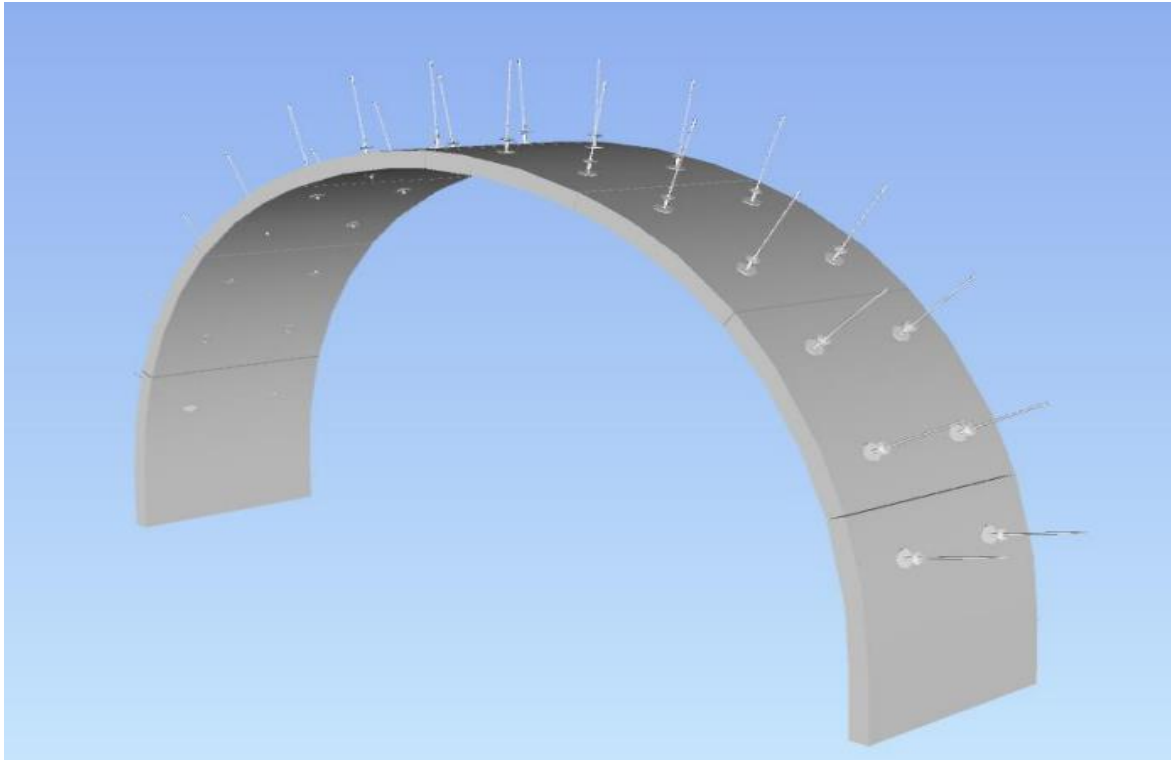
Figur 5.2 Oversikt Torsbuåstunnelen, ref vedlegg 1

Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i vann- og frostsikringsløsningen i tunnelen som ble utført i Torsbuåstunnelen. Miljøpåvirkningen fra denne løsningen blir sammenlignet med miljøpåvirkningene Foamrox sin nye vann- og frostsikringsløsning basert på glass. For materialberegningene er det tatt utgangspunkt i ett av tunnelens løp. Konseptet for Foamrox nye i vann- og frostsikringsløsning blir beskrevet i kapittel 5.2.

5.2 Materiale: vann- og frostsikring av celleglassplater

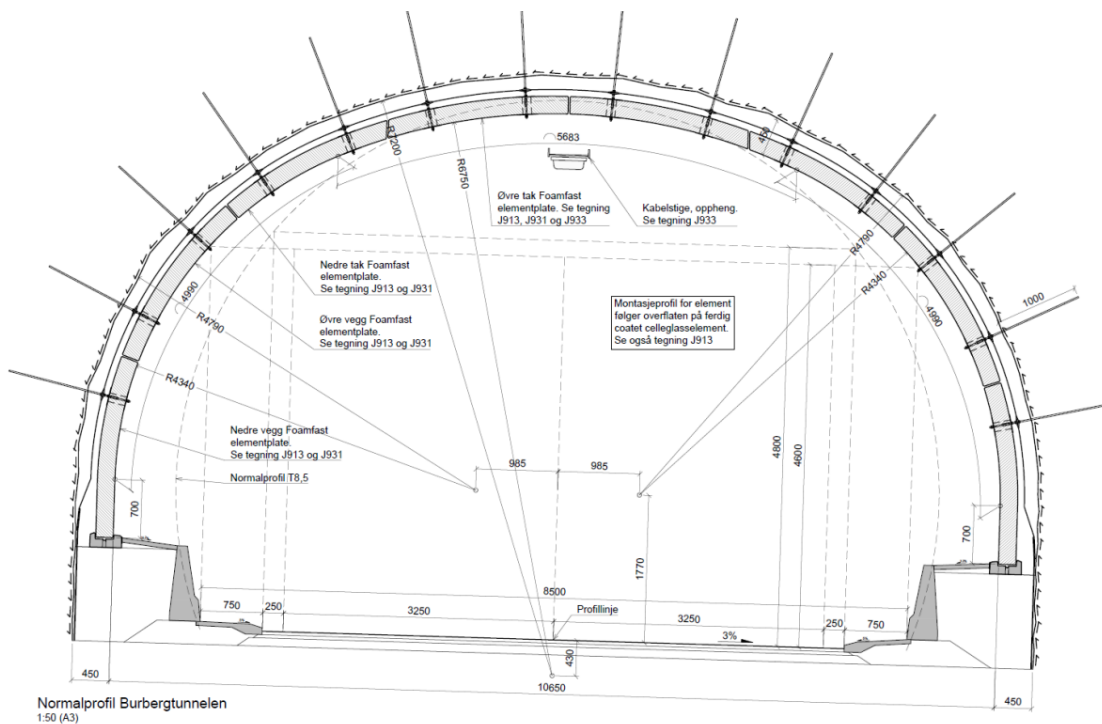
Det er utført dimensjonering av Foamrox elementløsning som vann- og frostsikring i Burbergtunnelen ved Nordøyvegen i Møre og Romsdal og løsningen ble godkjent av Vegdirektoratet som et testprosjekt en periode på 1-3år. Burbergtunnelen har et løp med total lengde på 170 meter, hvor av portalene er ca 100 meter og elementløsningen med Foamrox var planlagt for ca 70 løpemeter. Burbergtunnelen er en lavtrafikk tunnel i klasse A med en ÅDT på 400.

I henhold til konstruksjonsberegningene utført av Norconsult (vedlegg 4) vil et Foamroxhvelv i Burbergtunnelen ha et tunnelprofil bestående av 8 elementer i ringretning, hhv 2 veggelementer og 6 takelementer. Veggelementene fastholdes med 2 M16 bergbolter (B500C, lengde 0,6m, varmforsinket og pulverlakkert kamstål med gjenget ende) forankret i berg og bunnen av elementet plasseres i en fundamentstøp, mens takelementene fastholdes av 4 M16 bolter i tillegg til å hvile ned på underliggende elementer, som vist på figur 5.3.



Figur 5.3 Foamrox-hvelv

Den komplette løsningen med tunnelkledning, som inkluderer Foamrox vann- og frostsikringshvelv, ble planlagt med geometrisk utforming som vist i figur 5.4. Det er her lagt opp til føringskant i tråd med hva som er krav i en slik lavtrafikkert tunnel. Krav til føringskant er strengere ved tunnelklasse E.



Figur 5.4 Geometri normalprofil Burbergtunnelen med Foamroxhvelv, ref: vedlegg 4

Rapporten fra Norconsult, vedlegg 4, viser til at det «*i kommende prosjekter vil søkelys rettes mot å forbedre konseptet. Dette kan gjøres ved å blant annet utføre flere tester av produktet «og evt. nye sammensetninger/forsterkninger) for å oppnå høyere dimensjonerende kapasiteter. Høyere kapasiteter vil kunne føre til færre bolter, større elementer og redusert tykkelse.*» Jeg forutsetter i det videre at løsningen som er planlagt her er skalerbar.

I de videre beregningene, er det tatt utgangspunkt i at Foamrox-elementene kan erstatte vann- og frostsikringshvelv med PE-skum og sprøytebetong. Ved tunnelklasse høyere enn A er det økte krav til føringskant enn det som ble beregnet for pilotprosjektet i Burbergtunnelen. Ved en påkjøringslast skal konsekvensene for enkelte deler av konstruksjonen dokumenteres, jfr N500 kap 7.6.2. Konstruksjonselementer skal være sikret mot påkjøringslast på en slik måte at de ikke faller ned i trafikkrommet ved påkjørsel i tunnel. For veggelementer skal konstruksjonen dimensjoneres for en jevnt fordelt ulykkeslast, hvor lasten regnes som horisontallast opp til 3,5m over kjørebanelivå, ref vedlegg 2 s.13.

Ved bruk av Foamrox-elementer som erstatning for PE-skum forsvinner behovet for armeringsstål og sprøytebetong for brannsikring.

6 Metode

6.1 Litteraturstudie

Det er gjennomført tradisjonelt litteraturstudie for å finne artikler om vann- og frostsikringsløsninger, LCA-studier på tunnel, informasjon om kunnskapsstatus innen feltet av tunnelbygging i dag og øvrige artikler som kan gi mer kunnskap om hvordan Norge kan redusere miljøpåvirkning av vegtunneler.

Det er hentet ut fagfelleverderte artikler fra Oria og Google Scholar, fagartikler publisert av Statens Vegvesen og andre seriøse aktører innen bransjen eller på oppdrag fra offentlige byggherrer. Litteraturstudie skal bidra til å svare på forskerspørsmålene og til å gi input til og drøftinger av egne LCA-analyser på tunnel. Relevante søkeord har vært «LCA», «cellular glass boards», «recycled glass», «polyurea», «GLAPOR», «road tunnel», «LCA polyurea», «Polyurea resin», «polyurea coating «cellular glass boards», i ulike kombinasjoner. Søkestrategien har vært å avgrense på publiseringsår for perioden 2000 og frem til i dag. Primært ønsker jeg norske studier om LCA for tunnel, ettersom fjellkvalitet og norsk byggemetode for tunnel er hovedfokus. For fagartikler fra offentlige byggherrer er det søkt studier på Oria og på Statens vegvesens egne hjemmesider. For forskningsartikler søkes det kun etter artikler som er fagfelleverdert.

Ulemper ved litteraturstudie er at man må bruke litteratur som allerede finnes og i dette tilfelle er det mangelfull forskning. Må være ekstra oppmerksom på å få motstridende resultater, derfor er det hentet ut mest mulig artikler om LCA for tunnel for å se på ulike konklusjoner for forventet CO_2 -utslipp pr lengdemeter bygget tunnel. Det er også gjort grundigere søk på energibehov for produksjon av celleglassplater.

6.2 Life Cycle Assessment (LCA)

Denne LCA-studien følger ISO 14040/44-metoden. LCA står for «Life Cycle Assessment» og ISO-standardene angir at en LCA-studie skal baseres på analysen av miljøpåvirkning fra et produkt, tjeneste, eller et system relatert til en spesifikk funksjon, ved å ta hensyn til alle fasene av livsløpet fra «vugge-til-grav». Disse fasene inkluderer alt fra materialutvinning, produksjon, bruk og til livsløpets slutt. Det er en metode som bruker flere kriterier for å avgjøre potensiale for miljøpåvirkninger av et produkt i forskjellige kategorier.

LCA er en av flere anerkjente forskningsmetoder for kvantitativ beregning av miljøpåvirkning av et produkt, tjeneste eller industriell aktivitet. I denne LCA-studien, brukes den karakteristiske metoden ReCiPe 2016 Midpoint. Aggregerte verdier er hentet fra LCI-databasen EcoInvent versjon 3. Det er GWP som har hovedfokus av de ulike påvirkningskategoriene.

6.2.1 Hensikt og omfang

Å definere hensikt og omfang er den første fasen i en livsløpsvurdering og legger rammene for studien. Ifølge ISO 14040 skal definisjonen av hensikten inkludere intensjonen med bruk av LCA-studiet, begrunnelsen for å gjennomføre den og hvem resultatene skal kommuniseres til. Hensikten skal være klart formulert. Konteksten av studiet må defineres, som for eksempel til hvem og hvordan skal resultatene kommuniseres. Omfang er rammen for studien og beskriver hvilke systemer som

skal vurderes og hvordan dette skal gjøres. Produktsystemene skal beskrives, det skal settes systemgrenser, krav til data og tegnes et enkelt flytskjema for prosessene som skal undersøkes. Funksjonell enhet skal defineres, for å sikre at det danner et reelt sammenligningsgrunnlag. Den funksjonelle enheten som fastsettes utgjør også et referansepunkt for all input som skal innhentes for å gjøre analysen.

Hensikten med denne LCA-studien er å beregne klimagassutslipp av to ulike tunnelkledninger for en konkret tunnel, for å avgjøre hvilket konsept som vil gi lavest klimagassfotavtrykk ved bygging av tunnel. Resultatet kan brukes av bestillere som ønsker å vite hvordan utførelse av tunnel vil påvirke prosjektets klimafotavtrykk, samt til utførende som ønsker å forbedre klimafotavtrykk ved bygging av tunnel.

Den **funksjonelle enheten (FU)** til tunnelkledning er å beskytte trafikanter mot virkningene av vann- og frost i vegtunneler. For denne LCA-analysen settes den funksjonelle enheten til en 750m lang tunnel med tunnelklasse E og tunnelprofil T13,2, som er en typisk ny tunnel på høytrafikkerte motorveier i Norge.

Omfanget av LCA-studien er to ulike konsepter for tunnelkledninger. Systemgrensene for analysen er A1-A4, som vist i figur 6.1. Det vil bli inkludert prosessene fra A1 som er materialutvinning, A2 transport, A3 som er produksjon av materialene, samt A4 transport til konstruksjonsstedet. Maskiner som brukes til å montere tunnelhvelvløsningene blir ikke inkludert i studien (A5).

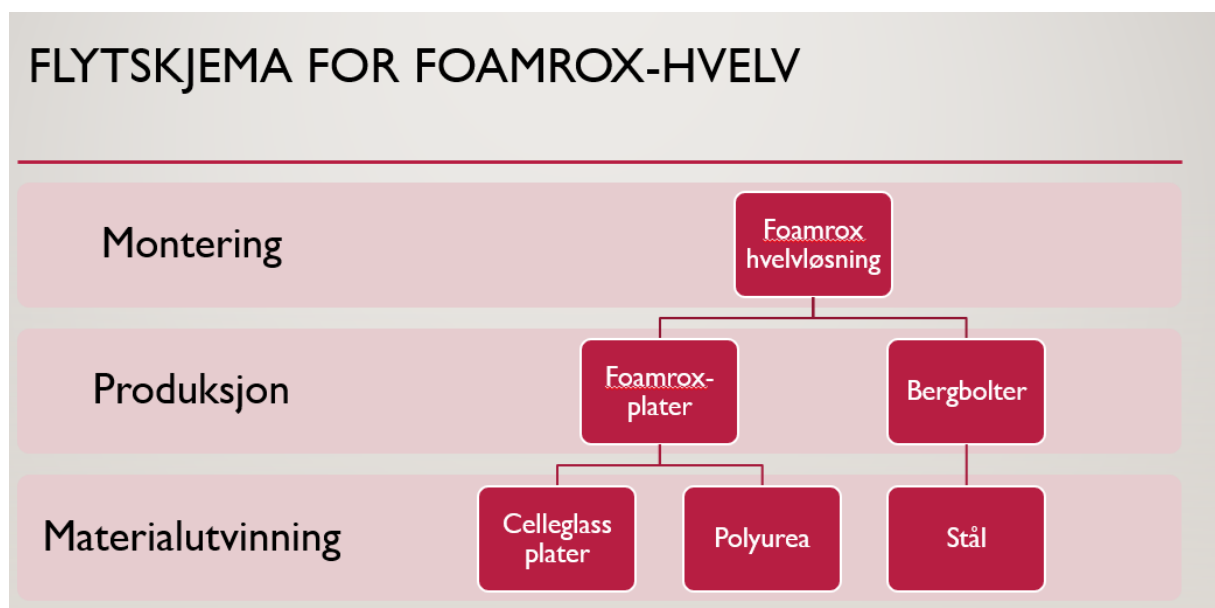
Product stage				Construction installation stage
Raw materials	Transport	Manufacturing	Transport	Assembly
A1	A2	A3	A4	A5
X	X	X	X	MND

Figur 6.1 Systemgrenser for LCA-analysen

LCA-studien inkluderer miljøberegninger av to ulike konsept for vann- og frostsikringsløsning i tunnel. Konsept A er en standard norsk vegtunnel med veggelementer i prefabrikkert betong og sprøytebetonghvelv med PE-skum. Konsept B er tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementene av betong, med en tunnelhvelvløsning fra Foamrox bestående av celleglassplater med membran. LCA-studien vil begrenses til tunnelkledning og analysene vil fokusere på produksjonsfasen. Portaler vil ikke bli medregnet i analysen fordi begge konseptene forutsetter bruk av samme løsning for portaler. Løsningen for veggelementene og fundament er forutsatt identiske i begge konseptene for tunnelkledning, ettersom veggelementet og sprøytebetonghvelvet er antatt å være to uavhengige konstruksjoner, ref vedlegg 2 s.34.

Konsept A, tradisjonell tunnel med sprøytebetonghvelv, er i dag en kjent og etablert løsning i bransjen. I denne løsningen er det inkludert materialinnhenting av råmaterialer til sprøytebetongproduksjon (cement, sand, tilslag), stål til bergbolter og nettarmering, og polyetylene som brukes til å produsere PE-skumplatene.

