

Basaltfiber som alternativ til slakkarmering i vegger. Et studium av; praktiske, økonomiske og miljømessige konsekvenser.

Basalt Fiber as an Alternative to Steel Reinforcement in Walls. A Study About the Practical, Economic, and Environmental Impacts.

Trondheim Mai 2022

Mats Olsen Brastad
Thomas Hille

Intern veileder:
Arne Mathias Selberg

Ekstern veileder:
Alexander Kristensen

Prosjektnr:
2022 - 21

Rapporten er ÅPEN

Rapporten er ÅPEN

Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål

Moy terrasse i Grimstad er prosjektert med tradisjonell slakkarmering i stål. Gruppens oppgave er å se på bruken av basaltfiber som enten erstatning for, eller som supplement til tradisjonell stålarmoring i bærevegger hovedsakelig påkjent av trykk.

Gruppen skal bruke den tilegnede kunnskapen fra dette prosjektet til å gjennomføre en fysisk støp av innervegg ved bruk av basaltfiber som ett alternativ eller i tillegg til slakkarmering. På denne måten kan gruppen se en konkret sammenheng mellom teori og praksis. For å gjennomføre dette ønsker gruppen å fokusere spesielt på den praktiske utførelsen, så lenge teorien og tidligere erfaringer viser at det er forsvarlig å utføre støypen. Dette faller også inn under hovedmålet til BRG, som har uttrykt et ønske om å utforske mulighetene til å bruke alternative metoder for å skille seg ut blant entreprenørene.

I løpet av prosjektet ønsker gruppen å besvare og drøfte følgende punkter:

Beregninger

Hva er basalt?

Praktiske konsekvenser

Økonomiske konsekvenser

Miljømessige konsekvenser

Disse punktene skal resultere i en rapport som konkluderer om det er gunstig å bruke basaltfiber som alternativ armeringsløsning til stål. Rapporten skal kunne brukes av ekstern bedrift til videre arbeid og utvikling av basaltfiberarmoring i vegger.

Stikkord:

Basaltfiber, praktisk, økonomi, miljø, slakkarmering, analyse, trykkpåkjennte vegger, reststrekkfasthet, riss.

Keywords:

Basalt fiber, practical, economic, environmental, reinforcement, analysis, walls subjected to compressive forces, residual tensile strength, crack.

Forord

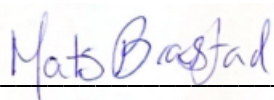
Denne bacheloroppgaven er skrevet av Mats Olsen Brastad og Thomas Hille som en avsluttende oppgave på vår byggingeniør-utdanning ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet våren 2022. Oppgaven baserer seg på tilegnet kunnskap fra vår undervisningstid på NTNU, særlig gjennom det siste året hvor vi har hatt fordypning innenfor konstruksjonsteknikk.

Oppgaven har sin opprinnelse i ett ønske fra BRG Entreprenør AS om å kartlegge muligheten for bruk av basaltfiber som armeringsmateriale i innervegger. Dette er et tema vi visste lite om fra før så derfor skapte dette stor nysgjerrighet hos oss.

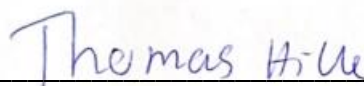
Den praktiske utførelsen og vinklingen av oppgaven ga oss en unik mulighet til å tilegne oss nyttige kunnskaper og erfaringer om samspillet mellom teori og praksis vi føler vil komme godt med i videre arbeid.

Vi vil gjerne takke vår interne veileder, universitetslektor Siv.ing. Arne Mathias Selberg ved NTNU og vår eksterne veileder, regionleder Alexander Kristensen ved BRG for godt samarbeid, konstruktive tilbakemeldinger og tett oppfølging gjennom hele prosjektet. En stor takk rettes også til Per Cato Standal og Len Miller ved ReforceTech for bistand med viktig kunnskap og nyttige erfaringer, samt alle dyktige fagarbeidere som var med på å gjøre gjennomføringen av den praktiske utførelsen mulig.

Trondheim, 20. mai 2022



Mats Olsen Brastad



Thomas Hille

Sammendrag

Byggebransjen forholder seg i stor grad til kjente materialer og metoder som følger Eurokodene. Nye løsninger krever at aktører innen næringen er villig til å prøve alternative metoder som potensielt kan effektivisere byggeprosessen og forbedre resultatet.

Denne bacheloroppgaven tar for seg basaltfiber som alternativ, eller som supplement, til tradisjonell slakkarmering i primært trykkpåkjennte innervegger. Oppgaven tar utgangspunkt i leilighetskomplekset Moy Terrasse i Grimstad hvor det ble gjennomført ett praktisk forsøk med basaltfiber. Forsøket la grunnlaget for denne rapporten og gikk ut på å støpe to geometrisk identiske vegger med forskjellige armeringsløsning.

Basaltfiber er et organisk materiale som har gode egenskaper til å motstå riss i betongen. Unikt for denne type fiber er at den har samme tetthet som betong. Dette gjør at den hverken synker eller flyter opp ved utstøping. Basaltfibertypen som ble benyttet i forsøket heter MiniBars™ og er produsert av ReforceTech.

For å sammenligne basaltfiber med tradisjonell slakkarmering er det fokusert på tre faktorer som drøftes for å komme til en konklusjon. Disse faktorene er henholdsvis praktisk utførelse, økonomi og miljø. Erfaringer fra førstnevnte er at selve støpen var tilsvarende arbeid, men det var noe enklere å sette opp forskaling til basaltveggen da det kun var en liten mengde slakkarmering.

Den økonomiske delen er delt inn i materialkostnader og arbeidskostnader. Til tross for at basaltfiber har en dyrere kilopris enn stangarmering, veies det opp for ved at det kreves mye mindre mengde fiber per kubikk betong enn det gjør med slakkarmering. Differansen i materialkostnadene er derfor relativt liten. Besparingene ved bruk av basaltfiber kommer i all hovedsak fra de lave arbeidskostnadene i tillegg til redusert byggetid.

Byggebransjen står for en vesentlig del av klimagassutslippene i verden. Tiltak som kan gjøres er å utforske materialer og metoder som er mer miljøvennlige. Basaltfiber er et alternativ til slakkarmering som viser seg å være betydelig mer miljøvennlig, forbeholdt at det bare er

materialene som sammenlignes. Selv om basaltfiber har lavere utslipp enn slakkarmering, blir differansen mellom armeringene tilnærmet neglisjerbar i forhold til utslippene fra betong.

Det viser seg at en kombinasjonsløsning av slakkarmering og basaltfiber vil ha lavere kostnad og føre til noe mindre CO₂-utslipp, uten å påvirke veggens utseende og struktur. I tillegg er det generelt et behov for mer kunnskap om basaltfiber som armeringsmateriale i byggebransjen.

Abstract

The construction industry has a tendency of mostly using familiar materials and methods according to the Eurocodes. For changes to be made and results to improve, engineers must be willing to step out of their comfort zone to explore new solutions and methods.

This Bachelor thesis is about basalt fiber as an alternative to, or in combination with traditional steel reinforcement in inner walls primarily exposed to compressive forces. The thesis is based on an apartment complex under construction called Moy Terrasse in Grimstad. At this construction site the projects practical experiment with basalt fiber as reinforcement was executed. The experiment was to cast two geometric identical inner walls with different reinforcement.

Basalt fiber is an organic material which is very capable to counteract cracking in the concrete. Unique for this fiber is that it has the same density as concrete, which means that it will neither sink nor float when casted. The basalt fiber type used in this experiment is called MiniBars and it is produced by ReforceTech.

To compare basalt fiber to traditional reinforcement it was chosen three factors which is discussed throughout the report. At the end of the report the discussions are evaluated to reach a conclusion. The chosen factors are practical execution, economy, and environment. Experience from the practical part is that the casting was about the same amount of work, but it was a bit easier to set up the formwork for the wall containing basalt fiber because of the low amount of traditional reinforcement.

The economical part of the report is separated into material cost and labor cost. Even though basalt fiber is more expensive per kilograms than traditional reinforcement, it is required a lot lower amount of fiber per cubic meter concrete than with regular reinforcement. Therefore, the difference in material cost is relatively low. The reduction in costs achieved by using basalt fiber is mostly from reduced construction time and lower labor costs.

The construction industry is responsible for a substantial amount of total climate gas emissions in the world. Measures that can be made is to try out more eco-friendly materials

and methods. Basalt fiber is an alternative to regular reinforcement which has proven to be more eco-friendly, that is if only the materials are being compared. Even though basalt fiber has lower carbon emission than traditional reinforcement, the difference between them is close to negligible compared to the emissions from concrete.

The result from this report is that a combination of traditional reinforcement and basalt fiber will result in lower cost and a bit less emission of CO₂ without affecting the appearance and structure of the wall. It has been experienced that in general, engineers are lacking knowledge about basalt fiber. To conclude; it is necessary with greater knowledge about basalt fiber as a reinforcement option in the construction industry.

Innholdsfortegnelse

Problemdefinerings/prosjektbeskrivelse og resultatmål	iii
Forord.....	v
Sammendrag	vii
Abstract.....	ix
Innholdsfortegnelse	xi
Figurliste.....	xiii
Tabelliste	xv
Begrepsforklaring.....	xvi
1. Innledning	1
1.1. Oppgavebeskrivelse	1
1.2. BRG Entreprenør AS	2
2. Basaltfiber	2
2.1. Basaltfiber som armeringsmateriale.....	2
2.2. Eksempel på konstruksjoner armert med basaltfiber	4
2.2.1. Byggetrinn 4, konfektfabrikken	4
2.2.2. Rudsflata 11	5
3. Beregninger.....	5
3.1. Beregningsforutsetninger	5
3.2. Beregninger utført av gruppen	7
3.2.1. Laster.....	7
3.2.2. Tradisjonell stangarmering	9
3.2.3. Basaltfiberarmering	15
4. Praktisk utførelse	17
4.1. Tradisjonelt armert	19

4.2.	Basaltfiber	21
4.2.1.	Forarbeid.....	21
4.2.2.	På blandeverket	22
4.2.3.	Overføring betongbil til pumpe	24
4.2.4.	Støp	25
4.2.5.	Etterarbeid og resultat.....	28
5.	Økonomi.....	30
5.1.	Materialkostnader.....	30
5.2.	Arbeidskostnader	30
5.3.	Totalkostnader	31
6.	Miljø	32
6.1.	FNs bærekraftsmål	32
6.2.	EPD	33
6.3.	Systemgrenser	34
6.4.	Miljøinnvirkninger	36
6.4.1.	Gjenbruk.....	38
7.	Diskusjon	38
7.1.	Beregninger	38
7.2.	Praktisk utførelse	40
7.3.	Økonomi	41
7.4.	Miljø.....	42
8.	Konklusjon.....	43
	Referanser.....	44
	Vedlegg	46

