



Kunnskap for en bedre verden

# Sammenligning av vann- og frostsikringsmetoder i norske infrastrukturtunneler med hensyn til klimagassutslipp

**Silje Nilsen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Pål Drevland Jakobsen, IBM

Medveileder: Rolf Bohne, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Silje Nilsen

## Sammenligning av vann- og frostsikringsmetoder i norske infrastruktur tunneler med hensyn til klimagassutslipp

Trondheim 01.06.18





## Forord

Denne masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og er avsluttende oppgave i hovedprofil anleggsteknikk ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. Når det er sagt er det flere personer som fortjener en takk.

Først og fremst vil jeg takke Amund Bruland for at han presenterte denne masteroppgaven i faget Anleggsteknikk VK høsten 2017 og meg selv som gikk i forelesningen selv om jeg egentlig hadde planer om å skrive master i prosjektledelse og ikke ta Anleggsteknikk VK. Alle andre tilfeldigheter og valg i livet som førte meg til denne masteroppgaven vil jeg også hylle da jeg i det store og hele koser meg med oppgaven, i motsetning til flere medstudenter. Dernest vil jeg takke min veileder Pål Drevland Jakobsen som når jeg først møtte han angående denne masteroppgaven husket meg fra anleggsteknikk GK for min rare e-post adresse, noe som var veldig hyggelig. Jeg vil selvfølgelig også takke for god oppfølging i både prosjektoppgave og masteroppgave på tross av pappaperm og spesielt for at han alltid var positiv til min progresjon og sa jeg lå godt an, noe som var godt å høre. Medveileder Rolf Bohne fortjener også en takk for oppfølging og hjelp rundt LCA delen av oppgaven.

Gjennom våren 2018 har jeg sendt mange e-poster til mange personer som på en eller annen måte jobber med vann- og frostsikring og jeg er veldig takknemlig for at de har tatt seg tid til å svare på alle mine spørsmål. Jeg vil også takke min søster Janne for å ha satt meg i kontakt med utvikler av Foamrox, Rolf Jakobsen. Etter hennes strenge beskjed om ”ta å ring han da, eller send en mail!” turte jeg ikke annet enn å gjøre som jeg alltid har gjort; å gjøre som storesøster sier.

Spesielt takk til Bergljot Skonnord og de andre fra Veidekke som hjalp meg og som tok meg i mot og lot meg følge med på arbeidet med vann- og frostsikring i Bodøtunnelen i tre dager med både brakkerom, kontorplass og god matservering til rådighet. Også takk til Carsten Rosskamp og Ronny Wilhelmsen i Implenia som viste meg rundt i Eiganestunnelen og delte med meg den informasjonen jeg trengte.

Siden denne masteren handler om frost synes jeg det er passende med et vinterrelatert sitat:

*”It’s not bad conditions it’s just snow” - tilfeldig pilot på Værnes*

Nå pakker jeg sakene, feirer levert masteroppgave og drar til Japan med fly som slipper ut masse klimagasser. Kun turen til mellomlandingene Finland tar Norge med i sitt klimaregnskap, så da telles vel ikke resten?



## Sammendrag

Denne masteroppgaven tar for seg de fire vann- og frostsikringsløsninger som blir brukt i norske infrastruktur tunneler i dag med fokus på klimagassutslipp. Den går også inn på en potensiell ny løsning for vann- og frostsikring og vurderer denne opp mot de eksisterende løsningene. Det er kun sett på tunneler som bygges på tradisjonelt vis, dvs. med boring og sprengning. Tunnelboremaskiner har andre forutsetninger for VoF og behandles ikke i denne oppgaven. Infrastruktur tunneler er blitt en betongtung konstruksjon og mye sement brukes til å sikre tunnelene etter sprengning ved innsprøyting av sement og et lag med ca. 8 cm sprøytebetong brukes for å sikre tunnelen for arbeid der det trengs før vann- og frostsikring bygges. Dette fører til høye klimagassutslipp og det er det denne oppgaven skal se på.

For VoF løsningene er det klimagassutslipp i forbindelse med produksjon av materialer, transport og bygging som er tatt med. Vedlikehold av løsningene er ikke inkludert. Levetiden er usikker, men begrunnede, estimerte levetider blir vurdert opp mot løsningene. Det økonomiske aspektet er ikke vurdert.

Det er observert store ulikheter når det gjelder hvor store utslipp betong fører til og dermed er dette en usikker post. På generell basis er det, ikke overraskende, løsningene med mest betong som kommer verst ut med tanke på klimagassutslipp. Klimagassutslipp fra andre materialer har hver for seg lite å si for totalen. Transport til byggeplass kan ha mye å si for klimagassutslippet, men blir en lokal betongleverandør valgt er avstandene for betongtransport normalt korte og klimagassutslippene tilsvarende små. Dette er for øvrig noe man bør tenke på når betongleverandør blir valgt enten av entreprenør eller byggherre.

Selve byggingen viser seg å ha lite å si for klimagassutslipp sett i forhold til materialproduksjonen. Om man skal velge ett fokusområde for å minske klimagassutslipp bør man derfor se på materialene som brukes og måter for å redusere materialforbruk. Dette kan for eksempel gjøres ved å velge en VoF løsning som bruker lite betong.

Når man deler CO<sub>2</sub>-utslippet fra de ulike løsningene på estimerte levetider for hver løsning ser man at CO<sub>2</sub>-utslippene jevner seg ut. Det vil si at den mest betongtunge VoF'en har lengre levetid, men den mest betongtunge løsningen kommer allikevel ut som den dårligste når det gjelder klimagassutslipp fordelt på leveår. Løsningen som ikke er blitt brukt i VoF før, Foamrox skumglass er den løsningen som kommer best ut i omtrent alle resultatene og forskning på dette materialet som VoF bør iverksettes. Løsningen med sprøytebar membran

kommer også godt ut av resultatene, men denne krever at det ikke er rennende vann når membranen sprøytes på og fungerer dårlig i frostutsatte områder.

Rangeringen av løsningene fra lavest til høyest CO<sub>2</sub>-ekv. i dette studiet med betong CEM II ble som følger:

1. Foamrox skumglass med enten veggelementer eller føringskant av betong
2. Sprøytbar membran ved liten frostmengde
3. PE-skum med sprøytebetong og enten veggelementer eller føringskant av betong
4. Betongelementer i hele hvelvet
5. Helstøpt hvelv

Dette er løsningene for veitunneler. Den samme rekkefølgen vil gjelde for jernbanetunneler, men uten veggelementer eller føringskant for løsningen med Foamrox og uten løsningen med PE-skum da det ikke lenger brukes i jernbanetunneler.



## Abstract

This master thesis addresses the four water and frost protection solutions that are used in Norwegian tunnels today, focusing on greenhouse gas emissions. It also addresses a potentially new solution for water and frost protection and evaluates this against existing solutions. Only traditionally excavated tunnels are being considered, i.e. by drilling and blasting. Tunnel drilling machines have other prerequisites for water and frost protection and are not considered in this thesis. Infrastructure tunnels have become a concrete construction and a lot of cement is used to secure the tunnels after blasting by grouting and a layer of approx. 8 cm shotcrete is used to secure the tunnel for work where it is needed before water and frost protection is built. This leads to high greenhouse gas emissions and that is what this thesis will consider.

This thesis includes the greenhouse gas emissions associated with the production of materials, material transportation and construction of the water and frost protection solutions. Maintenance of the solutions are not included. The lifetimes of the solutions are uncertain, but calculated, estimated lifetimes are assessed. The economic aspect is not considered. Major inequalities have been observed with regard to the amount of emissions that concrete leads to and thus this is an uncertain item. On a general basis, the solution with the most concrete emits the most greenhouse gases. Other materials have little impact in comparison to the concrete. The transport of materials to the construction site can have a big impact to the total emission of greenhouse gases, but if a local concrete supplier is chosen the emissions from transport will not be relatively small. This however is something to be considered by the developer or contractor when choosing the concrete supplier.

The constructing phase is a small contributor to greenhouse gas emissions in comparison to the material production. Therefore, if considering only one focus area, the focus should be on the materials that are used. Choosing a solution with a small amount of concrete can do this.

When dividing the greenhouse gas emissions from the different solutions on expected lifetimes for each solution, it is seen that the emissions are leveling out. This is because the solution with the most concrete has a longer lifetime, but this solution is still the worst in terms of greenhouse gas emissions divided by expected lifetime. The solution that has not been used for water and frost protection, Foamrox glass foam is the solution that scores best in all the results and research on this material as water and frost protection should be implemented. The sprayable membrane solution also benefits from the results, but it requires

no running water when the membrane is sprayed on and can not withstand many freezing cycles with temperatures under  $-3^{\circ}\text{C}$ .

The ranking of the solutions from lowest to highest greenhouse gas emissions in this study with concrete CEM II is as follows:

1. Foamrox foam glass with either concrete wall elements or concrete guide edge
2. Sprayable membrane at locations with low frost rate
3. PE foam with shotcrete and either concrete wall elements or concrete guide edge
4. Concrete elements throughout the lining
5. Fully cast-in concrete lining

These are the solutions for road tunnels. The same order will apply to rail tunnels as well, but without wall elements or concrete guide edges for the Foamrox solutions and without the PE foam solution because this is no longer used in rail tunnels.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b>	<b>III</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b>	<b>IX</b>
<b>Figurliste</b>	<b>XI</b>
<b>Tabelliste</b>	<b>XII</b>
<b>Forkortelser</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Bakgrunn</i>	1
1.2 <i>Formål</i>	2
1.3 <i>Omfang og begrensninger</i>	2
1.4 <i>Rapportens oppbygning</i>	3
<b>2 Metode</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Litteraturstudium</i>	4
2.2 <i>Dimensjonering av tunnel og mengdedata</i>	5
2.3 <i>Metode for LCA</i>	7
2.4 <i>Svakheter med arbeidet/metodene</i>	8
<b>3 Teori</b>	<b>10</b>
3.1 <i>Tunneler i Norge</i>	10
3.2 <i>Vann og frostsikring i Norge</i>	13
3.3 <i>Fire ulike VoF til tunneler inkl. estimert levetid</i>	16
3.4 <i>Andre løsninger</i>	29
3.5 <i>LCA</i>	31
<b>4 Resultat</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Materialer i analysen</i>	35
4.2 <i>Sammenligning av totale klimagassutslipp</i>	36
4.3 <i>Jernbane</i>	51
<b>5 Diskusjon</b>	<b>52</b>
5.1 <i>LCA</i>	52
5.2 <i>Diskusjon av resultatene</i>	53
<b>6 Konklusjon</b>	<b>58</b>
	<b>IX</b>

<b>7</b>	<b>Anbefalinger om videre arbeid</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografi</b>	<b>61</b>

## Figurliste

Figur 1: Definisjon på tunnelklasse i forhold til ÅDT .....	10	
Figur 2: Tunneler i tunnelklasse A	Figur 3: Tunneler i tunnelklasse B .....	11
Figur 4: Tunneler i tunnelklasse C	Figur 5: Tunneler i tunnelklasse D .....	11
Figur 6: Tunneler i tunnelklasse E	Figur 7: Tunneler i tunnelklasse F .....	12
Figur 8: Tunneler i tunnelklasse A og B bygget før 1970.....	13	
Figur 9: Illustrasjon av frost i tunneltverrsnitt før VoF i Eiganestunnelen (eget bilde).....	15	
Figur 10: Føringskant i betong	Figur 11: Veggelement i betong.....	17
Figur 12: PE-skum med påfestet PE-materiale i overgangene mellom skumplatene (Aas Jakobsen 2015).....	18	
Figur 13: Skisse av PE-skum løsning med overlapp av platene (Tuven 2015).....	18	
Figur 14: Montering av bolter til PE-skum før PE-skum monteres. Foto: Ronny Wilhelmsen fra Implenia .....	19	
Figur 15: Montering av PE-skum med overlapp i Eiganestunnelen. Foto: Ronny Wilhelmsen fra Implenia .....	20	
Figur 16: T10,5 veitunnel tverrsnitt med betongelementer, XPS isolasjon og membran(Statens Vegvesen 2014).....	22	
Figur 17: Illustrasjon av feste mellom vegg- og takelement med bruk av neopren, et gummimateriale som beskytter mot skade på betongen i overgangen(Statens Vegvesen 2014).....	22	
Figur 18: Illustrasjon av feste mellom to takelementer, punkt 4 er en fuge, punkt 6 er membran og punkt 7 og 9 er XPS isolasjon(Statens Vegvesen 2014). .....	23	
Figur 19: Skisse av helstøpt betonghvelv (Statens vegvesen 2016b).....	26	
Figur 20: Skisse av løsning med sprøytbar EVA-membran (Tuven 2015).....	27	
Figur 21: Ferdig WG tunnelhvelv T100 hvor man kan se rørbuene som holder tunnelduken på plass (Rønneberg and Østmoen 2016).....	29	
Figur 22: Foamrox glassfiber i ulike fasonger .....	30	
Figur 23: CO2-utslipp for alle VoF løsninger pr lengdemeter T9,5 tunnel .....	38	

Figur 24: Samme som Figur 23, uten VoF med helstøpt betonghvelv.....	39
Figur 25: Utslipp av CO <sub>2</sub> -ekv. for betong CEM III for de ulike løsningene.....	40
Figur 26: Utslipp av CO <sub>2</sub> -ekv for betong CEM I for de ulike løsningene.....	41
Figur 27: CO <sub>2</sub> -utslipp med 200km transportavstand for betong .....	43
Figur 28: Løsningene i tunnelklasse A, B og C uten isolering med frostmengde opp til 8 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde opp til 10 000 h°C til høyre. ....	44
Figur 29: Løsningene i tunnelklasse A, B og C med isolering med frostmengde opp til 20 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde over 30 000 h°C til høyre. ....	45
Figur 30: Løsningene i tunnelklasse D, E og F uten isolering med frostmengde opp til 8 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde opp til 10 000 h°C til høyre. ....	46
Figur 31: Løsningene i tunnelklasse D, E og F med isolering med frostmengde opp til 20 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde over 30 000 h°C til høyre. ....	47
Figur 32: Utslipp CO <sub>2</sub> -ekv. fordelt på dimensjonert levetid.....	48
Figur 33: Forskjeller i utslipp for løsningene fra norske og europeiske gjennomsnittsdata ....	50
Figur 34: utslipp CO <sub>2</sub> -ekv. for dobbeltsporet jernbanetunnel for VoF løsningene for jernbane .....	51
Figur 35: Klimagassutslipp fra alle fasene som er inkludert fordelt på 100% for alle løsningene.....	59

## Tabelliste

Tabell 1: Minimumstykkelser for frostisolajosn av XPS og PE-skum ved ulike frostmengder (Statens vegvesen 2016a) og antall kommuner i Norge som frostmengden gjelder for (Byggforskserien 2012).....	14
Tabell 2: Godkjente VoF metoder fra N500 med tilhørende beskrivelse (Statens vegvesen 2016a).....	15
Tabell 3: Materialtyper og tykkelser for VoF med PE-skum.....	19
Tabell 4: Hvilke maskiner som kan brukes til hva og fremdriften til maskinene basert på erfaringstall.....	20
Tabell 5: Materialtyper og tykkelser for VoF med betongelementer.....	21

Tabell 6: Maskiner og tidsbruk for å bygge VoF med betongelementer basert på erfaringstall .....	23
Tabell 7: Oversikt over hovedkomponentene i løsningen helstøpt betonghvelv (Statens vegvesen 2016a) (Statens vegvesen 2016b).....	25
Tabell 8: Oversikt over hovedkomponentene i VoF med sprøytbar EVA membran (Tuven 2015) (Holter 2015).....	28
Tabell 9: Maskiner og tidsbruk for å bygge VoF med sprøytbar membran ifølge Karl Gunnar Holter ved NTNU (e-post samtale) .....	28
Tabell 9: Sementtyper og deres bestanddeler som brukes i norsk betong (Byggforskserien 2016).....	33
Tabell 10: Klimagassutslipp for materialer og transport.....	35
Tabell 11: VoF løsningene med mengder materialer og klimagassutslipp for materialer, transport og bygging.....	37
Tabell 12: Endring i betongutslipp for VoF løsningene.....	42
Tabell 13: Levetider for løsningene som skal til for å oppnå likt utslipp CO <sub>2</sub> -ekv. fordelt på levetid som helstøpt hvelv med levetid 100 år .....	48

## Forkortelser

VoF	Vann- og frostsikring
SVV	Statens Vegvesen
CO2-ekv.	Karbondioksid ekvivalenter
GWP	Global warming potential
LCA	Livssyklusvurdering
EPD	Environmental product declaration
ÅDT	Årsdøgntrafikk
FU	Funksjonell enhet (functional unit)



# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

For å unngå kritiske klimaendringer ble det i Parisavtalen enighet om at den globale oppvarmingen må holdes under 2 grader, helst under 1,5 grader sammenlignet med førindustriell tid. For å oppnå målet har FNs klimapanel beregnet at klimagassutslippene må reduseres med 40-70% innen 2050 sammenlignet med 2010 nivå (Miljødirektoratet 2016). Transportetatene i Norge har med bakgrunn i dette satt som mål å redusere utslippene fra bygging av infrastruktur med 40 prosent innen 2030. Det er planlagt å gjøre dette ved elektrifisering av anleggsarbeidet og ved bruk av biodrivstoff i stedet for diesel. I tillegg er valg av klimavennlige materialer og planlegging for lavt materialbruk trukket fram som måter å redusere klimagassutslipp på (Avinor, Transportetatene 2017).

I følge store norske leksikon bygges det ca. 70 km tunnel i Norge hvert år (Nordahl 2018). Tunneler er blitt en betongtung konstruksjon og mye sement brukes til å sikre tunnelene etter sprengning ved injeksjon av sement og et lag med ca. 8 cm sprøytebetong brukes vanligvis for å sikre tunnelen der det er nødvendig før VoF settes opp. Mange av disse 70 kilometerne med tunnel som bygges hvert år er infrastruktur tunneler som behøver en form for vann- og frostsikring. Ved å velge riktig VoF for formålet kan besparelsene på miljøregnskapet bli store og det er viktig å være klar over miljøkonsekvensene for det som bygges hvis man skal klare å oppnå togradersmålet.

En infrastruktur tunnel har gjennom alle fasene i livsløpet en effekt på miljøet. Fra råmaterialer og transport av disse, energibruk og maskinbruk under bygging, vedlikeholdsarbeid i bruksfasen til eventuell rivning. Disse har i større eller mindre grad en effekt på miljøet. Disse fasene er veldig avhengige av hverandre slik at hvis man bruker gode bærekraftige løsninger vil mindre vedlikehold være nødvendig og omvendt. Det er derfor viktig å være klar over hvilken levetid tunnelen skal ha for å planlegge riktig bruk av materialer i byggefasen for å optimalisere totalt energiforbruk i hele livsløpet. Det er dette klimaregnskapet en LCA kan vise og det er viktig å ta med alle fasene i livsløpet for å få et riktig bilde av tunnelens effekt på miljøet. Man bør også ta høyde for eventuelle fremtidige teknologiske forbedringer som kan påvirke for eksempel måten vedlikeholdsarbeid utføres på, men dette er som regel umulig å vite og vil bare være mer eller mindre kvalifiserte antagelser.

Det er med andre ord mange ting å tenke på for å utføre en LCA på riktig vis. I denne oppgaven blir det fokusert på vann- og frostsikring av infrastruktur tunneler og oppgaven vil gå grundig inn på LCA av de første fasene av VoF, nemlig materialproduksjon, transport til byggeplass og selve bygging av VoF. Det er tidligere blitt gjennomført LCA for sprengning og driving av tunneler av Huang et al. (2014) slik at det som mangler i disse fasene for en infrastruktur tunneler er VoF.

## 1.2 Formål

Målet med oppgaven er å tydeliggjøre besparelsene man kan gjøre på miljøet ved å velge en vann- og frostsikringsløsning kontra en annen. Det blir da mulig å sette miljø i form av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter som et insentiv og et krav fra byggherre til entreprenør.

Formålet med oppgaven er å sammenligne og vurdere VoF løsninger for både materialproduksjon, transport og bygging for så å vurdere de opp mot forventet levetid og dermed komme frem til den/de løsningene som slipper ut minst klimagasser.

Problemstillingen fokuserer på følgende forskningsspørsmål:

- Hvor mange CO<sub>2</sub>-ekvivalenter produserer de ulike VoF løsningene i forhold til hverandre i fasene materialproduksjon, transport og bygging?
- Hvor mye av klimagassutslippet er forbundet med betongbruk?
- Hvilke VoF løsninger kommer best ut når estimert levetid blir tatt med i beregninger?
- Finnes det andre potensielle måter å vann- og frostsikre en tunnel på?

Forskningsspørsmålene er besvart ved å regne på klimagassutslipp for de ulike løsningene som brukes i infrastruktur tunneler i dag ved hovedsakelig å bruke SVVs LCA verktøy som er utarbeidet av Asplan Viak for klimaregnskap hvor databasen Ecoinvent og eksisterende EPDer er brukt (Asplan Viak 2015). For materialer som ikke fremgår i SVVs LCA verktøy er NTNUs programvare Arda brukt med databasen Ecoinvent og for materialet Foamrox er en EPD brukt. Levetid på løsningene er funnet ved litteratursøk og varierer en del da det er avhengig av lokale faktorer. Andre måter å vann- og frostsikre på er også undersøkt ved et litteratursøk og ved å prate med produsenter av materialer.

## 1.3 Omfang og begrensninger

Dataene i denne oppgaven bygger mye på eksisterende litteratur og erfaringsdata fra ulike prosjekter i Norge. Materialmengder er hovedsakelig hentet fra eksisterende litteratur, men siden teoretiske mengder ikke alltid stemmer overens med virkelig forbruk har erfaringstall

også blitt brukt her. For byggingen har nesten kun erfaringsdata blitt bruk og egne data fra anleggsbesøk.

Oppgaven går ikke nøye inn på levetid og heller ikke elektrifisert byggeplass, men nevner dette og gjør enkle beregninger for å tydeliggjøre hvor mye det potensielt har å si for klimagassutslipp. Det samme gjelder hvor mye mannskapet som kan tiltransporteres med fly utgjør for klimaregnskapet..

LCAene tar for seg hovedkomponentene til VoF fordi andre små deler blir neglisjerbare i forhold til for eksempel betongmengdene. Det er antatt et konstant tverrsnitt i tunnelen og bruk av kun én VoF løsning pr tunnel. I virkeligheten vil det ofte være en blanding av løsninger, men det blir ikke vurdert i denne oppgaven. Det vil også være nisjer og av og til tverrsnittsendringer i tunneler, men disse endringene i tverrsnittet er ikke tatt med i klimagassregnskapet i denne oppgaven. Det blir derimot beskrevet i hvilke tilfeller en VoF ofte foretrekkes og hvor det er vanskelig å utføre den.

## **1.4 Rapportens oppbygning**

Kapittel 2 presenterer teori om infrastruktur tunneler i Norge og hvilke typer tunneler vi har. Kapittel 2 handler i hovedsak om tunneler i Norge og fordelingen av frost i Norge. Det beskriver også alle vann- og frostsikringsmetodene som er godkjente i Norge per dags dato og teorien som ligger bak LCA og eksisterende EPDer. I kapittel 3 blir metodene som er brukt forklart, altså metoden for LCA og for datainnhenting og kalkulering i forbindelse med LCA og annen teori. Påfølgende kapittel viser og forklarer resultatene til rapporten og kapittel 5, diskusjonskapittelet, kritiserer og vurderer resultatenes tyngde. Til slutt i kapittel 6 er det en konklusjon for masteroppgaven og forslag til videre arbeid følger etter dette.

## **2 Metode**

### **2.1 Litteraturstudium**

For å finne ut hvilke vann- og frostsikringsløsninger som finnes ble det gjort et litteratursøk. Mye av det som ble funnet i dette søket er beskrevet i teoridelen, men mye var også utdatert og flere VoF metoder som var beskrevet i litteratur er ikke lengre godkjent som VoF av Bane NOR og SVV eller brukes ikke lengre. De mest aktuelle rapportene som kom fram i dette litteratursøket var rapporten N500 av Statens vegvesen og ”RAM- og risikovurdering Vann- og frostsikring” skrevet av daværende Jernbaneverket. I tillegg er informasjon fra Nasjonal vegdatabank mye brukt for å finne informasjon om veitunnelene i Norge. Denne masteroppgaven inneholder altså data under norsk lisens for offentlige data (NLOD) tilgjengeliggjort av Statens vegvesen.