Konsept B, tunnelhvelv med Foamrox-løsning, er et uprøvd konsept i bransjen. Flytskjemaet for prosessene som er inkludert i denne løsningen er vist i figur 6.2. Prosessene inkluderer materialinnhenting av resirkulert glass og kjemikalier til produksjon av celleglassplater, kjemikalier til produksjon av coating, samt stål til bergboltene. Produksjonsfasen inkluderer prosessen med å sprøyte coating på celleglassplatene. Monteringsfasen inkluderer kjøring fra fabrikken hvor produksjon av celleglassplatene har foregått og til montering på byggeplass. Mellom alle prosessene blir det inkludert energi og transportbehov.



Figur 6.2 Flytskjema for Foamrox-hvelv, konsept B

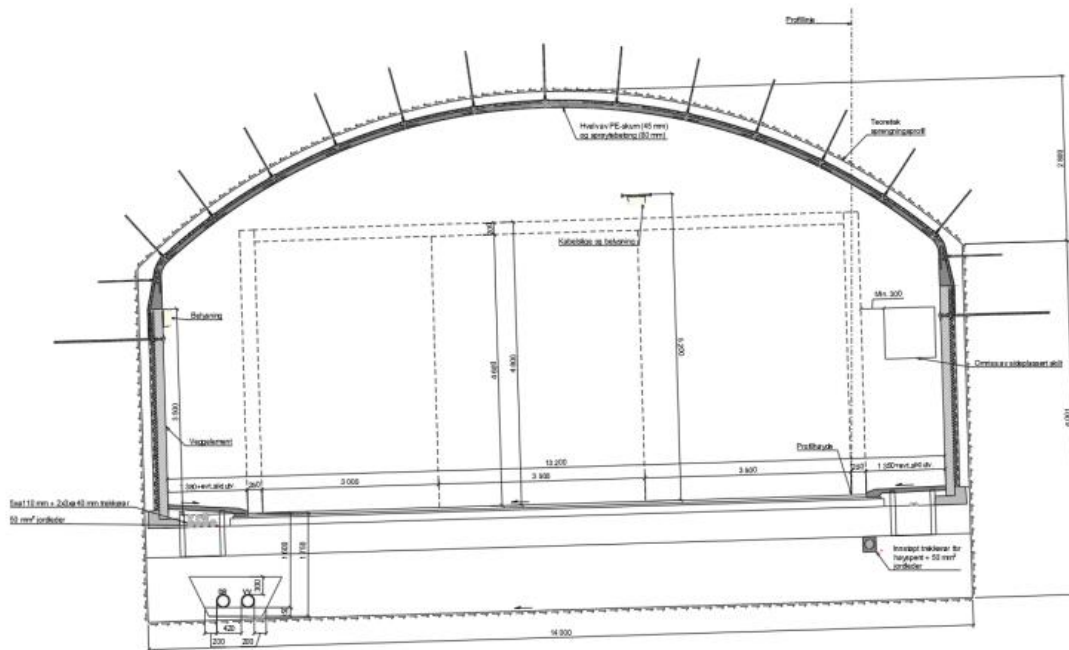
6.2.2 Livsløpsregnskap (LCI)

Den andre fasen er en «Life Cycle Inventory», livsløpsregnskap. I denne fasen innhentes data for LCA-studien, materialforbruk beregnes og det skal utarbeides en prosessbeskrivelse gjennom et flytskjema av det tekniske systemet, med de begrensningene av systemet som ble satt i første fase. Dataen kan være hentet fra databaser eller relevant litteratur. Relevant data kan være om ressursbruk, materialbruk, energi- og transportbehov, utslipp og avfall. Produktsystemet skal inneholde alle prosessene som er spesifikke for prosjektets system. Etter prosessene er identifisert, data innhentet og kvalitetssikret, skal det beregnes mengder av de ulike ressursene som brukes og tilhørende utslipp, som hører til den funksjonelle enheten som er satt. Basert på dette etableres LCI-modell og beregne LCI-resultater. Resultatene skal rapporteres. LCI-resultatene blir ofte presentert i tabell med verdier for de ulike utslippene som produseres av hver ressurs som inngår i det samlede systemet.

Livsløpsregnskap for de to konseptene av tunnelkledning blir beregnet og gjengitt hver for seg.

Konsept A: Referansetunnelen

Den dimensjonerte og utførte tunnelkonstruksjonen på dette prosjektet er en T13,2 geometri med kombinasjon av prefabrikkerte rektangulære veggelementer med overliggende sprøytebetonghvelv, som illustrert på figur 6.3 og gitt i vedlegg 3. Dimensjonering av veggelementene er beskrevet i Norconsults rapport, vedlegg 2. Veggelement 5.8m lange, 3.56m høye og 150 mm tykke, rette betongelementer.



Figur 6.3 Tunnelprofil T13,2 med kombinasjon av sprøytebetong og veggelementer, ref vedlegg 3 s.15

Elementene er utført med fasthetsklasse B45 og bestandighetsklasse MF40. Eksponeringsklasse er valgt til XD3 for tunnelside og XC3 for bergside, som innebærer krav til overdekning 40mm på tunnelside og 35mm på bergside. Som brannsikring av betongen er veggelementer tilsatt 2kg/m³ monofilament polypropylenfiber (PP-fiber) med tykkelse 18 mikrometer og lengde 6mm.

I Norconsults rapport skrives det at det benyttes XPS som frostisolasjon bak betongelementer (se vedlegg 2, kap 3.2.4). XPS-dimensjoner er imidlertid ikke beregnet i rapporten. Fra vedlegg 3 «dimensjonering av sprøytebetonghvelv», kap 3.2.4 er det gitt at frostmengden Tvedestrand leses av til $F_{10} = 7.000 \text{ h}^\circ\text{C}$. Kravet til frostisolasjon slår først inn ved frostmengde $F_{10} \geq 8000 \text{ h}^\circ\text{C}$ ([24]⁴), som omtalt i kap 3.3. Jeg forutsetter derfor at det ikke er krav om frostisolasjon bak veggelementene.

Armering i betongen er gitt ved enkelt og sentrisk armeringsnett K189 (ø8s150) vertikalt og ø8s100 horisontalt. I nedre halvdel av elementet er det lagt inn ø8s50 i stedet for ø8s100 for å redusere store rissvidder. I fundamentet er det lagt inn generelt ø8s100, som vist i figur 6.4. For å unngå opprissing

⁴ Krav 8.1.2-2

brukes 4Ø8s150 bøyer ved hvert opplegg. Betongkvalitet forutsettes satt lik som for veggelementene. Fundamentet er armert med 2 stk Ø8s100

Geometri fundament

$h := 150\text{mm}$

$b := 550\text{mm}$

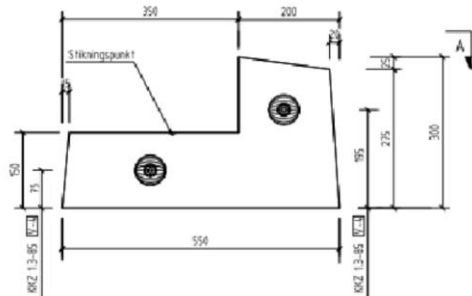
$b_{\text{vegg}} := 150\text{mm}$

$L_f := 1000\text{mm}$

Oppstikk:

$b_o := 200\text{mm}$

$h_o := 150\text{mm}$



Figur 6.4 Geometri fundament til veggelementer, ref vedlegg 2 s.68

Bergbolter med lengde 1,0m er kamstålbolter som er gjenget på enden i materialkvalitet B500NC, varmforsinket min 65 mikrometer og pulverlakkert med epoxy, beleggstykkelse 50-100 mikrometer. På tunnelsiden av veggelementene benyttes sirkulære skiver på 150mm, på bergsiden av veggelementet benyttes kvadratisk skive 150mm, begge med tykkelse 12 mm. For å feste veggelementene i berget benyttes 2stk Ø25 kamstålbolt med boltehull diameter 75mm benyttes pr veggelement.

Forutsetninger for beregning av materialbruk

Ved beregning av armeringsmengder forutsettes minimum overlapp av armeringsjern på 50 x diameter i mm [45]. Ø8-jern beregnes da med å overlappe $8\text{mm} * 50 = 40\text{cm}$ pr lengde, og lengden pr jern anslås å være 6m. For armeringsjern i fundament vil overlapping utgjøre 7 % ekstra materialbruk. Armeringsnett kan leveres med tilpasset geometri, men ofte med målene 2x5m. Veggelementene har lengde 5.8m og bredde 3.56m, og monteres hver for seg langs tunnelveggen med bergbolter inn i fjell. Jeg forutsetter at nødvendig armering for hvert veggelement leveres i optimale dimensjoner, slik at det ikke er overlapp av armering i hvert enkelt veggelement. Armeringsberegningstabell fra celsa (vedlegg 7) er lagt til grunn for konvertering av armeringsmengder om til vekt. Bøyer ved hvert opplegg er neglisjert. Anbefalingene fra Norconsults rapport inndeler den horisontale armeringer i «øvre del» og «nedre del». Det forutsettes i beregningene av materialforbruk at dette skillet går midt i veggelementet ved høyde = $3,56/2$ m. Leverandør av de prefabrickerte elementene til E18 Torsbuåstunnelen, Elementpartner AS, har sin fabrikk på Åndalsnes. Sement forutsettes transportert fra Norcem i Brevik (602km), sand og råmaterialer forutsettes fra et lokalt massetak. Ferdig betongelementer inkl armering, forutsettes fraktet med lastebil fra Åndalsnes frem til byggeplass i Arendal. Resept på B45 i veggelementene levert av leverandør (vedlegg 6).

Cut-off

Forskaling til støp av elementene forutsettes gjenbrukt i slik utstrekning, at materialbruk allokert til hvert produkt blir minimalt og derfor ikke medregnet. For betongblanding er «additives and air

entrainers" ikke tatt med. Nisjer og utsparinger neglisjeres. XPS som frostisolasjon bak veggelementene er ikke et krav i denne tunnelen. Fuger mellom veggelementene er neglisjert

Andre LCA-prosesser

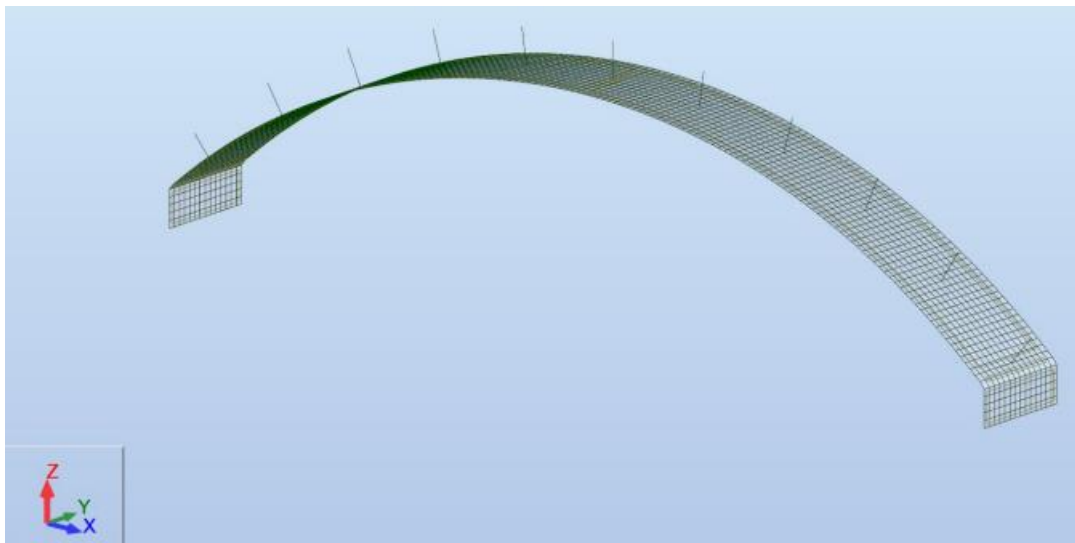
Følgende prosesser er hentet fra EcoInvent-databasen i LCA-beregningen:

Cement, portland fly ash cement 21-35% market for cement

Ethylene oxide (rer) market for ethylene 3,7kg (superplastisizer)

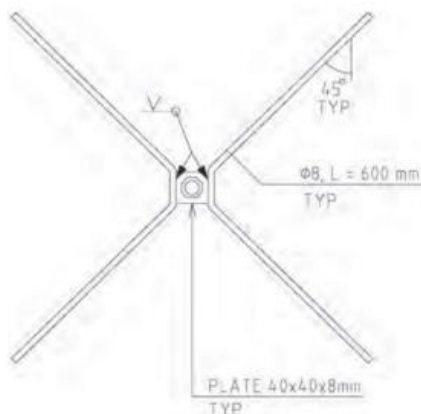
Acetic acid without water in 98% solution state (superplastisizer)

Sprøytebetonghvelvet er fastholdt av bolter inn i berg og isolert av et 45 mm tykt lag PE-kum på bergsiden av hvelvet, sprøytet med 85mm tykt lag av sprøytebetong i fasthetsklasse B35 og bestandighetsklasse M45. Armering av sprøytebetonghvelv er gjengitt fra vedlegg 3 og vist i figur 6.5. Nettarmeringen er utført med $\phi 6s150$, med materialkvalitet B500NA i både lengde- og ringretning.



Figur 6.5 Analysemodell av sprøytebetonghvelv

Hvelvet er opphengt i 11 stk radielle M16 bergbolter som er montert vinkelrett på hvelvet. Bergboltene er kamstål $\phi 16$ lengde 0,5m med materialkvalitet B500NC, korrosjonsbeskyttet med varmforsinking og pulverlakkering. Bolteavstand i ringretning er 1,42 m og avstand mellom bolteradene i lengderetning er 1,375 m. Under hver bolt er det plassert en blekksprut, med geometri gitt av figur 6.6.



Figur 6.6 Blekksprut, stålskive med påsveiset armering. Lengde diagonalt ca 600mm

Forutsetninger for beregning av materialbruk

Basert på forutsetningene om 11 bergbolter i ringretning, med bolteavstand 1,42m, antas hvelvet å være 14,2m i ringretning. Det er antatt i rapporten at åpning mellom sprøytebetong og veggelement på 1mm da det vil ligge en plastfilm i skillet, denne er ikke inkludert i materialberegningene.

På grunn av svinn i sprøytebetonghvelvet oppstår det normalt en åpning på ca 5-8 mm mellom overkant veggelement og sprøytebetonghvelvet, i tillegg vil åpning påvirkes av temperaturbevegelser. Det anses ikke å være nødvendig å brannsikre eller fuge denne åpningen spesielt.

For beregning av armeringsmengder er det anvendt tommelfingerregel om minimum overlapp av armeringnett med én rute [45]. Armeringsnett kan leveres med tilpasset geometri, men ofte med målene 2x5m. Armeringsnett $\phi 6s160$ overlappes 16cm i hver skjøt, som anslås å være hver 2m lengden og hver 5m i bredden. $Overlapp = \left(\frac{16cm}{500cm}\right) + \left(\frac{16cm}{200cm}\right) = 11\%$ ekstra materialbruk for hvert lag. Armeringsberegningstabell fra celsa (vedlegg 7) er lagt til grunn for konvertering av armeringsmengder om til vekt. Det er forutsatt at boltelengden holdes på 0,5m for alle bolter. Stål forutsettes kjøpt lokalt. Livsløpet for stål er ikke inkludert i beregningene.

Det er lagt til grunn idealisert sprøytebetongmengde, slik at det ikke er svinn fra blandemaskin og sprøyteprosess og at betongprodusenten er en lokal leverandør

Nisjer og utsparinger neglisjeres.

Konsept B - Foamrox-hvelvløsning

Foamrox-elementene består av massive elementer av celleglassisolasjon av typen Glapor PG600 som er coatet med 2.3 mm membran (polyurea). Elementene er 2,2m x 2,1 m og har en tykkelse på 210 mm (204 mm celleglass med 2-3mm polyurea på hver side). For tunnelklasse E vil dette gi 7 elementer i ringretning, og 341 elementer i lengderetning av hele tunnelen, se beregninger i vedlegg 8.

I henhold til LCA-beregningene som foreligger fra Foamrox, vedlegg 5, vil en plate med tykkelse 104mm bestå av 17kg/m² celleglass. I denne studien ser jeg på celleglassplater med tykkelse på 204mm, og anslår mengden av celleglass da til 33kg celleglass/m² plate.

Produktet består av celleglass-plate, som produseres og prekuttes i en tysk fabrikk før de fraktes 1.307km til Froland. I produksjonshallen i Froland sprayer platene med coating, en polyurea fra Spania. I følge Foamrox er det ingen avfall av polyurea i denne fasen. Det kreves heller ingen energi til denne prosessen, ettersom coatingen sprayer manuelt. Det inkluderes likevell energiforbruket for Foamrox-fabrikken, allokert pr tonn celleglassplater som selges fra fabrikkens årlig.

Celleglassplatene produseres i Tyskland og har en materialsammensetning gitt i tabell (ref vedlegg 5)

Materialsammensetning	
Resirkulert glass	87 %
Sodium silicate	12 %
Glycerine	1 %

Tabell 6-1 Materialsammensetning celleglassplater

LCA-analysen inneholder innsamling av glass, transport, prosessering av glasset (vasking, sortering, tørking og knusing), produksjon av tilslag og oppvarmingsprosess. Glasspulveret blir så mikset med et skumningsmiddel for å få glasset til å ekspandere.

Coating er en polyurea membran og som leveres fra Krypton i Spania. Polyurean heter Rayston Fire E. Undertegnede har signert en NDA med den norske importøren Kinera AS for å få tilgang til produktets sammensetning. Beskrivelsen blir derfor ikke gjengitt her, men er gjennomgått med min veileder i denne masteroppgaven. Datagrunnlaget er dermed vurdert og godkjent, og det er kun resultatene fra LCA-analysen som vil bli presentert. Beregningene tar utgangspunkt coatingen går til fyllmasse når ved når produktet er ved livsløpets slutt.

Forutsetninger for beregning av materialbruk

Det er forutsatt en ringlengde på 14,2m og at boltelengden er 0,6m for alle bolter. Nisjer og utsparinger neglisjeres.

