



CHALMERS



Avfallsglas som alternativ till konventionell ballast i betong

En laborativ undersökning för en hållbar utveckling

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammen kemiteknik och samhällsbyggnadsteknik

CAROLINA FORSBERG, EMICA SRISAWAT,
MAX HJELMQVIST OCH TILDE ARTURÉN

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNAD

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2026

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2026

Avfallsglas som alternativ till konventionell ballast i betong

En laborativ undersökning för en hållbar utveckling

CAROLINA FORSBERG, EMICA SRISAWAT,
MAX HJELMQVIST OCH TILDE ARTURÉN



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Avfallsglas som alternativ till konventionell ballast i betong
En laborativ undersökning för en hållbar utveckling
CAROLINA FORSBERG, EMICA SRISAWAT,
MAX HJELMQVIST OCH TILDE ARTURÉN

Handledare: Bruno Oliveira Gonçalves, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Examinator: Helén Jansson, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Examensarbete 2026
Institutionen för Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Genomskärningar av de tre olika glasbetonger som undersökts inom arbetet.

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2026

Sammanfattning

Denna rapport undersöker möjligheten att ersätta konventionell ballast, såsom sand och krossat berg, med krossat avfallsglas i betong. Studien motiveras av den ökande bristen på naturliga ballastresurser samt behovet av att minska volymerna av glasavfall. Genom laborativa tester utvärderades hur glasballast påverkar betongens arbetbarhet, tryckhållfasthet, värmeledningsförmåga och ångpermeabilitet.

I studien användes krossat förpackningsglas i fraktionerna 4/8 mm och 8/16 mm för att framställa tre olika glasbetonger som jämfördes med en referensbetong. Resultaten visar att glasbetong generellt uppvisar lägre tryckhållfasthet och sämre arbetbarhet än konventionell betong. Samtidigt observerades lägre värmeledningsförmåga, vilket indikerar förbättrade isolerande egenskaper. Fukttransportmätningarna gav osäkra resultat då stationärt tillstånd sannolikt inte uppnåddes.

Studien identifierar även potentiella beständighetsproblem kopplade till alkali-silikareaktioner (ASR), vilket bedöms vara en central utmaning för materialets långsiktiga användning. Ur ett hållbarhetsperspektiv kan användningen av avfallsglas minska uttaget av naturresurser och mängden deponerat glasavfall, men samtidigt används ett material med hög återvinningspotential i en tillämpning där framtida materialåtervinning försvåras.

Sammantaget visar resultaten att krossat avfallsglas har viss potential som alternativ ballast i betong, men att ytterligare forskning krävs kring långsiktig prestanda innan materialet kan användas i större skala.

Nyckelord: Glasbetong, betong, avfallsglas, ballast, hållbarhet, tryckhållfasthet, värmeledningsförmåga, arbetbarhet, alkali-silikareaktion

Abstract

This report investigates the possibility of replacing conventional aggregates, such as sand and crushed rock, with crushed waste glass in concrete. The study is motivated by the increasing scarcity of natural aggregate resources and the need to lower the volumes of waste glass. Through laboratory testing, the influence of glass aggregate on the workability, compressive strength, thermal conductivity, and vapor permeability of concrete was evaluated.

In this study, crushed container glass in the fractions 4/8 mm and 8/16 mm was used to produce three different glass concrete mixtures, which were compared to a reference concrete. The results show that glass concrete generally exhibits lower compressive strength and poorer workability than conventional concrete while lower thermal conductivity was observed, indicating improved insulating properties. The vapor permeability yields an unsteady result since a steady state was likely never achieved.

The study also identifies potential durability issues related to alkali-silica reactions (ASR), which is considered a major challenge for the long-term use of the material. From a sustainability perspective, the use of waste glass can reduce the extraction of natural resources and the amount of glass sent to landfills. However, it simultaneously limits the possibility of future high-quality recycling of the glass.

Overall, the results indicate that crushed waste glass has potential as an alternative aggregate in concrete, but that further research regarding durability and long-term performance is required before the material can be applied on a larger scale.

Keywords: Glasscrete, concrete, waste glass, aggregate, sustainability, compressive strength, thermal conductivity, workability, alkali-silica reaction

Förord

Detta arbete har varit möjligt tack vare stöd och hjälp från flera personer och organisationer som vi vill rikta ett stort tack till.

Vi vill tacka vår handledare Bruno Oliveira Gonçalves för stödet i det laborativa arbetet samt hans engagerade inställning till projektet. Vi vill även tacka Agnes Nagy för att hon tog sig tid att berätta om sin forskning vid Högskolan i Borås och för att hon bidrog med värdefull kunskap kring glasbetong. Ett stort tack riktas även till Bijan Adl Zarrabi för vägledning genom hela TPS-mätningprocessen samt till Anna Martinelli som delade med sig av värdefulla och användbara artiklar samt föreläsningar.

Vidare vill vi tacka Stena Recycling och Thomas Betong för möjligheten att besöka deras verksamheter och få en inblick i hur industrin arbetar i praktiken. Vi vill rikta ett extra tack till Stena Recycling för att de tillhandahöll material till arbetet vilket gjorde studien möjlig att genomföra.

Slutligen vill vi rikta ett särskilt stort tack till vår examinator Helén Jansson för hennes stöd, vägledning och positiva energi som gjorde arbetet både roligare och lättare att genomföra.

Göteborg, 2026

Akronymer och kemiska beteckningar

Akronymer

ASR	Alkali-silikareaktion
TPS	Transient Plane Source
<i>vct</i>	Vattencementtal

Kemiska beteckningar

CaCO_3	Kalksten
CaO	Kalciumoxid
CSH	Kalciumsilikathydrat
C_2S	Dikalciumsilikat
C_3S	Trikalciumsilikat
Ca(OH)_2	Kalciumhydroxid
SiO_2	Kiseloxid
MgO	Magnesiumoxid
Na_2O	Natriumoxid

Innehåll

Akronymer och kemiska beteckningar	vii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Ballastutvinning och hållbarhet	1
1.1.2 Glasåtervinning och dess begränsningar	2
1.2 Syfte och frågeställningar	3
1.3 Avgränsningar	4
1.4 Användning av AI	4
2 Material	5
2.1 Betong	5
2.1.1 Sammansättning och hydratisering	5
2.1.2 Färsk betong	6
2.1.3 Mekaniska egenskaper	7
2.1.4 Termiska egenskaper	7
2.1.5 Fukt i betong	7
2.2 Konventionell ballast	8
2.2.1 Definitioner	8
2.2.2 Ballastens inverkan på betongens egenskaper	9
2.3 Glas	9
2.3.1 Vanliga glastyper	9
2.4 Glas som ballast	10
2.4.1 Generella egenskaper	10
2.4.2 Alkali-silikareaktion	10
3 Metod	12
3.1 Materialberedning av avfallsglas	12
3.2 Betongproportionering och gjutning	13
3.3 Provningsmetoder	14
3.3.1 Arbetbarhet	14
3.3.2 Tryckhållfasthet	15
3.3.3 Transient Plane Source (TPS)	16
3.3.4 Koppmetoden	17
4 Resultat	20
4.1 Arbetbarhet	20

4.2	Tryckhållfasthet	20
4.3	Värmekonduktivitet och specifik värmekapacitet	22
4.4	Ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd	23
5	Diskussion	25
5.1	Tolkning av resultat	25
5.1.1	Tryckhållfasthet	25
5.1.2	Termiska egenskaper	26
5.1.3	Fukttransport	27
5.2	Glasets kornform som avgörande faktor	28
5.2.1	Kornformens inverkan på arbetbarhet	29
5.2.2	Kornformens inverkan på tryckhållfasthet	30
5.3	Materialets beständighet över tid	30
5.4	Hållbarhetsaspekter	31
5.4.1	Resursanvändning och materialvärde i glasbetong	31
5.4.2	Minskad trafikbelastning	32
5.5	Felkällor	32
5.6	Framtida forskning	33
6	Slutsats	35
	Litteratur	37
	Appendix	I
A	Provresultat tryckhållfasthet	I
A.1	Provresultat tryckhållfasthet	I
B	Beräkningar värmekonduktivitet	II
B.1	Omräkning för sanddensitet (M1:5)	II
B.2	Värmekonduktivitet G1	III
B.3	Värmekonduktivitet G2	IV
B.4	Värmekonduktivitet G3	V
B.5	Provresultat värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet	VI
C	Beräkningar fukttransport	VII
C.1	Indata för koppmetoden	VII
C.2	Fukttransport referensbetong	VIII
C.3	Fukttransport G1	XI
C.4	Fukttransport G2	XIV
C.5	Fukttransport G3	XVII
D	Produktblad	XX

1

Inledning

Betong är en fundamental del av det moderna samhället och ballast, i form av sand, grus och krossat berg, är den volymmässigt dominerande beståndsdel i betong [1]. Globalt utvinns uppemot 40–50 miljarder ton ballast varje år [2], vilket gör det till den näst mest utvunna resursen i världen, endast överträffad av vatten. Eftersom utvinningen redan på många håll överstiger den naturliga återbildningstakten väcker nuvarande förbrukning frågor om långsiktig resursförvaltning och hållbar försörjning. Parallellt genereras globalt stora volymer glasavfall vars återvinningsgrad endast når upp till omkring 21% [3]. Krossat avfallsglas utgör därmed ett potentiellt substitut för konventionell ballast i betong, med möjlighet att samtidigt minska trycket på naturresurser och volymen avfall som hamnar på deponi. Eftersom betong ofta används i konstruktioner med höga krav på säkerhet och beständighet är det emellertid nödvändigt att noggrant utreda tekniska utmaningar som glasbetong kan medföra, för att säkerställa materialets hållbarhet och prestanda.

1.1 Bakgrund

Följande kapitel beskriver de samhällliga och miljömässiga utmaningarna som motiverar arbetet. Inledningsvis behandlas hållbarhetsaspekter kopplade till den globala ballastutvinningen följt av en redogörelse för begränsningar inom glasåtervinning.

1.1.1 Ballastutvinning och hållbarhet

Trots en redan ansträngd resurssituation bedöms den globala efterfrågan på ballast öka ytterligare i takt med befolkningsökning, urbanisering och ekonomisk tillväxt [2]. Problematiken är dock komplex eftersom bristen på tillförlitlig statistik i många länder utgör ett hinder för miljökonsekvensbedömningar på systemnivå. Följande avsnitt behandlar därför de övergripande hållbarhetsaspekterna av ballastutvinning snarare än att ge en fullständig redogörelse.

Historiskt har naturgrus använts som ballast i Sverige, men tillgången har successivt minskat och betongtillverkningen har övergått till att använda krossat berg som ballastmaterial [4]. Omställningen är ett resultat av skärpta styrmedel, däribland begränsad tillståndsgivning för uttag och en höjd naturgrusskatt. Trots detta förblir naturgrus en viktig råvara inom byggnadsindustrin då de fina fraktionerna ännu saknar ett fullgott substitut. Vidare utgör Sveriges ballastproduktion ett undantag

ur ett globalt perspektiv. I stora delar av världen kvarstår ett starkt beroende av naturlig ballast från främst floder och kustmiljöer [5].

Ballastutvinning är förknippad med en omfattande men samtidigt varierande miljöpåverkan beroende på utvinningsmetod och geografiskt sammanhang. Vad gäller klimatpåverkan står ballast för omkring 15% av betongens totala koldioxidutsläpp, primärt kopplat till materialtransporter och energiförbrukning vid utvinning [6]. I Stockholms län uppskattas idag var fjärde lastbil vara en ballasttransport och i takt med att täkter placeras allt längre ifrån byggplatser förväntas transportsträckorna öka betydligt [4]. Det bör vidare noteras att hela livscykeln för krossat berg kräver nästan tre gånger så mycket energi som för naturgrus [7], vilket innebär att en ökad användning av bergkross riskerar att öka utsläppen trots att det i övrigt anses vara ett mer hållbart alternativ till en ändlig resurs.

Utvinning av krossat berg i dagbrott medför bestående landskapsförändringar, förlust av vegetation samt ökad instabilitet [8]. Utvinning av naturgrus i floder leder till erosionsprocesser som gradvis fördjupar och destabiliserar kanaler, med risk för kollaps av flodbankar och skador på viktig infrastruktur. Ingrepp i vattenmiljöer frigör dessutom sediment vilket reducerar ljusinsläppet och hämmar fotosyntesen, något som bland annat dokumenterats i indiska floder där en okontrollerad utvinning utgör ett allvarligt hot mot inhemska fiskarters överlevnad till följd av försämrade livsmiljöer [9].

Ballastutvinning berör även sociala och ekonomiska aspekter. Globalt hotar okontrollerad utvinning försörjningsmöjligheter och skapar intressekonflikter om land och naturresurser [9]. Illegal utvinning, driven av en kombination av hög global efterfrågan och bristande reglering, har i vissa regioner utvecklats till organiserad brottslighet med allvarliga säkerhetsrisker för lokalbefolkning och aktivister [2]. I ett svenskt sammanhang handlar problematiken snarare om transportkostnader och regional planering. Eftersom ballast är en tung bulkvara med lågt enhetspris kan täkter i regel bara leverera material inom 50 kilometers avstånd [4], vilket gör materialförsörjning till en strategisk samhällsfråga.

1.1.2 Glasåtervinning och dess begränsningar

Den globala glasproduktionen uppskattas uppgå till cirka 130 miljoner ton per år, varav den Europeiska unionen står för omkring 40 miljoner ton [10]. I glasproduktion används en stor mängd sand vilket är en ändlig resurs [11], och på samma sätt som för ballastutvinning kan även glasproduktion vara skadligt för ekosystemet på grund av dess stora behov av sand utvunnet ifrån naturgrus.

Glasåtervinning är ett väl studerat område som drivs av den potentiella energibesparingen som kan erhållas. Vidare finns en stor potential att minska påverkan på ekosystem genom att reducera utvinningen av naturresurser. Uppskattningsvis leder glasproduktion från återvunnet glas till en minskning av luftföroreningar med cirka 20% och vattenföroreningar med cirka 50% [11].

Trots att det finns en allmän uppfattning om att glas är ett fullt återvinningsbart material, uppgår den globala återvinningsgraden till endast cirka 21% av allt producerat glas [3]. Av detta står förpackningsglas för den största andelen som återvinns med 32%, följt av planglas med 11%, se skillnad mellan olika glastyper i kapitel 2.3.1.

Orsakerna till den låga återvinningsgraden varierar mellan olika regioner. Inom EU uppskattas en betydande andel av förpackningsglaset ingå i ett cirkulärt flöde, med en återvinningsgrad på omkring 76% [12]. Samtidigt finns stora variationer mellan EU-länderna i hur mycket glas som återvinns, vilket huvudsakligen kan förklaras av ekonomiska skillnader, variationer i infrastruktur samt skillnad i miljölagstiftning. Exempelvis uppvisar länder som Sverige, Belgien och Slovenien återvinningsgrader på över 95%, medan länder som Cypern och Grekland återvinner mindre än 50% av sitt glas.