#### **RAM- og risikovurdering vann- og frostsikring**

Rapporten er fra 2015 og er utarbeidet av en sammensatt arbeidsgruppe for å vurdere VoF løsningene. Samtlige i gruppen jobber i anerkjente firmaer som jobber med tunneler og en NTNU professor er også med i gruppen. Bane NOR, tidl. Jernbaneverket, er utgiveren av rapporten og har ansvar for all infrastruktur på Norges jernbanenettverk (Tuven 2015).

I rapporten er fire VoF vurdert opp mot hverandre og det er disse fire som er brukt som grunnlag i denne masteroppgaven. Rapporten har en god teknisk beskrivelse av alle løsningene og hvilke materialer som er brukt. Hvilke konklusjoner RAM- og risikovurderingen kommer fram til har ikke så mye å si for denne masteroppgaven og det er systemdefinisjonen som er mest relevant og det at alle fire VoF sikrer mot vanddrypp i tunnelrommet.

#### **N500 Vegtunneler**

Denne rapporten er utarbeidet av Statens vegvesen og det er kapittel 7 som er mest interessant for denne masteroppgaven. Kap. 7 omhandler vann- og frostsikring i tunneler og viser til hvilke løsninger som er godkjente for bruk i veitunneler per 2016. Det er de samme som for jernbane, men uten løsningen med sprøytbar membran og med tunnelportal. Det er noen forskjeller fra VoF i jernbanetunneler ved at det i veitunneler er krav om en føringskant av betong eller veggelementer i betong for de frittstående VoF. Her er det også informasjon om hvor mye isolasjon som må til i ulike frostmengder.

## Vitenskapelige artikler

Gjennom litteratursøket ble mange artikler lest, men flere av de omhandlet utdaterte VoF og det ble ikke funnet noen artikler som omhandler klimagassutslipp fra VoF. Doktorgraden til Karl Gunnar Holter er brukt mye for å finne ut av løsningen med sprøytbar membran. I tillegg er en artikkel skrevet av ansatte ved NTNU (Huang, et al. 2014) om klimautslipp i forbindelse med boring og sprengning av tunnel blitt brukt.

Informasjonen som er hentet ut er forsøkt gjort så nøytralt som mulig for å unngå påvirkninger fra andres meninger om hvilken løsning som er ”best”. For å vurdere kilder har ”TONE” prinsippet blitt brukt. TONE står for troverdighet, objektivitet, nøyaktighet og egnethet (NTNU 2017).

Hvem som har skrevet og hvem som har publisert artikkelen bestemmer hvor **troverdig** den er. Man bør undersøke om litteraturen er fagfellevurdert og hvilken utdanning forfatteren har. Hvordan dataene er fremstilt i litteraturen har med **objektivitet** å gjøre og man bør vurdere om forfatteren fremstiller dataene fra flere syn eller kun fremmer et enkelt syn. I tillegg bør man sjekke om annen litteratur samsvarer med funnene. Hvis en artikkel er noen år gammel er det viktig å sjekk om den samsvarer med nyere litteratur og dermed finne ut hvor **nøyaktig** artikkelen er. Hvilke forskningstekniker som blir brukt har også med hvor nøyaktig en artikkel er. E i TONE står for egnethet og man må finne ut om litteraturen er egnet til det temaet man søker etter og dette bør gjøres først i et litteratursøk. Hvis litteraturen belyser temaet på en ny måte og hvis den kan være til bruk i oppgaven man jobber med vil den være egnet (NTNU 2017).

## 2.2 Dimensjonering av tunnel og mengdedata

Ved dimensjonering av tunnel ble det valgt å ta utgangspunkt i veitunneltverrsnittet som er mest brukt i Norge, nemlig T9,5 (Huang, et al. 2014). Det er regnet mengder for samme lengde på kledningen i tverrsnittet for alle materialer. Så selv om innerste bue på betongen vil være litt kortere enn kurven der membranen er, blir alt beregnet med én kurvelengde. Noen materialer som PE-skum og membran går nedenfor veibanen og dette blir regnet med. For tunneltverrsnittet T9,5 er den teoretiske buelengden til sprengningsprofilen 21,04m og buelengden til normalprofilen 18,46m (Statens vegvesen 2016a). Normalprofilen indikerer innerste buelengde for VoF. Det er valgt å gå for en mellomting mellom normalprofil og sprengningsprofil og buelengden er satt til 19,75m.

For å få mengder som samsvarer med enhetene som brukes i LCA av de ulike materialene er det regnet på enten kubikkmeter, kvadratmeter og/eller kilo for materialene. For å regne ut transporten er all materiale omregnet til tonn for å kunne bruke enheten tonn-kilometer. Transportmåten som er valgt er en EURO4 lastebil som kan frakte mellom 3,5 og 7,5 tonn for PE-skum og for øvrige materialer er en EURO4 lastebil som kan frakte mellom 16 og 32 tonn valgt. EURO4 er valgt fordi det siden 31. desember 2013 er krav om Euro4 sertifisering på tunge kjøretøy over 2,6tonn i EU ifølge RSA (RSA 2016). I databasen Ecoinvent som er brukt blir transporten regnet ut med gjennomsnittlige belastningsfaktorer som inkluderer gjennomsnittlig andel tomme returer for lastebilene (Weidema B P 2013). Derfor er det kun satt inn for kjørelengde én vei.

Mengdene på materialer som brukes er hovedsakelig fra SVV og Bane NOR sine rapporter, men mengdene er kvalitetssikret gjennom samtaler med aktører i bransjen og skal stemme godt.

Estimatet på bygging av VoF er basert på antall liter diesel maskinene bruker. En LCA av livsløpet på maskinene er gjort grovt og konklusjonen er at utslipp av CO<sub>2</sub>-ekv. i forbindelse med det er neglisjerbart. Hvor mange liter bensin som ulike maskiner bruker er basert på erfaringstall gjennom samtale med Veidekke Anlegg og baserer seg på maskinene som brukes i løsningen med PE-skum med nettarmert sprøytebetong og veggelementer og løsningen med betongelementer i hele hvelvet. Det er generelt lite informasjon om dieselforbruk for maskiner, spesielt maskiner som går på tomgang. Det er forsøkt å få slike tall fra maskinprodusenter, men de som har svart på mail vet ikke hvor mye diesel som brukes på tomgang. På grunn av dette er tallene fra Veidekke brukt for alle VoF, fordi flere av maskinene brukes i flere VoF og det antas at effektiviteten på maskinene er omtrent lik. For å kunne regne dieselforbruk pr lengdemeter tunnel er det anskaffet fremdriftsplaner fra ulike tunnelprosjekter i Norge. Gjennomsnittlig fremdrift er regnet ut og dieselforbruket er fordelt på dette.

For VoF med helstøpt hvelv er det brukt en annen metode for å finne klimagassutslipp. Her er det i mindre grad maskiner som går på diesel og beregningen av CO<sub>2</sub> utslipp er basert på mengden materialer som brukes til forskaling og transport av dette til byggeplass. Beregningene er basert på byggingen av Ulvintunnelen. Ut ifra tegninger av forskaling består denne i hovedsak av stål og dette er lagt til grunn. Antall tonn forskaling er delt på antall meter tunnel bygget for deretter å regne ut klimagassutslipp pr meter tunnel. Transport av forskalingen er også utregnet og avstanden fra Sveits til Ulvintunnelen er brukt siden

leverandøren for forskalingen er sveitsisk med samme transport som de andre materialene i VoF løsningene. Det ble også regnet på strømbruk for Ulvintunnelen, men i CO<sub>2</sub>-ekv. er det neglisjerbart. Det antas at forskalingen ikke brukes videre, men eventuelt omformes til noe annet.

## **2.3 Metode for LCA**

Metoden som beskrives i ISO 14040 (ISO 2006) blir fulgt ved utførelsen av LCAene i denne oppgaven. Klimagassutslipp for flere materialer er beregnet ved å bruke verktøyet til SVV utarbeidet av Asplan Viak hvor det er tatt utgangspunkt i databasen ecoinvent og eksisterende norske EPDer (Asplan Viak 2015). En Excel-mal for Arda og programvaren Arda er brukt for å regne ut klimagassutslippene forårsaket av produksjonen av materialene og transporten til byggeplass som ikke er regnet ut ved hjelp av SVVs LCA verktøy. Det vil si sprøytbar membran, norsk strøm og transport til byggeplass. For utslipp fra materialet Foamrox er en EPD brukt (IBU 2017).

I Arda er metoden ReCiPe Midpoint hierarchist brukt for å regne ut klimagassutslippene. For å gjøre dette er det gått ut ifra det som ifølge Huang et al. er standard norsk veitunnel, nemlig T9,5 (Huang, et al. 2014) og standard dobbeltsporet jernbanetunnel (Sagen 2017).

### **1.1.1 Hensikt og omfang**

Hensikten med oppgaven er å vurdere klimagassutslippene som blir forårsaket av materialene og transporten av materialene som kreves for å lage én meter vann- og frostsikring i tunnel. I tillegg blir klimagassutslipp i forbindelse med bygging vurdert. Oppgavebeskrivelsen var allerede utarbeidet og foreslått av NTNU, men endringer og tillegg er gjort underveis i oppgaven.

### **1.1.2 Livsløpsregnskap**

For å kunne lage et livsløpsregnskap må mye data søkes fram. Dette ble blant annet gjort ved å søke på produsenter av materialer for å finne spesielt densitet til de ulike materialene siden enheten for transport er tonn-kilometer. Mye av litteraturen for densitet er fra Statens Vegvesens nettsider og nettsider til ulike, norske produsenter av materialene i vann- og frostsikringsløsningene.

For å finne tykkelser på materialer ble det søkt på statens vegvesens nettsider og rapporten *RAM- og risikovurdering vann- og frostsikring* ble brukt.

### **1.1.3 Livsløpseffektvurdering**

Metoden som er valgt når Arda og ecoinvent er brukt er ReCiPe hierarchist fordi det er standard for Arda programmet og har klimagasser som en miljøfaktor. Der det er brukt eksisterende EPDer er dette trinnet for metode allerede gjennomført og miljøpåvirkningene fra klimagasser er utregnet. SVVs verktøy er også utviklet ved å benytte metoden ReCiPe. For SVVs verktøy er det for materialer som er antatt produsert i Norge benyttet norsk elektrisitetssmiks, ellers er det brukt europeisk energimiks (Asplan Viak 2015). Det er også regnet for europeisk energimiks når Arda er brukt og EPDen for Foamrox glassfiber legger til grunn tysk energimiks da materialet produseres der (IBU 2017).

### **1.1.4 Livsløpstolkning**

Siden det kun er sett på én effektindikator, klimagassutslipp, blir tolkningen en oppsummering av resultatene fra livsløpseffektvurderingen av klimagasser. For å gjøre resultatene godt kommuniserbare er det laget diagrammer i resultatdelen og tolkningen av diagrammene er beskrevet i resultat- og diskusjonskapittelet.

## **2.4 Svakheter med arbeidet/metodene**

Ideelt sett ville det vært bedre å måle dieselforbruket for maskinene over en lang periode for å få sikre data for dieselforbruk for alle de ulike VoFene. Siden det ikke er pågående prosjekter for alle de ulike VoFene per nå er ikke det mulig å få til. I tillegg er bygging en liten del av det totale klimagassutslipp og dermed kanskje ikke verdt å legge så mye tid i, i denne sammenheng. Det er heller ikke tatt med svinn på materialer, annet enn prelltap for sprøytebetongen på PE-skum løsningene. For de andre løsningene med sprøytebetong er betongmengden varierende og dette er diskutert i diskusjonskapittelet. Mengdene bolter er også usikre og vil være avhengig av hva slags berg det bores i. Hvorvidt forskalingen i helstøpt hvelv brukes videre eller ikke vil ha mye å si for klimagassutslippet fra byggingen i denne løsningen. Hvis den brukes i fremtidige tunneler vil utslippene reduseres kraftig fordi klimagassutslippene fra stålet i så fall også fordeles over livsløpet til andre tunneler.

LCA er ikke noen eksakt vitenskap og vil gi et estimat på utslipp, ikke en fasit. Hvor godt dette estimatet er vil avhenge av detaljnivået. Resultatene avhenger også av hvilken metode som er valgt og hvilke energimikser som er lagt til grunn. Som forklart i kapittel 2.2 er alle materialer regnet ut ved å bruke samme buelengde, dette er en forenkling og ikke helt korrekt som forklart. I denne oppgaven er det forsøkt å få en generell oversikt over klimagassutslipp for ulike VoF og det er sammenligningen av disse som vil være mest relevant, ikke hvor

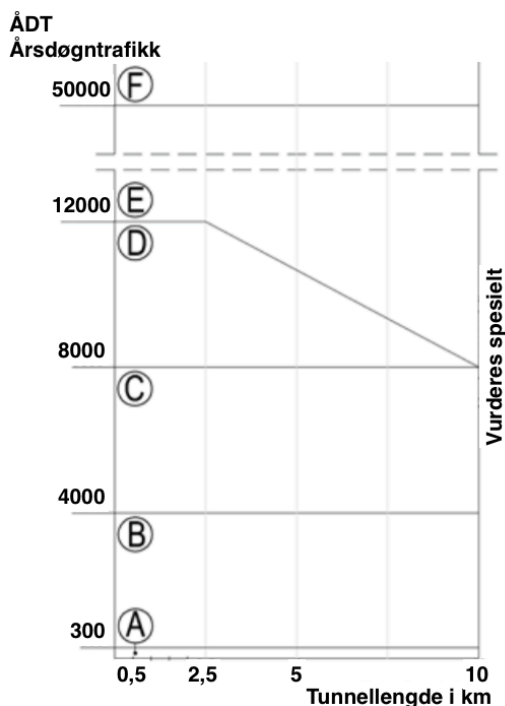


mange kg CO<sub>2</sub>-ekv. en løsning slipper ut alene for som man ser fra resultatene kan dette variere mye.

## 3 Teori

### 3.1 Tunneler i Norge

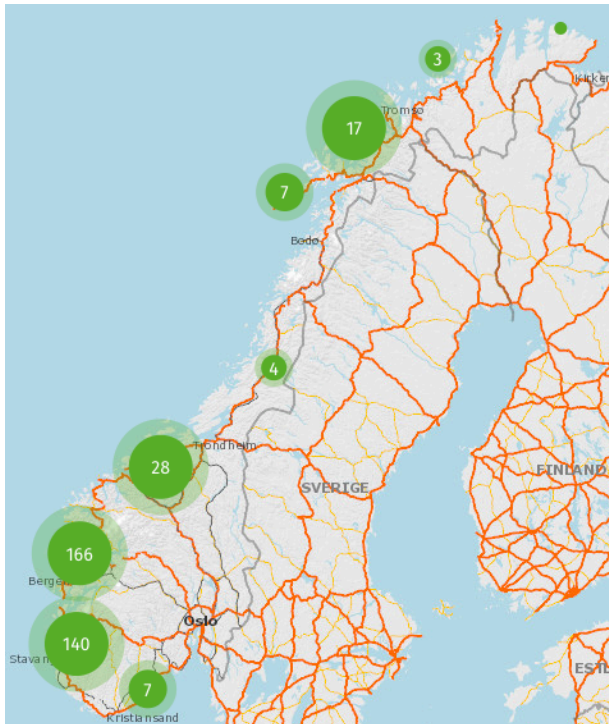
Det finnes 1191 veitunneler i Norge per 2018, hvorav 36 er undersjøiske (Statens vegvesen 2018). I tillegg er det 754 jernbanetunneler per 2016 med en total lengde på 4208 km (Jernbanedirektoratet 2016). For veitunneler er 373 prosjektert i tunnelklasse A, 409 i klasse B, 64 i klasse C, 44 i klasse D, 83 i klasse E og 21 i klasse F. 116 tunneler er definert som ikke relevant for tunnelklasse og 81 tunneler er uten verdi. Hovedandelen av disse udefinerte tunnelene har lengde mindre enn 500m (Statens vegvesen 2018). Ved besøk av vegdata.no to uker senere var antall tunneler noe mindre av ukjent årsak. Vær dermed klar over at dette ikke nødvendigvis er 100% rett, men gir en god indikasjon på fordelingen av veitunneler i Norge. Se definisjon for tunnelklassene i figur 1.



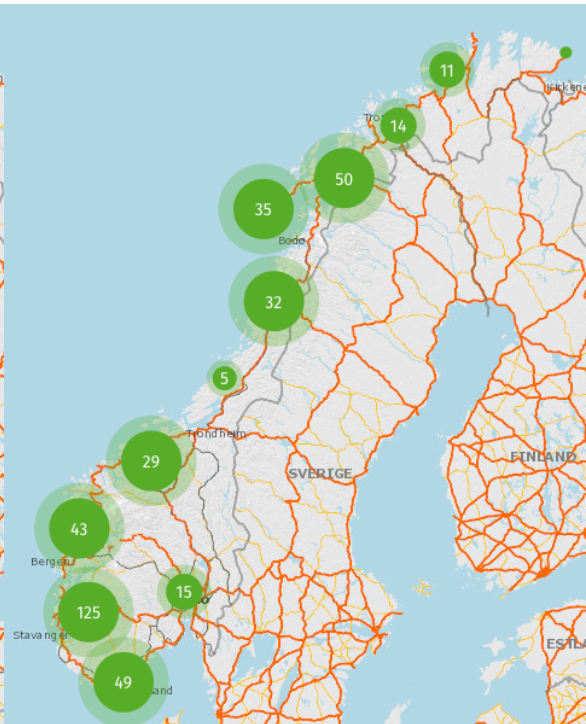
Figur 1: Definisjon på tunnelklasse i forhold til ÅDT

De siste 20 årene (1998-2018) har det blitt bygget 32 tunneler i klasse A, 85 i klasse B, 19 i klasse C, 25 i klasse D, 45 i klasse E og 21 i klasse F i Norge. Det blir altså bygget flest tunneler i klasse B, men i sammenligning med 20 år tidligere (1978-1998) har bygging av tunneler i klasse E og D blitt doblet og det er ikke blitt bygget tunneler i klasse F før årtusensskiftet. Bygging av tunneler i klasse A har minket fra 107 stk mellom 1978 og 1998 til 32 stk de siste 20 årene. Merk at dette er tall for hvilken tunnelklasse en tunnel er prosjektert til ved bygging og at gamle tunneler kan ha blitt fornyet til en høyere eller lavere tunnelklasse

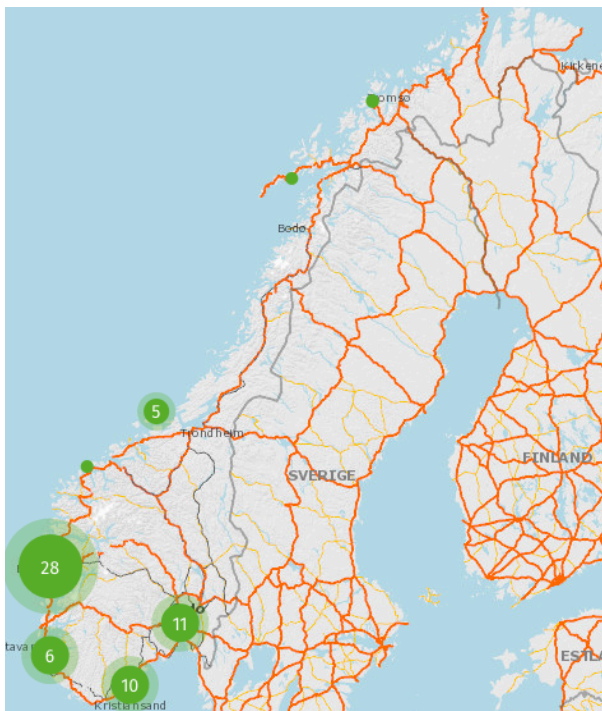
ved rehabilitering. Figur 2 til 7, viser en oversikt over hvor i Norge tunnelene befinner seg i de ulike tunnelkassene (Statens vegvesen 2018).



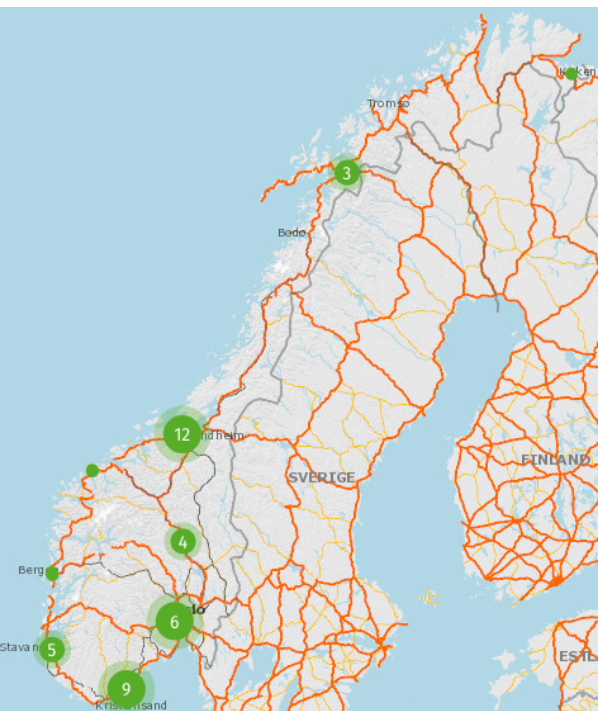
Figur 2: Tunneler i tunnelklasse A



Figur 3: Tunneler i tunnelklasse B



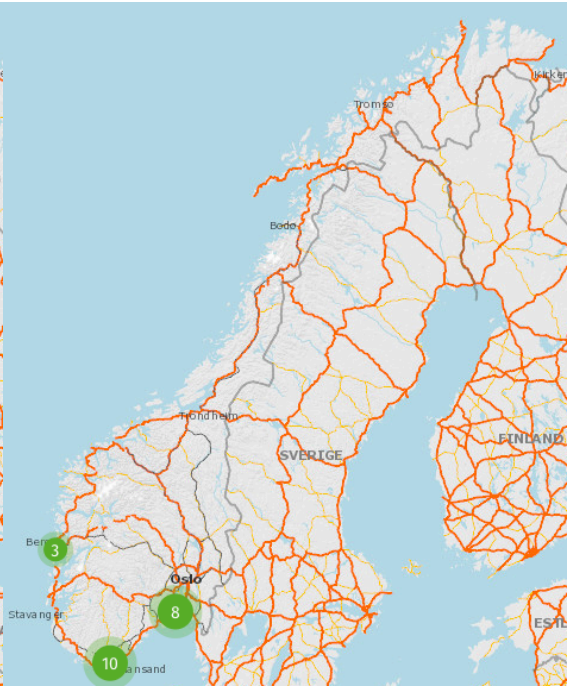
Figur 4: Tunneler i tunnelklasse C



Figur 5: Tunneler i tunnelklasse D



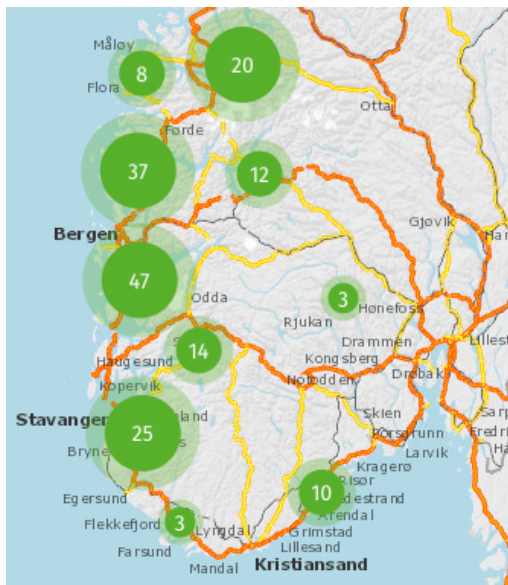
Figur 6: Tunneler i tunnelklasse E



Figur 7: Tunneler i tunnelklasse F

## 3.2 Vann og frostsikring i Norge

I eldre tunneler kan man ofte se at det ikke er noen form for VoF og lite bergsikring, man ser rett inn på det utsprengte berget. Dette er ofte gamle tunneler med lav ÅDT og tidvis vanddrypp forekommer fra tunnelheng og vegger. Mange slike tunneler befinner seg langs vestkysten der det på grunn av vanskelig topografi ble laget tunneler med minimal bergsikring for å få ned kostnadene (Broch, Grøv and Davik 2002). Nedenfor er alle tunneler i klasse A og B i Norge som ble bygget før 1970, nesten alle på vestkysten og ingen lenger nord. For høyere tunnelklasser ble det før 1970 kun bygget 7 tunneler (Statens vegvesen 2018).



