



CHALMERS

Blåmusselskal – ett hållbart alternativ till den kontroversiella cementen

En jämförande studie av substitution med kalcinerat blåmusselskal vid tillverkning av hydrauliskt bindemedel

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

MALIN AHRENBECK
ALICE BENSKIÖLD
ANDREAS GANNHOLM
ELIN NILSSON
CARL-FREDRIK STORM
REBECCA STRAND

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

© Malin Ahrenbeck, Alice Benskiöld, Andreas Gannholm, Elin Nilsson
Carl-Fredrik Storm, Rebecca Strand, 2021

Handledare: Ingemar Segerholm
Examinator: Luping Tang
Kandidatarbete 2021: ACEX10-21-15

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige, 2021

Skrivet i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2021

ACEX10 - KANDIDATARBETE

Blåmusselskal - ett hållbart alternativ till den kontroversiella cementen

En jämförande studie av substitution med kalcinerat blåmusselskal vid tillverkning av hydrauliskt bindemedel

Handledare:

Ingemar Segerholm

Examinator:

Luping Tang

Författare:

Malin Ahrenbeck
Alice Benskiöld
Andreas Gannholm
Elin Nilsson
Carl-Fredrik Storm
Rebecca Strand



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola
14 juni 2021

Förord

Följande rapport är författarnas resultat av kursen Kandidatarbete inom samhällsbyggnadsteknik, ACEX10, en kurs motsvarande 15 högskolepoäng. Arbetet genomfördes under vårterminen 2021 på institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Chalmers tekniska högskola. Bilder i rapporten är tagna av författarna själva.

Till att börja med vill vi tacka Scanfjord Mollösund AB för material till laborationer i form av skal från blåmusslor, samt Jesper Knutsson, forskare vid avdelningen för vatten miljö teknik och labbansvarig för avdelningen byggnadsteknologi. Tack för tillgång till laborationssal och tillhörande utrustning. Utan er hjälp hade arbetet inte varit genomförbart.

Vi vill även rikta ett stort tack till Anders Karlsson, forskningsingenjör på avdelningen för geologi och geoteknik samt konstruktionsteknik, för hjälp med tillhandahållning av utrustning och provtagning. Examinator för arbetet har varit Luping Tang, professor på avdelningen för byggnadsteknologi, som vi tackar för hjälp med framtagning av recept för blandning av bruk samt vägledning i laboratoriet. Ett avslutande stort tack till vår handledare Ingemar Segerholm, universitetslektor på avdelningen för byggnadsteknologi, för hjälp med kalcinering av skal från blåmusslor samt vägledning genom hela arbetets gång.

Abstract

Concrete is one of the most commonly used building materials in the modern society. One of the most crucial components in concrete is cement, the purpose of which is to act as a hydraulic binder and bind the aggregate together in the concrete. Cement is made from mostly limestone, where the quarrying and burning of the limestone causes large environmental impact.

This study investigates the effect of replacement of cement with calcined and non-calcined shells of blue mussels, respectively, on the compressive strength of the cementitious mortar. The replacement is also discussed from an environmental point of view. To evaluate the effect of the substitution, mortar was cast with different proportions of replaced cement. The specimens went through a test for compressive strength, and the results were compared with that from a reference sample. The different proportions examined were 5, 15, 30 and 50 weight percent of calcined, as well as 5 weight percent non-calcined shells.

The results showed that both the samples containing 5 weight percent calcined and non-calcined shells remained within the approved interval for compressive strength according to standards. Furthermore, the specimens containing 15 weight percent calcined shells or more did not fulfill the same requirements. From the results, a conclusion can be made that a substitution by 5 weight percent calcined shells is auspicious. A small increase in carbon dioxide emissions occur, however a large part of those come from a short carbon cycle. In addition, less lime quarrying occurs and less fossil fuels are needed for the calcination of shells. If the cement is replaced with 5 weight percent non-calcined shells instead, 114 500 tonnes carbon dioxide emissions could potentially be avoided on a yearly basis.

Sammanfattning

Betong är ett av dem mest använda byggnadsmaterial i dagens samhälle. En av komponenterna i betong är cement vars syfte är att agera som ett hydrauliskt bindemedel och hålla ihop ballasten i betongen. Cement består till stor del av kalksten, vars brytning och bränning orsakar stora koldioxidutsläpp.

I denna studie undersöks påverkan på cementens tryckhållfasthet då andelar cement ersätts av kalcinerade respektive okalcinerade skal från blåmusslor. Utbytet diskuteras även ur ett miljömässigt perspektiv. För att utvärdera hur väl substitueringen fungerade göts bruk med olika ersättningsandelar. På dessa provkroppar utfördes tryckhållfasthetstester, vilka sedan jämfördes med referensprov. De olika ersättningsandelar som undersöktes var 5, 15, 30 respektive 50 viktprocent kalcinerat blåmusselskal, samt 5 viktprocent okalcinerat.

Resultaten visade på att proverna med 5 viktprocent kalcinerat och okalcinerat blåmusselskal båda höll sig inom intervallet för godkänd tryckhållfasthet enligt standard. Vidare uppfyllde prover innehållande 15 viktprocent kalcinerat musselskal eller mer inte standard för tryckhållfasthet. Utifrån resultaten kan en slutsats dras att substituera cement mot 5 viktprocent kalcinerat musselskal är gynnsamt. Det sker en liten ökning i koldioxidutsläpp, men en stor del av utsläppen kommer från ett kort kretslopp. Dessutom sker mindre kalkbrytning, och mindre fossila bränslen krävs vid kalcineringen av musselskal. Skulle cementen istället substitueras mot 5 viktprocent okalcinerat musselskal, kan de årliga koldioxidutsläppen från cementindustrin istället minska med 114 500 ton.

Ordlista

Ord som förklaras nedan skrivs kursiverat i rapporten första gången de nämns.

Amorf - Ämne med glasliknande egenskaper.

Deprotonering - En syra avger en vätejon, H^+ .

Hydrauliskt bindemedel - Bindemedel som hårdnar genom reaktion med vatten till en produkt som är beständig mot vatten. Härdning sker såväl i luft som i vatten.

Kalcinering - Upphettning av kalciumkarbonat, $CaCO_3$, för att driva bort koldioxid, CO_2 , och bilda kalciumoxid, CaO .

Klinkermineral - Mineralen som bildas av de ingående oxiderna vid upphettning i cementtillverkningen.

Mytilus edulis - Blåmussla.

Puzzolan - Samlingsnamn för kiselhaltiga material som i närvaro av vatten och $Ca(OH)_2$ reagerar och då fungerar som bindemedel i cement.

Akronymer

OPC - Ordinary Portland Cement

SIS - Svenska institutet för standarder

vct - Vattencementtal

Kemiska beteckningar

Al_2O_3 - Aluminiumoxid

Ca^{2+} - Kalciumjon

$CaCO_3$ - Kalciumkarbonat

CaO - Kalciumoxid, bränt kalk

CO_3^{2-} - Karbonatjon

$Ca(OH)_2$ - Kalciumhydroxid

Fe_2O_3 - Järnoxid

H^+ - Vätejon

HCO_3^- - Vätekarbonatjon

H_2CO_3 - Kolsyra

SiO_2 - Kiseldioxid

$2CaO \cdot SiO_2$ - Dikalciumsilikat, Belit, C_2S

$3CaO \cdot Al_2O_3$ - Trikalciumaluminat, Aluminat, C_3A

$3CaO \cdot SiO_2$ - Trikalciumsilikat, Alit, C_3S

$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ - Kalciumsilikathydrat, C-S-H

$4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3$ - Tetrakalciumaluminatferrit, Ferrit, C_4AF

Innehåll

1	Inledning och bakgrund	1
1.1	Syfte	2
1.2	Avgränsningar	2
1.3	Samhälleliga och etiska aspekter	2
2	Betong och bruk	3
2.1	Ballast	3
2.2	Filler	3
2.3	Cement	4
2.3.1	Tillverkning och kemisk sammansättning	4
2.3.2	Cementens reaktion med vatten	5
2.3.3	Vattencementtal	6
2.3.4	Byggcement Skövde	6
2.3.5	Hållfasthetstester	6
3	Tidigare studier med snäckskal	8
3.1	Kemisk uppbyggnad av snäckskal	8
3.2	Tidigare använda metoder	8
3.3	Tidigare testresultat	9
4	Klimat- och miljöpåverkan	11
4.1	Koldioxidutsläpp och kolcykeln	11
4.2	Brytning av kalksten	12
5	Metod	14
5.1	Forskningsöversikt	14
5.2	Laborativa mätningar	14
5.2.1	Etapp 1: Förberedning av musselskal	15
5.2.2	Etapp 2: Blandning av bruk	16
5.2.3	Etapp 3: Tillverkning av provkroppar	17
5.2.4	Etapp 4: Test av tryckhållfasthet	18
6	Resultat	19
6.1	Tryckhållfasthet efter 7 dygns härdning	19
6.2	Tryckhållfasthet efter 28 dygns härdning	20
6.3	Beräknade utsläpp från kalcinerade musselskal	21
7	Diskussion	23
7.1	Analys av resultat	23
7.1.1	Provkroppar innehållande 30 respektive 50 viktprocent kalcinerat musselskal	23
7.1.2	Fillereffekten	23
7.1.3	Kiseldioxidens inverkan	24
7.2	Miljöpåverkan	25
7.2.1	Koldioxidutsläpp	25
7.2.2	Inverkan på natur och samhälle	27

7.3	Felkällor	27
7.4	Framtida studier	29
8	Slutsats	30

Referenser

	Bilagor	i
A	Tillvägagångssätt	i
A.1	Etapp 1: Förberedning av musselskal	i
A.2	Etapp 2: Blandning av bruk	i
A.3	Etapp 3: Tillverkning av provkroppar	ii
A.4	Etapp 4: Hållfasthetstest	ii
B	Recept	iii
C	Beräkningar av koldioxidutsläpp från calcinerade musselskal	iv

1 Inledning och bakgrund

Betong är ett av de viktigaste byggnadsmaterial som används i dagens samhälle. Det har stor och spridd användning då det kan användas för att bland annat bygga broar, väggar och husgrunder. De gamla romarna använde en slags betong för att bygga ikoniska byggnader som Pantheon som står än idag, nästan 2000 år senare. Sedan romartiden har betongtillverkning förändrats mycket och idag används noggrant beräknade andelar av ingredienser, vanligen cement, ballast och vatten. Ibland används även olika tillsatser för att påverka specifika egenskaper hos betong.

En problematisk aspekt med betong är att den aktiva ingrediensen, cement, bidrar till en stor klimatpåverkan vid dess tillverkning. Den globala cementtillverkningen uppskattas stå för omkring 8 % av världens koldioxidutsläpp [1]. Ordinary Portland Cement, *OPC*, är den vanligaste cementen. Den tillverkas huvudsakligen av kalksten, som behöver grävas ur marken, krossas, och sedan bränns vid 1450 °C för att genomgå kemiska reaktioner [2]. I syfte att minska klimatpåverkan, har studier genomförts för att undersöka om cement kan ersättas med ett mer hållbart alternativ. Ett av alternativen är att använda snäckskal av olika slag. Snäckskal användes för att tillverka en speciell slags betong som kallas tabby redan på 1700-talet [3]. Tabby tillverkades främst vid kuster där spanska och brittiska kolonier etablerades, då det vid dessa platser fanns gott om snäckskal. Vid tillverkningen användes en blandning av lika delar kalk, sand, snäckskal och vatten, ibland med inslag av aska. För att bibehålla en kontinuitet i rapporten benämns hädanefter snäck- och musselskal använda i tidigare utförda studier som snäckskal, och de skal som används i denna studies laborativa arbete benämns musselskal.

På senare tid har det återigen väckts ett intresse av att använda snäckskal i betong. Snäckskalen anses i förhållande till cement vara bättre för miljön, framförallt då de har mycket kortare omloppstid än kalkstenen som vanligtvis används vid tillverkningen av cement. Snäckskal innehåller precis som kalksten stora mängder kalciumkarbonat, $CaCO_3$, vilket vid upphettning omvandlas till kalciumoxid, CaO . Denna omvandling kallas för *kalcinering*. Runt 50 000 ton snäckskal blir till avfall varje år världen över, och hade teoretiskt sett kunnat användas i betongtillverkning [4].

I Norden där denna studie utförs, finns det stor tillgång av blåmusslor, *Mytilus edulis*. Dessa snäckskal har tidigare inte undersökts som ersättningsmaterial för cement, och det är därför av intresse att göra just det. I denna studie kommer således bruk tillverkas för att testa tryckhållfastheten av cement delvis substituerad med *Mytilus edulis*. Den är en mycket varierande art där bland annat storlek, tillväxthastighet och skaltjocklek varierar kraftigt bland populationer [5]. I Östersjön växer musslorna mycket långsammare och uppnår inte lika stor maximal storlek som i Nordsjön. Detta tros bero på graden salinitet, där Östersjön har bräckt vatten medan Nordsjön har en högre salt-halt, vilket gynnar blåmusslorna. Temperatur och tillgång på föda är ytterligare exempel på viktiga faktorer som kan påverka.