6.2.3 Livsløpseffektvurdering (LCIA)

Den tredje fasen er en livsløpseffektvurdering. LCIA står for «Life Cycle Inventory Analysis». Målet med denne fasen er å beskrive eller indikere miljøpåvirkningen av LCI-beregningen gjennom en mer relevant miljøinformasjon. Resultatene fra LCI-analysen aggregeres inn i færre parametere. Først klassifiseres LCI-parametere ut fra hvilken miljøpåvirkning de bidrar til. Deretter gjennomføres en beregning av systemets karakteristikk, som angir det relative bidraget til utslipp og ressursforbruk for hver type av miljøpåvirkning. For eksempel vil alle utslipp av drivhusgasser samlet i én indikator for globalt oppvarmingspotensiale (GWP).

ReCiPe 2016 Midpoint er valgt som metode for å gjøre konsekvensanalysen. Aggregerte verdier i LCI-databasen er brukt fra EcoInvent versjon 3. Det er GWP som har hovedfokus av de ulike påvirkningskategoriene.

6.2.4 Tolkning

Dette steget oppsummerer resultatene fra livsløpseffektvurderingene av klimagassutslipp. For å kommunisere resultatene, vises effektvurderingene i diagrammer i resultatdelen og tolkningen i drøftingskapittelet. De essensielle og kritiske problemområdene blir valgt og deretter grundig evaluert. En komplett oppsummering vil deretter blir gitt sammen med anbefalinger.

Resultatet fra denne LCA-studien kan brukes i vegtunneler i Norge, men også i andre land med tilsvarende geologi og krav til vann- og frostsikring. Jeg antar at resultatet dermed er interessant for Statens Vegvesen, Nye Veier, Fylkeskommuner og kommuner, og beslutningstakere som skal vurdere hvilket materiale som er best egnet som vann- og frostsikringsløsning mhp klimagassutslipp.

7 Resultat

7.1 Resultat av litteraturstudie

Dette delkapittelet gjengir resultatene av litteratursøk som er gjennomført for å svare på forskningsspørsmålene om hvordan Norge kan redusere klimagassutslipp ved bygging av tunnel. Forskningsfronten på hvilke innsatsfaktorer som bidrar mest til klimagassutslipp ved bygging av tunnel blir presentert og hvor mye klimagassutslipp en typisk norsk vegtunnel representerer.

Det blir også hentet inn forskningsdata på produksjonsprosesser av celleglassplater og Polyurea, som er hovedkomponentene til Foamrox-hvelvløsning. Disse resultatene vil senere bli brukt i drøfting av LCA-analysen av Foamrox hvelvløsning, for å vurdere validiteten av egne resultater og til å peke på videre forbedringspotensialer av produksjonsprosessene. Videre er det gjort litteratursøk for å vurdere tilgjengeligheten av resirkulert glass til dette formålet hvis Foamrox-hvelvløsning blir etablert som en ny og anbefalt løsning i norske vegtunneler.

7.1.1 Forskning på miljøpåvirkning av tunnelkledning

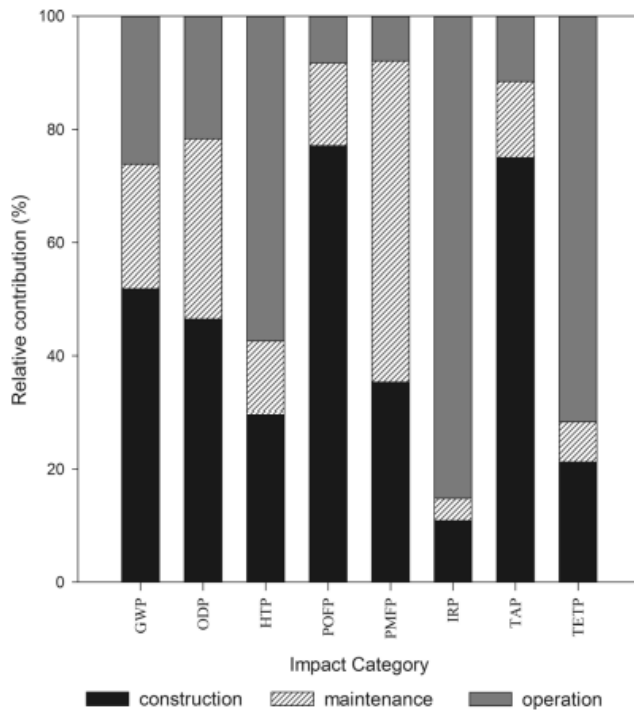
Dette kapitlet omhandler forskningsfronten på klimagassutslipp ved bygging av norske vegtunneler og bidrar til å svare på hovedspørsmålet i masteroppgaven om hvordan kan Norge redusere klimagassutslipp ved bygging av vegtunneler.

Det er nesten ingen LCA-studier som inkluderer hele livsløpet for en hel vegtunnel. Litteratursøk på dette gir få funn. I 2012 utførte Miliutenko m.fl. en svensk studie av energibruk og klimagassutslipp av en vegtunnel gjennom 100års levetid, konkluderer med at produksjon av materialene utgjør det største bidraget til energibehov og GWP. Klimagassutslipp for bygging av tunnel i fjell ble kalkulert til 4,8 tonn CO_2 -ekv pr m tunnel. I denne beregningen er det lagt til grunn vann- og frostsikringsløsning av PE-skum og sprøytebetong. Beregningene inkluderer også veioppbygging og asfalt [46].

En mer omfattende LCA-analyse av norske vegtunneler ble utført av Lizhen Huang m.fl i 2014 [47]. Denne LCA-studien er basert på data fra alle tunneler ferdigstilt i Norge i perioden 2004-2011, totalt 140km. Resultatet viser at en standard norsk vegtunnel, definert som 3km lang med tverrsnitt T9,5, slipper ut minst 31.000 tonn CO_2 -ekvivalenter (GWP gjennom sine 100års levetid). Omregnet blir det 10,3 tonn CO_2 -ekv pr m.

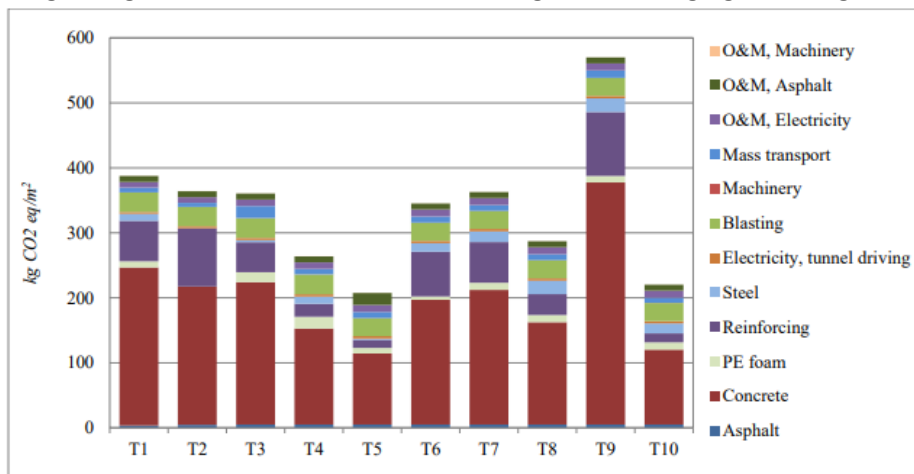
Drivhusgassutslippet stammer hovedsakelig fra betong og elektrisitet. Eksplosiver, betong, bitumen, knuste steinmaterialer og elektrisitet er de fem hovedelementene for miljøpåvirkning. Artikkelen konkluderer med at optimalisering av byggefasen, forbedring av materialbestandighet og energieffektivisering av ventilasjonssystemet vil spille en nøkkelrolle for å redusere byrden for miljøet for en typisk vegtunnel.

Huang sin forskningsartikkel viser at det er byggefasen som utgjør den største andelen av det totale GWP⁵ (51%), som vist i figur 7.1.



Figur 7.1 Fordeling av klimagassutslipp fordelt på de ulike fasene av en tunnels levetid

Hammervolds doktorgradsavhandling «Towards greener road infrastructure» av 2014 [48] så på miljøpåvirkning av en rekke case studies i norske veiprosjekter, for å identifisere miljøpåvirkning og potensielle tiltak for å redusere disse. Studien så blant annet på 10 ulike tunneler, hvor betong og armering og sprenging bidro mest til negative miljøkonsekvenser. I bruksfasen utgjør ventilasjon og belysning 15-20% i de fleste kategoriene, som vist i figur 7.2. Totale påvirkning av tunnel for profil T9 er 0,57 tonn CO₂-ekv pr m². Variasjonen i de ulike tunnelklassene er hovedsakelig behov for bergsikring, men tilhørende varierende mengde av betong og armering som brukes til det.



Figur 7.1 Tunneler: fordeling av GWP pr innsatsfaktor

⁵ Global Warming potential, målt i tonn CO₂-ekvivalenter

I 2015 ble det publisert en masteroppgave ved NTNU med LCA av Byåsen tunnelen i Trondhjem [49]. Beregningene i masteroppgaven viser at årlig klimagassutslipp knyttet til bygging og drift av en tunnel i underkant av 2km lengde er mellom 3.106-5.509 tonn CO_2 -ekvivalenter/år. Studien viser også viktigheten av å inkludere trafikk, hvorav tiltak som fører til endring av trafikkmengde får betydelig betydning for klimagassregnskapet.

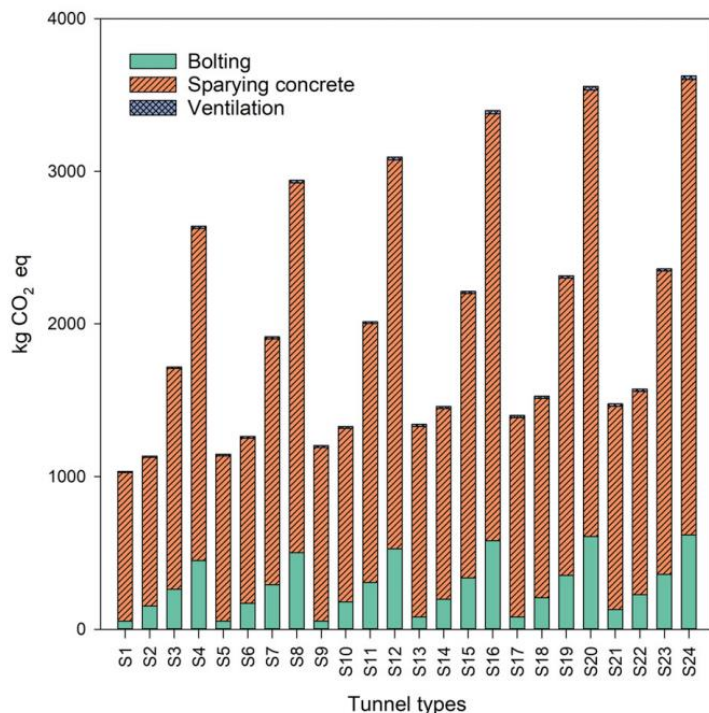
En annen norsk LCA-studie ble gjennomført i 2016 av Reyn O`Born m.fl [50], basert på Oslofjordtunnelen. Studien er gjennomført i tidligfase for to alternative korridorer av et veiprojekt, for å kvantifisere energibehov og klimagassutslipp for hver av disse to alternativene. Resultatene viser at påvirkningen fra trafikken er mer avgjørende enn påvirkningen relatert til selve infrastrukturen. Dette viser hvor viktig det er med de ulike livssyklusene, materialbruk, drivstoff og de kritiske komponentene for et slikt system.

Tunneler er sterkt påvirket av berget det skal bygges i. Jinanfeng [51] artikkel fra 2018 viser til at det omsluttete berget aldri tidligere har vært nevnt i tidligere publiserte studier på klimagassutslipp i tunneler. Studien undersøker forholdet mellom tunneldesign og bergmassens klassifisering. Det er gjennomført LCA-analyser for fem ulike kinesiske tunneler med hensyn på bergkvaliteter og tilhørende tunnelkledning. Funnene viser at klimagassutslipp øker dramatisk når bergkvaliteten reduseres. Klimagassutslipp fra bergsikring øker med 82% når omsluttende bergkvalitetet øker fra grad III til IV⁶ og 21% når bergkvalitet endres fra IV til V, og utslippene fra tunnelkledning øker samtidig med 69% for dette steget (hovedsakelig pga økt mengde av Sement og stål). God bergkvalitet bidrar til å stabilisere tunnelstrukturen etter driving. Tunneler med god bergkvalitet krever mindre materialbruk.

I 2019 utførte forskere ved NTNU en studie for å kartlegge hvilke miljøpåvirkning bergsikring i tunnel har, hvordan tunnelens størrelse og fjellkvalitet påvirker miljøpåvirkningen av bergsikring og hvilke parametere som er avgjørende for å redusere miljøpåvirkningene av bergsikring i tunnel [52]. Studien viser at sprøytebetong og bolter er begge viktige drivere for miljøpåvirkningen, men at deres relative bidrag avhenger av tunnelens størrelse og steinkvalitet. Sprøytebetong er den største bidragsyteren til klimagassutslipp, men dets relative bidrag reduseres når tunnelen blir lengre eller når bergkvaliteten blir lavere. LCA-studien som ble utført viser at sprøytebetong utgjør 94% av GWP.

Den potensielle miljøpåvirkningen med referanse til 24 forskjellige tunnelprofiler på en 3km lang tunnel er vist figur 7.2. Klimagassutslipp for 1m bergsikring varierer med mellom 1 – 3,6 tonn CO_2 -ekvivalenter. Alle miljøpåvirkninger er mer sensitive til bergkvalitet enn til tunnelens størrelse. Ved å optimalisere bruk av bolter og sprøytebetong for å forbedre de mekaniske egenskapene til berget er den viktigste nøkkelen for en grønnere bergsikring. Studien anbefaler bedre design av sprøytebetong, forbedring av bestandighet og mekaniske egenskaper for å kunne redusere tykkelse på sprøytebetong.

⁶ Tunnelklassifisering ihht «Road Tunnel Design Rules JTG TD70-2010» og «Standard for Engineering Classification of Rock Mass GB/T 50218.2014, hvor høyere klassifisering angir dårligere bergkvalitet.



Figur 7.2 Potensielle miljøpåvirkninger for ulike tunnelprofiler

7.1.2 Forskning på celleglass

Dette kapittelet omhandler forskningsfronten på produksjon av celleglass og bidrar til å svare på et av delspørsmålet i masteroppgaven om hva som er potensialet for reduksjon av klimagassutslipp ved en alternativ vann- og frostsikringsløsning av celleglass. Disse resultatene vil senere bli brukt i drøfting av LCA-analysen av Foamrox hvelvløsning, for å vurdere validiteten av egne resultater og til å peke på videre forbedringspotensialer av produksjonsprosessene. Videre er det gjort litteratursøk for å vurdere tilgjengeligheten av resirkulert glass til dette formålet hvis Foamrox-hvelvløsning blir etablert som en ny og anbefalt løsning i norske vegtunneler.

Malindu Sandanayake m.fl. skrev i 2020 en artikkel med sammenstilling av eksisterende kunnskap og funn på bærekraftig betongprodukter som er klar for markedet, hvor tradisjonelle råmaterialer erstattes med avfallsmaterialer som plastikk, glass, flyveaske og slagg [53]. Resirkulert glass som erstatning for fint og/eller grovt tilslag i betong bidrar til lavere energiforbruk, redusert drivhusgasser og gir færre miljøgifter, men konklusjonen var at tilgjengelige avfallsmaterialer er den største barrieren for å kommersialisere bærekraftige betongprodukter.

At glass har et stort potensial for gjenbruk, blir også illustrert i Butler og Hoopers bok «Glass waste» fra 2011 [54]. Den skiller på potensialet for flatt glass og glassemballasje. Flatt glass brukt til vinduer og lignende, har verken økonomisk eller miljømessig potensial for gjenbruk på grunn av måten dette blir brukt. Flatt glass har lang brukslevetid, og ved slutten av sin brukslevetid har ikke produktet restverdi i sin tilstand. Glassemballasje har imidlertid en kort brukslevetid og har derfor stor restverdi for gjenbruk. Boka viser også til at Europa i 2007 produserte 22,4 millioner tonn glassemballasje. Den største miljøpåvirkningen i glassproduksjon er det høye energiforbruket ved smelting og de tilhørende gass-utslippene. Forbrenningsovnen varmes opp til 1650 °C og det smeltet glasset holdes

på en konstant temperatur i 24 timer for glassemballasje og 72 timer for flatt glass. Energien som kreves for å smelte og blande alle komponentene utgjør mer enn 75% av det totale energiforbruket for glassproduksjon, mens anskaffelse av råmaterialene utgjør 25% [54]⁷. Dersom andelen gjenbruk av glassemballasje øker fra 30% til 80% på verdensbasis, vil det gi en besparelse på $10 \cdot 10^6$ GJ energi årlig.

I 1998 gjenbrakte vi i Norge 26% av vårt glassavfall, av i overkant 131.000 tonn [55]. I 2020 ble det levert inn 117.000 tonn glass til avfallsbehandling, hvorav 105.000 tonn ble gjenbrukt [56]. Det utgjør 89,7%. Også i EU er det stort fokus på gjenbruk av glassemballasje. Data fra 2018 viser at resirkulering av glass lå på 74% [57]. FEVE (The European Container Glass Federation) sitt utgangspunkt er at glass er en av de sjeldne materialene som kan gjenvinnes i det uendelige uten tap av kvalitet.

Transport av gjenbruksmaterialer påvirker miljøregnskapet for resirkulerte materialer. En italiensk studie av Blengini m.fl. i 2010 konkluderte med at transportavstand for resirkulerte materialer kan øke 2-3 ganger før miljøpåvirkningene av dette overgår miljøpåvirkningene av å ikke resirkulere [58].