Figur 8: Tunneler i tunnelklasse A og B bygget før 1970

På grunn av Norges kalde klima trenger frost dypt inn i tunneler og for å sikre mot frost som illustrert på bildet i figur 9 må man isolere tunnelbanen når frostmengden  $F_{10T}$  er 8000 h°C og høyere. Bruk av PE-skum for frostsikring var den mest suksessfulle måten å frostsikre tunneler på da de startet å bruke det. Siden starten på 60-tallet har rundt 20 ulike metoder for VoF blitt prøvd ut, men få har vist seg å være gode nok til å sikre en god og tilstrekkelig varig VoF (Statens Vegvesen 2009). I dag brukes PE-skum og XPS isolasjon for å frostsikre de frittstående VoF løsningene. For de kontaktstøpte VoF brukes betong som frostsikring. Tabell 1 er en oversikt over hvor tykk isolasjon man trenger for ulike frostmengder  $F_{10T}$  for XPS og PE-skum og tabell 2 er en oversikt over alle godkjente VoF løsningene i veitunneler. Begge tabellene er hentet fra SVVs håndbok N500 hhv tabell 7.3 og 7.1 i N500 (Statens vegvesen 2016a).

Tabell 1: Minimumstykkelser for frostisolajosn av XPS og PE-skum ved ulike frostmengder (Statens vegvesen 2016a) og antall kommuner i Norge som frostmengden gjelder for (Byggforskserien 2012)

<b>Frostmengde, <math>F_{10T}</math> (h°C)</b>	<b>XPS (mm) minimum tykkelse</b>	<b>PE-skum (mm) minimum tykkelse</b>	<b>Antall kommuner i Norge</b>
< 8 000	-	-	136
8 000 – 10 000	50	45	44
10 000 – 15 000	50	50	97
15 000 – 20 000	50	60	65
20 000 – 25 000	60	70	45
25 000 – 30 000	60	80	40
> 30 000	70	90	33

Hvis man regner gjennomsnittlig frostmengde ved å summere frostmengde for alle kommuner fordelt på antall kommuner i Norge får man at gjennomsnittet ligger på 15 000 h°C frostmengde (Byggforskserien 2012). Hvis man ser på hvor veitunnelene som finnes i Norge ligger ser man at hoveddelen ligger sørvest i Norge. 71% av alle tunneler ligger i fylkene Vest-Agder, Rogaland, Hordaland, Sogn og Fjordane og Møre og Romsdal. I disse fylkene er det 138 kommuner og 111 av disse har en gjennomsnittlig frostmengde under 8000 h°C, dvs. ikke medregnet kommuner med frostmengde 8000 h°C (Byggforskserien 2012). Det vil si at hvis alle tunnelene i nevnte fylker er fordelt likt på disse 138 kommunene er det ikke behov for frostsikring for over 57% av alle tunneler i Norge, regnet med frostmengde  $F_{10T}$  som er dimensjonerende når man bygger tunnel.

Tabell 2: Godkjente VoF metoder fra N500 med tilhørende beskrivelse (Statens vegvesen 2016a)

Vann- og frostsikring	Frostmengder <sup>(1)</sup> (kap.7.2)	Tunnelklasser						Føringskant	Membran Type I, II, III	PE-skum	Frostisolasjon XPS
		A	B	C <sup>(4)</sup>	D	E	F				
Hvelv av sprøytebetong <sup>(2)</sup>	F <sub>10</sub> < 8 000 h°C	X	X	X				X	III	(X)	-
	F <sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C	X	X	X				X	-	X	-
Hvelv av betongelementer <sup>(3)</sup>	F <sub>10</sub> < 8 000 h°C			(X)	X	X	X	-	I, III	-	-
	F <sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C			(X)	X	X	X	-	I, III	-	X
Kontaktstøpt vann-/frostsikrings-hvelv med membran	Alle F <sub>10</sub>			(X)	(X)	(X)	(X)	-	II	-	-
Tunnelportal		X	X	X	X	X	X	-	I		-

X Skal benyttes som hovedløsning. Se kap. 7.4.1-7.4.7 for detaljer.

(X) Alternativ, prosjektspesifikk løsning.

(1) Ved frostmengde F<sub>10</sub> ≥ 8 000 h°C skal hvelvet frostisoleres.

Ved F<sub>10</sub> < 8 000 h°C kan hvelvet utføres uisolert.

(2) Sprøytebetong i heng og vegger, med føringskant av betong. Sprøytebetong i heng, kombinert med veggelementer av betong kan benyttes i tunnelklasse D, E og F.

Sprøytebetong i heng kombinert med veggelementer av betong i profilutvidelser; f.eks. havarinisjer.

(3) Betongelementer: helhvelv, eller veggelementer kombinert med sprøytebetong i heng.

(4) For tunneler i tunnelklasse C skal det i innkjøringssonene benyttes løsninger som inkluderer veggelementer av betong. Veggelementene skal minst benyttes til og med halve lengden av overgangssone for belysning. I øvrige del av tunnelen skal det benyttes føringskant av betong. Over føringskant og veggelementer benyttes hvelv av sprøytebetong.

Kapittel 3.3 vil gå detaljert inn på løsningene i tabell 2, med unntak av tunnelportal og i tillegg en løsning med sprøytbar membran. Kapittel 3.4 beskriver andre VoF løsninger som brukes eller har potensial til å kunne brukes.



Figur 9: Illustrasjon av frost i tunneltverrsnitt før VoF i Eiganestunnelen (eget bilde)

### 3.3 Fire ulike VoF til tunneler inkl. estimert levetid

Det er de fire godkjent VoF løsningene som blir sett spesielt på i denne oppgaven. Det er de fire løsningene som i 2015 ble godkjent av Bane NOR for å sikre mot vanddrypp i tunnellopet. Løsningene er altså vannsikre, men ikke alle er frostsikre. I noen løsninger er det tilrettelagt at man kan tilsette et materiale, for eksempel XPS isolasjon, for å gjøre løsningen frostsikker. Alle disse løsningene var i 2015 godkjente for bruk i jernbanetunneler, men PE-skum er ikke lenger tillatt i jernbanetunneler. Tre av de fire løsningene er godkjent av SVV for bruk i tunneler, men hvilken tunnelklasse veitunnelen har bestemmer hvilke løsninger som brukes.

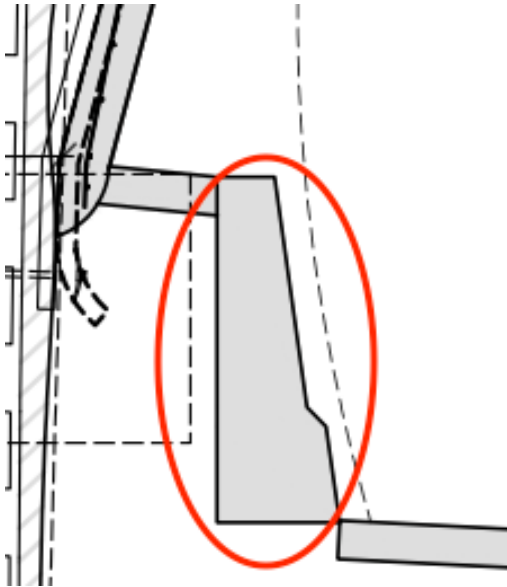
#### 3.3.1 PE-skum

PE-skum ble først tatt i bruk i norske veitunneler rundt år 1980 og ble et av de vanligste VoF løsningene utover 1980-tallet (Statens Vegvesen 2009). I dag er det også mye brukt i veitunneler og både Eiganestunnelen og Bodøtunnelen som bygges nå, i 2018, bruker PE-skum i VoF. Bane NOR har nylig besluttet å slutte å bruke løsningen i jernbanetunneler. I 2007 bestemte vegvesenet seg for å fase ut bruken av PE-skum for å jobbe med alternative løsninger.

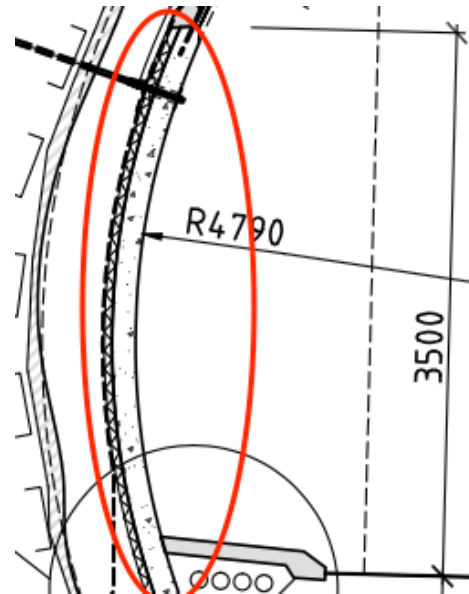
PE-skum består av hovedsakelig luft og det er dette som gjør at den har en så lav densitet på 30-35 kg/m<sup>3</sup>. PE står for polyetylen og er en type polymer som brukes i mange vanlige plastartikler. PE-skummet er per definisjon ikke brannfarlig (Pedersen 2009), men farlig ved brann fordi det gir fra seg en giftig gass ved høye temperaturer. PE-skummet smelter ved 120-130 grader og tar fyr ved ca. 300 grader. Det må derfor brannsikres skikkelig for å unngå at eventuelle tunnelbranner setter fyr på PE-skummet. Derfor er det krav om at gjennomsnittstemperaturen ved PE-skummet ikke overstiger 250 grader etter 60 minutters testing inni tunneler (Statens Vegvesen 2016c). PE-skummet brannsikres ved å bruke nettarmert sprøytebetong tilsatt PP-fiber (polypropylenfiber) for å dekke PE-skummet. Etter nye tester i 2006 ble det klart at 8cm sprøytebetong iblandet 2 kg PP-fiber per kubikk betong må til for å tilfredsstille brannkravet (Statens Vegvesen 2016c). PP-fiberen gjør sprøytebetongen mer elastisk og hindrer dermed at sprekker dannes i sprøytebetongen. Det er viktig å unngå sprekke dannelse under brann slik at brannen ikke kommer inn til PE-skummet via sprekker og dette sikres ved at PP-fiberen gjør at fukt og vanndamp slipper ut av betongen (Statens Vegvesen 2016c). I tunnelklasse A til C må man ha en føringskant i betong for denne løsningen. I tunnelklasse D til F må man ha veggelementer av betong med nødvendig XPS



isolasjon bak (Statens vegvesen 2016a). Se figur 10 og 11 for illustrasjon (Statens Vegvesen 2014).



Figur 10: Føringskant i betong



Figur 11: Veggelement i betong

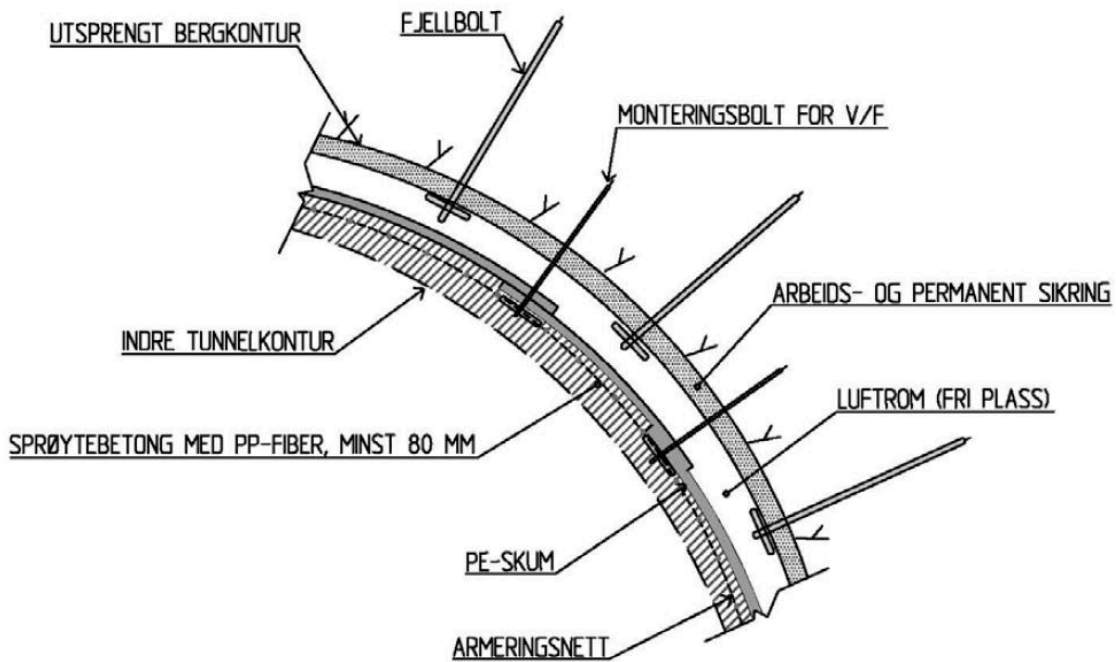
Tykkelsen på PE-skummet kan varieres og hvor tykt det må være er avhengig av målt frostmengde i området. Minimumstykkelse på PE-skummet er 45mm og tåler da opp til 10000 h<sup>0</sup>C frost (Statens vegvesen 2016a). PE-skummet kommer normalt i størrelser på 2,75 \* 2,75 meter, men kan kappes til mindre størrelser som gjør den til en fleksibel løsning som ofte brukes ved tverrsnittsendringer og nisjer i kombinasjon med andre løsninger. I tunneler med betongelementer blir ofte PE-skum løsningen brukt i tverrsnittsoverganger og nisjer fordi det er vanskelig å gjennomføre disse partiene med betongelementer.

PE-skum platene kan enten monteres kant i kant med hverandre eller med overlapp. Hvordan dette gjøres påvirker hvor mange bolter som kreves og overlapp krever naturligvis mer PE-skum for å gjøre opp for overlappingen. Ved montering kant i kant er det nødvendig å sikre overgangen fra PE-skum plate til PE-skum plate og dette gjøres som regel ved å bruke tynne plater av PE materiale, ikke skum, se bildene i figur 12 og vannavstøtende stålprofiler i platekantene.



Figur 12: PE-skum med påfestet PE-materiale i overgangene mellom skumplatene (Aas Jakobsen 2015)

Ved overlapp blir boltene plassert slik at de fester PE-platene til hverandre som illustrert i figur 13 og krever ingen ytterligere vannsikring. Boltmønsteret er 1,2 \* 1,2 m for overlapp og 1,375 \* 1,375 m for PE-plater kant i kant.



Figur 13: Skisse av PE-skum løsning med overlapp av platene (Tuven 2015)

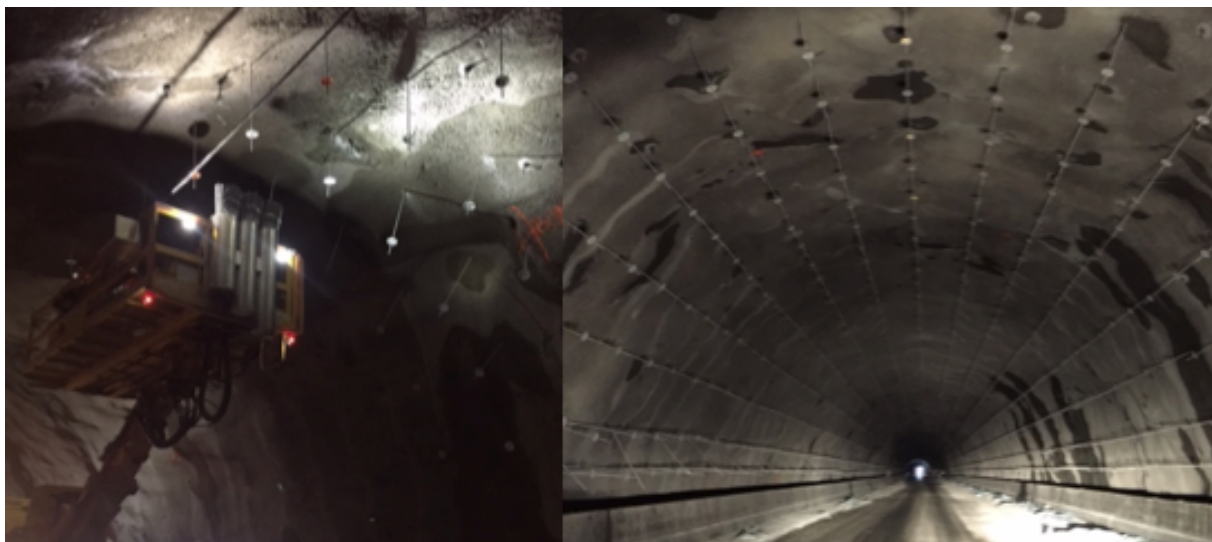
Mer konkrete materialtyper og tykkelser for VoF med PE-skum er beskrevet i tabell 3 nedenfor.

Tabell 3: Materialtyper og tykkelser for VoF med PE-skum

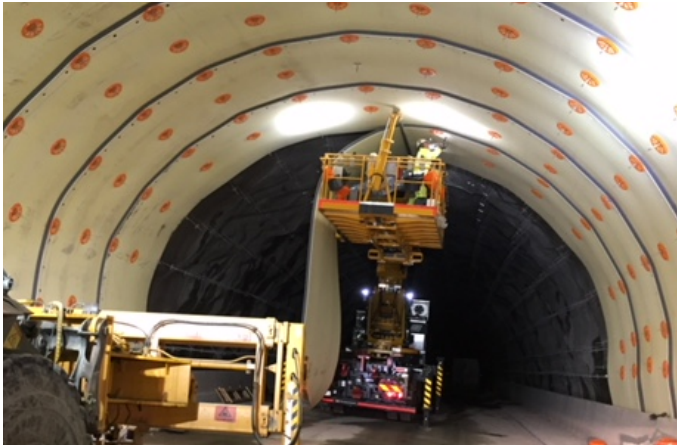
Navn	Dimensjon	Material
PE-skum plater	Høyde*bredde*lengde = Min. 45mm* 1,375m*1,375m Ved overlapp: 350mm overlapp	PE-skum
PE-skum bolter <sup>1)</sup>	ø16mm bolter. Min. forankring i berg: 500mm	Kamstål
Armeringsnett	K 131 (plateoverlapp) K189 (kant i kant) 200mm overlapp av nettene	Stål B500NA
Sprøytebetong med PP-fiber	Min. 8cm sprøytebetong 2 kg/ m <sup>3</sup> PP-fiber	Sprøytebetong B35 Polypropylenfiber
Føringskant i betong	Areal = 0,186 m <sup>3</sup> /m	Betong B45
Veggelementer	150mm tykkelse, h=3,6m, b=5m	Betong B45
Bolter for veggelementer	2 stk pr veggelement, M33 bolt	Kamstål

<sup>1)</sup> Varmforsinket med 55 µm sinkbelegg og 55 µm pulverlakkering med epoksy

PE-skummet blir montert ved bruk av en platformbil etter at en bolterigg og platformbil har boret for og festet bolter for PE-skum, se figur 15. Når PE-skummet er på plass blir armeringsnett montert av en kranbil og liten lift etterfulgt av en platformbil som monterer avstandsklosser, skjøteskruer etc. til armeringen. Før sprøytebetongen sprøytes på er det som regel 2-4 små lifter som utfører små aktiviteter som rissfuger, brannfeller og montering av tekniske bolter. Til slutt blir sprøytebetongen sprøytet over PE-skum og armering med påkrevd tykkelse, 8 cm. Etterarbeid som rengjøring av veibane gjøres med en liten lift.



Figur 14: Montering av bolter til PE-skum før PE-skum monteres. Foto: Ronny Wilhelmsen fra Implenia



Figur 15: Montering av PE-skum med overlapp i Eiganestunnelen. Foto: Ronny Wilhelmsen fra Implenia

Når det er veggelementer, noe det som regel er i veitunneler i tunnelklasse D til F med PE-skum, blir disse montert av en tung 10t truck etter at boring for bolter til veggelementer er utført av en liten pallborerigg. De fleste av disse maskinene går for det meste på tilsvarende tomgang hele tiden. Sprøyteriggen går derimot på full last ca 80% av tiden. En oversikt over arbeidet som utføres og eksempler på maskiner som brukes til arbeidet, samt ca. tidsbruk for en T9,5 tunnel er oppført i tabell 4.

Tabell 4: Hvilke maskiner som kan brukes til hva og fremdriften til maskinene basert på erfaringstall

Maskin	Bruksområde	Meter T9,5 tunnel bygget pr 12 timer
Liten pallborerigg	Boring for bolter for veggelementer	75
Tung 10t truck	Montering av veggelementer	50
Bolterigg	Boring av bolter for PE-skum	60
Plattformbil	Montering av bolter for PE-skum	30
	Montering av PE-skum	50
Kranbil og liten lift	Montering av armering	45
2-4 lifter	Små aktiviteter	Varierer
Sprøyterigg	Påføring av sprøytebetong	60-70
Liten lift	Etterarbeid	60-70

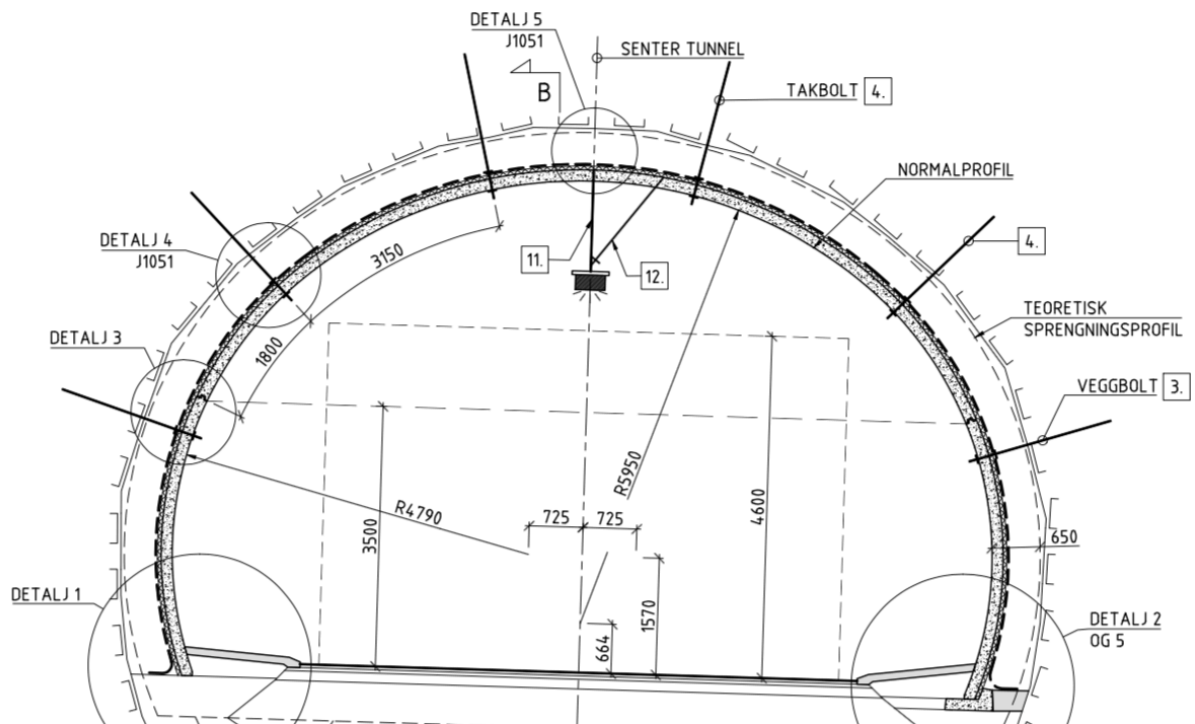
### 3.3.2 Frittstående hvelv av betongelementer

Denne løsningen er av de som blir brukt mest i norske veitunneler og kan isoleres med XPS isolasjon. Når isolasjon er nødvendig kommer betongelementene til byggeplassen ferdig med påfestet XPS isolasjon på baksiden. Siden det jobbes med prefabrikkerte betongelementer kan det være vanskelig og upraktisk å lage betongelementer til vanskelige tverrsnittsendringer og i overganger til nisjer. Denne løsningen er i hovedsak selvbærende og i tunneler med lange heng er det ikke mulig å bruke løsningen fordi berget i hengt som regel ikke har mulighet til å bære takkonstruksjonen. På grunn av dette blir denne løsningen ofte brukt i kombinasjon med andre mer fleksible løsninger, som for eksempel PE-skum med sprøytebetong. Løsningen blir også brukt i jernbanetunneler, men ikke i kombinasjon med PE-skum siden Bane NOR nylig har sluttet med PE-skum.