I länder som USA uppskattas återvinningsgraden för glas ligga kring 31%, där en stor del av de glasförpackningar som inte återvinns istället hamnar på deponi [3]. En bidragande faktor till den lägre återvinningsgraden jämfört med EU är landets stora geografiska yta samt bristande konsumentmedvetenhet. Samtidigt varierar återvinningsgraden mellan olika delstater beroende på lokala system och styrmedel. Även i Kina har återvinningsproblematik då endast omkring 20% av glasförpackningarna återvinns, vilket till stor del beror på att deponering länge har varit den dominerande metoden för avfallshantering. Precis som i USA varierar återvinningsgraden mellan olika regioner beroende på lokala förutsättningar och avfallssystem.

Det finns även flera processutmaningar och kemiska utmaningar som måste beaktas för att uppnå en hög glasåtervinningsgrad. Glasprodukter med hög grad av kontaminering från andra material, såsom elektroniska skärmar, speglar, solpaneler och laboratorieavfall, saknar i dagsläget välutvecklade och stabila cirkulära återvinningssystem [3].

Slutligen råder det även brist på teknisk förståelse kring hur återvinningsanläggningar bör utformas och optimeras för att hantera flera olika glastyper inom samma process. Effektiv materialåtervinning ställer höga krav på avancerade separationsprocesser samt omfattande teknisk kompetens.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med arbetet är att undersöka möjligheten att ersätta konventionell ballast av grus och krossat berg i betong med avfallsglas. Genom laborativa tester utvärderas glasbetongens egenskaper i förhållande till en referensbetong, med fokus på arbetbarhet, tryckhållfasthet, ångpermeabilitet och värmeledningsförmåga. Arbetet söker därigenom svar på följande frågeställningar:

- Hur påverkar substitution av konventionell ballast med krossat avfallsglas betongens materialegenskaper?
- Vilken kornstorlek och kornstorleksfördelning av glas ger bäst resultat i förhållande till referensbetongen?
- Vilka hållbarhets- och miljömässiga konsekvenser medför användningen av avfallsglas som ballast?

1.3 Avgränsningar

Arbetet omfattar enbart återanvänt förpackningsglas som substitut för ballastfraktionerna 4/8 och 8/16 mm. De finaste glasfraktionerna, 0/4 mm, testas inte då hantering av finfördelat glas utgör en arbetsmiljörisk. För att isolera glasets påverkan på betongens egenskaper och minska antalet variabler så används inga tillsatsmedel, tillsatsmaterial eller andra materialmodifieringar. Mekaniska egenskaper som böjhållfasthet och draghållfasthet inkluderas inte. Antalet testade kompositioner begränsas av projektets tidsram och tillgängligt material. Alkali-silikareaktion, en kemisk reaktion som kan försvaga betongen, beaktas utifrån befintlig litteratur och diskuteras i relation till resultaten, men undersöks inte experimentellt.

1.4 Användning av AI

I detta arbete har AI-baserade verktyg använts som stöd vid datahantering, generering av LaTeX-kod för tabeller och figurer samt vid språkgranskning, textbearbetning och för identifiering av potentiellt relevanta källor inom området. De AI-modeller som använts inkluderar MATLAB Copilot, Scopus AI, NotebookLM, ChatGPT samt Claude. Samtliga verktyg har använts med ett kritiskt förhållningssätt, och allt innehåll i rapporten har granskats, verifierats och bearbetats av rapportens författare.

2

Material

I detta avsnittet beskrivs de material som ingår i arbetet: betong, konventionell ballast, glas samt glas som ballast. Egenskaper och sammansättning presenteras med fokus på de aspekter som är relevanta för det laborativa arbetet samt efterföljande diskussion.

2.1 Betong

Betong är ett av världens mest använda byggnadsmaterial och används bland annat vid tillverkning av konstruktionselement så som broar, tunnlar, fundament och bostäder. Betong består av cement, vatten och ballast [1]. I detta arbete användes portlandcement och därför avgränsas följande avsnitt till denna cementtyp.

2.1.1 Sammansättning och hydratisering

Portlandcement är ett hydrauliskt bindemedel vars främsta råvara är kalksten (CaCO_3). I tillverkningen bränns kalksten i höga temperaturer vilket leder till att koldioxid avges och kalciumoxid (CaO), bränd kalksten, bildas [13]. I denna process bildas även klinkermineraller, varav de vanligaste är trikalciumsilikat (C_3S) samt dikalciumsilikat (C_2S). I slutskedet av cementtillverkningen tillsätts gips vilket reglerar bindningstiden genom att sakta ner den och förhindra att betongen härdar för snabbt.

När cementet blandas med vatten initieras hydratiseringen, vilket gör att cementpastan hårdnar och omsluter ballasten [13]. I den initiala reaktionen bidrar främst C_3S och C_2S vilka bildar kalciumsilikathydrat (CSH), ett cementgel som binder samman materialet. Dessa klinkermineraller har stor inverkan på utvecklingen av hållfastheten, där C_3S främst bidrar till den tidiga hållfastheten medan C_2S främst bidrar till den långsiktiga hållfastheten.

Cementgelen är porös runt cementkornen och innehåller kemiskt bundet vatten. I takt med att reaktionen mellan vatten och cement fortgår minskar porerna mellan cementkornen, och hålrummen fylls med cementgel [13]. De cementpartiklar som reagerat binds därmed samman och betongen hårdnar. Mängden porer i materialet kan regleras med hjälp av vattencementtal, *vct*. Vattencementtalet definieras som förhållandet mellan vattenmängden (W) och cementmängden (C) enligt ekvation 2.1.

$$vct = \frac{W}{C} \quad (2.1)$$

Ett högt vct innebär att det finns ett överskott av vatten för hydratiseringen, vilket på sikt avdunstar efter att betongen hydratiserat och lämnar då kapillärporer efter sig [13]. Detta leder till en ökad porbildning och högre permeabilitet vilket i sin tur ger en lägre hållfasthet och sämre beständighet. Har betongen i stället ett lågt vct utgörs befintliga porer främst av gelporer, vilka är mindre än kapillärporerna. Vid lågt vct ges en tätare struktur på grund av gelporerna, vilket leder till låg permeabilitet och högre hållfasthet.

Vid gränsen mellan ballast och cementpasta bildas en fasgräns, en så kallad övergångszon [13]. Denna zon utgör den mekaniskt svagaste delen av betongen, vilket innebär att hållfastheten ofta är lägre här. Övergångszonen kännetecknas av en högre porositet och en grövre porstruktur jämfört med den omgivande cementpastan. Detta beror på flera faktorer, bland annat ett lokalt högre effektivt vct nära ballastytan, vidhäftning mellan cement och ballast, utfällning av större kristaller som kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) orienterade parallellt med ballastytan samt att det blir svårare för cementkornen att packas tätt i detta område. Som en följd av detta bildas en lägre koncentration av den täta cementgelen i övergångszonen. Genom att använda ett lågt vct , finmalda bindemedel samt tillsatsmaterial som silikastoft kan porositeten i övergångszonen minskas, vilket förbättrar betongens egenskaper.

Reaktionshastigheten i betong är som störst under de första dyggen och avtar sedan. Hållfastheten i betong ökar snabbt från gjutningstillfället och fram till cirka 28 dagar [1]. Detta beror på att reaktionshastigheten är som högst under de första dyggen, då hållfastheten ökar snabbast. I takt med att kapillärporerna blir mindre, som en konsekvens av att gelstrukturen runt cementkärnorna blir tätare, avtar hållfasthetstillväxten. Efter cirka 28 dagar fortsätter härdningsprocessen, men i en långsammare takt, och kan fortgå upp till omkring 90 dagar.

2.1.2 Färsk betong

Betong är i färskt tillstånd ett formbart material vars egenskaper har stor betydelse för den hårdnade betongens kvalitet, då en otillräcklig komprimering eller felaktig hantering under gjutning kan leda till ökad porositet och en försämrad hållfasthet [13]. För att skapa en välkomprimerad och homogen betong krävs en god arbetbarhet. Arbetbarheten är även en viktig egenskap för att betongen ska kunna fraktas och placeras rätt i gjutformar genom exempelvis slangpumpning. Arbetbarhet är ett brett begrepp som innefattar flertalet egenskaper, bland annat konsistensmätning. De faktorer som har störst inverkan på konsistensen är vattenhalten, men även ballastens gradering och kornform, finmaterialhalt i ballasten, tillsatsmaterial och tillsatsmedel. Ballastens påverkan på arbetbarheten kommer vidare att beskrivas i kapitel 2.2 samt 2.4.

2.1.3 Mekaniska egenskaper

Mekaniska egenskaper beskriver hur ett material reagerar vid mekanisk belastning i olika riktningar. Exempel på vanliga mekaniska egenskaper är hållfasthet, elasticitetsmodul, hårdhet och duktilitet [14]. Betongens främsta styrka är dess tryckhållfasthet och begreppet beskriver ett materials förmåga att motstå tryckkrafter utan att deformeras [1]. Som tidigare nämnt är den mest avgörande faktorn för betongens tryckhållfasthet *vct*, men även fasgränserna har betydelse för tryckhållfastheten. Betongens faktiska tryckhållfasthet anges i kub/cylinderhållfasthet och ges av trycktester av kuber eller cylindrar som ska gjutas enligt standard SS-EN 12390-1 [15]. Cylinderhållfastheten uppgår till 80-85% av kubhållfastheten.

2.1.4 Termiska egenskaper

För att bibehålla en bekväm termisk komfort i en byggnad krävs isolerande material som möjliggör att den tillförda värmen inomhus ej transporteras ut direkt. Transporten av värme i ett material sker genom två olika mekanismer: konvektion och ledning [1]. Konvektion innebär att värmen transporteras mellan områden med olika temperaturer med hjälp av ett strömmande medium, såsom luft. Värmeöverföring genom ledning sker då molekyler med högre kinetisk energi stöter i molekyler med lägre kinetisk energi, vilket ger upphov till en energiöverföring. Dessa två mekanismer är det som räknas till värmeledning.

Benägenheten att leda och transportera värme kallas värmeledningsförmåga [1]. Betong är som många andra byggnadsmaterial ett poröst material, denna egenskap är särskilt gynnsam vad gäller värmeledning. Värmeledningsförmågan hos ett poröst material är beroende av det volymetriska förhållandet mellan luften i porerna och fast material.

2.1.5 Fukt i betong

Fukt är ett ständigt problem vid byggnationer vad gäller betongens beständighet [1]. Fukttransport genom material sker på två sätt: konvektion och diffusion, där diffusion är den mest bidragande faktorn antaget att betongen inte är sprucken. Diffusionen sker när vattenmolekylerna förflyttar sig från områden med högre koncentration till områden med lägre koncentration för att uppnå jämvikt. Betongens förmåga att motstå denna förflyttning kallas fuktmotstånd. Måttet på flödet av fukt för ett specifikt material kallas för fukttransportkoefficient och den varierar med den omgivande luftens relativa fuktighet. De faktorer som har störst inverkan på fukttransportkoefficienten är struktur, porositet och hygroskopicitet. Hygroskopicitet är ett materials förmåga att absorbera vattenmolekyler från omgivande luft.

Permeabilitet, även kallat genomsläpplighet, är materialets förmåga att släppa igenom en vätska eller gas under tryck [1]. Måttet på hur stort flödet av vätskan eller gasen är ges av dess permeabilitetskoefficient. Permeabilitetskoefficienten beror till största del av cementpastan då ballasten anses vara icke permeabel.

2.2 Konventionell ballast

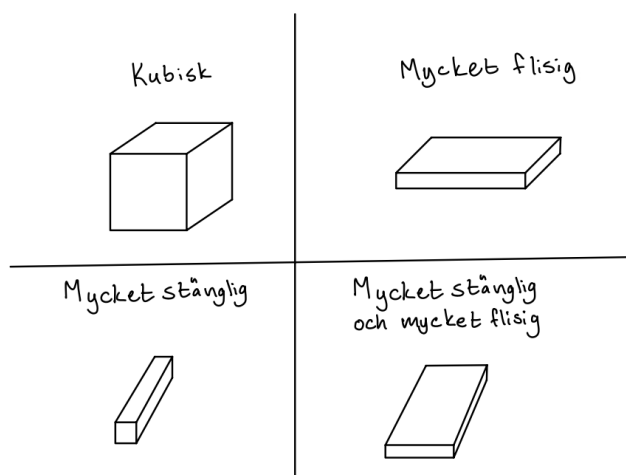
Konventionell ballast är ett av de primära materialen i betong och dess egenskaper påverkar betongen i både färskt och hårdnat tillstånd. Nedan definieras relevanta begrepp samt ballastens inverkan på betongens materialegenskaper.

2.2.1 Definitioner

SS-EN 12620+A1 definierar ballast som ”kornformigt material som används till byggande” och specificerar att materialet kan vara naturligt, industriellt framställt eller återvunnet [16]. I detta arbete används termen konventionell ballast för att beteckna ballast tillverkad av naturgrus, sand eller krossat berg. Begreppet används för att underlätta distinktionen gentemot alternativa ballastmaterial, däribland glas som ballast.

Ballast klassificeras utifrån kornstorlek, där sorteringen anges med en undre (d) och övre (D) kornstorleksgräns i mm [16]. Fraktionen för en viss ballastsortering uttrycks som d/D , exempelvis 8/16 där minsta kornstorlek är 8 mm och största är 16 mm. En grundläggande uppdelning görs enligt SS-EN 12620+A1 mellan fin ballast ($D \leq 4$) och grov ballast ($D \geq 4$ och $d \leq 4$).

Ballastkornens geometri beskrivs med hjälp av kubicitet, kantighet och ytstruktur [13]. Kubiciteten beskriver förhållandet mellan kornets längd, bredd och tjocklek där ett kubiskt korn har samma mått i alla riktningar, medan ett flisigt eller stängligt korn är platt respektive avlångt, se Figur 2.1. Kantigheten anger hur skarpa eller runda ballastkornen är och ytstrukturen beskriver kornytans råhet.



Figur 2.1: Illustration över ballastkornens kubicitet, från kubisk form till mycket flisig, mycket stänglig eller en kombination av båda.

2.2.2 Ballastens inverkan på betongens egenskaper

Ballasten utgör normalt cirka 65–75% av betongens totala volym och dess egenskaper har därmed en stor inverkan på betongens sammansättning och prestanda [1].

Ballastens kornform och kornstorleksfördelning är inledningsvis betydande för den färska betongens arbetbarhet. Runda och släta korn ger generellt bättre arbetbarhet och samtidigt ett lägre vattenbehov, medan kantiga och flisiga korn ökar den inre friktionen och hindrar den färska betongens rörlighet [13]. Fördelningen av de olika kornstorlekarna påverkar också arbetbarheten, där en stor andel grov ballast samt en kontinuerlig kornstorleksfördelning ger bättre packning och lägre hålrumsvolym. Alltför hög andel finmaterial ger däremot en försämrad arbetbarhet.