Det er gjennomført flere studier av hvordan miljøpåvirkningen ved produksjon av celleglass kan reduseres. En studie fra Blengini m.fl. i 2011 utførte LCA-analyser for å undersøke miljøprofilen til celleglassisolasjon, produsert av resirkulert glass [59]. Konklusjonen av artikkelen er at de miljømessige fordelene relatert til det å unngå landfyll er mindre enn de økte negative miljøpåvirkningene som fremkommer fra transportbehovet ved gjenbruk. Produktet vil oppnå høyere miljømessige fordeler ved å bruke resirkulert glass som ikke kan gjenbrukes i sin opprinnelige form. Prosessering av spesialglass vil dessuten kreve mindre energi (12kWh/t), siden det inneholder mindre forurensning. Energiforbruk i produksjonsprosessen er en hot-spot og LCA-analysene anbefaler å gå over til naturlig gass eller elektrisitet. En annen viktig forbedring kan være å erstatte silisiumkarbid med en annen mer miljøvennlig tilsetning, eller å bruke resirkulert silisiumkarbid. For en mer omfattende sammenligning av celleglassplater og andre bygningsmaterialer, er det nødvendig å bedre definere hvordan produktet avhendes når brukslevetiden går ut.

Forfatteren understreker at på grunn av kommersielle interesser, er mye av bakgrunnsinformasjonen om produktet konfidensielt og begrenset for offentligheten. Det er derfor lite detaljerte og transparente LCA-studier av celleglass produkter. Noen av produsentene av resirkulerte celleglassplater utgir produktet for å være miljøvennlig, ofte basert på egenprodusert deklarasjoner om at materialene er resirkulerte, noe som bidrar til å unngå avfall til landfyll og besparelser av ikkefornybare ressurser. Produsenter kan ha ulik sortering av hvilke glass som inngår i produksjonen av celleglass-plater. Forfatteren argumenterer for at den første gevinsten ligger i å unngå å deponere materialet i naturene, men at prosessen med utvelgelse og materialgjenvinning kan bidra til å redusere den totale miljøeffekten i prosessen. Som konsekvens av dette kan miljøpåvirkningen overgå miljøgevinsten og gi selv-deklarerings av miljøkonsekvenser mindre kredibilitet.

Studien beskriver også produksjonsprosessen for celleglassisolasjon: innsamling av glass, transport, prosessering av glasset (vasking, sortering, tørking og knusing). Glasspulveret blir så mikset med et skumningsmiddel for å få glasset til å ekspandere, herunder silisiumkarbid (2%), Kalsiumsulfat

⁷ s.153

(0,5%) og kalsiumkarbonat (0,5%). Glassmiksen sendes deretter i en forbrenningsovn for forvarming og skumming ($T=900^{\circ}\text{C}$), kjøling og deretter forming. Strukturen i celleglasset binder opp en stor andel av den tilførte CO_2 en, mens resten blir sluppet ut i atmosfæren. Basert på den totale mengden CO_2 i silisiumkarbid og forutsatt at 50% blir bundet opp i materialet, er det direkte utslippet i produksjon 11kg CO_2 pr tonn celleglassisolasjon.

Den rumenske studien av Axinte m.fl viste i 2021 at ved å produsere celleglass med bruk av mikrobølger kan energibehovet reduseres fra 0,75-1,15 kWh/kg og ned til 0,684-0,691 kWh/kg, uten at dette går ut over kvaliteten til produktet [60].

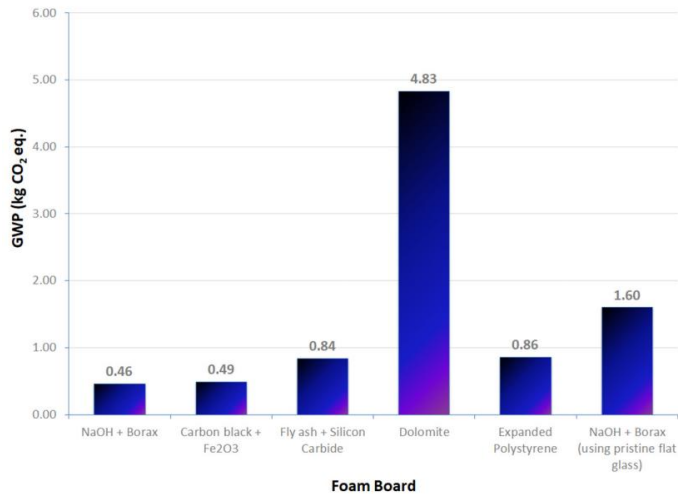
Energocell Foam Glass Factory skriver på sine hjemmesider at de bruker 140kWh i energi for å produsere 1m³ skumglassplater [61], mens EPD for Glapor sin celleglassplater angir totalt energiforbruk for 1m³ celleglassplate til å være 372kWh naturgass og 3,2kWh elektrisk energi [62]. LCA for Foamrox-løsning er vedlagt i vedlegg 5.

Scarinci m.fl beskriver i boka «*Cellular ceramics, structure, manufacturing, properties and applications*» at skumglass har en unik kombinasjon av egenskaper; veier lite, høy motstand mot trykkrefter, termiske egenskaper, høy frysemotstand, ikke brennbart, ikke giftig, vann og fuktmodstandsdyktig med videre. I tillegg er det raskt å montere, har lave transportkostnader, enkelt å håndtere, enkelt å kutte og lett anvendelig. Det vanligste skumningsmiddelet i kommersielle celleglassprodukter er silisiumkarbid (SiC) [63].

I følge Karandashova har celleglass ulike fysiske, termiske og mekaniske egenskaper ut fra hvilket skumningsmiddel og mineralske tilslag som er brukt i produksjonsprosessen [64]. Resultatet av forskningen fra 2017 angir den optimale sammensetningen for celleglass til å være 90% glasspulver, 4% glycerol, 4% sodium silicate og 3% vann.

Flere studier har sett på ulike sammensetninger av skumningsmidler i celleglassproduksjon. Owoeye m.fl. studerte bruk av sodium silicate som skumningsmiddel, som viste at når temperaturer og «grain size» øker, så øker porøsiteten mens densiteten reduseres [65].

En brasiliansk studie av da Silva m.fl. i 2021 [66] tar for seg fire ulike skumningmidler brukt i produksjon av celleglassplater: kaustisk soda (NaOH), svart karbon (C), silisiumkarbid (SiC) og dolomitt ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Skumningsmidler reagerer med glassmaterialet ved en gitt temperatur, og slipper da ut gass som formes som bobler i det nå myke glasset. Når temperaturen øker, reduseres viskositeten i glasset, noe som fører til at overflatespenningen i glasset reduseres. Denne reduksjonen i overflatespenning bidrar til å redusere trykket i gassboblene slik at de kan ekspandere og danner et porøst celleglass. I denne prosessen slippes det ut CO_2 fra skumningsmidlene til atmosfæren. LCA-analysen viser at bruk av Kaustisk soda (NaOH) gir best resultater ift GWP, og avgir bare 0,46kg CO_2 -ekv for 1m² celleglassplate med tykkelse 1cm, se figur 7.3.



Figur 7.3 Resultat av LCA-analyse for ulike skumningsmidler

Da Silva beregnet også energiforbrukets bidrag til klimagassutslipp ved produksjon av celleglassplater til å være 0,465kWh/kg. En celleglassplate produsert ved NaOH som skumningsmiddel har et energiforbruk som varierer mellom 7,89-13,5 kWh/kg avhengig av hvilken energikilde som benyttes, som vist i figur 7.4. Dette illustrerer hvor vesentlig valg av energikilde er på klimagassregnskapet i produksjon av celleglassplater.

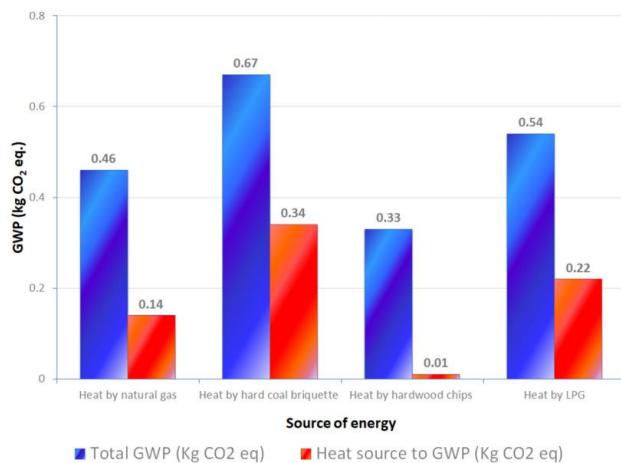
Consumption of different energy sources to produce one foam glass board (1 m² × 1 cm) with NaOH and lower heating values (LHV).

Foaming agent	Energy consumption for one foam glass board (kWh)	Fuel	LHV (kWh/kg) ^a	Fuel needed for one foam glass board (kg)
NaOH	0.58	Natural gas (NG)	13.50	0.043
		Hard coal briquette	7.89	0.074
		Hardwood chips	4.28	0.136
		Liquefied petroleum gas (LPG)	12.64	0.046

^a Tabulated values for LHV: NG, LPG, coal and wood (The Engineering Toolbox, 2019).

Figur 7.4 Energiforbruk ved produksjon av en celleglassplate á 1,25kg

Ulike energikilder gir ulikt energiforbruk og dermed ulikt bidrag til klimagassutslippene, som da Silva har vist ved figur 7.5.



Figur 7.5 GWP for NaOH-basert celleglassplate på 1m2x1cm, fordelt på ulike energikilder

7.1.3 Studier av Polyurea membran

Foamrox-hvelvløsning inneholder både celleglassplater og polyurea som membran. Dette delkapittelet omhandler forskningsfronten på polyurea for å få kunnskap om klimagassutslipp ved produksjon av dette materialet til bruk i LCA-analysen av Foamrox-hvelvløsning.

Polyurethanes er en av de viktigste polymeriske materialene som kan produseres til en film som gir en varig beskyttende coating. Polyurea har høy motstand mot vann, korrosjon og varme [67]. Det finnes ingen studier av polyurea membran som brukt i Foamrox tunnelhvelvløsning. Det finnes ingen LCA for produktet brukt i forbindelse med celleglassplater, og det foreligger heller ingen EPD fra produsent. Uten å vite innholdet i Foamrox-produktet sin Polyurea er det vanskelig å finne relevant litteraturstudie. Jeg har i prosessen klart å få tak i materialsammensetning av Polyureaen direkte fra produsent, men har signert en NDA. Materialene blir derfor ikke offentliggjort, men vurdert sammen med min veileder, som også har fått tilgang til dette, for å gi presise beregninger i LCA-analysen i denne oppgaven.

7.2 Resultat fra LCA-analysen

Livsløpsregnskap for de to ulike konseptene av vann- og frostsikringsløsning er utgangspunktet for LCA-analysen med tilhørende livsløpseffektvurdering og livsløpstolking.

7.2.1 Resultat LCI – materialforbruk

Materialforbruk for veggelementer og fundament

Basert på data fra konstruksjonsberegningene av referansetunnelen (vedlegg 2), data fra produsent (vedlegg 6) og armeringsberegningstabell fra Celsa (vedlegg 7), er beregninger utført og vedlagt i vedlegg 8. Oppsummering for materialforbruk i veggelementer er vist i tabell 7-1, og viser at det i veggelementene er 2.602 tonn betong, 47 tonn armeringsjern, samt 2 tonn bergbolter for å stabilisere veggelementene til berget.

Veggelementer	Mengde (tonn pr FU)
Betong B45, MF40	2.602 tonn
Armering	47 tonn
Bergbolter	2 tonn

Tabell 7-1 Materialforbruk for veggelementer

Materialforbruk i betong B45

Basert på resept fra leverandør av de prefabrikkerte veggelementene (vedlegg 6), Elementpartner AS, er materialsammensetning av betong B45, MF40, beregnet og vedlagt i vedlegg 8. Oppsummering for materialforbruk i veggelementer er vist i tabell 7-2. Hovedmaterialene i betongblandingen er cement, stein og støpesand.

Betong B45, MF40	kg pr m3 betong	Mengde (tonn pr FU)
Cement, standard FA	407	455
Microsilika	17	19
Vann	158	176,6
Stein 8/16	810	905,6
Støpesand 0-8	917	1 025,20
PP-fiber	2	2,2
Fillers	17	19
Vekt totalt	2328	2 602,70

Tabell 7-2 Materialforbruk for B45 MF40

Energibehov for produksjon

Ved blanding av betong, legges EPD for B45 [68] og EPD for sprøytebetong [69] til grunn at energiforbruk pr m3 ferdig betong gir 25g CO₂-ekv. Beregninger i SimaPro gir at dette svarer til 980kW norsk el-miks, både for B45 i veggelementer og for B35 Sprøytebetong.

Materialforbruk for sprøytebetonghvelv

Basert på data fra konstruksjonsberegningene av referansetunnelen (vedlegg 3) og EPD fra Weber sprøytebetong [69] er beregninger utført og vedlagt i vedlegg 8. Oppsummering for materialforbruk til sprøytebetonghvelv er vist i tabell 7-3. For et sprøytebetonghvelv i referansetunnelen går det med 1.810,5 tonn sprøytebetong, 32,8 tonn armeringsnett, 14,4 tonn PE-skum og 7,6 tonn øvrig stål til bergbolter og blekkspruter som låser dem fast i nettarmeringen.

Sprøytebetonghvelv	Mengde (tonn pr FU)
Sprøytebetong, B35 MF40	1.810,5 tonn
Armeringsnett	32,8 tonn
PE-skum	14,4 tonn
Øvrig stål (blekksprut og bergbolter)	7,6 tonn

Tabell 7-3 Materialforbruk, sprøytebetonghvelv

Materialforbruk i sprøytebetong

Basert på EPD fra Weber på sprøytebetong [69] er materialsammensetning av sprøytebetong B35, MF40, beregnet som snittverdi og vedlagt i vedlegg 8. Oppsummering for materialforbruk i veggelementer er vist i tabell 7-4. Hovedmaterialet i sprøytebetongen er tilslagene i form av fin sand.

EPD sprøytebetong: B35	Mengde i tonn pr FU
Binder (10-30%)	400
Aggregate (60-90%)	1500
Filler (1-5%)	60
Additives <0,5%	50
Sum vekt	2012

Tabell 7-4 Materialsammensetning av sprøytebetong B35

Materialforbruk i Foamrox-hvelv

Basert på data fra vedlegg 4 og 5, er beregninger utført og vedlagt i vedlegg 8. Oppsummering for materialforbruk i veggelementer er vist i tabell 7-5 og viser at det brukes 305,8 tonn resirkulert glass, 42,2 tonn sodium silicate og 3,5 tonn glycerine for å lage alle celleglassplatene som er nødvendig for Foamrox-hvelvløsningen i denne studien.

	Mengde i tonn pr FU
Celleglass-plate	351,5
<i>Resirkulert glass</i>	305,8
<i>Sodium silicate</i>	42,2
<i>Glycerine</i>	3,5
Polyurea	74,2
Bergbolter	8,7

Tabell 7-5 Materialsammensetning av Foamrox-hvelv

Transport beregnet i analysen er beregnet i vedlegg 8, og gjengitt i tabell 7-6. Det er særlig transport av polyurea og celleglassplater som krever energiforbruk i denne LCA-studien, med henholdsvis 2.652 km og 1.307km. Alle materialene forutsettes fraktes med euro 5 Lorry>32 tonn.

Produsent	Produkt	Transportmiddel (euro 5)	Produksjonssted	Material mengde (tonn)	Avstand (km)
Glapor	Celleglassplater	Lorry > 32 ton	Tyskland	351,45	1 307
Kinera	Polyurea	Lorry > 32 ton	Spania, Tarragona	74,2	2 652
Foamrox	Hvelv	Lorry > 32 ton	Froland	425,6	12
Norcem	sement	Lorry > 32 ton	Brevik	407	601
Elementpartner AS	Veggelement og fundamenter	Lorry > 32 ton	Åndalsnes	2 649	697

Tabell 7-6 Transportberegninger i LCA-analysene

Energiforbruk for materialene er beregnet i vedlegg 8, og er gjengitt i tabell 7-7. Glapor produserer celleglassplater hovedsakelig basert på tysk el-mix, men også naturgass. Kinera produserer Polyurea hovedsakelig basert på naturgass, men med et lite innslag av spansk el-miks. Sprøytebetong, B45 til veggelementer og ferdig produksjon av Foamrox hvelvløsning produseres i Norge basert på norsk el-miks.