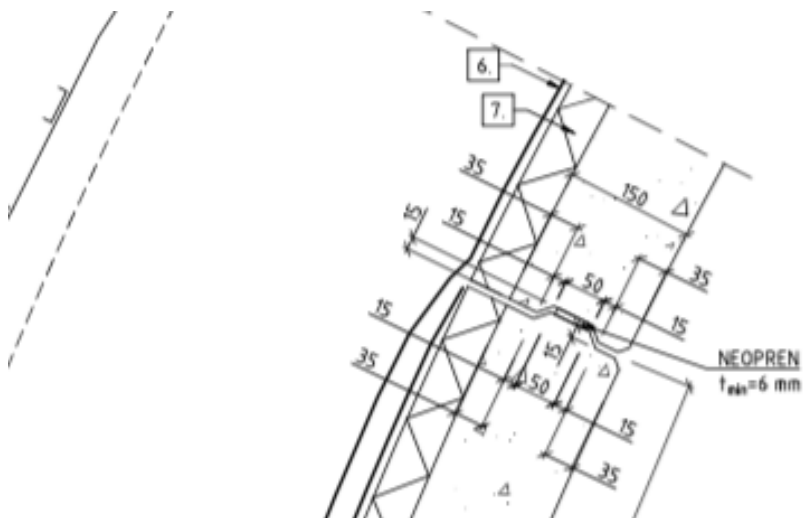
Løsningen består av prefabrikkerte betongelementer som forankres til berget med bolter. Det er som regel to veggelementer og to takelementer i tverrsnittet, men dette avhenger av størrelsen på tunnelens tverrsnitt, se illustrasjon av vanlig T10,5 tverrsnitt i figur 16 og overgang fra vegg- til takelement i figur 17 og overgang fra tak- til takelement i figur 18. Veggelementene er festet til berget med to bolter. Takelementene kan være frittstående med kun holdepunkter i festet til hverandre og veggelementene. Denne metoden er ofte brukt hvis berget er dårlig med dårlig feste for betongelementene i tak. Hvis metoden brukes i godt fjell er som regel betongelementene i taket festet med bolter til berget som vist i figur 16, men store deler av kraften tas opp i veggelementene. Boltelengde er avhengig av sprengkonturen og avstand fra VoF til sprengt kontur. Boltene må minst ha en forankring på 1 meter i fjell. Hvis tunnelen har en god sprengkontur med kort avstand fra plassering av VoF vil kortere bolter kunne brukes. Diameteren på boltene er avhengig av bergets egenskaper og antallet bolter i tak er avhengig av størrelsen på tverrsnittet.

Tabell 5: Materialtyper og tykkelser for VoF med betongelementer

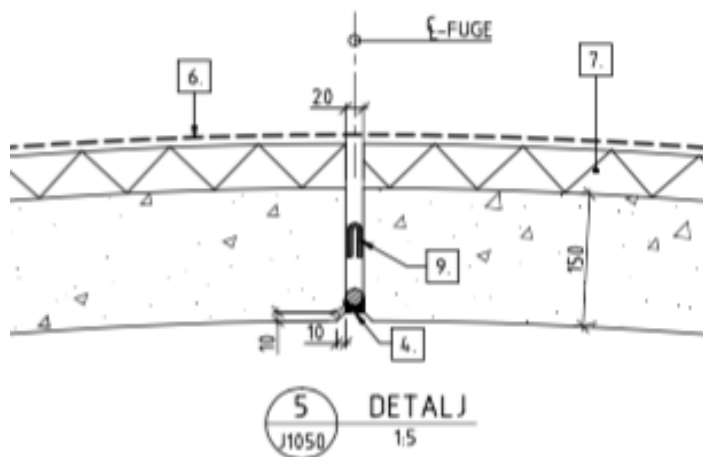
Navn	Dimensjon	Materiale
Prefabrikkerte betongelementer med armering	Tykkelse 150mm K189	Betong B45 Armering B500NB
Forankringsbolter	M27 og M33	Kamstål
Fiberduk og membran		Polypropylen
Isolasjon ved behov	Min. 50mm	XPS



Figur 16: T10,5 veitunnel tverrsnitt med betongelementer, XPS isolasjon og membran(Statens Vegvesen 2014).



Figur 17: Illustrasjon av feste mellom vegg- og takelement med bruk av neopren, et gummimateriale som beskytter mot skade på betongen i overgangen(Statens Vegvesen 2014).



Figur 18: Illustrasjon av feste mellom to takelementer, punkt 4 er en fuge, punkt 6 er membran og punkt 7 og 9 er XPS isolasjon(Statens Vegvesen 2014).

Løsningen krever en membran for å vannsikre den. Det brukes som regel en dukmembran av enten polypropylen eller polyetylen, altså en form for vanntett polymer. Membranen monteres bak betongen og eventuell XPS isolasjon hvis tunnelen må frostsikres. Membranen i veggene festes til betongelementboltene og en rondell av samme materiale som membran sveises på veggmembranen i overgangen til bolter. Deretter blir fugemasse sprøytet inn mellom bolt og rondell for å sikre tett overgang (Rønneberg 2016). Membranen til veggene blir rullet ut og festet med lift og hjullaster. En slik membranrull er ofte 100m lang og tar et par timer å sette opp. Membranen i taket blir festet og sveist ved å bruke en membranmaskin. Dette tar lengre tid og kapasiteten her er på 70 m<sup>2</sup> i timen.

Armeringen i betongelementene trenger ikke være mer enn generell minimumsarmering, som armeringsnett K198 i følge SVV rapport 509 (Palm 2017).

Bygging av denne VoF løsningen er ganske rask siden betongen allerede er herdet og klar for oppsetting. Det mest kompliserte her er å sørge for en tett membran i alle skjøter. Hvilke maskiner som brukes og tiden de bruker for å lage en T9,5 tunnel er listet opp i tabell 6 nedenfor.

Tabell 6: Maskiner og tidsbruk for å bygge VoF med betongelementer basert på erfaringstall

Maskin	Bruksområde	Meter T9,5 tunnel bygget pr 12 timer
Borrigg	Boring for bolter	150
Multilift	Montering av bolter	150
Membranmaskin/ hjullaster og lift	Montering av membran og fiberduk	255
Elementmaskin	Montering av elementer	20

### 3.3.3 Levetid for frittstående hvelv

I følge Statens Vegvesen viser en gjennomgang av veitunneler gjort i 2011 at gjennomsnittlig tid fra åpning av tunnel til rehabilitering og oppgradering var 22 år for oversjøiske tunneler og kun 15 år for undersjøiske tunneler (Statens Vegvesen 2012). Dette gjelder de frittstående hvelvene som i utgangspunktet skal ha en levetid på 50 år siden det er dimensjonerende levetid for veitunneler. For å øke gjennomsnittsalderen på VoF før rehabilitering foreslår SVV å sørge for å ha god plass til inspeksjon bak hvelvet for å kunne kartlegge bergsikringen, men det er ikke noe krav om det. Dette krever større utsprengninger og fører til risikoen for å overse ting under inspeksjoner i driftsfasen. Årsaken til rehabilitering for tunnelene SVV har undersøkt er det ikke sagt noe om og det er mulig årsaken er nye sikkerhetstiltak eller annet som ikke har med selve konstruksjonen å gjøre. Rehabilitering i en veitunnel får normalt store konsekvenser fordi man må stanse trafikken i tunnelen og det er ofte praktisk å skrifte ut hele systemer samtidig fordi noe rehabilitering krever demontering av andre objekter og for å slippe å stanse trafikken på nytt noen år senere igjen (Statens Vegvesen 2012).

I følge en rapport av Aas Jakobsen er festebolter begrensende for betongelementhvelvets brukstid og de prosjekterer av den grunn i etterkant av undersøkelsene kun festemateriell i syrefast kvalitet (Aas Jakobsen 2014). Kvaliteten på boltene har mye å si og ved å bruke litt ekstra penger på gode bolter med overflatebehandling kan levetiden bli høyere. For Pretec sine bolter med Pc-coating er det dimensjonert at de vil leve i 50 år i veldig korrosivt miljø C4. Dette er en indikasjon og det kan være boltene lever lengre i mildere miljøer eller kortere i nevnte miljø. Det finnes også dyrere og bedre bolter som vil kunne leve enda lengre. Hvilke bolter som brukes i tunneler velges som regel etter kravet satt fra SVV om materiale, dimensjon og overflatebehandling (Karlsen 2018).



### 3.3.4 Helstøpt hvelv

Metoden med helstøpt betonghvelv er en relativt ny metode i Norge, men er mye brukt i tunneler rundt om i Europa. Den sørger for både vann- og frostsikring av tunnel. Metoden har de siste årene blitt brukt i den 3,9 km lange Ulvin tunnelen og den 0,6 km lange Molykkja tunnel. Løsningen er også brukt i flere portaler i norske veg- og jernbanetunneler. Løsningen består av et utjevningsslag av sprøytebetong for å deretter kunne montere membran og filtduk for så å støpe inn membranen og filtduken med minimum 25 cm betong (Statens vegvesen 2016b). Det er viktig å ha et jevnt grunnlag før membranen festes for å unngå at denne strekkes og ødelegges når betongen støpes på. Hvis membranen først ødelegges etter betongstøp tar det gjerne lang tid før man oppdager at den er ødelagt og en reparering av denne VoF løsningen er veldig krevende. Siden membranen må ha en så jevn overflate kan det gå med mye sprøytebetong til avretting hvis sprengningen av tunnellopet er ujevnt gjennomført. I følge SVV er vanlig sprøytebetong forbruk i en slik løsning 20 cm og vanlig forbruk av betongstøp er 40 cm, med en minimumstykkelse på 25 cm. I Ulvintunnelen ble det for eksempel brukt i gjennomsnitt 63 cm betongstøp (Frogner 2014). Hvis denne VoF løsningen konstrueres som beskrevet tilfredsstillende den kravet til en levetid på 100 år fra Statens Vegvesen (Statens Vegvesen 2012). En oversikt over materialer i denne løsningen finnes i tabell 7.

Tabell 7: Oversikt over hovedkomponentene i løsningen helstøpt betonghvelv (Statens vegvesen 2016a) (Statens vegvesen 2016b)

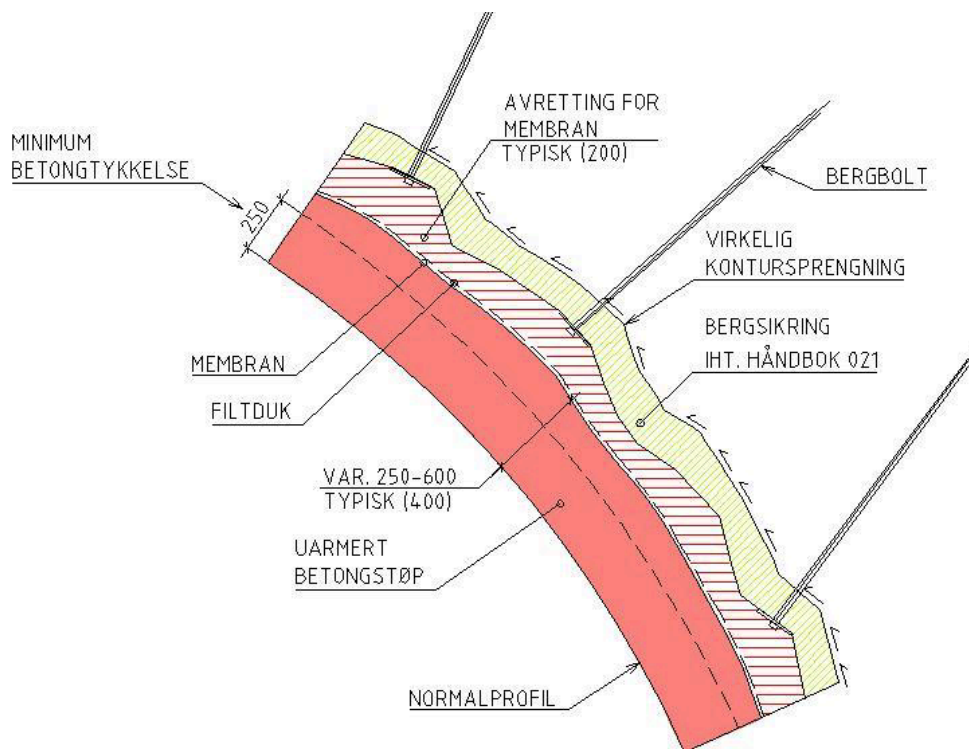
Navn	Dimensjon	Material
Sprøytebetong	Til avretting av kontur (typisk 200mm)	Sprøytebetong med fasthetsklasse B35 og bestandighetsklasse M45
Fiberduk		Polypropylen
Membran	Min. 2mm	GBR-P (polymeric geosynthetic barrier)
Uarmert betongstøp	Min. 250mm (typisk 400mm)	Betong B45

Armering er ikke nødvendig i denne løsningen med unntak av nisjer og i tverrsnittsendringer. På grunn av lokale bergforhold kan det være nødvendig med armering.

God heft mellom sprøytebetong og bergoverflate er viktig. Dette oppnås ved å spyle veggen med vann før sprøytebetongen sprøytes på av en sprøyteriggrobot. Sprøytebetongen sprøytes på i flere omganger for å sikre at den blir festet skikkelig. Filtduk og membran blir så festet til sprøytebetongen ved bruk av festebolter med tette føringer til membranen. Membran og

filtduk utføres med doble sveisesømmer ved skjøter. Når filtduk og membran er på plass kan støpningen begynne. Da har man en eller flere støpeformer som beveger seg innover i tunnelen. I Ulvintunnelen var gjennomsnittlig betongstøpproduksjon på 64m per uke med tre støpeformer på 12 meter. Støpehastigheten vil variere i relasjon til lengde på støpeform og antall støpeformer. Nisjer og tverrsnittsendringer vil også påvirke fremdriften.

Denne løsningen egner seg best til tunneler hvor god kontur er enkelt å oppnå for å minske betongforbruket i avretting og støp. Se figur 19 for en illustrasjon av tverrsnittet for denne VoF løsningen.



TYPISK SNITT

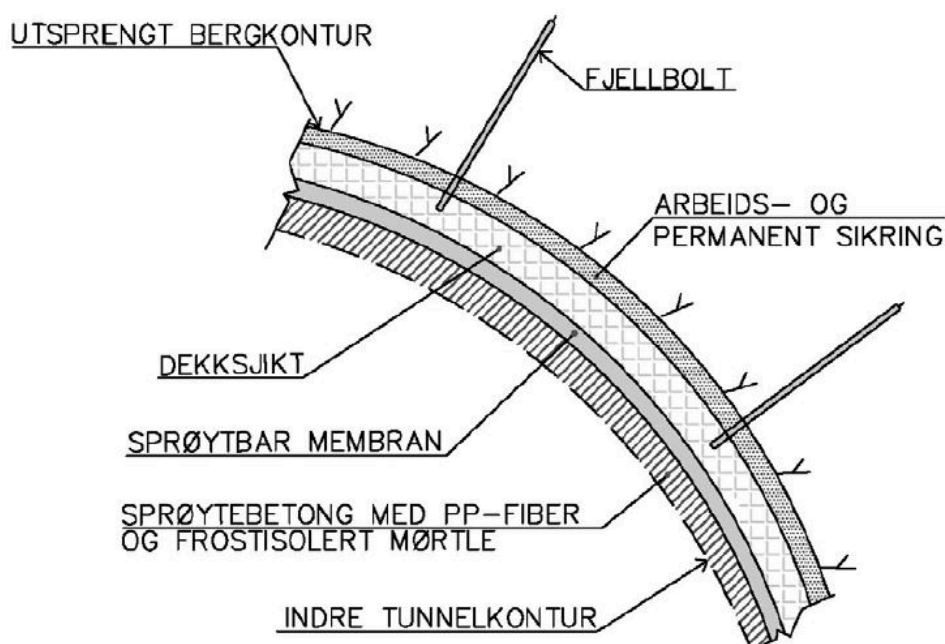
Figur 19: Skisse av helstøpt betonghvelv (Statens vegvesen 2016b)

Løsningen bygges ved å bruke forskalingsvogner som for Ulvintunnelen er motoriserte og går på hjul på en skinnegang. Vognen har vibratører og støperør som kobles opp mot betongpumpe og bil. Man kan støpe én vogn pr døgn og øke hastigheten for støpning ved å ha flere forskalingsvogner. Før forskalingsvognen bygges blir tunnelhvelvet avrettet med sprøytebetong ved behov og membranen påføres ved å bruke en monteringsvogn som for Ulvintunnelen går på skinner og strøm.

### 3.3.5 Sprøytbar EVA-membran

VoF metoden med sprøytbar membran er en ganske ny metode og Karl Gunnar Holter skrev en doktorgrad om den sprøytbare membranen (2015). Løsningen har i Norge blitt testet i små partier i Ulvintunnelen(30m) og Karmsund tunnelen(24m). Den er også brukt i et frostfritt parti på over 500m i Gevingåstunnelen (Holter 2015).

Løsningen er på samme måte som helstøpt hvelv i direkte kontakt med bergkonturen. I motsetning til helstøpt hvelv er det ikke nødvendig med et jevnt grunnlag før membranen sprøytes på siden den er så fleksibel. Kun 30-60mm sprøytebetong før membran sprøytes på er nødvendig. Se figur 20 for en skisse av løsningen.



Figur 20: Skisse av løsning med sprøytbar EVA-membran (Tuven 2015)

EVA står for Etyl-Vinyl-Acetat og består av ca. 75% EVA co-polymerer og 25% sement og tilslag. For at den sprøytbare membranen skal fungere godt må overflaten membranen sprøytes på være tørr. Løsningen kan derfor kun brukes når vanntrykket fra grunnvannet i berget er under 700kPa og berget må være stabilt. Under disse forutsetningene og med en minimumstemperatur på -3 grader celsius på membranen er det antatt en levetid på 100 år eller mer for denne løsningen. Tykkelsen på membranen er oftest 3mm, men for å oppnå denne tykkelsen blir det sprøytet på 4mm membran fordi den krymper når den tørker ifølge Karl Gunnar Holter ved NTNU (samtale).

Løsningen er i utgangspunktet ikke frostsikker, men kan gjøres frostsikker ved å påføre frostisolert mørtel i nødvendig tykkelse. Den sprøytbare membranen tåler ikke mer enn -3

grader Celsius og svekkes ved gjentatte frysningssykluser. Løsningen er dermed best egnet i frostfrie tunneler eller tunnelpartier (Holter 2015). En oversikt over materialene i løsningen finnes i tabell 8

Tabell 8: Oversikt over hovedkomponentene i VoF med sprøytbar EVA membran (Tuven 2015) (Holter 2015)

Navn	Dimensjon	Materiale
Sprøytebetong uten fiber	Til avretting av kontur	Sprøytebetong med fasthetsklasse B35 og bestandighetsklasse M45
Sprøytbar membran	3-6 med mer, ofte 4mm.	EVA-polymerer
Stålfiberarmert sprøytebetong og evt. frostisolert mørtel	Min. 60mm 50mm mørtel	Sprøytebetong med fasthetsklasse B35 og bestandighetsklasse M45 Stålfiber Mørtel

Grunnet krav til estetikk i veitunneler er VoF med sprøytbar membran best egnet i jernbanetunneler, men ved god kontursprengning kan overflaten på denne VoF bli god. Løsningen er per tid ikke godkjent eller ønsket brukt av SVV i veitunneler av estetiske grunner og fordi det kan være vanskelig å feste opphengsbolter gjennom membranen for å montere ulike komponenter som er i en veitunnel ifølge Karl Gunnar Holter ved NTNU (e-post samtale). En oversikt over hvilke maskiner og hvor lang tid det tar å bygge denne løsningen er oppsatt i tabell 9.

Tabell 9: Maskiner og tidsbruk for å bygge VoF med sprøytbar membran ifølge Karl Gunnar Holter ved NTNU (e-post samtale)

Maskin	Bruksområde	Meter T9,5 tunnel bygget pr 12 timer
Sprøyterigg	Sprøyte på sprøytebetong	202
Boremaksin	Bore drenshull	300
Tørrsprøytetpumpe	Sprøyte på membran	42
Sprøyterigg	Sprøyte på sprøytebetong	202

## 3.4 Andre løsninger

### 3.4.1 W. Gjertsen tunnel

W.Gjertsen tunnelduk 556 har tidligere blitt brukt som VoF i lavtrafikkerte tunneler. Løsningen er fortsatt typegodkjent for bruk i tunneler, men brukes nå mest i tekniske rom. Den ble senest brukt som VoF i bybanen i Bergen, der det er såkalt light rail ifølge André Mjelstad, daglig leder i W. Giertsen Tunnel AS (e-post samtale). Løsningen som er brukt der kalles WG tunnelhvelv T100 og består av tunnelduken festet av rør og bolter som illustrert i figur 21. Tunnelduken er en membran laget av PVC materiale med en tykkelse på 0,6mm og er anslått å ha en levetid på 30 år (Rønneberg and Østmoen 2016).



Figur 21: Ferdig WG tunnelhvelv T100 hvor man kan se rørbuene som holder tunnelduken på plass (Rønneberg and Østmoen 2016).

### 3.4.2 Foamrox skumglass elementer

Foamrox er et relativt nyutviklet materiale som består i hovedsak av resirkulert glass og luft. Det er i tillegg tilført et materiale for å gjøre det brannsikket i euroklasse A1. Det er prefabrikkert og kan formes etter ønske på fabrikk, se figur 22 for eksempler på former. Det er blitt testet grundig og skal være sterkt nok til å brukes som VoF. Materialet er både vann-, brann- og frostsikkert og miljøvennlig da det er laget av resirkulert glass (IBU 2017). I tillegg veier det kun 110-135 kg/m<sup>3</sup> noe som vil gjøre monteringen av elementene enklere enn for eksempel betongelementer. Det kan også henges i bergtaket på grunn av dets lave vekt ved bruk av enten komposittbolter eller vanlige bergbolter og det vil ha betydelig mindre egenvekt enn PE-skum og 100mm sprøytebetong som i dag blir mye brukt i heng. For én lengdemeter T9,5 tunnel vil 45mm PE-skum og 100mm sprøytebetong veie 4,5 tonn, mens 100mm Foamrox vil veie 217-267kg. 100mm tykkelse på materialet er i følge utvikler av Foamrox Rolf Jakobsen (e-post samtale) nok for å sikre vegbanen.



Figur 22: Foamrox glassfiber i ulike fasonger

Denne løsningen er ikke godkjent som VoF av SVV eller Bane NOR enda, men materialet er blitt godkjent til å lage ramme for brannskap for veitunneler. På tross av dette vil metoden bli vurdert på lik linje med de godkjente løsningene i resultatene i denne oppgaven og i kombinasjon med veggelementer av betong og XPS isolasjon eller føringskant av betong som det er krav om i veitunneler.

## 3.5 LCA

LCA står for "life cycle assessment" og er et verktøy for å vurdere miljøbelastningene til et produkt eller produksjonssystem. LCA tar for seg hele livsløpet til et produkt eller produksjonssystem fra "vugge til grav". De ulike stadiene er utvinning av ressurser, produksjon av råmaterialer og produkter, transport av råmaterialer og produkter, bruk og eventuell gjenvinning som for eksempel rivning av et produkt. Det er mange misforståelser når det gjelder miljøbelastninger fra ulike produkter og LCA er et verktøy som hjelper til å se hele bildet, slik at misforståelser som "elbiler er utelukkende bedre for miljøet" unngås (Strømman 2010). Om det faktisk er bedre må undersøkes nøyere og hvilken type elektrisitet som brukes og miljøbelastningene fra produksjonen av batteriet har mye å si for om elbil er bedre enn en konvensjonell bil.

Det er viktig å merke seg at en LCA ikke er noe fasitsvar på hvor store miljøbelastninger et produkt har, men at den gir et godt estimat og jo mer detaljert informasjon man setter inn desto bedre blir LCAen. Det er fire faser i en LCA (ISO 2006) og disse er beskrevet kort her.

### 3.5.1 Fasene i LCA

#### Hensikt og omfang

Det første man må gjøre når man skal utføre en LCA er å finne ut hva man ønsker å oppnå med LCAen og hvor omfattende den skal være. Det er viktig å vite hvor man skal avgrense analysen og definere hvilke prosesser som skal regnes med og sørge for at informasjonen man trenger kan innhentes. Målet med analysen må også fastsettes her og det kan for eksempel være å sammenligne to produkter eller to måter å lage et produkt (Strømman 2010).

For å kunne ha et sammenligningsgrunnlag må man definere en funksjonell enhet. En funksjonell enhet kan være alt fra en meter tunnel til en kilo epler. Det er veldig viktig å definere FU tidlig for å ha en god forståelse for hva man skal komme fram til (Strømman 2010). FU er også referansepunktet for all input som trengs som for eksempel at man trenger 4 tonn betong og 3 liter diesel for å lage en meter tunnel.

Et annet viktig punkt i denne delen av en LCA er å tenke på bruker av LCAen man lager. Det er viktig å vite hva som er interessant for brukeren og dermed vite hvilke miljøfaktorer man bør undersøke (Strømman 2010).

