

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Division of Structural Engineering
Faculty of Engineering, LTH
P.O. Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Småhusgrund med cementbundet rivningstegel

Cement-bound brick waste as foundation in small-scale buildings

Victor Andersson
Samuel Nilsson

2022

Rapport TVBK-5288
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK-22/5288

Examensarbete
Handledare: Miklós Molnár
Maj 2022

Sammanfattning

Miljöpåverkan är ett ständigt återkommande ämne i samhällsdebatten. Många företag strävar efter att minimera sin miljöpåverkan, vilket kan ske genom att återanvända material i stället för att producera nya. I fallet med betongproduktion finns det flera sätt att göra den bättre för miljön. Till exempel kan rivningstegel användas som alternativ till den traditionella ballasten, som ett sätt att minska användningen av naturresurser. Ett annat sätt att minska betongs påverkan på miljön är att minimera cementanvändningen som står för stora utsläpp av CO₂ under produktionen. Inom vägbyggnad har bärlager med ett lågt cementinnehåll använts. Bärlagret utgörs vanligtvis av makadam med cement som bindemedel. Om makadamen ersätts med någon typ av återvunnen ballast minskar hållfastheten till mellan 3 och 5 MPa. En tillämpning av denna metod är grundläggning av mindre byggnader, där grundläggningen oftast sker med en platta av betong med underliggande isolering. En användning av återvunnen ballast är förmodligen tillämpbart, eftersom tryckspänningen som uppstår i en platta överstiger sällan 0,26 MPa.

I detta examensarbete har syftet varit att undersöka om cementbundet rivningstegel kan användas som en alternativgrundläggning till mindre byggnader. Tegellaggregaten som användes var av storleken 37–75 mm och tegelstenarna hade en medeltryckhållfasthet på 25 MPa. Metoden som användes var att ett bruk med låg cementhalt hälldes över tegellaggregaten. Bruk med olika innehåll av sand, cement, vatten, flyttillsatsmedel och filler testades. Bruket utvärderades utifrån dess förmåga att få en spridning genom tegellaggregaten samtidigt som en för stor vattenseparation inte fick ske. Provkropparna hade cementinnehåll på 7,0–7,2% eller 4,4–4,7% och innehöll antingen ett stabilt eller instabilt bruk. Totalt utgjordes knappt hälften av all ballast av tegellaggregat och resterande utgjordes av sand.

Resultaten visar att en dimensionerande tryckhållfasthet på 2,1–2,2 MPa kan uppnås med ett cementinnehåll i provkroppen på mellan 4,4–4,7%. Den dimensionerande tryckhållfastheten vid ett cementinnehåll på 7,0–7,2% var 2,7–2,9 MPa. Hållfastheten som tagits fram är större än den belastning som överslagsmässigt beräknats. Denna belastning sker endast längs bärlinjer i byggnaden, i övrigt belastas stora delar av plattan av nyttig last. Den nyttiga lasten för mindre byggnader är 2 kPa. Fördelarna med metoden är att en högre porositet kan uppnås, vilket leder till en bättre värme- och ljudisoleringsförmåga. Teglets absorptionsförmåga och det faktum att aggregaten ligger i kontakt med varandra leder till en reducerad krympning. Nackdelen med metoden är att den inte är etablerad, vilket leder till höga kostnader vid användning. Även krossningen av rivningstegl leder till större utsläpp jämfört med traditionell ballast.

Metoden anses som att den förmodligen funkar som en alternativ grundläggning av mindre byggnader. Men utöver tryckhållfastheten behöver bland annat draghållfasthetskapaciteten undersökas för att bedöma om metoden är lämplig att använda.

Abstract

Environmental impact is a recurring topic in the social debate. Many companies strive to minimize their environmental impact, which can be done by reusing materials instead of producing new ones. In the case of concrete production, there are several ways to make it better for the environment. For example, brick waste can be used as an alternative to the traditional stone aggregate as a way to reduce the use of natural resources. Another way to reduce the impact of concrete on the environment is to minimize the use of cement, which is responsible for large emissions during production.

In road construction, subbase layers with a low cement content have been used. The subbase is usually made of macadam with cement as the binding agent. If the macadam is replaced with some type of recycled aggregate, the strength is reduced to between 3 and 5 MPa. One possible application of this method is the foundation of small-scale buildings, where the foundation usually consists of a concrete slab with underlying insulation. The method is probably applicable, because the design compressive stress occurring in a slab rarely exceeds 0,26 MPa.

In this thesis the aim has been to investigate whether cement-bound demolition bricks can be used as an alternative foundation for small-scale buildings. The brick aggregate used was of size 37-75 mm and the bricks had an average compressive strength of 25 MPa. The method used was to pour a low cement content mortar over the brick aggregates. Mortar with different contents of sand, cement, water, superplasticizer and filler were tested. The mortar was evaluated based on its ability to spread through the brick aggregates while avoiding excessive water separation. The test specimens had cement contents of 7,0-7,2% or 4,4-4,7% and contained either stable or unstable mortar.

The results show that a design compressive strength of 2,1–2,2 MPa can be achieved with a cement content in the specimen of between 4,4–4,7%. The design compressive strength with the cement content of 7,0–7,2% was 2,7–2,9 MPa. The strength obtained is greater than the estimated load. This load occurs only along the load-bearing lines of the building, the other parts of the slab are only loaded by the imposed load. The imposed load for smaller buildings is 2 kPa. The advantages of the method are that a higher porosity can be achieved leading to a better thermal and sound insulation performance. The absorption capacity of the brick and the fact that the aggregates are in contact with each other lead to a reduced shrinkage. The disadvantage of this method is that it is not established, which might lead to high costs. Further, that the crushing of brick aggregates leads to higher emissions compared to traditional aggregates.

The method is considered to probably work as an alternative foundation for smaller buildings. In addition to the compressive strength, the tensile strength of the method needs to be investigated to assess whether it is suitable to use.

Förord

Detta examenarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör den avslutande delen inom väg- och vattenbyggnadsprogrammet med inriktning mot konstruktionsteknik vid LTH. Arbetet har utförts under vårterminen 2022.

Arbetet baseras på en idé framförd av vår handledare Miklós Molnár. Vi vill rikta ett stort tack till Miklós som presenterade idén för oss och för att han trodde på vår förmåga att genomföra den. Hans handledning, tillgänglighet och hjälp med material har varit mycket värdefull. Vi vill även rikta ett stort tack till Stefan Backe som hjälpt till med material och tips samt Per-Olof Rosenkvist som hjälpt oss med testningen.

Victor Andersson & Samuel Nilsson

Lund, maj 2022

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte.....	4
1.3	Frågeställningar	4
1.4	Avgränsningar	4
2	Litteraturstudie	5
2.1	Traditionell betong med tegel.....	5
2.2	Cementbundna aggregat	8
2.3	Egenskaper av tegel som ersättning.....	15
3	Metod och Material	21
3.1	Tegel	21
3.1.1	Sorptivitet	21
3.1.2	Densitet.....	22
3.1.3	Tryckhållfasthet.....	23
3.2	Bruk	23
3.3	Provkropp och blandning.....	24
4	Resultat och Diskussion	27
4.1	Inledande tester – resultat	27
4.2	Huvudtester – resultat	30
4.3	Analys av resultaten.....	33
4.4	Tillämpning	34
4.5	Fördelar och nackdelar	35
4.5.1	Tryckhållfasthet och arbetbarhet.....	35
4.5.2	Porositet.....	35
4.5.3	Härdning och uttorkning	36
4.5.4	Armering och praktisk tillämpning	37
4.5.5	Krympning	37
4.5.6	Miljöpåverkan	38
4.6	Vidare studier	39
5	Slutsatser	41

Referenser.....	43
Bilagor.....	47

1 Introduktion

Följande kapitel syftar till att introducera ämnet och redogöra för arbetets syfte, frågeställningar och avgränsningar.

1.1 Bakgrund

I dagens samhälle är miljöfrågan ständigt i fokus och att minimera användningen av naturresurser är något som byggsektorn försöker ta hänsyn till. Flera företag inom byggsektorn har gemensamt kommit fram till målet att minska utsläppen till nettonollutsläpp av växthusgaser till 2045 (Fossilfritt Sverige, 2018). Detta mål kan delvis uppnås genom att producera material som leder till mindre utsläpp och genom att återanvända de material som redan finns. Återanvändning av byggnadsmaterial leder till att en mindre mängd blir avfall samt ett mindre behov av nyproducerade material. Ett alternativ till återanvändning är att materialet läggs på deponi, vilket dock kräver stora landareal och orsakar föroreningar (Miao et al., 2018). Återanvändning av betongaggregat i stället för deponering är även positivt för de kostnader och miljöeffekter som deponering medför (Shafii et al., 2006). Utöver själva deponeringen ökar även transportsträckorna mellan rivningsarbetsplatser och avfallsanläggningen samtidigt som transportkostnader ökar (Zhu & Zhu, 2020). Återanvändningen av material stämmer även överens med Sveriges miljömål att återanvända bygg- och rivningsavfall. Etappmålet, som än så länge inte uppnås, är att mängden bygg- och rivningsavfall som förbereds för återanvändning och återvinning ska årligen vara minst 70 viktprocent fram till 2025 (Sveriges Miljömål, 2021).

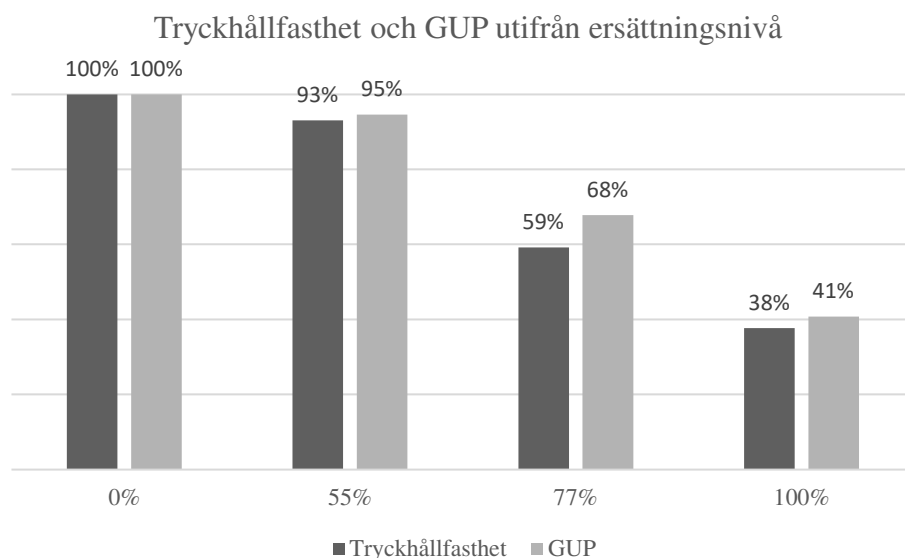
Det finns flera studier som visar att det finns en potential i de byggnader som rivs att återanvända materialen och att materialen som går till deponi vid en rivning har minskat (Treloar et al., 2003). I Sverige återanvändes 2019 5000 ton av byggavfallet som fanns vid återvinningscentraler (Avfall Sverige, 2020). Det finns flera sätt att utnyttja den resurs som konstruktions- och rivningsavfall utgör. Detta kan kombineras ihop med den ökade efterfrågan på betong som har ökat i takt med att byggindustrin har expanderat (Ceesay & Miyazawa, 2019). Den ökade efterfrågan har i sin tur skapat en oro eftersom den inte möter tillgången på naturligt aggregat, som utgör ballasten i betong, som minskar i flera länder (Ceesay & Miyazawa, 2019; Karthik & Sathish, 2019). Men tillgången av aggregat skiljer sig i världen. I Sverige är tillgången god och ballasten är av god kvalitet, till skillnad från många andra länder (Burström, 2007).

Trots en bra tillgång av grundmaterial är betong inte lämplig att använda i alla avseenden. För även om det nationellt finns tillgång till material är betong tillsammans med stål de material som har störst påverkan på miljön inom byggsektorn i form av utsläpp av växthusgaser (Shafii et al., 2006). Aggregaten påverkar effekten betong har på miljön i form av tillverkning, produktion och transport. Ett sätt att minska betongs påverkan på miljön kan därför vara att ersätta aggregaten med något alternativt material. Ett alternativt material som kan användas är återvunna betongaggregat. En användning av betongaggregaten är dock inte positivt ur alla avseenden. För även om en användning av betongaggregat leder till att en mindre mängd naturresurser förbrukas, leder det även till högre utsläpp av koldioxid till följd av bearbetning vid återvinning i jämförelse med traditionella aggregat (Park et al., 2019). En ersättning av material är dock positivt ur ett konkurrensperspektiv, eftersom det finns länder där det råder monopol på naturligt aggregat (Shafii et al., 2006). Men den största påverkan som betong har

på miljön är i form av cementanvändningen. Cementen som används i betongtillverkningen har en inverkan på miljön i form av koldioxidutsläpp vid tillverkningen, vilket genereras när kalksten bränns (Burström, 2007). Enligt undersökningar utgör cementproduktionen runt 5% av människors koldioxidutsläpp (Summerbell et al., 2016). Ett sätt att minska betongens miljöpåverkan kan alltså vara att minska mängden cement samtidigt som återvunna material används som alternativ till ballasten.

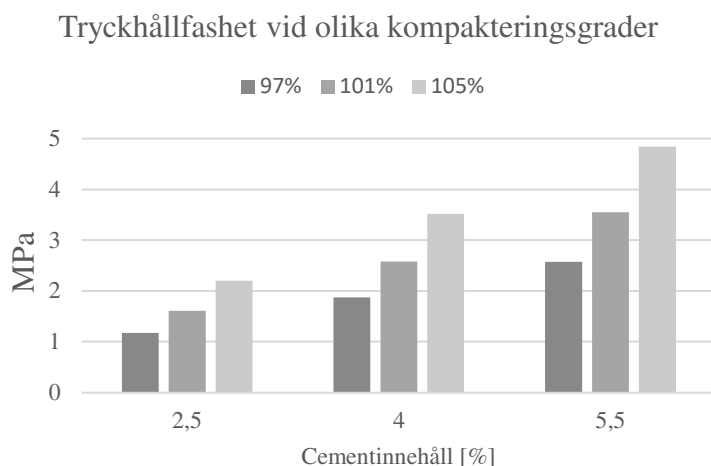
Konstruktions- och rivningsavfall utgörs till stora delar av betong- och tegelrester (Horvath, 2004). I Sverige genererades 13 miljoner ton bygg- och rivningsavfall 2018 varav 47 procent återvanns och 36 procent blev deponi (Naturvårdverket, 2020). Detta betyder att det finns en potential att använda betong- och tegelrester som en del av aggregaten i betong. Skillnaden mellan att använda tegelaggregat i stället för återvunna betongaggregat är att tegel absorberar mer vatten. Tegelaggregat lämpar sig bättre att använda jämfört med glas eller plast eftersom teglets vidhäftningsförmåga ger en bättre hållfasthet (Atyia et al., 2021). Fördelarna som en användning av tegelaggregat medför till skillnad från naturliga aggregat är: en lättare betongblandning, en förbättrad värme- och ljudisolering samt ett förbättrat brandmotstånd. Men tegel kan inte bara användas i betong utan idag finns det även en marknad för att återanvända hela tegelstenen (Bruksspecialisten Tegel, u.å.).

Återanvändningen av material i betongtillverkningen har fördelar och nackdelar. I en studie presenterad av Kurad et al. (2017) undersöktes användningen av flygaska och återvunnet betongaggregat. I studien utvärderades betongs hållfasthet samt den miljöpåverkan den leder till. Studien visar att ersättningen av naturligt aggregat med återvunna betongaggregat ska begränsas eftersom för stora tillsatser leder till en otillräcklig utveckling av hållfastheten. I Figur 1.1 visas hur tryckhållfastheten och miljöpåverkan i form av Global Uppvärmningspotential *GUP* förändrades. Den traditionella betongen med 0% ersättning av ballasten hade en tryckhållfasthet f_{cm} efter 28 dagar motsvarande 55,8 MPa och en global uppvärmningspotential på 351 kg CO₂-eq. I en studie av Azba och Alnuman (2021) har krossat tegel använts i stället för naturligt aggregat. I studien ersattes det naturliga aggregatet stegvis med krossat tegel. Resultatet visade att användning av 20, 60 och 100 % krossat tegel ledde till en tryckhållfasthet motsvarande cirka 48, 31 respektive 30 MPa, vilket ska jämföras med referensprovets tryckhållfasthet 54 MPa.



Figur 1.1 Relativ tryckhållfasthet och GUP vid olika ersättningsnivåer med återvunnet betongaggregat (Kurad et al., 2017).

Flera studier har undersökt inverkan av tegelaggregat som ballastersättning i betong med låga cementinnehåll. Xuan et al. (2012) har undersökt inverkan i betong när tegelaggregat ersätter betongaggregat som ballast och om detta är tillämpligt som bärlager i en väggkropp. Studien visar att tryckhållfastheten påverkas av mängden cement som finns i provkroppen (Figur 1.2). Kompakteringsgraden anger förhållandet mellan den maximala torrdensiteten i fält och labb. Studien visar att tryckhållfastheten minskar i takt med ett ökat v/c-tal. Det ska även framgå att arbetbarheten för blandningarna är i hög grad kopplad till mängden vatten, desto mer vatten som användes desto bättre blev arbetbarheten.



Figur 1.2 Tryckhållfasthet vid olika cementnivåer och kompakteringsgrader (Xuan et al., 2012).

Prepacked aggregate concrete är en metod som kan användas vid framställning av betong (Awal, 1984). Till skillnad från traditionell betong som blandas innan gjutning, framställs betongen genom att först sprida ut ett lager av grovt aggregat, vilket sedan fylls med bruk. Detta kan antingen göras genom att hälla bruket över aggregaten eller genom att injektera bruket i botten av lagret. Lv et al. (2020) hävdar att metoden kan leda till stora ekonomiska och

miljömässiga fördelar. Bland annat kan cementinnehållet minska med 15–20 % med bibehållen tryckhållfasthet jämfört med vanlig betong. En annan fördel med metoden är att krympningen reduceras till följd av att aggregaten är placerade i kontakt med varandra (Awal, 1984).

I en vägkropp där kraven på hållfasthet är relativt liten används normalt ett bärlager som är bundet med något typ av bindemedel, vanligast i Sverige är att krossad sten kombineras ihop med bitumen (Agardh & Parhamifar, 2014). I en studie av Karthik & Sathish (2019) ersattes makadam av återvunnet krossat betongaggregat, vilket enligt författarna leder till en lägre kostnad, energibesparingar samt mindre föroreningar. Resultatet visar att makadamen kan ersättas med upp till 40 % återvunnet betongaggregat och samtidigt uppfylla de krav som ställs på en vägkropp. I en annan studie av (Jia et al., 2015) undersöktes användningen av cementbundet tegel och betongaggregat undersökts som alternativ till bärlager i en vägkropp. Totalt användes 6 % cement och i de två tester där endast krossat tegel använts varierade tryckhållfastheten mellan cirka 1,8 och 2,3 MPa.

Platta på mark är en typisk grundläggning för mindre byggnader där kraven på grundens bärförmåga är liten. Grundläggningen av ett 1,5-planshus i Sverige består vanligast av en platta av betong som vilar på underliggande jord med mellanliggande isolering. En fördel med denna grundläggningsteknik vid jämförelse med till exempel en plintgrund kan vara att utförandet är enklare. Ett enklare och snabbare utförande leder till ekonomiska vinster. Samtidigt är det en säker konstruktion ur ett fuktsäkerhetsperspektiv enligt Sandin (2010). En grov överslagsräkning för ett 8x12 m 2-planshus visar att det maximalt uppstår en karakteristisk tryckspänning motsvarande 0,26 MPa i en platta på mark (Bilaga 1). Detta ska jämföras med en betong av kvalitén C20 som har en dimensionerande tryckhållfasthet på cirka 13 MPa.

1.2 Syfte

Detta arbete syftar till att undersöka ifall en grund bestående av cementbundet rivningstegel med lågt cementinnehåll lämpar sig som grundläggning av mindre byggnader. Fokus ligger på tryckhållfasthet och de ingående materialens egenskaper. Utöver detta undersöks också en annorlunda gjutningsteknik. Denna går ut på att först sprida ut tegelaggregat och sedan hälla ett bruk över.