Odling av *Mytilus edulis* får endast ske på bestämda platser i Sverige, och sker främst i områden kring norra Bohuslän. År 2019 producerades 1745 ton *Mytilus edulis* i Sverige [6]. I anslutning till konserveringsindustrin tar det cirka 18 månader att odla fram en musla [7]. Odlingen av *Mytilus edulis* sker huvudsakligen för att framställa föda till människor och kan förtäras färska eller konserveras för senare konsumering. I det senare alternativet kokas musslorna och endast köttet läggs i saltlag, vilket medför att skalerna i sig är en restprodukt. Vissa användningsområden för restprodukten har skapats, men mycket av de musselskalerna som produceras tas inte vara på. Ett företag som använder sig av musselskal är cementföretaget Aalborg Portland i Danmark, som använder 1500 ton

skal från musslor per 3,5 miljoner ton kalk när de utvinner kalk ur sina dagbrott [8]. De använder skalen som underlag till stora grävmaskiner som går på räls, för att bidra med ökad stabilitet till rälsen och undvika kalkens blöta kletiga yta.

1.1 Syfte

Det huvudsakliga syftet med arbetet är att undersöka hur stor andel kalcinerat skal av *Mytilus edulis*, mätt i viktprocent, som kan substituera cement som hydrauliskt bindemedel vid tillverkning av bruk, och samtidigt bibehålla god tryckhållfasthet. Även hur väl ersättning med okalcinerat skal av *Mytilus edulis* fungerar undersöks. Dessutom studeras miljömässiga aspekter, såsom förändringen i koldioxidutsläpp om cement delvis byts ut mot kalcinerade musselskal.

1.2 Avgränsningar

Arbetet är begränsat till att undersöka förändring i tryckhållfasthet då cement delvis substitueras mot kalcinerade respektive okalcinerade musselskal, samt de miljömässiga aspekter det orsakar. Till viss del analyseras den kemiska sammansättningen av *Mytilus edulis* genom tidigare studier, men en kemisk analys utförs inte. Studien är huvudsakligen avgränsad till Sverige.

Den materialegenskap som undersöks i rapporten är tryckhållfasthet. Det finns ytterligare egenskaper som kan undersökas, exempelvis kloridinträning, uttorkningshastighet och skjuvspänning, men dessa undersöks inte på grund av arbetets utformning. Tryckhållfasthetstest utförs vanligtvis efter 7, 28 samt 90 dygns härdning [2]. Den laborativa delen av arbetet är begränsat till färre än 90 dagar, vilket medför att endast tryckhållfasthetstest efter 7 samt 28 dygns härdning kommer att genomföras.

1.3 Samhälleliga och etiska aspekter

Vid planering av arbetet diskuterades huruvida samhälleliga och etiska aspekter behövde ta i beaktning under projektets utförande. Slutsatsen drogs att ett fåtal aspekter behövdes ha i åtanke vid utformning av arbetet, och presenteras därför i detta avsnitt.

Musselskalen i denna studie införskaffades från företaget Scanfjord, där musselskalen är en restprodukt från produktionen som bedrivs. Vi förlitade oss på att företaget såg till att skalen var fria från kvarvarande musslor, samt att de hade behandlats på ett etiskt sätt. Till följd av att arbeta med organiskt material kunde förvaringen av råvaran vara en aspekt som stör närliggande fastigheter, då organiskt material tenderar att ge ifrån sig lukt vid förvaring under en längre tid. För att undvika detta problem påbörjades projektets laborativa del tätt inpå leverans av musselskal, för att minimera risken för spridning av oönskad lukt. Vid det laborativa arbetets slut avsades ansvaret från laboranterna till ansvariga vid samhällsinstitutionen, för de skal som inte användes. Den klimat- och miljöpåverkan som utbyte av cement mot musselskal kan medföra, är något som diskuteras under egen rubrik längre fram i rapporten.

2 Betong och bruk

Cement är en huvudkomponent i betong och har stor inverkan på dess egenskaper. För att undersöka möjliga förbättringar hos betongens karaktär kan tryckhållfastheten hos cement testas, vilket görs enligt standard genom att tillverka bruk. Till skillnad från betong innehåller bruk ballast av mindre storlek. I detta avsnitt kommer beståndsdelarna i betong presenteras, samt cementens uppbyggnad, egenskaper och kemiska reaktioner. Vidare beskrivs betydelsen av hållfasthet i betong, samt hur detta kan testas.

Betong har varit och är än idag ett av de byggnadsmaterial som har bidragit mest till utvecklingen av det moderna samhället [9]. Akvedukter, broar och höghus är bara några exempel på konstruktioner som har spelat en väsentlig roll i den exponentiella utvecklingen av livskvalitet som pågått under de senaste 2000 åren, men som hade varit omöjliga att konstruera utan betong. Dessa exempel har bidragit till att betong idag är det mest konsumerade materialet i världen efter vatten.

Komponenterna som ingår i betong kallas vanligtvis för betongens ingredienser [10]. Cement, vatten och ballast är de standardingredienser som ingår i alla olika blandningar av betong. Proportioneringen av dessa ingredienser benämns som betongens recept och kan variera beroende på vilka egenskaper som betongen önskas uppfylla. I vissa fall används även tillsatsmedel för att ge betongen speciella egenskaper, såsom frostbeständighet eller förbättrad arbetbarhet. Betong är ett så kallat kompositmaterial, då det i både flytande och fast fas utgörs av en sammansättning av olika material. För gemene man kan ingredienserna verka få och enkla, något som gör att betongens utveckling kan uppfattas som tämligen begränsad och ointressant. Uppbyggnaden av betongens mikrostruktur är dock ett avancerat samarbete mellan ingredienserna som ger materialet eftertraktade egenskaper, där cementen är den ingrediens med högst komplexitet.

2.1 Ballast

Ballast är benämningen på kornformiga partiklar som utgör cirka 65–75 volymprocent av innehållet i betong och består vanligtvis av sand och sten [2]. Då dessa material är betydligt billigare än cement är det ekonomiskt fördelaktigt att ha en stor andel ballast i sin betong. För att skapa en betong som innehåller en stor andel ballast krävs en varierande kornstorlek. Partiklarnas olika storlekar varierar mellan 0,001 och 64 mm [10]. Fördelningen av partiklarna påverkar även betydelsefulla egenskaper hos betongen, som till exempel arbetbarhet, deformering och porositet.

2.2 Filler

Material med kornstorlek mindre än 0,125 mm har samlingsnamnet filler [2]. Vid en kornstorlek på mindre än 10 μm kallas det ultrafiller eller ultrafin filler. Filler är idag en vanlig tillsats i betong med syfte att fylla ut och minska mängden cement, detta främst av ekonomiska skäl. Exempel på filler är obehandlad kalksten, som till största delen är inert och bidrar inte vid bildning av cementpasta, vilken beskrivs i avsnitt 2.3.2 nedan. Filler bidrar istället till betongens hållfasthet genom att cementpastan får en bättre packning, och detta benämns fillereffekten.

2.3 Cement

Sverige har idag en produktion på 2,8 miljoner ton cement varje år [11]. Cement är ett *hydrauliskt bindemedel* som härdar i luft så väl som under vatten, och vars roll är att agera som ett lim och hålla ihop ballast. Generellt har cementen en lägre hållfasthet än ballasten, vilket gör det till den svaga länken och avgörande för betongens egenskaper. Idag finns det olika typer av cement på marknaden vars innehåll kan variera något. En av de cementsorter som används mest frekvent i Sverige är så kallad Byggcement [10].

2.3.1 Tillverkning och kemisk sammansättning

I grova drag består cement av kalksten och lera som bränns vid en hög temperatur [2]. Kalkstenen är en bergart som består av minst 50 % CaCO_3 , huvudsakligen i form av mineralet kalcit. Lera kan ibland behöva tillsättas beroende på kalkstensens komposition. Lerpartiklarna innehåller bland annat kiseldioxid, SiO_2 , aluminiumoxid, Al_2O_3 , och järnoxid, Fe_2O_3 . Dessa benämns oxider och är avgörande vid produktion av cement. Vid tillverkningsprocessen bränns kalkstenen och leran i flera steg vid temperaturer upp emot 1450 °C. I det första steget, vid en temperatur på 700-1000 °C, kalcineras CaCO_3 och övergår till CaO. När kalcineringsprocessen är slutförd höjs temperaturen till cirka 1100 °C, vilket utlöser en reaktion mellan CaO och SiO_2 . Slutligen, då temperaturen når 1450 °C, har den största delen av reaktionen ägt rum och bildat så kallade *klinkermineral* [12]. I rapporten kommer hädanefter bränning syfta på uppvärmning av material till 1450 °C. Vanligtvis används förkortningar för de ingående oxiderna och de viktigaste klinkermineralen som ingår i cement. Tabell 1 visar beteckningarna och den typiska kemiska sammansättningen för OPC.

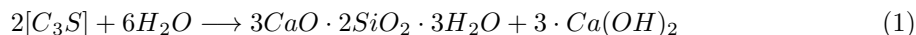
Tabell 1: Vanligaste oxiderna och klinkermineraler i OPC [2].

Oxider	Beteckning	Viktprocentandel [%]
Kalciumoxid, CaO	C	63
Kiseldioxid, SiO_2	S	20
Aluminiumoxid, Al_2O_3	A	4,4
Järnoxid, Fe_2O_3	F	2,2
Klinkermineral		
Alit - Trikalciumpsilikat, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	59
Belit - Dikalciumpsilikat, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	13
Aluminat - Trikalciumaluminat, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8
Ferrit - Tetrakalciumaluminatferrit, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	7

Efter bränningen kan det förekomma rester i form av bränt kalk, CaO, i cementen. Normalt återfinns cirka 1 % CaO i den färdiga produkten och värden upp till 2 % anses inte ge negativ påverkan [2]. Vid reaktion med vatten expanderar CaO kraftigt, vilket kan orsaka skador om det sker efter betongens hårdnande. Efter bränningen mals klinkermineralen till ett fint pulver där kornstorlekar varierar mellan 1–128 μm . Storleksfraktioner kan variera beroende på vilken specifik yta som önskas utav cementen. För en stor specifik yta mals portlandklinkern till mindre fraktioner för att öka kontaktytan mellan cementkornen och vattnet, vilket i sin tur ökar reaktionshastigheten.

2.3.2 Cementens reaktion med vatten

Då cement är ett hydrauliskt bindemedel utlöses en kemisk reaktion när de finmalda cementkornen kommer i kontakt med vatten [2]. Vid blandningen bildas cementpasta, en kombination av cement och vatten. Den slutliga reaktionsprodukten kallas cementgel. Gelen är ett fast, mycket finporöst nätverk som ger betongen dess hållfasthet, täthet och beständighet. Till en början är cementpastans aggregationstillstånd flytande, men efterhand då cementkornen reagerar med vattnet ökar andelen cementgel och blandningen antar fast form. Cementens reaktion med vatten benämns som hydratation och är en exoterm reaktion där klinkermineralen kemiskt binder det inblandade vattnet för att bilda cementgel. De huvudsakliga klinkermineralen reagerar olika fort med vattnet och bidrar även med olika egenskaper till betongen. Cementgelen bildas vid vattnets reaktion med alit, C_3S , och belit, C_2S . Dessa föreningar består båda av olika mängder kalciumsilikathydrat, $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$, även kallat C-S-H, samt kalciumhydroxid, $Ca(OH)_2$. Se ekvationer 1 och 2 nedan för reaktionerna som bildar cementgel.



$Ca(OH)_2$ bildar ett nätverk av kristaller, men tillför ingen betydande hållfasthet eller täthetsfunktion till betongen [13]. C_3S utgör i praktiken oftast den största delen av klinkermineralen, då reaktionen med vatten sker relativt fort, och är det mineral som har störst effekt på betongens hållfasthetsutveckling under de 28 första dagarna [2]. C_2S , som reagerar långsammare, påverkar hållfasthetsutvecklingen på längre sikt.

Aluminat, C_3A , och ferrit, C_4AF , är de klinkermineral som reagerar fortast med vatten och anses inte heller ha någon större påverkan på betongens hållfasthet [2]. Gips tillsätts cementen för att sakta ner reaktionerna för C_3A och C_4AF , så att betongen behåller en god arbetbarhet under längre tid. Hydratationen pågår fram tills klinkermineralen bundit inblandningsvattnet, vilket kan pågå under flera år. För normalt hårdnande betong har, som tidigare nämnt, den största andelen av C_3S redan efter 28 dagar reagerat med vattnet. Då portlandklinkern till största del består av C_3S , ungefär 50–70 %, har betongen därmed uppnått den största delen av sin slutgiltiga hållfasthet efter 28 dagar.