Man må ikke ta med alle stadiene i et livsløp og ofte finner man EPDer for produkter hvor kun utvinning av ressurser, produksjon av råmaterialer og produkter, og transport er inkludert

fordi hvordan livsløpet blir videre er usikkert. Men jo mer presis man er desto mer nøyaktig blir analysen.

### **LCI – Livsløpsregnskap**

LCI står for "life cycle inventory" og består i å samle inn data som trengs for å utføre analysen og er med på å sette sammen en slags oppskrift på hvordan å produsere den funksjonelle enheten man bestemte i første del. Man bør finne ut hvilke inngangsfaktorer og utgangsfaktorer produktsystemet man skal undersøke har, inkludert materialer, energibruk fra maskiner og utslipp til omgivelsene. I databaser som Ecoinvent er mye av denne datainnsamlingen gjort slik at man for eksempel slipper å undersøke hvordan armering blir laget, men trenger kun finne ut hvor mye armering som trengs for en FU (Strømman 2010). Ecoinvent er en database som inneholder store mengder bakgrunnsdata for flere tusen produkter og fungerer som en base for utførelse av en LCA (Ecoinvent n.d.).

### **LCIA – Livsløpseffektvurdering**

Det tredje punktet er en livsløpseffektvurdering, LCIA som står for "life cycle inventory analysis. Her velger man hvilken metode man skal bruke for å gjøre en konsekvensanalyse, for eksempel metoden ReCiPe. I denne delen skal man vurdere hvor betydelige de ulike miljøpåvirkningene er for livsløpet til et produktsystem. Ved å velge metode velger man hvilke miljøfaktorer som blir vurdert, det er derfor viktig å velge riktig metode for sin analyse (Strømman 2010).

### **3.5.2 LCA av betong**

Det er gjort mange studier av CO<sub>2</sub>-utslippet til betong og det er forsket mye på måter å redusere CO<sub>2</sub>-utslippene fra sementen som brukes. Det er tre ulike sementklasser som er mest aktuelle i Norge: CEM I, CEM II og CEM III. CEM I er ren portlandsement og inneholder 95-100% klinker. Det er i hovedsak andelen klinker i en sement som bestemmer CO<sub>2</sub>-utslippet da oppvarming av klinkeren fører til en kjemisk reaksjon som slipper ut CO<sub>2</sub> og fordi mye av oppvarmingen gjøres med fossile brensler. CEM I er altså den sementtypen som forårsaker mest CO<sub>2</sub>-utslipp. CEM II er en blandingssement med minst 65% klinker. Resten av sementen består i Norge av enten flygeaske, slagg og/eller kalkstein. En oversikt over de ulike komponentene i sementtypene I til III er listet i tabell 10 nedenfor. I Norge blir mer enn 65% av portlandsementen produsert med flygeaske og er altså en CEM II (Byggforskserien 2016).



CEM III kalles slaggsement og kan inneholde opp til 95% slagg. Slagg er et restprodukt fra smeltingen av råjern (Statens vegvesen 2018). Slaggsement har en langsommere fasthetsutvikling og lavere varmeutvikling enn CEM I. Den har bedre bestandighet overfor sulfat og svake syrer. CEM III er ikke så mye brukt i Norge enda, noe som kan skyldes at den har mindre god frostbestandighet (Byggforskserien 2016).

Tabell 10: Sementtyper og deres bestanddeler som brukes i norsk betong (Byggforskserien 2016)

Hovedtype	Betegnelse på sement		Bestanddeler (masseprosent)		
			Klinker	Andre bestanddeler	Sekundære bestanddeler
CEM I	Portlandsement	CEM I	95-100	-	0-5
CEM II	Portland-slaggsement	CEM II/A-S	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	0-5
	Portland-silikastøvsement	CEM II/A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland-pozzolansement	CEM II/A-P	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-P	65-79	21-35	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	21-35	0-5
	Portland-flygeaskesement	CEM II/A-V	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-V	65-79	21-35	0-5
		CEM II/A-W	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-W	65-79	21-35	0-5
	Portland-skifersement	CEM II/A-T	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-T	65-79	21-35	0-5
	Portland-kalksteinsement	CEM II/A-L	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	6-20	0-5
CEM II/B-LL		65-79	21-35	0-5	
Portland-blandingssement	CEM II/A-M	80-88	12-20	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35	0-5	
CEM III	Slaggsement	CEM III/A	35-64	36-65	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	0-5

Karbonatisering er en prosess som skjer i betong etter støp hvor betongen tar opp CO<sub>2</sub> fra omverdenen gjennom sin levetid. Hvor mye CO<sub>2</sub> som blir tatt opp er usikkert og på grunn av det er ikke karbonatisering regnet med i LCA for betong per dags dato. Forholdet overflate/volum av betongen vil ha mye å si for hvor stor karbonatiseringen er fordi betongen må være eksponert for å kunne ta opp CO<sub>2</sub>. Størst karbonatisering skjer derfor med knust betong eller veldig tynt betongdekke. Karbonatisering er ikke ønsket og er det som ødelegger betongen og dette er grunnen til krav om overdekning av armeringen (Byggforskserien 2016).

## 4 Resultat

### 4.1 Materialer i analysen

Klimagassutslipp for alle materialene utenom Foamrox, sprøytbar membran og transport er hentet fra SVVs liste over norske gjennomsnittsdata. For Foamrox er det brukt en EPD utgitt av IBU (institut Bauen und Umwelt e.V.) (IBU 2017). Utslipp fra transport er utregnet ved å bruke databasen Ecoinvent og NTNUs program Arda, det samme gjelder sprøytbar membran. Tabell 11 nedenfor er en liste over verdier for klimagassutslipp som er brukt i denne oppgaven.

Tabell 11: Klimagassutslipp for materialer og transport

Materiale	Enhet	GWP (kg CO <sub>2</sub> -ekv.)
Betong B45, CEM I	m <sup>3</sup>	280
Betong B45, CEM II	m <sup>3</sup>	238
Betong B45, CEM III	m <sup>3</sup>	110
Sprøytebetong B35, CEM I	m <sup>3</sup>	267
Sprøytebetong B35, CEM II	m <sup>3</sup>	227
Sprøytebetong B35, CEM III	m <sup>3</sup>	106
Sprøytebetong B35, CEM I, med stålfiber	m <sup>3</sup>	298
Sprøytebetong B35, CEM II, med stålfiber	m <sup>3</sup>	258
Sprøytebetong B35, CEM III, med stålfiber	m <sup>3</sup>	137
Sprøytebetong B35, CEM I, med plastfiber	m <sup>3</sup>	277
Sprøytebetong B35, CEM II, med plastfiber	m <sup>3</sup>	236
Sprøytebetong B35, CEM III, med plastfiber	m <sup>3</sup>	115
Bolt	kg	2,09
PE-skum	kg	2,59
Plastmembran + fiberduk	m <sup>2</sup>	4,72
Kamstål	kg	1,55
EVA-membran	kg	1,75
XPS isolasjon	m <sup>3</sup>	194
Foamrox	m <sup>3</sup>	79,7
Transport, lorry>32tonn, EURO4	tkm	0,105
Diesel	liter	3,19
Stål (til forskalingsvogn)	kg	2,47

## 4.2 Sammenligning av totale klimagassutslipp

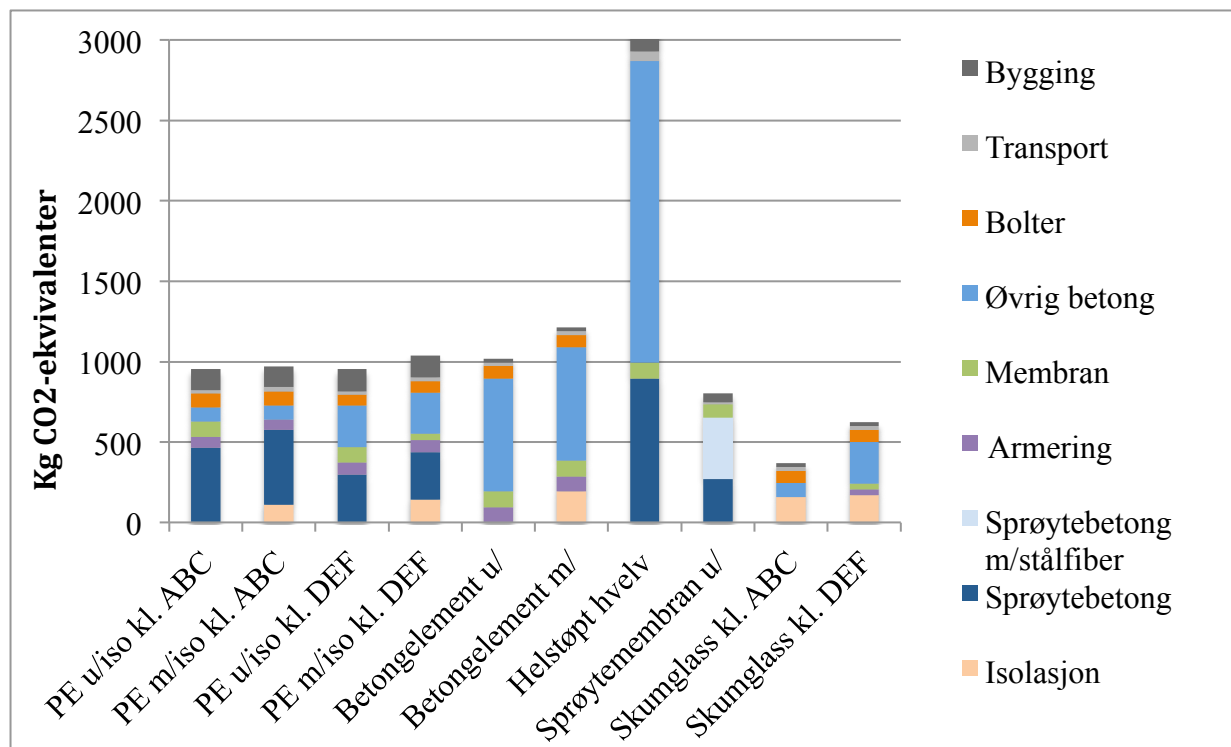
Hvis man ser på alle de fem VoF løsningene som brukes eller potensielt kan brukes i infrastruktur tunneler i Norge, altså PE-skum med sprøytemembran, betongelementer, helstøpt hvelv, sprøytbar membran med sprøytebetong og Foamrox skumglass, er det når man ser på alle tunnelklasser og frostmengde under 8000 h°C og mellom 15 000 - 20 000 h°C, 14 måter å lage VoF på. For PE-skum kan man enten ha det kant i kant eller med overlapp. Fra tabell 11 ser vi at CO<sub>2</sub>-utslippet fra PE-skum er lite og velger derfor å kun se på PE-skum med overlapp siden forskjellen i totalt utslipp CO<sub>2</sub>-ekv. vil være liten. Det er derfor kun 10 ulike VoF metoder og utslipp av CO<sub>2</sub>-ekv. for materialene, transporten og byggingen for disse er ført inn i tabell 12. Det er regnet ut for én lengdemeter T9,5 tunnel. Tverrsnittsendringer, nisjer og området i inn- og utkjøring av tunneler er ikke tatt med.

For løsningen med helstøpt hvelv er det i byggingen regnet at tre støpeformer på 160 tonn av stål blir brukt og at disse ikke brukes videre som forklart i metoddelen. Dette er grunne til at utslippet fra bygging av denne løsningen er høyere enn de andre løsningene. Transport av disse formene fra Sveits er også tatt med under bygging. Transporten av støpeformene står for 37 kg CO<sub>2</sub>-ekv pr. lengdemeter tunnel.

Tabell 12: VoF løsningene med mengder materialer og klimagassutslipp for materialer, transport og bygging

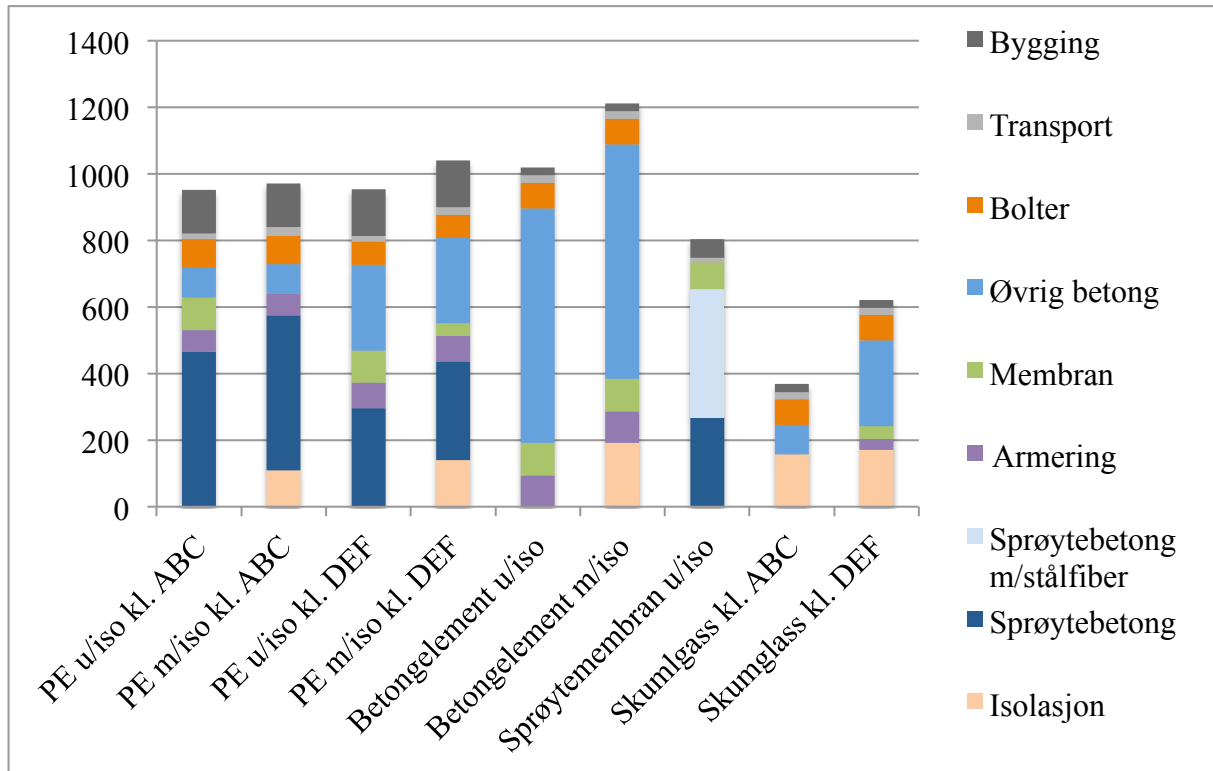
Løsning	Materiale	Mengde	CO <sub>2</sub> -ekv. materiale	CO <sub>2</sub> -ekv. transport	CO <sub>2</sub> -ekv. bygging
PE-skum uten isolasjon, med føringskant i betong Kalt PE u/iso kl. ABC	Sprøytebetong	1,975 m <sup>3</sup>	466	8,85	<b>131</b>
	Armering K131	19,75 m <sup>2</sup>	65	3,3	
	Bolter M16x1400	13,7stk	86	3,24	
	Betongkant	0,37 m <sup>3</sup>	88	1,90	
	Membran	20,75 m <sup>2</sup>	98	1,12	
	<b>Total</b>		<b>803</b>	<b>18,42</b>	
PE-skum med isolasjon, med føringskant i betong Kalt PE m/iso kl. ABC	PE-skum	1,40 m <sup>3</sup>	109	9,36	<b>131</b>
	Sprøytebetong	1,975 m <sup>3</sup>	466	8,85	
	Armering K131	19,75 m <sup>2</sup>	65	3,3	
	Bolter M16x1400	13,7 stk	86	3,24	
	Betongkant	0,37 m <sup>3</sup>	88	1,90	
	<b>Total</b>		<b>814</b>	<b>26,65</b>	
PE-skum uten isolasjon, med veggelementer av betong Kalt PE u/iso kl. DEF	Sprøytebetong	1,26 m <sup>3</sup>	296	5,62	<b>139</b>
	Armering	19,75 m <sup>2</sup>	76	3,85	
	Bolter M16x1400	6,7 stk	42	1,59	
	Bolter M33x2400	0,8 stk	27	1,00	
	Veggelementer	1,08 m <sup>3</sup>	257	5,14	
	Membran	20,75 m <sup>2</sup>	98	1,13	
	<b>Total</b>		<b>796</b>	<b>18,33</b>	
PE-skum med isolasjon, med veggelementer av betong Kalt PE m/iso kl. DEF	PE-skum	0,92 m <sup>3</sup>	71	6,11	<b>139</b>
	Sprøytebetong	1,23 m <sup>3</sup>	296	5,62	
	Armering	19,75 m <sup>2</sup>	76	3,85	
	Bolter M16x1400	6,7 stk	42	1,59	
	Bolter M33x2400	0,8 stk	27	1,00	
	Veggelementer	1,08 m <sup>3</sup>	257	5,14	
	Membran	8,0 m <sup>2</sup>	38	0,51	
	XPS isolasjon	0,36 m <sup>3</sup>	70	0,02	
	<b>Total</b>		<b>877</b>	<b>23,84</b>	
Betongelementer uten isolasjon Kalt betongelement u/iso	Betongelementer	2,96 m <sup>3</sup>	704	14,1	<b>24</b>
	Membran	20,75 m <sup>2</sup>	98	1,13	
	Bolter M24x2400	2,35stk	50	1,89	
	Bolter M33x2400	0,78 stk	27	1,00	
	Armering K189	19,75 m <sup>2</sup>	94	4,75	
	<b>Total</b>		<b>973</b>	<b>22,87</b>	
Betongelementer med isolasjon Kalt betongelement m/iso	Betongelementer	2,96 m <sup>3</sup>	704	14,1	
	Membran	20,75 m <sup>2</sup>	98	1,13	
	Bolter M24x2400	2,35 stk	50	1,89	
	Bolter M33x2400	0,78 stk	27	1,00	
	Armering K189	19,75 m <sup>2</sup>	94	4,75	

	XPS isolasjon	19,75 m <sup>2</sup>	192	0,06	
	<b>Total</b>		<b>1165</b>	<b>22,93</b>	<b>24</b>
Helstøpt hvelv	Sprøytebetong	3,95 m <sup>3</sup>	896	17,7	
	Membran	20,75 m <sup>2</sup>	98	1,13	
	Betongstøp	7,90 m <sup>3</sup>	1878	37,61	
	<b>Total</b>		<b>2972</b>	<b>56,44</b>	<b>340</b>
Sprøytbar membran uten isolasjon Kalt sprøytemembran u/iso	Sprøytebetong	1,19 m <sup>3</sup>	269	4,43	
	Sprøytemembran	0,08 m <sup>3</sup>	82	3,66	
	Sprøytebetong m/stålfiber	1,19 m <sup>3</sup>	384	5,38	
	<b>Total</b>		<b>735</b>	<b>13,47</b>	<b>33</b>
Foamrox skumglass med føringskant av betong Kalt skumglass kl. ABC	Skumglass	2,37 m <sup>3</sup>	157	17,8	
	Føringskant	0,37 m <sup>3</sup>	88	1,90	
	Bolter M24x2400	2,35 stk	50	1,89	
	Bolter M33x2400	0,78 stk	27	1,00	
	<b>Total</b>		<b>322</b>	<b>22,59</b>	<b>24</b>
Foamrox skumglass med veggelementer av betong Kalt skumglass kl. DEF	Skumglass	1,51 m <sup>3</sup>	100	11,33	
	Veggelementer	1,08 m <sup>3</sup>	257	5,36	
	Membran	8,0 m <sup>2</sup>	38	0,51	
	XPS isolasjon	0,36 m <sup>3</sup>	70	0,02	
	Armering	7,2 m <sup>2</sup>	34	1,73	
	Bolter M24x2400	2,35 stk	50	1,89	
	Bolter M33x2400	0,78 stk	27	1,00	
	<b>Total</b>		<b>576</b>	<b>21,84</b>	<b>24</b>



Figur 23: CO2-utslipp for alle VoF løsninger pr lengdemeter T9,5 tunnel

For å kunne se de ulike delene i diagrammet bedre er det samme diagrammet satt inn i figur 24 under uten stolpen for helstøpt hvelv. Mengde CO<sub>2</sub>-ekv. for de ulike delene kan også leses i tabell 12.



Figur 24: Samme som figur 23, uten VoF med helstøpt betonghvelv

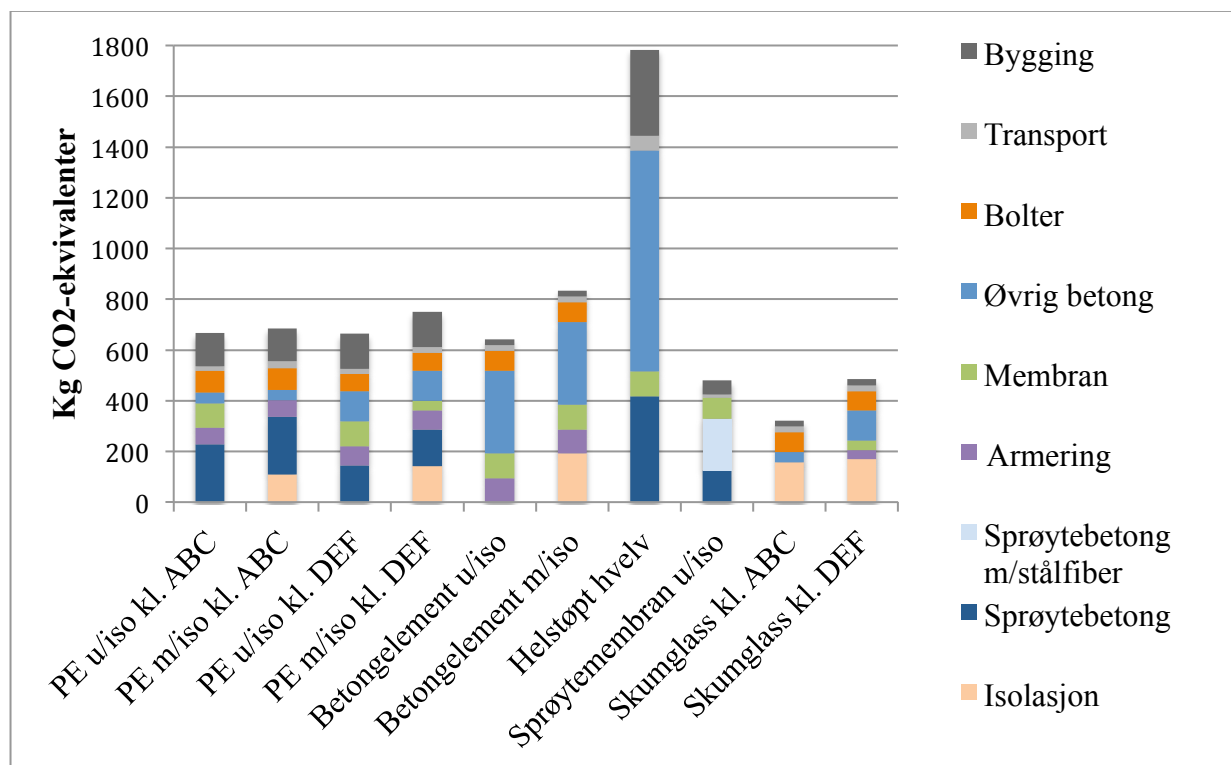
#### 4.2.1 Resultater for ulike typer betong

Siden det i Norge som nevnt er blitt vanlig å bruke CEM II i betongen, er det klimagassutslipp for slik betong det er regnet ut for i resultatene generelt. De øvrige materialene har samme verdier som i figur 23.

Her er det sett på tre ulike typer betong som er de aktuelle for Norge som forklart i teorien. Det er CEM I, CEM II og CEM III. Diagrammet for CEM II er det samme som diagrammet i figur 23.

#### Lavt betongtall

Her vises det til tall for betong med CEM III som beskrevet i teorien. Denne betongen er som sagt ikke mye brukt i Norge.