Figurliste

Figur 1. Moy Terrasse. Foto: Thomas Hille	1
Figur 2. ReforceTechs MiniBars™. Foto: Thomas Hille	3
Figur 3. MiniBars. Foto: Thomas Hille	4
Figur 4. Konfektfabrikken. Foto: ReforceTech	5
Figur 5. Rudsflata 11. Foto: Veidekke	5
Figur 6. Statisk modell for utregning av aksialbelastning på vegg.....	7
Figur 7. Vertikal påkjenning på veggen.....	8
Figur 8. Horisontal påkjenning på vegg.....	8
Figur 9. Dimensjonerende lastpåkjenninger.....	9
Figur 10. Opptak av ytre påkjenninger	9
Figur 11. Eksentrisitetsmoment.....	12
Figur 12. Opptak av eksentrisitetsmoment	12
Figur 13. Skisse av stangarmeringsløsning.....	14
Figur 14. Snitt av stangarmeringsløsning.....	14
Figur 15. Trepunkts bøyetest	16
Figur 16. Systemforskaling. Foto: Thomas Hille.....	17
Figur 17. Moy Terrasse. Foto: Thomas Hille	19
Figur 18. Armering i tradisjonell vegg. Illustrasjon: Solibri	20
Figur 19. Slakkarmering i tradisjonell vegg. Foto: Kjell Nordli.....	20
Figur 20. Slakkarmering i basaltvegg. Illustrasjon: Solibri	21
Figur 21. Tradisjonell armering i basaltvegg. Foto: Kevin Bach	22
Figur 22. Innblanding av fiber. Foto: Thomas Hille.....	23
Figur 23. Innblanding og overføring til betongbil. Foto: Mats Brastad	24
Figur 24. Opphopning av basaltfiber. Foto: Thomas Hille	25
Figur 25. Støp basaltvegg. Foto: Mats Brastad	26
Figur 26. Betong- og pumpebil. Foto: Thomas Hille	27
Figur 27. Vibrering av betong. Foto: Mats Brastad.....	28

Figur 28. Basaltvegg før overflatebehandling. Foto: Kjell Nordli.....	29
Figur 29. FNs bærekraftsmål. Illustrasjon: Regjeringen.....	32
Figur 30. EPD for MiniBars. Illustrasjon: EPD Norge	33
Figur 31. Systemgrense B500NC. Illustrasjon: Celsa.....	35
Figur 32. Systemgrense MiniBars. Illustrasjon: EPD Norge	35
Figur 33. Systemgrense B30 M60. Illustrasjon: Ribe Betong	35
Figur 34. Skisse av stangarmert betong	37
Figur 35. Skisse av fiberarmert betong	37
Figur 36. Kritisk linje i veggen	39
Figur 37. Kritisk sone i veggen	39

Tabelliste

Tabell 1. Materialkostnader pr m ³ betong, B500NC som referanse.	30
Tabell 2. Arbeidskostnader pr m ³ betong, B500NC som referanse.....	31
Tabell 3. Totalkostnad pr m ³ betong, B500NC som referanse.	31
Tabell 4. Betong	36
Tabell 5. Armering.....	36
Tabell 6. Utslipp for stålmert vegg	37
Tabell 7. Utslipp for fiberarmert vegg.....	37

Begrepsforklaring

Selvkomprimerende betong (SKB)	Betongtype tilsatt en høyere mengde finstoff og superplastiserende tilsetningsstoffer. SKB er så tyntflytende at det ikke er nødvendig med vibrering (Hokksund betong, 2016).
Jernbinder	«Fagarbeider i bygningsindustrien som kapper, bøyer og legger armeringsstålet på riktig plass i betongkonstruksjoner» (Dolven, 2019).
Life cycle assessment	Analyse som identifiserer energi- og materialforbruk for ett produkt gjennom hele dets levetid (Grønmo, 2020).
CO ₂ -ekv	Omregningsfaktor som gjør det mulig å sammenligne alle klimagassenes innvirkning på global oppvarming i atmosfæren (Lahn & Olerud, 2020).
GWP-total	Mål på drivhusgassenes akkumulerte effekt på global oppvarming i atmosfæren, regnes ut med enheten CO ₂ -ekvivalenter (Toldnæs, 2022).
Membranherder	Membran som påføres nystøpt betong for å unngå for tidlig vannavgang og svinriss under herdeperioden (PERI Norge, 2022).
Tobb	Beholder som frakter betongen fra betongbil til støpeformen ved hjelp av heisekran. (Osnes, 2020)
Lavkarbonbetong	Konstruksjonsbetong som oppfyller gitte krav knyttet til CO ₂ -utslipp i henhold til NS-EN206+NA (Unicon, 2022).

1. Innledning

1.1. Oppgavebeskrivelse

Denne oppgaven tar for seg basaltfiber som armeringsmateriale og sammenligner det med tradisjonell slakkarmering. Det tas utgangspunkt i prosjektet Moy Terrasse i Grimstad, som er et leilighetskompleks under bygging, prosjektert av Rambøll med BRG Entreprenør AS som totalentreprenør. BRG tilrettela prosjektet slik at det ble mulig å gjennomføre et praktisk forsøk hvor det ble støpt to geometrisk identiske innervegger. Den ene veggen ble dimensjonert med noe slakkarmering sammen med basaltfiber i henhold til beregningene utført i denne rapporten. Den andre var en tradisjonelt armert vegg prosjektert av Rambøll. For at det skulle være forsvarlig å utføre dette forsøket, ble konseptet for veggen med basaltfiber verifisert av Rambøll med forbehold om at de ikke tok ansvar for eventuelle svinn og riss.

Hensikten med oppgaven er å bidra til økt kunnskap om basaltfiber som armeringsmateriale i innervegger primært belastet av trykk. I rapporten undersøkes det om basaltfiber kan brukes som et mer gunstig alternativ eller supplement til slakkarmering. Dette blir gjort ved å vurdere den praktiske utførelsen, økonomien og de miljømessige konsekvensene.



Figur 1. Moy Terrasse. Foto: Thomas Hille

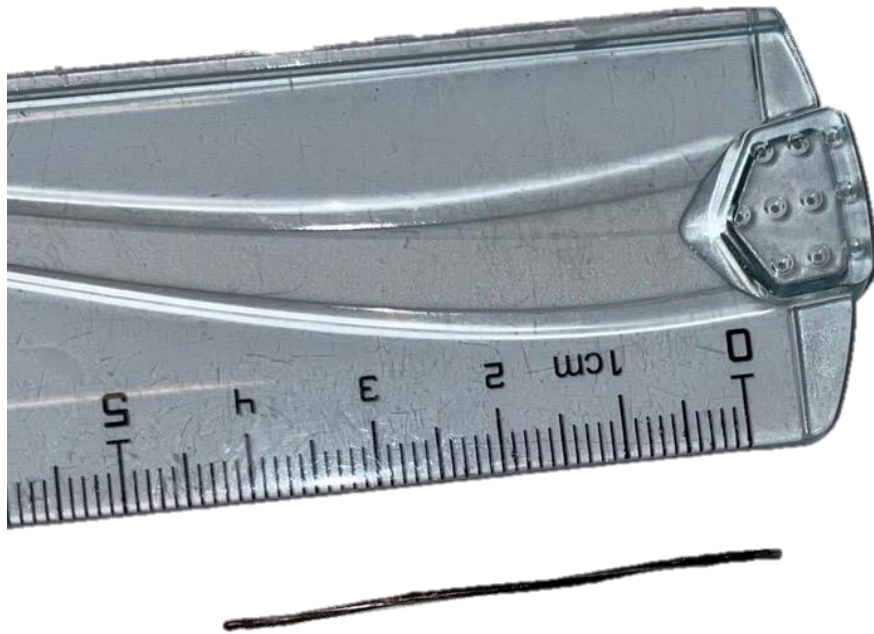
1.2. BRG Entreprenør AS

BRG er et sørlandsbasert entreprenør- og eiendomsutviklingselskap med hovedkontor i Kristiansand og avdelingskontor i Arendal og Mandal. Firmaet ble grunnlagt i 2008 og har i dag omtrent 194 ansatte med en omsetning på 1.2 milliarder kroner. De er involvert i flere større byggeprosjekter innenfor både bolig- og næringsbygg (BRG, 2022). Bakgrunnen for oppgaven er ønsket om å se på bruk av basaltfiber i betongvegger som primært er trykkbelastet. Dette kan være vegger som har andre funksjoner enn ren bæring, for eksempel for å ivareta lyd- eller brannkrav. Det kan i tillegg være betongvegger i øvre etasjene av et bygg som også har avstivende funksjoner, men hvor det ikke er større strekkbelastninger. De har også noe erfaring med basaltfiber fra prosjektet Tangvall skolesenter i Søgne. På dette prosjektet skulle det leveres mye slipte betonggolv, og det ble valgt basaltfiber som supplement til armeringsnett for å redusere riss.

2. Basaltfiber

2.1. Basaltfiber som armeringsmateriale

Basaltfiber er tynne fibre laget av basalt, en magmatisk bergart bestående av plagioklas, pyroksen og olivin (Selbekk, 2021). Produksjonsprosessen baserer seg i grove trekk på vasking, smelting og homogenisering av basaltmalmen etterfulgt av uthenting av fibrene (Seehusen, 2014). Disse fibrene tvinnes deretter sammen til strukturelle makrofibre i ett heliksmønster. Prosessen varierer imidlertid fra produsent til produsent. I Norge er det ReinforceTech som er største leverandør av basaltfiberarmering med sine MiniBars™. Det er dette produktet som danner grunnlaget for sammenligningen med tradisjonell stangarmering av stål i rapporten.



Figur 2. ReforceTechs MiniBars™. Foto: Thomas Hille

Basaltfiber er organisk og dermed ikke-korroderende, noe som betyr at det ikke må tas hensyn til overdekning når det skal armeres. Fibrene har tilnærmet samme tetthet som betong. Det betyr at den hverken vil synke og samle seg i bunn eller flyte opp til overflaten når den blandes inn, men spre seg jevnt i blandingen. Heliksformen og den grove overflaten på ReforceTechs MiniBars sørger for god heft mellom armering og betong (ReforceTech, 2022). Ved høye temperaturer krystalliseres basaltfibrene og opprettholder i stor grad sin opprinnelige form og styrke (Sim, et al., 2005).

Basaltfibreneres spredning i betongen gjør det til ett effektivt hjelpemiddel for å hindre store rissdannelser. Når tradisjonell betong risser har den ikke lenger noen strekkfasthet. Ved ytterlige påkjenninger vil det dannes store riss som til slutt vil føre til kollaps. I fiberarmert betong vil strekkspenningene tas opp av fibrene etter første rissdannelse. De danner en spenningsfordeling i betongen som medfører færre riss og mindre rissvidder enn for vanlig betong, dette kalles fibrenes reststrekkfasthet (Evjen & Kroknes, 2020). Denne egenskapen

gjør også fiberarmert betong mer bestandig mot korrosjon fordi fibre hindrer vanninntrenging.



Figur 3. MiniBars. Foto: Thomas Hille

2.2. Eksempel på konstruksjoner armert med basaltfiber

2.2.1. Byggetrinn 4, konfektfabrikken

Konfektfabrikken på Rodeløkka i Oslo er ett boligprosjekt utført av Veidekke. I byggetrinn 4, oppført 2012-2014 ble det bestemt at all tradisjonell armering i innerveggene skulle erstattes med basaltfiber. Det ble benyttet selvkomprimerende betong med kvalitet B30 M60 og fibermengden ble bestemt til 5.7 kg/m^3 . (Norsk betongforening, 2020)



Figur 4. Konfektfabrikken. Foto: ReforceTech

2.2.2. Rudsfleta 11

Rudsfleta 11 er Veidekkes kontorer på Rudshøgda i Innlandet. I prosjekteringsfasen ble det bestemt at den ytterste fasaden av bygget skulle utføres med basaltfiberarmering. Det ble benyttet selvkomprimerende betong og fibermengden ble bestemt til 7.5 kg/m^3 . (ReforceTech, 2012)



Figur 5. Rudsfleta 11. Foto: Veidekke

3. Beregninger

3.1. Beregningsforutsetninger

Beregninger er utført i henhold til NS-EN-1992-1-1, heretter kalt EC2 (Standard Norge, 2021), med mindre annet er spesifisert. Lastene er dimensjonert i bruddgrensetilstand. Det er sett bort fra ulykkeslaste som brann- og jordskjelvlaster.