Vad gäller betongens hållfasthet är det inte ballastkornens egen hållfasthet som är avgörande, utan vidhäftningen mellan cement och ballast i fasgränsen [13]. Kornformen spelar här en central roll då en skrovlig yta ger bättre vidhäftning, medan en slät yta resulterar i en svagare fasgräns och ökad risk för sprickbildning [17]. Flisiga och stängliga korn ger en sämre packning och större hålrumsvolym, vilket leder till ett tjockare skikt av cementpasta kring kornen som i sin tur riskerar att försvaga fasgränsen och försämma hållfastheten. Utöver fasgränsens kvalitet kan kornformen påverka hållfastheten genom mekaniska låsningseffekter, där kantiga och oregelbundna ballastkorn hakar i varandra och bidrar till en stabilare inre struktur.

2.3 Glas

Glas är ett kiseloxidrikt material som bildas genom att en smälta kyls ned utan att kristallisera [3]. Materialet används inom ett stort antal områden, bland annat i förpackningar, byggnader och tekniska produkter. Tack vare glasets höga hårdhet, kemiska beständighet och tillgänglighet som avfallsmaterial har det blivit intressant att undersöka som ett alternativ till konventionell ballast i betong.

2.3.1 Vanliga glastyper

Den mest producerade glastypen är förpackningsglas som används till bland annat flaskor och enklare glasprodukter, vilket står för 48% av den globala glasproduktionen. Därefter följer planglas som står för en produktion på 42% och används huvudsakligen till fönster, byggnader och bilrutor. Servisglas står för 5% av produktionen vilket innefattar bland annat köksprodukter och laboratorietrustning. Resterande glastyper är ofta specialglas såsom skärmar, säkerhetsglas och optiska glas som linser och kameror.

Den vanligaste typen av förpackningsglas är sodalimesilikatglas, vilket typiskt baseras på en sammansättning bestående av cirka 15% natriumoxid (Na_2O), 9% kalciumoxid (CaO) och resterande andel kiseldioxid (SiO_2) [10]. Skillnader i sammansättning mellan olika typer av sodalimesilikatglas är generellt små och relaterar främst till färgvariationer. Sodalimesilikatglas är i grunden transparent men

metallföreningar kan bidra till förlust i den optiska klarheten. Grönt glas erhåller sin färg genom tillsats av krom, medan brunt glas färgas genom kombinationer av krom och järn.

Planglas skiljer sig från förpackningsglas genom att det innehåller tillsatser av magnesiumoxid (MgO) [10]. Magnesiumoxid tillsätts för att förbättra glasets kemiska beständighet och mekaniska stabilitet. Vidare bidrar MgO till att reglera smältans viskositet under tillverkningsprocessen, vilket i sin tur leder till förbättrad produktkvalitet samt minskad risk för oönskad kristallisering. I likhet med transparent förpackningsglas kräver planglas mycket låga halter av metalliska komponenter för att bibehålla hög transparens.

Utöver dessa huvudtyper finns ett flertal andra glasvarianter och efterbehandlingsmetoder, såsom laminerat glas och härdat (tempererat) glas, vilka används för att anpassa materialets egenskaper till specifika tillämpningar.

2.4 Glas som ballast

Arbetet undersöker möjligheten att använda krossat avfallsglas som substitut till konventionell ballast i betong. Tidigare forskning har dock identifierat ett antal tekniska utmaningar med detta, kopplade till glasets fysikaliska och kemiska egenskaper. Dessa introduceras i följande avsnitt för att vidare behandlas i diskussionen i kapitel 5.

2.4.1 Generella egenskaper

Glasets geometri skiljer sig från konventionell ballast. Krossat glas uppvisar hög kantighet och slät ytstruktur, vilket i första hand påverkar den färska betongens egenskaper. Premathilaka m.fl. [18] identifierar ett övergripande mönster där ersättning av grov ballast generellt ger en förbättrad arbetbarhet, medan fin ballast tenderar att ge en försämrad arbetbarhet. Detta förklaras med att glasets släta, icke-porösa yta ger låg vattenabsorption, vilket innebär att mer vatten förblir fritt i blandningen och ökar rörligheten. Vid ersättning av fin ballast dominerar däremot glasets kantighet, vars geometri ökar friktionen mellan partiklarna och försämrar arbetbarheten.

Ytterligare en central faktor är föroreningar. Otvättat glas bär ofta på restprodukter så som papper, metall, socker och oljor från tidigare användning. Dessa föroreningar stör hydratiseringen, fördröjer härdningen avsevärt och försämrar betongens hållfasthet [19]. Förekomsten av föroreningar ökar även betongblandningens vattenbehov, varpå mer vatten krävs för att bibehålla önskad arbetbarhet.

2.4.2 Alkali-silikareaktion

Det mest kritiska problemet med glas som ballast i betong är alkali-silikareaktivitet, ASR. Reaktionen sker när kiseldioxid (silika) i glaset reagerar med alkalier i

cementpastans porlösning och bildar en alkali-silikagel [20]. Gelen sväller i kontakt med vatten, vilket skapar inre spänningar i betongen som kan leda till sprickbildning och försämrad beständighet.

Generellt ökar risken för ASR med ökad kornstorlek, medan fina glaskorn under 600 μm kan ha en motsatt, gynnsam puzzolanisk effekt [18]. Begreppet puzzolanisk innebär en kemisk reaktion där ett så kallat puzzolaniskt material reagerar med kalciumhydroxid och bildar CSH. Eftersom reaktionen förbrukar kalciumhydroxid minskar alkalikoncentrationen i cementpastan, vilket begränsar förutsättningarna för ASR. Al-Hellali m.fl. [21] konstaterar att 20% ersättning av cement mot glaspulver är nödvändigt för att effektivt hämma ASR utan att försämra hållfastheten.

Ytterligare åtgärder för att dämpa alkali-silikareaktioner i betong innefattar tillsats av andra puzzolana material såsom flygaska, silikastoft eller vulkanisk aska [20]. Dessutom kan färgen på glaset möjligen ha en inverkan på ASR. Flera studier har enligt [18] observerat att grönt glas har betydligt högre resistens mot ASR jämfört med transparent glas, vilket tros bero på närvaron av krom i det gröna glaset.

3

Metod

I detta kapitel beskrivs det laborativa arbetet. Inledningsvis beskrivs materialberedningen av det avfallsglas som användes, följt av en redogörelse av hur betongblandningarna proportionerades och gjöts. Avslutningsvis beskrivs de provningsmetoder som användes för att utvärdera glasbetongens egenskaper: arbetbarhet, tryckhållfasthet, värmeledningsförmåga och ångpermeabilitet.

3.1 Materialberedning av avfallsglas

Avfallsglas från Stena Recycling, sköljdes initialt av och tvättades därefter i omgångar med varmt vatten och diskmedel, dels för att avlägsna matrester och smuts, dels för att lösa upp lim från etiketter. Glasets initiala skick visas i Figur 3.1. Därefter placerades glaset i en betongblandare med roterande blad tillsammans med varmt vatten och diskmedel, i syfte att ytterligare lösa upp limrester samt att krossa materialet till mindre bitar. Glaset placerades därefter i plastbackar för att torka i cirka 48h med regelbunden omrörning, innan det silades för att få rätt fraktioner. Glaset delades upp i två fraktioner: 4/8 mm och 8/16 mm. Som visas i Figur 3.2 har både färgat och ofärgat glas blandats. Den minsta fraktionen, 0/4 mm, ersattes inte med glas vid gjutningen utan bestod av sand.



Figur 3.1: Otvättat avfallsglas.



Figur 3.2: Fraktion 8/16 mm till vänster och 4/8 mm till höger

3.2 Betongproportionering och gjutning

Tre olika recept för glasbetong togs fram, dessa redovisas nedan i Tabell 3.2. Receptet för referensprovet hämtades från Heidelberg Materials [22], och modifierades utifrån arbetets fraktionsuppdelning. Originalreceptet, som redovisas i Tabell 3.1, ska ge en tryckhållfasthet på ca 30 MPa men det framgår inte av receptet om tryckhållfastheten avser kub- eller cylinderhållfasthet. Det cement som användes i arbetet var Byggcement Skövde, se Appendix D.

Tabell 3.1: Referensrecept för betong med tryckhållfasthet 30 MPa från Heidelberg Materials

Cement	Grus 0/8 mm	Sten 8/16 mm	Vatten	Betongvolym
<i>kg</i>	<i>l</i>	<i>l</i>	<i>l</i>	<i>l</i>
20	36	32	11	54

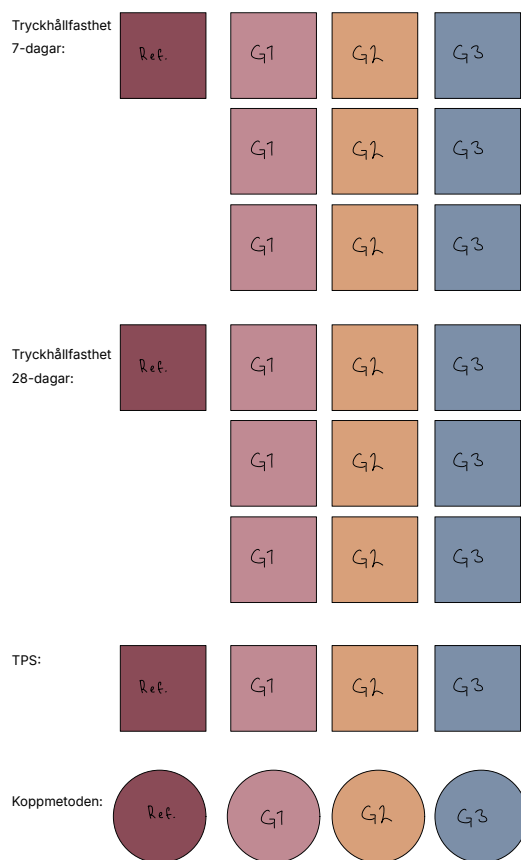
Då originalreceptet inte följer de uppdelningar av ballast som används i arbetet gjordes för referensbetongens recept ett antagande om att andelen 0/8 mm i referensreceptet var uppdelad 1 : 1 mellan 0/4 mm och 4/8 mm. Den första glasbetongen, G1, innehöll identiska proportioner av ingredienser som referensbetongen. G2 innehöll ingen fraktion 8/16 mm utan bestod enbart av sand och fraktion 4/8 mm, medan G3, i motsats till detta, enbart innehöll sand och fraktion 8/16 mm. Denna uppdelning gjordes för att studera skillnader i resultat vid olika mängder glas och kornstorleksfördelningar. Som visas i receptet, Tabell 3.2, har G2 och G3 ett högre *vct*, och detta beror på att 200 ml extra vatten behövde adderas för att kunna bereda en jämn betongblandning.

Tabell 3.2: Betongrecept

Recept	Cement	Vatten	Ballast 0/4	Ballast 4/8	Ballast 8/16	vct
	<i>kg</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>	<i>kg</i>	
Referens	1,50	0,82	2,27	1,80	3,06	0,54
G1	3,00	1,61	4,53	3,50	5,80	0,54
G2	3,00	1,81	9,10	6,22	–	0,60
G3	3,00	1,81	9,10	–	5,80	0,60

Efter betongberedningen fylldes formarna, vilka huvudsakligen bestod av kubiska formar med dimensionerna $100 \times 100 \times 100$ mm som uppfyller kraven enligt standard SS-EN 12390-1 för tryckhållfasthet [15]. För de provkroppar som skulle användas vid mätning av ångpermeabilitet användes även cylindriska formar med dimensionerna $\varnothing 100 \times 100$ mm. När formarna var fyllda vibrerades dessa och täcktes med plastfolie och fick sedan härda i 72h innan formarna togs av. Därefter härdade proverna i vattenbad fram till dess att de övriga testerna genomfördes, som längst 28 dagar.

Totalt gjöts 28 prover, varav 4 referensprover. Fördelningen av proverna samt dess form redovisas i Figur 3.3.



Figur 3.3: Schematisk bild över fördelningen av de 28 gjutna proverna

3.3 Provningsmetoder

I detta arbete har olika provningsmetoder använts för att utvärdera glasbetongens arbetbarhet, tryckhållfasthet, värmekonduktivitet och ångpermeabilitet. Följande avsnitt beskriver dessa metoder.

3.3.1 Arbetbarhet

Eftersom arbetbarhet är svårt att karaktärisera med ett enskilt mått har mätningarna genomförts på flera sätt. Konsistensmätning gjordes med sättmått enligt SS-EN 12350-2 [23]. Mätningen utfördes direkt efter blandning för samtliga fyra recept genom att en kon fylldes i omgångar, varpå varje lager kompakterades med en spatel.

Därefter lyftes konen av och sättmättet registrerades som skillnaden mellan konens höjd och höjden på den färska betongen. Som komplement utvärderades arbetbarheten även genom observationer under fyllning och vibrering av gjutformarna, samt genom visuell bedömning av de hårdnade provkropparnas ytstruktur. Detta gjordes för att bedöma betongens kompakterbarhet, det vill säga förmågan att avlägsna hålrum under kompakteringssteget [13].



Figur 3.4: Utrustning för konsistensprovning med sättmått och ett representativt betongprov

3.3.2 Tryckhållfasthet

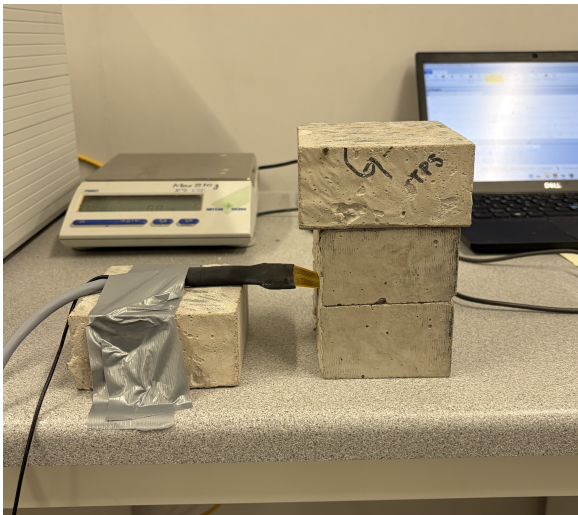
Tryckhållfastheten bestämdes med hjälp av en hydraulisk tryckpress från Toni Technik (Bauform Model 2040). Proverna utfördes efter 7 respektive 28 dagar enligt SS-EN 12390-3 [24]. Vid varje tillfälle testades ett referensprov samt tre prover av respektive glasbetong (G1, G2 och G3). Provkropparna placerades i pressen med de slätaste ytorna vända mot tryckplattorna. Därefter applicerade maskinen en kontrollerad belastning som gradvis ökades tills provet gick till brott och sprickbildning kunde observeras. Tryckpressen uppfyller gällande standard SS-EN 12390-1 för tryckprovning av betong [15]. I Figur 3.5 visas tryckpressen samt ett betongprov som utsätts för mekanisk belastning.