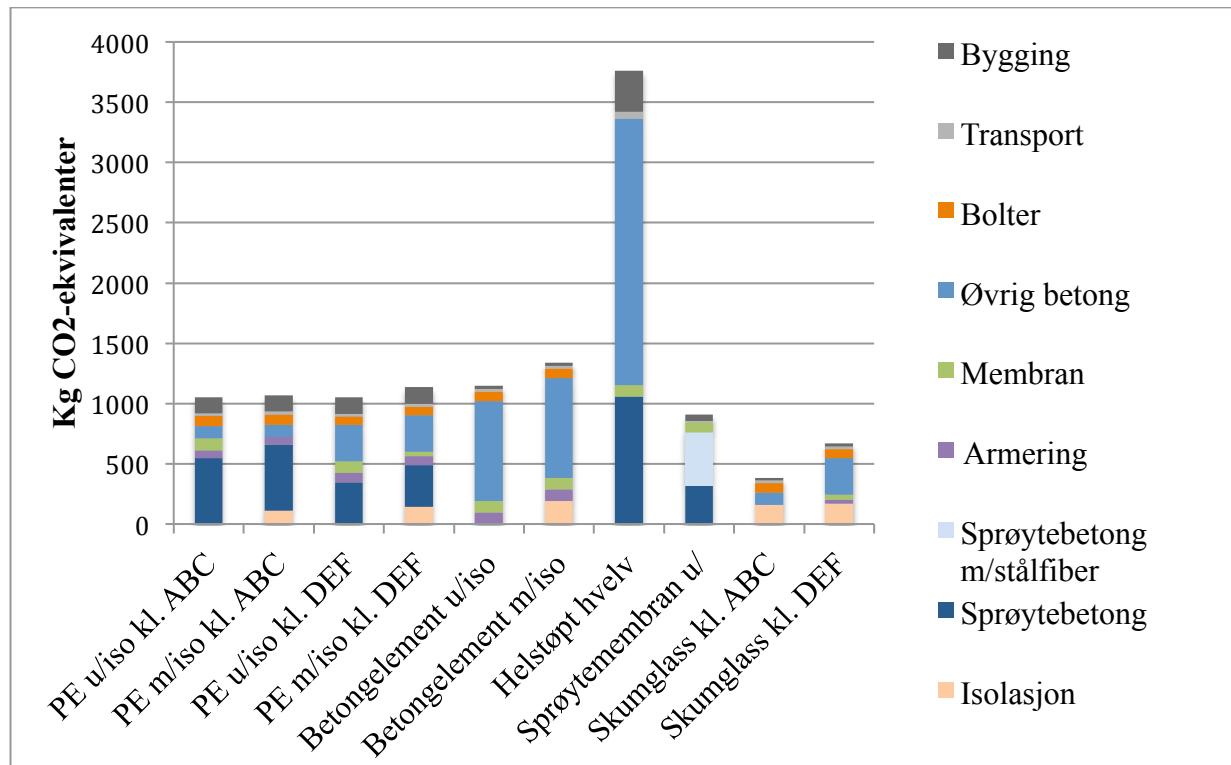


Figur 25: Utslipp av CO<sub>2</sub>-ekv. for betong CEM III for de ulike løsningene



## Høyt betongtall

Her er det brukt tall for betong med portlandsement CEM I og grunnet store mengder klinker i sementen har betongen høyt klimagassutslipp.



Figur 26: Utslipp av CO<sub>2</sub>-ekv for betong CEM I for de ulike løsningene

Hvordan mengden CO<sub>2</sub>-ekv på en løsning endres fra CEM II til CEM I og fra CEM II til CEM III er vist i tabell 13. Andre kolonne er hvor mye CO<sub>2</sub>-ekv løsningene slipper ut med vanlig CEM II betong, det vil si diagrammet i figur 23 i tall totalt. Kolonne tre og fire viser økningen/minkingen som endringen av type betong gjør for løsningen.

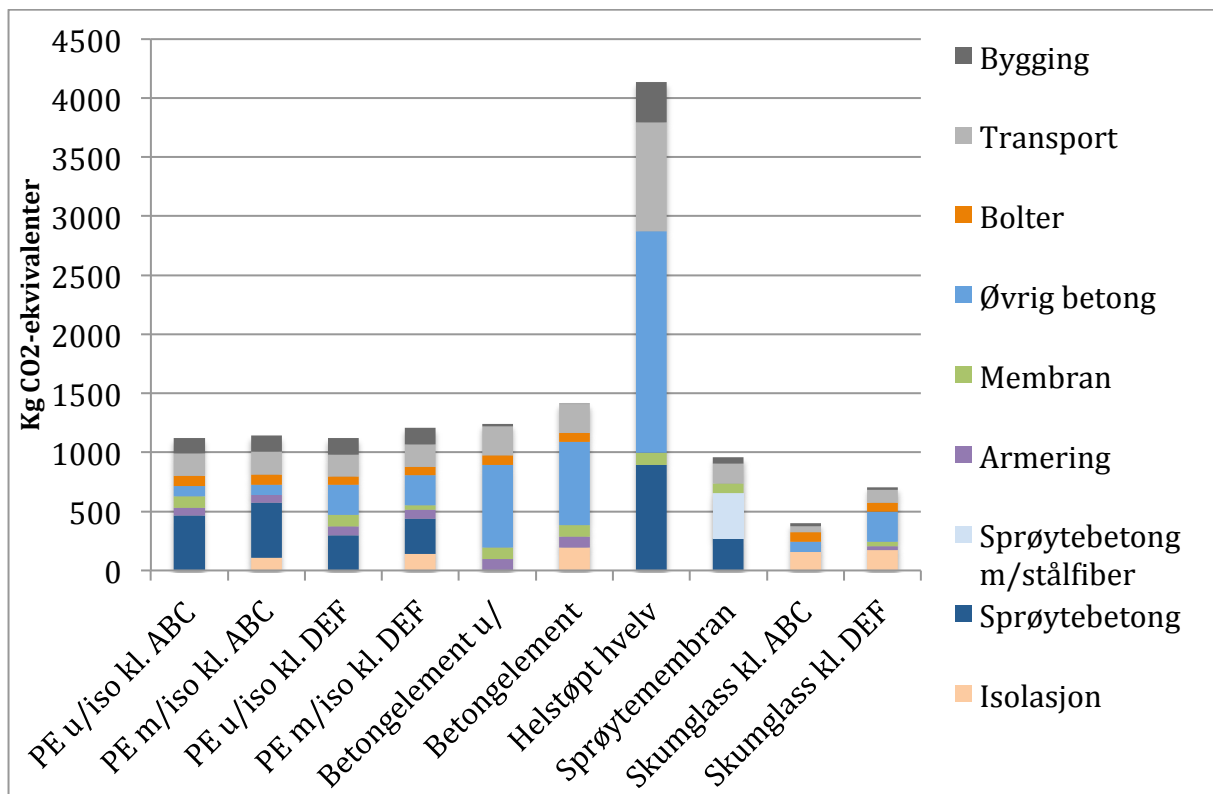
Tabell 13: Endring i betongutslipp for VoF løsningene

VoF løsning	Vanlig løsning med CEM II betong	Økning i CO <sub>2</sub> -ekv fra CEM II til CEM I	Minking i CO <sub>2</sub> -ekv fra CEM II til CEM III
PE-skum u/iso kl. ABC	953	97	286
PE-skum m/iso kl. ABC	972	97	286
PE-skum u/iso kl. DEF	953	97	289
PE-skum m/iso kl. DEF	1040	97	289
Betongelementer u/iso	1020	125	377
Betongelementer m/iso	1212	125	377
Helstøpt hvelv	3268	494	1485
Sprøytemembran u/iso	803	107	324
Skumglass kl. ABC	369	16	47
Skumglass kl. DEF	552	46	138

Totalt CO<sub>2</sub>-utslipp kan i verste fall øke med 15% for helstøpt hvelv og i beste fall øke med 4% for løsningen med skumglass for tunnelklasser A, B og C når betongen CEM II byttes ut med betong CEM I. Gjennomsnittlig økning for alle løsningene er på 10%. Ved å bytte fra betong CEM II til betong CEM III kan utslippet av CO<sub>2</sub>-ekv reduseres med maksimalt 45% for helstøpt løsning og minimalt 13% for løsningen med skumglass for tunnelklasse A, B og C. Gjennomsnittlig reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp for alle løsninger er på 31% når man går fra CEM II betong til CEM III betong.

#### 4.2.2 Lengre transportavstander

Siden det er mange betongprodusenter i Norge kan det som regel velges en betongprodusent som ligger i god nærhet av byggeplass og i de andre utregningene er transportavstanden satt til 12 km. Hvis man derimot velger en betongleverandør langt unna byggeplassen av grunner som for eksempel lavere pris vil utslippet av CO<sub>2</sub>-ekv. øke med avstanden. Hvis man også velger en betongleverandør i utlandet kan det være betongen i seg selv slipper ut mer CO<sub>2</sub>-ekv. enn norsk betong da gjennomsnittet for CO<sub>2</sub>-utslipp på betong i Europa er høyere enn i Norge ifølge tallene fra SVV. Det er valgt å sette inn en avstand for betong på 200km for å se hva det gjør med resultatene.



Figur 27: CO<sub>2</sub>-utslipp med 200km transportavstand for betong

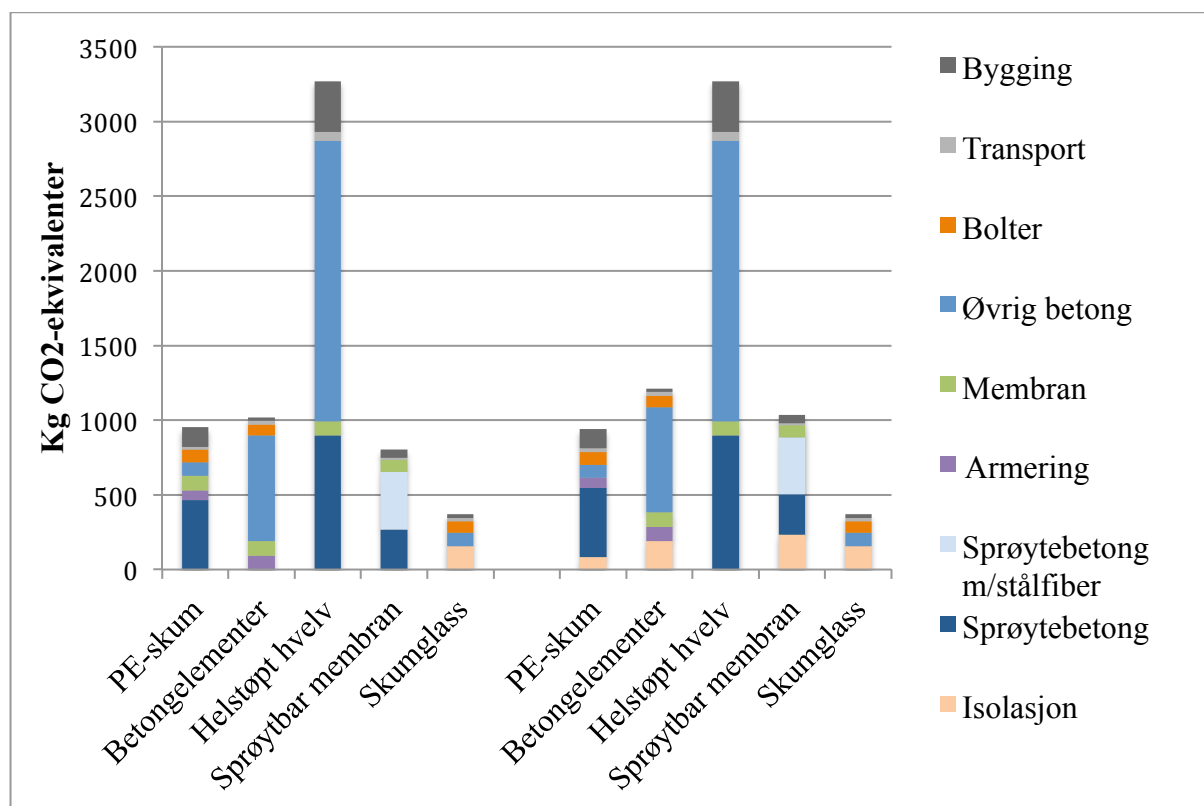
Fra diagrammet i figur 27 er det tydelig at økningen har en innvirkning på totalt CO<sub>2</sub>-utslipp. Der transportavstanden for betong er 12km ser man nesten ikke det grå feltet i diagrammet, men det er betraktelig større for en avstand på 200km.

Det er ikke sett på endring av transportavstand for de andre materialene fordi de fleste allerede har høy transportavstand og det er ikke sannsynlig at denne vil være betydelig mye høyere. For eksempel er armeringen i betongelementer satt til en transportavstand på 475km som utgjør 4,75 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Materialene utenom betongen veier til sammen heller ikke så mye og vil utgjøre lite siden transporten måles i tonn kilometer. Hvis man for eksempel setter kjøreavstanden til armeringen i betongelementene tilsvarende kjøreavstanden Kristiansand – Nordkapp vil den kun øke til 24 kg CO<sub>2</sub>-ekv, mens transport av betongen i betongelementmetoden på 200 km utgjør 235 kg CO<sub>2</sub>-ekv.

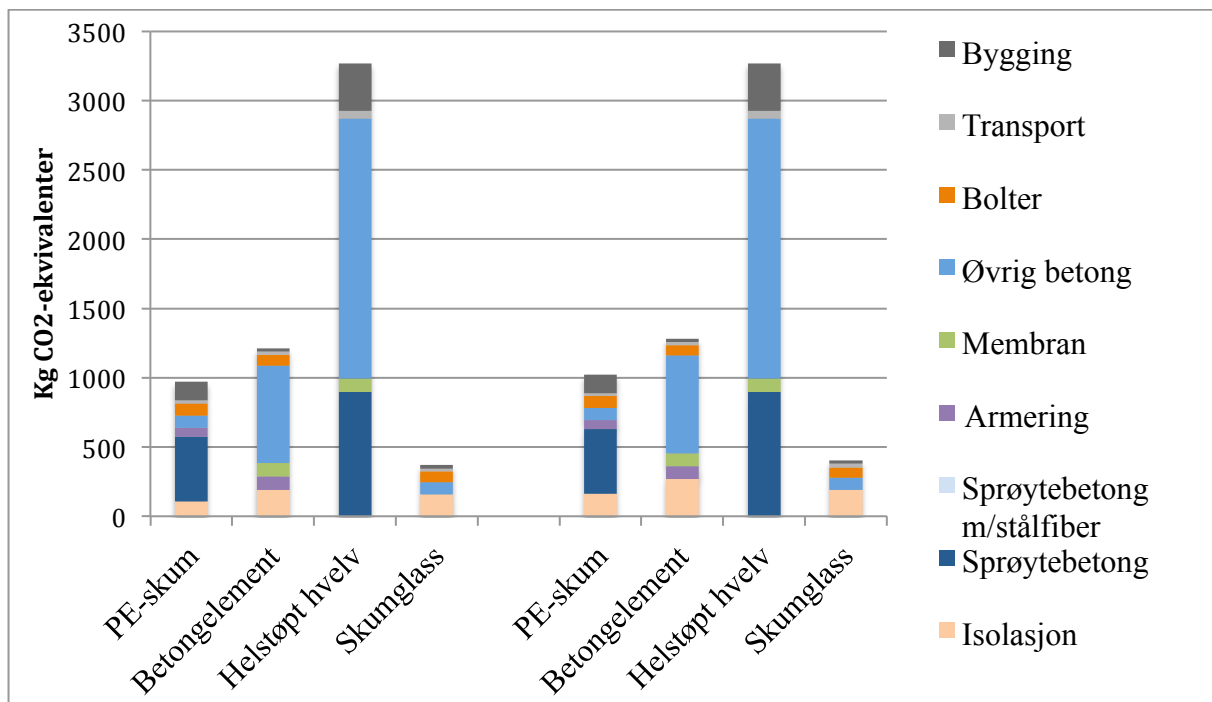
### 4.2.3 Estimat for tunnelklasse A, B og C ved ulike frostmengder

Fra tabell 2 i teoridelen ser vi at PE-skum med nettarmert sprøytebetong og føringskant av betong er hovedløsningen. For tunnelklasse C kan også kontaktstøpt tunnelhvelv og hvelv av betongelementer brukes. Den nye metoden med sprøytbar membran blir også tatt med selv om den ikke er godkjent av SVV, men her er den bare tatt med for frostmengde under 10 000 h°C fordi metoden ikke egner seg for store frostmengder som forklart i teorien. Her er det i tillegg satt inn løsningen med Foamrox skumglass, selv om denne ikke er godkjent i dag. For Foamrox må man ha 100mm tykkelse og dette vil isolere like godt som 74mm PE-skum siden Foamrox har en varmekonduktivitet på 0,058W/mK og PE-skum har en varmekonduktivitet på 0,043W/mK (IBU 2017) (Statens vegvesen 2016a). For å oppnå like god isolering som PE-skum på over 30 000 h°C frostmengde må tykkelsen på Foamrox være 120mm, kontra 90mm for PE-skum.

På løsningen med nettarmert sprøytebetong og PE-skum der frostmengden er under 8 000 h°C er det ikke PE-skum, men i stedet en membran bak sprøytebetongen og veggelementene som festes av bolter til berget. Det er her antatt lik mengde bolter som for løsningen med PE-skum.



Figur 28: Løsningene i tunnelklasse A, B og C uten isolering med frostmengde opp til 8 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde opp til 10 000 h°C til høyre.



Figur 29: Løsningene i tunnelklasse A, B og C med isolering med frostmengde opp til 20 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde over 30 000 h°C til høyre.

For PE-skum øker antall kg CO<sub>2</sub>-ekv. med 82 fra inntil 10 000 h°C til over 30 000 h°C i frostmengde, den samme økningen skjer fra uisolert løsning uten PE-skum til 45mm PE-skum isolert løsning, men her må man ha membran i den uisolerte løsningen og klimagassutslipp fra dette materialet gjør at uisolert løsning totalt sett slipper ut litt mer enn den isolerte løsningen, men kun 10 kg CO<sub>2</sub>-ekv. mer. Her er det ikke endret på utslipp i forbindelse med bygging av løsningen og det kan være denne minker når man ikke behøver å sette opp PE-skummet, men i stedet må sette opp membran.

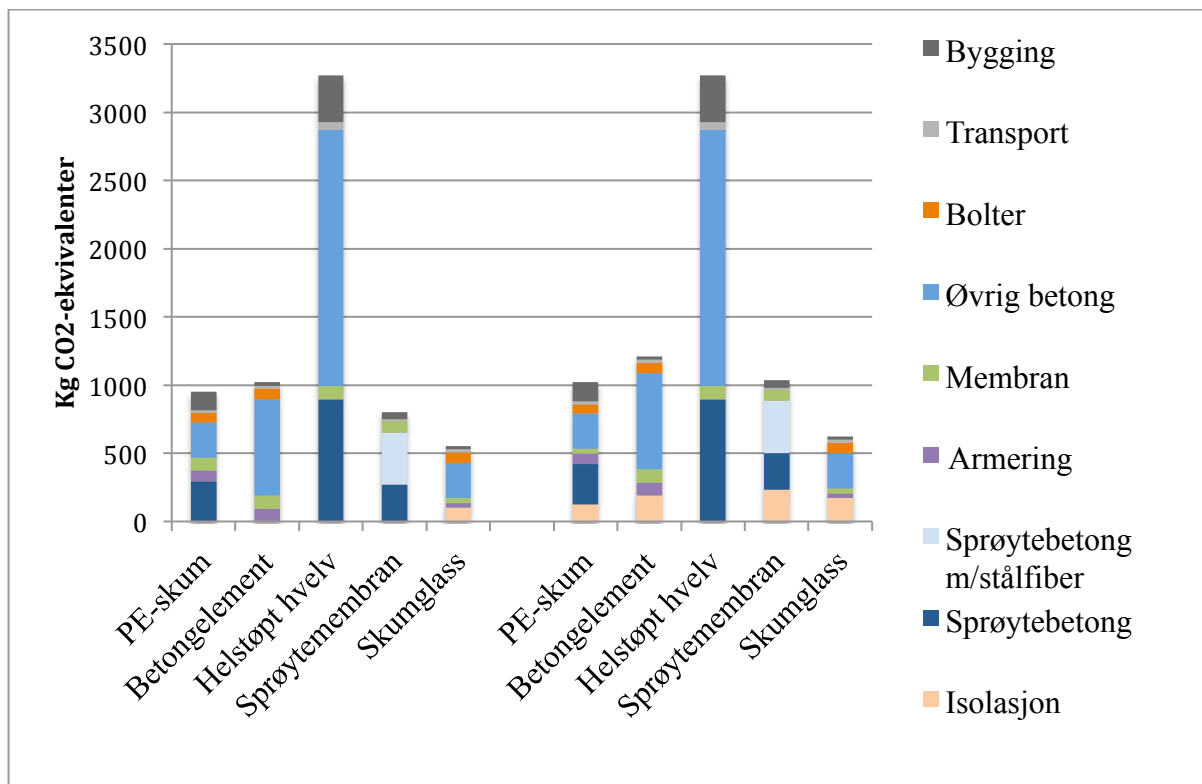
Økningen fra uisolerte betongelementer til 50 mm isolert løsning som tåler opp til 10 000 h°C frostmengde er på 192 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Det tilsvarer en økning på 21 % fra uisolert løsning. Økning fra 10 000 h°C til over 30 000 h°C i frostmengde tilsvarer en økning på 76 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Det tilsvarer en økning av CO<sub>2</sub>-ekv. på 6 % fra 50 mm isolering.

Løsningen for helstøpt hvelv er den samme i alle tunnelklasser og alle frostmengder og fører til betydelig mer CO<sub>2</sub>-utslipp enn de andre løsningene.

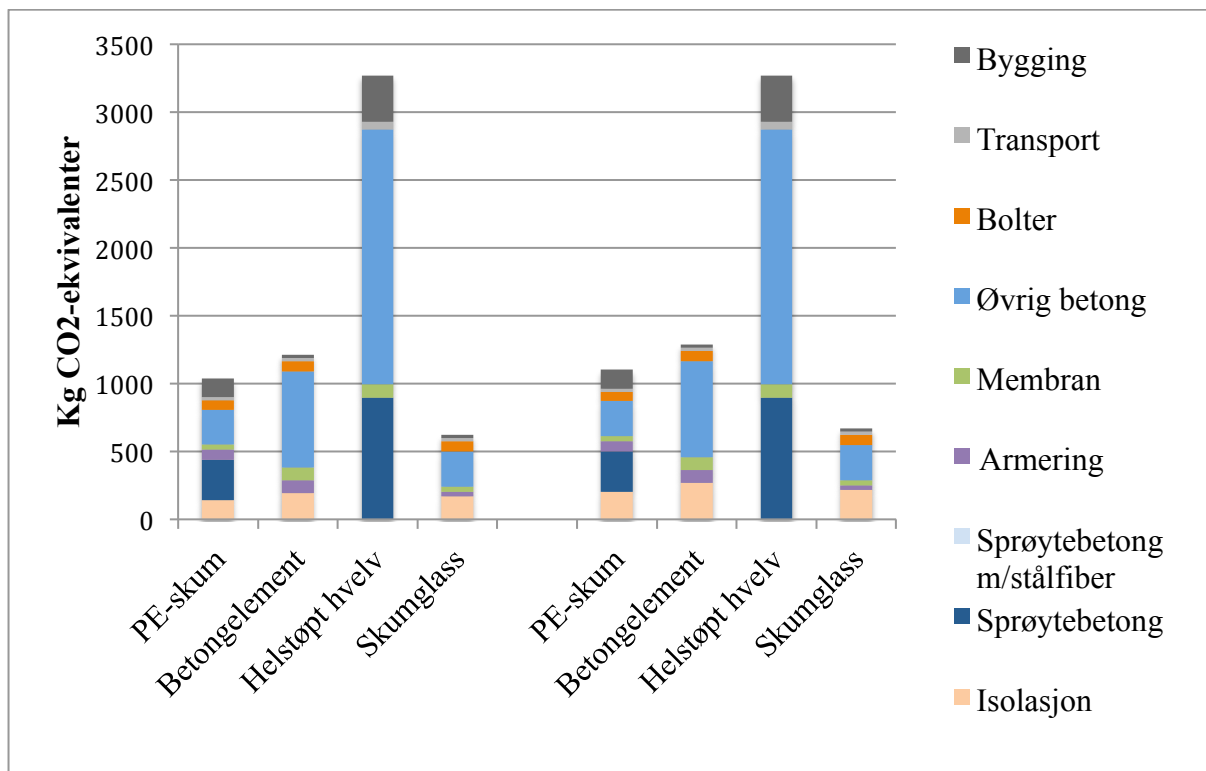
Hvis vi ser bort ifra løsningen med skumglass som tydelig er suveren i alle frostmengder ser vi at løsningen med sprøytbar membran slipper ut minst CO<sub>2</sub>-ekv. pr lengdemeter bygget tunnel for uisolerte løsninger. For løsninger som krever isolasjon er det PE-skum som kommer best ut når det gjelder CO<sub>2</sub>-utslipp pr lengdemeter tunnel bygget. Levetiden er ikke medregnet.