Norsk betongforenings publikasjon 38 stiller følgende krav til fiberarmerte konstruksjoner:

For konstruksjoner der sammenbrudd kan medføre tap av menneskeliv, eller er av stor samfunnsmessig eller økonomisk betydning, skal det i tillegg til de vanlige kontrollene påvises at bøyemomenter og aksialtrekkrefter i karakteristisk lastkombinasjon kan bæres av tradisjonell slakk- eller spennarmering uten bidrag fra fiberarmeringen. I denne kontrollen kan alle last- og materialfaktorer settes lik 1,0 (Norsk betongforening, 2020).

Dette betyr at veggen som skal fiber-armeres i tillegg må utføres med stangarmering som tar opp ytre påkjenninger som horisontal vindlast og eksentrisitetsmoment. Det spesifiseres at last- og materialfaktorer kan settes lik 1,0, det er likevel valgt å regne laster og armeringsmengder med sikkerhets- og materialfaktorer i henhold til gjeldende europeisk regelverk.

For å bestemme nødvendig fibermengde forutsettes det at fiberarmeringen må ha resttrekkfasthet tilsvarende tradisjonell stangarmerings strekkfasthet. Siden alt av ytre påkjenninger skal tas opp av tradisjonell stangarmering er det minimumskravet til armering som er dimensjonerende for å bestemme mengden basaltfiber. Minimumsarmeringen bestemmes i henhold til EC2-9.6. Det benyttes B30 M60 betong og B500NC armeringsstål. Det er fibermengden beregnet av tredjepartsselskapet Concribe som blir brukt som armeringsmengde i veggen, se vedlegg C. Dosering av fiber beregnes i bruksgrensetilstand.

3.2. Beregninger utført av gruppen

3.2.1. Laster

Karakteristiske lastverdier er hentet fra beregningsrapport RIB Moy terrasse, se vedlegg D.

Vertikallaster:

Vertikallasten skaper trykkpåkjenning som tas opp av betongen og ett minimumseksentrisitetsmoment på grunn av skjevstilling av lasten som tas opp av armeringen.

$$s_{tak} = 3.6 \text{ kN/m}^2$$

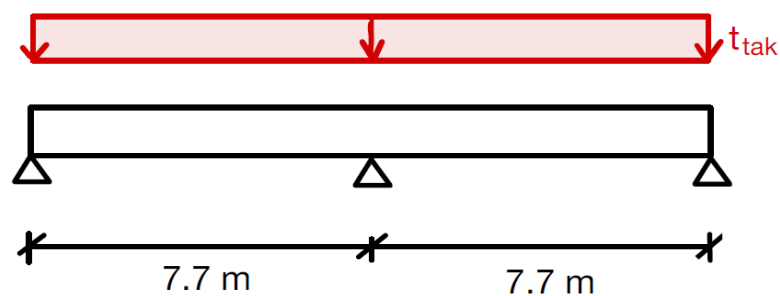
$$g_{tak} = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_g = 1.2$$

$$\gamma_q = 1.5$$

$$t_{tak} = s_{tak} * \gamma_q + g_{tak} * \gamma_g = 6.6 \text{ kN/m}^2$$

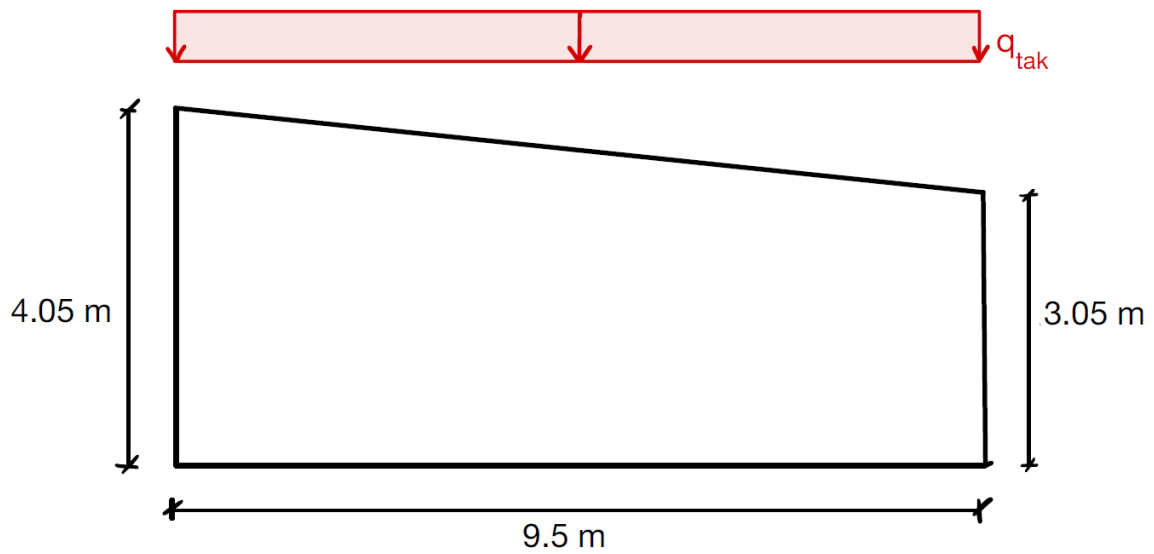
Byggets tak sees i denne oppgaven på som ett dekke med bredde per meter innover i planet. For å beregne aksiallasten på vegg benyttes *Stålkonstruksjoner. Profiler og formler* (Larsen, et al., 1993).



Figur 6. Statisk modell for utregning av aksialbelastning på vegg.

$$spenn_{tak} = 7.7 \text{ m}$$

$$q_{tak} = 1.25 * t_{tak} * spenn_{tak} = 63.5 \text{ kN/m}$$



Figur 7. Vertikal påkjenning på veggen

Horisontallaster:

Det antas at veggen tar opp vindlasten i form av en punktlast tilsvarende arealet av hele veggens høyde og halvparten av spennet mellom veggene. Vindlasten plasseres i øverste hjørne på den høyeste veggen, da dette vil gi den mest ugunstige lastpåkjenningen.

$$q_{kast} = 0.915 \text{ kN/m}^2$$

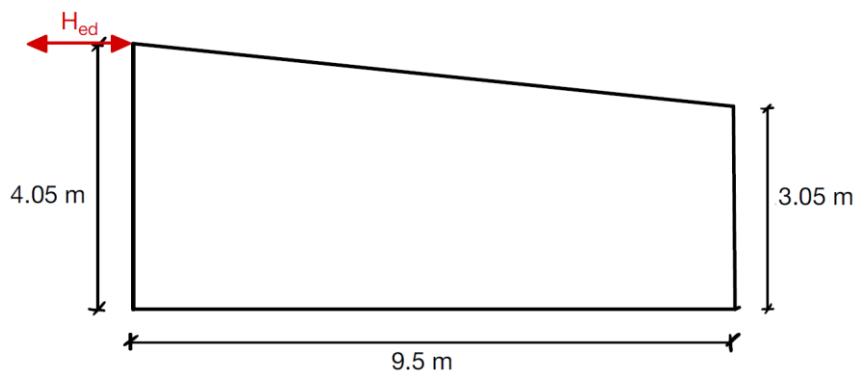
$$l_{halvspenn} = 3.8 \text{ m}$$

$$h = 4 \text{ m}$$

$$q_{vind} = q_{kast} * \gamma_q * l_{halvspenn} * 2 = 10.43 \text{ kN/m}$$

$$Q_{vind} = q_{vind} * h = 41.7 \text{ kN}$$

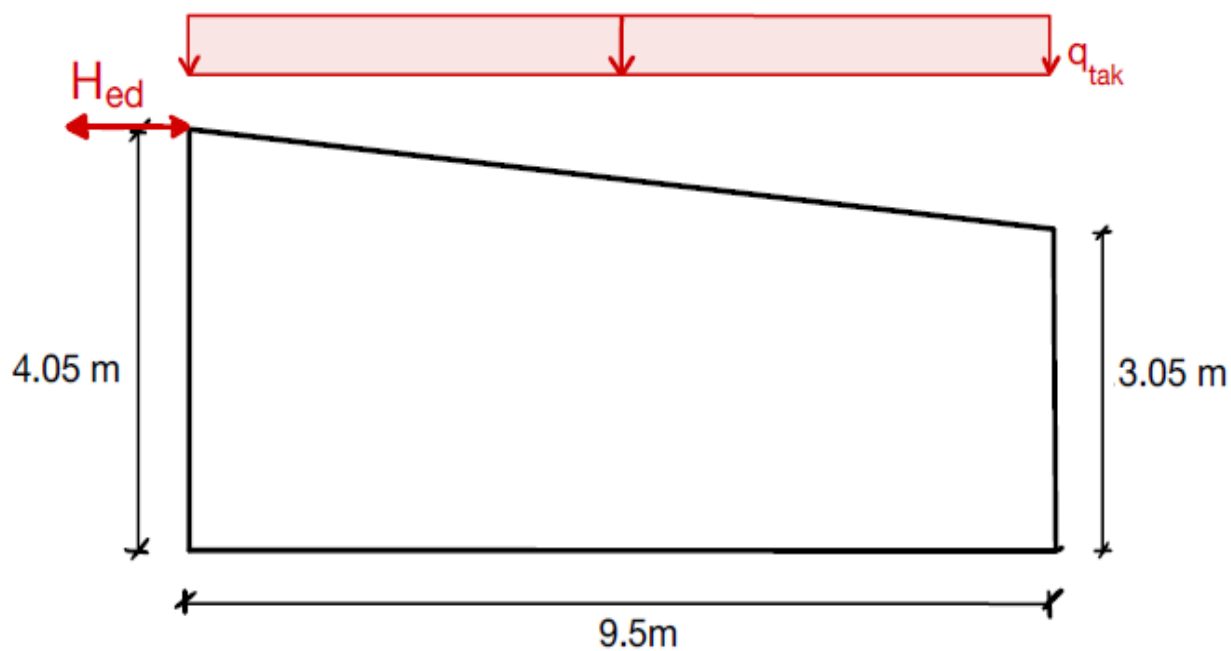
$$H_{ed} = \pm Q_{vind}$$



Figur 8. Horisontal påkjenning på vegg

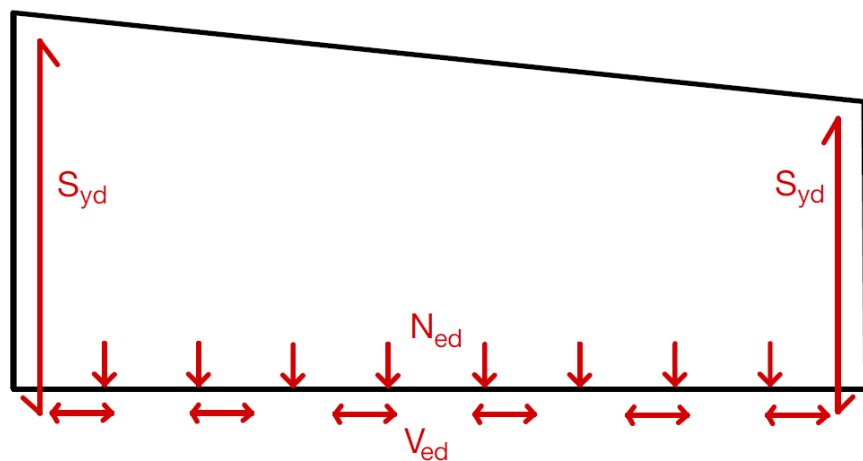
3.2.2. Tradisjonell stangarming

Veggens strekk- og skjærarming er dimensjonert med utgangspunkt i pensumet fra TKT4120 Betongkonstruksjoner 2 ved NTNU.