1.3 Frågeställningar

- Kan rivningstegel som stabiliseras av ett bruk med ett lågt cementinnehåll ha tillräcklig tryckhållfasthet för att användas till grundläggning av småhus?
- Vilken fraktion ska rivningsteglet bestå av och vad ska sammansättningen av bruket vara för att fungera?
- Hur ser kunskapsläget ut kring återanvändning av tegel i form av cementbundet rivningstegel och tegelaggregat i betong?

1.4 Avgränsningar

Endast provkroppar som motsvarar en liten del av en platta har undersökts. Det är endast tryckhållfastheten som undersökts och inte övriga hållfasthetsparametrar.

2 Litteraturstudie

I följande litteraturstudie presenteras en sammanställning av ett antal relevanta artiklar inom ämnet.

2.1 Traditionell betong med tegel

Tryckhållfasthet i traditionell betong med tegel I

Cachim (2009) undersökte hur egenskaper hos betong påverkades när krossat tegel användes till att delvis ersätta naturliga aggregat. Egenskaperna som testades var bland annat sättning, densitet, tryckhållfasthet och elasticitetsmodul. Ersättningsgraderna 15% och 30% testades tillsammans med v/c-tal 0,45 och 0,5. I studien användes typ II 32,5 Portlandcement tillsammans med sand och naturligt kalkhaltigt grovt aggregat. Aggregaten delades in i 5–10 mm (NA1) och 10–20 mm (NA2). Återvunnet aggregat av tegel, A och B, införskaffades från två fabriker, vilket krossades och ersatte aggregaten med storlek 5–10 mm. Egenskaper hos aggregaten som vattenabsorption och torrdensitet testades (Tabell 2.1). Författaren tar upp att en av de mest viktiga aspekterna av keramiska aggregat är deras vattenabsorption. Teglaggregatens vattenabsorption över tid mättes upp. Efter 2 minuter hade 75% av den totala absorptionen skett och efter 5 minuter hade 91% av absorptionen skett. Fem sorters blandningar testades tillsammans med en referensblandning med naturliga aggregat (Tabell 2.2). Aggregaten blötlades innan cement och fint aggregat tillsattes.

Tabell 2.1 Egenskaper hos aggregat (Cachim, 2009).

Egenskap	Natursten			Rivningstegel	
	Sand	NA-1	NA-2	Tegel A	Tegel B
Vattenabsorption [%]	0,79	1,33	1,07	15,81	18,91
Torrdensitet [kg/m ³]	2791	2641	2617	1805	1928

Tabell 2.2 Sammansättning och tryckhållfasthet hos betongrecept (Cachim, 2009)

Recept	Sammansättning (%)									
	Cement	Vatten	Sand	NA1	NA2	Tegel- A	Tegel- B	Mättat vatten	v/c- tal	Tryckhållfasthet 28 dagar
NN45	16,4	7,4	29,2	16,3	30,7	-	-	-	0,5	36,2 MPa
NA45	16,7	7,5	29,7	8,3	31,2	5,7	-	0,8	0,5	32,1 MPa
NB45	16,6	7,5	29,6	8,3	31,1	-	6,1	0,7	0,5	38,5 MPa
AA45	17,0	7,6	30,3	-	31,7	11,6	-	1,8	0,5	27,6 MPa
BB45	16,9	7,6	30,1	-	31,6	-	12,4	1,4	0,5	32,3 MPa
NN50	16,6	8,3	28,8	16,0	30,2	-	-	-	0,5	30,5 MPa
NA50	16,9	8,5	29,3	8,2	30,7	5,6	-	0,8	0,5	32,1 MPa
NB50	16,9	8,4	29,2	8,1	30,6	-	6,0	0,7	0,5	32,3 MPa
AA50	17,2	8,6	29,8	-	31,2	11,5	-	1,8	0,5	24,5 MPa
BB50	17,1	8,5	29,6	-	31,0	-	12,5	1,4	0,5	29,0 MPa

Resultaten jämfördes med en referensbetongblandning. Testerna tyder enligt författaren på att tegelkross kan ersätta 15% av vanligt betongaggregat och med en 30% ersättningsgrad försämrades egenskaper med upp till 20%. Det skedde ingen hållfasthetsförändring vid 15 % ersättningsgrad av naturliga aggregat med tegel. Betongtypen NB45 hade en 10% högre hållfasthet efter 90 dagar. En 100 % ersättning av de naturliga aggregaten NA-1 med tegel resulterade alltid i en lägre hållfasthet. Den färska betongens densitet minskade som mest med 6 %.

Tryckhållfasthet i traditionell betong med tegel II

I en studie av Zhang & Zong (2014) presenteras tester av de fysikaliska egenskaperna hos betong med rivningstegel som aggregatersättning. De ingående materialen bestod av Portlandcement, flygaska, grovt återvunnet aggregat av tegel (RA), grovt naturligt aggregat (NA), sand som finkornigt aggregat och vattenreducerande tillsatsmedel. Återvunnet aggregat testades ersätta naturligt aggregat till 0%, 30%, 40% och 50%. I studien tillsattes extra vatten på grund av tegelaggregatens absorption. Betongrecepten visas i Tabell 2.3 tillsammans med tryckhållfastheten efter 28 dagar.

Tabell 2.3 Sammansättningen av betongen och tryckhållfasthet (Zhang & Zong 2014).

	Sammansättning [%]							Tryckhållfasthet [MPa]
	Cement	Sand	NA	RA	Flygaska	Tillsatsmedel	Vatten	
R0F0	20,1	26,1	47,5	0,0	0,0	0,3	6,0	45,7
R30F0	19,7	25,5	32,5	13,9	0,0	0,3	8,0	43,1
R40F0	19,6	25,3	27,7	18,4	0,0	0,3	8,7	40,1
R50F0	19,4	25,1	22,9	22,9	0,0	0,3	9,3	34,1

Författarna drar följande slutsatser utifrån användningen av tegelrester. En användning av tegelaggregat försämrar hållfastheten i betongen. Tegelaggregat har en hög vattenabsorption vilket leder till att mer vatten behövs för att behålla samma sorts arbetbarhet som traditionell betong. Vanligtvis förbättrar en större andel flygaska arbetbarheten hos betong, men för betong med tegelrester som aggregat försämrar arbetbarheten då flygaska används. Arbetbarheten försämrar också för betong med tegelaggregat då den består av en högre andel långsträckt aggregat.

Tryckhållfasthet i traditionell betong med tegel III

Ceesay & Miyazawa (2019) undersökte möjligheten att använda aggregat från tegeltakpannor som en del av ballasten i betong. Författarna tar upp att aggregat från tegeltakpannor har en lägre hållfasthet jämfört med naturligt aggregat. I studien undersöktes de fysiska egenskaperna av aggregat från tegeltakpannor jämfört med naturliga aggregat både med och utan cement. Portlandcement användes och den naturliga ballasten var sand och grus. Tegeltakpannorna bestod till största del av lera eller cement. En kontrollprovkropp skapades enligt sammansättningen i Tabell 2.4. De grövre aggregaten i form av grus (G) och de finare aggregaten av sand (S) ersattes av antingen grov (RTG) eller fin tegelkross (RTS).

Tabell 2.4 De olika blandningarna (Ceesay & Miyazawa, 2019).

Mix	G+S	G+RTS	RTG+S	RTG+S	RTG+S	RTG+S
v/c-tal		0,5		0,3	0,4	0,5
Vatten	7,7%	8,7%	8,4%	7,7%	8,4%	8,5%
Cement	15,4%	17,4%	16,8%	25,8%	18,6%	15,4%
S/RTS	35,8 %	24,0 %	37,6 %	30,7 %	36,0 %	39,3 %
G/RTG	41,1 %	49,9 %	37,1 %	35,7 %	37,0 %	36,8 %

I studien ingick tester av tryck- och draghållfasthet, elasticitetsmodul, krympning, karbonatisering samt frysning och upptining. Resultaten visar att proverna med ett v/c-tal på 0,5 hade en tryckhållfasthet på cirka 47 MPa, medan användningen av G+RTS och RTG+S gav en tryckhållfasthet på 44 respektive 39 MPa. I fallet när v/c-talet varierades gav 0,55 och 0,45 samma draghållfasthet över tid. Elasticitetsmodulen var störst för G+S med ett värde på cirka 31 GPa, värdena för G+RTS och RTG+S var knappt 25 och 20 GPa. Vad gäller krympning

visade en användning av grov tegelkross en liknande krympning som G+S och fint tegelkross visade en större krympning. Resultatet av att frysa och tina upp betongen genomfördes för G+S och RTG+S genom att cykliskt frysa ner och tina upp proverna. Den procentuella minskningen av elasticitetsmodulen var konstant för G+S på cirka 10 %. För RTG+S sjönk elasticitetsmodulen till drygt 20 % i ett tidigt skede och varierade därefter mellan 30 och 40 %. Utifrån testerna för karbonatisering konstaterar författarna att inga ogynnsamma effekter framkommer av att använda krossade tegeltakpannor.

2.2 Cementbundna aggregat

Cementbundna bärlager och Preplaced aggregate concrete

Hultqvist & Carlsson (1990) tar upp problemet med spårbildning i vägar med intensiv och tung trafik. Spårbildningen leder till underhållskostnader och i vissa fall trafikfara. Författarna tar bland annat upp plastiska deformationer och deformation av underliggande obundna lager som orsaker till detta. För att minska deformationerna kan man använda bärlager med bättre lastfördelande egenskaper, till exempel ett cementbundet bärlager. Cementbunden makadam består av packad makadam som fyllts med cementbruk. Vanligtvis används makadam med fraktionerna 32–64 mm. I studien har två provsträckor undersökts vid Norsholm och Bålsta. Båda provsträckorna bestod av ett 150 mm tjockt lager av makadam, vid Norsholm användes fraktionerna 32–64 mm och vid Bålsta användes 30–80 mm. Makadamen lades ut på ett välpackat förstärkningslager och packades med en vält. Makadamen vattnades för att underlätta för cementbruket att tränga ner i hålrummen. Cementbruket spreds sedan över lagret med en ombyggd asfaltutläggare med ett cementinnehåll på 12 % vid Norsholm och 16 % vid Bålsta. I Norsholm varierade konsistensen på cementbruket under utläggningen. Detta kan enligt författarna beror på en varierande fuktkvot hos cementbrukets ballast. I de fall där bruket var trögflytande tillsattes vatten eller flyttillsatsmedel. För att tryckhållfasthetstesta cementbruket togs provkroppar fram i form av kuber. Provkropparna från Norsholm hade efter sju dagar en tryckhållfasthet på 16–17 MPa. Provkropparna från Bålsta hade en tryckhållfasthet på 19–25 MPa efter 9–10 dygn och nedträngningsdjupet varierades mellan 60 och 170 mm. Det var planerat att bruket skulle tränga ned 150 mm. Skillnaden kunde bero på makadamens höga halt av underkorn, vilka blockerade för bruket att tränga ner.

Författarna föreslår följande praktiska åtgärder vid tillverkning av cementbundet bärlager:

Makadamlagret bör läggas med makadamutläggare på ett jämnt och väl packat underlag.

En kort makadamfraktion skall användas med liten andel över och underkorn (normalt 32–64 mm).

Cementbruket måste ha en lättflytande konsistens (utbredningsmått 800 mm) för att kunna tränga ner i makadamlagret.

Cementbruket skall spridas jämnt över ytan med sådan mängd att hålrummet i makadamlagret fylls. Spridningstekniken måste vara sådan att spår inte bildas i det obundna makadamlagret.

(Hultqvist & Carlsson 1990, s. 26)

Det finns flera andra studier som har undersökt samma metod. Metoden har olika namn, bland annat two-stage concrete, preplaced aggregate concrete och prepacked aggregate concrete (Najjar et al., 2014). Tillverkning av betong enligt denna metod kan dock kräva en viss

erfarenhet, vilket saknas idag. Bruket kan antingen tillsättas aggregaten på ovansidan eller undersidan. När bruket appliceras på ovansidan sprider det sig i aggregaten genom gravitation alternativt pumpas bruket upp underifrån. Metoden lämpar sig väl för att motverka separation av grova aggregat eftersom aggregaten är i kontakt med varandra. Metoden beskrivs även som kostnadseffektivt eftersom det inte krävs någon typ av vibration och att endast 40% av betongen behöver pumpas. Det framgår även att kostnaderna för gjutningsformens täthet ökas med en tredjedel jämfört med gjutningsformen för traditionell betong. Författaren tar även upp att metoden leder till mindre sprickor eftersom aggregaten är placerade i kontakt med varandra samt att formen på aggregaten och brukets flytighet är viktiga parametrar. Akroyd (1962) menar att metoden kräver att bruket är tillräckligt lättflytande för att fylla hålrummen. Aggregaten bör ha en ren yta för att bruket ska kunna vidhäfta till aggregaten. Vattenseparation bör begränsas till 0,5% av brukets vikt.

Awal (1984) lyfter fram att krympningen är mindre hos betong framställd enligt ovannämnd princip jämfört med traditionell betong. Detta lär bero på att aggregaten är i kontakt med varandra, vilket bildar en struktur som förhindrar krympning. Coo & Pheeraphan (2016) har undersökt de mekaniska egenskaperna av betong när bruket injekteras i aggregaten. Undersökningen visar att en mix där hela provkroppen består av 8 % flygaska och cement har en tryckhållfasthet motsvarande 9,69 MPa. Författarna drar slutsatsen att användningen av flygaska förbättrar flödet i bruket genom att flygaskan skapar ett mjukgörande lager mellan sandpartiklarna. Men även att en minskning av cementinnehållet leder till en minskad hållfasthet. I jämförelse med traditionell betongtillverkning leder denna metod till en lägre kostnad med bibehållen bärförmåga. Lv et al. (2020) har också undersökt egenskaper hos betong framställd med ovan nämnd metod och med lågt cementinnehåll. Författarna drar slutsatsen att i allmänhet kan en tryckhållfasthet liknande traditionell betong uppnås tillsammans med en 15–20 % reduktion av cement. Metoden leder även till stora ekonomiska och miljömässiga fördelar jämfört med vad som beskrivs som traditionell betong.

Tryckhållfasthet i cementbundet betongaggregat

Lim & Zollinger (2003) har undersökt hållfasthetsutveckling och elasticitetsmodul hos cementbundna aggregat. I studien användes två typer av aggregat: krossad kalksten och återvunnet betongaggregat. Åtta olika blandningar testades för respektive typ av aggregat. För varje blandning varierades innehållet av grovt aggregat (> 4,75 mm), fint aggregat (<0,075 mm) och cement mellan 4% och 8%. Två nivåer för varje variabel testades, högt och lågt innehåll, i form av viktförhållande till total mängd aggregat. I Tabell 2.5 redovisas de 8 olika blandningarna och deras tryckhållfasthet efter 28 dagar.

Tabell 2.5 Blandningarnas variabler och tryckhållfasthet (Lim & Zollinger, 2003).

Blandning			Tryckhållfasthet 28 dagar [MPa]	
Grovt aggregat	Fint aggregat	Cementinnehåll	Återvunna betongaggregat	Krossad kalksten
48%	5%	4%	4,16	6,98
58%	5%	4%	4,46	3,84
48%	10%	4%	3,80	6,26
58%	10%	4%	3,64	5,06
48%	5%	8%	7,38	11,79
58%	5%	8%	8,42	9,10
48%	10%	8%	6,64	10,73
58%	10%	8%	6,26	8,91

Enligt författarna kan den lägre hållfastheten hos blandningarna med återvunnet betongaggregat bero på aggregatens vattenbehov vilket ger ett högre v/c-tal. Cementinnehåll hade störst inverkan på hållfastheten jämfört med de andra variablerna.

Tryckhållfasthet i cementbundet avfallsmaterial

I en studie genomförd av Meng et al. (2021) undersöks möjligheten att använda cementstabiliserade material bestående av en mix av bygg- och konstruktionsavfall som bärlager i vägkroppar. Avfallet som användes bestod av 61,3% betong, 31,7% krossade tegelstenar, 6,6% kakel och 0,4% träflis. Avfallet delades in i grovt och fint med en gräns på cirka 10 mm, de grövre aggregaten hade fraktioner som var mindre än 31,5 mm. Sju olika blandningar gjordes med en varierande mängd aggregat, cement och vatten. Tryckhållfastheten uppmättes kontinuerligt och värdet efter 28 dagar framgår i Tabell 2.6. I studien framgår även att draghållfastheten för proverna utgjorde 11 % av tryckhållfastheten. Resultaten visar även att en ökad mängd cement ökar krympningen i proverna över tid. Författarna drar slutsatsen att en blandning med 100 % återvunnet avfall kan användas som bärlager.

Tabell 2.6 Andelar av material i varje blandning och tryckhållfasthet (Meng et al., 2021).

Blandning	MRA	Cement	Vatten	MPa
C0	87,5%	0%	12,5%	0,1
C3	84,5%	2,5%	12,9%	4,1
C4	83,7%	3,3%	13,0%	4,9
C5	82,7%	4,1%	13,2%	6,3
C6	81,9%	4,9%	13,2%	7,5

Tryckhållfasthet i cementbundet tegel I

I en studie av Jia et al. (2015) undersöktes möjligheten att använda avfall i form av krossat betongaggregat och krossade tegelrester som bärlager i en väggkropp. Avfallsresterna kombinerades ihop med portlandcement för att kunna utgöra ett fungerande bärlager. De olika aggregaten delades in i tre kornstorleksfördelningar: grov, mellan och fin. Den grova fördelningen innehöll aggregat mindre än 37,5 mm. Mellanfördelningen innehöll aggregat mindre än 19 mm och den fina fördelningen innehöll aggregat mindre än 4,75 mm. Hur mycket grov, mellan, och fin ballast de olika fraktionsgrupperna av tegel (T) och betong (B) bestod av visas i Tabell 2.7.

Tabell 2.7 Andelar av aggregatsorterna (Jia et al., 2015).

Fraktioner	Krossat tegel [%]			Krossat betongaggregat [%]		
	Grov	Mellan	Fin	Grov	Mellan	Fin
T1	31	59	10	-	-	-
T2	41	40	19	-	-	-
TB1	29	31	10	-	30	-
TB2	23	38	18	21	-	-

Testerna av hållfastheten genomfördes genom ett horisontellt oförhindrat vertikalt trycktest och med ett innehåll av 6% cement. Slutsatsen kan dras att ju mer betongaggregat som används i förhållande till mängden tegelaggregat desto större är tryckhållfastheten. Tryckhållfastheten ökar även i linje med att torrdensiteten för provkropparna ökar. Tryckhållfastheten för fraktionsgrupperna T1 och T2 är 1,8 respektive 2,3 MPa och motsvarande siffror för grupperna TB1 och TB2 är 2,7 och 3,2 MPa.

Tryckhållfasthet i cementbundet tegel II

Xuan et al. (2012) har undersökt betongs mekaniska egenskaper vid användning av återvunnet tegel- och betongaggregat. Aggregaten delades in i sex fraktionsgrupper: 31,5–22,4, 22,4–16,0, 16,0–8,0, 8,0–5,6, 5,6–2,0 samt 2,0–0,063 mm. Betongblandningarna gjordes med följande förhållande mellan mängden tegel- och betongaggregat: 0:100, 35:65, 65:3 samt 100:0. Mängden cement varierades mellan 2,5 och 5% utifrån mängden aggregat. Fördelningen mellan de olika fraktionsgrupperna var jämn men med en större mängd av de större fraktionerna. Resultatet visar att en större mängd vatten behövs för att bibehålla en bra arbetbarhet i proverna med en större andel tegelaggregat. I de fallen där cementinnehållet i förhållande till mängden vatten var större ökade tryckhållfastheten för samtliga prover. I Tabell 2.8 framgår tryckhållfastheten efter 7 dagar med varierande andel ballast i form av återvunnet tegelaggregat (TA), cementinnehåll (C) samt kompakteringsgrad (KG).

Tabell 2.8 Tryckhållfastheten i MPa utifrån andelen tegelaggregat (TA) och cementinnehåll samt kompakteringsgrad (KG) (Xuan et al., 2012).