Produsent	Produkt	Energi (kWh/tonn)	Energikilde
Glapor	Celleglassplater	207,2 kWh/tonn 2.314,1 kWh/tonn	Naturgass Tysk el-miks
Kinera	Polyurea	21.378,2kWh/tonn 578 kWh/tonn	Naturgass Spansk el-mix
Foamrox	Hvelv	500,9 kWh/tonn	Norsk el-miks
Norsk leverandør	Sprøytebetong	437,9 kWh/tonn	Norsk el-miks
Elementpartner	B45	487,6 kWh/tonn	Norsk el-miks

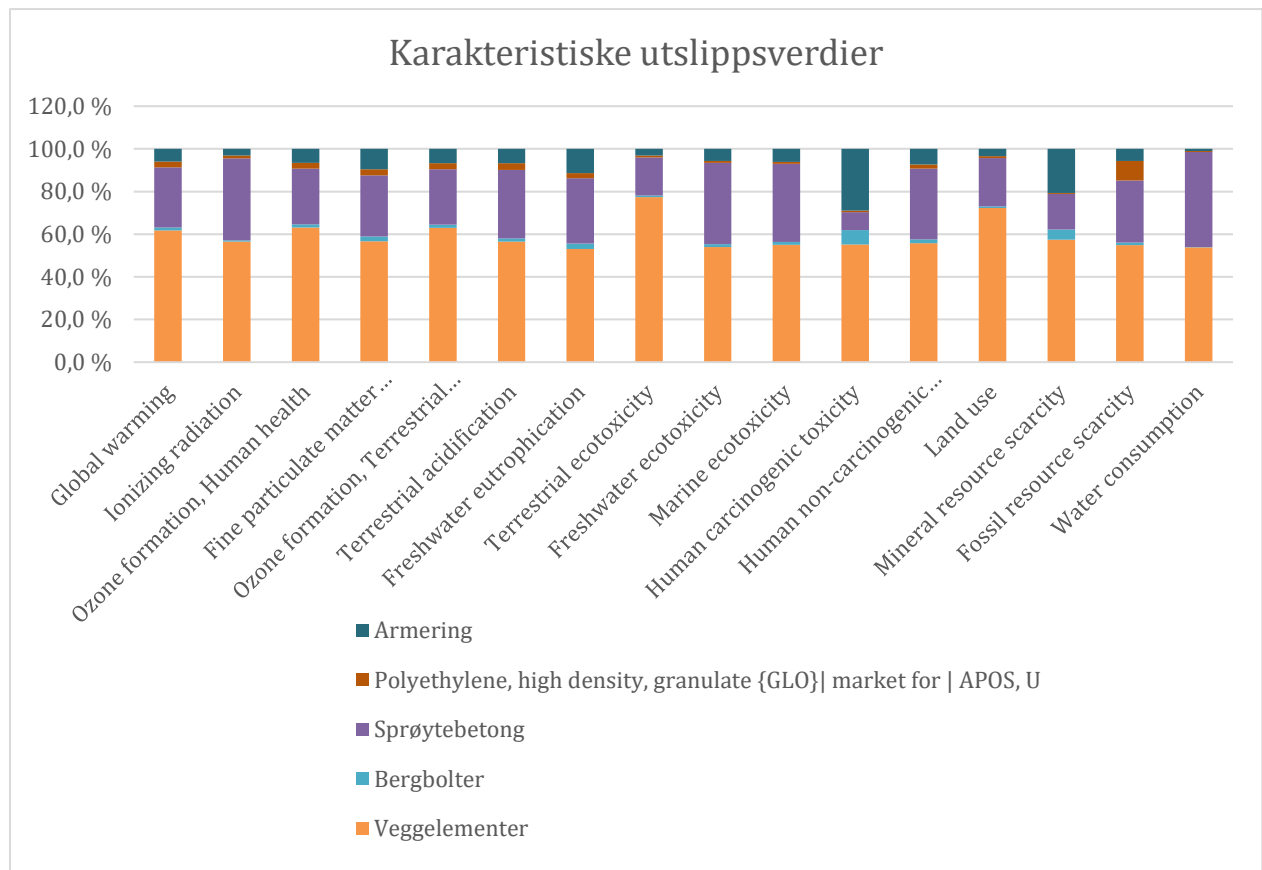
Tabell 7-7 Energiforbruk i produksjon

7.2.2 Resultat av LCA-analyse

LCA-analysen ble gjennomført for en 750m lang tunnel med to ulike konsepter for tunnelkledning. Konsept A er en tunnelkledning med prefabrikkerte veggelementer og fundament av betong, samt sprøytebetonghvelv med PE-skum, og konsept B er en tunnelkledning med prefabrikkerte veggelementer og fundament av betong, samt Foamrox-hvelvløsning.

Konsept A

Miljøpåvirkningene fra en tunnel med tradisjonell tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementer av betong og sprøytebetonghvelv med PE-skum er vist i figur 7.6 (se også vedlegg 10). Det er veggelementene som representerer den høyeste miljøpåvirkningen innenfor samtlige kategorier. Sprøytebetong er det materialet som utgjør nest mest miljøpåvirkning av innsatsfaktorene innenfor de aller fleste kategorier, med unntak av nettarmering i sprøytebetonghvelvet gir størst utslag på kategoriene «Human carcinogenic toxicity» og «Mineral resource scarcity».



Figur 7.6 Miljøpåvirkning av tunnel med tradisjonell tunnelkledning

De kategoriserte miljøpåvirkningene for hver innsatsfaktor i denne analysen er gitt i tabell 7-8 (se vedlegg 11). Det totale GWP for denne løsningen med tradisjonell tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementer av betong med sprøytebetonghvelv og PE-skum utgjør totalt 1224,5 tonn CO₂--ekvivalenter. Denne tunnelkledningen gir lite påvirkning på kategoriene «stratospheric ozone depletion» og «Marine eutrophication» med henholdsvis 0,46 kg CFC11-eq og 26,15 kg N-eq.

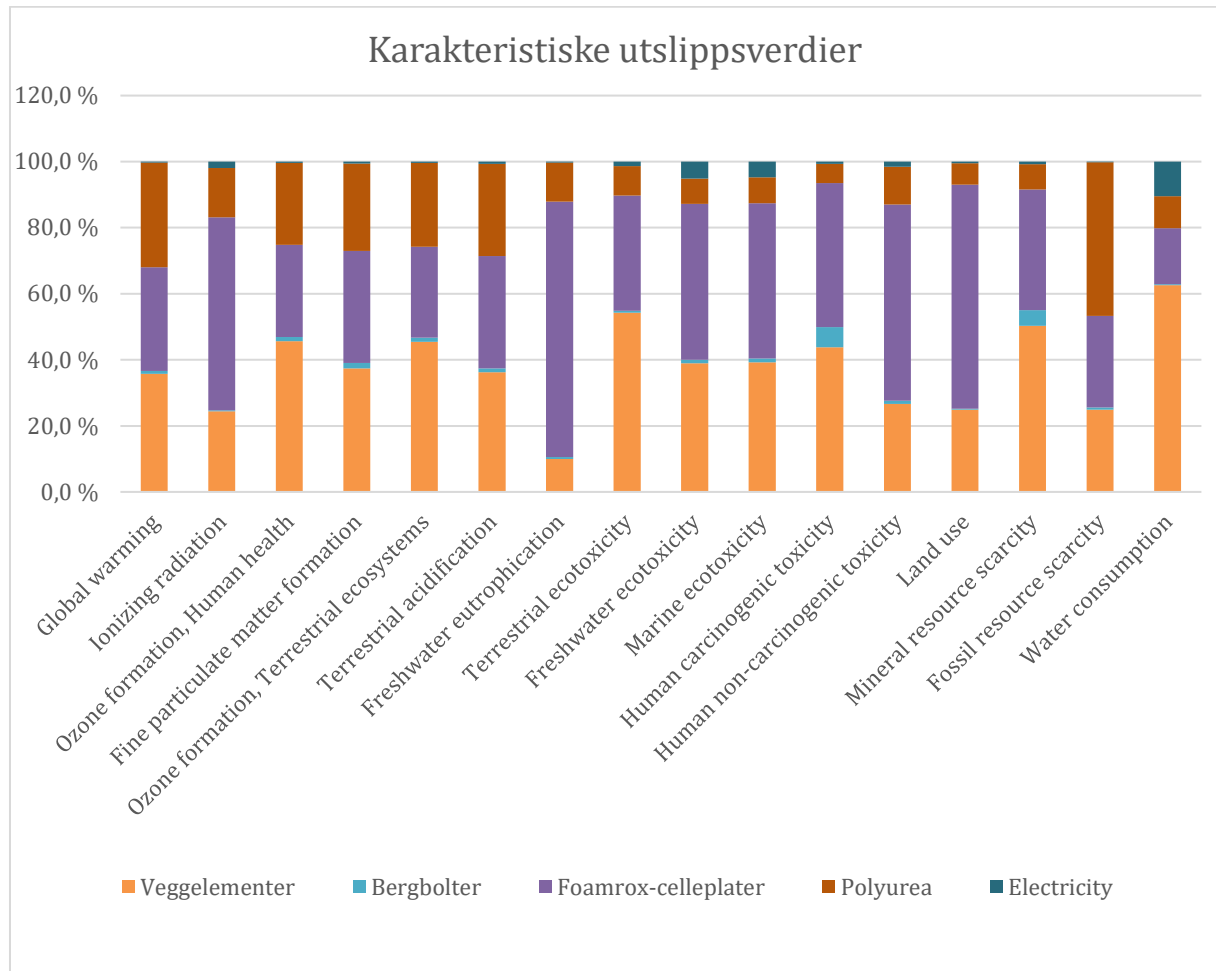
Impact category	Total	Veggelementer	Bergbolter	Sprøytebetong	PE-skum	Armering	Unit
Global warming	1224526,24	755776,35	16772,04	345249,56	34343,70	72384,59	kg CO ₂ - eq
Stratospheric ozone depletion	0,46	0,30	0,00	0,14	0,01	0,02	kg CFC11 eq
Ionizing radiation	67239,72	37963,65	491,40	25815,98	847,94	2120,76	kBq Co-60 eq
Ozone formation, Human health	2697,97	1701,11	41,26	703,84	73,71	178,06	kg NOx eq
Fine particulate matter formation	1288,86	731,17	28,52	369,07	37,00	123,10	kg PM2.5 eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	2788,96	1754,35	43,73	723,25	78,90	188,72	kg NOx eq
Terrestrial acidification	2911,60	1644,02	44,83	936,13	93,12	193,49	kg SO2 eq
Freshwater eutrophication	311,30	165,01	8,20	95,28	7,40	35,41	kg P eq
Marine eutrophication	26,15	16,65	0,54	6,12	0,52	2,32	kg N eq
Terrestrial ecotoxicity	8209894,74	6351469,84	59539,10	1470656,62	71270,99	256958,20	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	91654,27	49525,62	1206,06	34956,04	761,46	5205,09	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	118688,34	65244,30	1681,09	43491,92	1015,81	7255,22	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	205956,70	113648,18	13808,60	17435,70	1469,23	59595,00	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	882065,64	492485,26	14927,11	293169,77	17061,24	64422,26	kg 1,4-DCB
Land use	40494,04	29263,94	326,40	9162,04	332,99	1408,66	m ² a crop eq
Mineral resource scarcity	12541,60	7209,45	600,22	2082,78	58,70	2590,44	kg Cu eq
Fossil resource scarcity	262556,72	143869,37	3433,32	76274,28	24162,27	14817,48	kg oil eq
Water consumption	71144,94	38246,16	164,44	31677,88	346,76	709,70	m ³

Tabell 7-8 Kategoriserte miljøpåvirkninger fra tradisjonell tunnelkledning

Konsept B

Miljøpåvirkningene fra en tunnel med tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementer av betong og et nytt konsept med Foamrox-hvelv er vist i figur 7.7 (se også vedlegg 12). GWP for hvelvløsningen er forholdsvis likt fordelt mellom veggelementer, celleglassplater og Polyurea-membranen.

Celleglassplatene er den innsatsfaktoren som gir høyest miljøpåvirkning innenfor kategoriene «Ionizing radiation», «Freshwater eutrophication», «Freshwater ecotoxicity», «Marine exotoxicity», «Human non-carcinogenic toxicity» og «Land use». Veggelementene har høyest innflytelse på miljøpåvirkningene i kategoriene «Terrestrial ecotoxicity» og «Water consumption»



Figur 7.7 Miljøpåvirkning av tunnel med Foamrox-hvelvløsning

De kategoriserte miljøpåvirkningene for hver innsatsfaktor i denne analysen er gitt i tabell 7-9 (og vedlegg 13). Det totale GWP for denne løsningen med tradisjonell tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementer av betong med sprøytebetonghvelv og PE-skum utgjør totalt 2115,4 tonn CO₂-ekvivalenter. Denne tunnelkledningen gir lite påvirkning på kategoriene «stratospheric ozone depletion» og «Marine eutrophication» med henholdsvis 1,1 kg CFC11-eq og 171,1 kg N-eq.

Impact category	Total	Veggelementer	Bergbolter	Foamrox-celleplater	Polyurea	Electricity	Unit
Global warming	2115547,3	755776,4	19199,6	664603,0	670466,3	5502,1	kg CO2 eq
Stratospheric ozone depletion	1,1	0,3	0,0	0,6	0,2	0,0	kg CFC11 eq
Ionizing radiation	155670,1	37963,6	562,5	90855,5	23315,9	2972,5	kBq Co-60 eq
Ozone formation, Human health	3726,3	1701,1	47,2	1041,0	924,3	12,7	kg NOx eq
Fine particulate matter formation	1956,3	731,2	32,7	664,4	516,8	11,3	kg PM2.5 eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	3863,7	1754,4	50,1	1064,8	981,5	13,0	kg NOx eq
Terrestrial acidification	4539,0	1644,0	51,3	1545,6	1268,6	29,5	kg SO2 eq
Freshwater eutrophication	1653,2	165,0	9,4	1279,0	195,5	4,2	kg P eq
Marine eutrophication	171,1	16,7	0,6	130,0	23,6	0,3	kg N eq
Terrestrial ecotoxicity	11702732,3	6351469,8	68156,6	4076441,7	1045212,4	161451,8	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	127085,8	49525,6	1380,6	59966,5	9741,1	6471,9	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	166137,3	65244,3	1924,4	78064,0	13021,4	7883,2	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	259495,6	113648,2	15807,2	113159,2	15209,3	1671,7	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	1847932,8	492485,3	17087,6	1099317,2	210264,9	28777,8	kg 1,4-DCB
Land use	117748,6	29263,9	373,6	79845,0	7719,9	546,1	m2a crop eq
Mineral resource scarcity	14349,2	7209,5	687,1	5239,0	1096,3	117,4	kg Cu eq
Fossil resource scarcity	578396,6	143869,4	3930,2	160269,0	269193,5	1134,5	kg oil eq
Water consumption	61072,6	38246,2	188,2	10347,0	5904,8	6386,4	m3

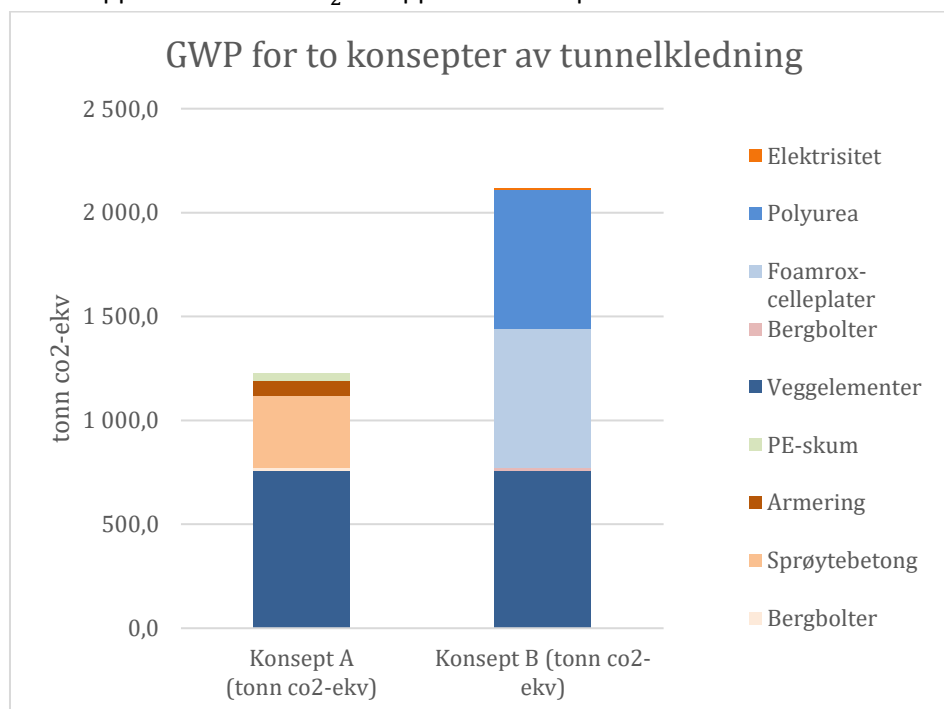
Tabell 7-9 Kategoriserte miljøpåvirkninger fra tunnelkledning med Foamrox-hvelv

Det gir følgende resultater for GWP fordelt på de ulike elementene i løsningene, som vist i tabell 7-10. Tabellen viser at det er konsept B som gir høyest totalt CO_2 -utslipp med 2.115,6 tonn CO_2 -ekvivalenter. Fordelt på tunnelens lengde på 750m gir GWP-resultatet for disse to tunnelkledningene en variasjon på 1,6 – 2,8 tonn CO_2 -ekv pr m.

	Konsept A (tonn CO_2 -ekv)	Konsept B (tonn CO_2 -ekv)
Veggelementer	755,8	
Bergbolter	16,8	
Sprøytebetong	345,2	
Armering	72,4	
PE-skum	34,3	
Veggelementer		755,8
Bergbolter		19,2
Foamrox-celleplater		664,6
Polyurea		670,5
Elektrisitet		5,5
	1 224,5	2 115,6
tonn CO_2 -ekv pr lengdemeter tunnel	1,6	2,8

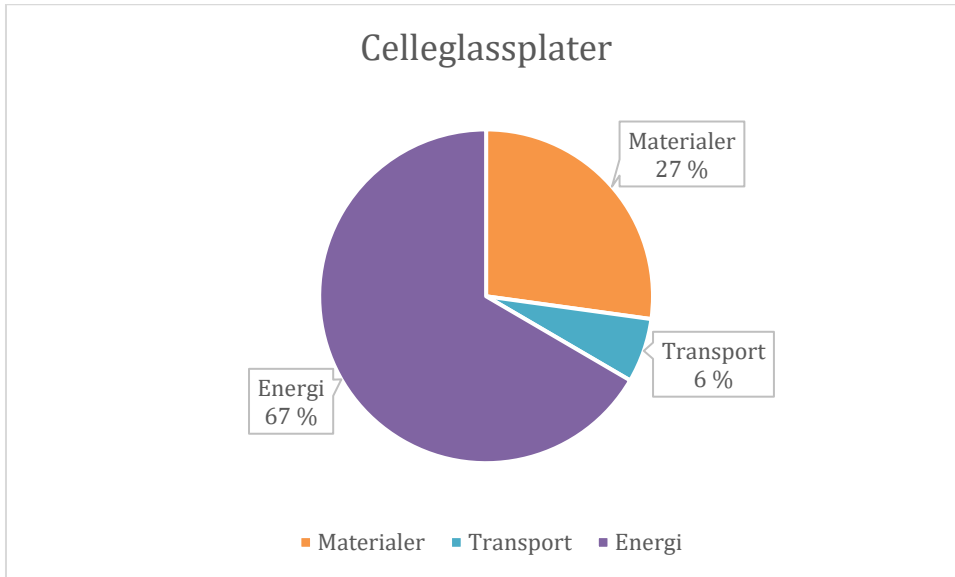
Tabell 7-10 LCA-beregning av GWP for to ulike vann- og frostsikringsløsninger

Den karakteristiske fordelingen av CO_2 -utslipp (GWP) for de ulike vann- og frostsikringsløsningene er illustrert i figur 7.8. Veggelementene er lik for begge løsningene. Tekstfeltet over «veggelementer» i diagrammet representerer innsatsfaktorene i konsept B, mens tekstfeltet under «veggelementer» i diagrammet representerer innsatsfaktorene i konsept A. Søylediagrammene viser at utslipp ved veggelementene er like for begge løsningene, men det er både polyurea og celleglassplatene som driver opp det samlede CO_2 -utslippet for konsept B.