Figur 9. Dimensjonerende lastpåkjenninger

Figur 8 viser dimensjonerende lastpåkjenninger på vegg og figur 9 viser hvordan betongen og armeringen skal ta opp de ytre påkjenningene.



Figur 10. Opptak av ytre påkjenninger

Betongens trykkapasitet

Sjekker betongens trykkapasitet per meter i veggens lengderetning.

$$t = 200 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$A_c = t * b = 2.0 * 10^5 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\alpha_{cc} = 0.85 \text{ (EC2-NA.3.1.6)}$$

$$\gamma_c = 1.5 \text{ (EC2-NA. Tab-2.1N)}$$

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 17 \text{ N/mm}^2 \text{ (EC2-3.1.6)}$$

$$q_{Rd} = f_{cd} * A_c = 3400 \text{ kN/m}$$

$$q_{Rd} > q_{tak} \rightarrow \text{Betongen har tilstrekkelig trykkapasitet}$$

Strekkarmering

$$l_{vegg} = 9500 \text{ mm}$$

$$V_{ed} = H_{ed} = 41.7 \text{ kN}$$

$$M_{ed} = H_{ed} * h = 166.8 \text{ kNm}$$

$$N_{ed} = q_d * l_{vegg} = 603.3 \text{ kN}$$

Nødvendig trykksone er arealet av veggens som trengs for å ta opp trykkpåkjenningen, denne tas opp av betongen.

$$T_{Rd} = f_{cd} * t * x$$

$$T_{Rd} = T_{ed} = 603.3 \text{ kN}$$

$$f_{cd} * t * x \geq T_{ed}$$

$$x \geq \frac{T_{ed}}{t * f_{cd}} = 177.4 \text{ mm}$$

Velger da $x = 200 \text{ mm}$

$$T_{Rd} = f_{cd} * t * x = 680 \text{ kN}$$

$$z = l_{vegg} - 2 * x = 9100 \text{ mm}$$

$$T_{cd} = \frac{M_{ed}}{z} = 18.4 \text{ kN}$$

$$T_{Rd} \geq T_{cd} \rightarrow \text{Kapasiteten er ok}$$

Nødvendig strekksone er arealet som trengs for å ta opp strekkpåkjenningen, denne tas opp av armeringen.

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_s = 1.15 \text{ (EC2-NA. Tab-2.1N)}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{yd} = T_{cd} \text{ på grunn av likevekt}$$

$$A_{sm} \geq \frac{T_{cd}}{f_{yd}} = 43 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{A_{sm}}{\pi * 6^2} = 0.38 \approx 1 \text{ jern}$$

$$A_{s,nødv} = \pi * 6^2 = 113 \text{ mm}^2$$

Legger inn ett jern på hver side av veggen.

$$A_s = 2 * A_{s,nødv} = 226 \text{ mm}^2$$

Skjærarmering

For å sikre forankring og tilstrekkelig heft mellom armeringen og betongen forlenges armeringsstengene fra etasjen under 60 cm opp i fiberveggen. Disse skal også ta opp skjærpåkjenningene, nødvendig armeringsareal som trengs for å ivareta skjærkreftene er:

$$f_{ctk,0,05} = 2.0 \text{ N/mm}^2 \text{ (EC2-Tab.3.1)}$$

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{cc} * f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} = 1.13 \text{ N/mm}^2 \text{ (EC2-3.1.6(2))}$$

$$A_i = t * b = 2 * 10^5 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$A_{sv} \geq \frac{V_{ed} - 0.03 * f_{ctd} * A_i}{0.5 * f_{yd}}$$

$$A_{sv} \geq 161 \text{ mm}^2/\text{m}$$

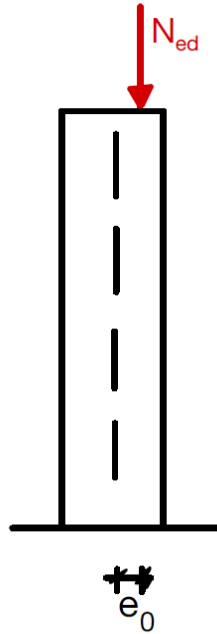
$$n = \frac{A_{sv}}{\pi * 6^2} = 1.42 \approx 2 \text{ jern/m}$$

Eksentrisitetsarmering

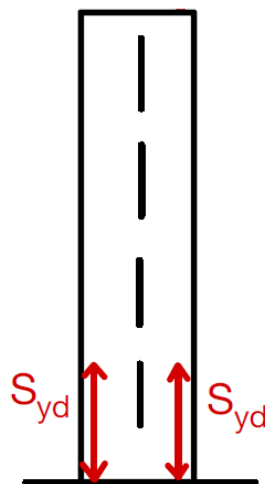
Som følge av skjevstilling av påkjenningen på veggen kan det dannes ett eksentrisitetsmoment. Minsteeksentrisiteten i henhold til EC2-6.1 er gitt ved:

$$e_o = \max\left(\frac{h}{30}, 20 \text{ mm}\right) = 20 \text{ mm}$$

$$M_{ed} = N_{ed} * e_o = 1.27 \text{ kNm/m}$$



Figur 11. Eksentrisitetsmoment



Figur 12. Opptak av eksentrisitetsmoment

Eksentrisitetsmomentet skal ivaretas av forankringsarmeringen, nødvendig armeringsareal er:

$$c_{nom} = 25 \text{ mm}$$

$$arm = t - 2 * \left(c_{nom} + \frac{\varphi}{2} \right) = 0.138 \text{ m}$$

$$S_{Rd} = f_{yd} * A_s$$

$$M_{ed} = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = S_{Rd} * arm \rightarrow M_{Rd} = f_{yd} * A_s * arm$$

$$A_{s,nødv} = \frac{M_{Rd}}{f_{yd} * arm} = 21.2 \text{ mm}^2 / m$$

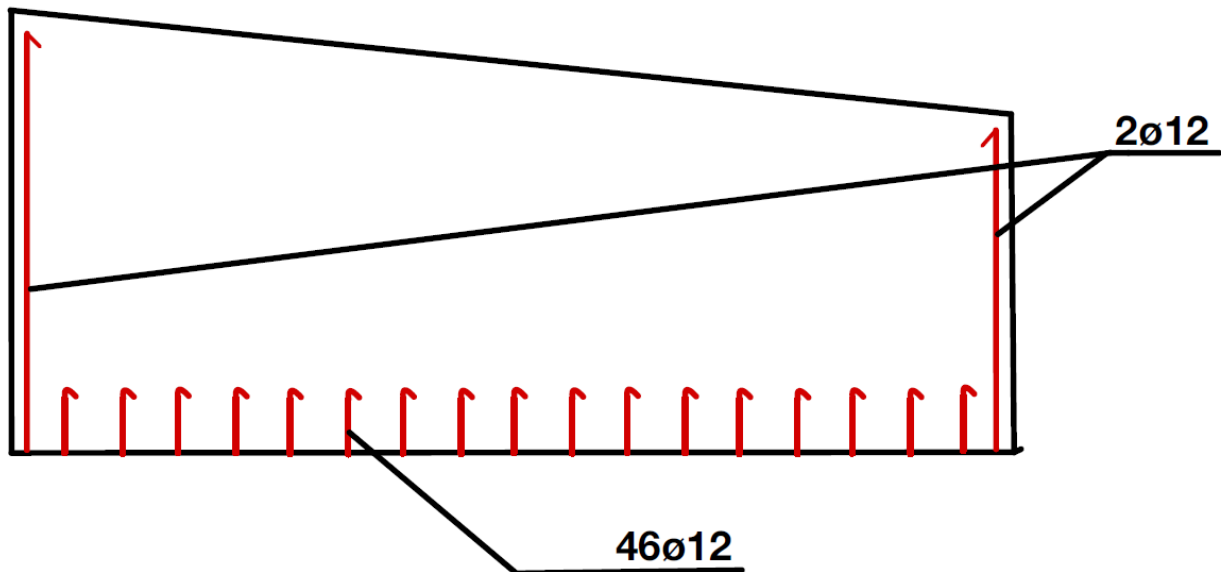
For å danne ett kraftpar er det nødvendig med armering på begge sider av veggen, det nødvendige armeringsarealet per side blir da 10.6 mm^2 .

$$n = \frac{8.6}{\pi * 6^2} = 0.08 \approx 1 \text{ jern per side/m}$$

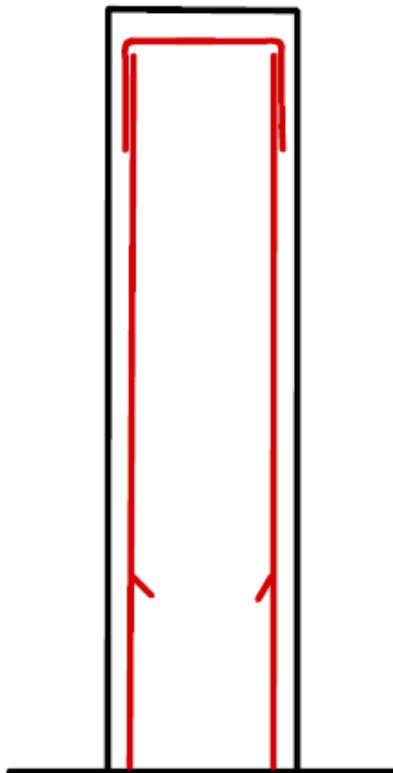
Totalt for begge sider av veggen blir armeringsmengden lik:

$$A_{s,eks} = 2 * \pi * 6^2 = 223 \text{ mm}^2 / m$$

Veggens stangarmering



Figur 13. Skisse av stangarmeringsløsning



Figur 14. Snitt av stangarmeringsløsning

3.2.3. Basaltfiberarmering

I henhold til EC2 skal vegger armeres med en minimumsarmering i vertikal og horisontal retning selv om de ytre påkjenningene kan tas oss at ett mindre armeringsareal.

Stangarmeringsmengden regnet ut i kapittel 3.2.2 trekkes ikke fra minimumsarmering bestemt i henhold til EC2.