TA [%]	KG [%]	Cementinnehåll [%]		
		2,5	4	5,5
100	97	1,17	1,87	2,57
	101	1,61	2,58	3,55
	105	2,20	3,52	4,84
65	97	1,43	2,28	3,14
	101	1,97	3,15	4,33
	105	2,69	4,30	5,91
35	97	1,64	2,62	3,61
	101	2,26	3,62	4,98
	105	3,09	4,94	6,80
0	97	1,80	2,88	3,96
	101	2,49	3,98	5,48
	105	3,40	5,43	7,47

Tryckhållfasthet i cementbundet tegel III

I en studie av Hou et al. (2016) undersöktes egenskaperna av cementbundna tegelaggregat. Sex typer av blandningar av cementstabiliserad rivningstegel skapades med 0%, 20%, 40%, 60%, 80% och 100% tegelaggregatet, i övrigt utgjordes aggregateten av kalksten. Cementinnehållet var 5%. Tegelaggregatens fraktioner och skrymdensitet redovisas i Tabell 2.9.

Tabell 2.9 Tegelaggregatens skrymdensitet (Hou., 2016).

Fraktion [mm]	Skrymdensitet [kg/dm ³]
5–10	1,912
10–20	1,897
20–31,5	1,891

Resultatet visar att tryckhållfastheten minskade med ökande ersättningsnivå av tegelaggregat. Ungefärlig tryckhållfasthet och draghållfasthet för olika ersättningsnivåer efter antalet dagar redovisas i Tabell 2.10. Tegelaggregatens påverkan på draghållfasthet var inte lika stor som för tryckhållfasthet. Utöver aggregatens draghållfasthet hade vidhäftning mellan aggregat och cementbruk också påverkan på draghållfasthet. Tegelaggregatens yta var ojämna än kalkstensaggregaten. Författarna tar också upp att vissa av tegelaggregatens ingående ämnen

kan ha reagerat och bildat cementerande material, vilket bidrar positivt till tryckhållfasthet och draghållfasthet.

Tabell 2.10 Tryck- och draghållfasthet vid olika ersättningsnivåer av tegelaggregat (Hou., 2016).

Ersättningsnivå [%]	Tryckhållfasthet [MPa]			Draghållfasthet [MPa]	
	7 dagar	28 dagar	90 dagar	28 dagar	90 dagar
0	4,2	6,0	7,4	0,49	0,65
20	3,5	5,0	6,0	0,44	0,58
40	2,6	3,6	4,9	0,39	0,5
60	1,8	2,5	3,5	0,32	0,40
80	1,2	1,7	2,4	0,28	0,33
100	0,6	0,8	1,2	0,22	0,28

Resultatet visar även att relativa krympningen minskar med en ökad nivå av tegelaggregat och med en ökad vattenhalt i blandningen. Detta enligt författarna för att teglet då innehåller absorberat vatten under härdningen. Ungefärlig krympning för varje ersättningsnivå vid 1 dag, 4 dagar och 7 dagar redovisas i Tabell 2.11.

Tabell 2.11 Relativ krympning (Hou et al., 2016).

Ersättningsnivå [%]	Relativ krympning [10^{-6}]		
	1 dag	4 dagar	7 dagar
0	120	270	460
20	115	270	450
40	110	260	400
60	100	250	390
80	90	240	360
100	80	220	330

Tryckhållfasthet i cementbundet tegel IV

Hu et al. (2014) undersöker möjligheten att använda rivningstegel som ersättning till naturligt aggregat i cementbundet bärlager. I studien undersöks möjligheten till detta genom att utvärdera de fysiska och mekaniska egenskaper som en ersättning av rivningstegel mellan 0 och 100 % innebär. De två olika aggregaten delades in i fraktionerna 26,5–31,5, 19,0–26,5, 16,0–19,0, 13,2–16,0, 9,5–13,2, och 4,75–9,5 mm. Aggregatens skrymdensitet redovisas i Tabell 2.12. Proverna inkluderade även mindre aggregat som var mindre än 4,75 mm som bestod av sand. I Tabell 2.13 framgår de olika blandningarna där ett cementinnehåll på 5 % har använts i samtliga prover.

Tabell 2.12 Skrymdensitet hos aggregaten.

Aggregat	Skrymdensitet [kg/dm ³]
Tegelaggregat	1,854
Naturligt aggregat	2,632

Tabell 2.13 Blandningsandelar och torrdensitet för blandningarna (Hu et. al., 2014).

Blandningar	Grovt aggregat [%]		Sand [%]	Cement [%]
	Tegel	Naturligt		
C-0	0,0	70,0	30	5
C-25	17,5	52,5	30	5
C-50	35,0	35,0	30	5
C-75	52,5	17,5	30	5
C-100	70,0	0,0	30	5

I studierna undersöktes hållfastheten vid olika tidpunkter samt den relativa krympningen. Resultatet av hållfasthetsmätningarna visar att både tryck- och draghållfastheten avtar när andelen tegelrester ökas (Tabell 2.14). I studien inkluderades även en mätning av tryckhållfastheten efter cyklisk frysning (CF) av proverna, där proverna hade vattenmättats innan start. Varje prov utsattes för 5 cykler och i varje cykel frystes provet i åtta timmar följt av en upptining i 8 h. Utifrån värdena för hållfastheten går det att utläsa att tryckhållfastheten minskade med 62,6% efter 7 dagar och 57,3% efter 90 dagar när aggregaten endast bestod av tegelrester jämfört med blandningen utan tegelrester. Undersökningarna visar även att krympningen minskade vid en användning av en högre andel krossat tegel. Den procentuella minskningen av krympningen efter 14 dagar var 19,1% mellan proverna med endast tegelkross och endast naturligt aggregat. Enligt författarna går detta emot vad som förväntades av undersökningen. På grund av den höga andelen vatten som teglet potentiellt kan absorbera kan det förväntas att krympningen skulle vara större, eftersom krympning av betong ökar med mängden vatten som används. Detta förklaras utifrån att vattnet som teglet absorberar frigges under härdningsförloppet, vilket leder till en minskad autogen krympning. Trots att både tryck- och draghållfastheten minskade med ökad andel tegelrester, var teglets påverkan på draghållfastheten mindre. Efter 28 dagar minskade draghållfastheten med 45,2% och efter 90 dagar minskade draghållfastheten med 35,5% när aggregaten endast består av tegelrester jämfört med blandningen utan tegelrester. Teglets påverkan på draghållfasthet var mindre än dess påverkan på tryckhållfasthet och beror enligt författarna på att draghållfastheten huvudsakligen beror på blandningars sammanhållning i stället för aggregatens hållfasthet. Tegelaggregatens ojämna yta ger en högre vidhäftningsstyrka mellan aggregaten och cementbruket.

Tabell 2.14 Tryck- och draghållfasthet efter olika härdningstider (Hu et al., 2014).

Blandningar	Tryckhållfasthet [MPa]			Draghållfasthet [MPa]	
	7 d	28 d (CF)	90 d	28 d	90 d
C-0	3,34	5,20 (5,07)	6,87	0,31	0,62
C-25	2,46	4,36 (3,75)	5,73	0,27	0,55
C-50	1,80	3,16 (2,44)	4,68	0,23	0,50
C-75	1,43	2,40 (1,52)	3,52	0,20	0,44
C-100	1,14	1,88 (1,05)	2,93	0,17	0,40

2.3 Egenskaper av tegel som ersättning

Tegelpulver i traditionell betong

Ge et al. (2015) har studerat effekterna av att delvis ersätta cement med tegelpulver vid betongproduktion. Detta är möjligt på grund av tegelpulvrets pozzolana effekt. Materialen bestod av tegelpulver hämtat från en rivningsarbetsplats, grovt aggregat av kalksten med två olika storlekar (5–10 mm och 10–20 mm), fint aggregat av sand och vattenreducerande tillsatsmedel. v/c -talet 0,28 användes. I studien testades tre olika kornstorleksfördelningar av tegelpulver, A, B, och C, där A hade den finaste korn-storleksfördelningen och C den grövsta. Tre olika ersättningsnivåer (10%, 20% och 30%) testades. Tio blandningar undersöktes där en av blandningarna var en referensblandning som inte innehöll tegelpulver.

Blandningar med grövre fraktion och lägre andel tegelpulver hade ett bättre mått på arbetbarhet. Med 10 % tegelpulver i en blandning gav sättmättet liknande resultat som för referensbetongen. Däremot observerades en större försämring av arbetbarhet vid 20–30 % ersättning. För att förbättra arbetsbarheten föreslår författarna att man blötlägger tegelpulvret innan blandning eller använder mer vatten för att kompensera för vattnet som absorberas av pulvret.

Hållfastheten efter 28 dagar visas i Tabell 2.15. Med en ökad ersättningsnivå av tegelpulver minskade betongens tidiga hållfasthet. Efter längre härdningstid kunde en hållfasthet som var liknande vanlig betong uppnås. Referensbetongen uppnådde i princip sin hållfasthet efter 28 dagar, medan hållfastheten för betong med tegelpulver ökade under 90 dagar. Testerna visade att ersättningsgraden av cement hade högre påverkan på hållfastheten jämfört med vilken kornstorleksfördelning av tegelpulvret som användes. Författarna påpekar att den minskade hållfastheten kan berott på en utspädningseffekt och tegelpulvrets låga reaktivitet. Eftersom vattenhalten hölls konstant, ökade v/c -talet när tegelpulvret ersatte cement. Enligt författarna minskade denna effekt när mindre kornfraktioner av tegelpulver användes. Detta eftersom mer vatten absorberas av tegelpulvret och för att lägre kornfraktioner av tegelpulver hade högre reaktivitet. Blandningen med den mindre kornstorleksfördelningen hade enligt författarna därför den högsta hållfastheten.

Tabell 2.15 Tryckhållfasthet (Ge et al., 2015).

Kornstorleksfördelning	Ersättningsnivå		
	10 %	20 %	30 %
Tryckhållfasthet [MPa]			
A	55	50	47
B	55	48	45
C	51	47	42

Korrosion i traditionell betong med tegel

I en studie av Azba & Alnuman (2021) undersöktes inverkan som användningen av tegelkross har på betongs arbetbarhet, tryckhållfasthet samt den elektriska resistansen. Elektrisk resistans utgör ett materials motstånd till att joner kan passera igenom. I fallet med betong avgör detta hur stor risken för korrosion är. Betongens elektriska resistans påverkas av v/c-talet, användningen av tillsatsmedel, ålder och form. Yttre faktorer som påverkar kan vara geometri, fukthalt, temperatur och armering. Till exempel leder ett högre vatteninnehåll och temperatur till en reducerad elektrisk resistans. Den elektriska resistansen var mellan 1 k Ω -cm för vattenmättade prover till 105 k Ω -cm för ugnstorkade prover. I studien användes portlandcement, flyttillsatsmedel, tegelaggregat som var mindre än 25 mm samt naturligt grovt och fint aggregat.

Betongen bestod av en del cement, två delar fint aggregat och tre delar grovt aggregat utifrån materialens vikt. Härdningen av betongen skedde under 28 dagar och hälften av proverna utsattes för en 3,5 % NaCl-lösning i ytterligare 28 dagar. Mätningarna av betongsorternas arbetbarhet visade ingen tydlig korrelation mellan mängden tegelaggregat och sättmättet under de första timmarna. Slutsatsen dras av författarna att en användning av tillsatsmedel kan motverka de negativa effekterna tegelaggregat medför på arbetbarheten. Tegelaggregatets inverkan på tryckhållfastheten visade sig vara försumbar för proverna med 60–100 % tegelaggregat, den var konstant på cirka 30 MPa. För proverna med 0–40 % tegelaggregat sjönk tryckhållfastheten från 54 MPa vid en användning av 0 % tegelaggregat, liknande resultat fick proverna där en NaCl-lösningen användes. Testerna av den elektriska resistansen utan NaCl-lösningen visade att en användning av 100 % tegelaggregat minskade de elektriska motståndet med 72 % jämfört med när 0 % användes. Resultatet bedöms bero på mängden vatten som finns i teglet som ger en bättre ledning för jonerna. När NaCl-lösningen användes var nedgången av det elektriska motståndet större i början för att sedan stabilisera sig för samtliga prover efter 4 veckor. Testerna visade att samtliga prover hade en reduktion av det elektriska motståndet på mellan 36–37 % jämfört med startvärdet. Sammanfattningsvis drar författarna slutsatsen att betong med mer än 60 % tegelaggregat har en stor risk för korrosion av armeringen oavsett förhållanden.

Krympning i traditionell betong med tegel

I en studie av Gayarre et al. (2019) undersöktes tegelresters effekt på betongs långvariga deformation. Tegelresterna ersatte de naturliga aggregaten mellan 0 och 100 %. Det effektiva v/c-talet var detsamma i samtliga tester, 0,32, vatten tillsattes dock i takt med att tegelmängden

ökades. Mängden cement, vatten och aggregat som användes framgår av Tabell 2.16. I Tabell 2.17 framgår de resultat som författarna kom fram till där krympningen uppmättes efter 400 dagar.

Tabell 2.16 De olika blandningarna (Gayarre et al., 2019).

Material	Andel tegel av ballasten [%]					
	0	20	35	50	70	100
Cement	15,5%	15,9%	16,2%	16,5%	17,0%	17,8%
Naturgrus	31,4%	25,8%	21,4%	16,8%	10,3%	0%
Sand	44,9%	36,8%	30,5%	24,0%	14,8%	0%
Tvättad sand	2,7%	2,2%	1,9%	1,4%	0,9%	0%
RBA fin	0%	10,8%	19,2%	28,0%	40,3%	60,1%
RBA grov	0%	1,5%	2,6%	3,8%	5,5%	8,2%
Vatten	5,5%	7,0%	8,2%	9,4%	11,2%	13,9%
v/c-talet [-]	0,35	0,44	0,5	0,57	0,65	0,78

Tabell 2.17 Krympning, tryckhållfasthet och elasticitetsmodul för de olika blandningarna (Gayarre et al., 2019).

Tegel [%]	0	20	35	50	70	100
Krympning [$\mu\text{m}/\text{m}$]	183,2	259,4	322,7	411,4	490,4	644,2
Tryckhållfasthet [MPa]	59,8	55,6	52,8	54,1	46,8	43,4
Elasticitetsmodulen [GPa]	42	36	31	28,5	22,5	16,5

Författarna drar följande slutsatser utifrån användningen av tegelrester. En ökad användning av tegel förbättrar betongens härdning och den autogena krympningen minskar. Den autogena krympningen minskar på grund av att vatten har tillförts och den fuktighet som finns i tegelresterna. Den ökade användningen leder även till en lägre elasticitetsmodul vilket leder till svårigheter att kontrollera krympningen av betongen. Slutligen konstaterar författarna att krympningen ökar med 35–45 $\mu\text{m}/\text{m}$ för varje 10 %-ökning av tegelrester och hävdar att detta stämmer överens med andra studier.

Värmekonduktivitet i traditionell betong med tegel

I en studie av Atyia et al. (2021) undersöktes möjligheten att ersätta cementen och de naturliga aggregaten i betong med krossat och pulvrerat tegel. De fina aggregaten utgjordes av sand eller tegel, de grövre av dolomit eller krossat tegel. Samtliga blandningar innehöll cement men i några ersattes cementen delvis av pulvrerat tegel (Tabell 2.18).

Tabell 2.18 Andelarna av varje material i de olika blandningarna (Atyia et al., 2021).

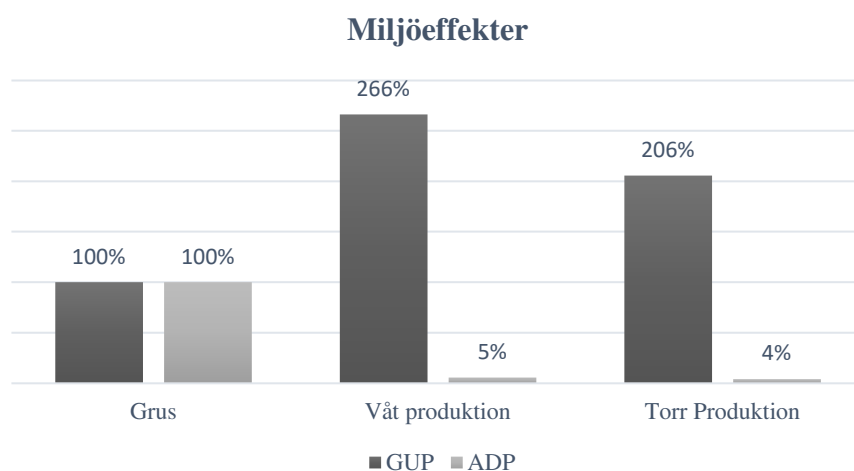
Mix	Cement	Tegelpulver	Kvarts	Fint aggregat		Grovt Aggregat	
				Sand	Tegel	Dolomit	Tegel
NC	20,0%	-	2,2%	34,5%	-	43,3%	-
RFAC	21,1%	-	2,3%	-	30,8%	45,7%	-
RCAC	21,7%	-	2,4%	37, %	-	-	38,6%
RF&CAC	23,0%	-	2,6%	-	33,5%	-	41,0%
MCO	25,5%	-	-	-	33,5%	-	41,0%
MC10	23,0%	3%	-	-	33,5%	-	41,0%
MC20	20,4%	5%	-	-	33,5%	-	41,0%
MC30	17,9%	8%	-	-	33,5%	-	41,0%

I studien uppmättes arbetbarheten, tryckhållfasthet samt porositet och värmekonduktivitet. I de proverna när cement delvis ersattes med tegelpulver uppvisades en försämrad arbetbarhet med en ökad mängd tegelpulver, detta var även fallet för tryckhållfastheten. En ökad användning av tegelaggregat försämrar även tryckhållfastheten, där en ersättning av grovt aggregat ger den största påverkan på tryckhållfastheten. Porositeten ökade för de blandningar som bestod av tegelaggregat och blandningarna med grovt tegelaggregat uppvisade den största påverkan på porositeten. Värmekonduktiviteten för de olika blandningarna mättes på provkroppar med storleken 100x100x30 mm. En värmekälla med storleken 100x100 mm placerades på provkroppens undersida och temperaturen på provkroppens över- och undersida uppmättes. De övriga sidorna på provkroppen var försedda med isolering. Provkroppen som endast bestod av naturligt aggregat uppvisade en värmekonduktivitet motsvarande cirka 1,5 W/(m·K). Värmekonduktiviteten minskade med en ökad användning av tegelaggregat, den största påverkan hade användningen av grovt tegelaggregat. I de blandningar där cement ersattes med pulveriserat tegel och endast tegelaggregat används var värmekonduktivitet cirka 0,6 W/(m·K). Studien inkluderar även en mätning av vattenpenetrationen och sorptiviteten. Vattenpenetrationen var störst för de blandningar där ballasten endast bestod av tegel. Soptiviteten ökade med mängden tegelaggregat men ökade även märkbart med en ökad användning av pulveriserat tegel. Författarna drar slutsatsen att den försämrade arbetbarheten beror på tegelaggregatens irreguljära form. Den försämrade tryckhållfastheten bedöms bero på den ökade porositeten. Minskningen av värmekonduktiviteten bedöms bero på den ökade porositeten och den procentuella minskningen av värmekonduktiviteten är 56,2% när tegelaggregat används jämfört med den vanliga betongen.

Miljöeffekter av återvunnet betongaggregat i traditionell betong

Park et al., (2019) nämner att problematiken med att använda återvunnet betongaggregat är att det behöver gå igenom flera processer jämfört med naturligt aggregat innan det kan användas. Detta leder till ett behov att minska den miljöpåverkan som produktionen av återvunnet betongaggregat medför för att göra det till en hållbar lösning. Studien syftar till att utvärdera den miljöpåverkan en användning av återvunnet betongaggregat innebär enligt en

Livscykelanalys. Analysen är indelad i råmaterial, transport och tillverkning. Den funktionella enheten som användes var 1 kg och analysen genomfördes i Sydkorea. Produktionen av aggregaten skedde genom en torr och en våt metod. Fördelen med den våta metoden är att aggregaten produceras med en högre kvalitet, nackdelen är att den är kostsam. Resultaten av studien visas i Figur 2.1. Global uppvärmningspotential mäts i form av kg CO₂-eq/kg material och anger potentialen till att materialet bidrar till den globala uppvärmningen. *Biotic resource depletion potential* (ADP) anger användning av naturresurser i form av kg Sb-eq/kg. Detta är en enhet som indikerar förbrukning av icke-fossila naturresurser i form av massa av grundämnet antimon. Författarna menar att resultatet beror på att tillverkningen av naturligt aggregat är enklare. Skillnaden i ADP menar författarna beror på att naturligt aggregat utarmar naturliga resurser medan återvunna aggregat är gjorda av befintliga betongresurser. Författarna menar även att resultaten inte är representativa för samtliga återvunna aggregat som används.