#### 4.2.4 Estimat for tunnelklasse D, E og F for ulike frostmengder

Fra tabell 2 i teoridelen kommer det fram at hvelv av betongelementer er hovedløsningen for tunneler i klassene D, E og F. Man kan også bruke helstøpt hvelv, og PE-skum løsningen, men da med veggelementer av betong og med XPS isolasjon bak veggelementene. Sprøytbar membran kan i prinsippet også brukes selv om SVV ikke har godkjent den, men kun ved lave frostmengder. For metoden med skumglass er det antatt at denne også må ha veggelementer av betong og XPS isolasjon bak elementene der isolasjon er nødvendig i likhet med PE-skumløsningen.



Figur 30: Løsningene i tunnelklasse D, E og F uten isolering med frostmengde opp til 8 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde opp til 10 000 h°C til høyre.



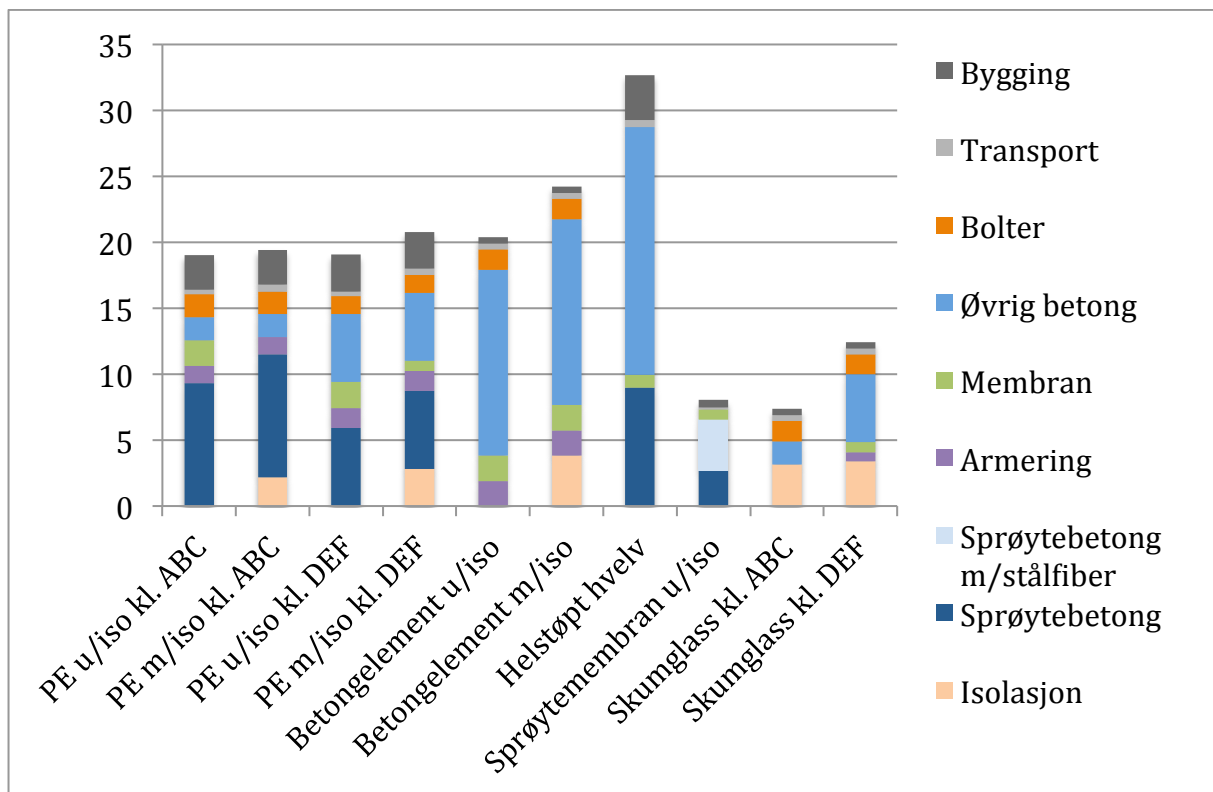
Figur 31: Løsningene i tunnelklasse D, E og F med isolering med frostmengde opp til 20 000 h°C til venstre og isolerte løsninger med frostmengde over 30 000 h°C til høyre.

I likhet med tunnelklasse A, B og C er skumglass den løsningen som slipper ut minst CO<sub>2</sub>-ekv. per tunnelmeter når et tidsperspektiv ikke tas med. Det er også her sprøytebetong som kommer best ut i den uisolerte løsningen og for løsningen opp til 10 000 h°C frostmengde når man ser bort ifra skumglass. For de høyere tunnelklassene er PE-skum løsningen og løsningen med betongelementer mer like i CO<sub>2</sub>-utslipp enn for lavere tunnelklasser som ikke har krav om vegglementer i betong. Selv om det brukes mindre tykkelse på isolasjon for XPS enn PE-skum ved høyere frostmengde kommer PE-skummet bedre ut fordi det har en lavere mengde CO<sub>2</sub>-utslipp per kubikk av materialet enn det XPS isolasjon har.

Løsningen med betongelementer er lik i alle tunnelklasser og det er kun tykkelsen på isolasjon som endrer seg ved endret frostmengde.

#### 4.2.5 Levetid

De 10 løsningene fra kapittel 4.2 er det sett videre på her satt i sammenheng med levetid for de ulike løsningene. Først blir CO<sub>2</sub>-utslipp fra alle de 10 løsningene delt på antall år de dimensjoneres til å leve. Dette er 50 år for PE-skum løsningen og betongelementløsningen og 100 år for de tre andre. For sprøytbar membran gjelder dette når membranen ikke utsettes for mer enn -3 grader celsius og for Foamrox skumglass er det antatt over 100 års levetid etter tester gjort på materialet. Siden Foamrox bygges med bolter er det valgt å sette levetiden for løsningen på 50 år på grunn av levetid for bolter, som beskrevet i teorien er det mulig å oppnå lengre levetid ved å bruke bedre bolter. Alle levetidene vil avhenge av lokale forhold og blant annet valg av bolter.



Figur 32: Utslipp CO<sub>2</sub>-ekv. fordelt på dimensjonert levetid

Siden levetiden på vann- og frostsikringsløsningene er såpass usikre er det valgt å se på hvor lenge de ulike løsningene må leve for å være ”like god” som løsningen helstøpt hvelv. Det vil si at hvis de har en antatt levetid på mer enn levetiden i tabell 14 er det mer lønnsomt klimamessig når man ser på klimagasser å velge denne fremfor helstøpt hvelv. Eventuell drift, vedlikehold og rivning av VoF er ikke medregnet.

Tabell 14: Levetider for løsningene som skal til for å oppnå likt utslipp CO<sub>2</sub>-ekv. fordelt på levetid



som helstøpt hvelv med levetid 100 år

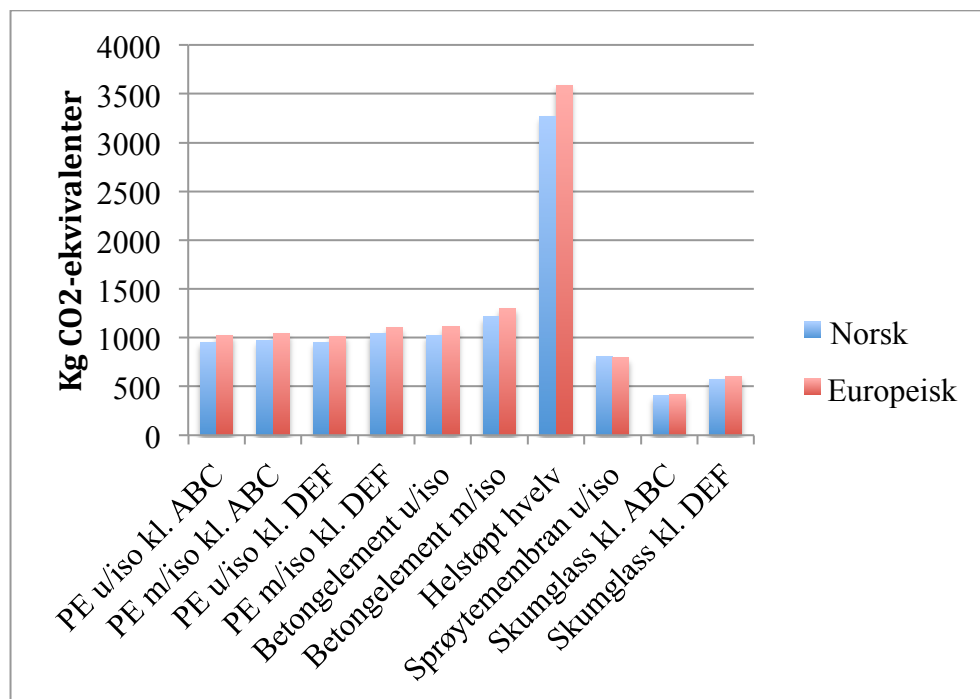
Løsning	Levetid i år	Løsning	Levetid i år
PE-skum uten isolasjon, tunnelklasse ABC	29,2	Betongelementer med isolasjon	37,1
PE-skum med isolasjon tunnelklasse ABC	29,8	Helstøpt hvelv	100
PE-skum uten isolasjon, tunnelklasse DEF	29,2	Sprøytemembran uten isolasjon	24,6
PE-skum med isolasjon tunnelklasse DEF	31,8	Skumglass tunnelklasse ABC	11,3
Betongelementer uten isolasjon	30,3	Skumglass tunnelklasse DEF	16,9

Som man ser fra tabell 14 trenger PE-skum med isolasjon og veggelementer av betong kun å leve i 32 år for å slippe ut like mye klimagasser fordelt på leveår som helstøpt hvelv som lever i 100 år. For at løsningen med helstøpt hvelv skal være like god som løsningen med PE-skum med isolasjon og veggelementer av betong som lever i 50 år, må løsningen helstøpt betong leve i 160 år. Merk for øvrig at ingen form for avkastning og evt. betongkarbonatisering over livsløp er medregnet her.

#### 4.2.6 Andre betraktninger

I tillegg til selve byggingen er det sett på utslipp i forbindelse med at arbeidere reiser langt ut til anlegget. Det er da regnet på to flyturer i uken med en reiseavstand tilsvarende Bergen – Oslo (Lånkan 2015). Utslippene for å fly opp og ned 16 personer hver uke fordelt på antall meter VoF som produseres hver uke ble kun 11 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Hvordan mannskap transporteres har altså lite å si for totalen CO<sub>2</sub>-ekv. Dette er et eksempel på hvor mange arbeidere som er nødvendig for løsningen som krever størst mannskap når den bygges, nemlig PE-skum løsningene.

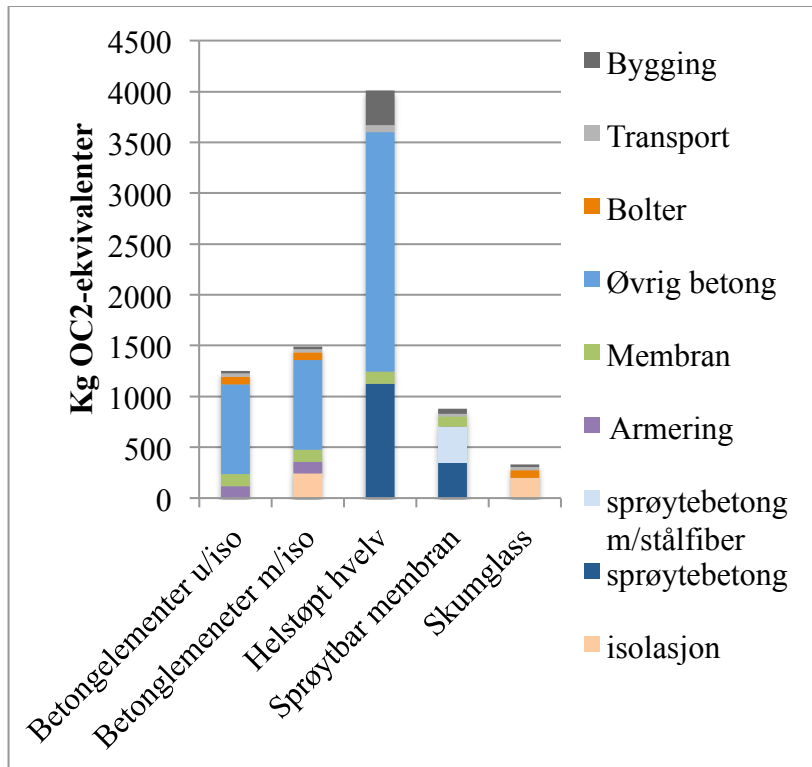
Det er også sett på forskjellene mellom norske og europeiske gjennomsnittsdata som er hentet fra verktøyet til SVV. Betongen er beregnet til å slippe ut litt mer klimagasser i Europa enn i Norge, men forskjellene er ikke store og forskjellene i totalt utslipp for de ulike VoF kan ses i diagrammet under.



Figur 33: Forskjeller i utslipp for løsningene fra norske og europeiske gjennomsnittsdata

### 4.3 Jernbane

For jernbanetunneler er som nevnt ikke PE-skum lengre brukt og det gjenstår da 5 løsninger siden det ikke skiller mellom tunnelklasser for skumglass løsningen i jernbanetunneler. De 5 løsningene og deres utslipp for en jernbanetunnel med dobbeltspor er illustrert i diagrammet i figur 34.



Figur 34: utslipp CO2-ekv. for dobbeltsporet jernbanetunnel for VoF løsningene for jernbane

Det er ikke krav om føringskant i betong eller veggelementer for tunnelene siden det i jernbanetunneler vil være mye mindre sannsynlig med påkjørsel av veggene i tunnelen enn for veitunneler og derfor blir ikke dette tatt med i løsningen med skumglass. Resultatene er ganske like som for veitunneler for disse løsningene og det er bare størrelsen på tverrsnittet i tunnelen og at føringskant i betong ikke er nødvendig som skiller disse resultatene fra resultatene for veitunnel i klasse A, B og C. For en veitunnel T9,5 er lengden på tunnelbuen 19,75m og for en dobbeltsporet jernbanetunnel er buen 24,80m. Det vises dermed til resultatene for veitunnel klasse A, B og C for endring i betong, transport, levetid og frost. Prosentvis vil de ha samme resultat.

## 5 Diskusjon

### 5.1 LCA

Det er i hovedsak verktøyet som Asplan Viak har utviklet for Statens Vegvesen som brukes i denne oppgaven. Dette er et verktøy som ble utviklet i 2015 og som blant annet er brukt til å regne på miljøbetraktninger i Eiganestunnelen. Ulempen med disse dataene er at dokumentasjonen på hvor tallene kommer fra ikke er fullstendig og det er derfor vanskelig å vurdere hvor gode de er. På den andre siden er det et respektert firma som har utviklet verktøyet og det er høyst sannsynlig at disse tallene er mer korrekte enn verdier for klimagassutslipp regnet ut ved bruk av kun Ecoinvent og Arda. Dette ble for øvrig gjort høsten 2017 i en prosjektoppgave (Nilsen 2017) og det var vanskelig å vite hvilke input som var de riktige for de ulike materialene og dermed ble resultatene usikre.

Når det gjelder betong spesielt er det mange forskjellige tall for klimagassutslipp fra betong og verdiene fra SVVs verktøy er lave i forhold til det som er bransjens gjennomsnittstall. For den ”verste” betongen CEM I som er brukt i resultatene og som kommer fra SVVs LCA verktøy er utslippet 280 kg CO<sub>2</sub>-ekv pr m<sup>3</sup>, mens bransjereferansen for betong er 420 kg CO<sub>2</sub>-ekv. pr m<sup>3</sup> og for den beste betongen i lavkarbonklasse A er gjennomsnittet 240 kg CO<sub>2</sub>-ekv. pr m<sup>3</sup> (Smeplass 2015). Dette gjelder B45 betong.

Det kan altså være at utslippet fra betong bør være høyere enn det resultatene viser. Det vil derimot ikke ha så mye å si for resultatene. Som kan ses fra resultatene på endring av betong er det samme rekkefølge på hvilke løsninger som er mest/minst fordelaktig med CEM I som for CEM III med hensyn til CO<sub>2</sub>-ekv. Den eneste forskjellen er at løsningene med isolasjon kommer dårligere ut med CEM III fordi isolasjonen får mer å si for totalen klimagasser. Hvis en går fra CEM II til CEM I er det ingen forskjell i rekkefølge på de 10 løsningene og en større økning i klimagassutslipp for betong pr m<sup>3</sup> vil heller ikke endre denne rekkefølgen. Konklusjonene i denne oppgaven om hvilken løsning som er best/verst i forbindelse med utslipp av klimagasser vil derfor være det samme uansett når det gjelder betongen som brukes i Norge i dag.

## **5.2 Diskusjon av resultatene**

### **5.2.1 Transport**

Det er valgt å sette inn samme type transport for alle materialer bortsett fra PE-skum, en EURO4 lastebil som kan frakte mellom 16-32 tonn. PE-skummet er satt til å bli fraktet av en EURO4 lastebil som kan laste 3,5-7,5 tonn fordi det er så mye lettere enn de andre materialene. Det vil mest sannsynlig variere veldig hvilke transportalternativer som brukes fra prosjekt til prosjekt og disse valgene vil ha en stor innvirkning på hvor store utslipp transporten utgjør. Hvis mye av transporten gjøres over vann eller via jernbane blir utslippene lavere og hvis det benyttes mindre lastebiler som for eksempel kan frakte opp til 7,5 tonn som den PE-skummet blir fraktet av blir utslippene større. Det er ikke regnet spesielt på hvor stort volum ulike materialer bruker og hvilken type lastebil som vil være aktuell for ulike materialer. Men siden PE-skum er såpass lett er det valgt en annen lastebil for dette materialet, den som kan frakte minst av EURO4 lastebilene i databasen Ecoinvent. XPS isolasjon er også lett, men er allerede festet til betongelementene og fraktes derfor med betongen. Det kan være andre materialer som for eksempel bolter hvor man kan bruke lastebiler som kan frakte mer enn 32 tonn og dermed slippe ut mindre CO<sub>2</sub>-ekv. for transport av tunge materialer, men dette er det ikke tatt hensyn til og det antas at frakten av materialene totalt utjevner hverandre slik at en lastebil EURO4 16-32 tonn gir et godt estimat på transporten.

Transportavstanden på 12 km for betong er valgt med bakgrunn i at det er ganske tett om betongleverandørene der det i dag finnes flest tunneler, ref. figur 2-7. Hvis man skal bygge tunnel i Nord-Norge er det færre betongleverandører og transportavstanden må mest sannsynlig oppskaleres, muligens opp imot 200km som vist i resultatene. For å redusere transportutslippene her bør man se på alternative transportter som sjøtransport.

For de andre materialene er det i hovedsak brukt lange avstander for transporten. Avstanden på de fleste andre materialer er satt til 475 km. Som nevnt i resultatdelen er det ikke så nødvendig å gjøre endringer på disse fordi de vil ha lite utslag i forhold til betongen.

### **5.2.2 Frostmengde i tunnel**

Fra resultatene ser man at hvor høy frostmengde det er i tunnelen har lite å si for hvor store klimagassutslippene er fordi isoleringsmaterialene slipper ut lite CO<sub>2</sub>-ekv. i forhold til totalt

klimagassutslipp for løsningene. Den største endringen er at løsningen sprøytbar membran ikke kan brukes ved høye frostmengder.

### **5.2.3 Tunnelklasse**

Når man ser på resultatene for de ulike tunnelklassene, her inndelt i klasse A, B, C og klasse D, E, F ser man at forskjellen i klimagassutslipp ikke er så stor. Forskjellen for noen løsninger er at man må ha veggelementer i stedet for en føringskant i betong, men ellers er de like. Denne forskjellen fører ikke med seg store endringer i klimagassutslipp og hvilken tunnelklasse det skal prosjekteres for har altså lite å si for hvor stort klimagassutslippet er for VoF.

### **5.2.4 Mest uheldige løsning med hensyn til klimagasser**

Løsningen helstøpt hvelv kommer klart dårligst ut i alle resultater. Den slipper ut mest CO<sub>2</sub> totalt pr lengdemeter tunnel. Den kommer litt bedre ut av det når utslippet fordeles over en levetid på 100 år, men er fortsatt dårligst av de 10 løsningene. Man kunne argumentert for at det kan være mulig å bruke mindre sprøytebetong for avjevning av tunnelhvelvet, men betongtykkelsen vil fortsatt være minst tre ganger så stor som for PE-skum løsningen og dobbelt så stor som betongelementene. Med mindre denne løsningen holder i opp mot 200 år er det ikke funnet noen grunner til å bruke denne løsningen fremfor andre løsninger gjennom dette studiet i forbindelse med klimagassutslipp. En annen faktor som bør vurderes er usikkerheten i fremtiden. Det kan hende tunnelen som bygges ikke brukes om 50 år, eller at den brukes i 200 år, men at man om 50 år finner en helt ny grønn løsning for VoF slik at det å bruke mye betong og slippe ut store mengder CO<sub>2</sub>-ekv. i dag ikke lønner seg, men at det heller lønner seg å gå for en løsning som ikke varer så lenge, som slipper ut mindre CO<sub>2</sub>-ekv. og som kan byttes i en mer miljøvennlig løsning når den er utslitt om 40-50 år. Dette er selvfølgelig gitt at Norge fortsetter å forske på nye miljøvennlige metoder for å lage VoF og ved at sementindustrien fortsetter å jobbe mot grønn sementproduksjon.

Man kan argumentere for at hyppigere utskifting av VoF fører til kostnader for samfunnet. Dette regnestykket har det ikke blitt sett på. Det at trafikken må ta en omkjøring og tidvis stå i kø i noen uker eller den tiden det tar å lage ny VoF vil nok koste samfunnet mye, men ha lite å si for klimagassutslipp. Ifølge regjeringen skal i tillegg alle nye personbiler, varebiler, busser, være nullutslippskjøretøy eller bruke biogass(bybuss) innen 2030 slik at utslipp i forbindelse med kø ikke vil være et direkte problem når VoF som bygges i dag skiftes ut om 40-50 år (Regjeringen 2017).

### **5.2.5 Mest heldige løsning med hensyn til klimagasser**

Løsningen som kommer best ut er Foamrox skumglass. Dette er et lett materiale som slipper ut veldig lite CO<sub>2</sub>-ekv. i produksjonen og som er estimert til å leve lenge. Denne løsningen er for øvrig ikke godkjent av SVV eller Bane NOR, men det er en løsning som burde prøves ut i tunnel. I følge utvikler Rolf Jakobsen kan materialet erstatte både betongelementer og PE-skum løsningene. Den nest beste løsningen er sprøytbar membran som er godkjent for bruk i jernbanetunneler. Denne løsningen bruker lite betong og få andre komponenter som spiller inn i klimagassutslippet. Ulempen med denne løsningen er at sprøytemembranen må sprøytes på en tørr overflate og det kan derfor være nødvendig med mer betong for å gjøre overflaten helt fri for vannlekkasjer.

### **5.2.6 Variasjonen i mengde for noen løsninger**

For løsningen helstøpt hvelv og sprøytbar membran vil mengden sprøytebetong til avjevning variere. For helstøpt hvelv avhenger det av hvor god kontur tunnelhvelvet har etter sprengning. For helstøpt hvelv er det anslått 0,2m tykkelse for avjevning før membranen festes på og denne avjevningen er kun for å gjøre tunnelhvelvet jevnt nok for å feste membran. Det er altså teoretisk mulig å fjerne dette betonglaget hvis konturen i tunnelhvelvet er god nok. For løsningen med sprøytbar membran er det ikke krav om så god kontur før membranen påføres, men det kreves en overflate uten rennende vann for at den sprøytebare membranen skal feste seg. Det kan derfor være mulig å bruke denne med veldig lite sprøytebetong før membran hvis tunnelen befinner seg i et område uten rennende vann inn i tunnelhvelvet og med lite frost. Men hva skal man med vann- og frostsikring hvis det ikke er vann- og frost i tunnelen. Det kan for eksempel være områder med periodevis mye vann hvor man i perioder med lite vann utfører bygging av denne typen VoF. Siden grunnvannstanden i Norge generelt sett er veldig høy vil det nok i de fleste tilfeller være nødvendig med betong før sprøytemembran for å holde vannet ute når membranen tørker.

### **5.2.7 Betong vs. skumglass**

Man kan begrunne valget med å fortsette med betong fordi Norges sementprodusent Norcem har en visjon om at utslippet av CO<sub>2</sub>-ekv. skal være lik null i løpet av produktens levetid innen 2030 på grunn av blant annet karbonfangst og medregnet karbonatisering (Norcem 2014). Uavhengig om dette er realistisk eller ikke, er det ganske sikkert at betong i andre deler av verden ikke vil bli like klimavennlig like fort. Derfor kan det være bra for mindre teknologisk utviklede land at Norge går foran med et nytt produkt som kan brukes som VoF

slik at betongforbruket går ned og heller øker igjen når/hvis sementen blir ”klimagassfri”. Det kan være det finnes andre materialer som har potensial til å bli brukt som VoF som ikke er blitt prøvd før og som ikke er inkludert i dette studiet, og disse bør i likhet med Foamrox undersøkes.