Veggens geometri

Veggen har ikke kontinuerlig høyde, benytter største høyde som gir det mest konservative armeringsarealet.

$$t = 200 \text{ mm}$$

$$l = 9500 \text{ mm}$$

$$h = 4050 \text{ mm (Veggen har ikke kontinuerlig høyde, benytter største høyde)}$$

$$A_{c,v} = t * h = 0.81 * 10^6 \text{ mm}^2$$

$$A_{c,h} = t * l = 1.9 * 10^6 \text{ mm}^2$$

Vertikal armering

$$A_{s,vmin} = 0.002 * A_c = 1620 \text{ mm}^2 \text{ (EC2-9.6.2)}$$

Senteravstand:

$$s_v = \min(3 * t, 400) = 400 \text{ mm}$$

Horisontal armering

$$f_{ctm} = 2.9 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{s,hmin,enside} = \max\left(0.25 * \frac{A_{s,v}}{2}, \frac{0.15 * A_{c,h} * f_{ctm}}{f_{yk}}\right) = 1653 \text{ mm}^2 \text{ (EC2-9.6.3)}$$

Total horisontalarmering for begge sider av veggen blir

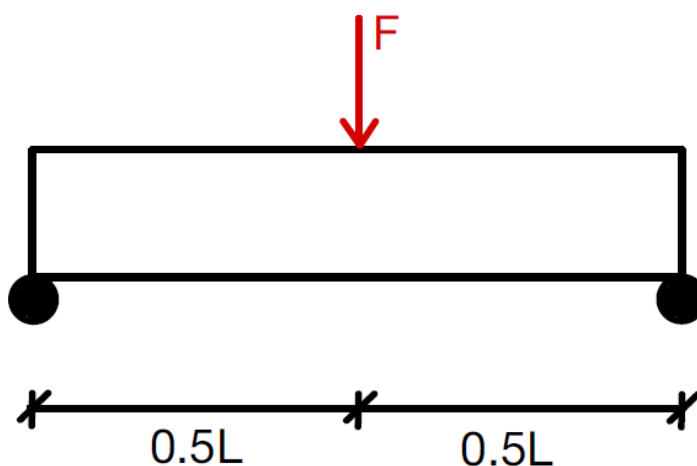
$$A_{s,hmin} = 2 * A_{s,hmin,enside} = 3306 \text{ mm}^2$$

Setter senteravstand på horisontalarmeringen til 300 mm.

$$s_h = 300 \text{ mm} \leq 400 \text{ mm} \rightarrow \text{Ok!}$$

Dosering av fiberarmering

For å bestemme nødvendig mengde basaltfiberarmering benyttes materialparameteren restbøyestrekfasthet. Til dette benyttes Crack mouth opening displacement-kurver, forkortet CMOD-kurver. Kurvene bestemmes fra ett trepunkts bøyeforsøk hvor en standardisert bjelke påsettes en punktlast som danner ett bøyemoment. Størrelsen på bøyemomentet ved ulike rissvidder bestemmer fibrenes reststrekfasthet. Disse testene og kurvene er konfidensielle og er derfor ikke gjengitt i oppgaven. For bruks- og bruddgrensetilstand er det bøyemomentet ved henholdsvis 0.5 mm og 2.5 mm som bestemmer basaltfibrenes restbøyestrekfasthet (Norsk betongforening, 2020). Det er reststrekfasthet ved 0.5 mm rissvidde som er benyttet i beregningene.



Figur 15. Trepunkts bøyetest

I tråd med armeringsmengdene beregnet ovenfor skal det kontrolleres at fibermengden som erstatter stangarmeringen har en reststrekfasthet tilsvarende stangarmeringens strekkapasitet. Strekkspenningen minimumsarmeringen kan ivareta er:

$$T_v = A_{s,vmin} * f_{yd} = 703.1 \text{ kN}$$

$$T_h = A_{s,hmin} * f_{yd} = 1434.8 \text{ kN}$$

$$\sigma_v = \frac{T_v}{A_{c,v}} = 0.87 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_h = \frac{T_h}{A_c} = 0.76 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fts} \geq 0.87 \text{ N/mm}^2$$

Fra fiberprodusentens trepunkts bøyetest ble det interpolert en kurve for den aktuelle betongkvalitetens restbøyestrekkefasthet. Fra restbøyestrekkefastheten avledes en verdi for reststrekkefastheten og dermed nødvendig fiberarmeringsmengde. Resultatet fra den interpolerte kurven var at 7.1 kg/m^3 har en reststrekkefasthet på 0.88 N/mm^2 og dermed tilstrekkelig kapasitet.

4. Praktisk utførelse

Når en vegg skal støpes er det noen hovedelementer som inngår i produksjonen. De mest sentrale er forskaling, armering og betong. Valget av forskaling blir bestemt ut ifra ønskede egenskaper til veggen. For vegger er det bordforskaling og systemforskaling som er mest brukt, men det finnes også andre metoder som klatreforskaling og glideforskaling (Byggstart, 2022). Bordforskaling bygges på stedet og er sammensatt av blant annet trevirke og finerplater. I forhold til andre forskalingsmetoder er dette en relativt tidkrevende prosess. Systemforskaling på den andre siden er raskt og effektivt å sette opp, samt å fjerne etter støp. Det er systemforskaling som ble brukt på aktuelle vegger i prosjektet.



Figur 16. Systemforskaling. Foto: Thomas Hille

Når det kommer til armering, skilles det vanligvis mellom tre typer. Tradisjonell stangarmering er mest utbredt og er den armeringsmetoden eurokoden hovedsakelig baserer seg på. De to andre typene er spennarmering og fiberarmering. Spennarmering spennes opp med strekkraft slik at det blir trykkspenning i betongen. Denne armering brukes typisk når det er lange spenn eller store strekkpåkjenninger.

Fiberarmering produseres i flere typer materialer, i tillegg til basaltfiber blir det også brukt blant annet polymerfiber og stålfiber. Polymerfiber er en strukturell fiber som brukes til armering av betong hvor konstruksjonen ikke utsettes for langtidsbelastning, fordi belastning over lengre tid vil svekke fiberens bæreevne (Betongsentrum, 2022). Det er ifølge norsk betongforenings publikasjon 38 ikke dokumentert at syntetiske fibre gir en økt kapasitet mot skjærbrudd, i motsetning til stålfiber som er godt dokumentert i samme publikasjon (Norsk betongforening, 2020). Bruken av stålfiber er hovedsakelig begrenset til armering av plasstøpte gulv på grunn og i sprøytebetong.

For å velge hvilken type betong som bør brukes spiller det inn flere faktorer, deriblant fasthetsklasse og bestandighetsklasse. Valg av bestandighetsklasse følger nasjonalt tillegg NS-EN 206:2013+NA:2014 og velges ut ifra eksponeringsklasse og materialkrav. Fasthetsklassen bestemmes ut ifra nødvendig opptredende påkjenninger, men er ofte noe overdimensjonert. Ofte velges B30 som laveste fasthet for å forsikre seg mot bestandighetsproblematikk, se vedlegg E.1.

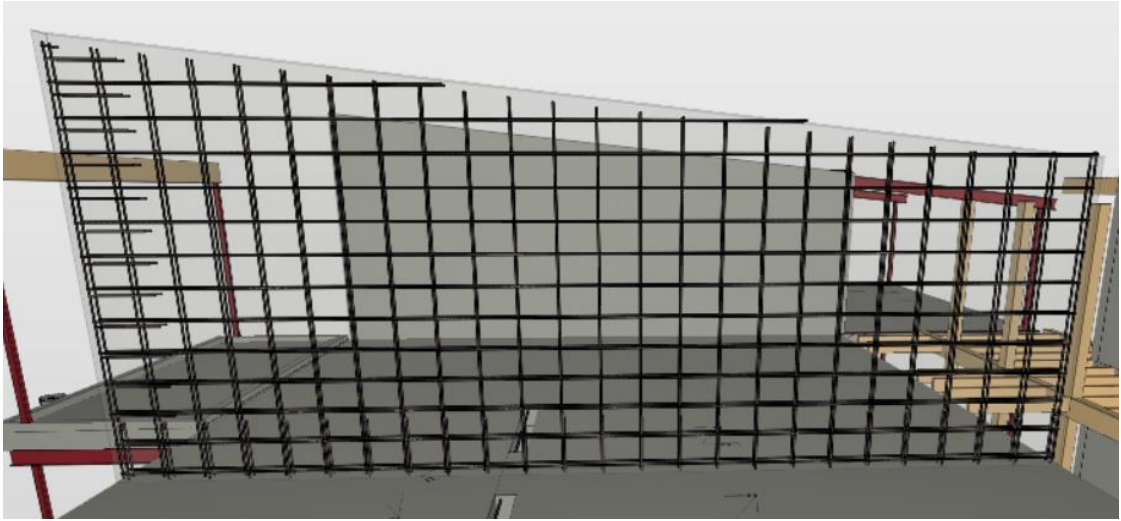
På Moy Terrasse ble det støpt to geometrisk identiske vegger med ulik armering. For at sammenligningen skulle ha færrest mulig variabler, ble det brukt samme type forskaling, betongkvalitet, vibrering, overflatebehandling og støpemetode. Disse var henholdsvis systemforskaling, B30 M60 betong, betongvibrator, sparkel og maling, og pumpebil.



Figur 17. Moy Terrasse. Foto: Thomas Hille

4.1.Tradisjonelt armert

Prosesen startet med at betongarbeideren satt opp den ene siden av forskalingen. Da stangarmeringen ankom byggeplassen, ble den bundet og plassert i forskalingsformen av en jernbinder. Når armeringen var forankret og plassert i henhold til armeringstegningene ble forskalingen lukket. Da betongen ankom byggeplassen, ble den overført fra betong- til pumpebilen og støpt ut. Underveis i støpen ble det brukt en betongvibrator for å sikre at det ikke oppsto noen luftlommer og at betongen ble tilstrekkelig komprimert (Thue, 2019). For å sikre at betongen hadde herdet nok ble forskalingen stående ett døgn.



Figur 18. Armering i tradisjonell vegg. Illustrasjon: Solibri

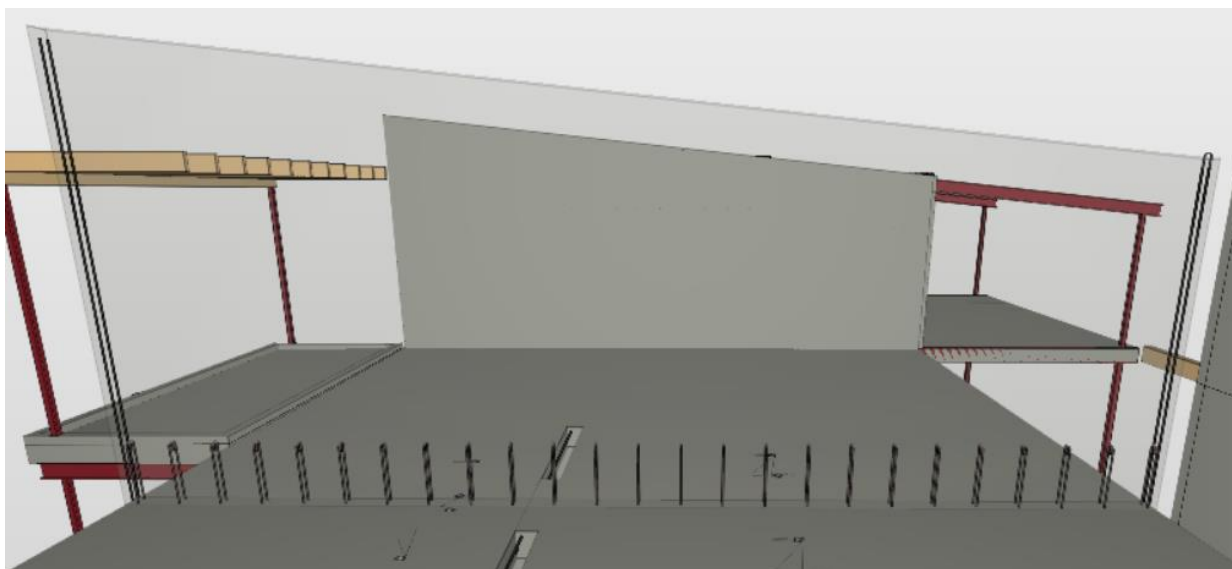


Figur 19. Slakkarmering i tradisjonell vegg. Foto: Kjell Nordli

4.2. Basaltfiber

4.2.1. Forarbeid

Aktuell vegg består i hovedsak av basaltfiber, men inneholder også noe tradisjonell armering som beregnet i kapittel 3.2. Slakkarmeringen er plassert i strekksonene til veggen for å ta opp horisontale krefter. Som nevnt tidligere er det ført opp forankringsarmering fra etasjen under for å overføre kreftene nedover i konstruksjonen.