Figur 2.1 Miljöeffekter vid tillverkning av återvunnet och naturligt aggregat.

Miljöeffekter av tegel i traditionell betong

Fort & Černý (2020) har genom en livscykelanalys undersökt miljöpåverkan av att återanvända rivningstegel i form av aggregat- och cementersättning. I studien undersöks också miljökonsekvenserna av att deponera teglet. I studien undersöks femton konsekvenskategorier varav två är global uppvärmning och mineralutvinning. Några av aspekterna författarna har tagit hänsyn till är:

- Vid deponi behöver materialet transporteras från produktion till deponi
- Rivningstegel som ersätter naturligt aggregat kan användas vid betongproduktion och som underlag till vägbyggnader. Denna process består av steg som insamling, transport, separation, krossning och malning
- Liknande process krävs då rivningstegel används för att ersätta cement. Dessutom krävs ytterligare malning och vibration. Rivningsteglet behöver också torkas vid 70 °C för att få en pozzolanisk reaktivitet.

Författarna drar slutsatserna att användning av rivningstegel i form av aggregat resulterar inte i minskade koldioxidutsläpp. Cementersättning är det mest lämpliga användningsområdet för återanvändning av rivningstegel då det bidrar till en minskad miljöpåverkan för flera aspekter.

3 Metod och Material

Metoden som har undersöks är att ett bruk bestående av sand, cement, vatten och tillsatsmedel har hållits över tegelaggregaten. Inledande tester där påverkan av cement- sand-, filler- och vatteninnehåll samt flyttillsatsmedel genomfördes. Vidare undersöktes även teglets egenskaper som sorptivitet, densitet och tryckhållfasthet.

3.1 Tegel

Tegelaggregaten införskaffades genom att riva en provmur som stått utomhus i Lund i cirka 2,5 år (Figur 3.1). Teglet krossades med slägga och silades i kornfraktionerna 37–75 och 22,4–37 mm (Figur 3.2). Innan gjutningen skedde blötlades tegelaggregaten i 20 minuter för att de yttersta porerna skulle vattenfyllas och inte absorbera bruket (Figur 3.3).



Figur 3.1 Rivningsobjekt.



Figur 3.2 Aggregat i storlek 22,4–37 (vänster) och 37–75 (höger).



Figur 3.3 Blötläggning av tegel.

3.1.1 Sorptivitet

Sorptivitet beskriver ett materials förmåga att suga upp vatten genom materialets porer (Wadsö, 2020). Teglets sorptivitet S undersöks i enheten $\text{mm}/\sqrt{\text{min}}$ genom att väga massa vatten m som teglet absorberar över tid t . Vattnet som används antas ha en densitet ρ_v motsvarande 1 kg/dm^3 . Sorptiviteten bestäms enligt ekvation (3—1).

$$m = S \cdot \rho_v \cdot A \cdot \sqrt{t} \quad (3—1)$$

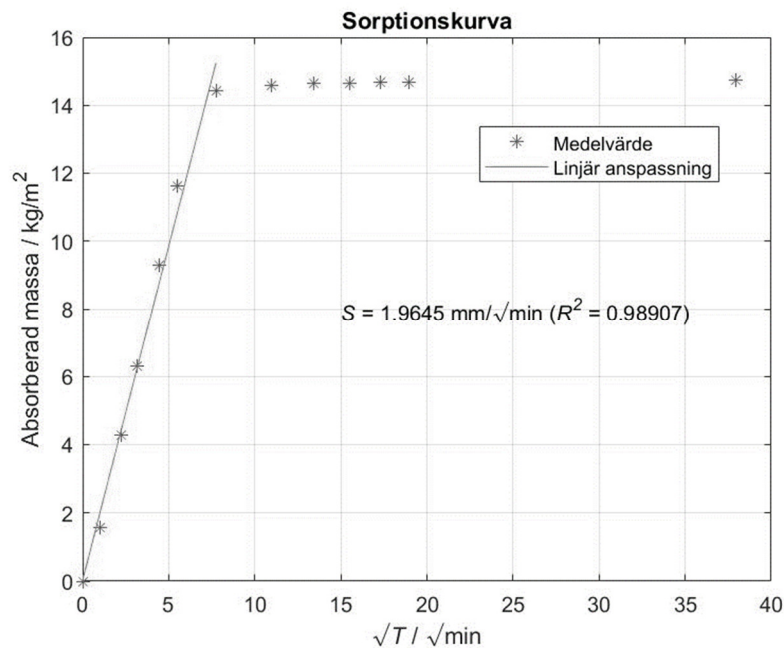
Bedömningen av tegelmaterialets sorptivitet skedde genom att utvärdera sju tegelstenar (Tabell 3.1). Tegelstenarna torkades i 1 dygn i ett värmeskåp med temperaturen $105 \text{ }^\circ\text{C}$ och placerades därefter i en balja ovanpå stålstänger (Figur 3.4). Baljan fylldes med vatten upp till tegelstenarnas undersida och under mätningen var tegelstenarnas undersida ständigt i kontakt med vatten. Tegelstenarnas massa uppmättes därefter med tidsintervallen baserat på ASTM (2015) (Bilaga 2). Utifrån massa absorberat vatten genererades en sorptionskurva där lutningen på den första delen utgör teglets sorptivitet (Figur 3.5).

Tabell 3.1 Längddimensioner för tegelstenarna.

	Längd	Bredd	Höjd
	mm		
1	229	105	36
2	228	106	36
3	228	107	37
4	230	107	36
5	229	106	35
6	228	106	35
7	239	107	35



Figur 3.4 Tegelstenarna ovanpå stålstänger.



Figur 3.5 Sorptionskurva för tegelstenarna.

3.1.2 Densitet

Skrymdensitet, porositet och kompaktdensitet bestämdes för aggregaten (Tabell 3.2). Skrymdensiteten ρ bestämdes utifrån att väga tegelaggregaten samt mäta aggregatens volym V (3—2). Volymen bestämdes genom att placera aggregaten i en behållare och sedan hälla vatten över aggregaten. Volymen vatten och aggregat i behållaren observerades och aggregatens volym kunde bestämmas. Porositeten och kompaktdensiteten ρ_k bestämdes enligt (3—3) respektive (3—4) genom att torka aggregaten i ett dygn i ett värmeskåp med temperaturen 105 °C. Efter torkningen mättes aggregatens massa och vattenmättades därefter i 1 dygn. Volymen hålrum V_p i aggregaten kunde därefter bestämmas genom att väga de vattenmättade aggregaten och beräkna den adderade massan.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-2)$$

$$p = \frac{V_p}{V} \quad (3-3)$$

$$\rho_k = \frac{m}{V - V_p} \quad (3-4)$$

Tabell 3.2 Porositet p , densitet ρ och kompaktdensitet ρ_k för aggregaten.

Fraktion [mm]	p [%]	ρ [kg/dm ³]	ρ_{torr} [kg/dm ³]	ρ_k [kg/dm ³]
37–75	32	1,95	1,87	2,74
22,4–37	30	1,97	1,94	2,76

3.1.3 Tryckhållfasthet

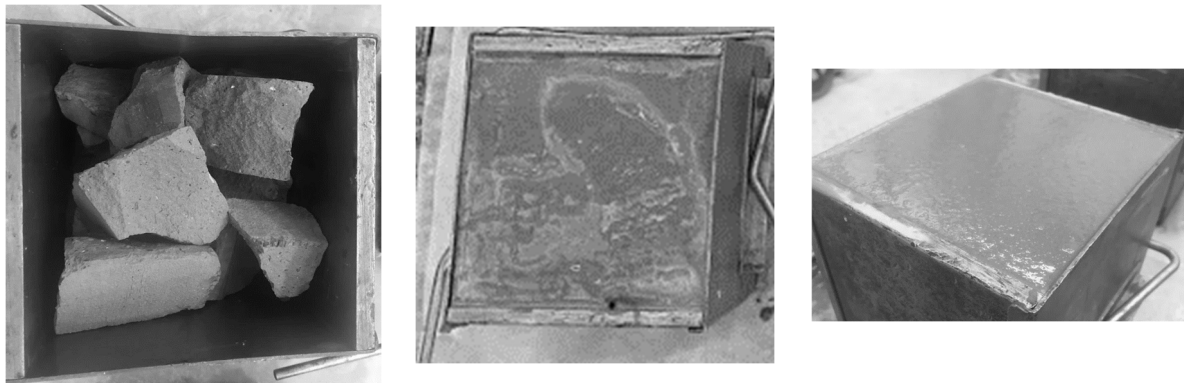
Två tegelstenar tryckhållfasthetstestades. Tre provkroppar av respektive tegelsten skapades genom att såga tegelstenarna. Provkropparnas mått och tryckhållfasthet visas i Bilaga 3. Teglet var fritt placerat på pressen så att dess sidor kunde deformeras horisontellt. Pressen belastade teglet genom att dess ovanlagda rörde sig med en konstant kolvastighet på 4 mm/min ner mot provkroppen. Samtidigt registrerades belastningar vid respektive förflyttning. Tryckhållfastheten varierade mellan 20 och 28 MPa. Ett murverk bestående av tegelstenar av hållfasthetsklass 25 och murbruk av murbruksklass M2,5 har en karakteristisk tryckhållfasthet på 6,0 MPa (Boverket 2019). Detta är förmodligen fallet för den murade konstruktionen som använts i detta arbete.

3.2 Bruk

Materialen som användes vid tillverkning av bruket var Portlandcement, sand, vatten, filler och flyttillsatsmedel av typen Sika ViscoCrete-6730. Sanden bestod av kornstorleken 0–2 mm och fillern av 0–0,125 mm. Cementen utgör det hydrauliska bindemedlet i blandningen och reagerar med vattnet för att sedan härda tills en solid kropp har skapats (Burström, 2007). Ballasten i bruket utgörs av sanden och fyller ut bruket och gör det till viss del stabilt. För att bruket ska ha rätt konsistens har tillsatsmedel använts. Flyttillsatsmedel är den vanligaste typen av tillsats och leder till att bruket får en lösare konsistens (Carlsson & Tuutti, 1993). Flyttillsatsmedlet skapar en friktionsdämpande effekt mellan sandkornen och finfördelar de små partiklarna i form av cement och filler. Effekten är tidsbegränsad och om möjligt bör det adderas till blandningen vid arbetsplatsen. En överdosering av flyttillsatsmedel kan leda till en segregation av sanden vilket leder till att sand separerar från blandningen och sjunker till botten (Najjar et al., 2014). Filler utgör en kornfraktion mindre än 0,125 mm och kan användas för att förbättra betongens sammanhållning och minska vattenseparation (Johansson, 1994). Separation i bruket kan ske i form av vatten-, bruks- och stenseparation (Burström, 2007). I fallet för vattenseparation är mängden finmaterial för liten och vattnet kan inte hållas kvar i blandningen. En konsekvens av detta är att det kan bildas en millimetertjock cementhud ovanpå provkroppen. Detta skikt har ett nedsatt nötningsmotstånd och en dålig vidhäftning mot andra skikt.

3.3 Provkropp och blandning

I testerna gjordes försök att gjuta provkroppar i form av kuber med sidorna 150 mm. Bruket skulle vara tillräckligt lättflytande för att tränga ner genom aggregaten och efter att bruket till viss del härdat applicerades flytspackel ovanpå provkroppen (Figur 3.6). Mängden sand hölls konstant vid framtagning av samtliga bruksblandningar. Cementinnehållet varierades utifrån fyra förhållanden mellan sand och cement: 80:20, 85:15, 90:10 och 95:5. Mängden vatten, flyttillsatsmedel och filler varierades för att undersöka om bruksblandningen kunde få en hög utfyllnadsgrad av provkroppen samtidigt som separation inte uppstod. Men för vissa provkroppar eftersträvades en hög utfyllnadsgrad och en större separation tilläts. Filler tillsattes också i vissa fall då bruket kändes för grovkornigt eller inhomogent.



Figur 3.6 Form med aggregat (vänster), med bruket (mitten) och med flytspackel (höger).

Andelarna material i provkroppen bestämdes genom att först väga de blötlagda tegelaggregatens vikt. Brukets beståndsdelar observerades vid gjutningen och dagen efter uppmättes den delvis härdade provkroppens vikt. Utifrån provkroppens vikt bestämdes därefter andelarna av respektive material.

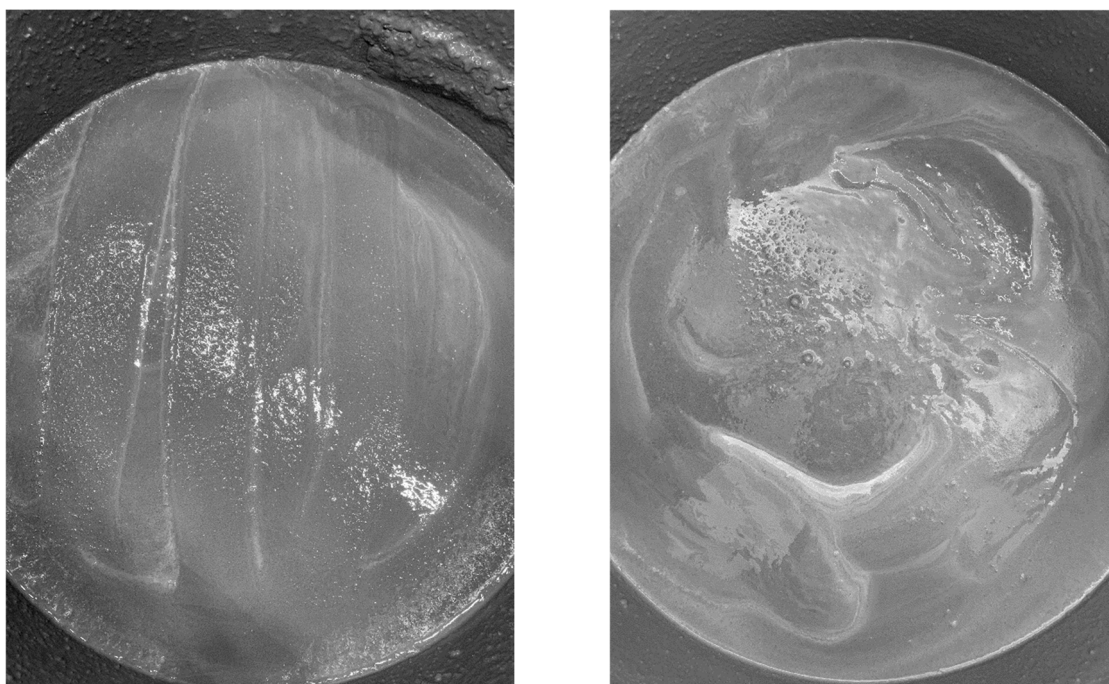
I de inledande testerna varierades cementnivåerna och härdningstiderna mellan de olika provkropparna. Detta för att undersöka hur de olika variablerna påverkar hållfastheten. Aggregatsstorlekarna som användes var både 22,4–37 och 37–75. Provning av hållfastheten skedde genom att belasta provkropparna i en hydraulisk press. De provkroppar som testades bestod av tre förhållanden mellan sand och cement; 90:10, 85:15 och 80:20 och det var endast de provkroppar med aggregatsstorleken 37–75 som undersöktes. Provkropparna belastades på samma sätt som vid trycktestning av teglet. Men vid de inledande testerna varierades kolvhastigheten mellan 1, 2 och 3 mm/min.

I huvudtesterna skapades fyra serier av provkroppar. Förhållandet mellan sand och cement i bruket varierades mellan 85:15 och 90:10 enligt Tabell 3.3 och bruket gjordes stabilt eller instabilt. När bruket gjordes instabilt tilläts en tydlig separation av bruket för att det skulle kunna rinna ner och sprida sig i hela formen. När bruket gjordes stabilt tilläts en begränsad separation och endast en tunn och trögflytande hinna av vatten på brukets ovansida tilläts. I Figur 3.7 visas hur separationen såg ut i ett färskt bruk efter att sand, cement, filler, vatten och flyttillsatsmedel har blandats i en spann. Spannen vibrerades lätt för att påskynda separationen vilket visar sig i hinna på brukets ovansida. En spackelspade användes för att påvisa separationen. Tryckhållfastheten utvärderades med samma sätt som i de inledande testerna men med en kolvhastighet på 4 mm/min. Provkropparna där bruket hade sand och cement-

förhållandet 85:15 och 90:10 härdades i 22 respektive 21 dagar. Under härdningsförloppet skedde ingen bevattning av betongen och provkropparna försågs inte med något täckskikt. Provkropparna förvarades i en labbmiljö med en temperatur och relativ fuktighet runt 20 grader respektive 30–40%.

Tabell 3.3 Brukets sammansättningar.

Grundrecept	Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	v/c-tal
85:15 stabilt	11,5%	65,0%	8,9%	14,6%	0,069%	1,3
85:15 instabilt	11,3%	64,2%	8,8%	15,6%	0,064%	1,4
90:10 stabilt	7,4%	66,2%	11,6%	14,8%	0,044%	2,0
90:10 instabilt	7,3%	65,4%	11,4%	15,9%	0,047%	2,2



Figur 3.7 Stabilt bruk (vänster) och instabilt bruk (höger).

4 Resultat och Diskussion

Följande delkapitel innehåller de resultat som har erhållits när olika typer av recept har undersökts följt av en diskussion kring resultatet och ämnet. De olika aspekterna som utvärderades var främst cementinnehåll och härdningstid, men också mängden tegelkross, filler, flyttillsatsmedel och vatten samt brukets nedträngning i provkropparna.

4.1 Inledande tester – resultat

Provningarna gjordes med aggregat av tegel i fraktionen 37–75 mm. En användning av fraktionen 22,4–37 mm leder till att en ungefärlig viktmässig lika stor mängd aggregat av fraktion 37–75 mm får plats i formen och en otillräcklig utfyllnadsgrad när samma bruksrecept undersöktes (Figur 4.1). Fyra sand- och cementförhållanden testades: 95:5, 90:10, 85:15 och 80:20. De fyra olika sand och cementförhållandena resulterade i följande ungefärliga cementinnehåll i provkropparna: 2,5%, 5%, 7,5% och 10%. Provkropparna med ett cementinnehåll på 2,5% trycktestades inte eftersom tryckhållfastheten bedömdes vara för liten. I provkropparna med ett cementinnehåll på 5% framgår det i Bilaga 4 att provkropp 8 har en större hållfasthet än provkropp 1. Provkropp 8 har ett ungefärligt lika stort cementinnehåll men en längre härdningstid. Vilket kan betyda att hållfastheten ökar med en längre härdningstid för provkroppar med ett cementinnehåll på cirka 5%.

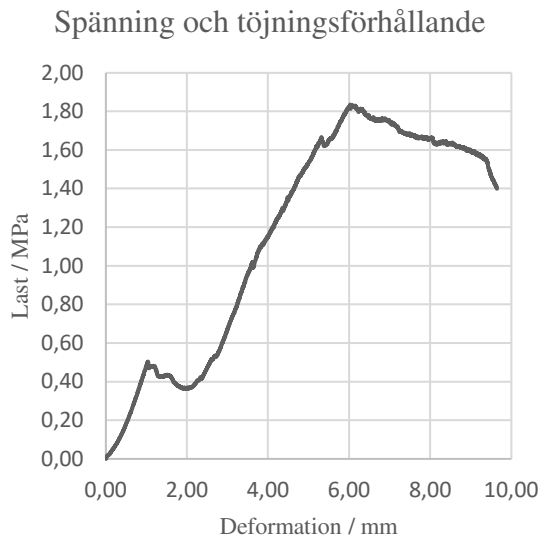


Figur 4.1 Aggregat med storleken 22,4–37 (vänster) och 37–75 (höger).

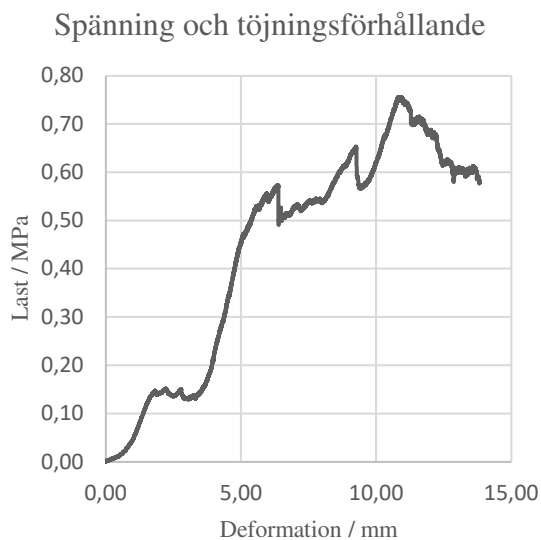
I provkropparna med ett cementinnehåll på cirka 7,5% jämförs provkropparna 10 och 18 med härdningstiderna 10 respektive 18 dagar. Båda provkropparna har ungefärligen samma hållfasthet vilket tyder på att härdningstiden kan ha en mindre påverkan jämfört med provkropparna med ett cementinnehåll på 5%. Provkropp 13 härdades i 14 dagar och har en mindre och mer oregelbunden yta på undersidan jämfört med provkropparna 10 och 18. Genom att jämföra de enskilda provkropparna kan slutsatsen dras att en oregelbunden yta eventuellt har en större påverkan på hållfastheten jämfört med härdningstiden.

I testerna där cementinnehållet var cirka 10% konstaterades ingen ökning av hållfastheten av provkropparna 20 och 21 jämfört med de fungerande proverna med ett cementinnehåll på 7,5%. En fungerande provkropp syftar till en spännings- och deformationskurva som liknar den i Figur 4.2, en kurva som har ett stabilt förhållande mellan spänning och deformation. En icke fungerande provkropp syftar till en provkropp som har ett ostabilt förhållande mellan spänning

och töjning där belastningen har omfördelats flera gånger (Figur 4.3). I en icke fungerande provkropp har bruket inte spridit sig tillräckligt. Det var även vid testerna med ett cementinnehåll på 10% där det med säkerhet kunde konstateras att tegelaggregat gick i brott innan provkroppen nådde den maximala lasten (Figur 4.4). Detta kan vara en slump, tegelaggregatet kan initialt vara skadat. Men till skillnad från de andra testerna med mindre cement där bruket förmodligen var brottmoden har detta prov mer cement. Detta kan betyda att en cementnivå över cirka 7,5% inte förbättrar hållfastheten (Figur 4.5), förmodligen eftersom tegelaggregaten börjar gå till brott.



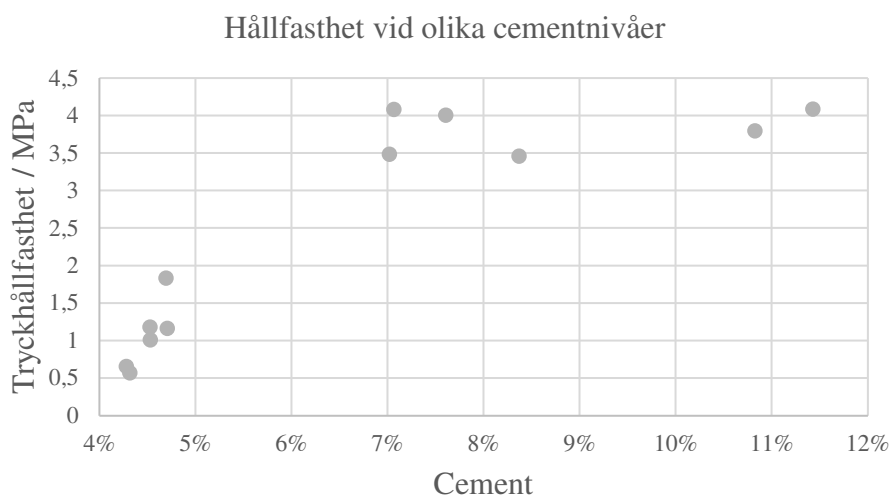
Figur 4.2 Exempel på en provkropp med acceptabel utfyllnadsgrad.



Figur 4.3 Exempel på en provkropp med oacceptabel utfyllnadsgrad.

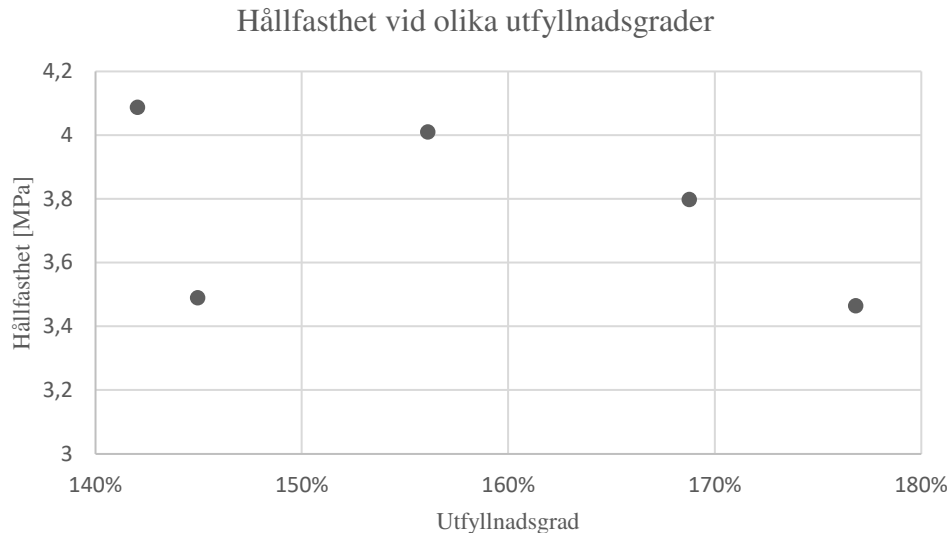


Figur 4.4 Spricka i tegelaggregat i en provkropp med 10,4 % cement.



Figur 4.5 Tryckhållfasthet vid olika cementnivåer i provkropparna.

Hur mycket bruk som finns i provkroppen kan påverka hållfastheten. Hålrums i provkroppen innebär potentiellt en mindre snittarea och att en högre spänning uppstår, vilket i sin tur kan medföra en lägre hållfasthet. Inverkan av hålrum kan definieras utifrån utfyllnadsgraden som definieras som förhållandet mellan brukets och teglets vikt. Detta ger en bild av mängden bruk som får plats i formen och som har spridit sig mellan tegelaggregaten. I Figur 4.6 framkommer tryckhållfastheten för provkroppar där bruket har ett sand- och cementförhållande 85:15 och 80:20. Där framgår det dock att det inte finns ett tydligt samband mellan utfyllnadsgraden och tryckhållfastheten. Provkropparnas utseende visar sig dock ha en inverkan på hållfastheten. I jämförelse med provkropp 10 och 13 så har provkropp 13 en längre härdningstid och lite högre cementinnehåll, men en lägre hållfasthet. Bruket har inte lyckats sprida sig i provkropp 13 eller runnit ner till botten av formen, detta anses vara den parameter som ger den lägre hållfastheten.



Figur 4.6 Tryckhållfasthet vid olika utfyllnadsgrader i provkropparna.

I flera av de tester som genomförts har vattenseparation av bruket konstaterats innan de hälldes i formarna. Det betyder att bruket är instabilt och känsligt för vibrationer. Separationen av bruket har främst konstaterats för de blandningar som inte har någon filler. Men det har även framkommit en tydlig separation av bruket i formen, i form av att en tunn hinna av vatten har bildats på provkropparnas ovansida. Men separation av bruket kan inte entydigt kopplas till en försämrad hållfasthet.

4.2 Huvudtester – resultat

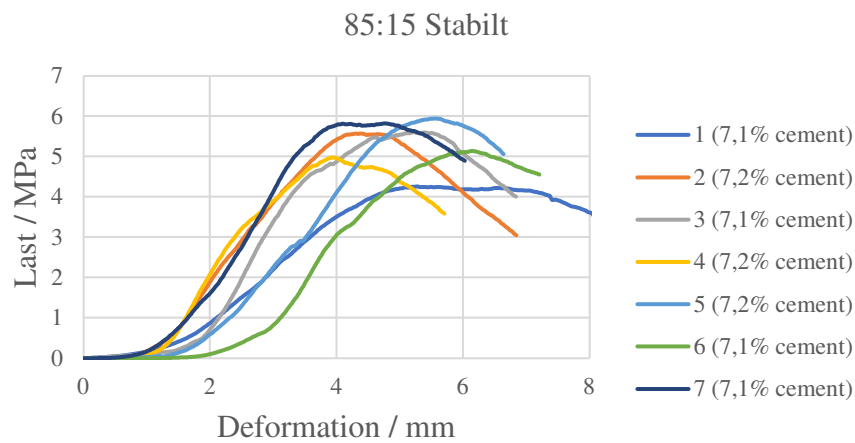
I huvudtesterna varierades sand och cementförhållandena i bruket mellan 85:15 och 90:10. Bruksblandningarna gjordes antingen stabila eller instabila. Även om de inledande testerna inte visade någon koppling mellan instabila bruk och tryckhållfasthet, kan separation ha andra negativa effekter. Varje recept gjordes därför både stabilt och instabilt där i det senare fallet mer vatten användes. En användning av mer vatten leder till ett mer lättflytande bruk och en potentiellt större utfyllnadsgrad i provkropparna. Variationen av cementinnehållet i provkropparna för respektive serie framgår av Tabell 4.1 och resultatet av samtliga provkroppar återfinns i Bilaga 5.

Tabell 4.1 Cementinnehåll i provkroppen vid olika sand och cementförhållanden i bruket.

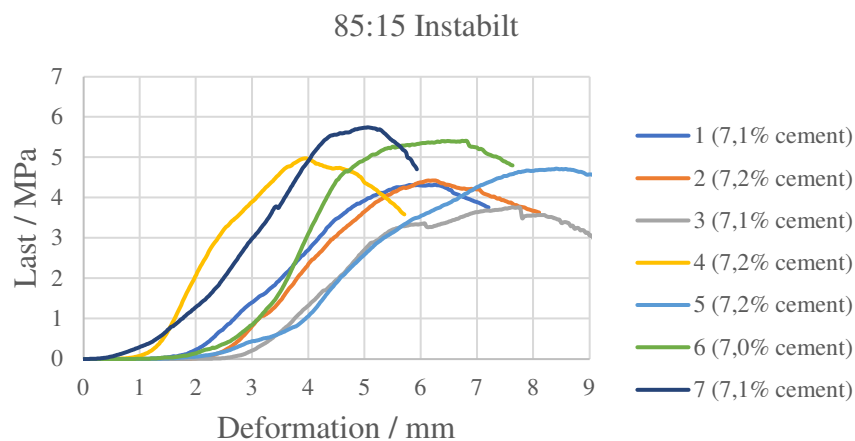
Benämning	85:15S	85:15I	90:10S	90:10I
Sand:Cement	85:15 Stabilt	85:15 Instabilt	90:10 Stabilt	90:10 Instabilt
Cementinnehåll [%]	7,1–7,2	7,0–7,2	4,4–4,7	4,5–4,6

Tryckhållfastheten för provkropparna i provserierna 85:15S (Figur 4.7) och 85:15I (Figur 4.8) varierade mellan 3,8–5,9 MPa medan provkropparna i provserierna 90:10S (Figur 4.9) och 90:10I (Figur 4.10) hade en tryckhållfasthet på 2,1–3,5 MPa (Bilaga 5). De horisontella förskjutningarna i figurerna beror på att pressens startläge varierade mellan provkropparna. Gällande en ökad tryckhållfasthet mellan provkroppar med stabila respektive instabila recept kunde en skillnad endast observeras för provkropparna som innehöll ett bruk med sand och

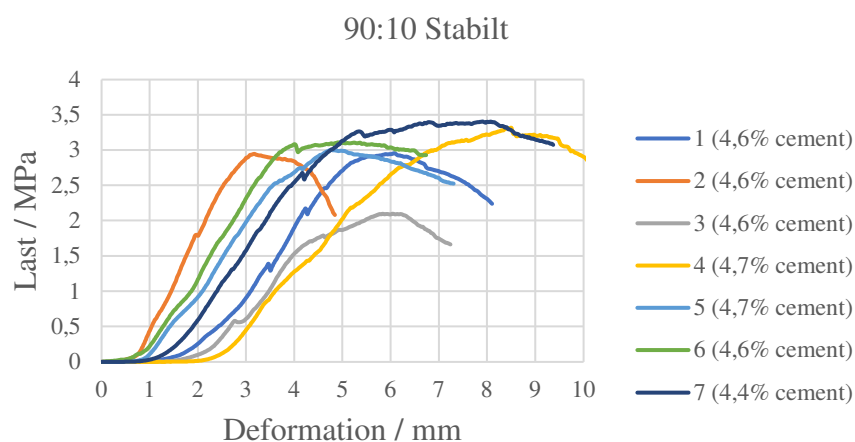
cementförhållandet 85:15. För dessa provkroppar hade de som innehöll stabilt bruk en medeltryckhållfasthet på 5,3 MPa medan de som innehöll instabilt bruk hade en medeltryckhållfasthet på 4,8 MPa.



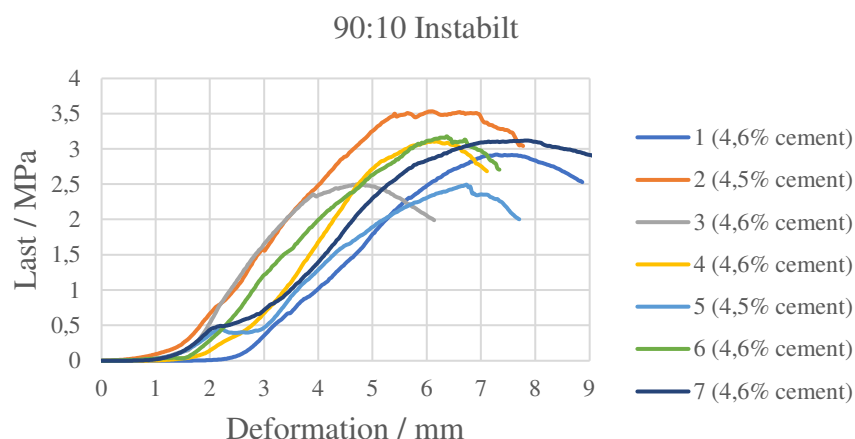
Figur 4.7 Last - deformationskurva för 85:15S.



Figur 4.8 Last – deformationskurva för 85:15I.



Figur 4.9 Last - deformationskurva för 90:10S.



Figur 4.10 Last - deformationskurva för 90:10I.

I serien 85:15S uppnådde provkropp 1 en lägre hållfasthet jämfört med de övriga provkropparna, vilket anses bero på att bruket inte uppnådde tillräcklig spridning i formen. Den otillräckliga spridningen framgår i Figur 4.11. I serien 90:10S finns det en avvikande kurva men samtliga provkroppar i serien hade ett utseende likt den typiska provkroppen i Figur 4.11. I serien 90:10I finns det två avvikande kurvor. Provkropp 3 skadades när formen togs bort men i övrigt hade samtliga provkroppar ett typiskt utseende.



Figur 4.11 En typisk provkropp i serien 85:15S (vänster) och provkropp 1 i samma serie (höger).

Provkropparnas utfyllnadsgrad redovisas i Bilaga 5 i form av viktandelen bruk i förhållande till tegelaggregat i provkroppen. Utfyllnadsgraden varierade mellan 162–175% för provkropparna med de stabila recepten och 164–176 % för provkropparna med instabila recept, med undantag för provkropp 7 i serien 90:10S. Detta betyder att de instabila recepten inte resulterar i en märkbar större utfyllnadsgrad. Provkroppen med lägst utfyllnadsgrad, provkropp 7 i provserien 90:10S, hade högst hållfasthet av provkropparna i denna serie, vilket tyder på att en lägre utfyllnadsgrad inte nödvändigtvis resulterar i lägre tryckhållfasthet. Vad gäller den lägre gränsen av utfyllnadsgraden lär det finnas en gräns där tryckhållfastheten blir påverkad. I detta arbete har dock ingen sådan gräns identifieras, utan det kan konstateras att de gränser som använts har fungerat. En för låg utfyllnadsgrad skulle dock leda till en märkbar försämrad hållfasthet. Resultaten visar att bruket kan göras stabilt och fortfarande generera en tillräcklig utfyllnadsgrad av provkroppen.

Det konstaterades i de inledande testerna att utfyllnaden av provkropparnas undersida hade påverkan på hållfastheten. I fallet för huvudtesterna bedöms utfyllnaden av provkropparnas

undersida ha en påverkan på hållfastheten i serierna med högre cement men verkar inte vara fallet för serierna med lägre cementhalt. Till exempel uppvisade provkropp 7 i serien 90:10S en begränsad spridning av bruket (Figur 4.12) men hade den högsta hållfastheten. Sammanfattningsvis kan det konstateras att utfyllnadsggraden inte har en direkt påverkan på hållfastheten i någon av serierna mellan de gränser som undersökts. Men hur väl bruket sprider sig påverkar främst provkropparna med en större mängd cement. Detta anses vara rimligt eftersom den högre hållfastheten som erhålls i serierna med ett större cementinnehåll är direkt beroende på bruket. Ett bruk som inte får en tillräcklig spridning innebär därför en försämrad hållfasthet. I fallen för serierna med ett lägre cementinnehåll spelar teglets hållfasthet en större roll för hållfastheten eftersom bruket är svagare. Ett svagare bruk innebär att spridningen av det har en mindre påverkan på hållfastheten i provkroppen.



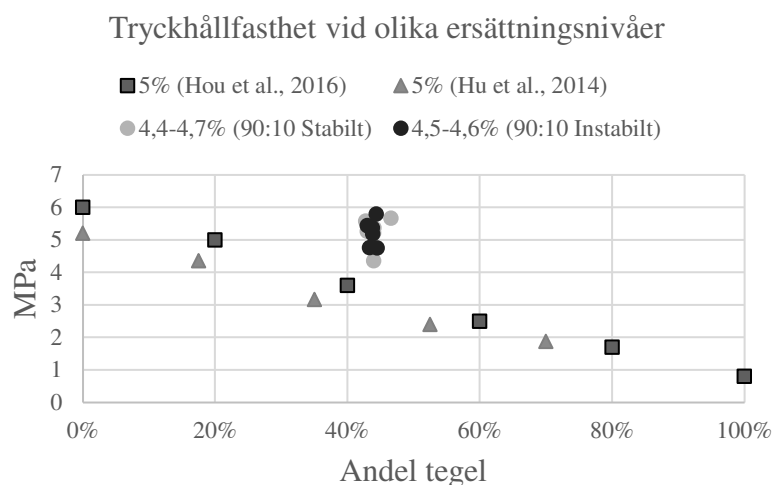
Figur 4.12 Provkropp 7 i serien 90:10S.

4.3 Analys av resultaten

Recepten som tagits fram i detta arbete innehåller liknande material som andra studier med liknande metod. Utifrån tester utan flyttillsatsmedel går det att konstatera att någon typ tillsatsmedel behöver användas för att göra konsistensen lösare i bruket. Flera av studierna använde även något typ av fillermaterial, vilket även var nödvändigt i detta arbete. Filler materialet gjorde bruket mer stabilt och homogent samtidigt som det förbättrade arbetbarheten. Resultatet visar även att det går att använda ett stabilt recept som är mer trögflytande jämfört med ett instabilt samtidigt som bruket rinner ner och fyller hålrummen.