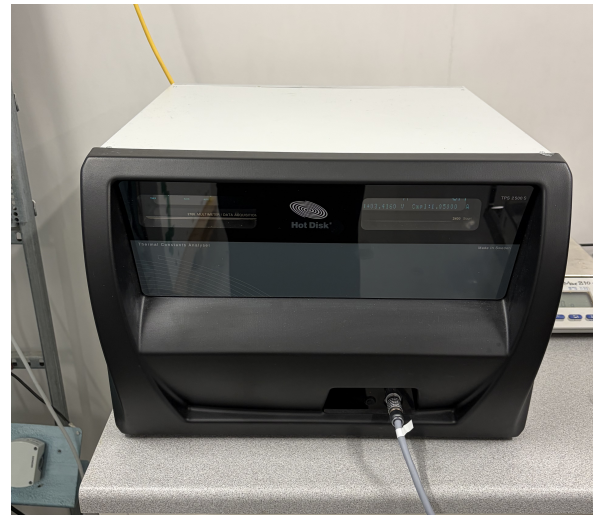
Figur 3.5: Tryckpress från Toni Technik använd vid tryckhållfasthetsprovning

3.3.3 Transient Plane Source (TPS)

Materialets värmekonduktivitet bestämdes med TPS-metoden (Transient Plane Source), vilken mäter temperaturökningen i ett prov över tid. Instrumentet visas i Figur 3.7. Ett av de kubiska proverna sågades i två lika stora delar, och en sensor placerades mellan två släta ytor, se Figur 3.6. Sensorn fungerar både som värmekälla och temperaturgivare, och tillförde en konstant effekt till provet [25]. Sensorn som användes benämndes som 55.01 och består av en spiralformad nickeltråd omsluten av en polyamidfilm. En vikt placerades på proverna för att säkerställa god termisk kontakt mellan provhalvorna och sensorn, vilket kan ses i Figur 3.6. Fem mätningar genomfördes per prov. Varje mätning pågick i 600 s med en tillförd effekt på 400 mW, varefter proverna fick svalna i 20 min mellan varje mätning. För att minimera påverkan från omgivande temperaturvariationer utfördes mätningarna i klimatrums med konstant temperatur på 20 °C och en relativ fuktighet på 50%.



Figur 3.6: Uppställning av sensor och provkroppar. I bild syns även den vikt som placerades på provkropparna



Figur 3.7: Termisk konduktivitetmätare utvecklad på Chalmers tekniska högskola. Användes för att utföra samtliga TPS-mätningar

För en ökad precision gjordes beräkningar för teoretiska mätvärden som användes för jämförelse med mätdata. Dessa beräkningar gjordes enligt ekvation 3.1, Maxwells modell för värmekonduktivitet. Ingående parametrar definieras i Tabell 3.3.

$$k_{eff} = k_m \left[\frac{k_p + 2k_m + 2\phi(k_p - k_m)}{k_p + 2k_m - \phi(k_p - k_m)} \right] \quad (3.1)$$

Tabell 3.3: Indata för Maxwells beräkningsmodell

Parameter	Beskrivning	Enhet
k_{eff}	Effektiv termisk ledningsförmåga för kompositen	W/(m·K)
k_m	Matrisens ledningsförmåga	W/(m·K)
k_p	Partiklarnas ledningsförmåga	W/(m·K)
ϕ	Volymfraktion av partiklar i blandningen ($0 \leq \phi \leq 1$)	-

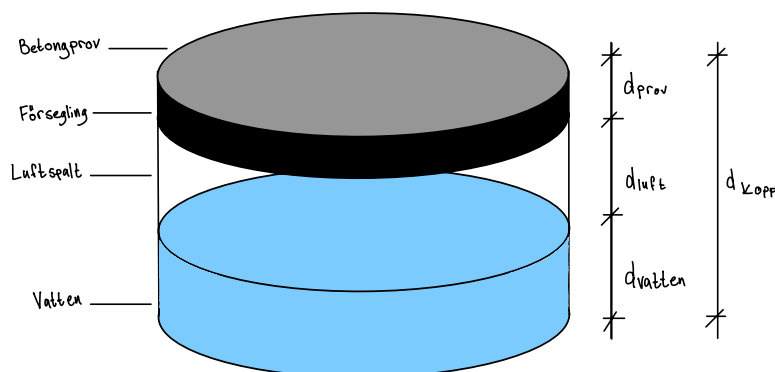
Fullständiga beräkningar redovisas i Appendix B.

3.3.4 Koppmetoden

Ångpermeabiliteten bestämdes med hjälp av koppmetoden. Proverna sågades med tjocklek 2 cm och konditionerades sedan i ett klimatrum vid 20 °C och en relativ fuktighet på 50% i 5 dagar. Därefter placerades proverna på koppar innehållande

100 ml avjoniserat vatten, motsvarande en relativ fuktighet på 100%. Kanterna mellan provet och koppen förseglades därefter med hjälp av självförseglande tejp och aluminiumfolie för att förhindra avdunstning mellan provets och koppens kant [1]. Viktförlusten mättes sedan med jämna mellanrum.

Mätningarna planerades att fortgå till dess att ett stationärt tillstånd kunde observeras, alltså att massförändringen över tid är konstant. På grund av tidsbrist avslutades mätningarna efter 22 dagar, och beräkningar utfördes med den data som fanns tillgänglig. I Figur 3.8 visas konceptet för koppmetoden samt en förklaring av de olika mått som användes i beräkningarna.



Figur 3.8: Konceptuell uppställning för koppmetoden samt förklaring av mått som används i beräkningar

Ånggenomgångsmotståndet för materialet beräknades enligt 3.2,

$$Z_{\text{material}} = \frac{\Delta v_{\text{material}}}{g} - Z_{\text{luft}} \quad (3.2)$$

vars parametrar definieras i Tabell 3.4.

Ångpermeabiliteten beräknades därefter enligt 3.3,

$$\delta_{\text{material}} = \frac{d_{\text{material}}}{Z_{\text{material}}} \quad (3.3)$$

vars parametrar definieras i Tabell 3.5.

Fullständiga beräkningar för hur ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd

Tabell 3.4: Indata för beräkning av ånggenomgångsmotstånd

Parameter	Beskrivning	Enhet
Z_{material}	Materialets ånggenomgångsmotstånd	s/m
$\Delta v_{\text{material}}$	Skillnad i ånghalt över materialet	kg/m ³
g	Ångflöde genom materialet	kg/(m ² s)
Z_{luft}	Luftspaltens ånggenomgångsmotstånd	s/m

Tabell 3.5: Indata för beräkning av ångpermeabilitet

Parameter	Beskrivning	Enhet
δ_{material}	Materialets ångpermeabilitet	m ² /s
d_{material}	Materialets tjocklek	m
Z_{material}	Materialets ånggenomgångsmotstånd	s/m

redovisas i Appendix C.

De experimentellt bestämda värdena jämfördes sedan med värden från litteratur för betongens ångpermeabilitet. För betong med v_{ct} 0,5 och rfukthalt mellan 35–70 % anges en ungefärlig ångpermeabilitet till 0,15 $\mu\text{m}^2/\text{s}$ och för betong inom samma fuktighetsintervall anges den ungefärliga ångpermeabiliteten till 0,2 $\mu\text{m}^2/\text{s}$ [1].

4

Resultat

I detta kapitel presenteras resultaten från de genomförda proverna av arbetbarhet, tryckhållfasthet, värmeledningsförmåga samt ångpermeabilitet. Resultaten redovisas för referensbetongen samt för de tre glasbetongerna. Detta utgör underlag för den efterföljande diskussionen och jämförelsen mellan de olika betongtyperna.

4.1 Arbetbarhet

För samtliga betongblandningar, referensbetongen, G1, G2 och G3, uppmättes ett sättmått på 0 mm, vilket indikerar en mycket styv konsistens. Visuell bedömning av provkropparnas ytor efter att formarna avlägsnats visade att samtliga recept uppvisade en viss förekomst av håligheter. Två provkroppar, en från G2 och en från G3, avvek påtagligt med betydligt större och mer oregelbundna håligheter, se Figur 4.1.



Figur 4.1: Ytstruktur hos hårdnade provkroppar. Från vänster: representativ yta för majoriteten av provkropparna, avvikande provkropp från G3 och avvikande provkropp från G2

4.2 Tryckhållfasthet

I Tabell 4.1 visas resultaten från tryckhållfasthetstesterna efter 7 och 28 dagar. För glasbetongerna har ett genomsnitt beräknats utifrån 3 prover. Samtliga provresultat redovisas i Appendix A, Tabell A.1.

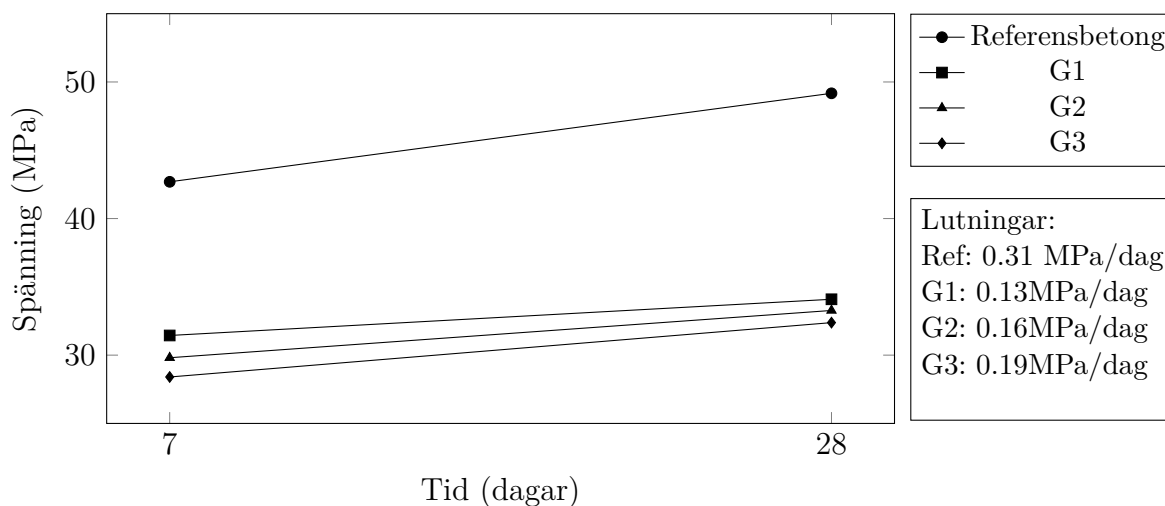
Tabell 4.1: Tryckhållfasthet efter 7 och 28 dagar

Prov	Densitet g/cm^3	7 dagar	28 dagar
		Tryckhållfasthet MPa	Tryckhållfasthet MPa
Referensbetong	2,37	42,69	49,17
G1	2,32	31,44	34,09
G2	2,25	29,81	33,27
G3	2,25	28,40	32,38

Generellt kan man se en ökning i tryckhållfastheten mellan 7 och 28 dagar för samtliga betongtyper, vilket är förväntat då cementets hydratisering fortskrider över tid.

Referensbetongen uppvisar högst tryckhållfasthet både efter 7 och 28 dagar, medan glasbetongerna (G1–G3) visar något lägre värden. Skillnaderna mellan de olika glasbetongerna är relativt små, men man kan ändå se att receptet för G1 gav högst tryckhållfasthet av de tre. Vid jämförelse av G2 och G3 ses att G2 presterar bättre.

Generellt kan man se en ökning i tryckhållfastheten mellan 7 och 28 dagar för samtliga betongtyper, se figur 4.2, vilket är förväntat på grund av cementhydratiseringens fortskridning över tid. Kurvan hos referensbetongen har en betydligt större lutning än glasbetongerna vilket indikerar en högre härdningstakt vid användning av konventionell ballast.



Figur 4.2: Tryckhållfasthet som funktion av tid för olika betongprov

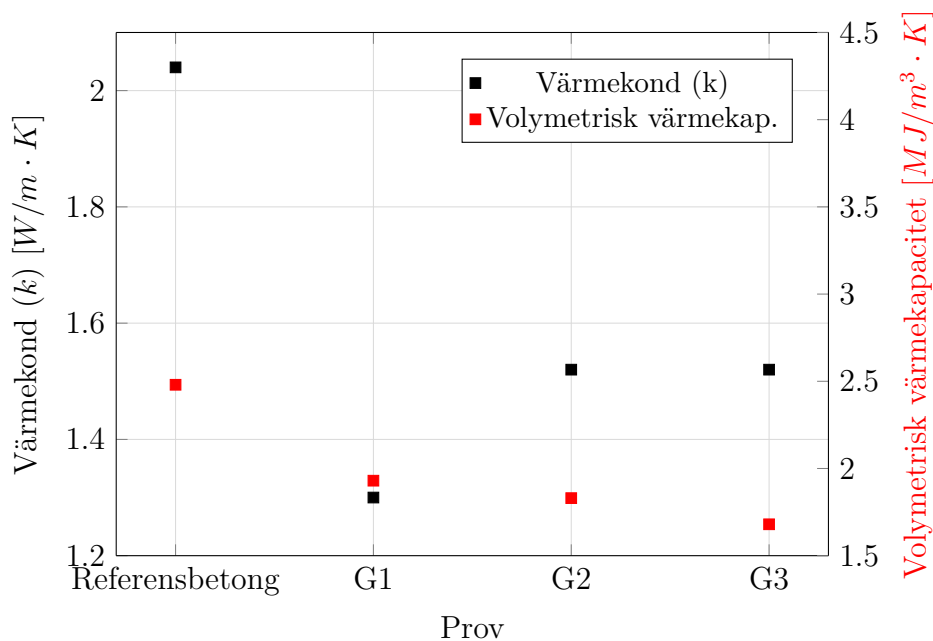
Skillnaden mellan referensbetongen och glasbetongerna kvarstår vid både 7 och 28 dagar. Detta antyder att ballastsubstitutionen huvudsakligen påverkar den totala hållfastheten, medan den relativa hållfasthetsutvecklingen över tid förblir jämförbar mellan provserierna då kurvorna följer en liknande trend.

4.3 Värmekonduktivitet och specifik värmekapacitet

I Tabell 4.2 redovisas de genomsnittliga resultaten från genomförda TPS-tester för referensbetongen samt de tre glasbetongerna. Fullständiga provresultat redovisas i Appedix B.

Tabell 4.2: Värmekonduktivitet och specifik värmekapacitet

Prov	Värmekonduktivitet, k	Volymetrisk värmekapacitet,
	$W/m \cdot K$	$MJ/m^3 \cdot K$
Referensbetong	2,04	2,48
G1	1,30	1,93
G2	1,52	1,83
G3	1,52	1,68



Figur 4.3: Värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet för de olika proven

Värmekonduktiviteten är allmänt lägre för glasbetongerna än för referensprovet, se Figur 4.3. Bland glasbetongerna har G1 lägst värmekonduktivitet medan G2 och G3 uppvisar identiska resultat.

För den volymetriska värmekapaciteten hos de olika recepten är skillnaden mellan referensprovet och glasbetongen betydligt större. Återigen är G2 och G3 liknande medan G1 uppvisar en högre volymetrisk värmekapacitet.