Figur 20. Slakkarmering i basaltvegg. Illustrasjon: Solibri



Figur 21. Tradisjonell armering i basaltvegg. Foto: Kevin Bach

4.2.2. På blandeverket

Proessen for å støpe betongveggen med fiberarmering startet på blandeverket. Den valgte betongen ble tilsatt fiber med en frekvens på omtrent 5 kg per minutt frem til beregnet mengde var oppnådd. For å hindre at fiberen skal klumpes i betongen, er det anbefalt fra leverandøren av basaltfiber Reforcetech AS at det blir brukt en luftkompressor, se vedlegg E.2. Siden basaltfiber fortsatt er relativt nytt, er det få blandeverk som per dags dato har tilgjengelig det utstyret som er anbefalt for å få en best mulig spredning av fiberen. Derfor ble fiberen tilsatt betongen manuelt.



Figur 22. Innblanding av fiber. Foto: Thomas Hille

Når fiber og betong ble blandet roterte betongbilens trommel på høy hastighet for å sikre en god fordeling av fibere i hele betongen. Det er et minimumskrav fra ReforceTech at den ferdige sammensetningen skal blandes i 6 minutter, se vedlegg E.2. Dette ble godt ivaretatt med en transporttid fra blandeverket til byggeplassen på omtrent 25 minutter. Under transport kan trommelen kjøres på normal hastighet.



Figur 23. Innblanding og overføring til betongbil. Foto: Mats Brastad

4.2.3. Overføring betongbil til pumpe

Ved ankomst på byggeplassen ble betongblandingen tømt over i en pumpebil gjennom en sil for å hindre at større klumper tettet slangen. Under overføringen ble det imidlertid behov for å løse opp noen opphopninger av fiberarmering. Dette kan ha en sammenheng med måten fiberen ble tilsatt betongen. Ved å følge anbefalt metode nevnt i kapittel 6.2.1 kan det trolig minimere sannsynligheten for disse opphopningene.



Figur 24. Opphopning av basaltfiber. Foto: Thomas Hille

4.2.4. Støp

For å følge anbefalingene fra ReforceTech om minst mulig fallhøyde, ble det brukt en 4 meter lengre slange på basaltveggen enn på den tradisjonelt armerte veggen, se vedlegg E.2. I tillegg sørget betongarbeiderne for at slangen ble beveget flere ganger underveis i støpen for å få en jevn fordeling av fibere.

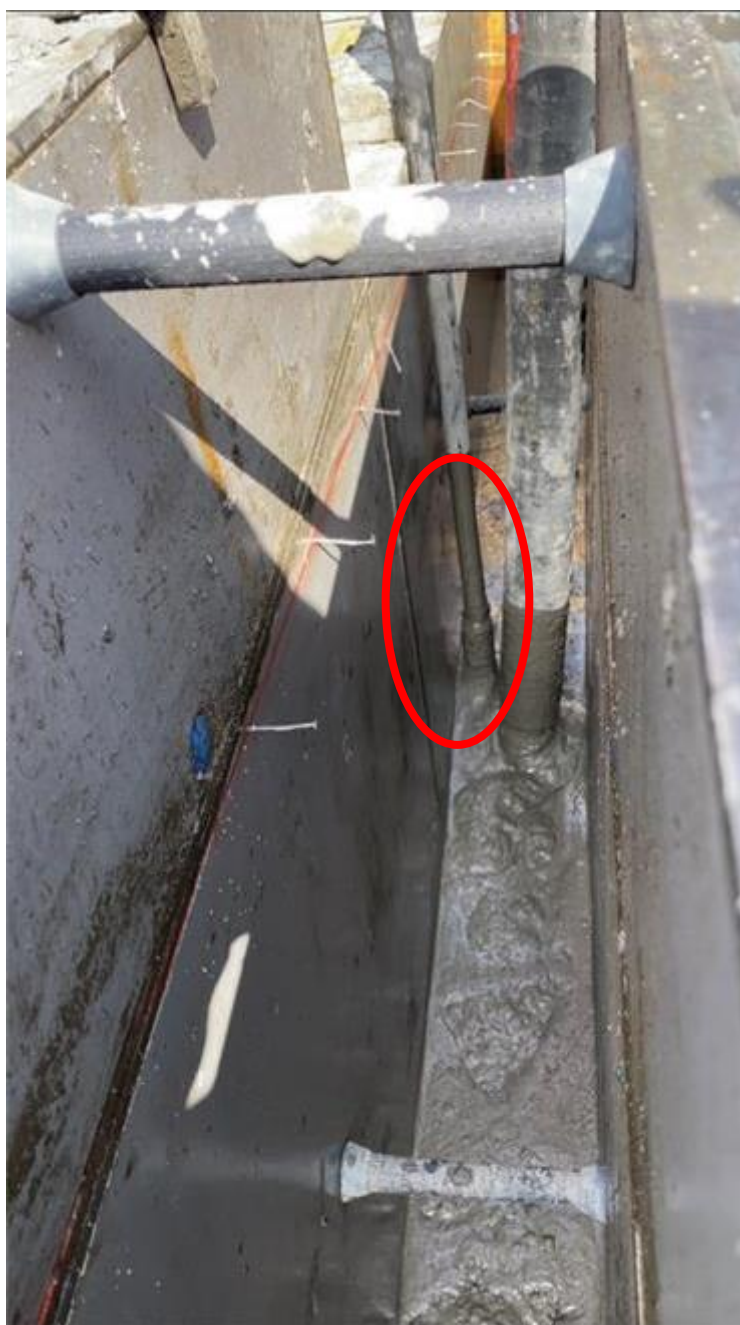


Figur 25. Støp basaltvegg. Foto: Mats Brastad



Figur 26. Betong- og pumpebil. Foto: Thomas Hille

Som nevnt i eksemplene beskrevet i kapittel 2.2. ble det brukt selvkomprimerende betong på lignende vegger. På grunn av helningen i toppen av aktuell vegg, ble det bestemt å bruke vanlig betong istedenfor selvkomprimerende. Derfor var det nødvendig med noe vibrering med betongvibrator under utstøpingen.



Figur 27. Vibring av betong. Foto: Mats Brastad

4.2.5. Etterarbeid og resultat

Etter at forskalingen ble fjernet, manglet bare overflatebehandling av veggen i form av sparkel og maling.



Figur 28. Basaltvegg før overflatebehandling. Foto: Kjell Nordli

Tilbakemeldingene fra driftsleder på betong og andre deltagere på støpen var at selve utstøpingen tilsvarte den samme arbeidsmengden og tidsbruken som for betong uten basaltfiber. Det som utgjorde størst forskjell ved denne metoden, var innsparing av tid ved forenklet oppsett og lukking av forskaling på grunn av lite tradisjonell armering. Resultatet var tilnærmet identisk med den tradisjonelt armerte veggen.

5. Økonomi

5.1. Materialkostnader

Betong med minimumsarmering beregnet i henhold til NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2021 er $\phi 12$ c300 horisontalt og $\phi 12$ c400 vertikalt. Det gir følgende armeringsbehov per kubikk betong:

$$11 \frac{m}{m^2} * 0.888 \frac{kg}{m} = 9.8 \text{ kg/m}^2$$

$$\frac{9.8 \text{ kg/m}^2}{0.2 \text{ m}} = 49 \text{ kg/m}^3$$

Celsa selger B500NC armeringsstål til omtrent 14 kr/kg, se vedlegg E.3., med ett armeringsbehov på 49 kg/m^3 tilsvarer dette en materialkostnad på 686 kr/m^3 .

Listepriisen for MiniBars er 102 kr/kg hos ReforceTech, se vedlegg E.4., med et armeringsbehov på 6 kg/m^3 tilsvarer dette en materialkostnad på 612 kr/m^3 .

Ribe betong selger betong med kvaliteten B30 M60 for 1575 kr/m^3 (Ribe betong, 2022).

Den totale materialkostnaden per kubikk blir da 2261 kr/m^3 for tradisjonelt armert betong og 2187 kr/m^3 for fiberarmert betong.

Tabell 1. Materialkostnader pr m^3 betong, B500NC som referanse.

Materialkostnader pr m^3 armert betong				
Parameter	Enhet	B500NC	MiniBars	Besparelse
Kostnad	kr/m^3	2261	2187	74

5.2. Arbeidskostnader

Før betongen kan støpes og forskalingen lukkes, må stålarmeringen bindes og settes på plass av en jernbinder. Kostnaden for dette ligger på omtrent 9 kr/kg, se vedlegg E.5. Dette tilsvarer en arbeidskostnad på 441 kr/m^3 . Før støpingen må basaltfibrene blandes inn i betongen på blandeverket, dette koster 6 kr/kg, som tilsvarer en arbeidskostnad på 36 kr/m^3 .

Tabell 2. Arbeidskostnader pr m³ betong, B500NC som referanse.

Arbeidskostnader pr m ³ betong, B500NC som referanse				
Parameter	Enhet	B500NC	MiniBars	Besparelse
Kostnad	kr/m ³	441	36	405

5.3. Totalkostnader

Summeres material- og arbeidskostnader, har stålmert betong en totalkostnad på 2702 kr/m³, mens basaltfiberarmert betong har en totalkostnad på 2223 kr/m³. Dette tilsvarer en kostnadsreduksjon på 479 kr/m³ eller 17.8% om det benyttes basaltfiber fremfor stangarmering i stål som armeringsmateriale. Den totale kostnadsreduksjon for veggen på 6.75 m³ blir dermed 3233 kr.

Tabell 3. Totalkostnad pr m³ betong, B500NC som referanse.

Totalkostnad pr m ³ betong, B500NC som referanse					
Parameter	Enhet	B500NC	MiniBars	Besparelse	Besparelse i %
Kostnad	kr/m ³	2702	2223	479	17.8

6. Miljø

6.1. FNs bærekraftsmål

FNs bærekraftsmål er en arbeidsplan bestående av 17 punkt som ved hjelp av internasjonalt samarbeid skal utrydde fattigdom, få slutt på ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030 (FN-sambandet, 2015).

Når det gjelder byggebransjen er det punkt 13 om å stoppe klimaendringene som er spesielt relevant. Klimagassutslippene i verden øker for hvert år og hadde i perioden 2010-2019 de høyeste utslippene noen gang (Regjeringen, 2022). En vesentlig del av denne økningen skyldes byggebransjen og det er derfor behov for å utforske nye materialer, samt nye byggeprosesser slik at spesielt karbonutslippet blir lavere enn det er nå.



Figur 29. FNs bærekraftsmål. Illustrasjon: Regjeringen

6.2.EPD

Environmental product declaration er en miljødeklarasjon som kortfattet oppsummerer og tallfester miljøprofilen til ett produkt eller en tjeneste. Dokumentet baserer seg på en life-cycle assessment som omfatter hele produktets levetid og er utarbeidet i henhold til ISO 14025 Environmental Labels and Declarations Type III. Den felles utformingen skal gjøre det lettere for brukeren å drive med sammenligning av produkter og sikre at vurderinger av produktenes miljøprofil skjer på likt grunnlag (EPD Norge, 2022).



Figur 30. EPD for MiniBars. Illustrasjon: EPD Norge

6.3. Systemgrenser

EPDen deles inn i fem systemgrenser:

Produksjonsfasen tar for seg utslippene og ressursbruken knyttet til produksjonen av produktet, dette inkluderer uthenting av råmateriale, transport av råmateriale til fabrikk og omforming av råmateriale til klart produkt.

Installasjonsfasen tar for seg utslippene og ressursbruken knyttet til montering av produktet, dette inkluderer transport fra fabrikk til byggeplass og monteringen av produktet.

Brukerfasen tar for seg utslippene og ressursbruken i perioden mellom produktet er montert og demontert, dette inkluderer utslipp og energibruk tilknyttet hverdagsbruk, reparasjon og utskifting av produktet. Denne systemgrensen er ikke aktuell for hverken stang- eller fiberarmering.