### **5.2.8 Betongelementhvelv og PE-skum løsningene**

Betongelementhvelv og PE-skum med sprøytemembran og veggelementer eller føringskant er løsningene som er mest brukt av SVV i dag. Disse løsningene kommer ut ganske likt når det gjelder klimagassutslipp, de kommer verken best eller verst ut i resultatene. Betongelement løsningen kommer litt dårligere ut enn PE-skum løsningene. Siden SVV som nevnt ikke ønsker å bruke sprøytebar membran og siden det sannsynligvis tar litt tid før Foamrox eventuelt kommer inn på markedet for VoF vil det ifølge dette studiet være best at SVV fortsetter med disse løsningene med hensyn til klimagassutslipp frem til godkjenning av en grønnere VoF løsning.

### **5.2.9 Dieselfri byggeplass**

Det utvikles stadig mer miljøvennlige kjøretøy og i anleggsbransjen er elektriske maskiner på vei inn. Det er ikke sett på hvilke utslippsbesparelser en overgang til helt elektrisk anleggspark fører til, men hvis man ser bort ifra livsløpet til maskinene i seg selv, slik det ble gjort for maskinene som går på diesel, vil man kunne spare en god del av utslippet fra bygging og transport. Man må i så fall ha tilgang på elektrisitet fra det norske nettet på byggeplassen. Man vil maksimalt spare 16% av totalt utslipp for PE-skum løsningen med veggelementer. For helstøpt betong kan man maksimalt spare 2% av totalt utslipp CO<sub>2</sub>-ekv. For de andre løsningene ligger maksimal besparelse et sted mellom disse tallene. Det er da antatt at utslippene fra både transport til byggeplass og bygging er neglisjerbare, bortsett fra bygging av helstøpt betonghvelv som allerede går hovedsakelig på strøm. Om utslippene blir så lave at de er neglisjerbare er ikke mulig å si uten en grundig studie på dette og det er ikke blitt gjort i denne sammenheng. Disse miljøbesparelsene vil uansett ikke alene kunne oppnå kravet om 40% reduksjon av klimagassutslipp.

For alle materialer i denne analysen er det i LCAen medregnet en form for transport fra uttak av råvarer til produksjon av materialet. Hvilke grunnlag som er lagt inn i SVVs verktøy er ikke nevnt i dokumentasjonen til verktøyet, kun at eksisterende EPDer og ecoinvent er brukt. Med bakgrunn i to EPDer for norsk betong fra EPD-norge.no står råvaretransporten for 4,7 kg CO<sub>2</sub>-ekv. per kubikk betong. Det brukes 2,3 m<sup>3</sup> betong for én meter T9,5 tunnel med PE-



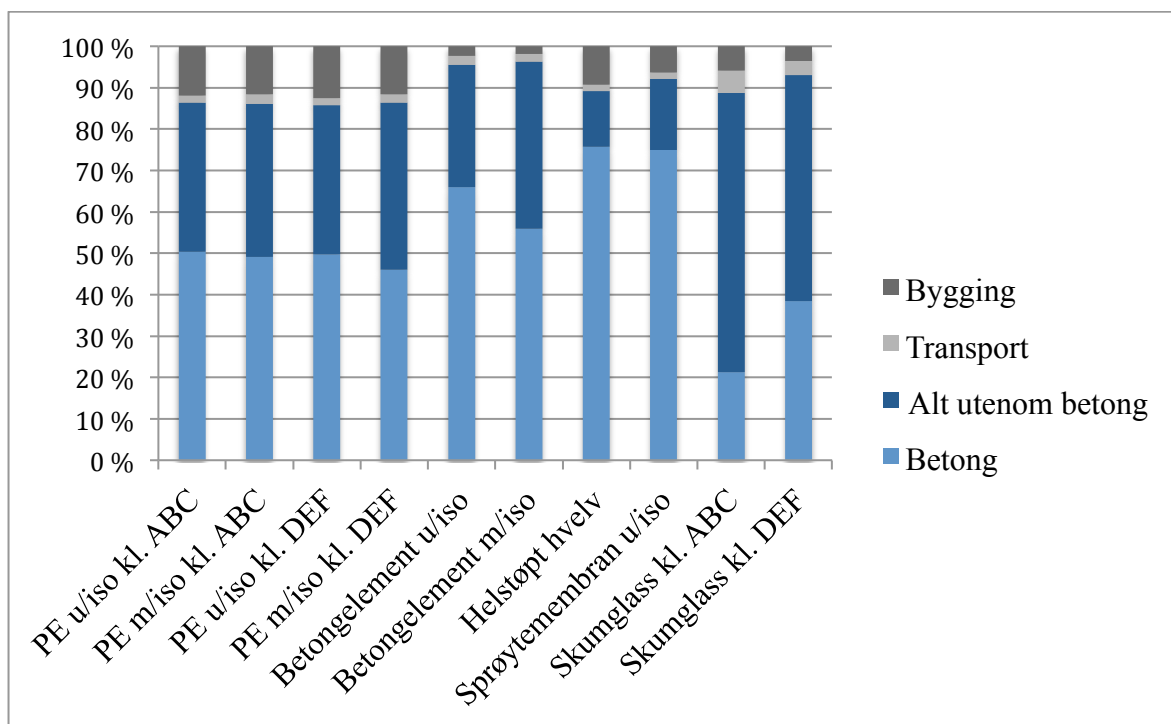
skum og veggelementer og transporten av råvarer til betongprodusenten utgjør med bakgrunn i disse verdiene 11 kg CO<sup>2</sup>-ekv. dvs. 1% av totalt utslipp for VoF løsningen. Tallet 4,7 kg CO<sup>2</sup>-ekv pr kubikk er gjennomsnittet av to EPDer hvor den ene legger til grunn 15 km transport av råvarer med EURO 5 lastebil og den andre 10km transport av råvarer med EURO 6 lastebil (Næringslivets stiftelse for miljødeklarasjoner 2017a) (Næringslivets stiftelse for miljødeklarasjoner 2017b).

## 6 Konklusjon

Dersom Norge skal klare å redusere klimagassutslippene fra VoF med 40-70% bør de fokusere på materialforbruk i stedet for å redusere utslipp i forbindelse med bygging som de skriver i nasjonal transportplan (Regjeringen 2017). Det beste vil være å fokusere på begge deler, men det vil være mer lønnsomt å bruke penger på å redusere materialforbruket ut ifra resultatene i denne analysen, samt å investere i bedre bolter og andre materialer som forårsaker lavere levetid på VoF løsningene med lavt klimagassutslipp. For VoF har byggingen lite å si for totalt klimagassutslipp og det å se på andre materialer enn betong kan være veldig lønnsomt i lengden. Transporten har også lite å si med mindre man velger en betongleverandør langt vekk (>100 km) fra byggeplass.

Det er i betongen besparelsene ligger fordi som man ser fra figur 26 er det betongen som står for de største klimagassutslippene. Det er kun ved endring av betong man har mulighet for å gjøre en stor forskjell i miljøet og kun her kan man gjøre de store besparelsene som skal til for å oppnå målet om 40-70% reduksjon av klimagassutslipp. Siden løsningen med Foamrox glassfiber kom best ut på alle måter i resultatet bør denne løsningen bli prøvd ut i en testtunnel og forsket videre på for bruk til VoF. Klimagassutslippene kan reduseres med over 50% ved å bruke denne løsningen kontra løsningen med PE-skum og sprøytebetong. For løsningene som brukes mest i veitunneler, PE-skum metoden og betongelementmetoden er det ikke mulig å redusere CO<sub>2</sub> utslippet i stor grad fordi man trenger den satte tykkelsen på betong og isolasjon. Måten å få ned klimagassutslippet vil være å gjøre sementen mer miljøvennlig og å bruke komposittbolter og andre resirkulerte materialer i løsningene.

For å se hvor stort bidrag de tre fasene, materialproduksjon, transport og bygging har er alle løsningene fordelt på 100 % og vist i diagrammet i figur 35. Her er det valgt å dele materialene opp i to deler for å vise hvor stort utslipp betongen utgjør alene. Materialproduksjon står for over 80% av klimagassutslippet for alle løsninger og i løsningene som er godkjente står andelen betong for mellom 46 % og 76 % av totalutslippene fra de tre fasene.



Figur 35: Klimagassutslipp fra alle fasene som er inkludert fordelt på 100% for alle løsningene.

Ut ifra resultatene fra dette studiet er ikke løsningen med helstøpt hvelv gunstig for miljøet og bør ikke brukes per dags dato. Store klimagassutslipp som denne løsningen fører til vil være en stor belastning på miljøet. Det vil i stedet være lønnsomt for klimaet, her med hensyn til klimagasser, å velge en løsning med lavere klimagassutslipp og lavere levetid som kan byttes ut med en mer klimavennlig løsning om 40-50 år. Løsningen helstøpt hvelv kan i beste fall bli fordelaktig når sementen har blitt klimavennlig.

Både med og uten levetid tatt i betraktning er rekkefølgen fra mest til minst heldige løsning med hensyn til klimagasser følgende:

1. Foamrox skumglass med enten veggelementer eller føringskant av betong
2. Sprøytebar membran ved liten frostmengde
3. PE-skum med sprøytebetong og enten veggelementer eller føringskant av betong
4. Betongelementer i hele hvelvet
5. Helstøpt hvelv

Dette er løsningene for veitunneler og den samme rekkefølgen vil gjelde jernbanetunneler også, men da uten veggelementer eller føringskant av betong for løsningen med Foamrox og uten løsningen med PE-skum siden den ikke lengre blir brukt i jernbanetunneler.

## 7 anbefalinger om videre arbeid

- Levetiden for de ulike VoFene bør undersøkes for å få en bedre vurdering av livsløpet til VoF.
- Dieselforbruk til anleggsmaskiner bør undersøkes samt dieselforbruk for ulike operasjoner en anleggsmaskin gjør og dieselforbruk i forbindelse med tomgangskjøring. Det kan for øvrig være at dette blir unødvendig nå når elektriske anleggsmaskiner er på vei inn i markedet.
- Hvordan karbonatisering kan inkluderes i betongens LCA og hvor mye karbonatisering som foregår i de ulike VoFene i Norsk klima over en viss tid. Det bør også vurderes om det er miljømessig lønnsomt å knuse betongen i tunnelene ved rivning av VoF for å øke karbonatiseringen i betongen.
- Teste ut Foamrox glassfiber som VoF i en testtunnel.
- Hvordan kvalitet på byggingen påvirker levetid og materialforbruk, samt hvor mye lengre levetid frittstående VoF kan oppnå ved å bruke bedre festemateriell.

## 8 Bibliografi

- Alltid Betong AS. «EPD av Ferdigbetong B45 MF40 16mm 200mm synkmål.» Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner, 2017.
- Aas Jakobsen. «Anbefalte vann- og frostsikringsløsninger.» 2015. <http://docplayer.me/46120270-Anbefalte-vann-og-frostsikringslosninger.html> (funnet 05 11, 2018).
- Aas Jakobsen. «Vann- og frostsikring i fremtidige tunneler.» *vegvesen.no*. 6.-10. 10 2014. [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/704770/binary/989371?fast\\_title=Vann-og+frostsikring+i+fremtidige+tunneler.pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/704770/binary/989371?fast_title=Vann-og+frostsikring+i+fremtidige+tunneler.pdf) (funnet 05 11, 2018).
- Asplan Viak. *Dokumentasjonsrapport, VegLCA v1.02*. dokumentasjonsrapport, Trondheim: Statens Vegvesen, 2015.
- Avinor, Transportetatene. «Nasjonal transportplan 2018-2029.» 2017. [http://www.ntp.dep.no/Forside/\\_attachment/1355550/binary/1108800?\\_ts=154a5190910](http://www.ntp.dep.no/Forside/_attachment/1355550/binary/1108800?_ts=154a5190910).
- Åkra Sementstøperi As. «Sement, mørtel, o.l.» 2017. <https://www.aakrasement.no/butikken/sement-mortel> (funnet 12 01, 2017).
- BASF AS. «MasterSeal 345.» 2017. [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/English%20\(Nigeria\)/TDS/MasterSeal/basf-masterseal-345-tds.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/English%20(Nigeria)/TDS/MasterSeal/basf-masterseal-345-tds.pdf) (funnet 12 01, 2017).
- Broch, Einar, Eivind Grøv, og Kjell Inge Davik. «The Inner Lining System in Norwegian Traffic Tunnels.» *Tunneling and underground space technology* 17, no. 3, 2002, 205-14.
- Buvik, Harald, Heidi Berg, Bernt Freiholts, og Olav Svangstu. *Kledninger i tunnel*. Utvalg 32 Bruer og tunneler, Nordisk vegteknisk forbund, 2008.
- Byggforskserien. *572.204 Sement. Typer, egenskaper og bruksområder*. 03 2016. [https://byggforsk.no/dokument/589/sement\\_typer\\_egenskaper\\_og\\_bruksomraader](https://byggforsk.no/dokument/589/sement_typer_egenskaper_og_bruksomraader) (funnet 04 25, 2018).
- Byggforskserien. *Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring*. 05 2012. [https://byggforsk.no/dokument/204/klimadata\\_for\\_termisk\\_dimensjonering\\_og\\_frostsikring#fig2c](https://byggforsk.no/dokument/204/klimadata_for_termisk_dimensjonering_og_frostsikring#fig2c) (funnet 04 10, 2018).
- Ecoinvent. *Why Ecoinvent*. <http://www.ecoinvent.org/database/buy-a-licence/why-ecoinvent/why-ecoinvent.html> (funnet 11 22, 2017).
- Frogner, Erik. *Sikre veitunneler, åpent faglig møte i NB Helstøpt tunnelhvelv - erfaringer fra Fellesprosjektet*. Ppt presentasjon, Norconsult, 2014.
- Holter, Karl Gunnar. *Future trends for tunnel lining design for modern rail and road tunnels in hard rock and cold climate*. Reaserch Gate, 2013.
- Holter, Karl Gunnar. *Properties of waterproof sprayed concrete tunnel linings*. Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- Holter, Karl Gunnar, intervjuet av Silje Nilsen. *Sprøytbar membran 7030*, Trondheim, (19 02 2018).
- Huang, Lizhen, Rolf A. Bohne, Amund Bruland, Pål D. Jakobsen, og Jardar Lohne. *Life cycle assessment of Norwegian road tunnel*. Springer-Verlag, 2014.
- IBU. *GLAPOR cellular glass*. Institut Bauen und Umwelt e.V., 2017.
- ISO. «ISO 14040, Miljøstyring - Livsløpsvurdering - prinsipper og rammeverk.» 2006.
- Jakobsen, Rolf, intervjuet av Silje Nilsen. *Alternativ VoF* (01 02 2018).
- Jernbanedirektoratet. *Jernbanestatistikk 2016*. Jernbanedirektoratet, 2016.
- Karlsen, Erik Andre, intervjuet av Silje Nilsen. *Levetid bolter* (08 05 2018).
- Lånkan, Kjersti Blehr. *Så mye forurensere flyturene dine*. 11 11 2015. klimagassutslipp bergen - oslo fly (funnet 04 30, 2018).

- Maxbo. «Armeringsnett K131 2x5m B500A.» <https://www.maxbo.no/armeringsnett-k131-2x5m-b500a-p1564310> (funnet 12 01, 2017a).
- Maxbo. «Armeringsnett K189 2x5m B500A.» <https://www.maxbo.no/armeringsnett-k189-2x5m-b500a-p1564318> (funnet 12 01, 2017b).
- Miljødirektoratet. «Togradersmålet.» 04 11 2016. <http://www.miljostatus.no/togradersmaalet> (funnet 12 01, 2917).
- Mjelstad, André, intervjuet av Silje Nilsen. *Giertsen tunnelduk* (11 04 2018).
- Myren, Synnøve A., og Bård Pedersen. *FoU-programmet Varige konstruksjoner 2012-2015 Sluttrapport*. Vegdirektoratet, 2016.
- Næringslivets stiftelse for miljødeklarasjoner. «B20 M90 D22 Synk 200.» *epd-norge.no*. Ribe Betong AS. 24 07 2017b. [http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/452\\_B20-M90-D22-Synk-200\\_1\\_1.pdf](http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/452_B20-M90-D22-Synk-200_1_1.pdf) (funnet 05 01, 2018).
- Næringslivets stiftelse for miljødeklarasjoner. «Betong B30 M60 22mm 200mm synk, lavkarbon kl. B.» *epd-norge.no*. 01 11 2017a. [http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-1444-479\\_B30-M60-22mm-200mm-synk-lavkarbon-kl-B\\_1.pdf](http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-1444-479_B30-M60-22mm-200mm-synk-lavkarbon-kl-B_1.pdf) (funnet 05 01, 2018).
- NFF. *Plastmaterialer i tunneler og bergrom - Håndtering i anleggsfasen*. Teknisk rapport 04, Norsk forening for fjellsprenningsteknikk, 2004.
- NFF. *Tung bergsikring i undergrunnsanlegg*. Vol. Håndbok nr. 5. Norsk forening for fjellsprenningsteknikk, 2008.
- Nilsen, Silje. «Valg av vann- og frostsikringsløsninger til norske infrastruktur-tunneler basert på miljøbetraktninger.» Prosjektoppgave, 2017.
- Norcem. *Vår nullvisjon*. 2014. <https://www.norcem.no/no/nullvisjon> (funnet 04 27, 2018).
- Nordahl, Reidar Hugsted & Rasmus S. «Tunnel.» *snl.no*. 02 05 2018. <https://snl.no/tunnel>.
- NTNU. *Using the T-O-N-E principles to find good scholarly journal articles*. 13 01 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=rs5PFX5SIHc&feature=youtu.be> (funnet 04 30, 2018).
- Olerud, Kåre. «CO2-ekvivalenter.» *Store Norske Leksikon*. 17 03 2016. <https://snl.no/CO2-ekvivalenter> (funnet 12 01, 2017).
- Palm, Anders L. *Dimensjonering av betongelementhvelv T10,5*. Tunnel og betong, Statens Vegvesen Vegdirektoratet, 2017.
- Pedersen, Bjørn. *Brannfarlige varer*. 14 02 2009. [https://snl.no/brannfarlige\\_varer](https://snl.no/brannfarlige_varer) (funnet 02 28, 2018).
- Pretec. 16 01 2017. <http://pretec.no/wp-content/uploads/2016/05/Kamstålbolt-Ø32-M33-Veggbolt-16.01.2017.pdf> (funnet 11 30, 2017).
- Pretec. «Produktdatablad for bakskiye m/tetningsplugg.» 16 01 2017b. <http://pretec.no/wp-content/uploads/2016/09/Bakskiye-m-tetningsplugg-16.01.2017.pdf> (funnet 11 30, 2017).
- Pretec. «Produktdatablad for framskiye for PE-skum.» 16 01 2017c. <http://pretec.no/wp-content/uploads/2016/05/Framskiye-for-PE-Skum-16.01.2017.pdf> (funnet 11 30, 2017).
- Pretec. «Produktdatablad Kamstålbolt Ø16/M16 for PE-skum.» 16 01 2017a. <http://pretec.no/wp-content/uploads/2016/09/Kamstålbolt-Ø16-M16-for-PE-Skum-16.01.2017.pdf> (funnet 11 30, 2017).
- Protan. «EPD of Protan Membrane for Tunnels.» The Norwegian EPD Foundation, 2015.
- Rønneberg, Christian. *Gode løsninger for vann- og frostsikring i tunneler*. Statens vegvesen Vegdirektoratet, 2016.
- Rønneberg, Christian, og Trond A. Østmoen. *Tilstand av ulike typer vann- og frostsikringshvelv*. Statens vegvesen, 2016.
- Regjeringen. «Nasjonal transportplan 2018-2029.» *Regjeringen.no*. 05 04 2017.

- <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20162017/id2546287/> (funnet 04 30, 2018).
- RIVM. «rivm.nl.» *Life Cycle Assessment - ReCiPe*. National Institute for public health and the environment. 16 06 2011. [http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life\\_Cycle\\_Assessment\\_LCA/ReCiPe](http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe) (funnet 11 21, 2017).
- RSA. *Euro IV, Euro V and VI Emissions Regulations for Heavy Duty Vehicle*. 2016. <http://www.rsa.ie/Documents/Vehicle%20Std%20Leg/Information%20Notes/Information%20note%20for%20Euro%20IV%20Euro%20V%20and%20Euro%20VI%20Emissions%20Regulations%20for%20Heavy%20Duty%20Vehicles%20%20Feb%202012.pdf> (funnet 04 18, 2018).
- Sagen, Trine. *Tunnel/Utforming av tunnelprofiler*. 29 08 2017. [http://jernbanekompetanse.no/w/index.php?title=Tunnel/Utforming\\_av\\_tunnelprofiler&oldid=6662](http://jernbanekompetanse.no/w/index.php?title=Tunnel/Utforming_av_tunnelprofiler&oldid=6662) (funnet 11 28, 2017).
- Smeplass, Sverre. *NB37 lavkarbonbetong*. 2015. <http://murbetong.no/wp-content/uploads/2016/03/1502-lavkarbonbetong.pdf> (funnet 05 16, 2018).
- Statens Vegvesen. *Bærekraftige betongkonstruksjoner*. Vegavdelingen, Vegdirektoratet, 2018.
- Statens Vegvesen. *Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011*. Etatsprogram, Statens Vegvesens rapporter, 2012.
- Statens Vegvesen. «Høring - rapport fra Statens kartverk om det offentlige kartgrunnlaget - Innhold , rutiner og ansvar.» *regjeringen.no*. 2012. [https://www.regjeringen.no/contentassets/216df4357faf4f418405fcd50bde308/statens\\_vegvesen.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/216df4357faf4f418405fcd50bde308/statens_vegvesen.pdf) (funnet 11 21, 2017).
- Statens Vegvesen. *Håndbok N500 Vegtunneler*. Statens vegvesen Vegdirektoratet, 2016a.
- Statens Vegvesen. *Håndbok V520 Tunnelveiledning. Foreløpig*. Statens vegvesen Vegdirektoratet, 2016b.
- Statens Vegvesen. *PE-skum historikk*. 2009. <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/tunneler/Brannsikkerhet/Plastbaserte+materialer/PE-skum+Historikk> (funnet 02 23, 2018).
- Statens Vegvesen. *Plastbaserte materialer*. 2016c. <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/tunneler/Brannsikkerhet/Plastbaserte+materialer> (funnet 02 23, 2018).
- Statens Vegvesen. «Tunnelklasser.» *vegvesen.no*. [https://www.vegvesen.no/s/bransjekontakt/Hb/hb017-1992/DelD\\_Spesielle\\_emner/31.Tunneler/31\\_Tunnelklasser.htm](https://www.vegvesen.no/s/bransjekontakt/Hb/hb017-1992/DelD_Spesielle_emner/31.Tunneler/31_Tunnelklasser.htm).
- Statens Vegvesen. «Tunnelprofiler.» *vegvesen.no*. [https://www.vegvesen.no/s/bransjekontakt/Hb/hb017-1992/DelD\\_Spesielle\\_emner/31.Tunneler/Tunnelprofiler.htm](https://www.vegvesen.no/s/bransjekontakt/Hb/hb017-1992/DelD_Spesielle_emner/31.Tunneler/Tunnelprofiler.htm) (funnet 11 21, 2017).
- Statens Vegvesen. *Vann- og frostsikring i tunnel*. retningslinje, Vegdirektoratet, 2014.
- Statens Vegvesen. *Vegkart*. 06 04 2018. [https://www.vegvesen.no/vegkart/vegkart/#kartlag:geodata/hva:\(~\(id:581,filter:\(~\),farge:'0\\_0\)\)/hvor:\(land:\(~Norge\)\)/@600000,7225000,3](https://www.vegvesen.no/vegkart/vegkart/#kartlag:geodata/hva:(~(id:581,filter:(~),farge:'0_0))/hvor:(land:(~Norge))/@600000,7225000,3) (funnet 04 06, 2018).
- Strømman, Anders. *Methodological Essentials of Life Cycle Assessment*. Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- Tuven, Ruth. *RAM- og Risikovurdering Vann og frostsikringsløsninger*. Bane NOR, 2015.
- Vika Ørsta AS. «EPD of CT-bolt M20.» The Norwegian EPD Foundation, 2017.
- Volum transport AS. *Vår lastebilpart*. Volum Transport AS Larvik. 2015. <http://volumtransport.no/lastebilpark/> (funnet 05 11, 2018).
- Weidema B P, Bauer C, Hischer R, Mutel C, Nemecek T. *Overview and methodology*. Ecoinvent centre, 2013.