Figur 7.8 Grafisk fremstilling av CO_2 -utslipp fordelt på konsept A og B

Videre analyse av celleglassplatene er vist figur 7.9 og tabell 7-11. Det er energiforbruket ved produksjon som bidrar i all vesentlighet for CO_2 -utslippet i denne prosessen.

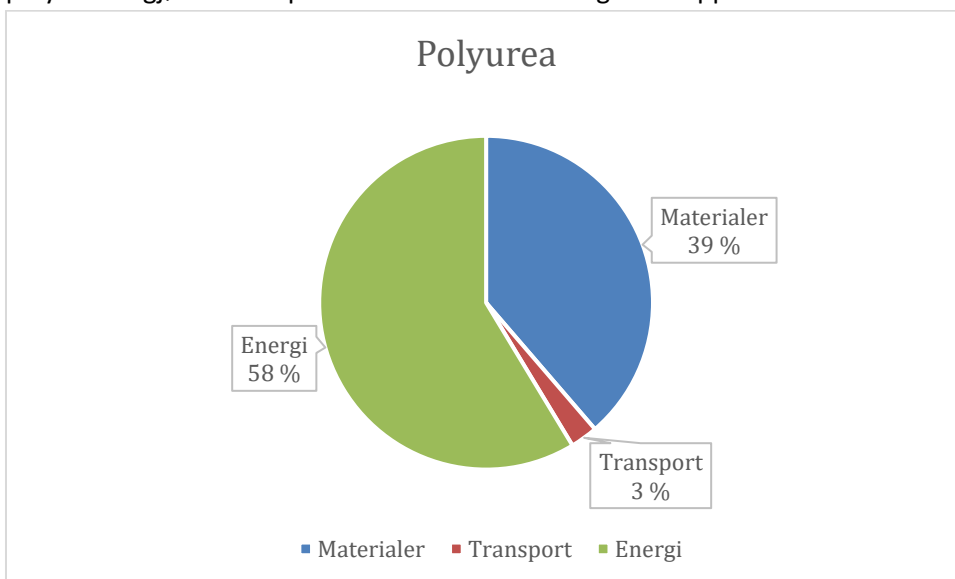


Figur 7.9 Prosentvis fordeling av CO_2 -utslipp i produksjon av Polyurea

Celleglassplater	tonn CO_2 -ekv
Materialer	181,0
Transport	41,5
Energi	443,4
Sum	665,9

Tabell 7-11 CO_2 -ekv for celleglassplatene

LCA-analysen for Polyurea gir et samlet GWP til 670,5 tonn CO_2 -ekv, jf tabell 7-9. LCA-analyse for selve polyurea-prosessen er vist i figur 7.10. Figuren viser at energi i produksjonsprosessen av polyurea utgjør 58% av produktets samlede klimagassutslipp.



Figur 7.10 Prosentvis fordeling av GWP for polyurea

Tabell 7-12 viser GWP og vekt for de to ulike tunnelhvelvløsningene. Vekten for de to løsningene er svært forskjellig, men det er ingen automatisk sammenheng med vekt og CO₂-utslipp. Materialene i konsept B veier totalt 1,4 tonn mindre enn materialene i konsept A. Konsept B (Foamrox) har likevel nesten dobbelt så høyt klimagassutslipp som konsept A.

	Konsept A		Konsept B	
	Mengde (tonn)	tonn CO ₂ -ekv	Mengde (tonn)	tonn CO ₂ -ekv
Veggelementer	2 651,0	756,0	2 651,0	756,0
Bergbolter	7,6	16,8	8,7	19,2
Sprøytebetong	1 810,5	345,0		
Armering	32,8	72,4		
PE-skum	14,4	34,3		
Foamrox-celleplater			351,5	665,0
Polyurea			74,2	670,0
Elektrisitet				5,5
Sum	4 516,3	1 224,5	3 085,4	2 115,7

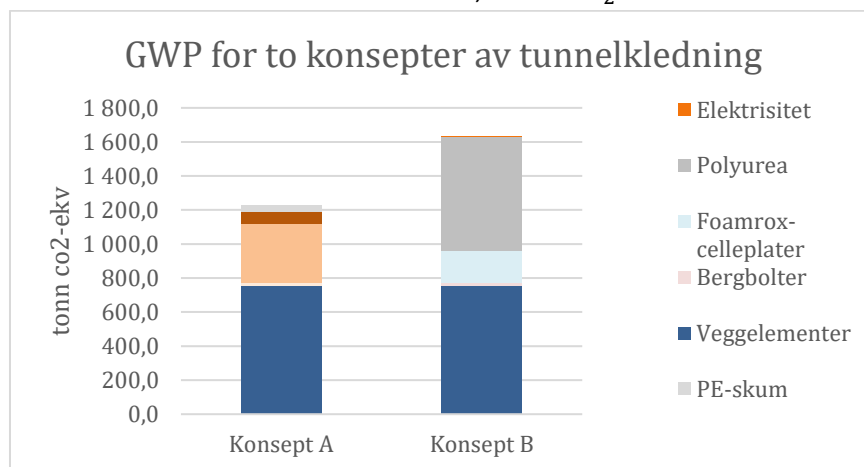
Tabell 7-12 Oversikt mengde og co2-ekv for begge vann- og frostsikringsløsningene

Veggelementene inkludert fundamenter er lik for begge konseptene og utgjør hhv 62% og 36% av det totale GWP for løsningene. Det er konsept B som gir høyest CO₂-ekv målt i tonn av disse to konseptene.

Optimaliserte løsninger av konsept B med Foamrox hvelvløsning

Det er videre utført analyser baserte på noen tenkte scenarier for å vurdere potensiale for reduksjon av klimagassutslipp ved Foamrox hvelvløsning.

Dersom Foamrox hadde valgt å produsere celleglassplatene i Norge basert på norsk el-mix og gjennomført energioptimalisering i tråd med forskningen, samt også da redusert transportavstand for celleglassplatene fra 1.307km til 30km, ville det gitt betydelig positive utslag på det samlede co₂-utslippet, som vist i figur 7.11 og tabell 7-13 (beregninger i vedlegg 14). Foamrox-hvelvløsning ville også ved dette scenarioet hatt høyere klimagassutslipp enn tradisjonell tunnelkledning, men differansen ville blitt redusert med 483,6 tonn CO₂-ekv.



Figur 7.11 Figur 7.9 LCA for en energioptimalisert løsning for produksjon av celleglassplater

Celleglassplater	Optimalisert løsning (tonn CO₂-ekv)	Opprinnelige resultat (tonn CO₂-ekv)	Differanse (tonn CO₂-ekv)
Materialer	181,0	181,0	0
Transport	0,6	41,5	-41
Energi	0,7	443,4	-442,7
Sum	182,3	665,9	-483,7

Tabell 7-13 LCA for en energioptimalisert løsning for produksjon av celleglassplater

Beregninger fra SimaPro viser at utslipp fra transport utgjør 0,09kg CO₂-ekv pr tonkilometer (tonn materialer * transportavstand i km). Tabell 7-14 og 7-15 viser de samlede utslippene ved transportbehovet for denne case-studien og en valgt optimalisert løsning ved en lokal produsent av betong og veggelementer lokalisert 30km fra Torsbuåstunnelen hvor disse skal monteres (se vedlegg 14).

Utslipp fra transport (case-studien)	menge (tonn)	km	Tkm	tonn CO ₂ -ekv
Cement	455	601	273 455	25
Veggelementer	2 649	697	1 846 353	166
Sum	3 104	1 298	2 119 808	191

Tabell 7-14 Utslipp fra transport, konsept A

Utslipp fra transport (optimalisert)	Mengde (tonn)	km	Tkm	Tonn CO ₂ -ekv
Cement	455	97	44 135	4
Veggelementer	2 649	30	79 470	72
Sum	3 104	127	123 605	76

Tabell 7-15 Potensiale for reduksjon av GWP for veggelementer

8. Diskusjon

Hovedfunn

LCA-analysen viser at det samlede utslippet for en tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementer og sprøytebetonghvelv gir lavere klimagassutslipp enn en tunnelkledning med prefabrikkerte veggelementer og Foamrox tunnelhvelv. Løsningen med sprøytebetonghvelv gir et potensielt utslipp av 1,6 tonn CO_2 -ekvivalenter pr lengdemeter tunnel. Løsningen med Foamrox-hvelv gir et utslipp på 2,8 tonn CO_2 -ekvivalenter på lengdemeter tunnel, som vist i tabell 7-10.

I Konsept A med prefabrikkerte veggelementer og tradisjonell vann- og frostsikringsløsning av PE-skum og sprøytebetonghvelv med PE-skum, er det veggelementene som representerer den høyeste miljøpåvirkningen innenfor samtlige miljøkategorier. Veggelementene utgjør 62% av GWP for denne løsningen. Sprøytebetong er det materialet som utgjør nest mest miljøpåvirkning av innsatsfaktorene innenfor de aller fleste kategorier. Potensialet for å redusere de negative miljøpåvirkningene av denne løsningen ligger derfor særlig i å se på produksjonsprosessene av veggelementene. Reduksjon av klimagassutslipp ved produksjon av veggelementer løser imidlertid ikke utfordringen med brannfaren av PE-skummet som omtalt kap 3.1.2 og kap 3.4.

Miljøpåvirkningene fra konsept B med tunnelkledning av prefabrikkerte veggelementer av betong og et nytt konsept med Foamrox-hvelv er GWP forholdsvis likt fordelt mellom veggelementer, celleglassplater og Polyurea-membranen. Celleglassplatene er den innsatsfaktoren som gir høyest miljøpåvirkning innenfor kategoriene «Ionizing radiation», «Freshwater eutrophication», «Freshwater ecotoxicity», «Marine exotoxicity», «Human non-carcinogenic toxicity» og «Land use». Veggelementene har GWP på 755,8 tonn CO_2 -ekv, celleglassplatene har GWP på 664,6 tonn CO_2 -ekv, mens polyureaen har GWP på 670,5 tonn CO_2 -ekv, som vist i figur 7.8. I prosessene tilhørende celleglassplatene, er det energi som er den største innsatsfaktoren for det samlede klimagassutslippet. Energi står for 67% av GWP for celleglassplatene, som vist i figur 7.9. Materialene står for 27%, mens transporten står for 6% av GWP. For produksjon av polyurea er det også energi som utgjør hovedandelen av GWP. Energi bidrar til 58% av det samlede GWP for polyurea, mens materialene utgjør 39% og transporten kun 3%, som vist i figur 7.10.

Potensialet for å redusere de negative miljøpåvirkningene av Foamrox-hvelvløsningen ligger derfor særlig i å se på produksjonsprosessene av celleglassplater og polyurea med tanke på energikilde og energioptimalisering, samt ved å redusere klimagassutslipp fra veggelementer.

Tradisjonell vann- og frostsikringsløsning vurdert opp mot eksisterende forskning

For å vurdere validiteten av resultatene fra klimagassutslippet av tradisjonell vann- og frostsikring er det utført litteraturstudie om forskningsfronten på dette området.

Miliutenko m.fl. [47] beregnet i 2012 at klimagassutslipp for en tunnel i fjell med vann- og frostsikringsløsning av PE-skum og sprøytebetonghvelv utgjorde 4,8 tonn CO_2 -ekv pr m tunnel [46]. Denne studien inkluderte imidlertid all konstruksjon over bakken, inkludert asfalt, sprengningsarbeider og bergsikring. Selve tunnelkledningen er ikke beskrevet konkret. Lizhen Huang m.fl sine resultater fra LCA-studie av alle tunneler ferdigstilt i Norge i perioden 2004-2011 viste at en standard norsk vegtunneler slipper ut minst 10,3 tonn CO_2 -ekv pr m Dette resultatet inkluderte også hele tunnelens livsløp, og omfanget inkluderte sprenging, bergsikring, vegoppbygging og asfalt i tillegg til vann- og frostsikring. Studien viser at byggefasen utgjør 51% av tunnelens totale GWP (svarer til 5,2 tonn CO_2 -ekv pr m), hvorav «casting and tunnel lining» er ansvarlig for 47% av GWP.

«Casting and tunnel lining» blir i artikkelen referert som alle prosessene ved tunnelbygging etter sprengning og bergsikring, som: betong, stål, PP-fiber, PE-skum, diesel og elektrisitet. Betong er forutsatt transportert 30km fra fabrikk til konstruksjonsstedet, materialtransport inne i tunnelen i byggefasen er beregnet å transporteres ved halve tunnelens lengde, og det er inkludert energiforbruk for prosessen med spraying av sprøytebetong [47]⁸

Det foreligger kun et begrenset antall forskningsstudier på klimagassutslipp ved bergsikring. Jinanfeng [51] artikkel fra 2018 undersøkte forholdet mellom tunneldesign og bergmassens klassifisering og LCA-analysen viser resultatene at klimagassutslipp øker dramatisk når bergkvaliteten reduseres. I 2019 utførte forskere ved NTNU [52] en studie som viser at sprøytebetong er den største bidragsyteren til klimagassutslipp, men dets relative bidrag reduseres når tunnelen blir lengre eller når bergkvaliteten blir lavere. LCA-studien viser at 1m bergsikring varierer for mellom 1 – 3,6 tonn CO_2 -ekvivalenter.

For å vurdere om resultatene fra denne masteroppgaven opp mot eksisterende forskning, er det nødvendig å vurdere hvor sammenlignbart resultatene er. Ved å anvende Huang sin forskning på klimagassutslipp ved bygging av tunnel i Norge utgjør klimagassutslipp totalt 5,2 tonn CO_2 -ekv pr meter. Av dette er det utgjør utslippene knyttet til vann- og frostsikringen 2,6 tonn CO_2 -ekv pr m. I denne masteroppgaven er tunnelkledningen beregnet til å representere 1.633-2.821kg CO_2 -ekvivalenser pr lengdemeter tunnel. Forskjellen i resultatene kan forklares ved at denne masteroppgaven ikke inkludert materialtransport på konstruksjonsstedet og energi fra byggefasen i tunnel. Resultatene fra masteroppgaven vurderes derfor å sammenfalle godt med resultat fra forskning som eksisterer på klimagassutslipp fra tradisjonell tunnelkledning.

Svakheter ved denne LCA-analysen

Datainnsamling er den mest tidkrevende prosessen for en LCA-analyse. Svakheterne ved denne LCA-analyse er at noen prosesser er utelatt som følge av tidsbegrensning for oppgaven. Det er ikke tatt høyde for maskinparken ved montering av hvelvløsningene. Foamrox hvelvløsning har en vesentlig lavere vekt enn sprøytebetonghvelvet, noe som vil gi en helt annen metode for montering og dermed også en differanse i klimagassutslipp for monteringsprosessen for de to ulike konseptene i LCA-analysen.

Sprøytebetong skal sprøytes på i tre lag, men det er ikke tatt høyde for svinn av sprøytebetongen i disse tre leggesprosessene. Det er forutsatt optimalisert utførelse av sprøytebetonghvelvet, hvilket innebærer at påkrevd minimums tykkelse på 8cm er gjennomgående i hele tunnelhvelvet. Det er imidlertid lite sannsynlig at det vil være tilfelle i praksis. Dersom det hadde vært mulig å vite nøyaktig hvor mye sprøytebetong som har vært produsert for å ferdigstille tunnelhvelvet med påkrevd tykkelse og inkludert alt svinn i prosessene fra produksjon, transport og sprøyting, ville dette nok gitt en noe høyere verdi på det totale klimagassutslippet for denne hvelvløsningen.

Det er gjort forenklete beregninger av betongproduksjon, basert i hovedsak på EPD for sprøytebetong og materialsammensetning av betong for veggelementer fra leverandør. De bakenforliggende prosessene med materialutvinning er basert på aggregerte verdier fra EcoInvent i dataprogrammet SimaPro. Det ville gitt bedre resultater dersom jeg hadde hatt tid til å gå grundigere gjennom de faktiske prosessene i norske produksjonsforhold.

⁸ S.179 table 1

Levetid er utelatt av studien, i den forståelsen av at svært få av Norges tunneler langs de viktigste infrastrukturårene hittil har levd i 50år, som er dimensjoneringskrav i N500 for vann- og frostsikringsløsninger. Behovet for å oppgradere tunneler inntreffer ofte av andre grunner enn at tunnelkledning har levd ut sin levetid. Det finnes heller i dag ingen studier som definerer levetid for Foamrox hvelvløsning ei heller klar beskrivelse av hvordan produktet skal håndteres etter endt levetid. For en mer omfattende sammenligning av celleglassplater og andre bygningsmaterialer, er det nødvendig å bedre definere hvordan produktet avhendes når brukslevetiden går ut [59].

Potensiale for klimagassreduksjon av begge vann- og frostsikringsløsningene

LCA-studien viser at prefabrikkerte veggelementer representerer en høy andel av tunnelkledningens miljøpåvirkning. Utslippene fra veggelementene ble i LCA-analysen beregnet til å utgjøre totalt 755,8 tonn CO_2 -ekvivalenter for hele tunnelen og dette utgjør 62% av det samlede utslippet for konsept A og 36% av de samlede utslippene for konsept B, se tabell 7-10.