Demonteringsfasen tar for seg utslippene og ressursbruken knyttet til demontering av produktet, dette inkluderer nedmontering av produktet, transport fra byggeplass til avfallsdeponiet, avfallsprosessering og avhending.

Resirkuleringsfasen tar for seg utslippene og ressursbruken knyttet til gjenbruk og resirkulering av produktet.

Module	Product stage			Construction process stage		Use stage							End of life stage				Resource recovery stage
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Modules declared	x	x	x	x	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	x	x	x	x	x

Figur 31. Systemgrense B500NC. Illustrasjon: Celsa

System boundaries (X=included, MND= module not declared, MNR=module not relevant)																
Product stage			Assembly stage		Use stage							End of life stage				Beyond the system boundaries
Raw materials	Transport	Manufacturing	Transport	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	MND	X	MND	X

Figur 32. Systemgrense MiniBars. Illustrasjon: EPD Norge

Product stage				Construction installation stage	User stage							End of life stage				Beyond the system boundaries
Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport	Konstruksjons/ installasjonsfase	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskiftinger	Renovering	Operasjonell energibruk	Operasjonell vannbruk	Demontering	Transport	Avfallsbehandling	Avfall til sluttbehandling	Gjenbruk/gjenvinning/resirkulering-potensiale
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND

Figur 33. Systemgrense B30 M60. Illustrasjon: Ribe Betong

6.4. Miljøinnvirkninger

I tråd med FNs bærekraftsmål 13 presentert i kapittel 6.1 fokuserer miljøanalysen på produktenes effekt på global oppvarming, målt i mengde CO₂-utslipp. Det er utslippene fra produksjonsfasen som legges til grunn i miljøanalysen. Se vedlegg F.1-F.3 for beregningsgrunnlag.

Tabell 4 og 5 presenterer isolerte utslipp fra materialene. Se vedlegg G.2 for utregning av utslippsfaktor

Tabell 4. Betong

Betong	Mengde (m ³)	Utslippsfaktor (kg CO ₂ -ekv/m ³)	Utslipp (Tonn CO ₂)
B30 M60	6.75	220	1.49

Tabell 5. Armering

Armering	Mengde (kg)	Utslippsfaktor (kg CO ₂ -ekv/kg)	Utslipp (Tonn CO ₂)
B500NC	330.75	0.358	0.12
MiniBars	40.5	2.11	0.085

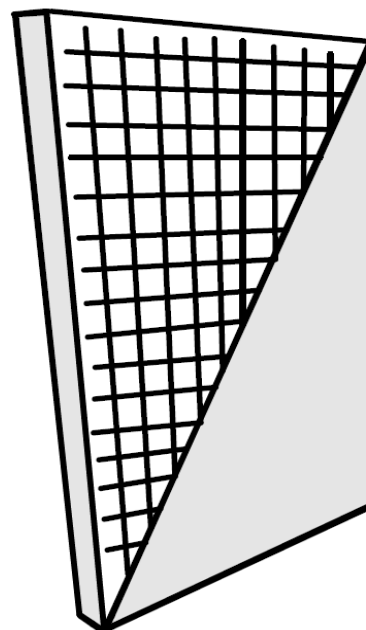
Tabell 6 presenterer det totale utslippet dersom det armeres med stangarmering i stål. Denne veggen har ett samlet utslipp på 1.61 tonn CO₂.

Tabell 7 presenterer det totale utslippet dersom det armers med basaltfiber. Denne veggen har ett samlet utslipp på 1.58 tonn CO₂.

Dette tilsvarer en reduksjon på 1.9%, eller 30 kg CO₂, noe som tilsvarer utslippet fra en bensinbil som har kjørt fra Kristiansand til Stavanger (Statistisk sentralbyrå, 2016).

Tabell 6. Utslipp for stålmert vegg

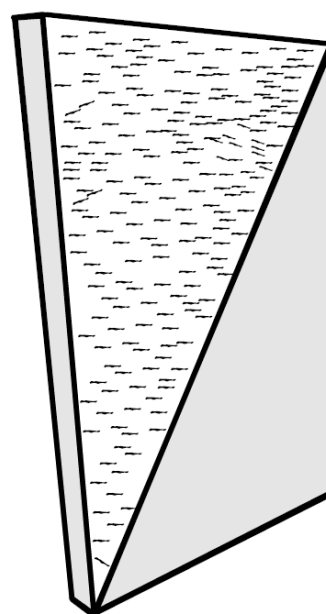
Materiale	Utslippsfaktor (kg/CO ₂ -ekv/m ³)	Utslipp (Tonn CO ₂)
B30 M60	220	1.49
B500NC	17.54	0.12
Sum	237.54	1.61



Figur 34. Skisse av stangarmert betong

Tabell 7. Utslipp for fiberarmert vegg

Materiale	Utslippsfaktor (kg/CO ₂ -ekv/m ³)	Utslipp (Tonn CO ₂)
B30 M60	220	1.49
MiniBars	12.66	0.085
Sum	232.66	1.58



Figur 35. Skisse av fiberarmert betong

6.4.1. Gjenbruk

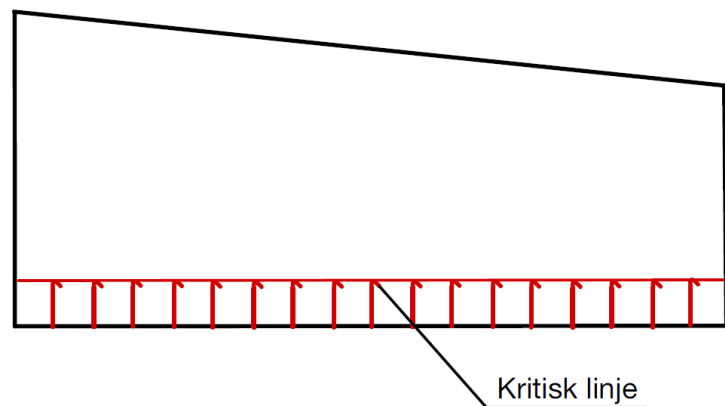
For at ett produkt skal være bærekraftig er det viktig at det har et sekundært bruksområde utover sin originale hensikt. En andel av skrapmetallet fra resirkulering av det demonterte armeringsstålet kan smeltes om og erstatte noe av råmateriale i armeringsproduksjon eller andre lignende prosesser. Betongen må knuses og separeres fra armeringen før skrapmetallet kan hentes ut. Det er ikke nødvendig å skille basaltfiberen fra betongen når dette skal gjenbrukes, da den fiberarmerte betongen knuses og brukes som erstatning for grus i oppbygningen av veier.

7. Diskusjon

7.1. Beregninger

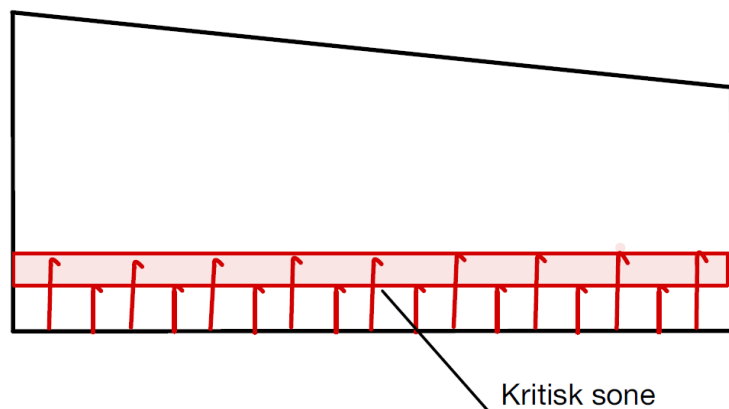
Dimensjonering av nødvendig fibermengde i betong baserer seg på interpolasjon av kurver med flere variabler. Det er med andre ord en komplisert prosess som det trengs erfaring for å mestre. Det er derfor knyttet stor usikkerhet til fibermengden bestemt i kapittel 3.2.3. Sammenlignet med rapporten fra Concribe ble fibermengden regnet ut av gruppen større. Dette skyldes i hovedsak at det ble benyttet ulike minimumsarmeringskrav i beregningsgrunnlaget. Siden Concribe har mer erfaring innenfor dimensjonering av fiberkonstruksjoner ble det besluttet at det var deres doseringsanbefaling som skulle legges til grunn i oppgaven. Dette sikret en mer optimalisert fibermengde.

Fordi veggen har forankringsarmering i samme høyde langs hele dens lengderetning, var det knyttet nysgjerrighet til om det kunne oppstå en kritisk linje i overgangen mellom hvor veggen hadde forankringsarmering og ikke. Disse sonene vil ha forskjellige fastheter og det er ukjent hvordan kraftoverføringen vil skje i denne overgangen.



Figur 36. Kritisk linje i veggen

Dersom dette hadde vist seg å være kritisk hadde en mulig løsning på dette problemet vært å legge forankringsarmeringen i forskjellige høyder og på denne måten lage en sone hvor spenningen fordeles over ett større område og på den måten gjør kraftoverføringen mellom sonene mindre.



Figur 37. Kritisk sone i veggen

Spørsmålet om dette ble rettet til ReforceTech, som svarte med at dette problemet ikke hadde vært observert før. Årsaken til at dette ikke var ett praktisk problem var at basaltfiberarmeringen lå spredt overalt i betongen, også rundt armeringsjernene. På den måten sørget basaltfibrene for en fordeling av spenningene og hindret at det ble en stor overgang i fasthet mellom sonene.

7.2. Praktisk utførelse

Under den praktiske utførelsen ble det gjort noen erfaringer som kan diskuteres.

Et av diskusjonsmomentene var hvilken betongresept som skulle brukes. Det ble vurdert noen typer kvalitet og bestandighetsklasser, deriblant B35 M40 for å redusere vannmengde, samt forskjellige tilsetningsstoffer som flygeaske for å redusere CO₂-mengden i betongen.

Et annet punkt var om det skulle brukes tobb eller pumpebil for å støpe betongen. På den tradisjonelt armerte veggen kunne det blitt brukt tobb, men basert på erfaringene til BRG, vil dette ta lengre tid. Det vil i tillegg kreve en ekstra arbeider til å styre kranen for å løfte tobben. Ved å bruke pumpebil frigjøres både arbeideren og kranen som da kan fokusere på andre oppgaver. Når det kommer til basaltveggen var det som tidligere nevnt behov for en lengre slange for å redusere fallhøyden til betongen. Siden det ble brukt pumpebil, var det fort gjort å sette på en lang nok forlenger. Det kunne også blitt satt på en forlenger på tobben, men tilhørende standardslange er kun på 2 meter noe som ville gitt en høyere fallhøyde enn anbefalt (Normann Olsen maskin, 2022).

Siden veggen med basaltfiber var den siste veggen som skulle støpes i bygget, var det mulig å la den herde noen dager ekstra. Forskalingen ble derfor stående i omtrent tre dager etter støp for å få minst mulig svinnriss. Noe av grunnen til at forskalingen ble stående så lenge, kan komme av lite erfaring om basaltfiber og tilhørende egenskaper hos entreprenøren. Det må derimot påpekes at det å la systemet stå lengre enn ett døgn under normale forhold, kan påvirke fremdriften for prosjektet i stor grad dersom dette skulle vært nødvendig. Det ble imidlertid erfart at forskalingen kunne vært fjernet etter ett døgn og blitt sprøytet med en membranherder istedenfor.

Ved støp av veggen ble det som nevnt i kapittel 4.2.4. brukt vanlig betong fremfor selvkomprimerende. Dette gjorde at det var behov for noe vibrering underveis i støpen. Tilsynelatende påvirket ikke vibreringen orienteringen til fibrene, men det er vanskelig å si uten å ta en prøve av veggen.

Under befaring hos Ribe Betong AS kom det som tidligere nevnt frem at blandeverk i Norge ikke har det utstyret som er nødvendig for å følge anbefalt innblandingsmetode av basaltfiber i betongen. Hvis etterspørselen av basaltfiberarmerte konstruksjoner øker, vil det muligens være nødvendig for blandeverkene å tilpasse utstyret sitt slik at doseringen og metode for innblanding blir mer nøyaktig og effektiv. Dette gjelder spesielt konstruksjoner som krever større fibermengde enn det som ble brukt i veggen på dette prosjektet.

I praksis viser det seg at generelt i byggebransjen mangler det erfaring knyttet til bruk av basaltfiber. Mange er interesserte i å lære mer om denne typen fiber, hvilke bruksområder den har, samt hva begrensningene er. Det er derimot slik at det ligger trygghet i å utføre arbeid på den tradisjonelle måten man vet fungerer. For å skape mer trygghet vil det være viktig å spre informasjon om basaltfiber ut til ingeniører og entreprenører slik at de kan gjøre en egen vurdering hvorvidt basalt kan være et alternativ for deres konstruksjoner.

7.3.Økonomi

Resultatene knyttet til kapittel 5 viser at det var reduksjonen i arbeidskostnader som i hovedsak gjorde basaltfiberarmering til ett rimeligere alternativ. Innblanding av fiber på blandeverket er en mye mindre arbeids- og tidskrevende prosess enn binding og montering av stangarmring. Med arbeidskostnader tilsvarende bare 8.2% av de på den stangarmerte veggen. Den frigitte tiden gjør at betongarbeiderne kan fokusere på annet arbeid og potensielt skape raskere fremdrift for prosjektet.

I tillegg til de direkte kostnadsreduksjonene med å gå fra stang- til basaltfiberarmering kan bytte av armeringsmateriale føre med seg noen gunstige indirekte kostnadsreduksjoner. Økt fremdrift kan føre til at prosjektet ferdigstilles tidligere, slik at det vil være mulig å overføre ressursene fra byggeplassen til andre prosjekter.

Det knyttes imidlertid noe usikkerhet til kostnadene relatert til innblanding av fiber på blandeverkene. Som nevnt i kapittel 7.2. vil en økning i basaltfiberarmerte konstruksjoner føre til ett behov for å investere i relevant utstyr. På den ene siden kan denne investeringen føre til økte priser på kort sikt for å tjene inn utgiften av utstyret. På den andre siden kan prisen på

lang sikt synke da innblandingen blir mer effektiv og automatisert. I tillegg vil blandeverk med anbefalt utstyr stille sterkere i anbud ved å kunne tilby større mengder på kortere tid.

Siden stangarmering i stål kun finnes i bestemte dimensjoner, kan dette føre til at det må benyttes ett armeringstverrsnitt som er større enn nødvendig. Dette fører til at kapasiteten til konstruksjonen blir større og dermed dyrere enn nødvendig. Basaltfiberarmeringen er mer fleksibel når det kommer til dosering, noe som gjør det mulig å unngå overflødig materiale.

7.4. Miljø

For entreprenører er det produksjonsfasen, systemgrenser A1-A3 og CO₂-utslippene som er mest relevant når det skal utarbeides klimaregnskap. Et godt klimaregnskap er viktig for at det skal være mulig å sette inn effektive tiltak for å redusere byggeprosjektene klimafotavtrykk. Det er i miljøanalysen derfor valgt å fokusere på disse parameterne.

Resultatene fra miljøanalysen viser at det er noe miljøgevinst ved å bytte ut stangarmering i stål med basaltfiberarmering. Den forteller også at det er betongen som i hovedsak bidrar til CO₂-utslippene. Isolert sett står stål- og basaltfiberarmeringen for henholdsvis 7.5% og 5.4% av veggens karbonavtrykk. Etter hvert som miljøkravene er forventet å bli strengere vil det bli behov for å finne nye løsninger som møter disse kravene (Nikolaisen, 2021). Siden betongen utgjør den største delen av utslippet er det her det bør gjøres tiltak. For å redusere mengden CO₂-utslipp fra betongen kan en andel av sementen i resepten byttes ut med tilsetningsstoffer som for eksempel flygeaske. Som regel er mer miljøvennlige betongkompositter dyrere, men i dette tilfellet blir prisforskjellen gjort opp for ved å bruke basaltfiber istedenfor tradisjonell slakkarmering. På denne måten kan klimafotavtrykket reduseres ved å bruke en kombinasjon av tilsetningsstoffer og basaltfiber, samtidig som det er økonomisk gunstig.

Som et eksempel på hvordan dette kan bli gjort, er den totale økonomiske besparelsen på aktuell basaltvegg 479 kr/m³, mens pristillegget for betong i lavkarbonklasse A er på 120 kr/m³ (Ribe betong, 2022). Dette tilsier en besparelse på 359 kr/m³ på en mer miljøvennlig vegg sammenlignet med en tradisjonelt armert vegg med standard betong.

8. Konklusjon

Resultatene fra parameterne som er undersøkt og drøftet i denne rapporten viser at basaltfiber har flere positive sider. Kombinasjonsløsningen brukt i forsøket viser reduserte kostnader på grunn av lavere arbeidskostnader, i tillegg til noe lavere utslipp av CO₂ i forhold til standardveggen. For vegger primært påkjent av trykkrefter er en kombinasjon av slakkarmering og basaltfiberarmering et godt alternativ sammenlignet med en vegg bestående av kun tradisjonell slakkarmering.

Basaltfiberarmering er et relativt nytt materiale i armeringssammenheng, som innehar gode evner til å motstå riss i betong. Foreløpig knyttes det noe usikkerhet til bruksområder og begrensninger i byggebransjen. Dette fordi det finnes relativt lite litteratur og retningslinjer om bruk av basaltfiber som armeringsmateriale. På grunn av dette velges ofte fiberarmering bort til fordel for stangarmering av stål, det trygge valget.

Referanser

Betongsentrum (2022) *Fiberarmering*. Tilgjengelig fra:

<https://www.betongsentrum.no/fiberarmering/> (Hentet: 28. april 2022)

BRG (2022) *Om oss*. Tilgjengelig fra: https://www.brgruppen.no/om_oss (Hentet: 15. mai 2022).

Byggstart (2022) *Forskaling: En komplett guide (pris, regler, tips)*. Tilgjengelig fra:

<https://www.byggstart.no/guide/forskaling> (Hentet: 28. april 2022).

Dolven, A. S (2019) *Jernbinder*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/jernbinder> (Hentet: 07. mai 2022).

EPD Norge (2022) *Hva er en EPD?* Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (Hentet: 06. mai 2022).

Evjen, R og Kroknes, E. H (2020) *Fiberarmert betong*. Bacheloroppgave, NTNU. Tilgjengelig fra:

<https://docplayer.me/198237488-Fiberarmert-betong-fiber-reinforced-concrete-trondheim-mai-tbyg-3016-bacheloroppgave-bygg-roger-bergh-navn-studenter.html> (Hentet: 08. april 2022).

FN-sambandet (2015) *FNs bærekraftsmål*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (Hentet: 05. mai 2022).

Grønmo, S (2020) *Livsløpsanalyse*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/livsl%C3%B8psanalyse>

(Hentet: 07. mai 2022).

Hokksund betong (2016) *Selvkomprimerende betong (SKB)*. Tilgjengelig fra:

<https://hokksundbetong.no/selvkomprimerende-betong-skb/> (Hentet: 07. mai 2022)

Lahn, B og Olerud, K (2020) *CO2-ekvivalenter*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/CO2-ekvivalenter>

(Hentet: 07. mai 2022).

Larsen, P. K, Clausen, A. H og Aalberg, A (1993) *Stålkonstruksjoner. Profiler og formler*. 3. utg. Trondheim: Fagbokforlaget.

Nikolaisen, H.V (2021) *Statsbygg: Gi byggebransjen strengere klimakrav*. Tilgjengelig fra:

<https://www.tu.no/artikler/statsbygg-gi-byggebransjen-strengere-klimakrav/514243> (Hentet: 14. mai 2022).

Normann Olsen Maskin (2022) *Betongtobb, veggtobb CT-N med slange*. Tilgjengelig fra:

<https://nom.no/product/betongtobb-ct-n/> (Hentet: 14. mai 2022).

Norsk betongforening (2020) *Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner*.

Osnes, A (2020) *Tobb*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/tobb> (Hentet: 07. mai 2022).

PERI Norge (2022) *Membranherder*. Tilgjengelig fra: <https://www.peri.no/produkter/forbruks-artikler/formolje/membranherder.html> (Hentet: 07. mai 2022).

ReforceTech (2012) *Construction and in-situ*. Tilgjengelig fra: <https://reforcetech.com/applications/construction-and-in-situ/> (Hentet: 22. april 2022).

ReforceTech (2022) *MINIBARS™*. Tilgjengelig fra: <https://reforcetech.com/wp-content/uploads/2016/12/Basalt-MiniBars.pdf> (Hentet: 21. april 2022).

Regjeringen (2022) *13. Stoppe klimaendringene*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/fns-barekraftsmal/13.-stoppe-klimaendringene/id2590202/?expand=factbox2596967> (Hentet: 05. mai 2022).

Seehusen, J. (2014) *Nå brukes «gråstein» som betongarmering*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/na-brukes-grastein-som-betongarmering/226528> (Hentet: 06. april 2022).

Selbekk, R. S. (2021) *Basalt*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/basalt> (Hentet: 06. mai 2022).

Sim, J, Park, C og Moon, Y. D. (2005) *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836805000454?via%3Dihub> (Hentet: 21. april 2022).

Standard Norge (2021) *Eurokode 2 – Prosjektering av betongkonstruksjoner – Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*.

Statistisk sentralbyrå (2016) *Drivstofforbruk og utslipp per kjørte kilometer for et utvalg av trafikksituasjoner og kjøretøygrupper. 2016. g/km*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/318322/drivstofforbruk-og-utslipp-per-kjorte-kilometer-for-et-utvalg-av-trafikksituasjoner-og-kjoretoygrupper.2016.g-km> (Hentet: 06. mai 2022).

Thue, J. V. (2019) *Betong*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/betong> (Hentet: 03. mai 2022).

Toldnæs, J. P. (2022) *Globale oppvarmingspotensialer*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/globale_oppvarmingspotensialer (Hentet: 07. mai 2022).

Unicon (2022) *Lavkarbonbetong*. Tilgjengelig fra: <https://www.unicon.no/produkter-tjenester/lavkarbonbetong/> (Hentet: 07.mai 2022).

Vedlegg

Vedlegg A: Artikkel

Vedlegg B: Plakat

Vedlegg C: Doseringsrapport Concribe

Vedlegg D: Beregningsgrunnlag RIB. Moy terrasse

Vedlegg E: E-Post- og telefonkorrespondanse

- E.1 Mailkorrespondanse Rambøll
- E.2 Blandeinstrukser, Reforcetech
- E.3 Materialpris stål, Celsa Steel Service
- E.4 Pris basaltfiber, ReforceTech
- E.5 Arbeidskostnad slakkarmering, BRG

Vedlegg F: Miljødeklarasjon

- F.1 EPD B30M60, Ribe betong
- F.2 EPD B500NC, Celsa steel service
- F.3 EPD MiniBars, ReforceTech

Vedlegg G: Beregning av utslippsfaktor