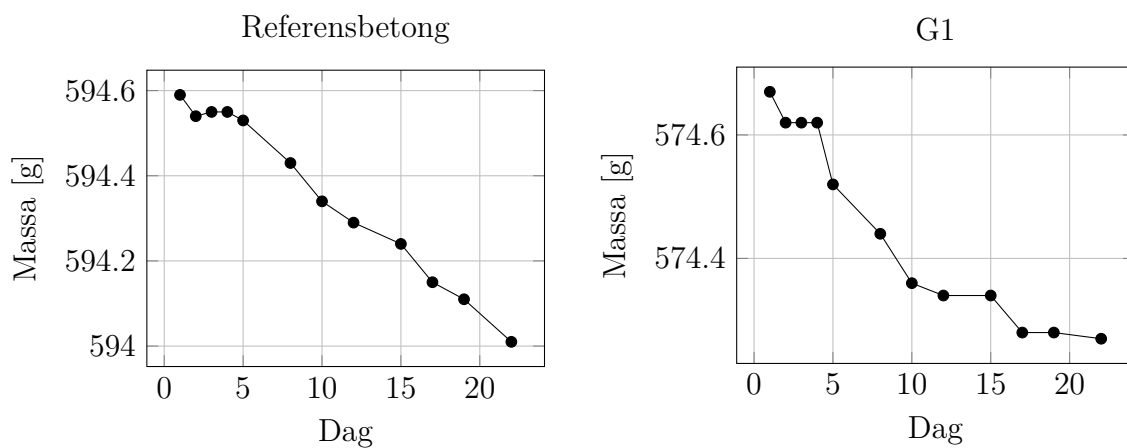
I tabell 4.3 redovisas beräknade värmekonduktivitet för glasbetongerna enligt Maxwells modell, fullständiga beräkningar redovisas i Appendix B

Tabell 4.3: Beräknad värmekonduktivitet för glasbetongerna

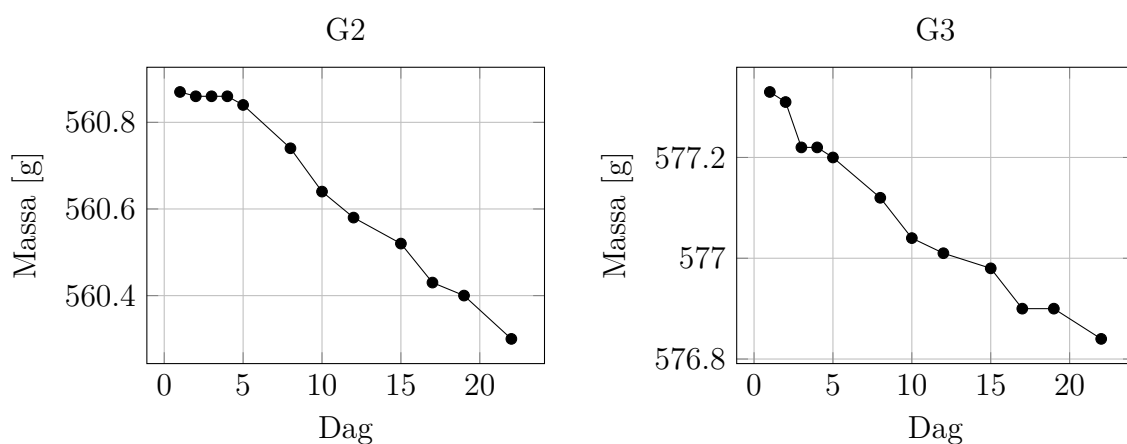
Prov	Värmekonduktivitet, k $W/m \cdot K$
G1	1,59
G2	1,76
G3	1,76

4.4 Ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd

I Figur 4.4 och Figur 4.5 redovisas massförändringen i proverna över tid.



Figur 4.4: Massförändring över tid för proverna referensbetong och G1



Figur 4.5: Massförändring över tid för proverna G2 och G3

Generellt visar en minskning av massa för samtliga prover. Mätningarna pågick i 22 dagar och ett stationärt tillstånd uppnåddes inte även om viss linjäritet kan observeras, framför allt för referensbetongen och G2. G1 och G3 uppvisar liknande beteenden och avstannar efter 15-20 dagar.

Tabell 4.4 redovisar ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd för respektive prov. Kompletterande beräkningar finns i Appendix C. Beräkningarna är utförda på data från mätning 5-22. Detta eftersom referensbetongen uppvisar linjäritet från denna mätningen.

Tabell 4.4: Beräknad ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd för samtliga prov

Prov	δ_v $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	Z 10^5 s/m
Referensbetong	0,105	1,90
G1	0,034	5,83
G2	0,109	1,83
G3	0,073	2,76

5

Diskussion

Energi- och resursanvändning är en central fråga i dagens samhälle och för att möta framtidens hållbarhetsutmaningar krävs en ökad grad av återbruk och återvinning globalt. Som tidigare nämnt i avsnitt 1.1.2 återvinns glas i mycket låg utsträckning utanför Europa. Idag transporteras ballast långa sträckor vilket medför både ekonomiska och miljömässiga kostnader. Av dessa anledningar kan glas som ersättning för konventionell ballast vara ett sätt att nyttja resurser på ett mer effektivt sätt i länder där infrastruktur för glasåtervinning är begränsad. Men för att glasbetong ska fungera som byggmaterial finns en rad materialegenskaper som måste uppfyllas. Mot denna bakgrund kommer glasbetong som material att utvärderas utifrån dess mekaniska egenskaper, beständighet och hållbarhetsaspekter, såväl som framtida forskning och felkällor.

5.1 Tolkning av resultat

I detta avsnitt diskuteras materialegenskaper utifrån de laborativa resultaten. Områden som diskuteras är tryckhållfasthet, värmeledningsförmåga och ångpermeabilitet.

5.1.1 Tryckhållfasthet

Enligt figur 4.2 uppvisar samtliga provserier en ökad tryckhållfasthet mellan 7 och 28 dagar, vilket är förväntat med fortsatt cementhydratisering över tid. Det bör dock noteras att hållfasthetsutvecklingen inte nödvändigtvis är linjär mellan mättillfällena. Eftersom endast två mätpunkter finns tillgängliga används den linjära representationen i figuren främst för att illustrera den övergripande trenden mellan provningstillfällena snarare än den exakta utvecklingen över tid.

Eftersom referensbetongen och G1 har samma vct blir de direkt jämförbara. Resultaten i kapitel 4.2 visar att tryckhållfastheten för G1 är lägre än för referensbetongen. Detta kan bero på sämre vidhäftning mellan glaspartiklarna och cementpastan, glasets form som avgörande faktor för tryckhållfastheten kommer vidare diskuteras i kapitel 5.2.2.

G2 och G3 har ett högre vct än de andra betongerna vilket vidare försämrar hållfastheten. Ett högre vct ger som tidigare nämnt en mer porös cementpasta efter härdning vilket på så vis försämrar tryckhållfastheten, se kapitel 2.1.1. Detta förklarar den lägre hållfastheten hos G2 samt G3 vid jämförelse med G1.

Skillnaden mellan G2 och G3 kan förklaras med storleksskillnaden i kornstorlekens geometri. G3 visar en lägre hållfasthet än G2, detta indikerar att den grövre fraktionen ger en sämre packning och därmed svagare vidhäftning till cementpastan. Det är även sannolikt att andra faktorer hos glasets geometri så som flisighet och stänglighet är de störst påverkande faktorerna, se kapitel 5.2.

Sålunda visar resultaten att både ballastmaterialet och *vct* har en påverkan på tryckhållfastheten, och G1 indikerar att glasballasten minskar hållfastheten kraftigt även vid oförändrat *vct*. Vid jämförelse av G2 och G3 stärks denna försvagning sannolikt av det högre vattencementtalet, men betongen försvagas även ytterligare vid användning av större fraktioner.

I denna studie användes osorterat avfallsglas med blandade färger, vilket innebär att resultaten inte möjliggör någon bedömning av hur glasets färg separat påverkar exempelvis tryckhållfasthet eller andra materialegenskaper. Samtidigt innebär detta en praktisk och processteknisk problematik, eftersom avfallsglasets, som ses i figur 3.1, inte är sorterat efter färg. En mer omfattande färgsortering skulle kräva ytterligare steg i återvinningsprocessen samt mer avancerade sorteringsanläggningar.

5.1.2 Termiska egenskaper

Vid beräkningarna av betongens värmeledningsförmåga användes ett karakteristiskt referensvärde för värmekonduktiviteten hos konventionell betong på 1,70 W/(m · K)[1]. De genomförda TPS-testerna visade dock att referensprovets konduktivitet var högre, 2,04 W/(m · K). Genomförda teoretiska beräkningar enligt Maxwells modell gav förväntade värden på 1,59 W/(m · K) för G1 samt kring 1,76 W/(m · K) för G2 och G3, se Appendix B.1. Att de faktiska TPS-resultaten genomgående blev lägre än de beräknade värdena kan sannolikt härledas till den sand som användes [26]. Ballastens geografiska ursprung och mineralogiska sammansättning har i tidigare studier visat sig ha en negativ inverkan på betongens termiska prestanda [27].

En intressant aspekt i resultaten är att TPS-testerna tyder på att mängden glas är den avgörande faktor för värmekonduktiviteten, snarare än glasets kornform. Detta bekräftas av att G2 och G3, se tabell 4.2 uppvisade identiska resultat trots skillnader i fraktionsfördelning. Bytet från konventionell ballast till glas sänker värmeledningsförmågan eftersom glas fungerar som en isolator jämfört med konventionell stenballast då glas har en värmekonduktivitet på cirka 1,02 W/(m · K) [28], vilket är betydligt lägre än för exempelvis granit som ligger kring 3,5 W/(m · K) [27]. Detta kan innebära att en ökad glasmängd ger betongen bättre isolerande egenskaper, vilket är fördelaktigt för att sänka värmeförluster i byggnadskonstruktioner.

Däremot medför användningen av glas en sänkning av materialets termiska tröghet. Referensbetongen uppvisade en volymetrisk värmekapacitet på 2,48 MJ/(m³ · K),

vilket är något högre än det karakteristiska värdet på $2,30 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ [1]. För glasbetongproverna sjönk dessa värden drastiskt, ner till $1,68 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ för G3. Värt att notera är att värmekapaciteten skiljer sig mellan G2 och G3. Vid jämförelse mellan G2 och G3, där främst kornstorlek och ballastfördelning skiljer proverna åt, framgår att värmeledning och värmelagring inte nödvändigtvis styrs av samma mekanismer. Trots att de båda proverna visar samma värmekonduktivitet skiljer sig värmekapaciteten. Eftersom proverna har samma densitet, se tabell 4.1, kan skillnaden potentiellt kopplas till variationer i kornstorlek och intern mikrostruktur. Finare partikelstorlekar kan ge en jämnare fördelning och större kontaktyta vilket i sin tur påverkar ett materials förmåga att lagra värme utan att förändra materialet. Även skillnad i kompaktering av proverna kan bidra till denna avvikelse.

En hög termisk massa är önskvärd i byggnader för att utjämna temperatursvängningar och lagra energi, vilket minskar behovet av aktiv uppvärmning och kylning, vilket i praktiken innebär att byggnaden reagerar snabbare på förändringar i utomhustemperatur.

TPS-testerna gav varierande resultat där ett antal av mätningarna gav avvikande värden från andra genomförda mätningar i samma mätserie. Det går ej att urskilja någon direkt trendlinje för mätserierna, inte heller mellan de prover som har liknande recept exempelvis G2 och G3. Dessa variationer kan indikera att proverna är inhomogena, vilket kan ge oregelbundna och varierande resultat. Det kan också förklaras av att det är svårt att uppnå representativa värden med TPS-metoden är på helt parallella ytor önskvärd då sensorn kräver god kontakt med materialet, vilket visade sig svårt att åstadkomma med tillgänglig kapmaskin.

5.1.3 Fukttransport

I arbetet observerades fukttransport genom materialet med hjälp av koppmetoden under 22 dagar och utifrån insamlad data beräknades ångpermeabiliteten och ånggenomgångsmotstånd i de fyra olika proverna. Enligt metoden ska mätningar pågå till dess att ett stationärt tillstånd har observerats. Insamlad mätdata uppvisade viss linjäritet vilket tyder på att proverna är på väg mot ett stationärt tillstånd, men det är viktigt att poängtera att detta troligtvis aldrig uppnåddes och därför bör resultat tolkas med stor försiktighet. Beräkningarna är utförda på data från mätning

Graferna för samtliga prover visar en stor variation i början som sedan planar ut. Resultaten för referensbetongen och G2 är jämförbara eftersom kurvorna uppvisar liknande beteende som tyder på att proverna kan ha närmat sig ett stationärt tillstånd. Däremot går det att se avvikelser mellan 15-20 dagar för både G1 och G3 och det hade därför varit optimalt att mäta ytterligare tid, dels för att säkerställa att referensbetongen och G2 har uppnått ett stationärt tillstånd, dels för att låta G1 och G3 stabilisera sig.

Enligt referensvärden som presenteras i avsnitt 3.3.3 bör referensbetongen uppvisa

en ångpermeabilitet mellan $0,15 - 0,2 \mu\text{m}^2/\text{s}$. Det experimentellt bestämda värdet för referensbetongen är $0,105 \mu\text{m}^2/\text{s}$, vilket är något lägre än litteratuvärdet men fortfarande relativt nära. Detta skulle kunna stärka antagandet om att referensbetongen närmade sig, eller eventuellt hade uppnått ett stationärt tillstånd. Eftersom G2 uppvisade ett liknande beteende skulle detta även kunna indikera att G2 närmade sig ett stationärt tillstånd.

G1 och G3 avviker från referensprovet och har en betydligt lägre ångpermeabilitet, vilket kan tolkas två sätt. Det första är att ett stationärt tillstånd inte har uppnåtts än, vilket graferna indikerar. Alternativt kan resultatet också tolkas som att G1 och G3 är tätare material än referensbetongen och G2, eller så är det en kombination av dessa två faktorer. Om G1 och G3 är tätare material skulle detta kunna vara en gynnsam materialegenskap för att begränsa ASR. Detta eftersom när kiseldioxid reagerar med alkalier bildas en gel som sväller i kontakt med vatten. Är då fukttransporten genom materialet låg begränsas risken för ASR. Det som talar emot att G1 och G3 skulle vara tätare material är att dess *vct* skiljer sig åt och det är därför mer troligt att de låga värdena istället beror på att de inte uppnått stationärt tillstånd än.

Ånggenomgångsmotståndet följde samma trend som ångpermeabiliteten, och G1 och G3 uppvisade högre motstånd mot fukttransport än referensbetongen och G2.

5.2 Glasets kornform som avgörande faktor

Som tidigare behandlats i kapitel 2.2.2 har ballastens geometri en stor inverkan på betongens egenskaper, vilket synliggörs i detta arbete. Eftersom glaset främst bestod av förpackningsglas såsom flaskor och burkar var materialet redan från början mycket tunt. När det sedan krossades fick glasskärvorna en varierad struktur, men gemensamt för samtliga var en utpräglad flisig och stänglig form. Kornen blev dessutom inte kantiga vid krossning, utan fick snarare rundade hörn, vilket troligtvis beror på att de slipades ner när glaset rengjordes i betongblandaren under beredningssteget. Glaset uppvisade även en mycket slät ytstruktur, i tydlig kontrast mot konventionell ballast där krossad sten generellt har en skrovlig yta. Kornformen påverkade även fraktionsindelningen. Glasets avlånga kornform medförde att partiklar som överskred de avsedda storleksgränserna ändå inkluderades i respektive fraktion vid siktning, se Figur 5.1. Dessa egenskaper tros ha påverkat resultaten i hög grad och utgör utgångspunkten för diskussionen kring varför glasbetongens resultat skiljer sig från referensbetongen .