Något som ytterligare kan påverka cementen och dess hållfasthet är *puzzolanaktivitet* [2], [10]. Puzzolaner är material som innehåller SiO_2 , som i sig själva inte bidrar till cementens hållfasthet, men som i finfördelad form och närvaro av vatten reagerar kemiskt med $Ca(OH)_2$ och bildar C-S-H. Detta ger en ökad mängd cementgel med en ökad homogenitet och höjer hållfastheten i cementen. Reaktiviteten av kiselhaltiga material beror till stor del på dess uppbyggnad. Om exempelvis SiO_2 är *amorft* uppbyggd, är den högreaktiv, men om den istället är i kristallin form så är den inte reaktiv. Amorfa material har glasliknande egenskaper, och bildas när material värms upp, vanligen tills det smälter, och sedan kyls snabbt [14].

2.3.3 Vattencementtal

Vattencementtalet, vct , är ett tal som visar på förhållandet mellan vatten och cement enligt ekvation 3 [2].

$$vct = \frac{W}{C} \quad (3)$$

där W är mängden blandningsvatten i kg och C är mängden cement i kg.

Vattencementtalet påverkar cementens porositet, vilket i sin tur påverkar hållfastheten [10]. Vid högre tillsats vatten blir mer kapillärporer kvar i cementen, vilka kan beskrivas som hålrum cementen inte har fyllt ut. Kapillärporer är större än cementgelens porer, vilket innebär att en högre andel kapillärporer ger ökad genomträngbarhet och därmed minskad hållfasthet. Ett högre vct ger sammanfattningsvis generellt en sämre hållfasthet. Det är dock viktigt att tänka på att vct även påverkar andra egenskaper, exempelvis arbetbarhet, och avvägningar behöver därför göras.

2.3.4 Byggcement Skövde

Byggcement Skövde, i rapporten benämnt Byggcement, är det cement som användes i det laborativa arbetet och som beskrivs som ett Portlandcement med "ordinär hållfasthetsutveckling och kan användas vid de flesta vanliga betongarbeten" enligt tillverkaren Cementa AB [15]. Kravet på cementen efter 28 dygn är enligt standard SS-EN 197-1, att provkroppar ska klara ett tryck mellan 42,5 och 62,5 MPa [15], [16]. Innehållet i Byggcement består av 80–94 % portlandklinker, 6–20 % kalksten och 0–5 % gips [17]. Genom att ersätta portlandklinkern med obränd finmalad kalksten minskar man energiåtgången samt koldioxidutsläppet vid produktion och reducerar därigenom cementens negativa miljöpåverkan. Byggcement har en längre hållfasthetsutveckling än OPC och detta kan påverka jämförelsen med tidigare studier, där OPC använts [10].

2.3.5 Hållfasthetstester

Egenskaperna hos betong är den huvudsakliga anledningen till varför materialet har varit och fortfarande är högt eftertraktat. Materialets beständighet, lättillgänglighet och inte minst mekaniska styrka är några kvalitéer som gör betong populärt. Som betongens svagaste komponent är cement ofta i fokus när det kommer till att undersöka och förbättra hållfastheten.

Den höga tryckhållfastheten är betongens främsta karaktärsdrag och därför är det även den mest testade hållfasthetsparametern. Det finns starka empiriska relationer mellan betongens tryckhållfasthet och dess andra hållfasthetsegenskaper, som spräck- och böjdragshållfasthet, vilket också bidrar till varför det är den hållfasthetsparametern som testas mest [18]. Exempelvis visar studier att betongens draghållfastheten motsvarar cirka 8–10 % av tryckhållfastheten [19]. Tack vare dess höga tryckhållfasthet används betongelement oftast i de delar av konstruktionen som förväntas utsättas för höga tryckkrafter. Men för att kunna ge betongelementen ett bredare användningsområde har tekniska lösningar som armering av betongen utvecklats för att stärka drag- och skjuvhållfastheten. I dessa hållfasthetsparametrar blir därför armeringen oftast det dimensionerande materialet för drag- och skjuvhållfasthet, medan tryckhållfastheten blir den mest relevanta hållfasthetsparametern för cement i betong.

Vid test av cementens tryckhållfasthet ska enligt Svenska institutet för standarder, *SIS*, en provkropp belastas enaxiellt med en konstant ökande last tills brott uppstår [20]. Provkropparna ska utgöras av prismor med måtten 40x40x160 mm och ska först delas på halva längden, för att sedan kunna testas för tryckhållfasthet. När brott av provkropp uppstår registreras lasten och kan sedan användas vid beräkning av tryckhållfastheten enligt ekvation 4.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4)$$

där F_c är lasten vid brott i N, 1600 är provkroppens tvärsnittsarea i mm² och R_c är tryckhållfasthet i MPa.

Standarden från stycket ovan beskriver även tydligt aspekter för hur tryckhållfastheten ska utföras; med allt från krav på komponenterna till hur blandning av provkroppar ska ske och förvaras [20]. Som exempel beskrivs att sanden ska ha en partikelstorlek på mindre än 2 mm, ha en fukthalt på högst 0,2 % och siktas tills sanden går genom sikten med en viss hastighet.

3 Tidigare studier med snäckskal

Enligt en litteraturöversikt gjord 2019, med mål att skapa en överblick över studier som behandlar användning av snäckskal i betongtillverkning, hade 25 olika studier inom ämnet genomförts [3]. Dessa studier undersökte olika slags snäckskal, från flera delar av världen och med varierande metoder. Ingen av de studerade artiklarna hade undersökt *Mytilus edulis*. En litteraturöversikt gjord 2020 går även den igenom vilka tidigare studier som gjorts och presenterar ytterligare resultat [21]. Studierna liknar varandra till stor del, men lägger fokus på olika områden. För att få en överblick av tidigare studier och dess resultat, har främst ovannämnda litteraturstudier använts.

3.1 Kemisk uppbyggnad av snäckskal

Tidigare studier visar på att snäck- och musselskal vanligen innehåller minst 90 %, ofta upp till 95-97 % CaCO_3 [3], [21]. Exakt innehåll varierar, och beror främst på var i världen snäckorna eller musslorna bildats, då det kan skilja storer åt gällande vilken slags mat de har haft tillgång till och vilket klimat de levt i.

Kemisk komposition med avseende på CaCO_3 samt SiO_2 i obehandlade musslor, enligt tidigare studier, visas i tabell 2 [3]. Dessa två kemiska föreningar är de som snäckskal till största delen består av. Studie A är en studie på ostron från flod respektive hav, utförd i Indien [22]. Studie B är en studie utförd i Thailand på korthalsad mussla, grönmussla och hjärtmussla [23]. Grönmussla, eller *Perna viridis*, ingår precis som *Mytilus edulis* i familjen Mytilidae [24].

Tabell 2: Kemisk komposition i viktsprocent för olika sorters obehandlade snäckskal enligt tidigare studier.

Innehåll	Studie A		Studie B		
	Ostron, flod	Ostron, hav	Korthalsad mussla	Grönmussla	Hjärtmussla
CaCO_3 [%]	96,0	89,6	96,8	95,6	97,1
SiO_2 [%]	1,28	4,04	0,84	0,73	0,98

Snäckskal innehåller vanligen också andra oxider såsom Al_2O_3 och Fe_2O_3 , dock i mindre mängd än SiO_2 [3]. Alla dessa oxider är närvarande vid den så kallade puzzolanaktiviteten, om de har en amorf uppbyggnad. En större mängd oxider är förenligt med en högre puzzolanaktivitet.

Det har under översiktsarbetet inte hittats några tidigare studier som presenterar kemisk uppbyggnad av *Mytilus edulis*. En tidigare studie av *Mytilus Galloprovincialis*, en blåmussla inom samma släkte som *Mytilus edulis*, visar dock resultat på att skalen innehöll ungefär 95 % CaCO_3 [25], [26]. Det har även framkommit att skal hos *Mytilus edulis* innehåller CaCO_3 i kristallina former [27].

3.2 Tidigare använda metoder

Enligt litteraturöversikten från 2020, har beredningen av skal gått till på liknande sätt i de tidigare studierna, genom rengöring, malning och kalcinering av skalen [21]. Det har vid kalcinering använts temperaturer mellan 500-1000 °C och i olika lång tid, från 30 minuter upp till 72 timmar. En lägre temperatur har visats sig kunna användas om man först maler skalen. För att kalcineringsprocessen ska bli så effektiv som möjligt har en studie kommit fram till att 800 °C är en optimal temperatur [28]. Denna studie utfördes i Malaysia på blandade arter av snäckskal.

3.3 Tidigare testresultat

Som tidigare nämnts i avsnitt 2.3.5 finns det flera tester som kan utföras på betong för att undersöka olika egenskaper, och många tester har utförts även på betong med snäckskal. I denna studie undersöks tryckhållfastheten och därför sammanställs tidigare resultat inom just tryckhållfasthet för betong med snäckskal här.

Tryckhållfastheten mäts som tidigare nämnts vanligen vid 7, 28 respektive 90 dygn. De uppmätta resultaten kan variera mycket mellan de olika studierna, och beror bland annat på vilket betongrecept som använts [3]. Det är därför viktigt att resultaten för de olika procenten jämförs med en referensgjutning, innehållande 100 % OPC. I tabell 3 visas tryckhållfasthetsresultat från tidigare studier där snäckskal av olika slag ersatt en andel viktprocent av cementen. De procent som presenteras i tabellen visar hur stor förändring som ges i tryckhållfasthet är för de olika ersättningarna jämfört med referensproven med endast OPC som bindemedel. Positiva värden indikerar en ökning i tryckhållfasthet, medan negativa värden betyder att provkropparna klarade ett mindre tryck än referensprovet innan brott skedde. Värdena har avrundats till en decimal. Studie 1 och 2 genomfördes båda i Indonesien med hjärtmussla samt polymesosdamussla [29], [30]. Studie 3 och 5 utfördes i Indien med ostronskal respektive snigelskal [22], [31]. Studie 4 och 6 genomfördes i Malaysia, båda med hjärtmussla [32], [33].

Tabell 3: Procentuell förändring i tryckhållfasthet för betong med olika viktprocentandelar snäckskal jämfört med tryckhållfasthet för vanlig betong enligt tidigare studier.

	Tryckhållfasthet efter 7 dagar jämfört med referensprov	Tryckhållfasthet efter 28 dagar jämfört med referensprov	Tryckhållfasthet efter 90 dagar jämfört med referensprov
Studie 1 [29]			
2 % Hjärtmussla		-14,8 %	
4 % Hjärtmussla	-1,6 %	-1,1 %	-3,7 %
6 % Hjärtmussla		-20,3 %	
8 % Hjärtmussla		-15,6 %	
Studie 2 [30]			
4 % Hjärtmussla	- 0,9 %	-5,3 %	-6,8 %
4 % Polymesosdamussla	+0,6 %	+5,3 %	+2,4 %
Studie 3 [22]			
2,5 % Ostronskal	+4,5 %	+5,3 %	
5 % Ostronskal	+9,5 %	+10,5 %	
7,5 % Ostronskal	+2,4 %	+5,3 %	
10 % Ostronskal	+2,4 %	+3,9 %	
Studie 4 [32]			
5 % Hjärtmussla	-21,6 %	-20,0 %	-15,0 %
10 % Hjärtmussla	-34,2 %	-31,1 %	-25,0 %
15 % Hjärtmussla	-21,1 %	-20,0 %	-16,9 %
25 % Hjärtmussla	-36,8 %	-38,9 %	-33,3 %
50 % Hjärtmussla	-73,7 %	-71,1 %	-68,8 %
Studie 5 [31]			
5 % Snigelskal	+4,4 %	+13,6 %	

Tabell 3: Procentuell förändring i tryckhållfasthet för betong med olika viktprocentandelar snäckskal jämfört med tryckhållfasthet för vanlig betong enligt tidigare studier.

	Tryckhållfasthet efter 7 dagar jämfört med referensprov	Tryckhållfasthet efter 28 dagar jämfört med referensprov	Tryckhållfasthet efter 90 dagar jämfört med referensprov
10 % Snigelskal	-23,9 %	-12,1 %	
15 % Snigelskal	-29,1 %	-20,6 %	
20 % Snigelskal	-32,4 %	-25,5 %	
Studie 6 [33]			
5 % Hjärtmussla	-21,3 %	-20,0 %	-10,6 %
10 % Hjärtmussla	-33,3 %	-26,7 %	-23,4 %
15 % Hjärtmussla	-20,0 %	-20,0 %	-14,9 %
25 % Hjärtmussla	-36,0 %	-40,0 %	-31,9 %
50 % Hjärtmussla	-73,3 %	-71,1 %	-68,1 %

Tidigare studier har visat att tryckhållfastheten i betong i vissa fall har ökat vid en tillsats av 4-10 % från snäckskal, vid jämförelse med endast OPC [21]. Detta kan exempelvis ses för ostronskal i tabellen ovan, och i tidigare studier har detta resonerats kunna bero på puzzolanaktivitet. Vid tillsats av allt mer snäckskal sjunker dock tryckhållfastheten efterhand även i dessa studier. Det har konstaterats att tillsats av kalcinerat snäckskal skulle kunna ersätta upp till ca 20 % cement [34]. Över denna procentandel blir hållfastheten för låg vid användning av de flesta skalerna.