En utfordring med de rette betongelementene som er brukt i denne beregningen er lang transportavstand. Betongelementene er produsert i Åndalsnes og cementprodusenten i Norge har produksjon i Breivik og Nordland. Det fører til at cementfrakt fra Breivik for produksjon av veggelementene i Åndalsnes, samt transport av ferdig elementene ned til Torsbudalen har en sterk miljøpåvirkning på det totale tunnelkledningsløsningene. For å vurdere potensialet for klimagassreduksjon kan det vurderes å følge noen av grepene som ble anbefalt av de ulike transportvirksomhetene i utredningsoppdrag til NTP [11]. Her ble det pekt på blant annet å velge kortreiste materialer, redusere materialmengde og å redusere direkte utslipp fra anleggsmaskiner gjennom å effektivisere maskinpark og å gå over på utslippsfrie drivstoff.

Utslipp fra transport utgjør 0,09kg CO_2 -ekv pr tonkilometer (tonn materialer * transportavstand i km). CO_2 -utslipp fra transportetappene i denne casen utgjør 191 tonn CO_2 -ekvivalenter (tabell 7-14), noe som svarer til 25% av veggelementenes samlede CO_2 -utslipp. Det er et betydelig potensial for å redusere klimagassutslipp for veggelementer ved å velge en lokal produsent og dermed redusere lengden på transportbehovet, eller for eksempel en plasstøpt løsning. I Norge er det kun Norcem som produserer cement og de har fabrikker i Breivik i Telemark og Kjøpsvik i Nordland. Ved å velge en lokal produsent av veggelementer kunne transportavstanden for sement blitt redusert fra 601km til 97km. Videre antar jeg at det kan velges en lokal produsent av betong innenfor en radius av 30km. Potensialet for å redusere klimagassutslipp ved transport av cement og veggelementer er 191 tonn CO_2 -ekv (tabell 7-14) fratrukket klimagassutslipp ved en optimalisert løsning på 76 tonn CO_2 -ekv (tabell 7-15). Det samlede potensialet for dette grepet er på 115 tonn CO_2 -ekv.

Det er ikke tatt høyde for potensialet av en mer klimavennlig produksjon av betong, hvor nye tilslag og erstatninger for sement kan bidra til å redusere klimagassutslipp av helstøpt tunnelhvelv, og også sprøytebetonghvelv. Forskning anbefaler bedre design av sprøytebetong, forbedring av bestandighet og mekaniske egenskaper for å kunne redusere tykkelse på sprøytebetong. [52].

Potensiale for klimagassreduksjon i Foamrox-hvelvløsning

LCA-analysen av hele løsningen med tunnelkledning for Torsbuåstunnelen, inkludert Foamrox hvelvløsning, representerer 2.115,5 tonn CO_2 -ekv, jf tabell 7-9. Energiforbruk har størst påvirkning på dette resultatet, da energi utgjør 67% av klimagassutslippene for produksjon av celleglassplatene og 58% av klimagassutslippene for produksjon av polyurea. Det ligger et potensiale for Foamrox i å få ned klimafotavtrykket av sitt produkt gjennom å redusere energikilder, energimengde og transportavstandene for produktet.

I miljødeklarasjonen (EPD) fra celleglassleverandøren Glapor oppgis det at 1m³ celleglassplate slipper ut 85,98kg CO_2 -ekv, fra prosessen innhenting av råmaterialer og frem til konstruksjon på anleggsstedet [62]. Omregnet til CO_2 -ekv pr tonn betyr dette 651,4kg CO_2 -ekv. I denne masteroppgaven har jeg beregnet utslippet pr tonn celleglassplater til 1.894 kg CO_2 -ekv. Bakgrunnen for denne differansen ligger i økt transportlengde fra produksjonssted i Tyskland, til Foamrox fabrikk i Norge. Videre antas det at de aggregerte verdiene fra EcoInvent for naturgass og tysk el-miks er oppdatert i etterkant av at EPDen ble produsert i 2017, samt at grunnlagsdataen for innsamling av resirkulert tilslag er satt til 0 utslipp i EPDen.

Blengini [59] definerer energiforbruk i produksjonsprosessen er en hot-spot og LCA-analysene av celleglassplater. For å produsere glasspulver, må glass innsamles og transporteres, deretter vaskes og knuses. Dette glasspulveret blir så mikset med et skumningsmiddel for å få glasset til å ekspandere. Glassmiksene sendes deretter i en forbrenningsovn for forvarming og skumming ($T=900^{\circ}C$), kjøling og deretter forming. Dette er energikrevende prosesser og valg av energikilder samt energieffektiviseringstiltak vil derfor ha betydelig påvirkning på CO_2 -utslipp for celleglassproduktet. Den rumenske studien av Axinte m.fl [60] viste i 2021 at ved å produsere celleglass med bruk av mikrobølger kan energibehovet reduseres fra 0,75-1,15 kWh/kg og ned til 0,684-0,691 kWh/kg, uten at dette går ut over kvaliteten til produktet. Energocell Foam Glass Factory [61] skriver på sine hjemmesider at de bruker 140kWh i energi for å produsere 1m³ skumglassplater, noe som tilsvarer 0,9kWh/kg. Da Silva [66] beregnet også energiforbrukets bidrag til klimagassutslipp ved produksjon av celleglassplater til å være 0,465kWh/kg.

Det er interessant at Axinte refererer til 0,75-1,15 kWh/kg som referansepunkt for energibehovet i prosessen for å produsere celleglass, og at dette understøttes ved et annet eksempel fra Energocell som produserer celleglassplater med bruk av 0,9kWh/kg. Da Silva og Axinte viser også til at energibehovet i denne produksjonsprosessen også har potensiale til ytterlig optimalisering. I denne oppgaven har jeg fått tak i EPD fra Glapor [62], som produserer celleglassplatene for Foamrox, og som i sin miljødeklarasjon oppgir et vesentlig høyere energiforbruk i produksjonsfasen. I EPDen oppgir de energiforbruk pr m³, og omregnet i vedlegg 8, utgjør disse verdiene; 2,3kWh/kg naturgass og 0,2kWh/kg med tysk el-mix. Dersom Foamrox hadde valgt en produksjonsprosess for celleglassplatene som hadde et energibehov tilsvarende det Axinte la til grunn som referanseverdier, ville energibehovet blitt redusert med om lag 2/3. Hvis jeg legger til grunn det laveste energiforbruket i Axinte sin referanseverdi (0,75kWh/kg) og omgjør energikilden til norsk el-mix, og forutsetter at denne lokale produksjonen av celleglass også reduserer transportavstanden fra 1307km til 30km, så bidrar dette til å redusere de totale utslippene for energi med 483,5 tonn CO_2 -ekv for tunnelhvelvløsningen, som vist i tabell 7-13. Figur 7.11 viser at det samlede CO_2 -utslippet for

Foamrox hvelvløsning ville blitt betydelig redusert, men fortsatt utgjøre et høyere potensielt utslipp enn konseptet med sprøytebetonghvelv.

Blengini 2011 [59] viser til at en annen viktig forbedring kan være å erstatte silisiumkarbid (SiC) med en annen mer miljøvennlig tilsetning, eller å bruke resirkulert silisiumkarbid. Strukturen i celleglasset binder opp en stor andel av den tilførte CO₂en, mens resten blir sluppet ut i atmosfæren. Basert på den totale mengden CO₂ i silisiumkarbid og forutsatt at 50% blir bundet opp i materialet, er det direkte utslippet i produksjon 11kg CO₂ pr tonn celleglassisolasjon. Scarinci m.fl [63] viser til at det vanligste skumningsmiddelet i kommersielle celleglassprodukter er silisiumkarbid (SiC). I følge Karandashova (2017) [66] viser forskning at den mest optimale sammensetningen for celleglass er 90% glasspulver, 4% glycerol, 4% sodium silicate og 3% vann [64]. da Silva m.fl. i 2021 analyserte fire ulike skumningsmidler brukt i produksjon av celleglassplater: kaustisk soda (NaOH), svart karbon (C), silisiumkarbid (SiC) og dolomitt ($CaMg(CO_3)_2$). LCA-analysen viste at bruk av kaustisk soda (NaOH) gir best resultater ift GWP, og avgir bare 0,46kg CO₂-ekv for 1m² celleglassplate med tykkelse 1cm.

I Foamrox sitt produkt fremgår det at celleglassplatene inneholder 87% resirkulert glass. Det er videre 12% sodium silicate, som er valgt som skumningsmiddel i produksjonsprosessen av celleglassplatene og 1% glycerine [62]. Karandashova viser til den mest optimale sammensetningen ville vært en økt andel resirkulert glass, lavere andel sodium silicate og høyere andel glycerine, samt tilførsel av mer vann. Da Silva sin forskningsartikkel viser imidlertid at ved å bruke sodium hydroxid som skumningsmiddel blir CO₂-utslippet betydelig lavere. Forskingen er litt sprikende på dette punktet, men det kan være et potensiale for å redusere CO₂-utslipp ved produksjon av celleglassplater ved en annen materialsammensetning i produksjonen.

Tilgjengelighet og valg av råmateriale er også en vesentlig faktor i LCA-analysen av celleglass. Glass er et av de sjeldne materialene som kan gjenvinnes i det uendelige uten tap av kvalitet og har flere potensielle bruksområder [57]. Sandanayake [53] konkluderte i 2020 med at den største barrieren for kommersialisering av resirkulerte tilslag er tilgjengelige avfallsmaterialer. Hvis man ser verden under ett er det fortsatt stort potensiale for resirkulering av glass, ettersom det fortsatt er land som deponerer dette materialet i naturen. Butler og Hooper [54] beregnet i 2011 at dersom gjenbruk av glassemballasje øker fra 30% til 80% på verdensbasis, vil det gi en besparelse på $10 * 10^6$ GJ energi årlig.

Det er imidlertid ikke gitt at det alltid vil gi miljømessige gevinster av å resirkulere glass. Transport av gjenbruksmaterialer påvirker miljøregnskapet for resirkulerte materialer. En italiensk studie av Blengini m.fl. i 2010 [58] konkluderte med at transportavstand for resirkulerte materialer kan øke 2-3 ganger før miljøpåvirkningene av dette overgår miljøpåvirkningene av å ikke resirkulere. En annen LCA-studie av Blengini i 2011 [60] viser imidlertid at de miljømessige fordelene av å unngå landfyll av glass er mindre enn de økte negative miljøpåvirkningene som fremkommer fra transportbehovet ved gjenbruk. Hvorvidt gjenbruk av glass gir positive miljømessige konsekvenser, avhenger av hvilke type glass som resirkuleres og transportkostnaden av innhenting. Blenginis LCA-analyse viser at glassproduktet vil oppnå høyere miljømessige fordeler ved å bruke resirkulert glass som ikke kan gjenbrukes i sin opprinnelige form. Glassemballasje vil kreve mindre energi og prosessering ved gjenbruk som glassemballasje. Det anbefales derfor at glass som resirkulert materiale i celleglassproduksjon, er basert på glass som ikke ellers kan gjenbrukes i sin opprinnelige form.

Hvilken energikilde som anvendes ved prosessering av glass vil også ha vesentlig påvirkning på miljøeffektene.

Butler og Hooper viser til at den største miljøpåvirkningen i glassproduksjon er det høye energiforbruket ved smelting og de tilhørende gass-utslippene. Forbrenningsovnens varmes opp til 1650 °C og det smeltet glasset holdes på en konstant temperatur i 24 timer for glassemballasje og 72 timer for flatt glass. Energien som kreves for å smelte og blande alle komponentene utgjør mer enn 75% av det totale energiforbruket for glassproduksjon, mens anskaffelse av råmaterialene utgjør 25% [54]⁹. I Norge resirkuleres allerede 89,7% av alt innsamlet glass, og dette blir gjenbrukt som glassemballasje, isolasjonsmaterialer, byggematerialer med videre [55]. For en tunnel med 750m lengde er det behov for 351 tonn resirkulert glass for å produsere Foamrox-hvelv. Ifølge SSB blir det i Norge levert 105.000 tonn glass til resirkulering årlig [56]. I Norge bygges det om lag 70km tunnel årlig. Det betyr at dersom alle tunneler i Norge skal bygges med Foamrox-hvelv, vil dette båndlegge 1/3 av alt glass som leveres til materialgjenvinning. Ettersom glass er et produkt som kan gjenvinnes uendelig mange ganger, er det ikke gitt at det beste for miljøet er å gjenvinne dette materialet til et produkt som blir etablert i tunnel for en levetid på 100 år. Glassproduktet kunne i så måtet vært i sirkulasjon og bruk i mange runder ved å anvende det på andre materialer.

Det ikke kjent hvilken opprinnelse glasset i produksjon av celleglassplater hos Glapor stammer fra. Blenginis studie [59] understreker at på grunn av kommersielle interesser, er mye av bakgrunnsinformasjonen om celleglassprodukter konfidensielt og begrenset for offentligheten. Det er derfor lite detaljerte og transparente LCA-studier av celleglassprodukter. Produsenter kan ha ulik sortering av hvilke glass som inngår i produksjonen av celleglass-plater. Ved å undersøke EPD som er utført for produksjon av celleglassplater hos Glapor [62] fremgår det at systembegrensningen er satt etter sortering av glass som skal resirkuleres. Det gis ikke videre informasjon om innsamling av dette glasset, transportavstander som er gjeldende, eller hva slags type glass som blir samlet inn til produksjonen av celleglassplatene. Produksjonsprosessen genererer 30% avfall, men dette avfallet forutsetter å forlate produksjonssystemet uten noen miljømessige byrder. Det ligger et potensiale for Foamrox i å forbedre resultatene for CO₂-utslipp ved å bruke spesialglass og glass som ikke på annen måte kan gjenbrukes i sin opprinnelige stand, og samtidig sikre at transportavstandene for innsamling av dette holdes så lavt at det lønner seg miljømessig å gjenbruke glass til dette formålet, fremfor til andre formål inkl deponering.

Polyurea-membranen i Foamrox-hvelvløsningen representerer 1/3 av det totale CO₂-utslippet for denne tunnelkledningen, som vist i tabell 7-10. Det finnes ingen studier av polyurea membran som brukt i Foamrox tunnelhvelvløsning representerer. Det finnes ingen LCA for produktet brukt i forbindelse med celleglassplater, og det foreligger heller ingen EPD fra produsent. Jeg har i prosessen klart å få tak i materialsammensetning av Polyureaen direkte fra produsent, men har signert en NDA av konkurransehensyn for leverandøren. Denne dataen har også vært tilgjengelig for min veileder underveis i denne oppgaveskrivingen og Simapro-beregningene er kvalitetssikret på den måten. Resultatet av denne analysen vil bidra til å løfte forskningsfronten på temaet og viser hvor viktig det er å vurdere polyureans innflytelse på produktet i LCA-beregninger for denne nye alternative vann- og frostsikringsløsningen. Produksjon av Polyurea er svært energikrevende og energiforbruket

representerer 2/3 av polyurea`ens totale CO_2 -utslipp. Det er særlig knyttet til energiforbruk Foamrox har potensiale for å redusere klimafotavtrykket.

Håndbok N500 har ikke materialbeskrevet hvordan vann- og frostsikring skal utføres, ref kap 3.3. Tunnelkledning for vann- og frostsikring skal ihht krav 8.1.1-4 oppfylle definerte krav til laster og definerte krav til brannmotstand gitt i kap 5.4. Håndbok N500 stiller således funksjonskravene til vann- og frostsikringsløsning og ikke materialkrav. Det betyr at leverandører av vann- og frostsikringsløsninger ikke er pålagt å følge tradisjonelle løsninger av tunnelkledning gitt at den nye løsningen dokumentert tilfredsstillende de nevnte kravene til laster og brannmotstand. I denne case studien er det tatt utgangspunkt i at de prefabrikkerte veggelementene av betong skal videreføres i Foamrox-løsningen, og at Foamrox vann- og frostsikringsløsning kun skal erstatte det tradisjonelle PE-skum og sprøytebetonghvelvet. Det er pr i dag ikke dimensjonert noe design for Foamrox-hvelvløsning for tunneler med tunnelklasse E. Føringskant må ivaretas for trafikksikkerheten, men det er mulig høyden på veggelementene kan reduseres ned til 90cm jf N500 Krav 8.4.6. Veggelementer skal dimensjoneres for en jevnt fordelt ulykkeslast, hvor lasten regnes som horisontallast opp til 3,5m over kjørebanelnivå, ref vedlegg 2 s.13. En ny designløsning må ta hensyn til hvordan ulykkeslasten da skal fordeles og tas opp av konstruksjonen.

Bergbolter for montering av Foamrox hvelvløsning representerer 1% av tunnelkledningens totale utslipp. Det må likevel nevnes at bergbolter er materialbeskrevet i N500 og at dette er hensyn til at boltene skal holde opp en svært tung hvelvløsning. Som beregnet i denne oppgaven, vil et sprøytebetonghvelv veie 2,5 tonn pr lengdemeter tunnel. Foamrox hvelv-løsning veier til sammenligning 0,6 tonn pr lengdemeter. Det fremstår som relevant å vurdere om dimensjoneringskravene til bolter av et slikt hvelv dermed er noe overdimensjoner.

Øvrig potensiale for reduksjon av klimagassutslipp i vann- og frostsikringsløsninger

LCA-analysen i denne masteroppgaven inkluderer ikke behovet for utsparinger i tunnel, som for eksempel havarinisjer. Dersom disse utsparingene hadde vært inkludert i studien, ville materialbehovet for vann- og frostsikringsløsningene økt og dermed også klimagassutslippet. Krav til havarinisjer er gitt i håndbok N500 og avhenger av tunnelklasse og tunnelens lengde. For tunnelklasse D, E og F stiller N500 krav om havarinisje hver 250 eller 500 m [24]. Sveits tillater å drive tunneler uten nisjer, og benytter heller styringssystemet i tunnelen ved ulykker [32]. En rapport fra Statens vegvesen av 2014 at dette gir byggetidsbesparelser, redusert behov for sprenging, bergsikring og materialforbruk. Statens vegvesen anbefalte i 2014 å utrede kost/nytte-estimering av nisjer kontra å benytte styringssystemet i tunneler til å styre trafikk rundt motorstopp eller ulykke [32]. Dersom styringssystemet ivaretar trafikksikkerheten, vil dette gi en positiv miljøbesparelse samt kostnadsreduksjon, en mulighet som ikke enda er tatt ut i Norge. Behovet for havarinisjer i tunnel bør vurderes på nytt.