Figur 4.13 visar en jämförelse mellan hållfastheten som erhållits i detta arbete och två andra studier, tryckhållfastheten är omräknad till 28 dagar. Serierna 85:15 och 90:10 har härdat i 22 respektive 21 dagar. För att räkna om hållfastheten till 28 dagar bestäms ökningen av hållfastheten genom att använda tendenskurvor (Figur 11.11:16) (Möller & Petterssons, 1994, s. 385). Hållfastheten ökar med 0,32 MPa/dag upp till 28 dagar för samtliga serier. Hou et al. (2016) använder provkroppar som har en cementnivå på 5% vilket generellt brukar resultera i en högre hållfasthet. Men till skillnad från aggregaten som användes i detta arbete, användes aggregat som var mindre än 31,5 mm och de hade en maximal kompaktdensitet motsvarande 1,912 kg/dm³. Detta betyder att den uppmätta hållfastheten i detta arbete bör vara högre, eftersom kompaktdensiteten av aggregaten som har använts är större. Metoden med att hälla bruket över aggregaten använde inte Hou et al. (2016). Denna metod har bevisat sig bibehålla hållfastheten även om mängden cement minskar (Lv et al., 2020). Hu et al. (2014) använder också endast aggregat som är mindre än 31,5 mm och har en torrdensitet på 1,854 kg/dm³. Torrdensiteten liknar den torrdensitet som tegelaggregaten hade i detta arbete. Men i jämförelse med Hu et al. (2014) utgjordes ballasten i detta arbete av en större mängd sand. Detta betyder

att hållfastheten bör vara mindre, eftersom sand har en högre hållfasthet än tegel. Hu et al. (2014) använde inte heller metoden med att hålla bruket över aggregaten.



Figur 4.13 Tryckhållfastheten som funktion av andelen tegel av ballasten för olika cementnivåer.

4.4 Tillämpning

För att undersöka om denna metod lämpar sig som grundläggning till mindre byggnader behöver en anpassning göras till gällande lagar och normer. Till följd av spridning hos betongmaterials egenskaper varierar hållfastheten mellan proverna och utifrån det ska ett karakteristiskt värde för hållfastheten tas fram. Det karakteristiska värdet f_{ck} motsvarar 5-percentilen av mätvärdena och utgår från medelvärdet f_{cm} (Isaksson et al., 2017). Det dimensionerande värdet f_{cd} bestäms genom att använda partialkoefficienten. I detta fall anses partialkoefficienten för murverk vara lämplig att använda. För detta fall väljs partialkoefficienten 2,2 till följd av produktionsförutsättningarna och eftersom 5-percentilen beaktas samt att murbruket anses vara föreskrivet (SIS, 2022). **I Fel! Hittar inte referenskälla.** framgår de olika hållfasthetsparametrarna för de olika serierna omräknat till 28 dagars härdning.

Tabell 4.2 Medel, karakteristisk och dimensionerande hållfasthet efter 28 dagars härdning.

Serie	85:15S	85:15I	90:10S	90:10I
f_{cm} [MPa]	7,3	6,7	5,2	5,2
f_{ck} [MPa]	6,4	5,9	4,6	4,8
f_{cd} [MPa]	2,9	2,7	2,1	2,2

Huruvida tryckhållfastheterna i serierna är tillräckligt stora för att klara av de belastningar som uppstår i en platta på mark ska de jämföras med de regler som gäller. En grov överslagsräkning för en villa visade att den största dimensionerande tryckspänningen som uppstår är 0,26 MPa. Denna belastning sker endast längs en bärlinje, vilket är en begränsad del av plattan. Den största andelen av plattan belastas endast av den nyttiga lasten, för bostäder är den karakteristiska belastningen 2,0 kPa. Övriga belastningar som uppstår i en platta på mark är dragspänning till följd av expansion och krympning, vilket kan tas upp av ett armeringsnät. Dragspänningar kan även uppstå längs bärlinjerna vilket tillgodoses genom att använda armeringsstänger.

4.5 Fördelar och nackdelar

I följande kapitel presenteras fördelar och nackdelar som användningen av tegel samt metoden med att hålla ett bruk över aggregaten medför i betong. Diskussionen baseras till stora delar på litteraturstudien.

4.5.1 Tryckhållfasthet och arbetbarhet

Flertalet studier har undersökt inverkan på traditionell betong med inslag av tegel som en del av ballasten. Det finns en tydlig korrelation mellan mängden tegel och tryckhållfasthet i betongen. Studierna av Cachim (2009) och Zhang & Zong (2014) visar att ju större mängd tegel som används desto mindre blir tryckhållfastheten, vilket är rimligt, eftersom tegel har lägre hållfasthet jämfört med traditionell ballast. Cachim (2009) visade även att en ökad torrdensitet i aggregaten leder till en större tryckhållfasthet. Men utöver aggregatens egenskaper har ersättningsnivån också påverkan på tryckhållfastheten. Azba & Alnuman (2021) visade att när ballasten ersättes med 60% eller mer av tegelaggregat skedde ingen tydlig försämring av tryckhållfastheten. Detta tyder på att det finns en nivå där liknande hållfasthetsegenskaper kan uppnås men med större mängd tegel. Detta är positivt ur ett miljöperspektiv, eftersom en ökad mängd återvunnet tegel leder till att en mindre mängd naturresurser förbrukas. I fallet för cementbundna aggregat är det dock cementnivån som anses ha störst påverkan på hållfastheten (Lim & Zollinger, 2003). Detta är sant till en viss cementnivå, eftersom de inledande testerna i detta arbete visar att en cementnivå över 7,5% inte ger en högre hållfasthet.

Rester av murbruk som satt fast på rivningsteglet har i vissa fall förekommit vid tillverkning av provkropparna. Detta anses inte ha en stor påverkan på provkropparnas hållfasthet då det förekom i mindre utsträckning. I de fall det förekom var det i små mängder. Det är dock en aspekt som skulle kunna ha påverkan på hållfasthet ifall stora mängder förekommer.

Utöver tryckhållfasthet har tegelaggregat också en påverkan i form av en försämring av arbetbarheten (Atyia et al., 2021; Xuan et al., 2012; Zhang & Zong, 2014). Detta kan bero på att aggregat som kommer från rivningstegel kan ha en mer långsträckt form jämfört med naturligt aggregat. Det kan också bero på teglets vattenabsorption i de fall man inte inledningsvis blötlägger teglet. Däremot visar studien av Azba & Alnuman (2021) ingen förändring av arbetbarheten, vilket författarna menar kan bero på användning av flyttillsatsmedel.

4.5.2 Porositet

En tydlig skillnad mellan att använda naturligt aggregat och tegelaggregat är att porositeten ökar i betongblandningen. En ökad porositet brukar innebära en försämrad hållfasthet, vilket även är fallet i de studier som granskats. Men en ökad porositet försämrar även värmekonduktiviteten. I studien genomförd av Atyia et al. (2021) har flera undersökningar av värmekonduktivitet genomförts. I en av blandningarna bestod den grövre ballasten av tegelaggregat och utgjorde 50% av all ballast, resterande ballast bestod av sand. Författarna kom fram till att denna blandning kan minska värmekonduktiviteten till cirka 0,95 W/(m·K), jämfört med referensblandningen med endast naturligt aggregat som hade 1,5 W/(m·K). Detta skulle innebära att en 100 mm tjock platta skulle få en reduktion av U-värdet med 0,18 W/(m²·K). Den energibesparing detta skulle motsvara för en bostad i Lund, med innermått 8x12 m, är 1498 kWh/år baserat på att antalet gradtimmar är 85 800 timmar/år (Pettersson, 2013). Med en

uppvärmningskostnad som för fjärrvärme motsvarande 1,3 kr/kWh skulle detta motsvara 1947 kr/år som skulle sparas genom att välja en platta med tegelaggregat (Konsumenternas Energimarknadsbyrå, 2019). Provkropparna i detta arbete har ett liknande förhållande mellan mängden tegelaggregat och sand. Men till skillnad från de tegelaggregat som användes av Atyia et al. (2021), är aggregaten som användes i detta arbete av större fraktionsstorlekar. De grövre aggregaten som användes av Atyia et al. (2021) var mellan 4 och drygt 10 mm, vilket ska jämföras med 37 och 75 mm. Detta betyder att värmekonduktiviteten för provkropparna i detta arbete förmodligen är mindre än 0,95 W/(m·K) eftersom större aggregat medför generellt att porositeten är större. En annan aspekt av teglets porositet som Atyia et al. (2021) tar upp är att porositeten bidrar till att ljud inte sprider sig lika snabbt genom en betong när tegelaggregat används jämfört med traditionell betong.

4.5.3 Härdning och uttorkning

Härdningstiden för en gjuten platta är avgörande för hur snabbt arbetet med nästkommande faser i produktionen kan börja. Ju mindre cement som är i plattan desto mindre blir den slutgiltiga hållfastheten för plattan. Detta medför att arbetet med att ställa upp övriga bärande element måste fördröjas eftersom hållfastheten eventuellt inte har utvecklats tillräckligt. Under härdningsförloppet sker även en värmeutveckling i betongen vilket är en konsekvens av reaktionen mellan cement och vatten, ju mindre cement som finns i betongen desto mindre blir värmeutvecklingen. Under härdningsförloppet är det vanligt att plattan vattnas för att förhindra att plattan torkar för snabbt och härdningen avstannar. De recept som använts i detta arbete har ett högre vatteninnehåll i förhållande till cement jämfört med ett traditionellt betongrecept. Detta skulle kunna innebära ett mindre behov av vattning. I testerna som genomförts har ingen vattning av proverna genomförts. Proverna har heller inte täckts med någon plastfilm och inga negativa effekter av tillvägagångssätten har kunnat konstateras.

Uttorkningstiden är också en viktig aspekt vid uppförandet av en byggnad, vilket kan kopplas samman med värmeutvecklingen. Uttorkningstiden är avgörande, eftersom längre uttorkningstid kan fördröja övriga processer i produktionen. Metoden som har använts i detta arbete kräver en större mängd vatten jämfört med de traditionella metoder som brukar användas för betongtillverkning. De recept som tagits fram i huvudtesterna innehåller mellan 14 och 15% vatten. Detta kan jämföras med en betong med tegel som har blandats med en traditionell metod. I studien genomförd av Gayarre et al. (2019) har en betong där ballasten utgjordes till 50% av tegel studerats. I denna studie utgjorde betongblandningen av 16,5% cement och 9,4% vatten. Detta visar att det recept som tagits fram i detta arbete förmodligen kräver en längre uttorkning jämfört med en traditionell betong. Detta gäller med förutsättning att tegel med liknande egenskaper har använts. I fallet med platta på mark är uttorkningen också förhindrad på plattans undersida, vilket gör uttorkningen något mer problematiskt. Vattnet kan också spela in i varför betong med tegel och lågt cementinnehåll är känslig för frysning (Hu et al. 2014). När betong utan tegel cykliskt fryses minskar tryckhållfastheten från 5,20 till 5,07 MPa. När halva ballasten utgörs av tegel minskar tryckhållfastheten från 3,16 till 2,44 MPa. Detta tyder på att det krävs att frysning av plattan undviks om utnyttjandegraden av plattan är stor. Ifall betong fryser finns det även risk för bestående skador. Ett potentiellt problem med det höga vatteninnehållet skulle kunna vara att det medför större konsekvenser vid frysning. I fallet för platta på mark är frysning förmodligen inget problem eftersom plattan förses med isolering mot mark och omkringliggande miljö. Men noga utförd isolering är nödvändiga för att undvika en försämrad hållfasthet.

4.5.4 Armering och praktisk tillämpning

Draghållfastheten är en aspekt som ska beaktas vid en grundläggning av en platta på mark. Enligt studierna av Hu et al. (2014) och Hou et al. (2016) minskar både draghållfastheten och tryckhållfastheten då en ökad mängd tegel ersätter naturlig ballast. Den relativa minskningen av draghållfastheten är dock inte lika hög som för tryckhållfastheten. Vidhäftning mellan aggregat och cementbruk har en påverkan på draghållfasthet. Teglaggregat har en grov yta vilket leder till en ökad friktion mellan partiklarna och är bidragande till den reducerade minskningen av draghållfastheten. Vidhäftningsförmåga är också av betydelse för armerad betong, eftersom armeringsjärnen hindras från att dras ut ur betongen med hjälp av friktion. En potentiell nackdel med att armera betong med teglaggregat skulle kunna vara att armeringen lättare korroderar (Azba & Alnuman, 2021). Enligt studien har betong med teglaggregat en lägre elektrisk resistans än betong med naturligt aggregat om teglet vattenmättas. Författarna menar att det kan bero på teglets högre vatteninnehåll, vilket resulterar i en lägre elektrisk resistans som ökar risken för korrosion. I de delar av en platta som är utsatt för fukt, till exempel längs fasaden, kan en användning av tegel i betongen leda till en större risk för korrosion. Om vattennivån i dessa delar av plattan blir för stor blir den elektriska resistansen reducerad jämfört med traditionell betong.

Användning av metoden att placera ut teglaggregat innan bruket pumpas ut kan medföra utmaningar, utöver krav på tryckhållfasthet, gällande utförande i praktiken. Byggnationen av platta på mark sker oftast genom att ett armeringsnät läggs ut på distanser innan plattan gjuts. Armeringens funktion är att ta upp dragspänningar. I ett fall då en grundläggning med cementbundet rivningstegel ska förstärkas med armeringsnät skulle teglaggregaten kunna läggas ut efter placeringen av armeringsnätet, förutsatt att nätets rutor är tillräckligt stora för aggregaten att släppas igenom. En nackdel med metoden skulle kunna vara att utförandet kräver ytterligare arbetsmoment då rivningsteglet ska spridas ut. För traditionell betong används mindre aggregatsstorlekar och betongblandningen pumpas ut över armeringen. Om de grova aggregaten placeras ut i förhand behöver dock endast 40% av den totala betongblandningen pumpas ut och en mindre mängd cement behöver användas (Najjar et al., 2014). Metoden beskrivs även som kostnadseffektiv, eftersom ingen vibration eller kompaktion krävs.

4.5.5 Krympning

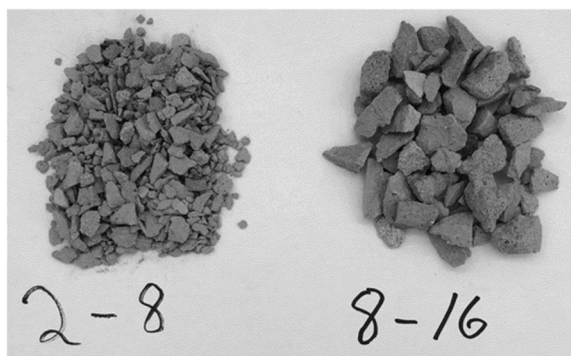
Tegel kan medföra en påverkan på krympningen då det ersätter naturlig ballast. Krympningen av betong kan bland annat kopplas till sprickbildningen som kan uppstå. Krympningen är större för traditionell betong jämfört med när tegel används som del av ballasten. I studien av Ceesay & Miyazawa (2019) ökade krympningen av traditionell betong då aggregat från återvunna tegeltakpannor användes. Även i studien genomförd av Gayarre et al. (2019) ökade den totala krympningen då en ökad andel teglaggregat ersatte naturligt aggregat, även fast den autogena krympningen minskade. Den autogena krympningen är den krympning som sker när cement reagerar med vatten i betong. Den autogena krympningen minskar enligt författarna eftersom extra vatten tillförts och att teglet har ett visst vatteninnehåll. I fallet för cementbundet rivningstegel visar studier på att den totala krympningen minskar (Hou et al. 2016; Hu et al. 2014). Det beror på att tegel absorberar delar av vattnet, vilket kan användas under härdningsförloppet. En annan anledning till att krympningen minskade för cementbundet rivningstegel kan bero på att strukturen mellan aggregaten skiljer sig. I detta arbete har en annorlunda metod använts vid tillverkningen av provkropparna, ett bruk har hållts över

aggregaten. Awal (1984) menar att en tillämpning av denna metod leder till en reducerad krympning eftersom aggregaten är placerade med kontaktytor mot varandra. Även cementnivån i betongen påverkar krympningen. I studien av Meng et al. (2021) framgår det att krympningen efter lång tid ökar med ett ökat cementinnehåll. En grund bestående av cementbundet rivningstegel med ett lågt cementinnehåll, likt provkropparna i detta arbete, skulle därför kunna ha en lägre grad av krympning även utifrån denna aspekt. Detta skulle kunna vara fördelaktigt när sprickbildning behöver beaktas (Hou et al., 2016). Övriga fördelar med metoden i detta arbete är att stora aggregat har använts, vilket har visat sig motverka krympning jämfört med mindre aggregat (Ceesay & Miyazawa, 2019).

4.5.6 Miljöpåverkan

Livscykelanalyserna som genomförts i studierna av Park et al. (2019) och Fořt & Černý (2020) pekar på att återanvändning av både betong och tegel i form av aggregat bidrar till koldioxidutsläpp som är större än om naturligt aggregat används. De återvunna materialen behöver bearbetas under olika processer för att kunna användas i en traditionell betongblandning. I detta arbete har betongen tillverkats med större aggregat jämfört med traditionell betong. En användning av större aggregat skulle minska behovet av bearbetning av aggregaten och reducerar koldioxidutsläppen, särskilt om rivningstegel är tillräckligt krossat redan vid rivningsplatsen. Båda studierna av Park et al. (2019) och Fořt & Černý (2020) tyder samtidigt på att återanvändning av materialen kan vara positivt ur ett perspektiv gällande förbrukning av naturresurser. Detta visar på att den miljömässiga aspekten av att använda återvunna aggregat inte är självklar. För även om man tjänar på att välja återvunna aggregat i form av förbrukning av naturresurser med en faktor cirka 20, genereras mer utsläpp i form av koldioxid i studierna råmaterial, transport och tillverkning (Park et al., 2019).

De miljömål som har satts upp om att minska utsläppen av växthusgaser till netto noll till 2045 och att använda mer återvunna material till 2025 går i fallet för användningen av återvunna aggregat mot varandra. För att göra lösningen mer hållbar behöver framställningen av de återvunna aggregaten förbättras ur ett utsläppsperspektiv. Främst när det gäller användningen av tegelaggregat kan det finnas möjlighet att använda aggregaten som krossas redan vid rivningen. På så sätt kan behovet att krossa aggregaten på en annan plats minska. Detta skulle med största sannolikhet leda till att utsläppen av växthusgaser minskar. I detta arbete har aggregat av storleken 37–75 undersökts vilket kan anses vara stora aggregat i jämförelse med andra studier (Figur 4.14 och Figur 4.15). I studier som har presenterats användes tegelaggregat med mindre fraktioner och behöver då gå igenom mer omfattande krossningsprocesser. Men resultatet av detta arbete visar att en tillräcklig hållfasthet kan uppnås samtidigt som en omfattande krossning och bearbetning av aggregaten inte är nödvändig. Vikten av materialet är även något som direkt kan kopplas till mängden utsläpp. Ett lättare material leder till att en mindre vikt behöver transporteras vilket resulterar i ett mindre utsläpp via transporter. Tegel i sig har en mindre vikt jämfört med naturlig ballast vilket visar sig i form av den lägre densitet som tegel har (Burström, 2007).



Figur 4.14 Tegelaggregat med fraktionerna 2–8 och 8–16.



Figur 4.15 Tegelaggregat med fraktionerna 16–22,4 och 22,4–37.

Ur ett miljöperspektiv är det inte positivt att använda tegelaggregat om man vill reducera mängden växthusgaser som släpps ut. Utan den positiva effekten av att använda tegelaggregat är att en mindre mängd naturresurser används. Detta arbete visar dock på att det går att reducera mängden cement och samtidigt klara de krav som ställs på hållfastheten i plattan. Reduceringen av cement är på så sätt den aspekt som minskar utsläppen av växthusgaser jämfört med användningen av tegel. Metoden med att hälla ett bruk över aggregaten har förmodligen även varit positivt för att klara hållfasthetskraven och samtidigt sänka cementnivån. Lv et al. (2020) menar nämligen att denna metod leder till att cementinnehållet kan reduceras med 15–20% samtidigt som hållfastheten bibehålls jämfört med betong som tillverkats enligt traditionell metod.

Produktion av cement har en klimatpåverkan i form av 0,65 kg CO₂ per kilo (Boverket 2022). I tillverkning av en 100 mm tjock platta med måtten 8x12 m, med en betong som innehåller 15% cement leder cementen till ett utsläpp motsvarande 2246 kgCO₂-eq. Detta kan jämföras med en grundläggning enligt metoden testad i detta arbete, med ett av recepten som har ett cementinnehåll på ca 5%. I detta fall reduceras utsläppen som cementinnehållet står för till 749 kgCO₂-eq.

4.6 Vidare studier

Ifall en grund bestående av cementbundet rivningstegel ska kunna utgöra ett lämpligt alternativ till en platta på mark, är armering ett område som skulle behöva undersökas ytterligare. Vid utförande av platta på mark brukar armeringsnät och övriga förstärkningar vid kanter användas för att ta hand om dragspänningar som uppstår. Därför skulle behovet av armering och samverkan mellan cementbundet rivningstegel och armering vara av intresse att undersöka. Det finns även en potential att utnyttja den friktion som finns mellan tegelaggregaten som ett sätt att förbättra förankringen av armeringsstängerna. Utmaningen ligger i att undvika korrosion i armeringen till följd av de risker som användningen av tegelaggregat eventuellt medför.

I vissa av studierna som undersökt tegelaggregat i betong har tester genomförts genom att skapa provkroppar med blötlagt tegel eller genom att tillsätta extra vatten på grund av teglets absorption. Även i detta arbete blötlades teglet innan gjutning av provkropparna, för att förhindra att vatten i bruket inte skulle absorberas av teglet. Därför skulle det vara intressant att undersöka ifall gjutning med torrt tegelaggregat skulle fungera. Det torra teglet skulle möjligtvis kunna absorbera separerat vatten från bruket, samtidigt som det underlättar att inte

behöva blötlägga teglet ur ett praktiskt perspektiv. Problemet med att eventuellt inte blötlägga teglet skulle kunna vara att teglet absorberar en del av cementen och på så sätt blir hållfastheten förmodligen mindre.

Ett intressant användningsområde för återanvändning av tegel är i form av tegelpulver som ersätter cement vid betongblandning. Produktionen av cement är det skedet som står för stora koldioxidutsläpp vid tillverkning av betong. I studien av Ge et al. (2015) har användningen av tegelpulver genomförts. Studien visar på att initial hållfasthet var mindre för blandningar som innehöll tegelpulver. Men efter längre härdningstid var hållfastheten liknande den för vanlig betong. Detta skulle kunna medföra ett alternativ till att reducera mängden cement. Utmaningen ligger i att förbättra härdningstiden för sådan betong för att inte utgöra ett tidshinder vid produktion.

Litteraturstudien belyser problemet med att återanvändning av rivningsmaterial i form av aggregat till betong inte resulterar i minskade koldioxidutsläpp, på grund av bearbetningen som genomförs. Ett område som skulle kunna undersökas vidare är ifall processer vid bearbetningen kan effektiviseras eller uteslutas och hur det påverkar koldioxidutsläppen. Effektiviseringen av processerna skulle även vara positivt ur ett ekonomiskt perspektiv. De ekonomiska fördelarna och nackdelarna bör undersökas för att ett nyanserat förhållningsätt kring metoden ska kunna etableras. Hur kostsamt det är att eventuellt krossa och transportera teglet. Den ekonomiska aspekten är även viktig ur ett tidsperspektiv. Metoden som presenteras i detta arbete är inte etablerad på marknaden och innehåller delar som är tidkrävande. Till exempel utläggning av aggregat och härdningstid.

5 Slutsatser

Syftet med detta arbete var att undersöka ifall en grund bestående av cementbundet rivningstegel med lågt cementinnehåll kan användas som grundläggning av mindre byggnader. Metoden som användes var att ett bruk hälldes över tegelaggregaten.

- Internationella studier visar att en ersättning av den traditionella ballasten med tegel leder till en reducerad tryckhållfasthet. I fallet för cementbundna aggregat, visar studier att cementinnehållet har stor inverkan på hållfastheten.
- Resultatet från denna studie visar att flyttillsatsmedel och filler behöver användas för att göra bruket tillräckligt lättflytande och stabilt, vilket även var fallet för andra studier med liknande tillvägagångsätt.
- Bruket kan göras stabilt och åstadkomma en likvärdig hållfasthet i provkroppen som när ett mer lättflytande bruk används. I ett stabilt bruk förekommer en begränsad separation jämfört med ett mer lättflytande bruk.
- Recepten som tagits fram visar att det förmodligen går att ta fram ett fungerande bruk som rinner ner mellan tegelaggregaten. Tegelaggregaten med fraktionen 37–75 fungerar att använda, vilket stämmer överens med resultat i andra studier. En användning av fraktionen 22,4–37 fungerar inte med de bruken som använts.
- Tryckhållfastheten som uppnås förefaller vara tillräcklig för att klara av de belastningar som en platta på mark utsätts för. Till exempel är den minsta tryckhållfastheten i en av provkroppserierna 2,1 MPa och medelcementinnehållet i serien är cirka 4,5%. Detta ska jämföras med att den karakteristiska nyttiga lasten, den enda last som verkar på stora delar av plattan, är 2 kPa.
- Ett cementinnehåll på 5% leder till en minskning av koldioxidutsläppen med cirka två tredjedelar, jämfört med lösningar som används idag.
- Resultaten visar även att ett cementinnehåll över cirka 7,5% inte är aktuellt att använda eftersom detta inte leder till en ökad tryckhållfasthet när tegelaggregat används.
- Den aspekt som påverkar tryckhållfastheten i serierna mest är hur mycket av bruket som rinner ner till botten i formen. Detta påverkar dock främst när cementinnehållet är runt 7,5% jämfört med cirka 5%.
- Teglets porositet förbättrar betongs isoleringsförmåga. En användning av tegelaggregat kan därför leda till en reducerad energianvändningen i bostaden.
- En nackdel med att använda lite cement samt att hålla bruket över tegelaggregaten är att hållfasthetsutvecklingen är långsam och att metoden inte är tillräckligt etablerad, vilket kan medföra kostnader.
- Krympningen kan reduceras vid användning av tegelaggregat. Krympningen minskar till följd av vatteninnehållet i teglet och att tegelaggregaten placeras i kontakt med varandra.
- Ur ett miljöperspektiv visar studier på att användning av tegelaggregat leder till ett ökat utsläpp av koldioxid till följd av bearbetningen som krävs. Rivningstegel behöver krossas för att kunna användas vilket leder till större utsläpp jämfört med traditionell ballast. En användning av rivningstegtegel leder dock till att mindre naturresurser används, vilket kan ses som en fördel.
- En minskning av cementnivån är den aspekt som bidrar mest till en minskad miljöpåverkan.

Referenser

- Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014). *Vägbyggnad*. Stockholm: Liber.
- Akroyd, T. N.W. (1962). *Concrete – Properties and Manufacture*. Oxford: Pergamon Press.
- ASTM (2015). *ASTM C1403-15 Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*. West Conshohocken: ASTM
- Atyia, M. M., Mahdy, M. G. & Abd Elrahman, M. (2021). Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction & Building Materials*, 304. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124655
- Avfall Sverige (2020). Svensk avfallshantering 2019. Malmö: Avfall Sverige. https://www.avfallsverige.se/fileadmin/user_upload/Publikationer/SAH_2020.pdf
- Awal, A. (1984). *Manufacture and properties of prepacked aggregate concrete*. Masteruppsats, Department of Civil Engineering. University of Melbourne.
- Azba, A. H. & Alnuman, B. S. (2021). Strength and electrical resistivity of recycled concrete made of aggregates from waste bricks. *7th International Engineering Conference Research & Innovation amid Global Pandemic (IEC2021)*. Erbil, Iraq 24–25 februari 2021, ss. 96–100. DOI: 10.1109/IEC52205.2021.9476139
- Boverket (2019). *Boverkets konstruktionsregler EKS 11 (BFS 2011:10)*. Karlskrona: Boverket. <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2019/eks-112.pdf>
- Boverket (2022). Cement, typ CEM II/A-LL 42,5 R. <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/klimatdatabas/klimatdatabas/GetResourceByCategoryID/> [2022-05-12]
- Bruksspecialisten Tegel (u.å.). *Återbrukat fasadtegel*. <https://tegel.bruksspecialisten.se/produkter/aterbrukatfasadtegel/> [2022-05-23]
- Burström, P.-G. (2007). *Byggnadsmaterial: Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. 2. uppl., Lund: Studentlitteratur.
- Cachim, P. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction & Building Materials*, 23(3), ss. 1292-1297. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023
- Carlsson, C.-A. & Tuutti, K. (1993). *Betongteknik*. 4. uppl., Stockholm: Byggtrepreneurerna.
- Ceesay, A. B. & Miyazawa, S. (2019). Strength Development and Durability of Concrete Containing Recycled Roof Tile Aggregate. *Recycled*, 4(3). DOI: 10.3390/recycling4030029
- Coo, M. & Pheeraphan, T. (2016). Effect of sand, fly ash and limestone powder on preplaced aggregate concrete mechanical properties and reinforced beam shear capacity. *Construction & Building Materials*, 120, ss. 581-592. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.128
- Forť, J. & Černý, R. (2020). Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. *Waste management*, 118, ss. 510–520. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.004

Fossilfritt Sverige (2018). Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Bygg- och anläggningssektorn. Stockholm: Statsens offentliga utredningar. https://fossilfritt Sverige.se/wp-content/uploads/2021/10/Fardplan_for_fossilfri_bygg-_och_anlaggningssektor_20181228-1.pdf

Gayarre, F. L., Gonzalés, J. S., Pérez, C. L.-C, Serrano López, M. A., Ros, P. S. & Martínez-Barrera, G. (2019). Shrinkage and creep in structural concrete with recycled brick aggregates. *Construction and Building Materials*, 228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116750

Ge, Z., Wang, Y., Sun, R., Wu, X. & Guan, Y. (2015). Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. *Construction and Building Materials*, 98, ss. 128-136. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100

Horvath, A. (2004). CONSTRUCTION MATERIALS AND THE ENVIRONMENT. *Annual Review of Environment & Resources*, 29(1), ss. 181–204. DOI: 10.1146/annurev.energy.29.062403.102215

Hou, Y., Ji, X., Zou, L., Liu, S. & Su, X. (2016). Performance of cement-stabilised crushed brick aggregates in asphalt pavement base and subbase applications. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), ss. 120-135. DOI: 10.1080/14680629.2015.1064466

Hu, L., Hao, J. & Wang, L. (2014). Laboratory evaluation of cement treated aggregate containing crushed clay brick. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(5), ss. 371-381. DOI: 10.1016/S2095-7564(15)30283-X

Isaksson, T., Mårtensson, A. & Thelandersson, S. (2017). *Byggkonstruktion*. 3. uppl., Lund: Studentlitteratur.

Jia, X., Huang, B. & Ye, F. (2015). Utilization of Construction and Demolition Wastes in Low-Volume Roads for Rural Areas in China. *Transportation Research Record*, 2474, ss. 39–47. DOI: 10.3141/2474-05

Johansson, L. (1994). Ballast. Ljungkrantz, C., Möller, G., Peterson, N. (red.) *Betonghandbok: Material*. 2. uppl., Solna: Svensk Byggtjänst.

Karthik, K. B. & Sathish, H. S. (2019). Experimental Analysis of Partial Replacement of Natural Aggregates with Recycled Concrete Aggregates. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(5), ss. 2012–2020.

Konsumenternas Energimarknadsbyrå (2019). Fjärrvärme - pris och kostnad. <https://www.energimarknadsbyran.se/fjarrvarme/fjarrvarmeavtal-och-kostnader/fjarrvarme-pris-och-kostnad/#:~:text=Fj%C3%A4rrv%C3%A4rmekostnaden%20f%C3%B6r%20ett%20sm%C3%A5hus%20som,12%20000%20kr.> [2022-04-07]

Kurad, R., Silvestre, J. de Brito, J. & Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, ss. 485–502. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.236

- Lim, S. & Zollinger, D.G. (2003). Estimation of the Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Cement-Treated Aggregate Base Materials. *Transportation Research Record*, 1837, ss. 30-38. DOI: 10.3141/1837-04
- Lv, J., Zhou, T. & Li, K. (2020). Development and investigation of a new low-cement-consumption concrete-replaced aggregate concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3). DOI: 10.3390/su12031080
- Meng, T., Lian, S., Ying, K. & Yu, H. (2021). Feasibility study of cement-stabilized materials using 100% mixed recycled aggregates from perspectives of mechanical properties and microstructure. *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), ss. 490–502. DOI: 10.1515/rams-2021-0031
- Miao, Y., Wang, L., Yu, W., Liu, C. & Hou, Y. (2018). Influences of clay brick particles on the performance of cement stabilized recycled aggregate as pavement base. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). DOI: 10.3390/su10103505
- Möller, G. & Petterssons, N. (1994). Hållfasthet. Ljungkrantz, C., Möller, G., Peterson, N. (red.) *Betonghandbok: Material*. 2. uppl., Solna: Svensk Byggtjänst.
- Najjar, M. F., Soliman, A. M. & Nehdi, M. L. (2014). Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications. *Construction and Building Materials*, 62, ss. 47-58. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.021
- Park, W.-J., Kim, T., Roh, S. & Kim, R. (2019). Analysis of life cycle environmental impact of recycled aggregate. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(5). DOI: 10.3390/app9051021
- Petterson, B.-Å. (2013). Tillämpad Byggnadsfysik. 5 uppl., Lund: Studentlitteratur.
- Sandin, S. (2010). Praktisk Byggnadsfysik. 1 uppl., Lund: Studentlitteratur.
- Shafii, F., Ali, Z. A. & Othman, M. Z. (2006). Achieving sustainable construction in the developing countries of Southeast Asia. *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006)*. Malajsien, Kuala Lumpur 5–6 september 2006, ss. 29–44.
- Summerbell, D.L., Barlow, C. Y. & Cullen, J., M. (2016). Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study. *Journal of Cleaner Production*, 135, ss. 1327-1339. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.155
- Sveriges Miljömål (2021). Mer bygg- och rivningsavfall materialåtervinns och förbereds för återanvändning. <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/mer-bygg--och-rivningsavfall-materialatervinns-och-forbereds-for-ateranvandning/> [2022-03-25]
- Swedish Standards Institute (SIS) (2008). *SS-EN 1992-1-1:2005 Eurocode 2 Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. (EN 1992-1-1:2005, IDT). Stockholm: SIS
- Swedish Standards Institute (SIS) (2022). *SS-EN 1996-1-1:2022 Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. (EN 1996-1-1:2022, IDT). Stockholm: SIS

Treloar, J., Hani, G., Love, P. & Nguyen, B. (2003). An analysis of factors influencing waste minimization and use of recycled materials for the construction of residential buildings. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 14(1), ss. 143–145. DOI: 10.1108/14777830310460432

Wadsö, L. (2020). *Construction material science*. Lund: KFS.

Xuan, D., Molenaar, A. A. A. & Houben, L. J. M. (2012). Compressive and Indirect Tensile Strengths of Cement-Treated Mix Granulates with Recycled Masonry and Concrete Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(5), ss. 577–585. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000401

Zhang, S. & Zong, L. (2014). Properties of concrete made with recycled coarse aggregate from waste brick. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(4), ss. 1283–1289. DOI: 10.1002/ep.11880

Zhu, L., & Zhu, Z. (2020). Reuse of Clay Brick Waste in Mortar and Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, ss. 1–11. DOI: 10.1155/2020/6326178

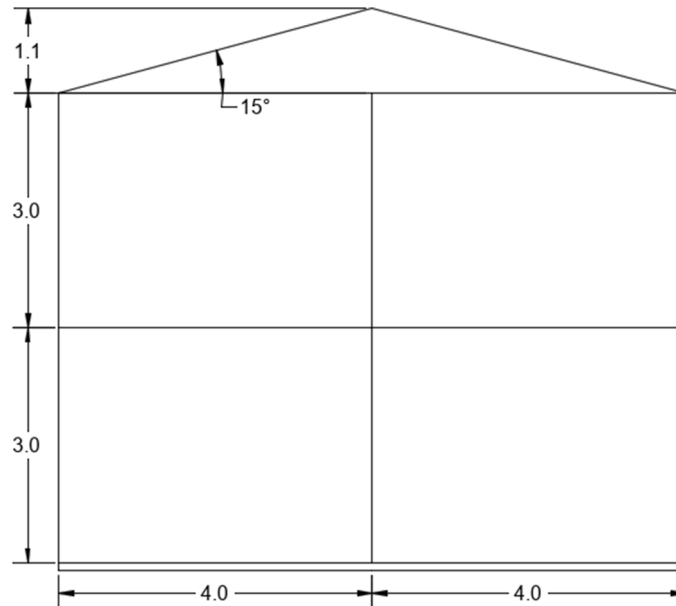
Bilagor

Bilaga 1 – Överslagsräkning	s. I
Bilaga 2 – Teglets vattenabsorption	s. II
Bilaga 3 – Teglets hållfasthet	s. III
Bilaga 4 – Inledande tester	s. IV
Bilaga 5 – Provkropparnas viktandelar och hållfasthet	s. XI

Bilaga 1 – Överslagsräkning

Beräkningarna sker längs tre bärlinjer i huset som vardera anses ha en bredd på 90 mm. Huset är placerat i Lund.

$$\begin{aligned}\text{Snölast} &= 1,0 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Nyttig last} &= 2,0 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Egenvikter och installationer} &= 2,0 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Vindlast} &= 1,0 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$



Vertikal belastning anses ske över influensbredden 4 m för den mittersta bärlinjen.

$$\frac{\left(\frac{1}{\cos(15)} + 2 + 2\right) \cdot 4}{0,09 \cdot 1000} = 0,22 \text{ MPa}$$

Vertikalbelastning till följd av att vindlasten verkar på hela höjden av byggnaden. Beräkningen sker genom momentjämvikt samt utifrån att bärlinjen i mitten F_m belastas två gånger mer än bärlinjen till höger F_h .

$$1 \cdot \frac{7,1^2}{2} - F_m \cdot 4 - F_h \cdot 8 = 0$$

$$8 \cdot F_m = \frac{7,1^2}{2}$$

$$F_m = 3,1 \text{ kN/m}$$

$$F_m = \frac{3,1}{0,07 \cdot 1000} = 0,04 \text{ MPa}$$

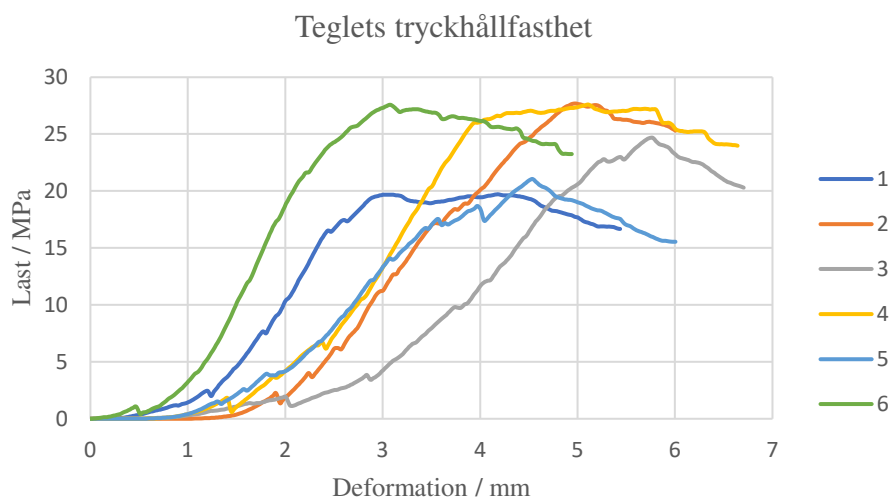
Belastningen läng den mittersta bärlinjen blir: $0,22 + 0,04 = 0,26 \text{ MPa}$