4 Klimat- och miljöpåverkan

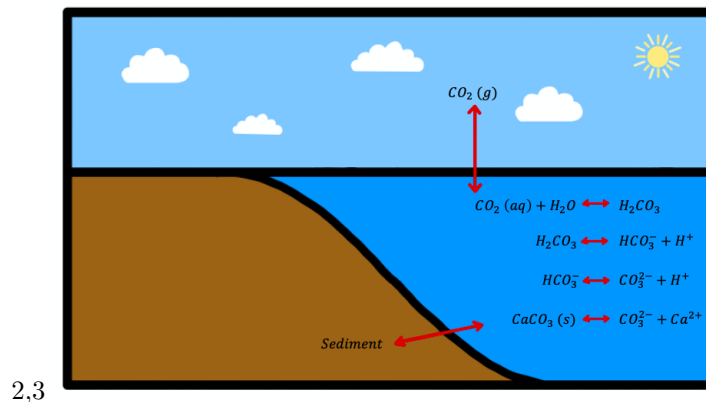
Som tidigare nämnts har betongtillverkning en stor negativ effekt på klimatet, framförallt till följd av dess stora koldioxidutsläpp. I detta avsnitt presenteras anledningarna till detta, samt varför det kan vara positivt för miljön att ersätta cement med snäckskal.

4.1 Koldioxidutsläpp och kolcykeln

Sveriges cementindustri släpper ut 697 kg CO₂ per ton cement [35]. Totalt bidrog industrin år 2019 med 2,3 miljoner ton CO₂ i utsläpp, vilket motsvarar 14 % av de totala koldioxidutsläppen från alla svenska industrier samma år [36]. Av de utsläpp som görs uppkommer omkring 60 % från de kemiska processer som sker vid kalcinering av kalksten, och är därför oundvikliga vid produktion av det hydrauliska bindemedlet i fråga [21], [35]. Resterande andel har sitt ursprung från förbränningen av bränslet, vanligen fossilt bränsle, i brännugnar som behöver ha en temperatur på 1450 °C. Denna temperatur krävs för att de nödvändiga kemiska reaktionerna ska ske.

Kolcykeln syftar på den tid det tar för kol att cirkulera genom jordens kolreservoarer [37]. Det finns en kort och en lång kolcykel. De material som ingår i den korta kolcykeln har en omloppstid på runt tiotals till tusentals år. Den långsamma kolcykeln har däremot en omloppstid på miljontals år. Till den korta kolcykeln räknas kol i framförallt atmosfären, hav, sjöar, jord och växtlighet. Till den långsamma kolcykeln räknas kol i sten och sediment. Både kalksten och snäckskal är uppbyggda av mycket kol, där kalksten ingår i den långa cykeln och snäckskal den korta.

Kalkstenen tillsammans med världshaven ingår i en av de större kolcyklerna på jorden, kallat karbonatsystemet, som årligen tar upp cirka 30 % av de antropogena koldioxidutsläppen [38]. En översikt av karbonatsystemet visas i figur 1. Koldioxid löser sig först i vatten, för att sedan reagera med vattnet och bilda kolsyra, H₂CO₃. Därefter *deprotoneras* H₂CO₃, det vill säga att den avger vätejoner, H⁺, två gånger till vätekarbonatjon, HCO₃⁻, respektive karbonatjon, CO₃²⁻. Slutligen reagerar CO₃²⁻ med en kalciumjon, Ca²⁺, och bildar CaCO₃, som sedimenterar till havsbotten. Där utsätts sedimentet genom tektoniska förändringar under flera miljoner år för högt tryck och höga temperaturer, vilket leder till att det omvandlas till den sedimentära bergarten känd som kalksten [39].



Figur 1: Kemiska jämviktsekvationer i karbonatsystemet.

I en process liknande karbonatsystemet, använder sig även musslor av CO_3^{2-} och Ca^{2+} för att producera sitt skal [40]. Produkter av dessa reaktanter är vatten, koldioxid och $CaCO_3$. Som tidigare beskrivits i avsnitt 3.1, är det $CaCO_3$ som till största del bygger upp *Mytilus edulis* skal. Musslan har därigenom en indirekt förmåga att binda koldioxid i skalet vid produktion av $CaCO_3$. Precis som alla djur på jorden utvinner dock *Mytilus edulis* sin energi genom respiration, det vill säga att den konsumerar syre och producerar koldioxid. En norsk studie utförd på *Mytilus edulis* visade att skalet kunde betraktas som en kolsänka, $-0,45 \text{ g } CO_2/\text{mussla}$, förutsatt att skalet deponerades på ett sätt så att koldioxiden i skalet förblev inbunden, exempelvis genom att användas vid tillverkning av betong utan att kalcineras [41]. Att skalet betraktas som en kolsänka innebär att en större mängd koldioxid lagras i skalet då det tillverkas av musslan, jämfört med den som släpps ut vid respiration. Det bör dock uppmärksammas att musslans vävnad inte var medräknad i koldioxidbudgeten, vilket bidrog till den negativa nettoeffekten. Skulle däremot musslans vävnad inkluderas i koldioxidbudgeten visade studien på att musslan ska betraktas som en kolkälla, $+2,66 \text{ g } CO_2/\text{mussla}$.

4.2 Brytning av kalksten

Normalt sett sker majoriteten av kalkbrytningen i dagbrott [42]. Det innebär att stenen tas upp direkt ifrån stora gropar på ytan istället för ur tunnlar under jorden. Brytning i dagbrott breder ut sig över stora areor och gör ansenlig anspråk på markytor. För att komma åt kalksten tas det översta jordlagret bort, vilket medför förändring i områdets markanvändning, grundvattennivåer och vegetation. Stora förändringar i den lokala miljön har en negativ påverkan på ekosystemet i området där brottet upprättas, vilket kan resultera i förlust av biologisk mångfald och essentiella ekosystemtjänster.

På Gotland i Slite har kalksten brutits i hundratals år, men har på senare tid blivit en omdebatterad fråga. Detta för att företaget sedan mitten på 00-talet velat expandera sin produktion, och ansökt om tillstånd för brytning i nya områden av den kalkrika ön. Ett rapporterat fall är Ojnarekogen; ett känsligt naturområde som pekats ut som riksintresse av Sveriges geologiska undersökning på grund av den stora tillgången högkvalitativ kalk [43]. Området är ett hem för flera fågelarter, som till exempel kungsörn och nattskärra samt flera andra rödlistade djur [44]. På grund av områdets

rika växt- och djurliv skapades debatt när ett företag fick tillstånd för provbrytning i området, och efter några år drogs tillståndet för provbrytningen tillbaka [45].

5 Metod

För att undersöka tryckhållfasthet hos cement och dess klimatpåverkan vid utbyte av olika viktprocent kalcinerat samt okalcinerat musselskal, har en kombination av forskningsöversikt och laborativt arbete tillämpats. I följande avsnitt presenteras hur forskningsöversikten genomförts, samt hur tillverkningen och mätningarna av provkropparna utförts i olika etapper. För en mer detaljerad beskrivning av hur det laborativa arbetet genomförts, se bilaga A och B.

5.1 Forskningsöversikt

För att kartlägga forskningsläget inom ämnet genomfördes en forskningsöversikt med fokus på tidigare studier med inriktning på användande av snäck- eller musselskal som hydrauliskt bindemedel. Översikten genomfördes med hjälp av databaser, huvudsakligen Scopus, Google Scholar samt databasen på Chalmers bibliotek. Det undersöktes vilka tidigare slags tester som utförts, vad resultat av testerna visade, samt om lärdomar kunde tas från tidigare studier eller om de gett resultat som kunde byggas vidare på i denna eller framtida studier.

Denna studie fokuserade på *Mytilus edulis* och dess användning som hydrauliskt bindemedel. Arbetet har utförts för att hitta tidigare studier som använt skal från denna art av musslor. Utifrån de sökord och databaser som användes fanns det inga referenser att tillgå. Därav har liknande undersökningar där andra snäckskal använts som ersättning för OPC studerats. Både studier på svenska och engelska var av intresse. Exempel på sökord som användes var: mussel, *Mytilus edulis*, seashells, cement, compressive strength, Ordinary portland cement, calcination, replace, kalciumkarbonat.

5.2 Laborativa mätningar

För att samla in nödvändig data tillverkades provkroppar, på vilka de önskade mätningarna utfördes. Totalt göts 36 prismor. De tester som genomfördes utformades på ett sådant sätt att de på bästa möjliga mån följde standard för tryckhållfasthet för cement från SIS [20].

Vid tillverkning av provkropparna blandades bruk med olika recept, innehållande en varierande mängd musselskal. De ingredienser som fanns att tillgå var Byggcement, finkornig ballast och vatten. De ersättningsandelar som testades var 5, 15, 30, och 50 viktprocent kalcinerat musselskal, samt 5 viktprocent okalcinerat musselskal. Dessutom tillverkades referensprov med standardrecept för bruk för att kunna undersöka effekten av ersättningen. De olika procenthalterna valdes för att få en spridning i testresultat och baserades till viss del på resultat från tidigare studier, som visade att låga halter gav bäst resultat. För att kunna tillverka provkroppar och sedan utföra tryckhållfasthetstester efter 7 respektive 28 dagar delades arbetet in i fyra etapper. I figur 2 visas hur musselskalen såg ut under några av arbetets stadier, från skal till färdigt bruk. De fyra etapperna beskrivs översiktligt nedan, för tydligare instruktioner se bilaga A.



Figur 2: Skal i olika stadier under arbetet. Från vänster: hela, krossade, malna, calcinerade, gjutna i bruk.

5.2.1 Etapp 1: Förberedning av musselskal

Skalen förbereddes genom att tvättas och skrubbas i vatten med stålborste. Detta gjordes för att få bort salt, sand och majoriteten av det organiska material som fanns på skalens yta. Därefter krossades skalens grovstruktur med hammare och torkades i en torkugn vid 105 °C över natten. Efter att skalens yta torkat krossades de ytterligare i en krossmaskin, för att sedan genomgå malning till ett fint pulver, som därefter siktades genom en 500 µm sikt. Pulvret lagrades i plastlådor för att minska påverkan från omgivning, i form av kontaminering och fukt. Maskinerna som användes för att krossa respektive mala kan ses i figur 3.



(a) Jaw Crusher av märke Retsch, krossar musselskal.



(b) Stenkvarn, maler krossade skal.

Figur 3: Maskiner som används under etapp 1 i det laborativa arbetet.

Det sista förberedande steget var att kalcinera pulvret i en ugn, för att få bort organiskt material och få pulvret att genomgå kalcinering. Detta utfördes genom att placera en liten mängd pulver i formar av glaserat keramiskt material och införa formarna i en brännugn. Därefter sattes temperaturen till 800 °C. Efter en timmes uppvärmning och fyra timmars kalcinering, stängdes ugnens värme av. Formarna lämnades i ugnen över natten för att svalna, och förflyttades till nya platslådor under morgonen därpå, samtidigt som en ny mängd pulver placerades i ugnen.

5.2.2 Etapp 2: Blandning av bruk

Sand siktades i en 4 mm sikt och förvarades i en större balja i laboratoriet. Murbruket blandades enligt standard i den blandare som kan ses i figur 4 [20]. Standarden beskriver både receptet för blandningen, samt hur blandaren ska vara inställd. Receptet som följdes bestod av 450 g bindemedel, 225 g vatten respektive 1350 g sand för en uppsättning. För att ersätta cementen i tillverkning av bruk blandades fem olika blandningar bestående av 5, 15, 30 och 50 viktprocent kalcinerat musselskalspulver, samt 5 viktprocent okalcinerat musselskalspulver. Dessutom blandades en referensblandning med endast cement som bindemedel. Två uppsättningar tillverkades för varje blandning. Specifikt recept för de olika blandningarna kan ses i Bilaga B.



Figur 4: Mixer för blandning av bruk i etapp 2.

5.2.3 Etapp 3: Tillverkning av provkroppar

Sex formar för prismor av dimensioner 40x40x160 mm fylldes med respektive blandning, där en uppsättning blandning täckte tre formar. Detta gav tre provkroppar för 7-dagarstest och tre för 28-dagarstest. Formarna placerades på vibrationsbord för att kompakteras, se figur 5, och härdades sedan under en plastduk i 24 timmar. Därefter avlägsnades prismorna från formarna, märktes upp med andel musselskal som blandats in och placerades slutligen i vattenbad i 7 respektive 28 dygn. Efter 7 respektive 28 dygn togs proverna upp och arbetet fortskred enligt etapp 4.



Figur 5: Form placerad på vibrationsbord. Steget utfördes under laborationens tredje etapp.