Figur 5.1: Krossat glas från fraktion 8/16 som visar kornens flisiga och stängliga geometri samt att längden överskrider maximal kornstorlek för gällande fraktion

5.2.1 Kornformens inverkan på arbetbarhet

I arbetet begränsades de standardiserade mätningarna till sättmättet, vilket ger en initial indikation på den färska betongens konsistens. Samtliga betongblandningar uppvisade dock ett sättmått på 0 mm vilket gör det omöjligt att särskilja resultaten med denna metod. Den visuella bedömningen av provkropparnas ytor gav däremot ett mer nyanserat underlag. Prover från G2 och G3 uppvisade påtagligt större och mer oregelbundna håligheter jämfört med referensbetongen, vilket tyder på en sämre arbetbarhet hos dessa blandningar.

Den bristande arbetbarheten i G2 och G3 kan delvis förklaras av receptutformningen. G2 saknar den grova fraktionen 8/16 mm och G3 saknar mellanfraktionen 4/8 mm, vilket i båda fallen avviker från den teori som presenteras i avsnitt 2.2.2 om att en stor andel grov ballast och en kontinuerlig kornstorleksfördelning är nödvändig för att uppnå god arbetbarhet. Det ökade vattenbehovet i dessa recept, som ledde till att *vct* höjdes till 0,60, bedöms vidare bero på den höga andelen sand snarare än glasets materialegenskaper. Finare fraktioner har en betydligt större specifik yta än grova fraktioner, vilket innebär att mer vatten behövs för att bibehålla önskad konsistens [13].

Enligt kapitel 2.4.1 bör substitution av grov ballast med krossat glas ge förbättrad arbetbarhet tack vare glasets icke-porösa och släta yta. Resultaten från laborationerna kan dock inte bekräfta detta samband. Dels då sättmättet inte uppvisade någon skillnad mellan G1 och referensbetongen, dels då G2 och G3 utgör extremfall utan kontinuerlig kornstorleksfördelning och som därmed inte kan jämföras direkt med referensbetongen.

Däremot är det fortfarande troligt att glasets kornform i sig försämrar arbetbarheten. Som tidigare framhävts är runda korn att föredra framför flisiga korn då dessa ger sämre packningsförmåga och ökad hålrumsvolym. Att G1 inte uppvisade någon tydlig försämring i jämförelse med referensbetongen utesluter inte att kornformen ändå har en inverkan, den visuella ytbedömningen är snarare ett för grovt mått för att upptäcka subtila skillnader i kompakterbarheten. Det är rimligt att, utifrån teorin, anta att glasets geometri påverkar kompakterbarhet men att effekten inte var tillräckligt stor för att synliggöras med de metoder som användes.

5.2.2 Kornformens inverkan på tryckhållfasthet

Att samtliga glasbetongprover uppvisade lägre tryckhållfasthet än referensbetongen kan till stor del förklaras utifrån glasets kornform. Som beskrivits i avsnitt 2.2.2 är vidhäftningen mellan ballast och cementpasta i fasgränsen avgörande för betongens hållfasthet och en skrovlig ytstruktur ger generellt bättre vidhäftning. Glasets yta är icke-porös och slät, vilket försämrar vidhäftningen och resulterar i en svagare fasgräns, och därmed lägre tryckhållfasthet. Det bör även noteras att pappersrester från etiketter, som inte fullständigt avlägsnades under rengöringsprocessen, löstes upp vid krossning i betongblandaren och bildade ett pulver som efter torkning lade sig som en beläggning runt glaskornen. Enligt [13] kan ytbeläggningar i form av finmaterial på ballastkornen försämra vidhäftningen mellan ballast och cementpasta och på så sätt försvaga fasgränsen.

Utöver ytstrukturen kan glaskornens flisiga och stängliga form ha påverkat tryckhållfastheten ytterligare. Formen gör att kornen tenderar att överlappa och haka i varandra i betongblandningen, vilket skapar stora och oregelbundna hålrum som cementpastan behöver fylla ut. Eftersom cementpastan är svagare än ballasten är den definierande för betongens hållfasthet och det eftersträvas därför att fylla ut ballastens hålrumsvolym så effektivt som möjligt för att minska behovet av cementpasta. Glasets kornform försvårar däremot detta och den ökade volymen av cementpasta kan därmed ha bidragit till de lägre tryckhållfasthetsvärdena för G1, G2 och G3. Att G2 uppvisar högre tryckhållfasthet än G3 trots identiskt *vct* stödjer resonemanget om kornformens betydelse. Den enda variabeln som skiljer dem åt är glasfraktionens storlek, vilken därför kan antas vara den bidragande faktorn, som tidigare nämnt i kapitel 5.1.1. Den grövre fraktionen 8/16 mm i G3 ger troligtvis en försämrad packning och ökad hålrumsvolym till skillnad från den finare fraktionen, 4/8 mm, i G2. Detta resulterar i den lägre tryckhållfastheten för G3.

5.3 Materialets beständighet över tid

De uppmätta tryckhållfasthetstesterna för glasbetongerna är lägre än referensbetongen, men samtliga prover uppvisar trots detta värden som kan bedömas godtagbara för många tillämpningar. Det är dock viktigt att notera att goda mekaniska egenskaper vid 7 och 28 dagars provning i detta fall inte går att likställa med god beständighet över tid. Betongens initiala egenskaper ger inte nödvändigtvis

en korrekt bild av materialets långsiktiga prestanda.

Det mest kritiska problemet i detta sammanhang är alkali-silikareaktivitet. Som beskrivits i avsnitt 2.4.2 innehåller glas en hög halt kiseldioxid, vilket gör det starkt alkali-silikareaktivt. Eftersom fraktionerna som använts i det laborativa arbetet, 4/8 och 8/16 mm, är grova är risken för ASR särskilt hög. Inom ramen för arbetet har ASR inte studerats experimentellt, men litteraturen är entydig om att betongens beständighet riskerar att försämrats avsevärt utan åtgärder som begränsar ASR, trots att de mekaniska egenskaperna är tillfredsställande på kort sikt.

5.4 Hållbarhetsaspekter

Generellt är det viktigt att skilja mellan glas som avfall och glas som resurs, eftersom dessa två perspektiv leder till mycket olika slutsatser ur både miljömässiga, ekonomiska och systemmässiga aspekter. När glas betraktas som avfall ligger fokus ofta på att hitta användningsområden som minskar deponering och nyttjar materialflöden lokalt. Om glas däremot ses som en resurs i ett cirkulärt materialsystem betonas istället dess potentiella värde i högkvalitativ återvinning och återföring till nya glasprodukter. I detta avsnitt jämförs de olika perspektiven med varandra, i syfte att utvärdera hållbarheten i användningen av glas som ballast.

5.4.1 Resursanvändning och materialvärde i glasbetong

Den främsta drivkraften för att använda glasbetong som alternativ till konventionell ballast är för att minska beroendet av naturresurser. Som tidigare nämnt utvinns mellan 40-50 miljarder ton ballast årligen [2], samtidigt är återvinningsgraden av glas så låg som 21% globalt [3]. Genom att ersätta konventionell ballast med avfallsglas kan man minska deponivolymer och samtidigt bevara naturresurser.

Material har både ett ekonomiskt och ett miljömässigt värde genom de resurser, den energi och den bearbetning som krävs för att framställa dem. Inom hållbar materialanvändning diskuteras även vikten av att bevara materialets kemiska komplexitet och egenskaper, samt att undvika användningsområden där framtida separation och återvinning försvåras. Material bör enligt designprinciper, som Anastas och Zimmerman [29] tolv gröna ingenjörprinciper, användas på ett sätt som möjliggör framtida separation och återvinning. När glas används som ballast i betong försvåras detta. Glas är ett förädlad material som kräver energi för att smältas och renas. Användningen av glas som ballast kan därför innebära en nedgradering av materialets värde, eftersom ett material med hög återvinningspotential binds in i en produkt där framtida separation och återvinning är försvårad.

Trots att det kan ses som en energiförlust att använda glas som ballast beror hållbarheten även starkt på lokala förutsättningar. I Sverige, där glasåtervinningen redan är välutvecklad, riskerar användningen att konkurrera med ett effektivt cirkulärt system. I länder med låg återvinningsgrad, som USA eller Kina, kan användningen däremot bidra till minskad deponering och resursuttag. Detta kan

bidra till ekologiska fördelar, såsom bevarandet av landskap och upprätthållandet av geologisk stabilitet. Denna lösning riskerar dock att bli reaktiv snarare än förebyggande, eftersom fokus ligger på att hitta användningsområden för avfall istället för att minimera avfallsgenereringen från början.

5.4.2 Minskad trafikbelastning

Som tidigare redogjorts står ballast för cirka 15% av betongens totala koldioxidutsläpp, vilket huvudsakligen beror på transportavstånd och utvinningsprocesser. Genom att förkorta dessa transportsträckor och använda material som finns tillgängliga i urbaniserade områden, såsom avfallsglas, kan utsläppen minska avsevärt. Detta är även fördelaktigt då täkter för naturresurser i allt större utsträckning lokaliseras längre från byggplatser. Glas kan i detta sammanhang ses som en lokal resurs, vilket enligt Anastas och Zimmerman [29] ingenjörprinciper är fördelaktigt. Samtidigt är det viktigt att beakta att en sådan utveckling kan leda till minskad återvinning av glas samt ett ökat behov av ny glasproduktion, vilket i sin tur innebär ett fortsatt resursuttag.

Dessa besparingar i transportsträckor och potential för minskad resursutvinning kan även bidra till ekonomiska fördelar. Däremot kan en konsekvens av produktförändring vara ökade processkostnader inom insamling, sortering och krossning av glaset. Dessutom kan variationer i kvalitet och materialegenskaper leda till ökade krav på kontroll och bearbetning.

5.5 Felkällor

Provning av hållfasthet avseende 7 dagar genomfördes först efter 10 dygn. Detta berodde på otydlig kommunikationen som gjorde att tillgång till tryckpressen saknades fram till dag 10. Den ökade härdningstiden har sannolikt medfört en viss ökning av hållfastheten, men effekten kan troligtvis anses begränsad och har inte påverkat resultatet i någon avgörande utsträckning, särskilt med hänsyn till att även provning efter 28 dagar genomfördes.

I samband med tryckhållfasthetstesterna vid 7 dagar, sattes fel inställningar inför första testet av G2. Bredden på provet ställdes in till 995 mm istället för 99,5 mm. Detta ledde till att tryckpressen genererade en större kraft under kortare tid jämför med de andra proverna. Detta justerades sedan när de andra två proverna trycktestades.

Det avfallsglas som användes levererades i ett skick som inte var optimalt för gjutning. Behållarna innehöll dels andra material än glas, dels rester av mat samt limmade etiketter. I möjligaste mån avlägsnades andra material genom sortering, och i den rengöringsprocess som tidigare beskrivits försökte även lim och papper avlägsnas. Det var dock inte möjligt att fullständigt avlägsna allt papper och lim,

vilket kan ha påverkat hydratationen i fasgränserna.

Ytterligare en felkälla gäller grundtemperaturen för TPS-proverna. Som tidigare nämnt i kapitel 3.3.3 genomfördes mätningarna i ett klimatrum för att minimera störningar av omgivningens temperaturförändringar, dock var instrumentet kalibrerat till 21 °C trots att rumstemperaturen var cirka 20 °C. Denna skillnad i starttemperatur kan ha bidragit till avvikande resultat i den första mätningen då den första gradens temperaturökning ej uppmättes.

5.6 Framtida forskning

Resultaten från detta arbete visar på att det finns en viss potential i användningen av krossat avfallsglas som alternativ till ballast, men det står också klart att materialet uppvisar flera betydande brister. Tekniska och miljömässiga faktorer som framkommit under arbetets gång tydliggör att ytterligare forskning är nödvändig innan materialet kan betraktas som ett realistiskt alternativ till konventionell ballast i strukturella tillämpningar.

ASR bedöms vara den faktor som har störst betydelse för glasbetongens långsiktiga beständighet och riskerar att försämra materialet i sådan utsträckning att dess användbarhet som byggmaterial blir mycket begränsad. På grund av arbetets tidsram har ASR inte kunnat undersökas experimentellt, vilket utgör den mest kritiska begränsningen för studien. Därför bör framtida forskning inkludera långtidsstudier över ASR-progression.

I likhet med ovanstående studier bör även effekten av puzzolana tillsatsmaterial undersökas för att begränsa ASR i glasbetong. Flygaska, silikastoft, vulkanisk aska och finmalet glaspulver är möjliga tillsatser som identifierats i litteraturen. Vid intervju med Agnes Nagy, docent i byggt teknik vid Högskolan i Borås, framgick att relevant forskning på området redan pågår. Nagy är involverad i ett forskningsprojekt där återvunnet planglas undersöks som ersättningsmaterial för cement i prefabelement, och framhöll i en personlig intervju 2026 att finmalet glaspulver framkommit som ett möjligt puzzolaniskt material. En intressant fortsättning på detta projekt vore att undersöka om glaspulver även kan användas för att dämpa ASR i glasbetong av den sort som studerats i detta arbete.

Ytterligare en intressant aspekt vore att studera hur glasets färg kan påverka ASR-progressionen. Som nämnts i kapitel 2.4.2 har bland annat grönt glas uppvisat högre resistens mot ASR jämfört med transparent glas. Eftersom avfallsglas i detta arbete inte sorterades efter färg skulle det vara värdefullt att undersöka om glasbetong enbart med grönt glas kan bidra till att begränsa ASR utan användning av tillsatsmaterial, alternativt en kombination av de båda åtgärderna.

Då denna studie avgränsades till endast återvunnet förpackningsglas kan det även vara relevant att undersöka andra typer av glas, som exempelvis planglas från bygg- och rivningsavfall. Planglas saknar generellt välutvecklade cirkulära

återvinningsflöden vilket gör det särskilt intressant att studera ur ett resurs- och hållbarhetsperspektiv. Eftersom planglas delvis har en annorlunda kemisk sammansättning krävs ytterligare studier för att bedöma dess lämplighet som ballastersättning.

Ingjutning av armering i betong möjliggör upptagning av dragkrafter vilket öppnar upp för fler applikationsområden. Därför bör samverkan mellan armering och glasbetong undersökas. Särskilt bör eventuell sprickbildning och fuktinträngning och hur det påverkar korrosionsförloppet i stål studeras.