Andre hensyn ved bygging av tunnel

Det kan være andre grunner enn CO_2 -utslipp som kan påvirke valg av vann- og frostsikringsløsning i tunnel. Statens vegvesen har i over 20 år hatt som mål å avvikle bruken av PE-skum som vann- og frostsikringsløsning i vegtunneler, hovedsakelig fordi materialet er brannfarlig [39]. Tunneler er definert som særskilt brannobjekt etter brann- og eksplosjonsvernlovens § 13, ettersom den med sin beskaffenhet eller den virksomhet som foregår i dem, antas å medføre særlig brannfare eller fare for stor brann, eller hvor brann kan medføre store samfunnsmessige konsekvenser. Brannsikring av vegtunneler er helt vesentlig i veinormal N500 og EUs tunnelsikkerhetsforskrift.

PE-skum smelter ved 120-130 grader celsius og gir fra seg en giftig gass ved høye temperaturer. Ved 300 grader tar PE-skummet fyr. Det må derfor brannsikres med sprøytebetong [34]. Selv om PE-skummet brannbeskyttes med et lag sprøytebetong inn mot trafikkrommet, kan man aldri være helt sikret mot at brannen får spredt seg bak tunnelhvelvet og at PE-skummet dermed blir eksponert for flammer. Blir det brudd i betongen og flammene når isolasjonen kan det likevel ta fyr, noe som for eksempel var tilfellet i Eidsvolltunnelen i 2012 [29] og i Skatestrømtunnelen i 2015 [28]. Ugunstige påkjørsler i tunnel som fører til brudd i betong eller hvelvløsningen kan man ikke bygges seg ut av. I anleggs- og monteringsfasen vil det dessuten alltid være tidsperioder hvor med utildekket PE-skum som utgjør en brannfare.

PE-skum utgjør dessuten et miljøproblem når produktet skal håndteres etter endt levetid. Et eksempel er en studie fra Kina i 2018 som viste at hovedandelen av mikroplast i vann stammer fra PE-skum, som med sin porøse struktur brytes enkelt ned av sol, vind og erosjon [37].

Til tross for målet om å avvikle bruken av brennbart isolasjonsmateriale har ikke forskning bidratt til noen løsning for nye materialer som er ubrennbare og godt egnet til vann- og frostsikring [40]. Det kan tale til fordel for det nye hvelvkonseptet til Foamrox med vann- og frostsikringsløsning av celleglass og polyurea som coating.

9. Konklusjon

Forskerspørsmål: Hva er potensialet for reduksjon av klimagassutslipp ved bygging av tunnel med en ny type vann- og frostsikringsløsning av resirkulert glass?

- Denne studien viser at Foamrox-tunnelhvelv ikke bidrar til å redusere klimagassutslipp ved bygging av tunnel
- I Torsbuåstunnelen har en vann- og frostsikringsløsning fra Foamrox et totalt klimagassutslipp på 2.115 tonn CO_2 -ekvivalenter. Til sammenligning har en tradisjonell vann- og frostsikringsløsning i samme tunnel et totalt klimagassutslipp på 1.224 tonn CO_2 -ekvivalenter. Dette svarer til henholdsvis 2,8 tonn og 1,6 tonn CO_2 -ekvivalenter pr lengdemeter tunnel.
- Veggelementene utgjør 62% av GWP for den tradisjonelle vann- og frostsikringsløsningen og 32% av Foamrox-løsningen. Ved å velge en lokal produsent av betong og veggelementer, kan klimagassutslippene relatert til veggelementene reduseres med 115 tonn CO_2 -ekv.
- Utslipp fra energi utgjør 67% av GWP for celleglassplatene. En optimalisert løsning for denne prosessen vil kunne bidra til å redusere de totale utslippene ved produksjon av celleglass med 483,5 tonn CO_2 -ekv for tunnelhvelvløsningen.
- Transportavstander, energikilde og energimengde er vesentlige bidragsyttere til totale klimagassutslipp ved bygging av tunnel. Det ligger et potensial i klimagassreduksjon ved å redusere transportavstander for frakt av materialer, optimalisere energiforbruk og ved å bruke lokalproduserte materialer.

10. Anbefalinger

Det foreligger lite forskning på polyurea brukt som membran i celleglassplater og dets påvirkning på klimagassutslipp. Jeg anbefaler at dette forskes på både eksisterende valgt polyurea og alternative membraner, for å danne et godt kunnskapsgrunnlag om hvordan klimagassregnskapet for membranen kan reduseres.

For en mer omfattende sammenligning av celleglassplater og andre bygningsmaterialer, er det også nødvendig å forske på hvordan produktet kan avhendes når brukslevetiden går ut.

Glass er et anvendelig materiale som i dag har høy gjenvinningsverdi i Norge. Jeg anbefaler at det forskes på hvordan glass best kan anvendes i et sirkulært perspektiv, når kampen om resirkulert glass som råstoff blir hardere.

11. Bibliografi

- [1] Innovasjon Norge, «Tunneler i tall» 2021 [Internett]:
<https://www.innovasjon Norge.no/no/om/tall-og-fakta/nytt-om-eksport---tunnelteknologi/tunneler-i-tall/>
- [2] Store Norske leksikon, «Tunnel,» 2022 [Internett]:
<https://snl.no/tunnel>
- [3] Statens vegvesen, «Norges største veiprojekt åpnet i Stavanger onsdag,» 2020 [Internett]:
<https://www.vegvesen.no/om-oss/presse/aktuelt/nasjonalt/norges-storste-veiprojekt-apnes-i-stavanger-onsdag/>
- [4] Byggeindustrien, 2009 [Internett]:
<https://www.bygg.no/verdens-hoyeste-tunnelmunning/46835!/>.
- [5] Norwegian Tunnelling Network [Internett]:
<http://www.norwegiantunnelling.no/laerdalstunnelen/>
- [6] Statens vegvesen, "Forsking", 5 mai 2021. [Internett]:
https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/europaveg/ferjefrie39/forsking/?fbclid=IwAR2awO6ZCUVgjxgAwDgq3kuYqvXBc2TYCkDyJaMveBJFRQxgFlg_EQaTS54.
- [7] Klimasats-prosjektet, 2020. [Internett]:
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klimasats/2020/reduuerte-klimagassutslipp-fra-vegbygging/>.
- [8] Regjeringen, «Internasjonale klimaforhandlinger,» 2021, [Internett]:
<https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/de-internasjonale-klimaforhandlingene/id2741333/>
- [9] Drivkraft Norge, "Hvilke klimaavtaler har vi i Norge" [Internett]:
<https://www.drivkraftnorge.no/klimabevissthet/overordnede-klimamal/>.
- [10] Stortingsmelding «Nasjonal Transportplan 2022-2033» Stortinget, 2021.
- [11] Miljødirektoratet, «Nasjonal transportplan 2022-2033 Reduksjon av klimagassutslipp, utredningsrapport 4,» Rapport av 2018.
- [12] Statens vegvesen, «Metode for beregning av energiforbruk og klimagassutslipp for vegprosjekter,» Rapport av 2009.
- [13] Regjeringen, «Forsterket innsatsfordeling 2021-2030,», 2021.
- [14] Cicero, senter for klimaforskning, «Helheten i EUs klimapolitikk - systemet overordnet for å nå målene,» rapport av 21 mai 2019.
- [15] Miljødirektoratet rapport av 2019, " Hvorfor kan ikke Miljødirektoratet levere statistikk som inkluderer indirekte utslipp?"
- [16] Miljødirektoratet, «Veileder: klima og energiplanlegging,» 26 11 2019. [Internett]:
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/beregne-indirekte-utslipp-og-livslopsutslipp/>.
- [17] Menon Economics og TØI, «Indirekte utslipp og eksterne kostnader i transportsektorens bygg- og anleggsfase,» Menon, rapport av 2022.

- [18] N. Lars Andresen, "Skal Norges nest største bransje få et kunnskapsløft?" 29 sept 2021. [Internett]: <https://www.ngi.no/Nyheter/Aktuelt-fra-NGI/Skal-Norges-nest-stoerste-bransje-faa-et-kunnskapsloeft>.
- [19] Asplan Viak, «Bygg- og anleggssektorens klimagassutslipp,» Rapport av 2019.
- [20] Zero, «Sjekkliste, klimatiltak i anleggsbransjen,» Rapport av 2020.
- [21] Jernbanedirektoratet, Statens Vegvesen, Nye Veier, Avinor og Kystverket «Muligheter og barrierer for fossilfrie anleggsplasser i transportsektoren,» rapport av 2022.
- [22] FN-sambandet, «FNs bærekraftsmål,» 2022.
- [23] SIITS, «Hva er bærekraftig mobilitet og transport?» [Internett]: <https://www.siits.no/2021/06/04/hva-er-baerekraftig-mobilitet-og-transport/>
- [24] Statens vegvesen, «håndbok N500 Vegtunneler,» 2022.
- [25] www.lovddata.no, «Tunnelsikkerhetsforskriften,»
- [26] Statens vegvesen, *TS-håndboka*, Statens vegvesen, 2016.
- [27] Teknisk ukeblad, «www.tu.no,» 9 aug 2013. [Internett] <https://www.tu.no/artikler/slik-sikret-de-dodstunnelen-gjennom-mont-blanc/234905>.
- [28] Statens Vegvesen, «De fem store tunnelbrannene i Norge,» Rapport av 2017.
- [29] NRK 17 jan 2012 "Eidsvolltunnelen stengt i flere måneder" [Internett]: <https://www.nrk.no/osloogviken/eidsvolltunnelen-stengt-i-maneder-1.7957475>
- [30] Transportøkonomisk institutt, «Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2015,» Transportøkonomisk institutt, rapport av 2016.
- [31] Torbjørn Johansen, Knut Boge og Anders Grendal, «KVU Oslo-navet,» Rapport av 2014.
- [32] Statens vegvesen, «Bruk av TBM til driving av vegtunneler i Norge,» Rapport av 2014.
- [33] Statens vegvesen, «håndbok N100 veg- og gateutforming,» 2021.
- [34] Dr. Ing A. Aas-Jakobsen AS, Christian Rønneberg, «Gode løsninger for vann- og frostsikring i tunneler,» Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015. Rapport av 2016
- [35] Statens Vegvesen, «PP-fiber til bruk i brannsikring av betong, rapport nr.83,» Vegdirektoratet, Rapport av 2013.
- [36] Foamrox hjemmeside [Internett]: «<https://www.foamrox.no/produkter/>»
- [37] Minglong Chen, Meng Jin, Peiran Tao, Zheng Wang, Weiping Xie, Xubiao Yu, Kan Wang «Assessment of microplastics derived from mariculture in Xiangshan Bay, China,» *Environmental Pollution* 242, pp. 1146-1156, 2018.
- [38] SINTEF, «Brannsikring av PE-skum, P-499,» Rapport av 1994.
- [39] Statens vegvesen, «Samfunnstjenelige vegtunneler 1998-2001, sluttrapport,» Vegdirektoratet, Rapport av 2001.
- [40] Geo- og tunnelseksjonen i Statens vegvesen, «Teknologirapport nr.2504,» Statens vegvesen, Rapport av 2008.
- [41] «Etatsprogrammet Moderne vegtunneler, strategi for bygging av nye vegtunneler,» Vegdirektoratet, Rapport av 2012.

- [42] Statens Vegvesen, «FoU-programmet Varige konstruksjoner 2012-2015,» Vegdirektoratet, Rapport av 2016.
- [43] Norconsult, «E18 Tvedestrand - Arendal, Søknad om tillatelse etter forurensningsloven,» Rapport av 2018.
- [44] «Samferdselinfra,» [Internett]. Available: <https://www.samferdselinfra.no/prosjekt/e18-tvedestrand-arendal/>.
- [45] Norsk Stål, «Norsk Stål, produktkatalog,» [Internett].
- [46] Jonas Åkerman, Anna Björklund, Sofia Miliutenko, «Energy use and greenhouse gas emissions during the Life Cycle stages of a road tunnel - the Swedish case norra länken,» *European journal of transport and infrastructure research*, pp. 36-62, 17 3 2012.
- [47] Rolf André Bohne, Amund Bruland, Pål Drevland Jakobsen, Jardar Lohne, Lizhen Huang, «Life cycle assessment of Norwegian road tunnel,» *Springer*, 25 11 2014.
- [48] J. Hammervold, «Towards greener road infrastructure» NTNU, 2014.
- [49] Per Olav Fremo Kalvå, «Life Cycle Assessment of the Byåsen tunnel in Trondhjem, Norway - assessing emissions from traffic and infrastructure,» NTNU, 2015.
- [50] Helge Brattebø, Ole Magnus Kålas Iversen, Sofiia Miliutenko, José Potting, Reyn O`Born, «Quantifying energy demand and greenhouse gas emissions of road infrastructure projects: An LCA case study of the Oslo fjord crossing in Norway,» *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, pp. 445-466, 2016.
- [51] Chun Guo, Xiaofeng Chen, Zhenhua Zhang, Lu Yang, Mingnian Wang, Kun Yang, Jianfeng Xu, «Emission transition of greenhouse gases with the surrounding rock weakened - A case study of tunnel construction,» *Journal of Cleaner Production 209 (2019) 169-179*, oktober 2018.
- [52] Pål Drevland Jacobsen, Rolf André Bohne, Yongping Liu, Amund Bruland, Manquehual Cristobal Javier, Lizhen Huang, «The environmental impact of rock support for road tunnels: The experience of Norway,» *Science of the Total Environment 712*, 7 1 2020.
- [53] Yanni Bouras, Robert Haigh, Zora Vrcelj, Malindu Sandanayake, «Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete - A Decade Review,» *Sustainability*, 18 11 2020.
- [54] P. H. John Butler, *Waste: A Handbook for Management*, 2011.
- [55] SSB, «Avfallsregnskap, glass, 1993-1998,» 2000.
- [56] SSB, «Avfallsregnskapet,» 2021.
- [57] FEVE - The European Container Glass Federation, [Internett]: <https://feve.org/recyclingstats2018/>.
- [58] Elena Garbarino, Gian Andrea Blengini, «Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix,» *Journal of Cleaner Production 18 (2010)*, pp. 1021-1030, 29 januar 2010.
- [59] Mirko Busto, Moris Fantoni, Debora Fino, Gian Andrea Blengini, «Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA,» *Waste Management 32 (2012)*, pp. 1000-1008, 19 oktober 2011.

- [60] Lucian Paunescu, Marius Florin Dragoescu, Sorin Mircea Axinte, «Manufacturing the cellular glass from glass waste by an original unconventional technique,» *Academic Journal of manufacturing engineering*, april 2021.
- [61] Energocell hjemmeside «Energocell foam glass factory,» [Internett]: <https://www.energocell.hu/en/foamglass-manufacturing/>.
- [62] Institut Bauen und Umwelt, «EPD - GLAPOR cellular glass,» av 2017.
- [63] Giovanna Brusatin, Enrico Bernardo, Giovanni Scarinci, «Glass Foams,» i *in Cellular ceramics, structure, manufacturing, properties and applications*, ed. by M. Scheffler, P. Colombo, Wiley-VCH, 2005, pp. 158-176.
- [64] B. M. Goltsman, E. A. Yatsenko, N S Karandashova, «Analysis of influence of foaming mixture components on structure and properties of foam glass,» i *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Boston, MA, 2017.
- [65] Grace Olufunke Matthew, Faith Osesenaga Ovienmhanda, Sanya Olajide Tunmilayo, Seun Samuel Owoeye, «Preparation and characterization of foam glass from waste container glasses and water glass for application in thermal insulations,» *Ceramics International* 46, pp. 11770-11775, 2020.
- [66] Fabio Neves Puglieri, Daiane Maria de Genaro Chiroli, Guilherme Antonio Bartmeyer, Evaldo Toniolo Kubaski, Sergio Mazurek Tebcherani, Robson Couto da Silva, «Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents,» *Science of the Total Environment* 771 (2021), januar 2021.
- [67] Haiyang Cheng, Fengyu Zhao, Hui Li, «A review on CO₂-Based Polyureas and Polyurea Hybrids,» *Asian Journal of organic chemistry*, 2022.
- [68] Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner, «EPD - Ferdigbetong B45 MF40,» epd-norge.no, 2017.
- [69] The Norwegian EPD Foundation, «EPD - weber sprøytebetong V,» epd-norge.no, 2018.
- [70] Christian Boye, Kristin Hilde Holmøy, Eivind Grøv, «Tunneling Rogfast with TBM at 390 m below sea level,» *Cristin*, 2013.

12. Vedlegg

- Vedlegg 1 Oversiktsbilde fra Torsbuåstunnelen, fra AF Gruppens søknad om sikkerhetsgodkjenning
- Vedlegg 2 Norconsult, 2018, Dimensjonering av Veggelementer
- Vedlegg 3 Norconsult, 2018, Dimensjonering av sprøytebetonghvelv
- Vedlegg 4 Norconsult 2021, Dimensjonering av Foamrox-hvelv
- Vedlegg 5 NIRAS 2019, LCA for "Foamrox insulation elements for tunnels"
- Vedlegg 6 Resept B45, veggelementer, fra leverandøren Elementpartner AS
- Vedlegg 7 Armeringsberegningstabell, fra Celsa
- Vedlegg 8 LCI, Beregninger av materialforbruk
- Vedlegg 9 Dokumentasjon av energiforbruk ved Foamrox produksjonslokaler
- Vedlegg 10 SimaPro beregninger av konsept A
- Vedlegg 11 Grafisk fremstilling av LCA-resultater fra konsept A
- Vedlegg 12 Simapro beregninger av konsept B
- Vedlegg 13 Grafisk fremstilling av LCA-resultater fra konsept B
- Vedlegg 14 LCA-resultater for GWP av de ulike materialene