5.2.4 Etapp 4: Test av tryckhållfasthet

För att få fler provkroppar delades prismorna på hälften, och numrerades enligt figur 6, för respektive procentsats. Detta utfördes med hjälp av en maskin som testar böjdraghållfasthet, se figur 7a. Kropparna placerades sedan liggandes i en kubpress, se figur 7b, som mätte trycket som kan tillsättas innan kroppen går sönder. Efter test nedtecknades resultat för vidare analys.



Figur 6: Numrering av prover.



(a) Maskin, som testar böjdragshållfasthet, vilken användes för att dela provkropparna på mitten.



(b) Kubpress som användes för att testa tryckhållfasthet.

Figur 7: Maskiner som användes under laborationens sista etapp, för att utföra hållfasthetstester.

6 Resultat

I följande avsnitt presenteras resultat från laborativa tryckhållfasthetstester på gjutna provkroppar efter 7 samt 28 dygn. I tabell 5 och 7 presenteras resultat i procentuell förändring i förhållande till referensprov. Denna presentation av resultat valdes för att kunna jämföra laborativa resultat i denna studie med värden från tidigare studier. Detta då resultat i tidigare studier, se tabell 3, är baserade på tester utförda på betong, medan tester i denna studie är utförda på bruk. Därefter presenteras beräknade utsläpp från kalcinerade blåmusselskal.

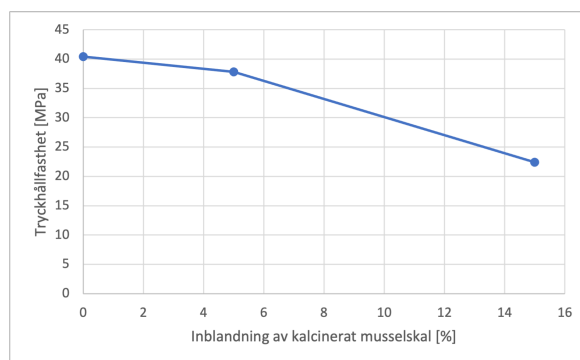
6.1 Tryckhållfasthet efter 7 dygns härdning

Efter att provkropparna förvarats i ett vattenbad under sju dygn, utfördes trycktester på kropparna med andel 0, 5, samt 15 viktprocent musselskal. Tryckhållfasthetstest för provkropparna med andel 30 respektive 50 viktprocent kunde ej utföras. Detta då provkropparna innehållande 50 viktprocent pulveriserades vid placering i vatten, och provkropparna med 30 viktprocent föll isär vid hantering. Resultaten från tryckhållfasthetstesterna presenteras i tabell 4, där gulmarkerade rutor refererar till avvikande värden, vilka är exkluderade vid beräkning av medelvärde.

Tabell 4: Resultat från tryckhållfasthetstest efter 7 dygn [MPa].

Viktprocent	Prov 1:1	Prov 1:2	Prov 2:1	Prov 2:2	Prov 3:1	Prov 3:2	Medelvärde
0	40,6	32,9	40,7	40,2	41,1	39,3	40,4
5	36,6	37,0	38,9	39,2	37,9	37,4	37,8
5, okalcinerat	39,6	39,9	39,8	39,6	34,0	41,2	40,0
15	23,2	24,1	22,6	22,6	20,6	21,6	22,4
30	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-

Tabell 4 visar på jämn spridning av värden för respektive viktprocentsats, med undantag för 0 viktprocent provkropp 1:2 och 5 viktprocent okalcinerat provkropp 3:1. Vid jämförelse av medelvärden för prover innehållande kalcinerat snäckskal, visar resultaten på att inblandning av en högre andel kalcinerat musselskal ger sämre tryckhållfasthet, se figur 8.



Figur 8: Medelvärden för data, efter 7 dygns härdning, med viktprocent 0, 5 och 15 kalcinerat musselskal.

I tabell 5 nedan illustreras hur tryckhållfastheten ändras procentuellt vid de olika procentsatserna jämfört med referensprov med 0 viktprocent musselskal. Detta beräknats genom att ta den aktuella procentsatsens medelvärde dividerat på medelvärdet vid 0 viktprocent inblandning av musselskal.

Tabell 5: Procentuell förändring av tryckhållfasthet efter 7 dygn jämfört med referensprov.

Viktprocentuell inblandning av musselskal i cement	5	5, okalcinerat	15
Procentuell förändring av tryckhållfasthet	-6,4 %	-1,0 %	-44,6 %

Tabell 5 ovan visar på att tryckhållfastheten efter sju dygn minskar vid tillsättning av musselskal. Vid 5 viktprocent okalcinerat musselskal minskar tryckhållfastheten med endast 1 % medan vid 5 viktprocent kalcinerat musselskal minskar tryckhållfastheten med 6,4 %. För de provkroppar med 15 viktprocent kalcinerat är det en minskning i tryckhållfasthet på 44,6 % jämfört med referensprovet.

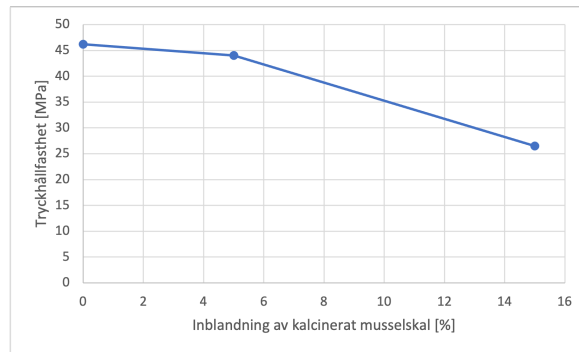
6.2 Tryckhållfasthet efter 28 dygns härdning

Efter 28 dygns förvarning i vattenbad av resterande provkroppar utfördes tryckttester på kroppar med andelar viktprocent kalcinerat musselskal 0, 5, och 15 samt 5 viktprocent okalcinerat musselskal. Likväl som vid testning av tryckhållfasthet efter 7 dygn utfördes här inga tryckhållfasthetstester på prover innehållande andel 30 respektive 50 viktprocent kalcinerat musselskal. I tabell 6 presenteras resultaten, där gulmarkerat värde refererar till avvikande värde, vilket är exkluderat vid beräkning av medelvärde.

Tabell 6: Resultat från tryckhållfasthetstest efter 28 dygn [MPa].

Viktprocent	Prov 1:1	Prov 1:2	Prov 2:1	Prov 2:2	Prov 3:1	Prov 3:2	Medelvärde
0	43,3	46,7	46,1	49,1	45,6	46,6	46,2
5	42,6	46,2	45,1	41,3	45,2	43,7	44,0
5, okalcinerat	44,7	47,3	43,9	45,3	49,2	50,6	46,8
15	26,0	26,1	20,4	25,3	26,3	28,5	26,5
30	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-

Tabell 6 ovan visar på sjunkande medelvärden tillhörande prover innehållande kalcinerat musselskal. Prov 2:1 innehållande 15 viktprocent kalcinerat musselskal avviker från resterande värden i provserien. I figur 9 nedan plottas medelvärden med avseende på tryckhållfasthet för prover innehållande kalcinerat musselskal. Vilka visar på att inblandning av en högre andel kalcinerat musselskal ger sämre tryckhållfasthet.



Figur 9: Medelvärden för data, efter 28 dygns härdning, med viktprocent 0, 5 och 15 kalcinerat musselskal.

Tabell 7 nedan representerar procentuell förändring i tryckhållfasthet utifrån medelvärden i tabell 6, och beräknas på samma sätt som förändringarna i tabell 5 ovan för testerna efter sju dagar.

Tabell 7: Procentuell förändring av tryckhållfasthet efter 28 dygn jämfört med referensprov.

Viktprocentuell inblandning av musselskal i cement	5	5, okalcinerat	15
Procentuell förändring av tryckhållfasthet	-4,8 %	1,3 %	-42,6 %

Resultatet i tabell 7 ovan visar negativa värden för procentsatserna 5 och 15 viktprocent innehållande kalcinerat musselskal. Resultatet för ersättning med 5 viktprocent okalcinerat musselskal visar på en ökad tryckhållfasthet i förhållande till referensprovet med 0 viktprocent musselskal.

6.3 Beräknade utsläpp från kalcinerade musselskal

Utifrån antagande om att cementindustrins koldioxidutsläpp motsvarar 697 kg CO₂ per ton tillverkad cement och att 60 % av dessa, 418 kg/ton, härleds från den kemiska reaktionen då CaCO₃ övergår till CaO och CO₂, samt att klinkermineralen består av 63 % CaO, utförs beräkningen att kalcinering av ett ton CaCO₃ skulle medföra ett utsläpp av 664 kg CO₂. Innehållet av CaCO₃ i *Mytilus edulis* antas vara 95 % vilket innebär att koldioxidutsläpp från enbart den kemiska reaktionen beräknas till 631 kg CO₂ per ton kalcinerade blåmusselskal. För beräkningar till utsläppen från kalcinerade musselskal se bilaga C.

Vid kalcinering av musselskalen används en temperatur på 800 °C, vilket motsvarar endast 55 % av de 1450°C som används vid tillverkningen av traditionell cement. Vid beräkning av koldioxidutsläpp för bränsleförbränningen antas därför att bränsleförbrukningen minskar med 45 %. Utifrån antagandet att 40 % av de 697 kg CO₂ per ton cement härleds från bränsleförbränningen vid tillverkning av traditionell cement, samt att kalcinering av musselskalen endast kräver 55 % av bränslet, beräknas koldioxidutsläppen från bränsleförbränningen motsvara 153 kg CO₂ per ton kalcinerade musselskal.

Vid beräkningen av det totala koldioxidutsläppet för kalcineringen av musselskalen summeras utsläppen från den kemiska reaktionen och bränsleförbrukningen. Detta resulterar i att det uppskattade koldioxidutsläppet från kalcineringen av musselskalen antas till 784 kg CO₂ per ton, detta leder till att fördelningen av utsläpp blir 80 % från kalcinering och 20 % från förbränningen av bränsle.

7 Diskussion

I följande avsnitt analyseras de mätdata som erhållits i förhållande till tidigare studier, samt vad som kan tänkas vara bakomliggande orsaker till dessa resultat. Vidare diskuteras även eventuella effekter vid ersättning av cement ur ett miljöperspektiv, möjliga felkällor och framtida studier.

7.1 Analys av resultat

Resultat presenterade i tabell 4 och 6, tyder på att ersättning av cement mot kalcinerat musselskal sänker bindemedlets tryckhållfasthet. Ur figur 8 och 9 kan det även avläsas att testerna har en större förlust av tryckhållfasthet mellan 5-15 viktprocent, jämfört med en substitution av 0-5 viktprocent. För 28-dagarstesterna visar resultatet att referensproven med 0 viktprocents inblandning, samt provkropparna där 5 viktprocent kalcinerat, respektive 5 viktprocent okalcinerat musselskal ersätts, alla håller sig inom intervallet 42,5-62,5 MPa. Detta betyder att recepten för de olika bruken uppfyller kravet för cementens tryckhållfasthet enligt standard SS-EN 197-1, som nämns i avsnitt 2.3.4. Utifrån våra tester innebär det teoretiskt att det finns en möjlighet att ersätta upp till 5 viktprocent av Byggcement mot skalet från *Mytilus edulis*, kalcinerat eller ej, och fortfarande uppfylla kravet för bindemedlets tryckhållfasthet. Som tidigare nämnt sänks tryckhållfastheten påtagligt då 15 viktprocent av cementen ersätts mot kalcinerat snäckskal. Tabell 8 visar att provkropparna uppvisar 42,6 % sämre tryckhållfasthet jämfört referensproven. Den stora differensen gör det möjligt att med säkerhet konstatera att bruket med 15 viktprocent ersättning har betydligt lägre tryckhållfasthet jämfört med referensprovet, trots få antal tester.

7.1.1 Provkroppar innehållande 30 respektive 50 viktprocent kalcinerat musselskal

Den kraftiga expansion som förekommer vid bildandet av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kan orsaka skador på betongen, om detta sker efter brukets hårdnande. Reaktion som sker mellan CaO och vatten bedöms vara den mest sannolika orsaken till det misslyckade hårdnandet av provkropparna 30, respektive 50 viktprocent. Vid tillverkning av vanligt klinkermineral med kalksten, mals klinkermineralen till en storlek på 1-128 μm . I vår studie mals musselskalen till en storlek på 500 μm som störst. Vid mindre storlek ökar kontaktytan mellan vatten och cementkorn, vilket i sin tur ökar reaktionshastigheten. Den större storleken på vårt material gjorde kontaktytan mindre och hade därmed troligtvis en negativ inverkan på reaktionshastigheten. Detta kan ha gjort att bildandet av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pågick efter brukets hårdnande och därför gav oönskade konsekvenser för bruken där 30 respektive 50 viktprocent av cementen ersätts.