Slutligen krävs mer djupgående hållbarhetsanalyser för att säkerställa den faktiska miljönyttan med att använda glas som alternativ till ballast. De hållbarhetsaspekter som diskuteras i denna studie är övergripande och därför är en framtida, fullständig livscykelanalys och utvärdering av olika transportsценарion nödvändig. Det kan även vara relevant att specifikt studera lokal miljönytta på platser med mycket långa transportsträckor samt bristfällig glasåtervinning där glas hamnar på deponi.

6

Slutsats

Arbetets syfte var att undersöka möjligheten att använda krossat avfallsglas som ballast i betong samt att utvärdera materialets tekniska egenskaper och hållbarhetsaspekter. Resultaten visar att glasbetongen har flera tekniska egenskaper som begränsar dess applikationsmöjligheter, däremot finns det flera aspekter som gör materialet intressant ur både resurs- och miljöperspektiv.

De laborativa resultaten visar att glasbetongen generellt uppvisade lägre tryckhållfasthet än referensbetongen, vilket sannolikt kan kopplas till glasets släta ytstruktur samt dess flisiga och stängliga kornform som försämrar vidhäftningen i fasgränsen mellan ballast och cementpastan. Samtidigt uppvisade glasbetongerna tryckhållfasthetsvärden mellan 32,38 och 34,09 MPa. TPS-mätningarna visade även att glasbetongen hade något lägre värmekonduktivitet än konventionell betong, vilket indikerar förbättrade isolerande egenskaper. Däremot observerades även en lägre värmekapacitet, vilket innebär minskad termisk tröghet och därmed sämre förmåga att dämpa temperaturvariationer i byggnader. Resultaten för ångpermeabiliteten bedöms vara osäkra då stationärt tillstånd inte fullt uppnåddes under mätperioden. Viss linjäritet kunde dock observeras, vilket kan tyda på att proverna närmar sig ett stationärt tillstånd.

Den största osäkerheten kring glasbetongens långsiktiga användbarhet bedöms vara ASR. Eftersom glas innehåller höga halter kiseldioxid och de använda glasfraktionerna var relativt grova finns en betydande risk för ASR-relaterad sprickbildning och försämrad beständighet över tid. Detta har inte kunnat undersökas inom ramen för arbetet, men litteraturen visar tydligt att ASR är en avgörande faktor för glasbetongens långsiktiga prestation. Vidare forskning kring bland annat långtidsbeständighet och möjligheten att begränsa ASR med puzzolana tillsatser bedöms av denna anledning vara intressanta.

Ur ett hållbarhetsperspektiv visar arbetet att användningen av glas som ballast är komplext och starkt beroende av systemperspektiv och lokala förutsättningar. I områden där glasåtervinningen är begränsad kan glasbetong bidra till minskad deponering, minskat resursuttag och kortare transportsträckor. Samtidigt innebär användningen av glas som ballast att det förädlade glaset, som dessutom har hög återvinningspotential, binds in i en produkt där framtida separation och återvinning försvåras. Hållbarheten beror därför i stor utsträckning på om glas betraktas som avfall eller som en värdefull sekundär resurs i ett cirkulärt materialsystem.

För att sammanfatta resultaten och besvara arbetets frågeställningar presenterade i kapitel 1.2 kan följande slutsatser dras:

- Hur påverkar substitution av konventionell ballast med krossat avfallsglas betongens materialegenskaper?

Resultaten visar att glasballast generellt försämrar betongens tryckhållfasthet och arbetbarhet jämfört med referensbetongen, främst på grund av glasets geometri och sämre vidhäftning till cementpastan. Samtidigt har glasbetongen en lägre värmeledningsförmåga, och därmed bättre isolerande egenskaper, men den har en sämre värmelagringsförmåga. Vissa av glasbetongerna uppvisade även lägre ångpermeabilitet än referensbetongen.

- Vilken kornstorlek och kornstorleksfördelning av glas ger bäst resultat i förhållande till referensbetongen?

G1 som innehöll både 4/8 mm och 8/16 mm visade generellt de bästa resultaten bland glasbetongerna. Resultaten indikerar även att de mindre glasfraktioner ger en bättre arbetbarhet, tryckhållfasthet och packning än de grövre glasfraktionerna.

- Vilka hållbarhets- och miljömässiga konsekvenser medför användningen av avfallsglas som ballast?

Hållbarhetskonsekvenserna av avfallsglas i betong kan ses som både negativa och positiva. Glasballasten kan minska uttaget av naturresurser och deponivolymer, men kan samtidigt leda till ett avbrott i en cirkulär process där ett material med hög återvinningspotential nedcirkuleras.

Sammantaget visar arbetet att krossat avfallsglas har en viss potential men att materialet medför flera begränsningar som behöver beaktas. För att materialet ska kunna ses som ett långsiktigt hållbart alternativ krävs fortsatt forskning kring beständighet, ASR-problematik samt lokal miljöpåverkan av materialet.

Litteratur

- [1] Per Gunnar Burström. *Byggnadsmaterial – Tillverkning, egenskaper och användning*. 4. utg. Studentlitteratur AB, 2021.
- [2] UNEP. *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. Tekn. rapport. Geneva, Switzerland: GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, 2019.
- [3] Choong Real Baek, Hwidong D. Kim och Yong-Chul Jang. “Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories”. I: *Environmental Engineering Research* 30 (3 sept. 2024), s. 240241–. ISSN: 1226-1025. DOI: 10.4491/eer.2024.241.
- [4] Sveriges geologiska undersökning. *Grus, sand och krossberg 2024*. Tekn. rapport Periodiska publikationer 2025:3. Uppsala: SGU, 2025. URL: www.sgu.se.
- [5] Georgia Psyrri m. fl. “Abundant resources in an era of scarcity: Systemic aspects of the Global sand and gravel crisis”. I: *Resources, Conservation and Recycling* 225 (jan. 2026). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925005087>.
- [6] Bruno Estanqueiro m. fl. “Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete”. I: *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 22.4 (april 2018), s. 429–449. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19648189.2016.1197161>.
- [7] Mattias Göransson. *Ersättningsmaterial för naturgrus-kunskapsutställning och rekommendationer för användningen av naturgrus*. Tekn. rapport SGU-rapport 2015:35. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning, 2015. URL: www.sgu.se.
- [8] Mette Bendixen m. fl. “Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals: Conflicts, synergies, and pathways forward”. I: *One Earth* 4.8 (aug. 2021), s. 1095–1111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332221004097>.
- [9] Manirul Mia m. fl. “Environmental and Socio-economic Impacts of River Sand and Gravel Mining: A Review”. I: *Environmental Management* 76.3 (jan. 2026). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-025-02370-4>.
- [10] Thomas D. Dyer. “Glass Recycling”. I: *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. Elsevier Inc., maj 2014, s. 191–209. ISBN: 9780123965066. DOI: 10.1016/B978-0-12-396459-5.00014-3.
- [11] Harn Wei Kua m. fl. “A review of glass recycling policies in Stockholm, Hong Kong SAR and Shanghai from a circular economy perspective”. I: *Journal*

- of Cleaner Production* 434 (jan. 2024). ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140068.
- [12] Telesilla Bristogianni och Faidra Oikonomopoulou. "Glass up-casting: a review on the current challenges in glass recycling and a novel approach for recycling "as-is" glass waste into volumetric glass components". I: *Challenging Glass 8: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, CGC 2022*. Challenging Glass Conference (CGC), 2022, s. 255–302. DOI: 10.1007/s40940-022-00206-9.
- [13] Johan Silfwerbrand. *Betonghandbok: material - delmaterial samt färsk och hårdnande betong*. 3. utg. Svensk Byggtjänst, 2017.
- [14] Tord Isaksson, Annika Mårtensson och Sven Thelandersson. *Bärande konstruktioner: del 1*. 4. utg. Lund: Studentlitteratur, 2020. ISBN: 9789144139418.
- [15] Svenska institutet för standarder. *Provning av hårdnad betong – Del 1: Form, dimensioner och övriga krav på provkroppar och formar*. Tekn. rapport SS-EN 12390-1:2021. Stockholm: SIS, 2021.
- [16] Svenska institutet för standarder. *Ballast för betong*. Tekn. rapport SS-EN 12620+A1:2008. Stockholm: SIS, 2008.
- [17] Zhen Jiang m.fl. "Insights into the role of aggregate shape in enhancing rheology and reducing cement usage in concrete mixture design". I: *Journal of Building Engineering* 103 (juni 2025). URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85217425136?origin=resultslist>.
- [18] K. K.W. Premathilaka m.fl. "Application of recycled waste glass to replace traditional quarried aggregates: A comprehensive review". I: *Journal of Building Engineering* 86.4 (juni 2024). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224004145>.
- [19] P. Spiesz, S. Rouvas och H. J.H. Brouwers. "Utilization of waste glass in translucent and photocatalytic concrete". I: *Construction and Building Materials* 128 (dec. 2016), s. 436–448. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/84994045352>.
- [20] Jan Trägårdh. *ASR i svensk betong – vägledning för nya och befintliga konstruktioner*. Stockholm: Svenska betongföreningen, 2020. ISBN: 9789187591082.
- [21] Nada Al-Hellali m.fl. "Glass Waste as a Supplementary Cementitious Material in Climate Reduced Concrete – A Review". I: *Nordic Concrete Research* 72.1 (juni 2025), s. 167–181. DOI: 10.2478/NCR-2025-0012.
- [22] Heidelberg Materials. *Betongarbeten*. [Online]. Tillgänglig: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/betongarbeten> (hämtad: 2026-05-12). 2024.
- [23] Svenska institutet för standarder. *Provning av färsk betong-Del 2: Sättnått*. Tekn. rapport SS-EN 12350-2:2019. Stockholm: SIS, 2019.
- [24] Svenska institutet för standarder (SIS). *Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar*. Tekn. rapport SS-EN 12390-3:2019. Stockholm: SIS, 2019.
- [25] *Hot Disk Thermal Constants Analyser*. Version 5.9. Instruction manual. Hot Disk AB. Gothenburg, Sweden, 2007.

- [26] Payam Shafigh m. fl. “Thermal properties of cement mortar with different mix proportions”. I: *Materiales de Construcción* 70 (339 juli 2020), e224. ISSN: 0465-2746. DOI: 10.3989/mc.2020.09219.
- [27] Julia Chan. “Thermal properties of concrete with different Swedish aggregate materials”. Master’s Thesis. Lund, Sweden: Lund University, 2014. URL: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4358448>.
- [28] Franco Geotti-Bianchini och Joachim Lohrengel. “Thermal conductivity of float glass at room temperature”. I: *Glastechnische Berichte* 66.2 (1993), s. 25–29.
- [29] Yale Center for Green Chemistry and Green Engineering. *Principles of Green Engineering*. [Online]. Tillgänglig: <https://greenchemistry.yale.edu/about/principles-green-engineering> (hämtad: 2026-05-09).

A

Provresultat tryckhållfasthet

A.1 Provresultat tryckhållfasthet

Tabell A.1: Tryckhållfasthet efter 7 och 28 dagar

Prov	7 dagar		28 dagar	
	Densitet g/cm^3	Tryckhållfasthet MPa	Densitet g/cm^3	Tryckhållfasthet MPa
Referensbetong	2,19	42,69	2,37	49,17
G1	2,33	30,51	2,34	33,78
	2,32	31,55	2,30	34,34
	2,31	32,25	2,31	34,14
	2,26	29,03	2,26	32,34
G2	2,36	31,06	2,15	33,26
	2,30	29,36	2,19	34,20
	2,27	28,05	2,23	32,88
G3	2,27	28,82	2,25	34,13
	2,22	28,34	2,25	33,13

B

Beräkningar värmekonduktivitet

B.1 Omräkning för sanddensitet (M1:5)

```
% Omräkning för anpassning till sand densitet för val av recept ur
Thermal properties of cement mortar with different mix proportions
% Omräkning från givna sand cement förhållanden
sand_massa_original = 1626.6; % kg/m3
densitet_original = 2.55; % Ursprunglig densitet

% nya sand
densitet_ny = 1.702; % specifika densitet

% 1. Beräkna den volym sanden tog upp i ursprungsreceptet
sand_volym = sand_massa_original / densitet_original;

% 2. Beräkna den nya massan som krävs för att fylla samma volym
sand_massa_ny = sand_volym * densitet_ny;

% Presentera resultatet
fprintf('--- Omräkning för M1:5 ---\n')
fprintf('Originalmassa sand: %.1f kg/m3\n', sand_massa_original)
fprintf('Ny massa sand: %.1f kg/m3\n', sand_massa_ny)
fprintf('-----\n')
--- Omräkning för M1:5 ---
Originalmassa sand: 1626.6 kg/m3
Ny massa sand: 1085.7 kg/m3
-----
```

B.2 Värmekonduktivitet G1

```

% Beräkning av k_eff för betong med glasballast G1
clear; clc;
% Andel glas
Volym_glas=7.40;
Volym_tot=13.78;
% 1. Materialkonstanter
k_m = 2.43;      % Termisk ledningsförmåga Bruk [W/mK] från
Thermal properties of cement mortar with different mix proportions
k_p = 1.02;     % Termisk ledningsförmåga glas [W/mK]
från Thermal conductivity of float glass at room temperature se källor

phi_input=Volym_glas/Volym_tot; % Volymetrisk andel glas

% 3. Maxwells beräkning
% k_eff = k_m *
[ (k_p + 2*k_m + 2*phi*(k_p - k_m)) / (k_p + 2*k_m - phi*(k_p - k_m)) ]

numerator = k_p + 2*k_m + 2*phi_input*(k_p - k_m);
denominator = k_p + 2*k_m - phi_input*(k_p - k_m);

k_eff = k_m * (numerator / denominator);

% 4. Resultatpresentation
fprintf('\n--- Resultat ---\n');
fprintf('Vald volymandel glas: %.1f %%\n', phi_input * 100);
fprintf('Matrisens ledningsförmåga: %.2f W/mK\n', k_m);
fprintf('Glasets ledningsförmåga:  %.2f W/mK\n', k_p);
fprintf('-----\n');
fprintf('Beräknad effektiv ledningsförmåga: %.4f W/mK\n', k_eff);

% Enkel visuell jämförelse
diff_procent = ((k_eff - k_m) / k_m) * 100;
fprintf('Förändring jämfört med ren bruk: %.2f %%\n', diff_procent);
--- Resultat ---
Vald volymandel glas: 53.7 %
Matrisens ledningsförmåga: 2.43 W/mK
Glasets ledningsförmåga:  1.02 W/mK
-----
Beräknad effektiv ledningsförmåga: 1.5983 W/mK
Förändring jämfört med ren bruk: -34.22 %