Bilaga 2 – Teglets vattenabsorption

t [min]	Massa [kg]						
	1	2	3	4	5	6	7
0	2228,0	2200,3	2228,0	2224,1	2219,0	2201,6	2292,5
1	2259,5	2239,6	2254,8	2262,9	2259,6	2246,6	2337,9
5	2322,0	2306,3	2319,6	2328,6	2330,5	2314,7	2406,5
10	2372,5	2356,9	2370,6	2379,5	2369,1	2367,1	2456,9
20	2448,9	2429,4	2443,9	2454,7	2438,9	2442,0	2528,0
30	2509,4	2404,9	2499,3	2515,6	2497,4	2499,8	2582,7
60	2583,8	2542,3	2574,1	2576,7	2582,4	2546,5	2657,7
120	2588,2	2545,2	2580,5	2584,5	2580,3	2548,3	2663,7
180	2590,0	2546,4	2581,6	2585,7	2581,5	2549,3	2664,5
240	2589,5	2546,6	2581,8	2585,9	2581,9	2549,5	2664,7
300	2589,9	2547,0	2582,5	2586,7	2582,6	2550,7	2665,8
360	2590,2	2547,2	2582,5	2586,6	2582,6	2551,0	2665,6
1440	2592,7	2550,5	2582,3	2589,5	2582,2	2553,5	2668,9
4320	2228,0	2200,3	2228,0	2224,1	2219,0	2201,6	2292,5

Bilaga 3 – Teglets tryckhållfasthet

Provkropp	Bredd [mm]	Höjd [mm]	Tryckhållfasthet [MPa]
1	106	70	20
2	105	75	28
3	104	75	25
4	105	76	28
5	105	71	21
6	105	71	28
Medel			25

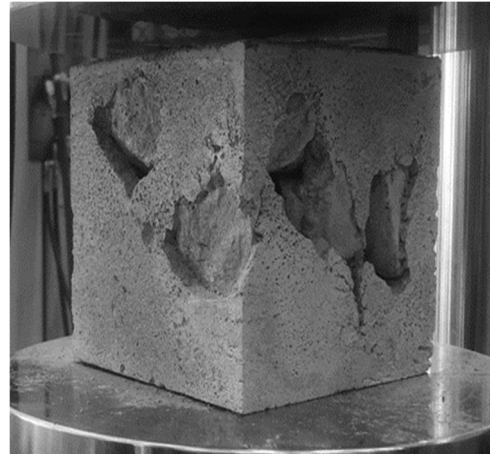
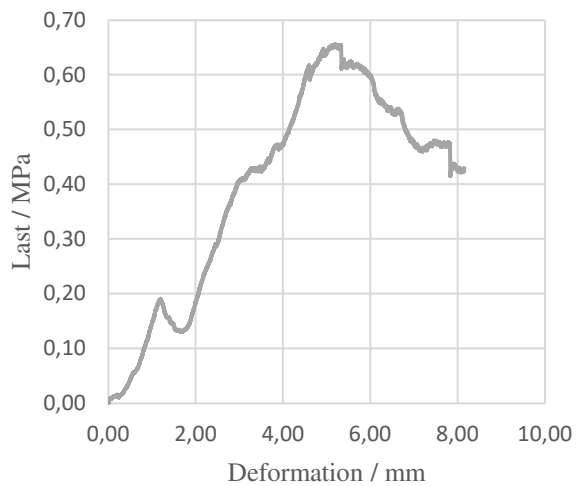


Bilaga 4 – Inledande tester

Provkropp 1

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
4,3%	39%	3,1%	6,8%	0,021%	47%	4,928

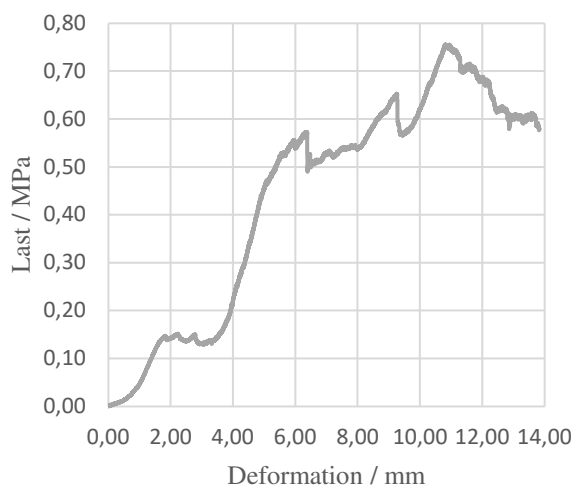
Härdningstid: 8 dagar



Provkropp 2

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
4,3%	39%	3,8%	7,0%	0,027%	46%	4,992

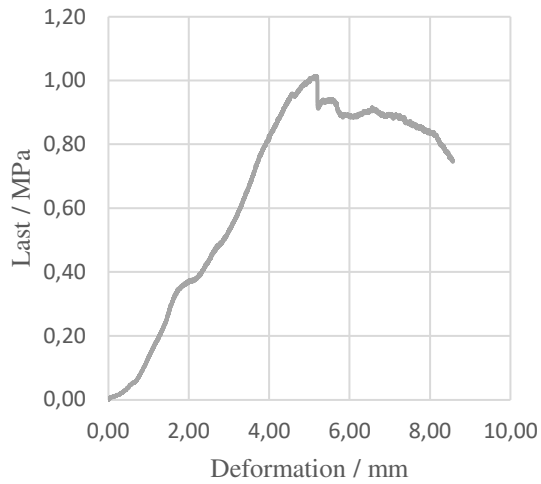
Härdningstid: 8 dagar



Provkropp 3

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
4,5%	41%	5,8%	7,1%	0,029%	42%	5,322

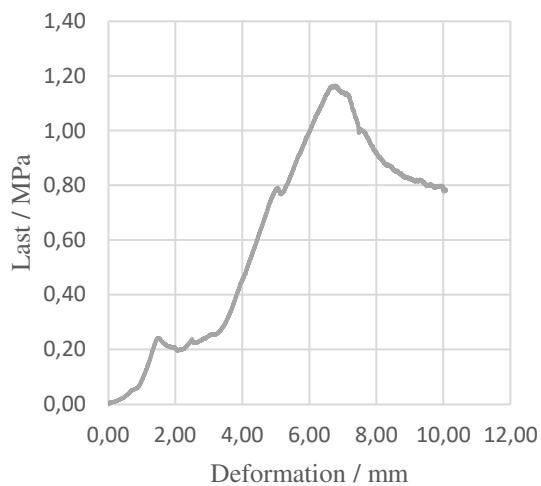
Härningstid: 9 dagar



Provkropp 4

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
4,7%	42%	4,6%	7,1%	0,018%	41%	5,426

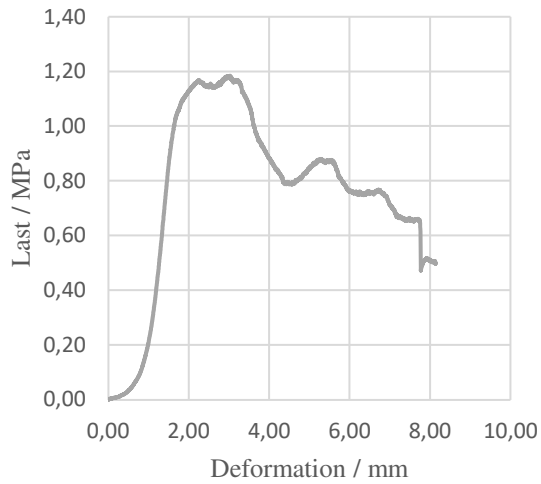
Härningstid: 13 dagar



Provkropp 5

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
4,5%	41%	3,6%	6,8%	0,010%	44%	5,242

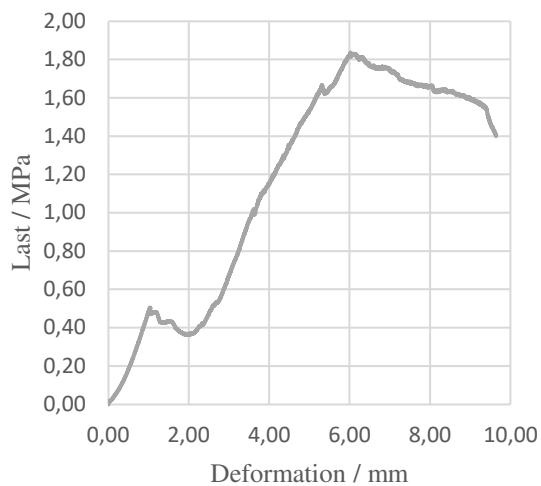
Härningstid: 13 dagar



Provkropp 8

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
4,7%	42%	-	7,7%	-	45%	4,954

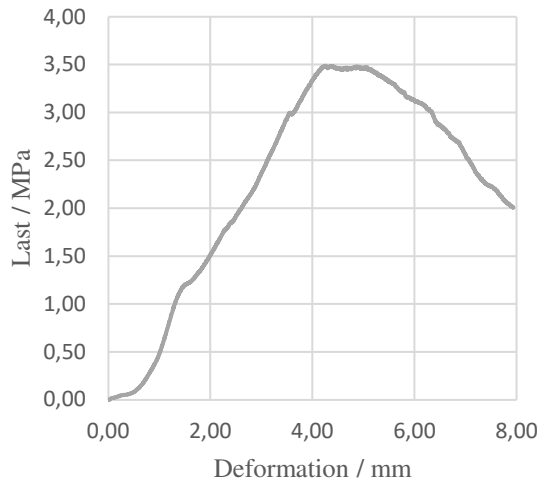
Härningstid: 20 dagar



Provkropp 9

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
7,0%	40%	5,5%	6,8%	0,040%	41%	5,678

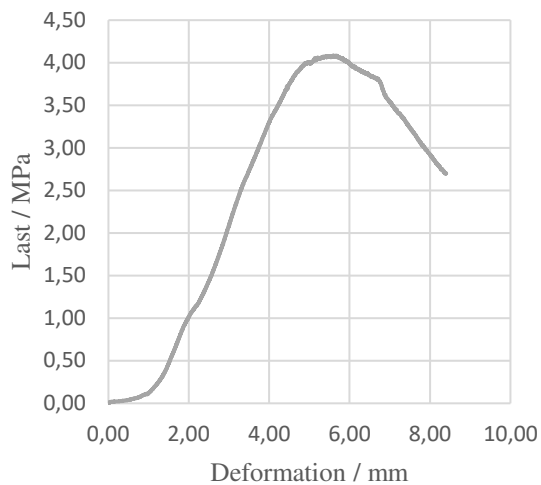
Härningstid: 9 dagar



Provkropp 10

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
7,1%	40%	4,7%	6,9%	0,023%	41%	5,988

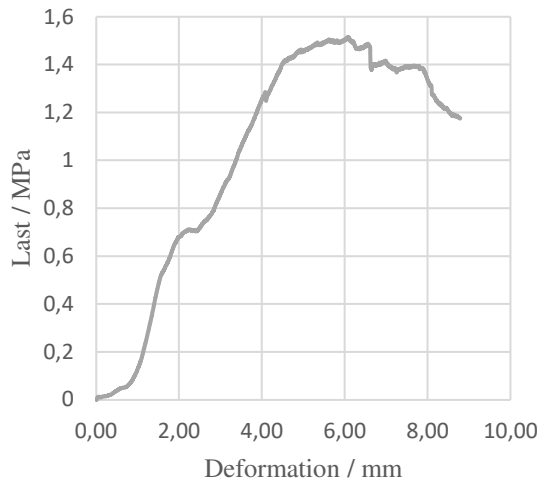
Härningstid: 10 dagar



Provkropp 13

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
7,6%	43%	-	8,2%	-	41%	5,756

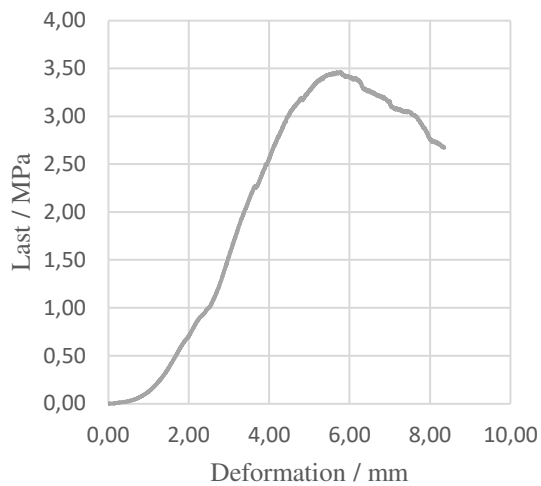
Härningstid: 14 dagar



Provkropp 17

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
8,4%	47%	-	8,3%	-	36%	6,129

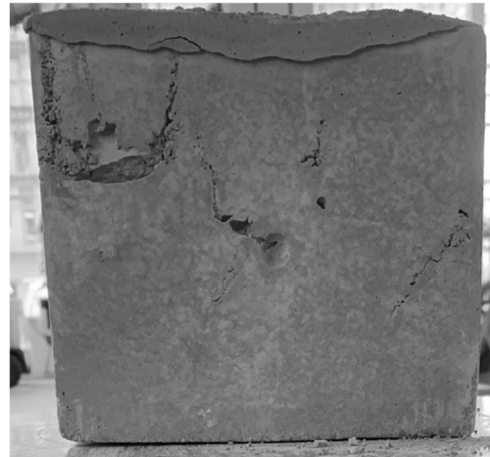
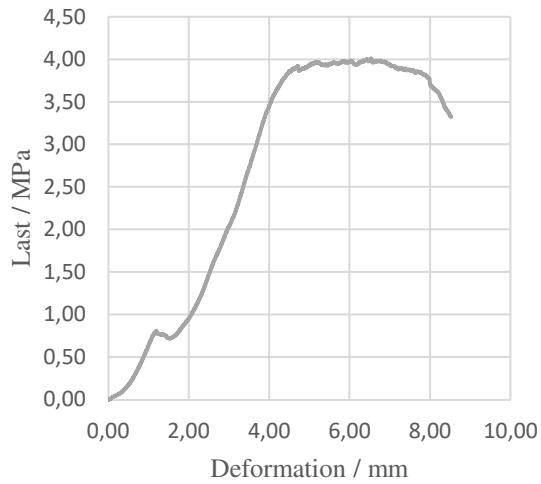
Härningstid: 20 dagar



Provkropp 18

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
7,6%	43%	-	10,7%	-	39%	6,090

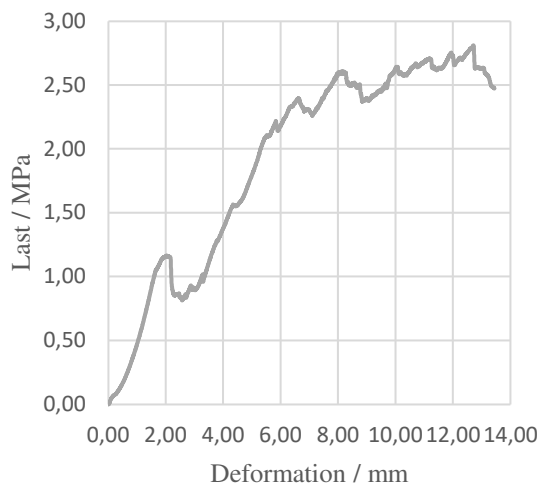
Härningstid: 23 dagar



Provkropp 19

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
10,4%	42%	-	7,9%	-	40%	5,396

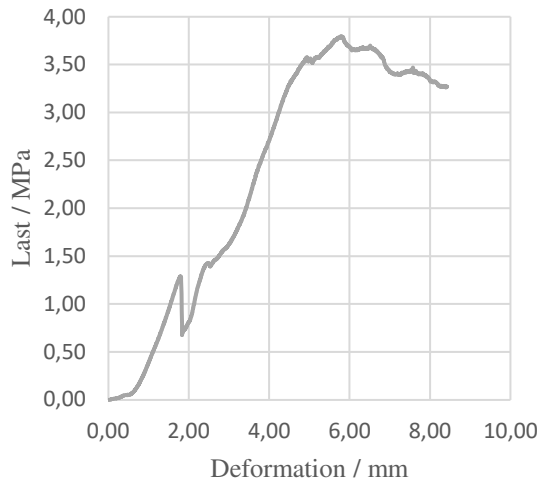
Härningstid: 15 dagar



Provkropp 20

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
10,8%	43%	-	8,7%	-	37%	6,152

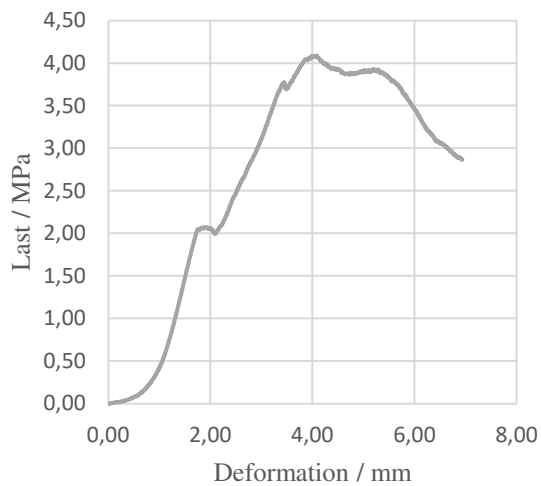
Härningstid 15 dagar



Provkropp 21

Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]
11,4%	51%	-	9,3%	-	29%	6,414

Härningstid: 20 dagar



Bilaga 5 – Provkropparnas viktandelar och hållfasthet

85:15 % stabilt bruk

	Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]	Utfyllnadsgrad
1	7,1%	40,2%	5,5%	9,0%	0,043%	38%	6,401	162%
2	7,2%	40,6%	5,6%	9,1%	0,043%	38%	6,397	167%
3	7,1%	40,4%	5,5%	9,1%	0,043%	38%	6,393	164%
4	7,2%	40,9%	5,6%	9,2%	0,043%	37%	6,393	169%
5	7,2%	40,6%	5,6%	9,1%	0,043%	38%	6,341	166%
6	7,1%	40,3%	5,5%	9,0%	0,043%	38%	6,387	163%
7	7,1%	40,2%	5,5%	9,0%	0,043%	38%	6,401	162%

85:15 % instabilt bruk

	Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]	Utfyllnadsgrad
1	7,1%	40,4%	5,5%	10%	0,040%	37%	6,443	170%
2	7,2%	40,6%	5,6%	10%	0,041%	37%	6,555	172%
3	7,1%	40,3%	5,5%	10%	0,040%	37%	6,381	168%
4	7,2%	40,6%	5,6%	10%	0,041%	37%	6,437	172%
5	7,2%	40,9%	5,6%	10%	0,041%	36%	6,521	176%
6	7,0%	39,9%	5,5%	10%	0,040%	38%	6,403	164%
7	7,1%	40,3%	5,5%	10%	0,040%	37%	6,515	169%

90:10 % stabilt bruk

	Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]	Utfyllnadsgrad
1	4,6%	41,4%	7,2%	9,3%	0,028%	37%	6,465	167%
2	4,6%	41,5%	7,2%	9,3%	0,028%	37%	6,429	168%
3	4,6%	41,3%	7,2%	9,3%	0,028%	38%	6,333	166%
4	4,7%	42,1%	7,4%	9,4%	0,028%	36%	6,475	175%
5	4,7%	41,9%	7,3%	9,4%	0,028%	37%	6,467	173%
6	4,6%	41,3%	7,2%	9,3%	0,028%	38%	6,371	166%
7	4,4%	39,7%	6,9%	8,9%	0,026%	40%	6,185	150%

90:10 % instabilt bruk

	Cement	Sand	Filler	Vatten	Flyttillsatsmedel	Aggregat	Totalt [kg]	Utfyllnadsgrad
1	4,6%	41,1%	7,2%	10%	0,029%	37%	6,489	169%
2	4,5%	40,8%	7,1%	10%	0,029%	38%	6,511	166%
3	4,6%	41,4%	7,2%	10%	0,030%	37%	6,563	173%
4	4,6%	41,1%	7,2%	10%	0,029%	37%	6,503	169%
5	4,5%	40,7%	7,1%	10%	0,029%	38%	6,503	165%
6	4,6%	41,7%	7,3%	10%	0,030%	36%	6,505	176%
7	4,6%	41,3%	7,2%	10%	0,030%	37%	6,591	172%

Provkropp	Tryckhållfasthet vid testning [MPa]			
	85:15S	85:15I	90:10S	90:10I
1	4,3	4,3	3,0	2,9
2	5,6	4,4	2,9	3,5
3	5,6	3,8	2,1	2,5
4	5,0	5,0	3,3	3,1
5	5,9	4,7	3,0	2,5
6	5,1	5,4	3,1	3,2
7	5,8	5,7	3,4	3,1
Medelvärde	5,3	4,8	3,0	3,0
Standardavvikelse	0,59	0,67	0,43	0,38