7.1.2 Fillereffekten

Tvärt emot det förväntade resultatet vid ersättningen med 5 viktprocent okalcinerat musselskal, uppvisar provkropparna inte bara en högre tryckhållfasthet jämfört ersättningen med 5 viktprocent kalcinerat, utan även högre jämfört referensproven. Den observerade ökningen i tryckhållfasthet skulle möjligtvis kunna kopplas till fillereffekten. Då de malda musselskalen var av storleksordningen 500 μm och lägre, så kan det tänkas att en finmald fraktion i storleksordning $\leq 125 \mu\text{m}$, agerar som en filler. Detta skulle medföra att cementpastan får en bättre packning, där strukturel som hålrum och sprickor minskar, vilka annars vanligtvis försvagar bruket.

Vid utformning av recept för de olika bruken, antas de kalcinerade musselskalen agera som ett

hydrauliskt bindemedel där en specifik viktandel av cementen substituerades. De okalcinerade musselskalen antas dock inte fylla funktionen som bindemedel i cementen, utan kommer enligt teorin istället fungera som filler eller ballast. Därmed blir mängden hydrauliskt bindemedel i receptet lägre, medan mängden vatten förblir den samma. Det är anmärkningsvärt att enligt ekvation 3, skulle substitutionen av 5 viktprocent okalcinerat musselskal medföra ett förhöjt vct för bruket, från 0,50 till 0,53, vilket teoretiskt sett skulle resultera i en lägre tryckhållfasthet. Att resultatet från provtryckningen visar en högre tryckhållfasthet talar för att ersättningen av de okalcinerade musselskalen inte bara kompenserar för den teoretiskt förlorade tryckhållfastheten från ett förhöjt vct, utan även höjer provkroppens tryckhållfasthet i förhållande till referensprovet. Dessa resultat bör dock tolkas med försiktighet då antalet provtagningar anses vara för få till antal och differensen i resultatet för liten, för att avgöra hurvida resultatet är statistiskt signifikativt eller ej. Förändringen av vct är också så pass liten, att den skulle kunna tänkas vara nära försumbar. Det är dock en intressant observation att en mindre mängd cement används i proven, men ändå uppnås en likvärdig tryckhållfasthet.

7.1.3 Kiseldioxidens inverkan

Från tabell 3 som hittas i avsnitt 3.3 finns noterbara värden. Resultatet för ostronskalen sticker ut ur mängden, då det visar en ökad tryckhållfasthet vid inblandning av upp till 10 viktprocent kalcinerat ostronskal. I tabell 2 presenteras även innehållet av SiO_2 och CaCO_3 för olika snäckskal, där ostronskalen återigen utmärker sig med sitt höga innehåll av SiO_2 . Detta resultat antyder att cement som ersätts med ett kalcinerat snäckskal vars innehåll SiO_2 är förhållandevis högt, även visar en högre tryckhållfasthet jämfört sitt referensprov. I arterna som undersöktes ingick dock inte *Mytilus edulis*. Däremot ingår grönmussla som är nära besläktad *Mytilus edulis*. Grönmusslan har ett SiO_2 -innehåll som är fem gånger mindre jämfört ostron från havet.

Det kan således tänkas att en möjlig anledning till att provkropparna med kalcinerat skal av *Mytilus edulis* uppvisar en försämrad tryckhållfasthet, jämfört med skal från andra arter, kan härledas till *Mytilus edulis* låga SiO_2 -innehåll. Det bör dock tas i beaktning att laborativa tryckhållfasthetstester utfördes på bruk medan resultat från tidigare studier kommer från tester på betong. SiO_2 påverkar i första hand cementens tryckhållfasthet, men då det med säkerhet inte kan sägas hur cementen påverkar betongen respektive brukets tryckhållfasthet, presenteras resultaten i procentuell förändring i förhållande till respektive referensprov.

Innehållet av SiO_2 vid bränningen är avgörande för att klinkermineralen C_2S och C_3S ska kunna bildas. Dessa är, tillsammans med vatten, de reaktanter som ingår i bildandet av C-S-H och $\text{Ca}(\text{OH})_2$. C-S-H är produkten som svarar för cementens primära utveckling av tryckhållfasthet. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ anses däremot inte ha någon betydande eller rent av ha en negativ effekt på tryckhållfastheten, då kristaller av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gör cementgelen mindre homogen. En brist på oxider, framförallt SiO_2 , vid kalcineringen av musselskalen är därför en teori som styrker hypotesen om att det finns en koppling mellan skalens SiO_2 -innehåll och den uppmätta tryckhållfastheten.

Om klinkermineralen inte skulle bildas på grund av bristen på oxider, kan det dessutom tänkas att produkten vid kalcineringen av musselskalen till största del kommer att bestå av CaO . Att ersätta cement med musselskal blir därför problematiskt då det resulterar i att andelen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i cementgelen ökar, medan C-S-H minskar, vilket troligen skulle resultera i en sänkt tryckhållfasthet.

Det bör även uppmärksammas att temperaturen vid kalcineringen av både snäckskalerna i de de

tidigare studierna, samt *Mytilus edulis*, nådde ett intervall 700-1000 °C. Som tidigare nämnt i avsnittet 2.3.1, vilket beskriver processen vid bildandet av klinkermineralen, krävs en temperatur på cirka 1100 °C för att reaktionen mellan CaO och SiO₂ ska äga rum. Detta antyder på att temperaturen vid kalcineringen är för låg och att klinkermineralen C₂S och C₃S inte skulle kunna bildas. Detta i sin tur är motsägande för att hypotesen om att ostronskalen skulle uppvisa en högre tryckhållfasthet på grund av tillgången till SiO₂.

Däremot skulle ett större SiO₂-innehåll i snäckskalerna tala för en möjlighet till en högre puzzolanaktivitet i cementen. Aktiviteten skulle bidra till en ökad produktion av C-S-H, vilket teoretiskt sett även skulle bidra till en högre tryckhållfasthet. Denna slutsats lyfts även i studien presenterad i avsnitt 3, som anger puzzolanaktivitet som en möjlig anledning till den ökade tryckhållfastheten för ostronskalen. Dock krävs det att SiO₂ existerar i ett amorft tillstånd för att den ska vara reaktiv. Från de studier som gjorts kring *Mytilus edulis*, kan det konstateras att dess CaCO₃ är i kristallin form, men ingen information angående i vilken form dess SiO₂ eller övriga oxider existerar har hittats. För att avgöra om bristen på SiO₂, dess kemiska struktur eller en kombination av båda, skulle kunna vara den bakomliggande orsaken till den låga tryckhållfastheten uppvisad i provet innehållande 15 viktprocent, bör den kemiska strukturen hos *Mytilus edulis*, efter den har kalcinerat, undersökas efter *Mytilus edulis* har kalcinerats.

7.2 Miljöpåverkan

Med en årlig produktion på 2,8 miljoner ton cement, ökande urbanisering och infrastruktursatsningar, är cementproduktionen viktig för Sverige. Då man endast sett en ökning av produktionen under de senaste åren, finns det inget som tyder på att trenden skulle vända. Dock finns det stora miljöproblem, som utsläpp av växthusgaser och markanspråk, direkt kopplat till cementtillverkningen.

7.2.1 Koldioxidutsläpp

Av de globala koldioxidutsläpp som sker varje år kommer cirka 8 % från tillverkningen av cement, varav 60 % av dessa utsläpp är direkt kopplade till den kemiska reaktion som sker vid kalcineringen. Koldioxid som funnits bundet i kalksten under flertal miljoner år avgår i reaktionen och är en kraftigt bidragande faktor till cementens problematik med utsläpp av växthusgaser. För att försätta vara den fundamentala grundsten till utvecklingen av samhället som cementen har varit under tusentals år, men utan att bidra till förödande klimatförändringar, anser vi det därför vara väsentligt att hitta ett alternativ till dagens cement som uppfyller en likvärdig kvalitet.

Kalksten är den ingrediens i cement med störst inverkan på miljön, och är därmed den enskilt största faktorn till varför cementproduktionen idag anses ohållbar. Den koldioxid som binds under bildandet av kalksten har möjlighet att lagras i stenen under miljontals år, förutsatt att dess naturliga kretslopp inte störs av mänsklig påverkan. Vid kalcinering frigörs dock den inbundna koldioxiden, vilket medför en störning i kretsloppet. Likt förbränningen av fossila bränslen, sker utsläppen i snabbare takt jämfört den tid det tar för kalkstenen att binda samma mängd, vilket leder till att koncentrationen koldioxid i atmosfären ökar.

Vid kalcinering av musselskal avgår en stor mängd koldioxid, precis som vid kalcineringen av kalksten. Däremot är kolcykeln för musselskalen betydligt kortare, vilket innebär att nya musselskal kan binda koldioxidutsläppen från den tidigare kalcineringen snabbare än kalkstenen. Musslornas relativt korta omloppstid har därför potential att skapa ett cirkulärt kretslopp för den koldioxid som

avgår vid kalcineringen. Då kalcineringsreaktionerna står för 60 % av utsläppen vid produktionen av cement anser vi att det finns stora fördelar med att substituera cement, alternativt kalkstenen som används vid tillverkningen av cement, mot skalet från *Mytilus edulis*. Resterande 40 % av koldioxidutsläppen sker vid förbränningen av bränslen för att uppnå den höga temperatur som krävs vid tillverkningen. Vid kalcinering av musselskalen i arbetets laborativa del användes en lägre temperatur på 800 °C jämfört med 1450 °C, som används vid bränning av kalksten. Genom att använda den lägre temperaturen kan bränsleåtgången minskas med 45 %, antaget att det inte sker några energiförluster.

När man ersätter cement med kalcinerade musselskal förändras fördelningen av koldioxidutsläpp från cementproduktionens 60 % från kalcinering och 40 % från bränsleförbränning, till 80 % från kalcinering och 20 % från bränsleförbränning. Detta beror på att musselskalen antas innehålla 95 % CaCO_3 , vilket är en större andel än cementens 63 %, men också på grund av den lägre temperaturen som används vid kalcineringen som beskrivet ovan. Om det sker en minskning med 45 % av de 20 % av koldioxidutsläppen som orsakas av bränsleförbränning, kommer det således släppas ut 153 kg CO_2 vid produktion av ett ton kalcinerade musselskal, vilket kan jämföras med 279 kg CO_2 per ton cement.

Det sker även en förändring av koldioxidutsläpp mellan kalcinerade musselskal och cement vid kalcineringsprocessen. Eftersom musselskal innehåller en högre andel CaCO_3 kommer ett ton musselskal släppa ut mer koldioxid än ett ton cement när det reagerar. Som det beskrivs i avsnitt 6.3, är koldioxidutsläppen för musselskal 631 kg/ton medan det för cement är 418 kg/ton. Detta är en ökning med 51 %. Det kan ses som negativt att få högre koldioxidutsläpp, dock kommer utsläppen från musselskalen från ett kort kretslopp, där koldioxiden kan anses ha en nettoneutral påverkan på koldioxidkoncentrationen i atmosfären. Detta är fördelaktigt jämfört med koldioxidutsläpp från cement, vilka bidrar till en ökad halt koldioxid i atmosfären eftersom de ingår i ett långt kretslopp. Dessutom innehåller musselskal en högre andel CaCO_3 , vilket ger mer CaO per ton material. Det innebär att det är mer effektivt att kalcinera musselskal än cement sett till tillverkad CaO per ton kalcinerat material. Det är också värt att nämna att trots att koldioxidutsläppen växer för de kalcinerade musselskalen är den kemiska reaktionen densamma, CaCO_3 bildar CaO och CO_2 , vilket innebär att utsläppen för ett ton bildat CaO är densamma oavsett om den kommer från musslor eller kalksten. Sammanfattningsvis innebär detta att om man i framtiden lyckas helt ersätta kalkstenen i cement mot musselskal, får man en mer effektiv förbränning samt att man inte behöver använda en ändlig resurs.

Skulle musselskal med den lägre kalcineringstemperaturen ersätta 5 % av cementen vid tillverkningen av provkroppen, ökar det totala koldioxidutsläppet vid tillverkningsprocessen motsvarande 0,6 % av utsläppen vid traditionell tillverkning. Detta hade gett en årlig ökning på 14 348 ton koldioxid i Sverige, baserat på cementindustrins utsläpp år 2019. Skulle cementen istället substitueras mot 5 viktprocent okalcinerat musselskal, skulle de årliga koldioxidutsläppen från cementproduktionen minska med 5 %, vilket motsvarar 114 500 ton.

Vidare gavs goda resultat av tryckhållfasthetstesterna för ersättningen med 5 viktprocent okalcinerat musselskal. Detta kan medföra möjligheten att inte bara påverka kolets kretslopp, utan att även helt undvika de koldioxidutsläpp som vanligtvis uppstår vid tillverkning av cement. Som presenteras i avsnitt 4.1, kan musselskalen även anses vara en kolsänka om de okalcinerade gjuts in i betong. På så sätt finns det även en potential att lagra en del koldioxid i form av CaCO_3 i betongen. I avsnitt 4.1 poängteras dock att musslans vävnad inte inkluderades vid beräkning av skalens koldioxidbud-

get, och att hela musslan bör anses som en kolkälla då både skal och vävnad är inkluderade. För att utnyttja de potentiella fördelarna med att substituera cement mot musselskal är det därför viktigt att även musslornas vävnad tas tillvara på. Sammanfattningsvis bör odlingen av musslor inte ske endast med syfte att använda av skal, utan hela musslan måste tas till vara på för att uppnå en positiv påverkan på koldioxidutsläppen.

7.2.2 Inverkan på natur och samhälle

Ytterligare en nackdel med kalksten är att den ofta utvinns ur dagbrott vilket gör stora markanspråk och påverkar områdets markyta permanent. Detta kan medföra stora negativa effekter på ekosystem, biologisk mångfald och grundvatten inom området. Hållbara ekosystem är en förutsättning för vårt och kommande generationers liv på jorden och ingår därför i Förenta nationernas globala mål nummer 15; att skydda, återställa och främja ett hållbart nyttjande av landbaserade ekosystem. Dock kan kalkstenen anses vara en högt eftertraktad råvara som bidrar till ekonomisk tillväxt, vilket har gjort att några områden pekats ut som riksintresse på grund av dess kalktillgång. Ekonomiska och miljömässiga aspekter ställs därför mot varandra och kan skapa konflikter mellan intressenter som önskar använda dessa områden för olika ändamål.

Som i exemplet Ojnareskogen på Gotland där det uppstod en tvist då företag önskade expandera kalkbrytningen, men det ansågs ha negativa effekter på ett känsligt naturområde. Ekosystemtjänster som exempelvis tillgång till grundvatten samt den biologiska mångfalden ansågs överväga de ekonomiska fördelarna, vilket bidrog till att tillståndet för kalkbrytning i området drogs tillbaka. Till skillnad från kalksten som utvinns i dagbrott kan musslor odlas i havet under kontrollerade förhållanden. Att istället använda musselskal som substitut till cement kan därför bidra till en minskad exploatering av känsliga naturområden. En viktig förutsättning är dock att odlingen inte bidrar till negativa följder för havsmiljön och att den sker på ansvarsfullt vis. Ökade odlingsanläggningar av musslor hade dessvärre kunnat ha en negativ påverkan på det naturliga livet som råder i närliggande områden.

Placering av odlingar är något som berör aspekten om huruvida råvaran är lättillgänglig. För kuststäder, med företag som inriktar sig på musselodlingar eller liknande, kan tillgängligheten av skal vara stor. För städer som ligger långt från kusten eller inte har ett klimat som gynnar odlingar, kan tillgängligheten istället vara mindre. Då kan skal behöva fraktas långa vägar, vilket hade bidragit till en ökad mängd utsläpp via transport. Å andra sidan är tillgängligheten på kalkgruvor liten och kalksten transporteras därför redan långa vägar i Sverige och till eller från andra länder.

7.3 Felkällor

Något som kan ha påverkat resultatet är att byggcement användes istället för OPC. I de tidigare studierna som analyserades användes OPC, och denna skillnad kan ha påverkat jämförelsen. Som nämns i avsnitt 2.3.4, skiljer sig utvecklingen av hållfasthet mellan Byggcement och OPC. Då Byggcement har en längre hållfasthetutveckling än OPC, försvårar det möjligheten till att jämföra resultat från tidigare studier.

Ytterligare en aspekt som kan försvåra jämförelsearbetet mellan resultat från denna rapport och tidigare studier inom området, är att de tidigare studier som använts alla utförts i Asien där klimatet skiljer sig från det svenska. I avsnitt 1 fastställs att temperatur och salinitet har stor påverkan för

hur musslorna växer. Det skilda klimatet i Asien kan därför ha en inverkan på innehållet hos de snäck- och musselskal som studerats där.

Vid planering av arbetet var avsikten att mala musslorna till en mindre storlek än vad som blev möjligt. Vid malning av skal till en mindre storlek ökar den totala ytarean och därmed reaktiviteten hos de kalcinerade musselskalen. Samma princip kan även appliceras på ballasten. Som nämnt i avsnitt 2.3.5 ska den sand som används enligt standard SS-EN 196-1, hanteras på ett visst sätt för att uppfylla kraven. Sanden som användes hanterades inte på de sätt som är beskrivna i standarden, till exempel siktades den genom en 4 mm sikt istället för 2 mm. Avvikelserna kan påverka resultatet genom att den sammanlagda ytareaminskningen ger en avsevärd minskning i bindningsmöjlighet.

Den mänskliga faktorn kan ha en betydelse för resultaten av tryckhållfasthet. Under utförandet av arbetet rådde en pandemi, som orsakade en begränsning över hur många personer som kunde befinna sig i laboratoriet under samma tillfälle. Arbetet utfördes parallellt med en annan arbetsgrupp inom samma område, och det laborativa arbetet delades upp mellan grupperna. För att ge alla möjlighet att vara delaktiga under processen har olika personer utfört olika moment. Detta ökar risken för felkällor orsakade av människor, och hade kunnat undvikas om en och samma person utförde samtliga moment. Med avsikt att minska denna felkälla, fördes utförliga anteckningar över det utförda arbetet, som kunde följas av nästkommande laborant. Trots det, är det inte tillräckligt för att förbise den mänskliga faktorn.

7.4 Framtida studier

En intressant framtida studie skulle kunna vara att byta ut kalksten i cement mot malt musselskal redan vid tillverkning. På så sätt skulle skalen vara källan till CaCO_3 , och den förmodade bristen på oxider kunna motverkas genom inblandning av lera vid bränningen. Detta är intressant då miljöeffekten av producerad betong och bruk troligtvis skulle förbättras och CaO-halten skulle samtidigt vara oförändrad.

Receptet i studien har utformats efter ett vct på 0,50. Vid ersättningen av cement mot okalcinerat musselskal höjs vct då musselskalen agerar som filler. De skulle därför vara intressant för vidare studier att undersöka hur mycket inblandning av okalcinerat musselskal som kan ersättas och samtidigt bibehålla god hållfasthet i takt med att vct ökar.

Framtida studier med fokus på det kemiska innehållet samt strukturen av *Mytilus edulis* hade varit av intresse. Detta för att bättre kunna undersöka den eventuella påverkan SiO_2 och andra oxider har på hållfastheten. Viktiga aspekter att undersöka är om strukturen är amorf eller kristallin, samt hur högt innehållet av olika oxider är.

Antalet provkroppar i detta arbete är för få för att kunna ses som en statistisk undersökning, och anses istället vara en jämförande studie. För att kunna ha testerna som statistiskt underlag bör fler provkroppar testas. Med rapporten som bakgrund, hade procentuella inblandningar inom intervallet 0 till 15 viktprocent varit av störst intresse för framtida undersökningar där tryckhållfasthetens förändring studeras.

8 Slutsats

Utifrån de laborativa resultaten kan en slutsats dras om att prover innehållande 5 viktprocent kalcinerat respektive okalcinerat musselskal, uppfyller kvalitetskraven på en tryckhållfasthet mellan 42,5-62,5 MPa efter 28 dagar. Dessa ersättningsandelar kan därmed substituera cement som hydrauliskt bindemedel vid tillverkning av bruk, och samtidigt bibehålla god hållfasthet. Däremot uppnådde ersättningsandelarna 15, 30 och 50 viktprocent kalcinerat musselskal inte kvalitetskraven. Detta antas bero på kraftig expansion vid bildandet av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ efter brukets hårdnande, vilket tyder på att kalcinerat musselskal endast kan ersätta en mindre andel cement som hydrauliskt bindemedel.

En ersättning av 5 viktprocent kalcinerat musselskal kan vara miljömässigt fördelaktigt då det bidrar till en minskad cementkonsumption. Även om koldioxidutsläppen ökar med 0,6 % vid utbyte fås positiva konsekvenser så som att koldioxiden hamnar i ett kortare kretslopp och kalkbrytningen samt bränsleförbrukningen minskar. En ersättning med 5 viktprocent okalcinerade musselskal medför ännu större miljömässiga fördelar. Detta på grund av att de inte genomgår kalcinationsprocessen och därmed avges varken koldioxid från förbränningen av bränsle, eller från den kemiska reaktionen i musselskalen.

Skillnaden i innehåll av SiO_2 i snäckskal har enligt tidigare studier visat ett mönster där en större mängd SiO_2 leder till högre tryckhållfasthet. Dock har inget entydigt svar framkommit om varför det är så, när endast kalcinering genomförs och inte bränning. *Mytilus edulis* innehåller troligen en låg mängd SiO_2 , vilket kan vara en förklaring till att tryckhållfasthetstesterna i denna studie inte uppnådde samma resultat som tidigare studier. Den mest intressanta aspekten att undersöka i framtida studier anses vara potentialen att ersätta kalkstenen i cementtillverkningen mot snäckskal, istället för direkt substitution av cement. Detta då andra delar i cementen såsom lera innehåller den viktiga komponenten SiO_2 , samt andra oxider, som är essentiella för utveckling av cementen under klinkerprocessen.

Referenser

- [1] J. Lehne och F. Preston, *Making Concrete Change, Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. London: The Royal Institute of International Affairs, Chatham House, 2018, ISBN: 978 1 78413 272 9.
- [2] C. Ljungkrantz, G. Möller och N. Petersons, *Betonghandbok*, ser. Material. AB Svensk Byggtjänst och Cements AB, 1994, ISBN: 9173327093.
- [3] B. A. Tayeh, M. W. Hasaniyah m. fl., "Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review," *Journal of Cleaner Production*, årg. 237, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117723.
- [4] A. Perea, T. Kelly och Y. Hangun-Balkir, "Utilization of waste seashells and Camelina sativa oil for biodiesel synthesis," *Green Chemistry Letters and Reviews*, årg. 9, nr 1, s. 27–32, 2016. DOI: 10.1080/17518253.2016.1142004.
- [5] N. Kautsky, K. Johannesson och M. Tedengren, "Genotypic and phenotypic differences between Baltic and North Sea populations of *Mytilus edulis* evaluated through reciprocal transplantations. I. Growth and morphology," *Marine Ecology Progress Series*, årg. 59, s. 203–210, 1990.
- [6] M. Persson, B. Karlson m. fl., "Kontrollprogrammet för tvåskaliga blötdjur, Årsrapport 2014-2019," *Livsmedelsverkets rapportserie*, årg. L 2020, nr 24, s. 20–21, 2020. URL: <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/publikationsdatabas/rapporter/2020/1-2020-nr-24-arsrapport-2014-2019-kontrollprogrammet-for-tvaskaliga-blotdjur.pdf?AspxAutoDetectCookieSupport=1> (hämtad 2021-03-30).
- [7] Svenskt vattenbruk. (2020). "Musselodling," URL: <http://www.svensktvattenbruk.se/46/att-driva-vattenbruk/vattenbruksinriktning-och-teknik/musselodling.html?fbclid=IwAR153opb2TcS9S-gmuGh3iWdca10r5rxg8YUay9mk6bKM4vs0ksHfvuwP70> (hämtad 2021-04-19).
- [8] S. Konstmann Lausen från Aalborg Portland A/S, privat kommunikation, 23 febr. 2021.
- [9] C. R. Gagg, "Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis," *Engineering Failure Analysis*, årg. 40, s. 114–140, 2014.
- [10] P. G. Burström och K. Nilvér, *Byggnadsmaterial : tillverkning, egenskaper och användning*, 3 uppl. Lund: Studentlitteratur, 2018, ISBN: 9789144057552.
- [11] Cements AB. (2021). "Kort företagsfakta," URL: <https://www.cementa.se/sv/foretagsfakta> (hämtad 2021-02-18).
- [12] G. Moir, "1 - Cements," i *Advanced Concrete Technology*, J. Newman och B. S. Choo, utg., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, s. 3–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-075065686-3/50277-9>.
- [13] G. Fagerlund, "Mineraliska tillsatsmaterial i cement," svenska, *Bygg & teknik*, s. 23–29, 2010.
- [14] R. W. Douglas, G. D. Mahan och R. Zallen, "Amorphous Solid," *Encyclopædia Britannica (Aug. 1998)*. url: <https://www.britannica.com/science/amorphous-solid#accordionarticle-history>, 2016.
- [15] *Byggcement - Produktinformation*, Cements AB, Stockholm, Sweden, 2021.

- [16] *Cement, Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement*, 2. utg., SS-EN 197-1, Stockholm, Sweden: Svenska Institutet För Standard, 2013. URL: https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/cement-gips-kalk-bruk/ssen1971/?fbclid=IwAR0HwRv8nng2FxygzjlfI6PfDLTgd7uxICddqgH5yINwKBsJCd4q_E4wn5Y.
- [17] Cementa AB och Heidelberg Cement Group, *Portland Limestone Cement CEM II/A-LL 42.5 R*, i *Environmental Product Declaration, as per /ISO 14025/ and /EN 15804/n*, EPD-HCG-20190045-CAA1-EN, Berlin, Tyskland: Institut Bauen und Umwelt e.V (IBU), 2019.
- [18] D. Nilsson och D. Lundgren, *Betongens hållfasthetsutveckling vid användning av olika ersätare för portlandklinker: En laborativ studie*, 2012.
- [19] A. Almssad och G. Lindberg, *Betongkonstruktion*, 1 uppl. Lund: Studentlitteratur, 2015, ISBN: 9789144109961.
- [20] *Cement - provning, Del 1: Bestämning av hållfasthet*, 3. utg., SS-EN 196-1, Stockholm, Sweden: Svenska Institutet För Standard, 2016. URL: <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/cement-gips-kalk-bruk/ssen19%20612016/>.
- [21] G. O. Bamigboye, A. T. Nworgu m. fl., “Sustainable Use of Seashells as Binder in Concrete production: Prospect and challenges,” *Journal of Building Engineering*, 2020. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101864.
- [22] S. Abinaya och S. Venkatesh, “An effect on oyster shell powder’s mechanical properties in self compacting concrete,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, årg. 5, nr 6, 2016.
- [23] P. Lertwattanakul, N. Makul och C. Siripattaraprat, “Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering,” *Journal of environmental management*, årg. 111, s. 133–141, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.06.032.
- [24] P. F. Duncan, “SHELLFISH | Commercially Important Molluscs,” i *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)*, B. Caballero, utg., Second Edition, Oxford: Academic Press, 2003, s. 5222–5228. DOI: 10.1016/B0-12-227055-X/01079-8.
- [25] C. Martinez-Garcia, B. González-Fonteboa m. fl., “Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete,” *Construction and Building Materials*, årg. 139, s. 570–583, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.091.
- [26] M. J. Costello, P. Bouchet m. fl., “Global coordination and standardisation in marine biodiversity through the World Register of Marine Species (WoRMS) and related databases,” *PloS one*, årg. 8, nr 1, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0051629.
- [27] F. Hubbard, J. McManus och M. Al-Dabbas, “Environmental influences on the shell mineralogy of *Mytilus edulis*,” *Geo-Marine Letters*, årg. 1, nr 3-4, s. 267, 1981. DOI: 10.1007/BF02462445.
- [28] N. Nordin, Z. Hamzah m. fl., “Effect of temperature in calcination process of seashells,” *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, årg. 19, nr 1, s. 65–70, 2015.
- [29] M. Olivia, A. A. Mifshella och L. Darmayanti, “Mechanical properties of seashell concrete,” *Procedia Engineering*, årg. 125, s. 760–764, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.127Get.
- [30] M. Olivia, R. Oktaviani m. fl., “Properties of concrete containing ground waste cockle and clam seashells,” *Procedia engineering*, årg. 171, s. 658–663, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.404.

- [31] S. T. Zaid och V. G. Ghorpade, "Experimental Investigation of Snail Shell Ash as Partial Replacement of Ordinary Portland Cement in Concrete," *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* Vol, årg. 3, nr 10, s. 1049–1053, 2014.
- [32] N. Hazurina, O. Universiti m. fl., "Potential use of cockle (anadara granosa) shell ash as partial cement replacement in concrete," *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, årg. 2, s. 369–376, 2013.
- [33] M. Azmi och M. Johari, "Cockle Shell Ash Replacement For Cement And Filler In Concrete," *Malaysian Journal of Civil Engineering*, årg. 25, nr 2, s. 201–211, 2013.
- [34] K. H. Mo, U. J. Alengaram m. fl., "Recycling of seashell waste in concrete: A review," *Construction and Building Materials*, årg. 162, s. 751–764, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009.
- [35] Cementa AB. (2021). "Nollvision för koldioxid," URL: <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030> (hämtad 2021-02-19).
- [36] Statistiska centralbyrån, *Totala utsläpp av växthusgaser efter växthusgas, sektor och år*, Sökning 1: Koldioxid, Förbränning i cement-, kalk- och gipstillverkning (CRF 1A2f) samt Processutsläpp cementproduktion (CRF 2A1), 2019. Sökning 2: Koldioxid, Industri totalt, 2019. URL: https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0107/MI0107Industri/ (hämtad 2021-05-14).
- [37] P. Ciais, C. Sabine m. fl., "Carbon and Other Biogeochemical Cycles," i *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013.
- [38] O. Hoegh-Guldberg, R. Cai m. fl., "The ocean," i *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. Turley och L. Omar, utg. Cambridge University Press, 2014, kap. 30, s. 1655–1731, ISBN: 9781107058163, 9781107683860.
- [39] O. Modin, "pH, alkalinitet, karbonatsystemet och hårdhet," i *Om vatten*. 2017, kap. 4. URL: https://omvatten.se/onewebmedia/4_pH.pdf (hämtad 2021-04-27).
- [40] Woods Hole Oceanographic Institution. (2021). "Carbon Dioxide, Shell Building, and Ocean Acidification," URL: <https://www.whoi.edu/multimedia/carbon-dioxide-shell-building-and-ocean-acidification/> (hämtad 2021-04-28).
- [41] R. Filgueira, T. Strohmeier och Ø. Strand, "Regulating services of bivalve molluscs in the context of the carbon cycle and implications for ecosystem valuation," i *Goods and Services of Marine Bivalves*, A. Smaal, J. G. Ferreira m. fl., utg., Springer, Cham, 2018, s. 231–251. DOI: 10.1007/978-3-319-96776-9_12.
- [42] H. Ganapathi och M. Phukan, "Environmental Hazards of Limestone Mining and Adaptive Practices for Environment Management Plan," i *Environmental Processes and Management, Water Science and Technology Library*, R. Singh, P. Shukla och P. Singh, utg., vol. 91, Springer, 2020, s. 121–134. DOI: 10.1007/978-3-030-38152-3_8.
- [43] P. Liljas. (28 april 2018). "Naturvärden hotas när cementindustrin expanderar på Gotland," Sveriges Natur, URL: <https://www.sverigesnatur.org/aktuellt/naturvarden-hotas-nar-cementindustrin-expanderar-pa-gotland/> (hämtad 2021-05-04).

- [44] Naturskyddsföreningen. (2021). "Ojnarestriden - lång kamp för ett unikt område," Naturskyddsföreningen, URL: <https://www.naturskyddsforeningen.se/ojnarekampen> (hämtad 2021-05-03).
- [45] T. Hofset. (24 juli 2020). "Kalkbrytning i Bunge," Naturvårdsvärket, URL: <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Rattsinformation/Rattsfall/Takter/Kalkbrytning-i-Bunge/> (hämtad 2021-05-03).
- [46] B. A. Tayeh, M. W. Hasaniyah m. fl., "Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement," *Journal of Building Engineering*, årg. 31, s. 101328, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101328.

Bilagor

A Tillvägagångssätt

A.1 Etapp 1: Förberedning av musselskal

1. Skrubba och tvätta skalen med stålborste under vatten, för att få bort salt, sand och synligt organiskt material.
2. Krossa skalen grovt med en hammare och lägg i en ugnssäker form.
3. Torka skalen i torkugn på 105 °Celsius [46] över natten.
4. Krossa skalen ytterligare i krossmaskin.
5. Mal skalen fint i maskin tills skalen blivit pulveriserade och kan passera genom en fin sikt.
6. Sikta skalpulvret genom en sikt av storlek 500 µm och spara det som kommer igenom i plastlådor.
7. Mal om det som inte passerat sikten och upprepa steg 6.
8. Placera ett tunt lager, mindre än 1 cm, av det malda pulvret i ugnformar, och placera i en avstängd brännugn.
9. Värm brännugnen till 800 °Celsius [28], efter temperaturen är nådd, låt bränna i fyra timmar. Stäng av värmen. Öppna ej ugnen under tiden.
10. Låt det brända pulvret svalna i ugnen över natten.
11. Placera det avsvalnade pulvret i en försluten behållare.
12. Upprepa steg 8-11 för det resterande pulvret.

A.2 Etapp 2: Blandning av bruk

Blandning utförs i en mixer inställd enligt standard 196-1 [20] Om det är endast ett bindemedel, hoppa över steg 3.

1. Sikta sand genom en 4 mm sikt.
2. För steg 3-9 nedan görs blandning enligt recept i tabell B.1 i Bilaga B. De olika komponenterna vägs upp i bägare på våg.
3. Förblanda torrt pulver på låg hastighet i 30 sekunder. Tryck stopp.
4. Tillsätt vatten.
5. Blanda på låg hastighet i 30 sekunder.
6. Tillsätt sand under fortsatt blandning i 30 sekunder.
7. Byt till hög hastighet och blanda i 30 sekunder.

8. Stanna maskinen i 90 sekunder, rengör under denna tiden mixerbladen och rör runt det dåligt mixade pulvret i botten av skålen. Sätt tillbaka skålen.
9. Blanda på hög hastighet i 60 sekunder. Tryck på stop och ta bort skålen från maskinen.
10. Upprepa steg 3-9 två gånger för alla blandningar med olika mängd pulver av kalcinerat mus-selskal.

A.3 Etapp 3: Tillverkning av provkroppar

1. Täck 20 prismor, av dimension 40x40x160 mm, med ett tunt lager av olja.
2. Fyll prismorna med bruk.
3. Håll fast en form på vibrationsbordet och kompaktera. Låt bordet vibrera i ca 10 sekunder, tills inga stora luftbubblor är synliga, ytan får ett glaserat utseende och ingen uppenbar separation uppstår.
4. Upprepa steg 3 med resterande prover.
5. Märk alla formar med papperstejp efter andel ersatt cement.
6. Placera formarna under plastduk vid 20 ± 5 °Celsius och låt härda i 24 timmar.
7. Ta ur provkropparna ur formerna och placera i vattenbad med temperatur 20 ± 2 °Celsius.
8. Låt stå i 7 respektive 28 dygn.

A.4 Etapp 4: Hållfasthetstest

1. Ta upp hälften av provkropparna efter 7 dagar och torka av dem lätt.
2. Placera provkropparna i en maskin för böjdragshållfasthet för att dela dem på hälften.
3. Placera en halv provkropp i en kubpress för att mäta tryckhållfasthet.
4. Upprepa steg 2-3 med resterande provkroppar efter 28 dagar.

B Recept

Grundrecept för att blanda bruket är tagen från svensk standard om provtagning av cement 196-1 [20]. En uppsättning av receptet är nog för att täcka en form av tre prismor med dimension 40x40x160 mm och vägs upp enligt tabell B.1.

Tabell B.1: Recept för blandningar av bruk med olika mängd kalcinerat musselskal.

Blandning [vikt% pulver]	Cement [g]	Framställt pulver [g]	Vatten [g]	Sand [g]
0	450	0	225	1350
5	427,5	22,5	225	1350
15	382,5	67,5	225	1350
30	315	135	225	1350
50	225	225	225	1350

En blandning med 5 viktprocent musselskalspulver, som inte genomgått förbränning, görs enligt samma recept som för den med 5 viktprocent kalcinerat musselskal.

C Beräkningar av koldioxidutsläpp från kalcinerade musselskal

Antaganden

- Koldioxidutsläpp vid traditionell cementtillverkning är 697 kg CO₂ per ton cement.
- 60 % av utsläppen från tillverkningen av traditionell cement uppstår vid den kemiska reaktionen i kalcineringsprocessen då CaCO₃ övergår till CaO och CO₂.
- 40 % av utsläppen vid tillverkningen av traditionell cement uppstår vid förbränningen av bränsle i tillverkningsprocessen.
- Traditionell cement består av 63 % CaO.
- Musselskalen består av 95 % CaCO₃.
- Att använda temperaturen 800°C istället för 1450°C vid tillverkning sänker bränsleförbrukningen med 45 %.

Koldioxidutsläppen från den kemiska reaktionen vid kalcinering av musselskalen beräknades enligt följande:

$$697 * 0,6 = 418$$

$$418/63 = 6,64$$

$$6,64 * 100 = 664$$

$$664 * 0,95 = 631$$

Koldioxidutsläppen från musselskalen vid den kemiska reaktionen beräknades till 631 kg CO₂ per ton kalcinerat musselskal. För ett ämne som innehåller 100 % CaCO₃ släpps 664 kg CO₂ per ton kalcinerat material.

Koldioxidutsläppen från bränsleförbränningen beräknades enligt följande:

$$697 * 0,4 = 279$$

$$279 * 0,55 = 153$$

Koldioxidutsläppen från bränsleförbränningen vid tillverkning av kalcinerade musselskal beräknades till 153 kg CO₂ per ton kalcinerat musselskal.

Summan av de totala koldioxidutsläppen vid tillverkningen av kalcinerat musselskal beräknades till 784 kg CO₂ per ton kalcinerat musselskal.

Enligt dessa antagande och beräkningar är skillnaden mellan utsläppen vid tillverkningen av kalcinerat musselskal och traditionell cement 87 kg CO₂ per ton.

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se



CHALMERS