```

B.3 Värmekonduktivitet G2

```
% Beräkning av k_eff för betong med glasballast G2
clear; clc;
% Andel glas
Volym_glas=4.74;
Volym_tot=13.98;
% 1. Materialkonstanter
k_m = 2.23;      % Termisk ledningsförmåga Bruk [W/mK] Thermal
properties of cement mortar with different mix proportions
k_p = 1.02;     % Termisk ledningsförmåga glas [W/mK]
från Thermalconductivity of float glass at room temperature se källor

phi_input=Volym_glas/Volym_tot; % Volymetrisk andel glas

% 3. Maxwells beräkning
% k_eff = k_m *
[ (k_p + 2*k_m + 2*phi*(k_p - k_m)) / (k_p + 2*k_m - phi*(k_p - k_m)) ]

numerator = k_p + 2*k_m + 2*phi_input*(k_p - k_m);
denominator = k_p + 2*k_m - phi_input*(k_p - k_m);

k_eff = k_m * (numerator / denominator);

% 4. Resultatpresentation
fprintf('\n--- Resultat ---\n');
fprintf('Vald volymandel glas: %.1f %%\n', phi_input * 100);
fprintf('Matrisens ledningsförmåga: %.2f W/mK\n', k_m);
fprintf('Glasets ledningsförmåga:   %.2f W/mK\n', k_p);
fprintf('-----\n');
fprintf('Beräknad effektiv ledningsförmåga: %.4f W/mK\n', k_eff);

% Enkel visuell jämförelse
diff_procent = ((k_eff - k_m) / k_m) * 100;
fprintf('Förändring jämfört med ren bruk: %.2f %%\n', diff_procent);
--- Resultat ---
Vald volymandel glas: 33.9 %
Matrisens ledningsförmåga: 2.23 W/mK
Glasets ledningsförmåga:   1.02 W/mK
-----
Beräknad effektiv ledningsförmåga: 1.7640 W/mK
Förändring jämfört med ren bruk: -20.90 %
```

B.4 Värmekonduktivitet G3

```

% Beräkning av k_eff för betong med glasballast G3
clear; clc;
% Andel glas
Volym_glas=4.74;
Volym_tot=13.98;
% 1. Materialkonstanter
k_m = 2.23;      % Termisk ledningsförmåga Bruk [W/mK] från Thermal
properties of cement mortar with different mix proportions
k_p = 1.02;      % Termisk ledningsförmåga glas [W/mK] från Thermal
conductivity of float glass at room temperature se källor

phi_input=Volym_glas/Volym_tot; % Volymetrisk andel glas

% 3. Maxwells beräkning
% k_eff = k_m *
[ (k_p + 2*k_m + 2*phi*(k_p - k_m)) / (k_p + 2*k_m - phi*(k_p - k_m)) ]

numerator = k_p + 2*k_m + 2*phi_input*(k_p - k_m);
denominator = k_p + 2*k_m - phi_input*(k_p - k_m);

k_eff = k_m * (numerator / denominator);
4. Resultatpresentation
fprintf('\n--- Resultat ---\n');
fprintf('Vald volymandel glas: %.1f %%\n', phi_input * 100);
fprintf('Matrisens ledningsförmåga: %.2f W/mK\n', k_m);
fprintf('Glasets ledningsförmåga:   %.2f W/mK\n', k_p);
fprintf('-----\n');
fprintf('Beräknad effektiv ledningsförmåga: %.4f W/mK\n', k_eff);

% Enkel visuell jämförelse
diff_procent = ((k_eff - k_m) / k_m) * 100;
fprintf('Förändring jämfört med ren bruk: %.2f %%\n', diff_procent);
--- Resultat ---
Vald volymandel glas: 33.9 %
Matrisens ledningsförmåga: 2.23 W/mK
Glasets ledningsförmåga:   1.02 W/mK
-----
Beräknad effektiv ledningsförmåga: 1.7640 W/mK
Förändring jämfört med ren bruk: -20.90 %

```

B.5 Provresultat värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet

Tabell B.1: Alla uppmätta värmekonduktivitet och volymetrisk värmekapacitet

Prov	Värmekonduktivitet, k ($W/m \cdot K$)					Vol. värmekapacitet, ($MJ/m^3 \cdot K$)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Referens	1.41	2.03	2.20	2.27	2.28	3.272	2.77	2.19	2.11	1.06
G1	1.13	1.37	1.34	1.32	1.309	1.91	1.86	1.90	1.95	1.98
G2	1.00	1.55	1.63	1.66	1.77	2.50	1.80	1.74	1.66	1.44
G3	1.33	1.61	1.54	1.57	1.54	1.70	1.62	1.69	1.67	1.71

C

Beräkningar fukttransport

C.1 Indata för koppmetoden

Tabell C.1: Mätresultat från koppmetoden. Massan anges i gram.

Dag	Datum	Mätning	G1	G2	G3	Ref
1	20-apr	Startvärde	574,67	560,87	577,33	594,59
2	21-apr	Mätning 2	574,62	560,86	577,31	594,54
3	22-apr	Mätning 3	574,62	560,86	577,22	594,55
4	23-apr	Mätning 4	574,62	560,86	577,22	594,55
5	24-apr	Mätning 5	574,52	560,84	577,20	594,53
8	27-apr	Mätning 6	574,44	560,74	577,12	594,43
10	29-apr	Mätning 7	574,36	560,64	577,04	594,34
12	01-maj	Mätning 8	574,34	560,58	577,01	594,29
15	04-maj	Mätning 9	574,34	560,52	576,98	594,24
17	06-maj	Mätning 10	574,28	560,43	576,90	594,15
19	08-maj	Mätning 11	574,28	560,40	576,90	594,11
22	11-maj	Mätning 12	574,27	560,30	576,84	594,01

C.2 Fukttransport referensbetong

% Beräkningar ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd för referensprov

clear; clc;

%Ingångsvärden

d = 0.1; % [m] Diameter på prov

A = d²*pi/4; % [m²] Area prov

% Beräkna ångflödet

m1=0.59453 ; % [kg]

m2=0.59401 ; % [kg]

deltat = 1468800; % [s]

g = ((m1-m2)/deltat)*(1/A) % [kg/(m²*s)]

% Total ånghaltsskillnad

vs = 17.3e-3; % [kg/m³]

v = 0.5*vs; % [kg/m³]

deltavtot = vs-v % [kg/m³]

% Luftspaltens motstånd

deltaluft = 25e-6; % [m²/s]

dkopp = 0.075; % [m]

dmaterial = 0.020; % [m]

dvatten = 0.018; % [m]

dluft = dkopp-dmaterial-dvatten % [m]

Zluft = dluft/deltaluft % [s/m]

% Totalt ånggenomgångsmotstånd

Ztot = deltavtot/g % [s/m]

% Materialets ånggenomgångsmotstånd

Zmaterial = Ztot-Zluft % [s/m]

```
% Ångpermeabilitet
```

```
deltamaterial = dmaterial/Zmaterial %[m^2/s]
```

```
% Resultat
```

```
fprintf('Ånggenomgångsmotstånd för referensprovet:\n')
```

```
fprintf('Z = %.2e s/m\n\n', Zmaterial)
```

```
fprintf('Ångpermeabilitet för referensprovet:\n')
```

```
fprintf('delta = %.2e m^2/s\n', deltamaterial)
```

```
g =
```

```
4.5077e-08
```

```
deltavtot =
```

```
0.0086
```

```
dluft =
```

```
0.0370
```

```
Zluft =
```

```
1.4800e+03
```

```
Ztot =
```

```
1.9190e+05
```

```
Zmaterial =
```

```
1.9042e+05
```

```
deltamaterial =
```

```
1.0503e-07
```

C. Beräkningar fukttransport

Ånggenomgångsmotstånd för referensprovet:

$$Z = 1.90e+05 \text{ s/m}$$

Ångpermeabilitet för referensprovet:

$$\text{delta} = 1.05e-07 \text{ m}^2/\text{s}$$

C.3 Fukttransport G1

% Beräkningar ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd för prov G1

clear; clc;

%Ingångsvärden

d = 0.1; % [m] Diameter på prov
 A = d²*pi/4; % [m²] Area prov

% Beräkna ångflödet

m1=0.57444; % [kg]
 m2=0.57427; % [kg]

deltat = 1468800; % [s]

g = ((m1-m2)/deltat)*(1/A) % [kg/(m²*s)]

% Total ånghaltsskillnad

vs = 17.3e-3; % [kg/m³]
 v = 0.5*vs; % [kg/m³]

deltavtot = vs-v % [kg/m³]

% Luftspaltens motstånd

deltaluft = 25e-6; % [m²/s]

dkopp = 0.075; % [m]
 dmaterial = 0.020; % [m]
 dvatten = 0.018; % [m]

dluft = dkopp-dmaterial-dvatten % [m]

Zluft = dluft/deltaluft % [s/m]

% Totalt ånggenomgångsmotstånd

Ztot = deltavtot/g % [s/m]

% Materialets ånggenomgångsmotstånd

Zmaterial = Ztot-Zluft % [s/m]

C. Beräkningar fukttransport

```
% Ångpermeabilitet

deltamaterial = dmaterial/Zmaterial %[m^2/s]

% Resultat

fprintf('Ånggenomgångsmotstånd för G1:\n')
fprintf('Z = %.2e s/m\n\n', Zmaterial)

fprintf('Ångpermeabilitet för G1:\n')
fprintf('delta = %.2e m^2/s\n', deltamaterial)
g =

    1.4737e-08

deltavtot =

    0.0086

dluft =

    0.0370

Zluft =

    1.4800e+03

Ztot =

    5.8698e+05

Zmaterial =

    5.8550e+05

deltamaterial =

    3.4159e-08
```

Ånggenomgångsmotstånd för G1:

$$Z = 5.85e+05 \text{ s/m}$$

Ångpermeabilitet för G1:

$$\text{delta} = 3.42e-08 \text{ m}^2/\text{s}$$

C.4 Fukttransport G2

% Beräkningar ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd för prov G2

clear; clc;

%Ingångsvärden

d = 0.1; % [m] Diameter på prov

A = d²*pi/4; % [m²] Area prov

% Beräkna ångflödet

m1 = 0.56084; % [kg]

m2 = 0.5603; % [kg]

deltat = 1468800; % [s]

g = ((m1-m2)/deltat)*(1/A) % [kg/(m²*s)]

% Total ånghaltsskillnad

vs = 17.3e-3; % [kg/m³]

v = 0.5*vs; % [kg/m³]

deltavtot = vs-v % [kg/m³]

% Luftspaltens motstånd

deltaluft = 25e-6; % [m²/s]

dkopp = 0.075; % [m]

dmaterial = 0.020; % [m]

dvatten = 0.018; % [m]

dluft = dkopp-dmaterial-dvatten % [m]

Zluft = dluft/deltaluft % [s/m]

% Totalt ånggenomgångsmotstånd

Ztot = deltavtot/g % [s/m]

% Materialets ånggenomgångsmotstånd

Zmaterial = Ztot-Zluft % [s/m]

```
% Ångpermeabilitet

deltamaterial = dmaterial/Zmaterial %[m^2/s]

% Resultat

fprintf('Ånggenomgångsmotstånd för G2:\n')
fprintf('Z = %.2e s/m\n\n', Zmaterial)

fprintf('Ångpermeabilitet för G2:\n')
fprintf('delta = %.2e m^2/s\n', deltamaterial)
g =

    4.6810e-08

deltavtot =

    0.0086

dluft =

    0.0370

Zluft =

    1.4800e+03

Ztot =

    1.8479e+05

Zmaterial =

    1.8331e+05

deltamaterial =

    1.0911e-07
```

C. Beräkningar fukttransport

Ånggenomgångsmotstånd för G2:

$$Z = 1.83e+05 \text{ s/m}$$

Ångpermeabilitet för G2:

$$\text{delta} = 1.09e-07 \text{ m}^2/\text{s}$$

C.5 Fukttransport G3

% Beräkningar ångpermeabilitet och ånggenomgångsmotstånd för prov G3

clear; clc;

%Ingångsvärden

d = 0.1; % [m] Diameter på prov
 A = d²*pi/4; % [m²] Area prov

% Beräkna ångflödet

m1 = 0.57720; % [kg]
 m2 = 0.57684; % [kg]

deltat = 1468800; % [s]

g = ((m1-m2)/deltat)*(1/A) % [kg/(m²*s)]

% Total ånghaltsskillnad

vs = 17.3e-3; % [kg/m³]
 v = 0.5*vs; % [kg/m³]

deltavtot = vs-v % [kg/m³]

% Luftspaltens motstånd

deltaluft = 25e-6; % [m²/s]

dkopp = 0.075; % [m]
 dmaterial = 0.020; % [m]
 dvatten = 0.018; % [m]

dluft = dkopp-dmaterial-dvatten % [m]

Zluft = dluft/deltaluft % [s/m]

% Totalt ånggenomgångsmotstånd

Ztot = deltavtot/g % [s/m]

% Materialets ånggenomgångsmotstånd

Zmaterial = Ztot-Zluft % [s/m]

C. Beräkningar fukttransport

```
% Ångpermeabilitet

deltamaterial = dmaterial/Zmaterial %[m^2/s]

% Resultat

fprintf('Ånggenomgångsmotstånd för G3:\n')
fprintf('Z = %.2e s/m\n\n', Zmaterial)

fprintf('Ångpermeabilitet för G3:\n')
fprintf('delta = %.2e m^2/s\n', deltamaterial)
g =

    3.1207e-08

deltavtot =

    0.0086

dluft =

    0.0370

Zluft =

    1.4800e+03

Ztot =

    2.7718e+05

Zmaterial =

    2.7570e+05

deltamaterial =

    7.2542e-08
```

Ånggenomgångsmotstånd för G3:

$$Z = 2.76e+05 \text{ s/m}$$

Ångpermeabilitet för G3:

$$\text{delta} = 7.25e-08 \text{ m}^2/\text{s}$$

D

Produktblad

Denna bilaga innehåller produktblad för det cement som användes vid tillverkning av betongproverna.

Byggcement Skövde

CEM II/A-LL 42,5 R

Byggcement Skövde är ett Portlandkalkstenscement tillverkat i Skövde.

Byggcement uppfyller nedanstående data. Vid enstaka tillfällen kan produktens egenskaper avvika från angivna värden och intervall.

Egenskap		Värde	Intervall	Krav i SS-EN 197-1
Kompaktdensitet (kg/m ³)		3070	±20	-
Bulkdensitet (kg/m ³)		1000	±200	-
Bindetid (min)		150	±30	≥ 60
Specifik yta (blaine, m ² /kg)		490	±30	-
Ljushet (%)		26	± 1	-
Tryckhållfasthet (MPa)	1 dygn	23	± 3	-
	2 dygn	35	± 3	≥ 20,0
	28 dygn	55	± 4	≥ 42,5 / ≤ 62,5
Sulfathalt, SO ₃ (%)		≤ 4,0	-	≤ 4,0
Alkali, Na ₂ O _{ekv} (%)		0,95	± 0,1	-
Klorid, Cl ⁻ (%)		0,03	± 0,01	≤ 0,10
Vattenlöslig Cr ⁶⁺ (PPM)		0-2	-	≤ 2 ¹
Klinker (%)		≥ 80	-	80-94
Kalksten (%)		≤ 20	-	6-20

¹ Punkt 47 i bilaga XVII till REACH.

Lagringstiden begränsas till max 18 månader från förpackningsdatum för obruten 20-kilossäck, 12 månader från förpackningsdatum för obruten storsäck samt 6 månader från leveransdatum för löst i silo (bulk).

För information och skyddsanvisningar, se säkerhetsdatablad.

INSTITUTIONEN FÖR något ämne
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS