

Examensarbete i byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, VT2015

Husbyggnadsbetong med höga halter av tillsatsmaterial

En studie av hur stora mängder av kalcinerad lera, flygaska och mald granulerad masugnsslagg förändrar betongens hållfasthetsutveckling, uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning.



LUND
UNIVERSITY

Abdel Ali
Joacim Lundberg

Copyright © Abdel Ali & Joacim Lundberg, 2015

Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi,
Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund

ISRN LUTVDG/TVBM-15/5103-SE (1-160)
Lunds Tekniska Högskola
Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi
Byggnadsmaterial
Box 118
SE-221 00 LUND

Förord

Denna rapport är produkten av ett examensarbete på civilingenjörsutbildningen Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Detta examensarbete har genomförts vid avdelningen för Byggnadsmaterial samt avdelningen för Konstruktionsteknik, institutionen för Bygg- och miljöteknologi.

Vi vill tacka våra handledare Katja Fridh vid avdelningen för Byggnadsmaterial och Oskar Larsson vid avdelningen för Konstruktionsteknik för deras handledning under arbetets gång och för intressanta och givande diskussioner. Vidare vill vi även tacka Bengt Nilsson, Stefan Backe, Bo Johansson vid avdelningen för Byggnadsmaterial samt Per-Olof Rosenkvist vid avdelningen för Konstruktionsteknik för deras värdefulla hjälp och instruktioner vid allt praktiskt arbete. Ett tack vill även riktas till Lars Wadsö för all hjälp med kalorimetriundersökningarna samt Paul Sandberg, för hans hjälp med bedömningen av resultaten från kalorimetriundersökningen.

Ett särskilt tack riktas även till företaget Saint-Gobain Weber som har tillhandahållit den kalcinerade leran.

Lund, maj 2015

Abdel Ali, Joacim Lundberg

Sammanfattning

- Titel:** Husbyggnadsbetong med höga halter av tillsatsmaterial – En studie av hur stora mängder av kalcinerad lera, flygaska och mald granulerad masugnsslagg förändrar betongens hållfasthetsutveckling, uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning
- Författare:** Abdel Ali, Joacim Lundberg
- Handledare:** Katja Fridh – *Universitetslektor, Teknisk Doktor, Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.*
Oskar Larsson – *Forskare, Teknisk Doktor, Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, avdelning Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola.*
- Examinator:** Peter Johansson – *Universitetslektor, Teknisk Doktor, Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.*
- Problemställning:** Cementproduktionen står idag för ca 5% av världens koldioxidutsläpp, vilket har stor negativ påverkan på klimatet. För att minska utsläppen behöver cementanvändningen reduceras genom t.ex. ersätta cement med andra material, såsom flygaska, mald granulerad masugnsslagg och kalcinerad lera.
- Syfte:** Syftet är att undersöka den maximala vol.% cement som kan ersättas med flygaska, slagg och kalcinerad lera för husbyggnadsbetong och vidare undersöka hur betongens egenskaper som hållfasthetsutveckling, uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning förändras utan att dessa egenskaper minskas för mycket.
- Metod:** Studien inleddes med en litteraturstudie för att få mer kunskap om ämnet. Sedan genomfördes flera experimentella studier för att undersöka olika egenskaper för att svara på frågeställningarna. För att försöka få representativa prover för husbyggnadsbetong försöktes vct hållas till 0,6. Genom kalorimetrimätningar avgjordes vilken maximal ersättningsgrad som kunde användas för

de slutgiltiga provkropparna. Proverna testades regelbundet efter produktion. För speciellt hållfasthetstesterna provades kubhållfastheten efter 3-, 7- respektive 28-dygn. Av de olika betongsorterna utfördes en sulfatoptimering av den kalcinerade leran för att få en uppfattning om en sådan kunde medföra en högre ersättningsgrad. Sulfatoptimering gjordes endast för den kalcinerade leran då tanken uppstod efter att övriga recept redan var gjutna.

Slutsatser:

Flygaska

I denna studie ersattes 55 resp. 75 vol.% cement med flygaska och visar att vid ökande mängd flygaska försämras samtliga undersökta egenskaper. Vid mer än 55 vol.% sker det ingen uttorkning, vilket innebär att det inte är lämpligt att använda så höga ersättningsmängder i husbyggnadsbetong där snabb uttorkning krävs, t.ex. vid mattläggning.

Jämfört med referensbetongen ökar krympningen, dock är denna krympning marginellt större än referensbetongen. Det är svårt att bedöma risken för krympsprickor men troligtvis är risken större för betong med hög vol.% flygaska då denna betong har sämre elasticitetsmodul än referensbetongen (betong utan ersättning av cement).

Både böjdraghållfastheten samt böjstyvheten minskar med ökande mängd flygaska. Det är dock oklart huruvida betongsorterna är användbara i produktion ur böjstyvhets synpunkt.

Studien visar också att det inte är lämpligt att gjuta betong med 75 vol.% flygaska eller mer då betongen är för svag och benägen att spricka samt kraterbildning om den utsätts för slag eller borrar (se Figur 40).

Sötvattengranulerad masugnsslagg

I denna studie har cementersättning av 70 resp. 90 vol.% slagg undersökts. Hållfasthetsutvecklingen försämras (31 MPa respektive 15,5 MPa vid 28 dygn i jämförelse med referensbetongens 41 MPa) men båda betongsorterna verkar lovande för användning inom husbyggnation i t.ex.

platta på mark där dagens tryckhållfasthet är mycket överdimensionerande.

Efter ungefär två veckor har betongen med 70 vol.% slagg torkat mer än referensbetongen, medan betongen med 90 vol.% slagg torkar långsammare än referensbetongen. Däremot kommer troligtvis betongen med 90 vol.% slagg någon gång i framtiden ha torkat mer än referensbetongen, vilket beror på att slaggreaktionen sker senare och är dessutom mycket långsammare än cementreaktionen.

Både böjdraghållfastheten och böjstyvheten minskar med ökande andel slagg. Det är dock oklart om dessa betongsorter är användbara ur dessa avseenden.

Till skillnad från 75 vol.% flygaska har 90 vol.% slagg ingen benägenhet att spricka vid slag eller borring.

Kalcinerad lera

I denna studie har cementersättning av 30 resp. 55 vol.% sulfatoptimerad kalcinerad lera undersökts. Dessa betongsorter har ungefär samma egenskaper som referensbetongen förutom när det gäller uttorkningen. 30 vol.% lera torkar snabbare än referensbetongen samtidigt som 50 vol.% knappt uppvisar uttorkning.

Nyckelord:

Flygaska; mald granulerad masugnsslagg; kalcinerad lera; cement; koldioxidutsläpp; uttorkning; böjstyvhet; tryckhållfasthet; böjdraghållfasthet; krympning.

Abstract

- Title:** Concrete for buildings with high levels of supplementary cementitious materials – A study of how high levels of calcined clay, fly ash and ground granulated blast furnace slag influences the strength development, desiccation, bending stiffness, flexural strength and shrinkage
- Authors:** Abdel Ali, Joacim Lundberg
- Supervisors:** Katja Fridh – *PhD. Senior Lecturer, Faculty of Engineering, division of Building Materials, LTH.*
Oskar Larsson – *PhD, Faculty of Engineering, division of Structural engineering, LTH.*
- Examiner:** Peter Johansson – *PhD. Senior Lecturer, Faculty of Engineering, division of Building Materials, LTH.*
- Problem:** The production of cement stands today for approximately 5% of the world total emission of carbon dioxide, which has negative impact on the environment. In order to reduce the emission, the use of cement has to be reduced by e.g. replacing some of the cement with other materials.
- Purpose:** The purpose is to find the maximum amount of fly ash, slag and calcined clay that can be used in concrete and study how this may change the properties of the concrete without achieving a too large reduction of these properties.
- Method:** This study was initiated by doing a literature study to get more knowledge about the subject. Later on several experimental studies was performed to study different properties to answer the questions. By trying to achieve representative samples of a house building concrete, a water-cement ratio of 0,6 was used. By calorimeter measurements the maximum replacement rates usable for the final samples was conducted. The samples were tested regularly after production. Especially for the compressive strength measurements the samples was tested at 3, 7 and 28 days. A sulphate optimization was performed for the recipes with calcined clay to achieve an indication if an optimization might allow a greater cement replacement.

This optimization was only done for the calcined clay since the idea came after the other recipes already were produced.

Conclusions:

Fly ash

In this study 55% respectively 75% of cement volume was replaced with fly ash. The study shows that increase of fly ash has a negative effect on all the studied properties. If more than 55 vol.% is used, then there will be no dehydration. This means that concrete with this high amount of fly ash is not suited for concrete that is going to be used in projects where fast dehydration is desired.

The early shrinkage of both concrete types is almost the same as the reference concrete, but even so it's still hard to evaluate the risk of cracks caused by shrinkage. The risk of cracks is probably higher for these fly ash concretes due to that the concrete with high amount of fly ash has much lower elastic modulus (Young's modulus) than the reference concrete (concrete without cement replacement).

Both the flexural strength and the bending stiffness decrease with increased replacement rate of fly ash. It is unclear however if these concrete types are still useable in production from a bending stiffness point of view.

The study also shows that concrete with more than 75 vol.% fly ash has a high risk of cracking when drilling or dropping something heavy. This means that it's not suitable to build with concrete that has this high amount of fly ash.

Slag

In this study 70% respectively 90% of cement volume was replaced with slag. Higher amount of slag results in lower compressive strength (31 MPa and 15,5 MPa respectively at 28 days compared to the reference concretes 41 MPa), but the compressive strength is still promising to be high enough to be used in buildings, for example a slab on the ground where the compressive strength today is oversized.

After approximately two weeks the relative humidity, RH, in the concrete with 70 vol.% slag was lower than the

reference concrete while the concrete with 90 vol.% slag had a higher RH. However, since the slag reaction starts later than the cement reaction, there is a possibility that sometime the RH will be lower in the concrete with 90 vol.% slag.

Both the flexural strength and the bending stiffness decrease with increased replacement rate of fly ash. It is unclear however if these concrete types are still useable in production from a bending stiffness point of view.

Unlike the concrete with 75 vol.% fly ash, the concrete with 90 vol.% slag doesn't crack when drilling.

Calcined clay

In this study 30% respectively 50% of the cement volume was replaced with calcined clay. The study shows that both these concrete types have almost the same properties as the reference concrete except when it comes to dehydration.

The concrete with 30 vol.% clay dehydrates earlier and faster than the reference concrete while the concrete with 50 vol.% clay only shows small signs of dehydration.

Keywords:

Fly ash; ground granulated blast furnace slag; calcined clay; cement; carbon dioxide; dehydration; bending stiffness; compressive strength; flexural strength; shrinkage.

Innehållsförteckning

Förord.....	iii
Sammanfattning	v
Abstract.....	ix
Innehållsförteckning	xiii
Förkortningar.....	1
1 Inledning	3
1.1 Bakgrund.....	3
1.2 Frågeställning	3
1.3 Syfte	4
1.4 Avgränsning	4
2 Metod	5
2.1 Litteraturstudie	5
2.2 Experimentella studier.....	5
2.3 Forskningsmetodik	5
2.4 Tillförlitlighet	5
2.5 Validitet	6
2.6 Analysprocessen.....	7
3 Material	9
3.1 Betong.....	9
3.2 Färsk betong	10
3.3 Ballast	12
3.4 Vatten	12
3.5 Cement.....	13
3.5.1 Portlandcement.....	13
3.5.2 Cementets kemiska sammansättning och dess betydelse.....	15
3.5.3 Hydratation.....	17
3.6 Puzzolaner/tillsatsmaterial	18
3.6.1 Flygaska	19

3.6.2	Mald granulerad masugnsslagg	21
3.6.3	Kalcinerad lera	23
4	Teori.....	25
4.1	Värmeutveckling.....	25
4.1.1	Sulfatoptimering.....	25
4.2	Hållfasthetsutveckling.....	25
4.3	Fukt i betong.....	26
4.3.1	Uttorkning av betong	27
4.3.2	Självuttorkning	30
4.4	Böjstyvhet.....	30
4.4.1	Elasticitetsmodul	30
4.5	Böjdraghållfasthet	31
4.6	Krympning	32
5	Kostnad	33
6	Miljö	35
7	Recept.....	37
8	Experimentell metodik.....	39
8.1	Värmeutveckling.....	39
8.2	Tillverkning och lagring	40
8.2.1	Lagring av provkroppar	45
8.3	Hållfasthetsutveckling.....	46
8.4	Uttorkning av betong	46
8.5	Böjstyvhet.....	48
8.6	Böjdraghållfasthet	51
8.7	Krympning	52
8.8	Empiriska samband mellan tryckhållfasthet – böjdraghållfasthet och tryckhållfasthet – elasticitetsmodul	53
9	Resultat och diskussion	57
9.1	Värmeutveckling.....	57
9.2	Färska betongens egenskaper	61

9.3	Tryckhållfasthet	66
9.4	Uttorkning av betong	67
9.5	Böjdraghållfasthet	72
9.6	Böjstyvhet	74
9.7	Krympning och viktminskning.....	76
10	Slutsatser	81
10.1	Flygaska	81
10.2	Sötvattengranulerad masugnsslagg	82
10.3	Kalcinerad lera.....	84
11	Förslag för framtida studier	87
11.1	Utifrån materialperspektiv	87
11.2	Utifrån konstruktionsteknikperspektiv.....	88
	Bilaga 1: Betongrecept och färska betongens egenskaper.....	93
	Bilaga 2: Värmeutveckling	101
	Bilaga 3: Hållfasthetsutveckling	121
	Bilaga 4: Uttorkning	127
	Bilaga 5: Krympning och viktminskning	131
	Bilaga 6: Böjstyvhet och böjdraghållfasthet.....	137

Innehållsförteckning

Förkortningar

I detta arbete används ett antal förkortningar. Förkortningarna kommer att skrivas i fullständigt namn första gången de beskrivs, och därefter används förkortningar.

CaSO₄	Kalciumsulfat/gips
CH	Kalciumhydroxid
C₂S	Dikalciumsilikat (belit)
C₃S	Trikalciumsilikat (alit)
MGMS	Mald granulerad masugnsslagg/granulerad masugnsslagg
MK	Metakaolin
RF	Relativ fuktighet
Vbt	Vattenbindemedeltal
Vct	Vattencementtal

Förkortningar

1 Inledning

Det inledande kapitlet beskriver studiens bakgrund, frågeställning, syfte, mål och avgränsning.

1.1 Bakgrund

Idag står cementproduktionen för ca 5-8% av världens koldioxidutsläpp [1]. När cement tillverkas av råmaterialen kalksten och lera, avges koldioxid från råmaterialet, s.k. kalcinering [2], vilket är dåligt ur klimatperspektiv. En lösning är att använda en mindre andel cement genom att ersätta det med andra förenliga material, så kallade ersättningsmaterial. På så vis kan koldioxidutsläppen per viktenhet betong minskas.

Sedan många år tillbaka ersätts mindre mängder cement av flygaska, silika och mald granulerad masugnsslagg (MGMS). Flygaska, MGMS och silika är alla restprodukter från olika industrier som tidigare hamnade i deponi. Genom att använda dessa produkter i betong har inte bara cementanvändningen minskat, utan även deponiavfallet. Ett stort problem med restprodukter som flygaska och MGMS är att de är fortfarande bara rester från andra industrier och tillverkas inte i huvudsyfte för att användas i betong. Enligt [3] uppgår idag mängden flygaska till ungefär 30% av den globala cementproduktionen samtidigt som motsvarande mängd slagg är ungefär 5%. Detta innebär att andra material behöver beaktas då andelen flygaska respektive slagg inte kommer att räcka till. Det mest lovande verkar idag vara att använda sig av kalcinerad lera [1], [3].

Idag finns ett antal olika cementprodukter ute på marknaden som är mer miljövänliga än traditionell cement. En sådan produkt är Cementas Bascement, som innehåller ca 16% flygaska, [4], och är tänkt att användas i husproduktion.

I denna studie skall så stora mängder av cementvolymen som möjligt ersättas med flygaska, MGMS eller kalcinerad lera utan att få allt för försämrade egenskaper. Denna ersättningsgrad bestäms genom att undersöka hur värmeutvecklingen ändras beroende på cementets ersättningsgrad. Därefter har betongens hållfasthetsutveckling, uttorkning, böjstyvhets, böjdraghållfasthet och krympning undersöks ytligt, d.v.s. detta är ingen kvalitativ studie.

1.2 Frågeställning

Denna studie skall för en husbyggnadsbetong besvara följande frågeställningar:

1. Hur stor andel av cementvolymen kan ersättas med flygaska, MGMS eller kalcinerad lera och fortfarande bibehålla hållfasthetsutveckling?

2. Hur förändras betongens egenskaper som hållfasthetutveckling, uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning i förhållande till en vanlig betong utan användandet av tillsatsmaterial?
3. Kan de generella samband mellan tryckhållfasthet och t.ex. böjdraghållfasthet och elasticitetsmodul fortfarande användas trots hög ersättningsgrad av cement?
4. Kan dessa betongsorter med hög ersättningsgrad fortfarande användas inom husproduktion?

1.3 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att till en början undersöka hur stor andel av cementvolymen som kan ersättas med tillsatsmaterialen flygaska, MGMS och kalcinerad lera och fortfarande få en betong som kan användas ute i husproduktion, d.v.s fortfarande ha sådan arbetbarhet, hydratationshastighet samt hållfasthetutveckling så att hus fortfarande kan produceras och börja användas inom rimlig tid. Detta innebär dels att arbetbarheten samt hållfasthetutvecklingen behöver utvärderas före övriga egenskaper kan undersökas. Därefter kommer betongens egenskaper som uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning undersökas.

1.4 Avgränsning

Examensarbetet motsvarar 20 veckors heltidsstudier. Detta innebär att arbetet behöver begränsas, då arbetet måste genomföras inom denna tidsram.

I denna studie har vissa utvalda intressanta egenskaper för husprojekt undersökts genom en experimentell studie. Av dessa intressanta egenskaper har böjstyvhet, böjdraghållfasthet och hållfasthetutvecklingen undersökts med tre provkroppar vid varje prövningstillfälle. För krympningstesten har två provkroppar använts och för uttorkningen har en provkropp per recept använts.

Anledningen till att examensarbetet har avgränsats till att undersöka betong i husprojekt är för att det är mest troligt att det är där som denna typ av betong först kommer att användas, till skillnad från anläggningsprojekt där byggbranschen är mycket mer konservativ.

2 Metod

Studien inleddes med en litteraturstudie för att förstå målet och syftet med arbetet. Utifrån detta upprättades en tidplan, samt en förstudie genomfördes för att få bättre kunskap inom ämnet och för att veta vilka egenskaper som är intressanta att undersöka samt på vilket sätt problematiken skall angripas.

2.1 Litteraturstudie

Betonghandboken i material används som en grundläggande källa. Dock är denna källa flera decennier gammal och kräver komplettering med nyare forskning från artiklar och rapporter inom området. Artiklarna och rapporterna har hämtats via sökmotorerna LUBsearch, Engineering Village och LIBRIS. Författarna har bedömt alla källor som trovärdiga då de kommer från Lunds Tekniska Högskola, andra högre läroverk och forskningsinrättningar runt om i världen, alternativt från stora aktörer inom branschen, till exempel Cementsa.

2.2 Experimentella studier

För att kunna svara på frågeställningarna krävs det genomförande av experimentella studier. Dessa studier har genomförts vid Lunds Tekniska Högskolas nya betonglaboratorium. Varje laboration förbereddes noggrant genom att se till att deltagande laboranter hade goda teoretiska och praktiska kunskaper. Alla laborationer har dokumenterats både skriftligt och genom fotografering för att underlätta analysprocessen.

2.3 Forskningsmetodik

I denna studie har samtliga egenskaper undersökts genom en experimentell studie. Detta innebär att trender har studerats genom att genomföra ett antal tester. Enligt betonghandboken i konstruktion [5] måste vanligtvis minst tre provkroppar testas vid varje provningstillfälle för att få en tillräckligt god tillförlitlighet.

Uttorkningen och krympningen har endast undersökts med en respektive två provkroppar per betongrecept. Detta för att syftet med denna studie inte är att genomföra en djupare studie, utan endast en förstudie för att avgöra om det är intressant att genomföra en större studie i framtiden.

2.4 Tillförlitlighet

När en studie har genomförts är det viktigt att andra ska kunna granska författarnas slutsatser, samt genomföra studien och få liknande resultat. Det talas då om god reliabilitet vilket innebär att vid upprepade försök erhålls liknande

resultat oberoende av vem som genomför studien. Reliabilitet anger tillförlitligheten på parametrar och resultat [6].

För att få en god reliabilitet krävs det att tillräckligt många tester genomförs. Ju fler tester som genomförs, desto högre blir reliabiliteten.

I denna studie finns det en rad olika faktorer som påverkar reliabiliteten. Den största faktorn är antalet provkroppar som varierar mellan en till tre stycken. Detta innebär att standardavvikelsen kan vara något högre eller lägre än verkligheten. En annan faktor är att samtliga provkroppar har gjutits från samma betongsats. I verkligheten är det i princip omöjligt att vid varje gjutning få exakt samma betongsats. För att få en god reliabilitet bör det därför genomföras flera gjutningar med olika betongsatser. Den mänskliga faktorn, omgivningens temperatur och relativ fuktighet är exempel på några faktorer som kan påverka betongsatsens egenskaper.

Studiens reliabilitet för hållfasthetutvecklingen, böjstyvhet och böjdraghållfasthet anses vara god då minst tre provkroppar har testats vid varje provningstillfälle, vilket också anses vara minsta antalet provkroppar som bör användas krävet enligt betonghandboken i konstruktion [5]. Med tre provkroppar kan större avvikelser upptäckas och genomföra bedömningar huruvida provningarna är tillförlitliga. Däremot anses reliabiliteten vara låg för fri uttorkning, självuttorkning samt krympning där endast ett prov respektive två prov för varje recept undersöktes, vilket egentligen är för lite. Anledningen till att det tas mindre prov för att undersöka dessa egenskaper är att detta är en initial studie för att försöka se tendenser, och inte för fullskaliga försök.

2.5 Validitet

Efter genomförandet av en studie är det också viktigt att resultaten är valida och att det som skall undersökas har undersökts [6]. Det är då av stor vikt att det finns klara mått och mätmetoder.

Studiens validitet anses också vara hög då författarna har genomfört hela studien med handledning från forskare, doktorander samt forskningsingenjörer vid Lunds Tekniska Högskola, vilka är mycket insatta i ämnet och vet vilka resultat som efterfrågas.

2.6 Analysprocessen

Analysen har genomförts löpande efter varje laboration. Samtliga provkroppar har jämförts med referensprov som inte innehåller tillsatsmaterial. Författarna har löpande under studiens gång reflekterat och utökat litteraturstudie för att kunna dra lämpliga och säkra slutsatser. Vid den slutliga analysen har allt material återigen analyserats noggrant för att säkerställa slutsatserna.

Metod

3 Material

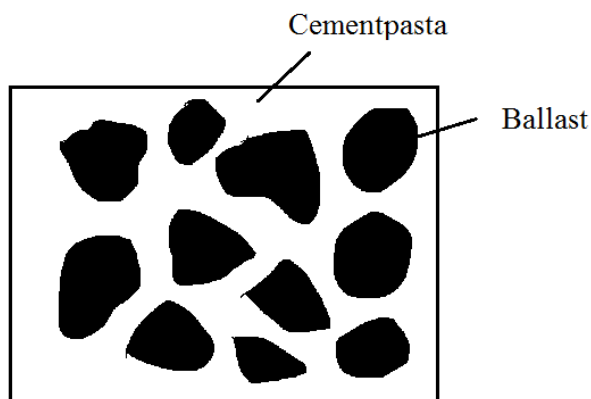
I det här kapitlet beskrivs betongen och dess beståndsdelar närmare. I detta arbete kommer tillsatsmaterialen flygaska, malda sötvattengranulerad masugnsslagg och kalcinerad lera användas. Flygaskan kommer från Emineral a/s i Danmark, den malda sötvattengranulerade masugnsslaggen har produktnamnet MERIT 5000 och kommer från Merox, Sverige. Den kalcinerade leran tillhandahålls av Saint-Gobain Weber, från Portugal och innehåller kvarts, fältspat samt lermineral, bland annat kaolin.

3.1 Betong

Betong är idag ett av de viktigaste byggnadsmaterialen. Det är ett relativt billigt byggnadsmaterial som har ett stort användningsområde; från olika husbyggnadsapplikationer till konstruktioner i extrema miljöer som t.ex. dammar och broar. Materialet har god beständighet, formbarhet, arbetbarhet samt hållfasthet [7].

Betong är ett kompositmaterial som huvudsakligen består av *ballast*, *vatten* och *cement*. Idag är det vanligt att betong också innehåller *tillsatsmedel* och *tillsatsmaterial* för att förändra betongens egenskaper [2]. Ett exempel på tillsatsmedel är flyttillsatsmedel som används för att göra betongens konsistens lösare och därmed ändra dess arbetbarhet utan att behöva öka andelen vatten. Ett exempel på tillsatsmaterial är flygaska som används för att minska andelen cement [2].

När cement och vatten blandas sker en kemisk reaktion som bildar en s.k. *cementpasta* och fungerar som ett bindemedel som håller ihop ballastkornen, se figur 1.



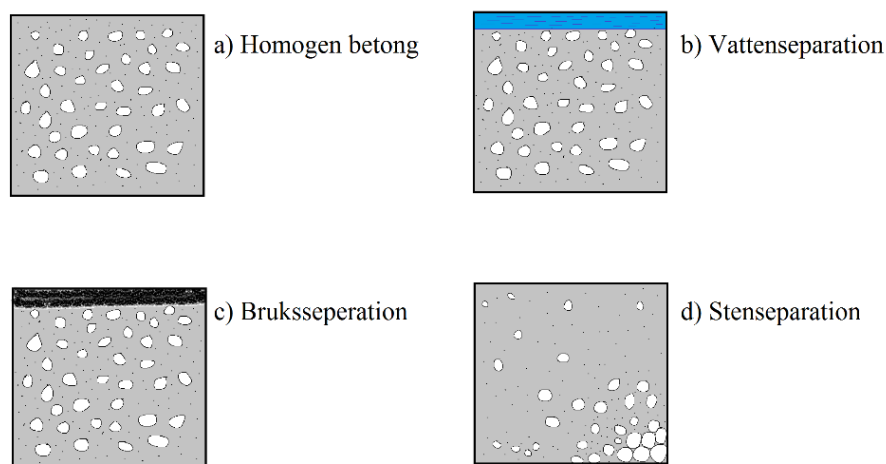
Figur 1. Cementpastan är ett bindemedel som håller ihop ballasten.

I Sverige finns det goda förutsättningar för att kunna bygga med betong. Här finns god tillgång till cement, bra ballast och rent vatten vilket är viktigt för att tillverka en bra betong.

3.2 Färsk betong

Hela detta delkapitel baseras på [7] om inget annat anges. Vid betonggjutningar ute i produktion är det av stor vikt att den färska betongen har god *arbetbarhet* och *stabilitet*. Betong med god arbetbarhet, även kallat *gjutbarhet*, ger snabb gjutning och god arbetsmiljö. Begreppet avser hur lätt det är för betongen att fylla ut formen och omslutas armeringsjärnen. Idag finns det ingen vedertagen metod för att mäta arbetbarheten. Dock mäts konsistensen genom att genomföra ett s.k. *sättnått* för att beskriva arbetbarheten.

Betong med god stabilitet har under hela produktionsprocessen, från tillverkning i betongfabrik till gjutning, en homogen massa där inget av betongens komponenter separerar från varandra, se figur 2. Då betongen innehåller många olika komponenter med olika densitet, finns det risk för separation då de tyngre komponenterna strävar efter att sjunka ner i massan. Det finns tre olika typer av separationer; *vattenseparation*, *stenseparation* och *bruksseparation*.



Figur 2. Snitt genom homogen betong samt olika typer av separationer.

Vattenseparation uppstår om det inte finns tillräckligt med finmaterial i betongen som kan hålla kvar vattnet. Vattnet avskiljs då ur cementpastan och samlas på betongytan eller under grova stenar och armering. Detta skall undvikas då det krävs vatten för att *hydrationsprocessen* inte ska avstanna. Om detta sker kommer hållfastheten i betongen försämrats avsevärt [7]. Det finns studier om att hydratationen avstannar när fuktigheten i betongen understiger en relativ fuktighet på 80% [8].

Stenseparation kan uppstå i betongbilen under transport eller när betongen vibreras på byggarbetsplatsen. En lösare konsistens och långa vibreringstider ökar risken för stenseparation som kan leda till att den övre delen i betongen får sämre hållfasthet än resten av betongen.

Bruksseparation uppstår om betongen har för lös konsistens. Detta leder till att ballasten sjunker samtidigt som bindemedlet lägger sig ovanpå ballasten, vilket resulterar i att två olika material erhålls istället för ett homogent.

Det är också viktigt att se till att den färska betongen inte härdar för snabbt, annars finns det risk för att den härdnar redan i betongbilen. Om det finns risk för detta, kan det förhindras genom att använda ett annat bindemedel som har lägre värmeutveckling och reagerar långsammare. Om detta inte är möjligt kan betongen istället kylas innan den lastas i betongbilen eller använda *retarderande tillsatsmedel*, som är ett tillsatsmedel som fördröjer betongens tillstyvnad.

3.3 Ballast

Ballast är ett gemensamt begrepp på bergartmaterialen som finns i betongen [7]. På marknaden förekommer två huvudtyper av ballast; *singel* och *makadam*.

Singel är naturligt okrossat grus som i Sverige utvinns ur rullstensåsar medan makadam framställs genom att krossa stora block till mindre kornfraktioner [7]. Idag är makadam den vanligaste typen av ballast i betong. Den är till skillnad från singel mycket kantig, se figur 3. Nackdelen med makadam är att vattenbehovet är större än vad det är för singel [9].



Figur 3. Till vänster: Singel. Till höger: Makadam.

Det är viktigt att ballasten är av god kvalitet och att den inte innehåller ämnen som är skadliga för betongen. Det är t.ex. inte lämpligt att använda ballast som innehåller alkalilöslig kiselsyra då detta kan leda till *alkalikiselsyrareaktioner* i betongen. Om reaktionen sker inne i betongen skapas det ett tryck som leder till att betongen spricker och det bildas kratrar [7].

3.4 Vatten

Vatten har som huvuduppgift att reagera med cement till ett hårt bindemedel som håller ihop kornen. Det är därför viktigt att det finns tillräckligt med vatten i betongen så att betongen uppnår den önskade hållfastheten.

Det är också viktigt att vattenkvaliteten är bra, annars kan betongens hållfasthet och beständighet försämrats. T.ex. är det inte lämpligt att använda saltvatten då saltet i vattnet kan leda till armeringskorrosion [7]. En tumregel är använda dricksvatten som blandningsvatten i betong [10].

3.5 Cement

Cement är ett *hydrauliskt bindemedel*. Detta innebär att när cement reagerar med vatten så hårdnar det och blir beständigt mot vatten. Hårdnaden sker i luft och i vatten.

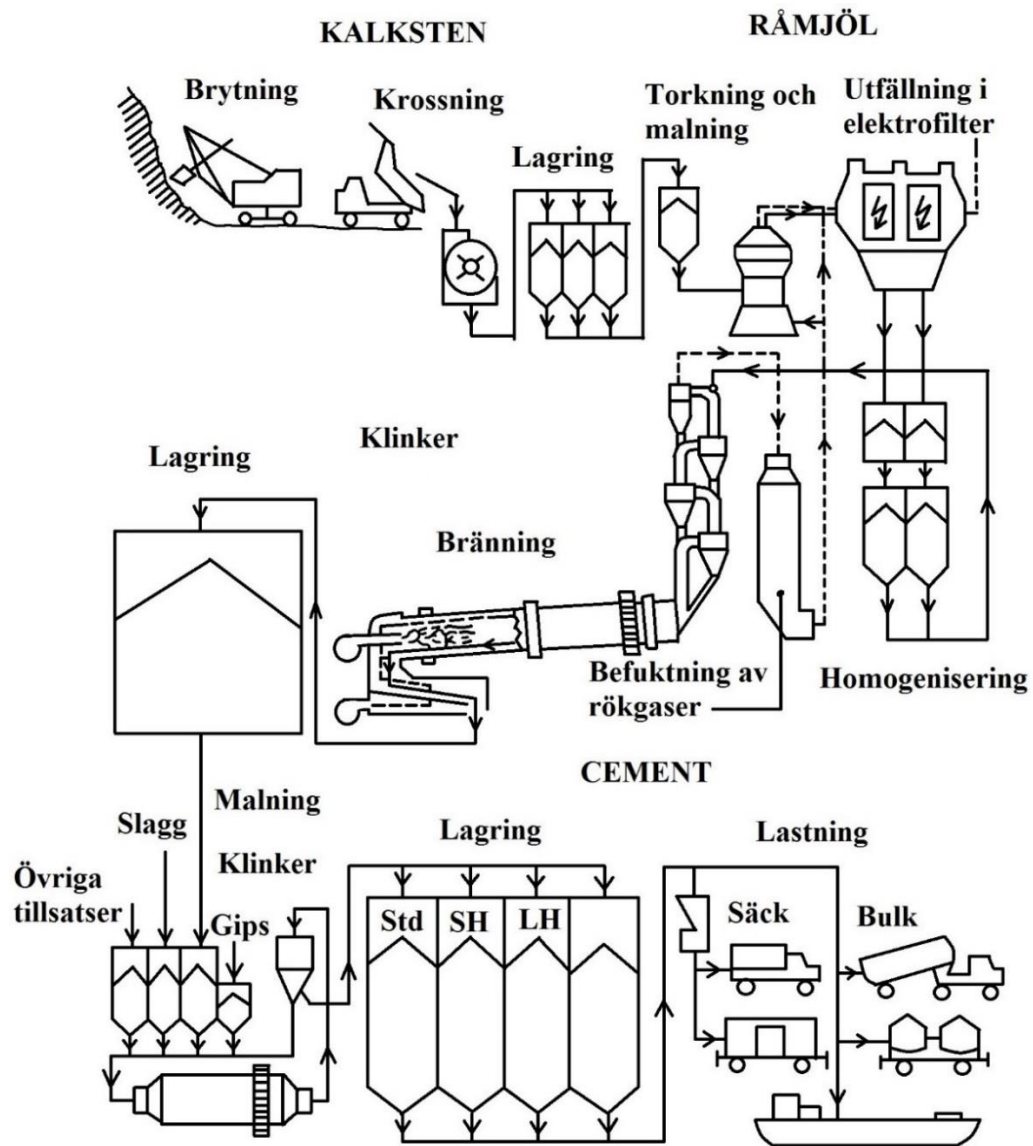
Av betongens alla beståndsdelar är cement den beståndsdel som har störst avgörande betydelse för betongens egenskaper. Den kemiska sammansättningen hos cement kan påverka allt från arbetbarheten hos betongen till betongytans färg och beständighet [11].

3.5.1 Portlandcement

Den vanligaste typen av cement som används idag heter portlandcement och tillverkas av råmaterialen kalksten och lera som bryts i ett kalkbrott. Råmaterialen finmals och bränns sedan i långa roterugnar. I det här steget kan råmaterialet stoppas in i roterugnen som ett torrt pulver (*torrmetoden*) eller genom tillsättning av vatten så att det blir ett vått slam (*våtmetoden*) [7].

Våtmetoden var förr i tiden den vanligaste metoden för tillverkning av cement i Sverige. Den här metoden kräver mycket energi då vattnet i slammet måste avdunsta. När råmaterialet förbränns i ugnen sker kalcinering, vilket är en process då kalksten, CaCO_3 , avger koldioxid, CO_2 [2].

Torrmetoden är en mer energisnål metod än våtmetoden och är av denna anledning den enda tillverkningsmetoden i Sverige [7]. I denna metod mals och blandas råmaterialet i torrt tillstånd som sedan matas in i ett cyklonsystem som är placerat i ett högt cyklontorn. I cyklonsystemet finns heta rökgaser som kommer från roterugnarna som leder till att en liten del av kalcineringen sker innan råmaterialet kommer in i ugnen [2]. När råmaterialet kommer ut ur roterugnen kyls den ned. Det fina pulvret har nu formen av små kulor och kallas för *cementklinker*. En visuell beskrivning av tillverkningsprocessen enligt torrmetoden visas i figur 4.



Figur 4. Visuellt illustration av cementtillverkningen enligt torrmetoden [2].

3.5.2 Cementets kemiska sammansättning och dess betydelse

För att kunna ändra på betongens egenskaper eller minska på koldioxidutsläppen vid cementtillverkning, måste först cementets kemiska sammansättning och vad som händer när cement reagerar med vatten klargöras. Det måste också framgå vad i cementet som ger betongen dess höga hållfasthetsegenskaper och goda beständighet.

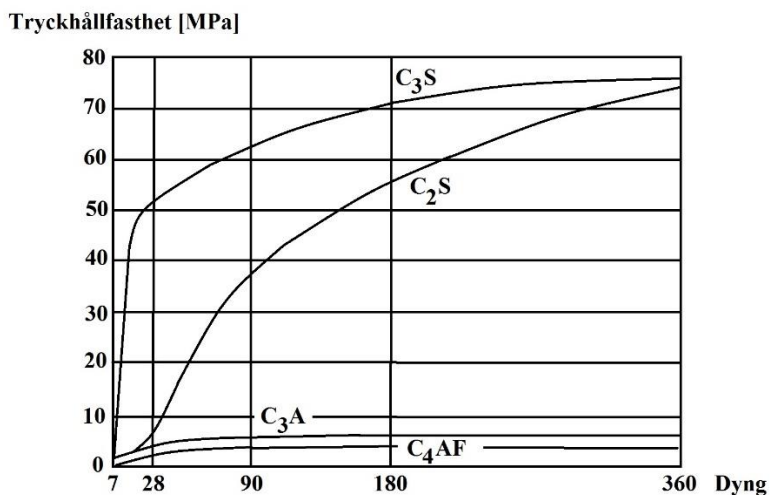
Cement består av ett antal olika cementklinker som bildas under förbränningen. Dessa cementklinkers är viktig för cementets egenskaper [12]. De viktigaste cementklinkers redovisas i tabell 1.

Tabell 1. De viktigaste klinkerkomponenterna (portlandklinker).

Namn	Kemisk beteckning	Förkortning
Trikalciumsilikat (alit)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Dikalciumsilikat (belit)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Trikalciumaluminat (celit)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalciumaluminatferrit (ferrit)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Förhållandet mellan dessa cementklinkrar i cementet har avgörande betydelse för cementets egenskaper, framför allt när det gäller hållfasthetsegenskaper [2]. Förutom hållfastheten påverkas också självtorkningen (d.v.s. då vatten binds kemiskt vid cementreaktionen) då mer vatten reagerar vid snabbare hållfasthetstillväxt.

Den viktigaste klinkern för hållfasthetsutvecklingen är C_3S , se figur 5. Denna klinker gör att cementet uppnår en hög hållfasthet i relativt tidig ålder. C_2S har en långsammare hållfasthetstillväxt än C_3S , men efter många år har den en högre hållfasthet än C_3S [12].



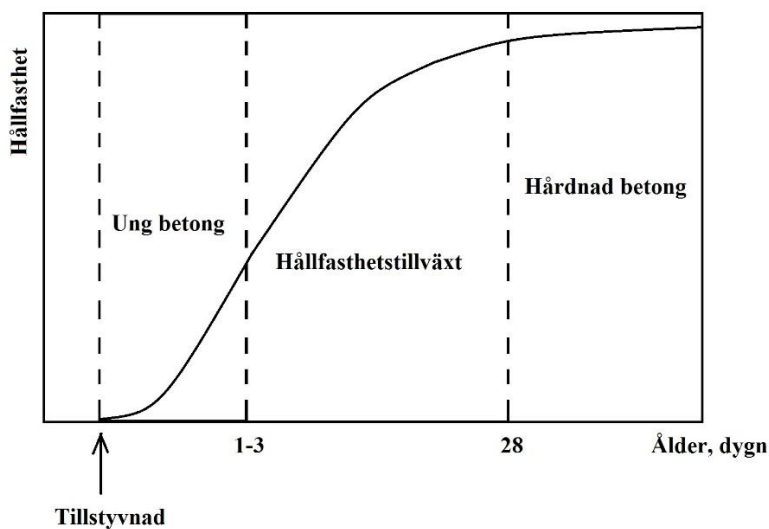
Figur 5. Hållfasthetstillväxt hos de viktigaste cementklinkerna [2].

Genom att ändra förhållandet mellan C_2S och C_3S i cementet kan en lämplig hållfasthetstillväxt erhållas beroende på vad som skall gjutas och vilka förutsättningar som finns [2]. I långsamhärdande cement, LH-cement, är förhållandet C_3S/C_2S lågt. Sådan cement är lämplig i grova konstruktioner där härdningstemperaturerna inte får bli för höga, annars kan temperaturskillnaden mellan ytan och konstruktionens centrum bli för stora vilket leder till spänningar vilket i sin tur leder till temperatursprickor [13]. I snabbhärdande cement, SH-cement, är förhållandet mellan C_3S/C_2S högt, vilket är lämpligt i betong som ska gjutas i kallt klimat och där det önskas tidig formrivning [7].

Reaktionen mellan cement och vatten är en exoterm process vilket innebär att värme utvecklas under reaktionsprocessen. Det finns både för- och nackdelar med denna exoterma process. Fördelen är att det skapas energi och reaktionen startar, d.v.s. att reaktionen är spontan och ingen energi behövs tillsättas utifrån. Denna energi medför också att temperaturen i betongen höjs, vilket minskar risken att betongen fryser sönder under vinterhalvåret när utetemperaturer är låga. Nackdelen är att för höga temperaturer kan leda till temperatursprickor hos betongen [2].

3.5.3 Hydratation

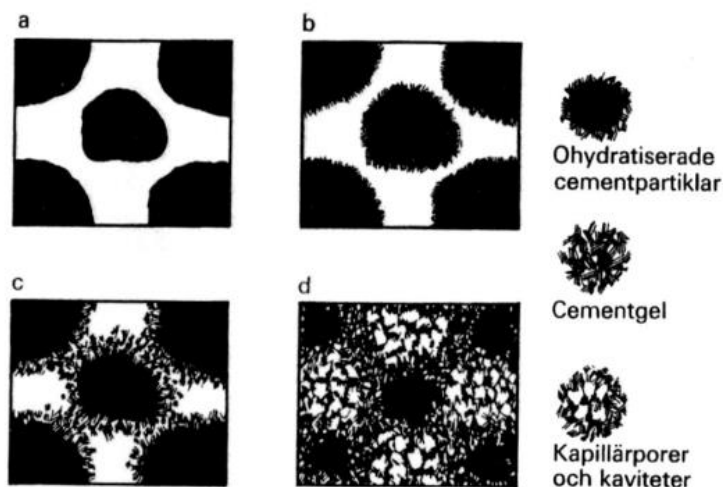
Hydratation är den reaktionsprocess som startar när cement och vatten blandas och reagerar till en stark massa, s.k. CSH-gel. Denna process kan indelas i tre faser nedan [7] och illustreras i figur 6 nedan.



Figur 6. Visuell beskrivning i form av diagram av hållfasthetstillväxten i betong [7].

- Fas 1: Så fort cement och vatten blandas börjar betongen tillstyvnad, men den kan fortfarande formas. Hydratationsprocessen är fortfarande relativt långsam.
- Fas 2: Här börjar hållfasttillväxten ta fart och betongens egenskaper börjar förändras snabbt. Hydratationsprocessen sker mycket snabbt och betongen börjar hårdna. För att hydratationen inte ska avta är det viktigt att se till att skydda betongen mot uttorkning. Detta kan göras genom att membranhärda betongen (d.v.s. förhindra att vatten avgår genom uttorkning genom t.ex. inplastning) eller spruta vatten.
- Fas 3: Betongen är hård men hydratationen är ännu inte fullt utvecklat.

Hydratationsprocessen kan ta flera år innan den är fullt utvecklad, men vanligtvis blir den aldrig det. Detta beror på att det blir svårare för vattenmolekylerna att komma i kontakt med cementklinkern. När klinker reagerar med vatten bildas en tät cementgel och täpper till (vissa) porer och hindrar därigenom vatten från att transporteras till oreagerad klinker och bilda mer cementgel, se figur 7 [2]. Det stadium som hydratationsprocessen har uppnått vid en viss tidpunkt kallas för *hydratationsgrad* och är ett mått på hur mycket cement som har hydratiserat i förhållande till totala mängden cement [2].



Figur 7. Illustration av cementreaktionens olika steg [7].

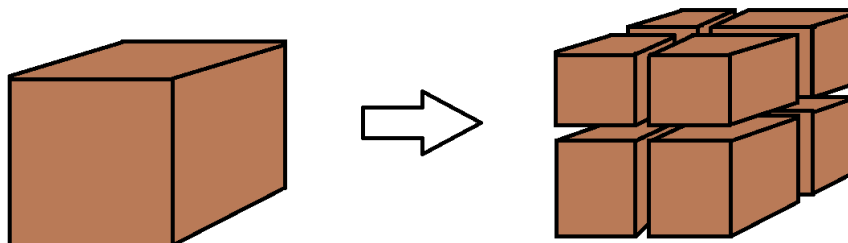
3.6 Puzzolaner/tillsatsmaterial

En puzzolan är ett icke-hydrauliskt kiselhaltigt eller kisel- och aluminiumhaltigt material som har lite eller ingen betydelse för cementets hårdnande, men som kan, om det pulveriseras, reagera med vatten och kalciumhydroxid (CH) och bilda CSH-gel [12]. Puzzolaner används som tillsatsmaterial i betong för att minska andelen cement. De flesta puzzolanerna anses vara miljövänligare än cement eftersom de är restprodukter från andra industrier. Tidigare hamnade dessa puzzolaner i deponi men som nu istället används i betong. Exempel på puzzolaner är flygaska, MGMS och silika [2].

Reaktionshastigheten mellan puzzolaner och CH är vid normal härdningstemperatur mycket långsam. Det kan ta flera veckor innan reaktionen börjar [14]. Detta beror på att puzzolaner kan ha låg specifik area, d.v.s. lite yta som kan reagera med CH, se figur 8 [15]. Den långsamma reaktionshastigheten gör att stora mängder puzzolaner är olämplig att ha i betong där det önskas snabb hållfasthetsutveckling. Reaktiviteten hos puzzolaner beror förutom på dess specifika area också på glashalten och andelen reaktiva oxider [15]. Glashalt är ett mått på ett materials reaktivitet där höga glashalter innebär att materialet är mer amorft och motsvarande att materialet är mer kristallint vid låg glashalt [2].

CH, som är en biprodukt av reaktionen mellan cement och vatten, finns i cementpastan och har ingen större betydelse för dess hållfasthetsegenskaper. Tillsats av puzzolaner medför vid oförändrad cementhalt en höjd hållfasthet.

Detta beror på att kiseldioxiden (SiO_2) i puzzolanen reagerar med CH och bildar därmed mer CSH-gel [15].



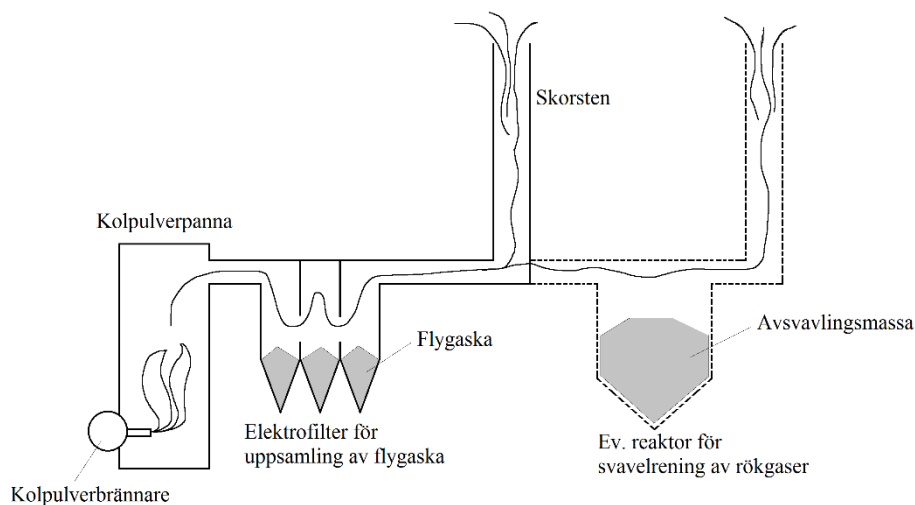
Figur 8. Illustration av en kub som får högre specifik area när den delas in i mindre kuber. Den bruna ytan är den yta som kan reagera med ett annat ämne. De mindre kuberna har tillsammans dubbelt så stor specifik area än den stora kuben.

CH är ett basiskt ämne som höjer pH-halten i betongen. Denna höjning av pH-halten är ur beständighetssynpunkt mycket viktig för att skydda armeringen mot korrosion. Det är därför viktigt att andelen puzzolaner begränsas så att inte för stor andel CH konsumeras. Höga halter av puzzolaner är därför inte lämpligt för konstruktioner som utsätts i extrema miljöer där det ställs krav på betongens beständighetsegenskaper som t.ex. broar [2].

Då det måste finnas tillgång till CH för att puzzolanerna skall reagera finns det en teoretisk gräns för högsta mängd puzzolaner som en blandning kan ha för att puzzolanerna ska reagera. Denna gräns ligger förmodligen för flygaska på runt 30% av cementvikten, och runt 20% för silika [16].

3.6.1 Flygaska

Flygaska är en restprodukt som kommer från kolpulvereldade kraft- och värmeverk. Den vanligaste och mest använda askan kommer från stenkol som innehåller ca 10% aska. När stenkol bränns i förbränningskammaren följer askan med rökgaserna och samlas i elektrofilter. Den grövsta askan samlas i det första filtret medan den finaste askan samlas i det sista, se figur 9. Innan rökgaserna lämnar anläggningen får det normalt passera ett svavlingssteg där svavlet i rökgaserna förenas med kalk. Detta tillsätts sedan i reaktorn där det bildas kalciumsulfit, CaSO_3 , eller kalciumsulfat, CaSO_4 , en *avsvavlingsmassa*, som slutligen hamnar i deponi [2].



Figur 9. Koleldat kraftverk med filter för flygaska [2].

Det finns också nya anläggningar där det inte finns något elektrofilter som filtrerar askan. I sådana anläggningar finns då både flygaska och svavel i avsvavlingsmassan. P.g.a. svavelinnehållet kan denna aska inte användas som bindemedel utan hamnar i deponi eller används som markutfyllnad [2]. Detta för att svavlet kan reagera med betongens innehåll, svälla och skada konstruktionen [17].

Det är inte bara tillverkningsprocessen som avgör askans egenskaper, utan också råmaterialet som bränns. Det finns två huvudtyper av flygaska (enligt amerikansk beteckningssätt); *Typ F* som tillverkas av *stenkol* och *Typ C* som tillverkas av *brunkol* eller *torv* [2]. Flygaska *Typ F* har låg kalkhalt på ca 5% samtidigt sin *Typ C* har hög kalkhalt på ca 35% [18]. *Typ F* är ren puzzolan samtidigt som *Typ C* är *latent hydrauliskt*. Hydrauliska latent material är material som har svag hydraulisk effekt som förstärks om kalk tillsätts. I Sverige används endast flygaska av *Typ F* [2].

Tillsats av flygaska ger en rad förändringar av betongens egenskaper. Den ökar betongens *smidighet*, *arbetbarhet* och *stabilitet*. Det är därför lämpligt att använda flygaska i betong där det ställs stora krav på betongens arbetbarhet, vid t.ex. gjutning med pumplastbil [2].

Flygaska har låg reaktivitet och bidrar inte till betongens tidiga hållfasthetstillväxt. Reaktiviteten hos flygaskan beror främst på askans finhet och glashalt. Ju finare askan är, och ju högre glashalten är desto högre är reaktiviteten [12]. När askan

börjar reagera sker reaktionen med CH i cementpastan och bildar därmed mer CSH-gel som har hög hållfasthet [19].

Idag finns det en produkt från Cementa, Bascement, vilken innehåller ca 16% flygaska. Enligt Cementa har denna produkt bättre sluthållfasthet och arbetbarhet än vanlig Byggcement, som är det cement på den svenska marknaden som används i hus.

Det finns studier som har visat att högre halter av flygaska även bidrar till att betongen får bättre beständighetsegenskaper. Detta beror på att det finkorniga materialet hos flygaskan fyller ut hålrum och minskar betongens porositet och permeabilitet [20]. Med minskad porositet och permeabilitet blir betongen tätare och därmed blir det svårare för vatten och kemikalier att ta sig in i betongen till armeringen [20]

3.6.2 Mald granulerad masugnsslagg

Ett annat tillsatsmaterial är mald granulerad masugnsslagg (MGMS). Slaggen är en restprodukt från järnindustrin vid framställning av tackjärn [21]. I tillverkningsprocessen blandas järnmalm under smältning i masugn tillsammans med kalk och koks [22]. Detta ger upphov till bildning av slagg, då den tillsatta kalkstenen binder upp gråberget¹ från järnet [2]. Slaggen flyter därefter upp ovanpå järnmassan för att sedan tappas av från masugnen och snabbkyls med vatten vilket medför en finfördelning av partiklarna, också kallad granulering [22]. Snabbkylningen ger en amorf (glasig) kornstruktur [2]. Denna glasighet kan bli så pass hög som 95% eller mer men bör samtidigt inte vara mindre än 90% då glasigheten är ett viktigt mått på reaktivitet [22].

Glasigheten gör att MGMS blir latent hydraulisk [22]. För att den masugnsganulerade slaggen skall bli aktiverad krävs det att vissa förutsättningar uppfylls; dels behöver masugnsslaggen malas till cementfinhet och dels behöver det tillsättas med kalciumrika komponenter, exempelvis kan portlandcement användas [2], då slagg aktiveras av sulfater, alkali samt Ca(OH)_2 [22]. Vidare medför tillsats av MGMS medför att betongen får bättre arbetbarhet då en lösare konsistens erhålls vid en oförändrad vattenhalt [22] samt lägre värmeutveckling [2].

3.6.2.1 Kemisk sammansättning

Den kemiska sammansättningen varierar mellan olika smältverk och beror bland annat på de förhållanden som krävs i masugnarna [22]. Det är järnkvantiteten som

¹ Gråberg kallas den del av malmen som inte har mineralfyndighet inom metallindustrin [40].

avgör den kemiska sammansättningen hos slaggen. I tabell 2 redovisas en typisk kemisk sammansättning för en svensk slagg. Vanligtvis brukar slaggen innehålla ungefär 40% av CaO och 40% av SiO₂ [22].

Tabell 2. Exempel på svensk slaggsammansättning [22]. Utöver dessa ingår dessutom Fe (< 1 %), MnO (< 5 %), Na₂O+K₂O (< 3 %) samt än mindre mängder av P₂O₅, TiO₂, BaO samt Fe₂O₃.

Mineralkomponent	[%]
CaO	36
SiO ₂	36
Al ₂ O ₃	10
MgO	13
S	1

Den kemiska sammansättningen påverkar slaggens reaktivitet men samtidigt är det svårt att avgöra hur reaktiva olika slaggsammansättningar är [22]. Det är förhållandet mellan CaO/SiO₂ som påverkar reaktiviteten där en högre kvot innebär en högre reaktivitet [22]. Dock finns det viss problematik med denna modul. Enligt [23] är effekten av Al₂O₃ ett komplext problem då dessa hydrauliska moduler endast fungerar bra vid jämförelse av likande slaggsammansättningar som tillverkats inom samma järnverk. Vidare har det gjorts regressionsanalys där ett stort utbud av västeuropeiska slagg har använts i vilken det kom fram att vid minst 13% Al₂O₃ finns det en benägenhet att den tidiga hållfastheten ökar samtidigt som den sena hållfastheten minskar. Samma analys har visat att MgO är kvantitativt likvärdig med CaO i mängder upp till 11%. I denna analys har det även visat sig att de mindre komponenterna i sammansättningen kan ha effekt. T.ex. att MnO alltid har en negativ effekt på hållfastheten samtidigt som alkalikomponenternas påverkan är mer komplex [23].

Vid inblandning av höga halter MGMS (ungefär mellan 65% till 70%) blir betongen sulfatresistant [2] [22]. Detta beror på att inblandningen av slagg medför en minskad andel C₃A, vilket i sin tur minskar möjligheterna att ettringit bildas då den lösliga CH binds upp i cementgelen och gör betongen tätare [22]. I och med att betongen är att betrakta som sulfatresistant så står betongen emot sulfatangrepp via mark rik på sulfat eller starkt sulfathaltigt vatten [2].

En bieffekt av att använda MGMS är innehållet av svavel som förekommer i sin sulfidform vilket medför att masugnsslaggen har en särskild lukt av svavel vilket även märks av hos fuktig betong [2] [22].

3.6.2.2 *Reaktioner med cementprodukter*

Aktiveringen av MGMS sker med produkter från cementreaktionen som CH, alkali och sulfater [22]. CH som finns i MGMS reagerar inte med MGMS då den glasiga CH har lågt kalciuminnehåll [2]. För att lösa MGMS CHs ovilja att reagera kan extra kalk tillsättas vilket i sin tur aktiverar hydrationsprocessen och därefter fortsätter slaggens egna innehåll av kalk att reagera [2].

Vid reaktionen med MGMS uppstår samma reaktionsprodukter som vid cementreaktionen med den skillnaden att kvoten CaO/SiO_2 är lägre [22]. Detta innebär att slaggen har svårare för att reagera med vatten samt reagerar långsammare med vatten [2]. Ytterligare en skillnad är att CSH-gelen ger ett högre innehåll av magnesium- och aluminiumoxid [22]. En följd av närvaron av aluminiumoxid är att det förekommer reaktioner med kalk och gips eller alternativt med kalciumhydroxid och dessa reaktioner ger upphov till kristaller vilka innehåller samma struktur som ettringit och monosulfat [22].

3.6.2.3 *Slaggens reaktivitet*

I jämförelse med rent portlandcement har MGMS en lägre reaktionshastighet [22]. Detta beror på att MGMS har lägre specifik area samt glasighet än portlandcement [2]. Vid malningen brukar det ofta tillsättas ca 1-3% gips, CaSO_4 , för att optimera sulfathalten och öka reaktiviteten [22].

I och med att MGMS reagerar långsamt innebär är detta t.ex. att det inte är lämpligt att gjuta med betong som innehåller MGMS i kallt klimat då det kan finnas risk för frysning av betongen [2].

3.6.3 *Kalcinerad lera*

Kalcinerad lera (engelska: calcined clays) och kalcinerad mörkel (engelska: calcined marl) är tillsatsmaterial som under senare tid har blivit allt mer aktuella.

En typ av aktiverad lera är metakaolin, MK, som framställs genom kalcinering² vid temperaturer kring 650-800°C av lermineralet kaolin, som innehåller aktiva former av silika och aluminium vilka reagerar med CH från cementshydratationen [24].

Lermineral bildas genom kemisk vittring, d.v.s. den process då ett geologiskt material genom kemiska processer sönderdelas [25]. Processen beror på de naturligt cirkulerande vattenlösningar vilka normalt alltid innehåller kolsyra [25]. Denna svaga syra är den främsta källan till angrepp på mineral och bergarter och medför att silikater i form av fältspater som kemiskt påverkas av kolsyreavattnet

² Kalcinering kallas den process där vatten avgår från leran samtidigt som lerpartiklarna sintrar ihop [25].

övergår i lermineral [25]. Lermineral förekommer i stort sett över hela världen i de översta lagren av jord- och berg. Större delen av Sverige är dock ett undantag då inlandsisen avlägsnade lermineralet på dessa nivåer [25]. Lermineralen återfinns istället framför allt i krosszoner och speciella sprickzoner i det svenska urberget [25]. Undantaget är Skåne, där lerstenarna i Höganäsområdet och kaolinlerorna i mellersta och nordöstra Skåne bryts för att användas i eldfast keramik [25]. Med andra ord finns det potential till att finna kaolinleror även i Sverige, även om det förmodligen är mer förekommande utomlands.

Märgel definieras som en ovittrad kalkhaltig morän eller moränlera och kan till och med definieras som lera [26]. Detta medför problematiken att kalcinerad lera/märgel är ett samlingsnamn vilket innebär att materialet kan ha skilda kemiska sammansättningar, och troligtvis behöver inte alla sorters leror/märgel vara användbara som tillsatsmaterial. Exempelvis är märgelsten som finns på Gotlands västra sida en blandning av terrigena leror och en kalkrik lersten som är mycket rik på fossil [26]. Det är dock oklart vad detta kan innebära för betongen om denna märgelsten skulle användas.

Tillsats av MK försämrar betongens arbetbarhet [24]. Detta innebär att det behövs flyttillsatsmedel för att uppnå samma konsistens som betong utan MK om samma vattenmängd önskas.

Användandet av kalcinerad lera som tillsatsmaterial är inte nytt. Under 1970-talet, innan tillgången på flygaska ökade, användes det en hel del i bl.a. Indien och Brasilien [1]. Två exempel på byggnader med kalcinerad lera som tillsatsmaterial är dels Bhakra dammen i Indien samt Jupia dammen i Brasilien [3].

4 Teori

I detta kapitel beskrivs teorin bakom värmeutveckling, hållfasthetsutveckling, uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning hos betong.

4.1 Värmeutveckling

Före gjutning av provkroppar måste värmeutvecklingen studeras. Om värmeutvecklingen är mycket låg är detta en indikation på att det inte sker någon härdning eller att härdningen är mycket långsam, vilket inte är rimligt vid gjutning ute i produktionen.

Som nämnts tidigare är cementreaktionen en exoterm process. När cement och vatten reagerar med varandra bildas värme. Denna värme har stor betydelse för betongens hållfasthetsutveckling och självtorkning. När värme bildas, höjs temperaturen i betongen och därmed ökar hydratationshastigheten. Denna värmeutveckling beror främst på cementsort och vattencementtalet, vct, alternativt vattenbindemedelstalet, vbt. Ju större specifik area cementsorten har och ju mer C_3S den innehåller, desto mer värme utvecklas. Kännedom om denna värmeutveckling är av särskilt stor vikt vid rivning av en betongform eller gjutning i kallt klimat då avsaknad av sådan kunskap medför ökad risk att betongen rasar vid formrivningen eller att betongen fryses sönder vid gjutning i kallt klimat [2]. En förenkling av problemet med värmeutveckling är att den är direkt proportionell mot betongens hydratationsgrad.

4.1.1 Sulfatoptimering

I denna studie genomfördes också en s.k. sulfatoptimering av den kalcinerade leran. Detta för att få undersöka hur dess värmeeffekt och värmeutveckling förändras vid ökade mängder $CaSO_4$. En sulfatoptimering görs för att optimera tryckhållfastheten hos betong [27]. Genom att blanda i extra gips ökar hållfastheten då kalciumsilikaternas hydratation påverkas [11]. Exempelvis för en SH-cement ger en ökning av gipstillhalten från 1 % till 3 % en ökning av 28 dagns hållfastheten med ca 10 MPa [11].

4.2 Hållfasthetsutveckling

Ute i produktion är det av stort intresse att känna till betongens hållfasthetsutveckling. Detta är viktigt vid t.ex. formrivning där betongen måste ha uppnått en viss hållfasthet innan formen kan rivas. Annars kan det i värsta fall leda till ras [2].

Det finns ett samband mellan hållfasthetsutvecklingen och temperaturutvecklingen. Detta samband beror på betongkvaliteten och cementsorten [2].

4.3 Fukt i betong

I husbyggnadsprojekt är det extra viktigt att hålla koll på fukten i betongen och uttorkningen, annars kan detta leda till problem och onödiga kostnader. Om t.ex. en matta läggs innan bjälklaget har hunnit torka till den kritiska fuktnivån kan detta leda till att den lossnar efter en tid och mattan måste läggas om [7]. Ytterliggare effekt av fukten är dels emissioner orsakade av fuktkänsliga material, t.ex. limning av PVC-mattor på betonggolv med en högre fuktighet än den för mattan kritiska fuktnivån [28]. Vidare är även "sjuka hus"-sjukan ett problem där fukt är en viktig faktor.

Betong innehåller alltid vatten och det brukar göras en skillnad mellan *kemiskt bundet vatten*, *adsorberat vatten*, *kapillärt vatten* och *fritt vatten* [7].

Kemiskt bundet vatten är det vattnet som har reagerat med cementet till CSH-gel. Den är starkt bundet och räknas inte som fukt. När detta vatten försvinner, genom t.ex. upphettning i ca 1000°C, bryts den kemiska strukturen och vattnet förångas.

Adsorberat vatten är det vatten som fastnar på materialet yta i porerna.

Kapillärt vatten är det vattnet som är bundet genom kapillärkondensation.

Fritt vatten är det vattnet som finns i grova porer eller utanför materialet.

Det är väldigt viktigt att kunna beskriva fuktillståndet i betongen för att t.ex. kunna göra bedömningar om det är möjligt att lägga ut golvmattor på t.ex. betongplattan som utgör grunden. Fuktillståndet i betongen kan beskrivas på många olika sätt. I denna studie beskrivs fuktillståndet i relativ fuktighet, RF, som är definierad som:

$$\Phi = \frac{p_w}{p_s} * 100$$

Där:

- Φ är den relativa fuktigheten [%].
- p_w är vattenångans partialtryck [g/m³].
- p_s är vattenångans partialtryck vid mättat tillstånd [g/m³].

p_w tas fram genom mätning med luftfuktsmätare. p_s är temperaturberoende och ges i tabeller som kan hittas i läroböcker eller internet.

Fördelen med att beskriva fuktillståndet i RF är att det inte är lika känslig för hela betongens representativitet, vilket är fallet när fuktillståndet beskrivs i fukthalt eller fuktkvot. Dessutom kan två olika material som befinner sig i fuktjämvikt med

varandra ha olika fukthalter och fuktkvoter, men däremot har materialen samma RF [2].

Den största fördelen med att beskriva fuktillståndet i RF är att ett stort antal beständighetsproblem är beroende av RF. Exempel på dessa är armeringskorrosion som sker snabbast vid RF på ca 95% och mögel på träkonstruktioner som uppträder vid ca 80% RF [7]. Det är därför mycket lämpligt att beskriva betongens fuktillstånd i RF.

Nackdelen med fuktmätningar är att det tar mycket lång tid innan jämvikt råder. Ju tätare betongen är, desto längre tid tar mätningarna. Vidare måste RF-givaren kalibreras ofta, annars finns det risk att givaren visar fel värde.

Temperaturvariationerna gör det väldigt svårt att mäta fukten ute i verkligheten. Temperaturskillnader mellan RF-givare och betong kan leda till stora felvärden. Därför är det rekommenderat att det endast genomförs fuktmätningar när byggnaden är uppvärmd. Slutligen får sådana mätningar endast genomföras av speciellt utbildad personal [29]. I Sverige är sådan personal licensierade av rådet för byggkompetens, RBK.

4.3.1 Uttorkning av betong

Ute i produktion är det av stort intresse att betongen torkar snabbt. Uttorkningen kan påskyndas genom uppvärmning av betongen, vilket är mycket energikrävande och kostar pengar. Därför är det av stort intresse att uttorkningen sker utan någon yttre påverkan, d.v.s. att betongen torkar av sig själv.

Uttorkningsprocessen i betong kan delas in i fem huvudprocesser som är *kemisk bindning*, *fysikalisk bindning*, *ytavdunstning*, *kapillärtransport* och *diffusion* [30].

Kemisk bindning påbörjas direkt när cementet och vattnet blandas med varandra. Via en kemisk reaktion binds vattnat och bildar CSH-gel. Denna process sker under lång tid [30].

Fysikalisk bindning innebär att vattnet binds på ytan av betongporerna dels genom adsorption och dels genom kapillärkondensation och är beroende av RF. Ju högre RF, desto mer vatten binds fysikaliskt [31].

Ytavdunstningen sker när betongen är färdiggjutet och om omgivande klimat har lägre RF än den RF som råder på ytan av betongen.

Kapillärtransport är transport av fritt vatten som sker i betongen.

Diffusion är en transportprocess där fukten diffunderar ut ur betongen tills jämvikt råder mellan betongens och omgivningens fuktighet.

Diffusionshastigheten är beroende av omgivningens fuktighet. Ju större skillnaden är mellan betongens och omgivningens fuktighet, desto snabbare är diffusionen.

Det finns en rad olika faktorer som påverkar hur fort uttorkningen av betongen sker. Några av faktorerna som har stor påverkan på uttorkningen är [31]:

- Vct/vbt
- Cementsort
- Tillsatsmaterial
- Betongens och omgivningens temperatur
- Omgivningens fuktighet
- Härdningsmetod
- Nederbörd
- Konstruktion

Vct/vbt är den faktor som har störst betydelse för betongens uttorkning [31]. Ett lägre vct/vbt innebär att det finns mindre mängd vatten i betongblandningen, vilket gör att fuktigheten i betongen blir lägre. Dessutom blir betongen tätare vilket leder till att det blir svårare för fukt att transporteras in eller ut ur betongen [2].

Cementsorten påverkar hur stor den kemiska bindningen blir. Cement med hög specifik area reagerar med mer vatten än cement med lägre specifik area. Ju mer vatten som binds kemiskt, desto mindre vatten behöver torka ut [2].

Tillsatsmaterial kan medföra en ökande mängd fukt. T.ex. ökar vattenbehovet vid användande av silika för att kompensera för arbetbarheten samtidigt som t.ex. flygaska har snarlik effekt på arbetbarheten som cement inte behöver ytterligare vatten [32].

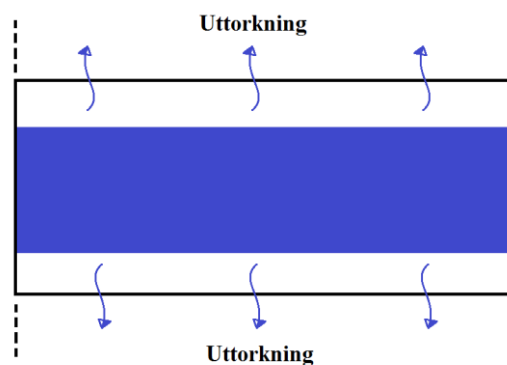
Betongens och omgivningens temperatur påverkar alla fem uttorkningsprocesser. En temperaturhöjning i betongen påskyndar hydrationsprocessen. RF är också direkt beroende av temperaturen. En temperaturhöjning innebär att vattenångans partialtryck vid mättat tillstånd, p_s , höjs och därmed sjunker RF. Vid en temperatursänkning sker det omvända. Det är förändringarna av RF som påverkar alla fem uttorkningsprocesser.

Omgivningens fuktighet påverkar uttorkningen på så sätt att omgivningens RF avgör om uttorkning sker ($RF_{\text{omgivning}} < RF_{\text{betong}}$) eller om uppfuktning sker ($RF_{\text{omgivning}} > RF_{\text{betong}}$)

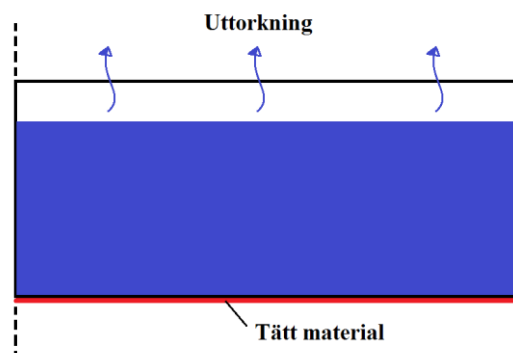
Härdningsmetoden påverkar uttorkningen. Betong som membranhärdas är skyddad mot uttorkning och därmed "försvinner" vatten endast genom kemisk bindning.

Nederbörd kan leda till att betongen suger åt sig vatten istället för att avge den. Det är väldigt vanligt att det regnar eller snöar under produktionskedet och normalt skyddas betongen aldrig mot nederbörden [31].

Konstruktionens geometri, storlek och placering har också avgörande betydelse för uttorkningen. Det tar längre tid för en tjockare konstruktion att torka än vad det gör för en tunnare. Detta för att det tar längre tid för fukten att transporteras ut ur betongen ju längre sträckan är [7]. Konstruktioner som är gjutna på en tät yta leder till att transportsträckan för fukten som befinner sig närmast det täta materialet blir mycket längre, se figur 10 respektive figur 11.



Figur 10. Dubbelsidig uttorkning.



Figur 11. Ensidig uttorkning. Tar längre tid än dubbelsidig uttorkning.

4.3.2 Självtorkning

Självtorkning sker under den reaktion där vattnet i betongen binds kemiskt och bildar CSH-gelen. När vattnet binds kemiskt övergår det från en flytande fas till en fast kristallin fas [7]. Dess volym minskar också med ca 25%. Detta fenomen kallas *självtorkning* [31]. Cementsorten, bindemedlets specifika area samt reaktionstemperatur är faktorer som påverkar hydratationsprocessen som i sin tur påverkar självtorkningen. Ju snabbare hydratationsprocessen är, desto snabbare är självtorkningen vilket leder till att RF i betongen sjunker.

4.4 Böjstyvhet

Böjstyvhet är ett mått på ett konstruktionselements, t.ex. en balk, motstånd mot nedböjningsdeformation. Den beror dels på materialets elasticitetsmodul och dels elementtvärsnittets yttröghetsmoment.

Betong brukar armeras, vilket i sin tur påverkar böjstyvheten. I detta fall är det dock endast betongens naturliga böjstyvhet (när den är gjuten i form av balkar) som är intressant. Den böjstyvhet som då gäller är böjstyvheten som uppvisas i det ospruckna stadiet, som kallas stadium I.

4.4.1 Elasticitetsmodul

Enligt [33] är elasticitetsmodulen ett förhållande mellan en skillnad i spänning och en motsvarande skillnad i töjning och definieras på olika sett beroende på vilken spänningsskillnad som avses. Vidare brukar det göras skillnad mellan en tangentmodul, E_{tan} , och en sekantmodul E_{sek} . Vid spänningsnivåer mellan ca 30-60% av hållfastheten är spännings-töjningssambandet i princip rätlinjigt varför E_{tan} och E_{sek} sätts lika med varandra [33]. För detta område sätts elasticitetsmodulen endast till E vilket ger sambandet [33]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Då betong är ett kompositmaterial påverkar de olika faserna elasticitetsmodulen, varav de viktigaste faserna är cementpastan respektive ballasten [33]. Det finns kompositmodeller för samverkan mellan faserna men dessa kommer dock inte tas upp vidare.

Elasticitetsmodulen påverkas av ett antal faktorer:

- Belastningshastighet
- Fukthalt
- Temperatur
- Hållfasthet

När det gäller belastningshastigheten ger en långsam belastning ett lägre värde och en snabb belastning ger ett högre värde på elasticitetsmodulen [33]. Den långsamma belastningen medför att en viss krypning hinner inträffa, vilket ökar töjningen ϵ samtidigt som det under en snabb belastning inte hinner inträffa någon krypning [33]. Vidare kan en ytterligare orsak till en ökad Elasticitetsmodul med snabb belastning vara att vattnet i porsystemet inte hinner omplaceras och därigenom verkar som en spänningsupptagare och därigenom förstyr strukturen hos materialet.

När det kommer till fukthalt påverkas elasticitetsmodulen på så sätt att en ökad fukthalt ger en viss ökning av elasticitetsmodulen, vilket beror på att gelporernas vatten hjälper till att ta upp viss spänning då det vattnet är såpass hårt bundet [33]. Elasticitetsmodulen kan höjas med 3-4 GPa för en våt provkropp samtidigt som hållfastheten varierar åt motsatt håll [21].

Temperaturens inverkan på elasticitetsmodulen är försumbar inom 0-100 grader Celsius [33]. Vid temperaturer under 0 grader Celsius sker en ökning av elasticitetsmodulen (för fuktig betong) då porvattnet fryser till is vilket ökar styvheten för strukturen. För helt torr betong uppstår ej förstärkningen av elasticitetsmodulen. Utöver detta påverkas Elasticitetsmodulen av härdningstemperaturen där en högre temperatur ger en något minskad Elasticitetsmodul [33].

Enligt [21] finns det en koppling mellan hållfasthet och elasticitetsmodul, vilken dock enbart gäller generellt. [21] nämner att ballasten påverkar Elasticitetsmodulen samtidigt som ballasten inte inverkar signifikant på tryckhållfastheten. Vidare beror relationen mellan Elasticitetsmodul och hållfasthet på åldern då Elasticitetsmodulens tillväxt är högre än hållfasthetstillväxten.

4.5 Böjdraghållfasthet

Betong är ett material som har flera olika hållfastheter, t.ex. tryck- och draghållfasthet. Den centriska draghållfastheten (som ofta bara benämns draghållfasthet) bestäms av den last i rent drag betongen klarar av. Denna är dock svår att mäta varför indirekta metoder brukar användas [13]. Ett sätt är genom att ta fram böjdraghållfastheten [7]. Böjdraghållfastheten är den belastning betongen klarar av vid böjning, t.ex. genom appliceringen av en last som ger upphov till böjning. Det finns samband mellan dessa hållfastheter enligt olika standarder centriska draghållfasthet och böjdraghållfastheten.

Hur böjdraghållfastheten utvärderas återges i 8.6 Böjdraghållfasthet.

4.6 Krympning

Det är viktigt att känna till betongens krympning då detta fenomen kan leda till tvångskrafter i form av dragspänningar i betongen [21]. Om dragspänningarna blir för stora kan detta leda sprickbildning och därigenom försämrad beständighet [21].

Krympning orsakas främst av fri uttorkning och självuttorkning [21]. Detta beror på att när betongen torkar så drar cementpastan ihop sig, vilket leder till dragspänningar om den är förhindrad från att krympa fritt vid t.ex. gjutning i etapper av bjälklag eller platta på mark. Denna spänning uppstår endast när betongen har hårdnat. Färsk betong som krymper utsätts ej för spänning.

Krympning som sker p.g.a. självuttorkningen kallas för autogen krympning medan krympning p.g.a. den fria uttorkningen kallas för uttorkningskrympning. I denna studie har endast den totala krympningen undersökts, vilket är kombinationen av autogen krympning och uttorkningskrympning.

5 Kostnad

Byggbranschen är en bransch där det råder stor konkurrens. Beställaren vill oftast betala så lite som möjligt vilket gör att de flesta byggbolagen försöker att bygga så billigt som möjligt. Det som väljs är då de billigaste materialen, såvida det inte finns några speciella krav. Om ny typ av betong ska få stort genomslag inom byggbranschen är det viktigt att kostnaderna är lägre än alternativt liknande dagens betong. Det är också viktigt att kvalitén inte försämras avsevärt.

Enligt Paul Sandberg³ kostar masugnsgranulerad slagg ungefär lika mycket som cement, medan flygaska är ungefär hälften så dyrt som cement. Kalcinerad lera är idag dyrare än cement men det beror enbart på att produktionen är mycket liten. Nästan all kalcinerad lera som produceras idag används nästan bara för forskning men när den väl produceras kommersiellt är det uppskattat att den kommer vara hälften så dyrt som cement. Detta beror på att tillverkningsprocessen är densamma som för cement förutom att förbränningen sker vid mycket lägre temperatur, vilket innebär lägre tillverkningskostnad.

³ Paul Sandberg innehar titeln teknisk doktor från avdelningen för byggnadsmaterial vid Lunds tekniska högskola och är idag verksam som konsult inom cement-kemi.

Kostnad

6 Miljö

Cementproduktionen är en mycket energikrävande process som bildar mycket växthusgaser som påverkar klimatet. Cementproduktionen står för ca 5-8% av världens koldioxidutsläpp [1]. Utsläppen skulle kunna minskas genom att t.ex. effektivisera förbränningsprocess, men däremot kan inte kalcineringen undvikas, vilken står för den största delen av utsläppen. Under hela tillverkningsprocessen bildas det ungefär 800kg koldioxid per ton kalksten [34]. Idag är den bästa lösningen att ersätta cement med andra bindemedel som avger mindre koldioxid.

Flygaska

Då flygaskan är en restprodukt från förbränningen av ett fossilt bränsle i kolpulvereldade kraftvärmeverk kan det argumenteras om detta verkligen är ett miljövänligare alternativ. Idag anses det vara ett mer miljövänligt alternativ då flygaskan kan ersätta cement ger minskad koldioxidutsläpp [3]. Hade inte flygaskan använts hade den troligtvis hamnat i deponi. Om användandet av flygaska utökas kommer inte dagens produktion att räcka till [3].

Mald granulerad masugnsslagg

Granulerad masugnsslagg är en restprodukt från järnindustrin som hamnar i deponi. De sorter som är användbara som puzzolaner anses då ge en miljövinna i form av minskad avfall till deponi samt minskat cementbehov. Utökas användandet av MGMS kommer inte dagens nivåer av MGMS räcka till [3].

Kalcinerad lera

Till skillnad från flygaska och slag finns naturliga leror och mörgel i tillräckligt stora mängder världen över för att räcka till dagens behov för cement och betongindustrin i helhet för att reducera miljöinverkan [35]. Kalcineringsprocessen är mindre energikrävande än cementproduktionen och är därmed ett alternativ som ger mindre koldioxidutsläpp till skillnad från cement. Ett annat stort plus med kalcinerad lera är att ingen koldioxid avges vid tillverkningsprocessen, s.k. kalcinering [36], annat än bränslet som används vid upphettningen av materialet, t.ex. fossilt bränsle.

7 Recept

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur höga halter av flygaska, sötvattensgranulerad masugnsslagg och kalcinerad lera förändrar betongens egenskaper såsom hållfasthetsutveckling, uttorkning, böjstyvhet, böjdraghållfasthet och krympning. Två olika ersättningsnivåer av varje tillsatsmaterial undersöktes. Dessa nivåer valdes utifrån resultaten från kalorimetertester, vilket tas upp i 8.1 Värmeutveckling.

För att ha någonting att jämföra med kommer referensprovkroppar, som inte innehåller tillsatsmaterial, gjutas och genomgå samma tester. Vct för referensproven har satts till 0,6. Alla andra prov har samma vattenmängd och ballast som referensproven men dock olika mängder cement och tillsatsmaterial.

Ballasten innehåller i princip alltid fukt som måste tas med i beräkningen, annars kan vattenmängden överskattas vilket kan påverka bl.a. konsistensen och hållfastheten. Vid varje gjutning homogeniseras ballasten, gruset för sig och stenen för sig, innan en del av ballasten bränns för att kunna beräkna fuktkvoten. Denna homogenisering gjordes genom att ballasten mättes upp i hinkar och hälls över i andra hinkar ett antal gånger till god omblandning anses ha uppnåtts och därmed en homogen ballast.

Cementet som användes i samtliga recept är Byggcement från Slite som tillverkats av Cementsa. Anledningen till att denna produkt används är för att detta är den vanligaste cementprodukten på den svenska marknaden som används för huskonstruktioner.

I Tabell 3 redovisas receptet för referensproven. Alla andra prov har samma recept men med olika cement- och tillsatsvolym och redovisas i bilaga 1.

Tabell 3. Grundrecept för referensprov.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Volym/liter
Cement	350	3010	116	0,6	0,12
Vatten	210	1000	210	0,2	0,21
Ballast	1732	2650	654	1,7	0,65
Luft	0,00	0	20	0,0	0,02
Summa	2292		1000	2,3	1,00

Ballasten består av ca 55% grus (0-8 mm) och 45% makadam (8-11 mm). Gruset kommer från Kvidinge och stenmaterialet kommer från Hardeberga stenbrott som ligger öster om Lund.

8 Experimentell metodik

8.1 Värmeutveckling

Huvudsyftet med denna laboration är att undersöka om det är möjligt att gjuta betong som innehåller upp till 90 vol.% flygaska, slagg och kalcinerad lera. Genom att genomföra kalorimätning med olika halter tillsatsmaterial, mellan 0% och 90% av cementvolymen, kan det förhoppningsvis avgöras vilka mängder som är orimliga att gjuta och hur vilken halt som bör vara den högsta.

Som tidigare nämnt finns det troligtvis en teoretisk maximal cementshalt som kan ersättas med andra tillsatsmaterial. För flygaska ligger denna halt på 30% av cementvikten och den rekommenderade maximala halten för kalcinerad lera ligger på 50%. För att undersöka om det ändå inte finns potential för högre ersättningsgrader än de ovan beskrivna genomfördes kalorimetrimätningar för att få en indikation ifall de sker någon hydratisering.

Dessa mätningar genomfördes med kalorimeterar av typen TAM air, se Figur 12. TAM air är en avancerad kalorimeter som har åtta kanaler, vilket innebär att det kan genomföras åtta olika tester samtidigt. I varje kanal finns, förutom proven, också referensprov som är placerade nära proven. Referensproven har ungefär samma värmekapacitet som proven och finns för att minimera fel. Skulle t.ex. proven störas av yttre värme kommer detta att påverka både proven och referensproven lika mycket och då kan resultaten lätt räknas om till det verkliga värdet.



Figur 12. TAM-air med en dator som loggar värmeeffekten.

De experimentella studierna genomfördes i följande steg:

1. Kalorimetrarna laddades med åtta stycken referensprov (i form av vatten) vardera och programmen startades, d.v.s kalorimetern börjar sampla..
2. Därefter blandades samtliga prov genom att
 - I. Väga upp mängden cement. Då ett konstant vtc eftersträvas varierar mängden cement för de olika proven.
 - II. Mängden tillsatsmaterial vägdes upp. Då syftet var att undersöka olika ersättningsgrader varierar mängden för att få sökt vol. %.
 - III. Därefter sker omrörning av cement och tillsatsmaterial med hjälp av en omrörningsmaskin under ungefär 30 sekunder.
 - IV. Mängden vatten mäts upp och hålls ner i cementblandningen.
 - V. Därefter sker omrörning med hjälp av samma maskin som ovan i samma tidsintervall.
 - VI. Slutligen firades proven ned i kalorimetrarna med en krok.
3. Kalorimetermätningen genomfördes under ca en veckas tid. Mängderna som vägdes upp i samtliga prover redovisas i bilaga 2.

8.2 Tillverkning och lagring

Före tillverkningen av provkroppar sker måste samtliga recept undersökas för att säkerställa att den färska betongen har tillräckligt god kvalitet. Detta genomfördes genom provgjutning. Syftet med provgjutningarna var att kontrollera att betongen är homogen, gjutbar och inte för styv.

Vid provgjutningen gjöts referensreceptet, 75 vol.% flygaska, 90 vol.% slagg och 50 vol.% kalcinerad lera. Författarna har bedömt att det inte behövs någon provgjutning av recepten som består av 55 vol.% flygaska, 70 vol.% slagg och 30 vol.% kalcinerad lera. Detta för att om recepten med högre halt tillsatsmaterial klarar provgjutningen, är det rimligt att anta att så är också fallet för recepten med lägre halt.

Innan varje gjutning rengjordes betongblandaren noggrant för att få bra reliabilitet på betongsatserna. Om fukt eller annat material hade funnits i betongblandaren hade detta kunnat påverka resultaten.

Gjutningsmomentet genomfördes enligt följande steg:

1. Tillräckligt mycket grus och sten vägdes upp var för sig och homogeniserades (blandades för att utjämna skillnaden mellan övre

torrare lagren och undre fuktigare lagren vid uppmätning) för att få en jämn fuktfördelning.

2. En representativ andel grus respektive sten vägdes upp och brändes för att få bort fukten.
3. Gruset och stenen vägdes igen och därefter beräknades fukthalten, u [kg/kg].

$$u = \frac{\text{Förågningsbara vattnets vikt}}{\text{Materialets torra vikt}}$$

4. När fukthalterna var kända vägdes vatten, cement, tillsatsmaterial, grus och sten upp.
5. Cement, tillsatsmaterial, sten och grus blandades i en betongblandare innan vattnet tillsattes försiktigt. I bilaga 1 redovisas mängderna av de olika materialen som vägdes upp för samtliga recept.
6. Sättnått genomfördes.
7. Densitet räknades ut genom att väga betongen som hölldes i behållaren för lufthaltsmätningen (på 8 liter).
8. Betongens lufthalt kontrollerades med en lufthaltsmätare.
9. Provkropparna gjöts.

Totalt gjöts för varje studie nio kuber för hållfasthetsprovning, två provkroppar för krympförsöken, en femliters hink för mätning av fri uttorkning, en femliters hink för mätning av självuttorkning och tre balkar för mätning av böjstyvhet och böjdraghållfasthet per recept, se Tabell 4. Kub- och balkformarna gjöts i färdiga formar. Balkarna var enkelarmerade på ca 2cm höjd från underkant, se Figur 13. Provkropparna för krympmätning gjöts i egentillverkade formar vars mått var noggrant utsågade och mätta, se Figur 14. Speciellt med dessa provkroppar är att en dubb på gjöts in på var kortsida för att vid senare tillfälle montera mätdubbar för att möjliggöra krympmätningar. Varje recept (ett recept per studie) tillverkades på en gjutning, d.v.s. med endast en blandning.



Figur 13. Balkformarna som användes innehållande armering.



Figur 14. En av formarna för provkropparna vars krympning ska mätas.

Tabell 4. Sammanställning över tillverkade provkroppar.

Provkroppar	Ålder	Antal
Tryckhållfasthet	3d prov	3
	7d-prov	3
	28d-prov	3
Böjdraghållfasthet och böjstyvhet	28d-prov	3
Krympning		2
Fri 1 dygn uttorkning		1
Autogen uttorkning		1
Total antal provkroppar/ recept		16
Antal recept		7
Total antal provkroppar för hela studien		112

I samband med varje gjutning undersöktes betongens homogenitet, lufthalt, sättmått samt densitet. Nedan beskrivs metoderna som användes:

Betongens homogenitet (d.v.s. om den verkar vara välblandad och likvärdig) undersöktes okulärt och dokumenterades med foton.

Lufthalten undersöktes med en lufthaltsmätare. Den går till på sådant sätt att betong hålls upp i en behållare med känd volym (i detta fall 8 liter). Under fyllningen vibreras behållaren på ett vibratorbord så att eventuella hålrum fylls ut av betong. Denna vibrering gjordes två gånger; en gång när behållaren var halvfyllt och ytterligare en gång till när den hade fyllts helt. Därefter sätts en tryckmätare fast på cylindern så att det sluter tätt. Sedan öppnas två ventiler och det slutna utrymmet mellan betongmassan och luftmätaren vattenfylls. Därefter stängs ventilerna och ett initialtryck pumpas upp. Därefter sker mätningen genom att vattnet genom detta tryck pressas ner i betongen och ersätter luften, vilket ger utslag i form av en lufthalt.

Sättmättet undersöktes med en sättkon, se Figur 15. Konen fylldes först till en tredjedel av konens höjd innan betongen kompakterades med hjälp av stötning med en metallpinne 25 gånger för att fylla ut hålrum. Sedan fylldes konen till två tredjedelar av konens höjd och betongen stöttes ytterligare 25 gånger. Slutligen fylldes konen helt och betongen stöttes ytterligare 25 gånger. När detta var klart lyftes sättkonen och sättmättet mättes från underkanten av staven till betongmassans högsta punkt.

Densiteten beräknades genom att väga betongen som fanns i behållaren vid lufthaltsmätningen. Vikten dividerades med lufthaltsmätarens volym som är 8 liter.



Figur 15. Sättkon och betongmassa.

8.2.1 Lagring av provkroppar

För att skydda betongen mot plastiska krympsprickor, som kan uppstå om för mycket vatten avdunstar från betongen under härdningen, har samtliga betongprover direkt efter gjutning membranhärdats genom täckning med plast, se Figur 16. Dagen därpå avformades alla provkroppar och plastades in för fortsatt skydd mot plastiska krympsprickor, och förvarades i betonglaboratoriet, som har relativt stabilt klimat på ca 20°C.



Figur 16. Betongen skyddas med plast.

8.3 Hållfasthetsutveckling

Provkropparna provtrycktes vid tre tillfällen; efter en härdningstid på 3, 7 och 28 dygn. För att få bra reliabilitet genomfördes tre provtryckningar per recept vid varje provningstillfälle.

Hållfastheten undersöktes genom att utsätta provkropparna (kuber med 150 mm kantlängd) för ökande trycklast med en hållfasthetsmaskin tills brott uppnåddes, se Figur 17.



Figur 17. Maskinen som användes vid tryckhållfasthetstesterna.

8.4 Uttorkning av betong

I undersökningen av självuttorkningen användes en metod där betongen hälldes ned i en 5-liters hink som har ett djup på 15 cm och en diameter på 30 cm. När betongen hårdnat borrades ett hål vars djup är 40% av betongens tjocklek. I detta hål sattes sedan ett plaströr med häftande gummi som ska se till att det blir tätt mellan plaströret och betongen, vilket sedan kontrolleras med en gummiblåsa. Efter detta isolerades betongen med plast och RF-givare placerades i plaströret, se Figur 18. För att ytterligare undvika läckage häftades gummimassa på skarven mellan plaströret och RF-givare.

I fallet med fri uttorkning genomfördes samma sak som ovan förutom att betongen inte isolerades med plast. Detta för att låta den få torka endimensionellt. Samtliga prov började mätas sex dygn efter gjutning för att inte chocka RF-givarna.

Totalt genomfördes mätningar på 14 stycken hinkar, men det fanns endast tillgång till tre stycken RF-givare som flyttades mellan olika hinkar. När en mätning skulle genomföras stoppades en RF-givare i plaströret som där skarven sedan isolerades enligt ovan. Innan avläsning fick givarna stå i hinken i minst 12 timmar enligt [37]. När avläsningen var genomförd placerades givaren i en annan hink och plaströret pluggades igen.

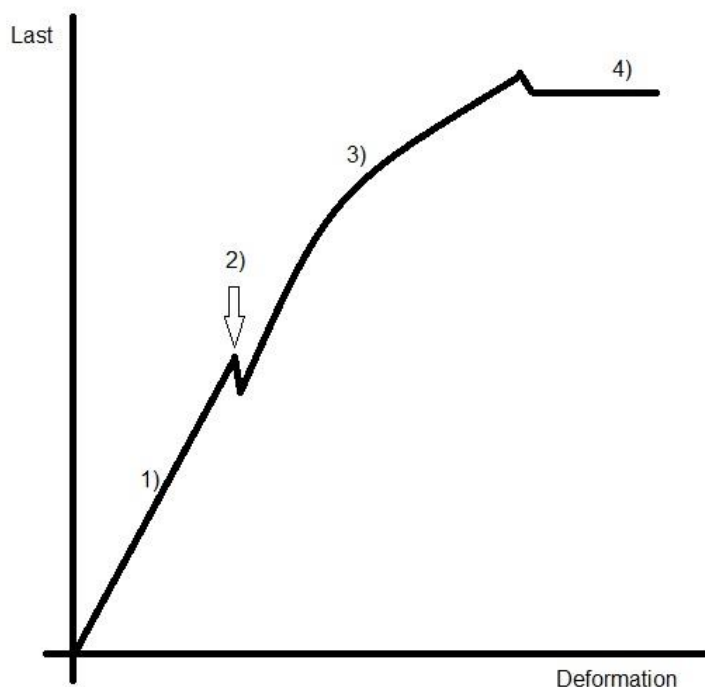


Figur 18. Hink som är fylld till toppen med betong och tätad med plast.

8.5 Bøjstyvhed

Balkarna (med måtten 800 mm x 100 mm x 100mm) utsattes för en trepunktsbelastning enligt Figur 20 där lasten ökades kontinuerligt. Under tiden loggades belastningen samt deformationen i ett datorprogram som ritade upp ett kraft-nedböjningsdiagram, se Figur 19, ur vilket fyra områden kan utläsas:

- 1) En del där kraft-nedböjning uppvisar ett linjärt samband, vilket innebär att betongen fortfarande befinner sig i stadium I (osprucket stadium), se figur 20.
- 2) En punkt där lasten plötsligt minskar snabbt för att sedan återigen öka, vilket innebär att balken för första gången spricker och därigenom övergår från stadium I till stadium II (sprucket stadium). Den lasten kallas spricklasten, se figur 21.
- 3) En del där kraft-nedböjningen ej längre uppvisar ett linjärt samband, vilket innebär att betongen har övergått till stadium II. Det innebär att då balken har spruckit upp har armeringen börjat bidra till att ta upp dragkraften som belastningen ger upphov till.
- 4) En del där belastningen planar ut och deformationen ökar vilket innebär att armeringen flyter och balken har gått till brott, se figur 22.



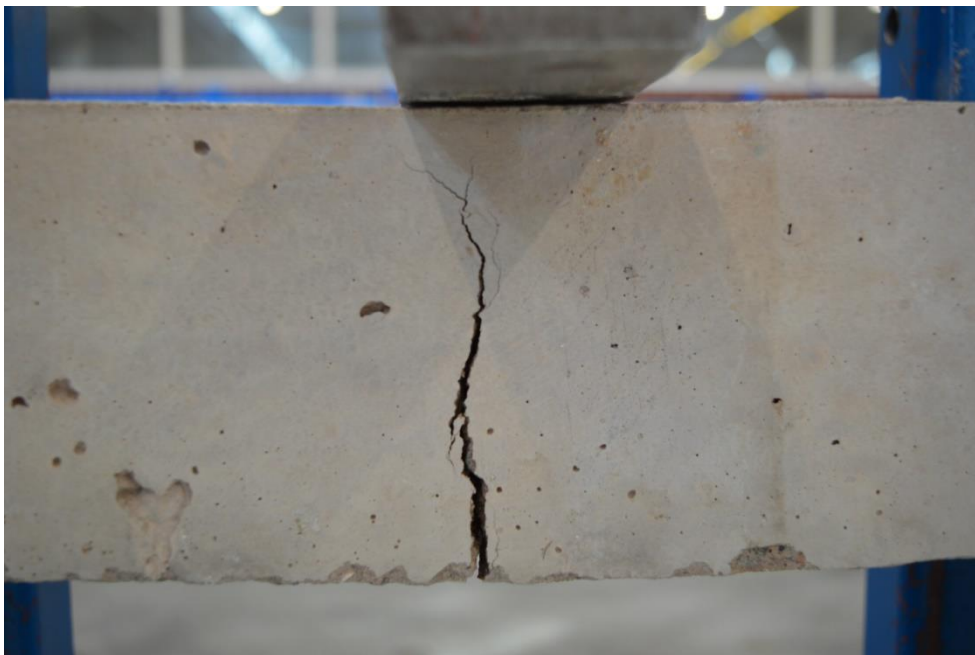
Figur 19. Exempel på last-nedböjningssamband. Område 1)-4) enligt ovan.



Figur 20. Lastuppställning vid balkprovningen. Balken ligger fritt upplagd och belastas med en tryckkraft mellan upplagen.



Figur 21. Den första böjsprickan uppstår som en följd till att böjdragheten har uppnåtts i nederkant. Detta markerar att balken har övergått från stadium I till stadium II. Detta markeras av område 2 i last-nedböjnings sambandet.



Figur 22. Balken har gått till brott till följd av ökad belastning. Detta innebär att armeringen har börjat flyta. Detta markeras av område 4 i last-deformationssambandet.

Utvärderingen av böjstyvheten sker utifrån den linjära delen av sambandet, d.v.s. då balken fortfarande befinner sig i stadium I (se Figur 19, område 1), då detta medför att endast betongens naturliga böjstyvhet tas fram och inte en böjstyvhet baserad på samverkan mellan betongen och armeringen (område 3).

Då balken är i stadium I under det linjära sambandet kan följande samband för kraft-nedböjning användas [38]:

$$v = \frac{PL^3}{48EI} \leftrightarrow EI = \frac{PL^3}{48v}$$

Där:

- v är nedböjning
- L är balkens längd mellan upplagen
- P är kraften

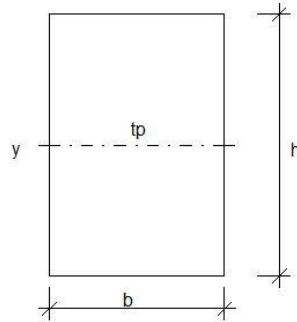
För utvärderingen behöver dock böjstyvheten beräknas genom att ta lutningen på det linjära sambandet vilket gör att sambandet kan modifieras till:

$$EI = \frac{(P_1 - P_2)L^3}{48(v_1 - v_2)}$$

Tröghetsmomentet I beräknas för balkar enligt:

$$I_y = \frac{bh^3}{12}$$

Där b respektive h ges utifrån Figur 23.



Figur 23. Balkens tvärsnitt.

När alla böjstyvheter är framräknade tas medelvärde för varje recepts tre balkar samt en standardavvikelse beräknas för att ge en uppfattning om spridningen mellan balkarna.

Före balkprovet genomförs en teoretisk referensberäkning för att avgöra hur snabbt balkbelastningen skall ske för att undvika en för snabb belastning vilket avsevärt försvårar utvärderingen.

8.6 Böjdraghållfasthet

Böjdraghållfastheten utvärderas genom att det ur balkprovningarnas last-deformations samband avläses var kurvan övergår från linjär till icke-linjär vilket är den punkt på sprickhållfastheten uppnås, se Figur 19, område 2. Utifrån den spricklasten kan sprickmomentet beräknas utifrån nedanstående formel och vidare kan böjdraghållfastheten beräknas enligt nedanstående formel:

$$M_{cr} = \frac{P_{cr}L}{4}$$

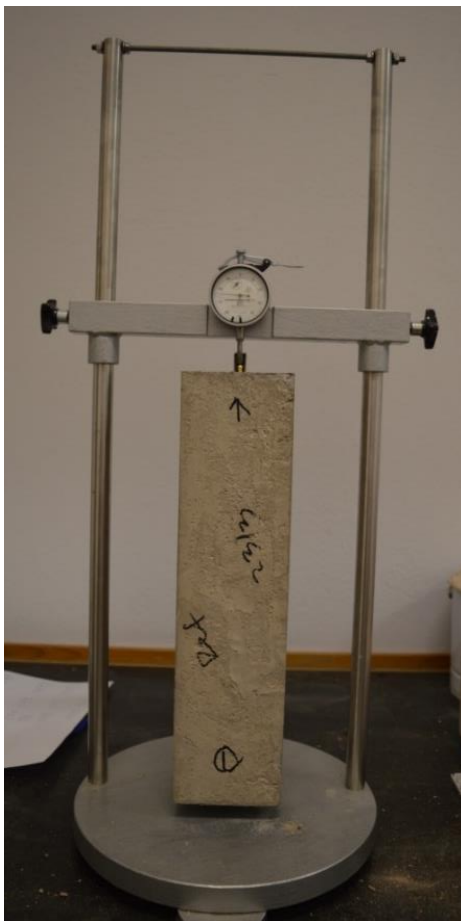
$$M_{cr} = f_{ctm}W \leftrightarrow f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{W}$$

8.7 Krympning

Krympmätningarna genomfördes med hjälp av en särskild mätbygel med en mätarklocka fäst i ovankant, se figur 24. Mätningarna genomfördes på sådant sätt att provkropparna (med måtten 400 mm x 100 mm x 100 mm) hade en mät-dubb i nedre hållaren och en mät-dubb i översta hållaren mot mätarklockan. För att underlätta en konsekvent mätning av prismorna markeras vilken sida som den övre mät-dubben är placerad.

Vid varje mätning genomfördes först en referensmätning med referensstav, vilken upprepas efter var fjärde prisma för att på så vis upptäcka eventuella förändringar hos mätanordningen som kan påverka resultatet.

Förutom krympningen vägdes samtliga provkroppar innan varje mätning för att ta reda på viktminskningen i syfte att avgöra huruvida uttorkning sker.



Figur 24. Mätbygel med en prisma ditsatt för mätning. Pilen markerar vilken mät-dubb som skall vara riktad uppåt mot klockan.

8.8 Empiriska samband mellan tryckhållfasthet – böjdraghållfasthet och tryckhållfasthet – elasticitetsmodul

Nedan beskrivs de samband som används för att jämföra det empiriskt framräknade värdet mot resultatet från balkprovningarna. Där elasticitetsmodulen tas fram multipliceras denna med yttröghetsmomentet I , vilket anses vara konstant för varje balk, vilket resulterar i en böjstyvhet.

Samband för hållfastheter enligt JCSS

In-situ tryckhållfasthet - tryckhållfasthet

Enligt [39] finns det ett samband mellan betongens tryckhållfasthet och dess centriska draghållfasthet vilken beskrivs av sambandet [MPa]:

$$f_c = \alpha(t, \tau) f_{c0}^\lambda$$

Där:

- λ är en lognormal faktor som tar hänsyn till systematisk variation av in-situ hållfastheten och standardprovets hållfasthet. Denna faktor har ett medelvärde på 0,96 och en COV på 0,005 och generellt gäller det att λ kan betraktas som deterministisk, d.v.s. konstant.
- $\alpha(t, \tau)$ är en deterministisk (konstant) funktion som tar hänsyn till betongens ålder vid påförande av belastning, t [dygn], och tiden under vilken belastningen verkar, τ [dygn]. Funktionen beskrivs av sambandet:

$$\alpha(t, \tau) = \alpha_1(\tau) \alpha_2(t)$$

$$\alpha_1(\tau) = \alpha_3(\infty) + [1 - \alpha_3(\infty)] e^{-a_\tau \tau}$$

$$\alpha_2(t) = a + b \ln t$$

- Där $\alpha_3(\infty) \approx 0,8$, $a_\tau = 0,04$. I de flesta tillämpningar kan $\alpha_1(\tau) = 0,8$ användas. Koefficienterna a respektive b i $\alpha_2(t)$ beror på cementet och omgivande miljö. Under normala förhållanden kan koefficienterna sättas till $a = 0,6$ respektive $b = 0,12$.
- $\varphi(t, \tau)$ är krypningskoefficienten enligt någon modern kod (i svenskt fall eurokod) och kan antas vara deterministisk.

- β_d är förhållandet mellan den permanenta lasten och den totala lasten och beror på vilken typ av struktur och generellt har faktorn värden mellan 0,6 och 0,8.

För beräkningar med denna metod ansätts $\lambda = 0,96$ och vid beräkning av $\alpha(t, \tau)$ används de konstanter som beskrivs som de som kan användas under normala samt flesta tillämpningar.

Tryckhållfasthet - centrisk draghållfasthet

$$f_{ct} = 0,3f_c^{2/3}$$

Där f_{ct} samt f_c ges i MPa.

Centrisk draghållfasthet - elasticitetsmodul

$$E_c = 10,5f_c^{1/3} \frac{1}{1 + \beta_d \varphi(t, \tau)}$$

Där E_c ges i GPa med f_c i MPa. $\varphi(t, \tau)$ samt β_d ges enligt 0.

I detta fall används in-situ tryckhållfastheten beräknad enligt 0. I och med att det inte sker någon extra belastning av proverna gäller det att krypning inte har ägt rum, d.v.s. $\varphi(t, \tau) = 0$.

Böjstyvheten beräknas sedan genom stycke 8.5.

Samband för hållfastheter enligt betonghandboken- material

Enligt [40] finns det vissa förhållanden mellan de olika typer av hållfastheter varav de väsentliga redovisas.

Tryckhållfasthet - böjdraghållfasthet

$$f_{t,fl} = A \cdot f_c^B$$

Där B beror på om ballasten är naturballast eller krossad ballast och varierar mellan 0,60 och 0,72. A är ungefär 0,45.

I beräkningarna ansätts B till 0,72 då ballasten är i detta fall makadam från Sydstens stenbrott i Hardeberga, Sverige.

Tryckhållfasthet – centrisk draghållfasthet

$$f_t = Af_c^B$$

Där A kan beskrivas med $A = 0,24$, $B = 2/3$ eller $A = 0,21$ och $B = 2/3$.

I detta fall beräknas med $A = 0,21$ samt $B = 2/3$ för att vara mer på den säkra sidan då detta ger en mindre hållfasthet.

Böjdraghållfasthet - centrisk draghållfasthet

$$f_t = Bf_{t,fl}$$

Där B bestäms av:

$$B = \frac{2,0 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}{1 + 2,0 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7}}$$

Där h är balkens höjd i mm samt $h_0 = 100$ mm.

Samband tryckhållfasthet – elasticitetsmodul enligt brittisk standard

Enligt [21] säger brittisk standard:

$$E_c = 9,1f_{cu}^{0,33}$$

Där E_c ges i GPa med F_{cu} i MPa. Detta samband gäller för betong med densitet 2320 kg/m³ vilket är typiskt för normal betong.

Böjstyvheten beräknas sedan genom stycke 8.5.

9 Resultat och diskussion

I detta avsnitt förs diskussioner kring resultaten från samtliga mätningar samt användbarheten av recepten som husbyggnadsbetong.

9.1 Värmeutveckling

I studien av värmeutvecklingen genomfördes totalt sex stycken kalorimeterförsök (två per tillsatsmaterial) som varade under ca en veckas tid.

Syftet med denna laboration var att undersöka bindemedlens värmeutveckling och utesluta bindemedelshalter som har för låg värmeutveckling. Detta för att undvika att gjuta betong som troligtvis inte kommer härda. Vart denna gräns ligger är en bedömningsfråga som inte endast beror på värmeutvecklingen eller värmeeffekten, utan även den kemiska sammansättningen hos tillsatsmaterialen.

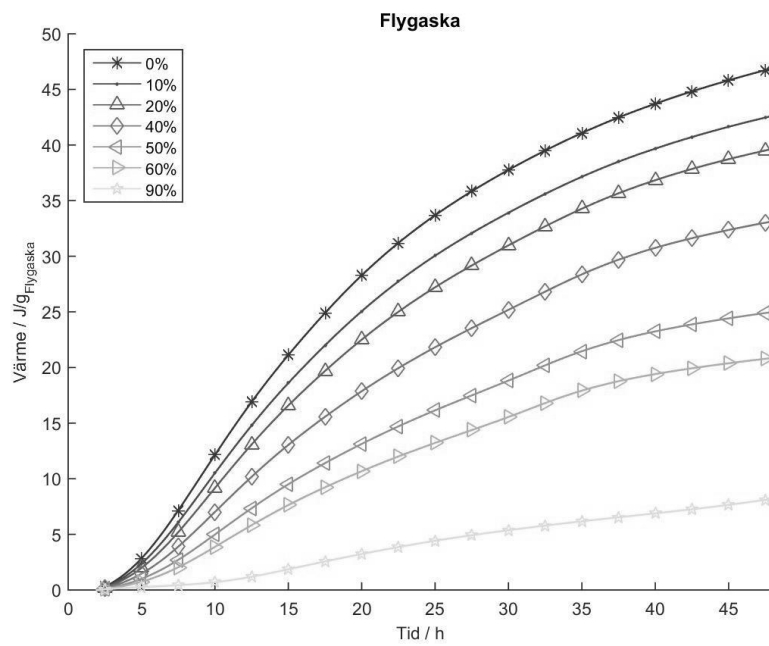
Författarna har i första hand studerat värmeeffekten per gram bindemedel för att bedöma huruvida bindemedlen reagerar i tillräcklig grad för att vara användbart. Sedan har värmeutvecklingen per gram bindemedel studerats och jämförts med referensreceptet och gjort en bedömning huruvida värmeeffekten anses vara för låg.

Flygaska

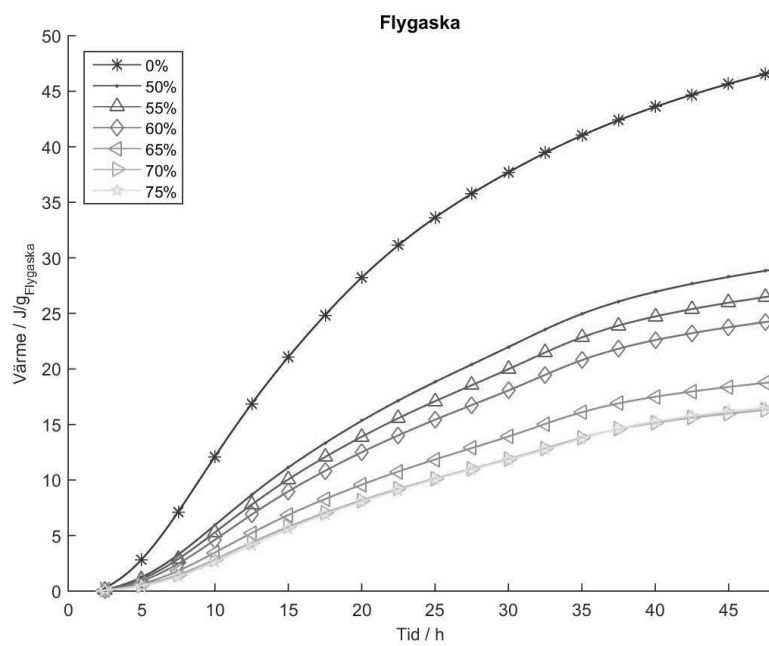
Genom att studera figur 25 kan det konstateras att värmeutvecklingen är mycket låg för provet med 90 vol.% flygaska. Under det första dygnet är värmeutvecklingen ungefär 88% lägre än för referensprovet vilket författarna anser vara för lågt. Detta innebär troligtvis att det sker nästan ingen reaktion hos bindemedlet och därmed ingen hållfasthetstillväxt under första dygnet, vilket beror på att klinkerhalten är för låg och det sker i princip ingen cementreaktion. Om det inte sker någon cementreaktion kommer flygaskan heller inte att reagera då det måste finnas CH för att flygaskan ska reagera. Detta innebär att 90 vol.% inte anses vara rimligt att gjuta för vidare tester.

I Figur 26 syns att provet med 75 vol.% flygaska har i princip samma värmeutveckling som provet med 70 vol.% flygaska. Provet med 75 vol.% flygaska har högre värmeutveckling än provet med 90 vol.% flygaska, men den är fortfarande relativt mycket lägre än referensreceptet, vilket också kan förväntas. Denna värmeutveckling är ungefär 70% lägre än referensprovet, vilket författarna har bedömt som tillräckligt högt för att betongen skall härda. Därför väljs 75 vol.% flygaska som högsta andelen utbytt material för fortsatta studier.

Resultat och diskussion



Figur 25. Total värmeutveckling per gram flygaska.



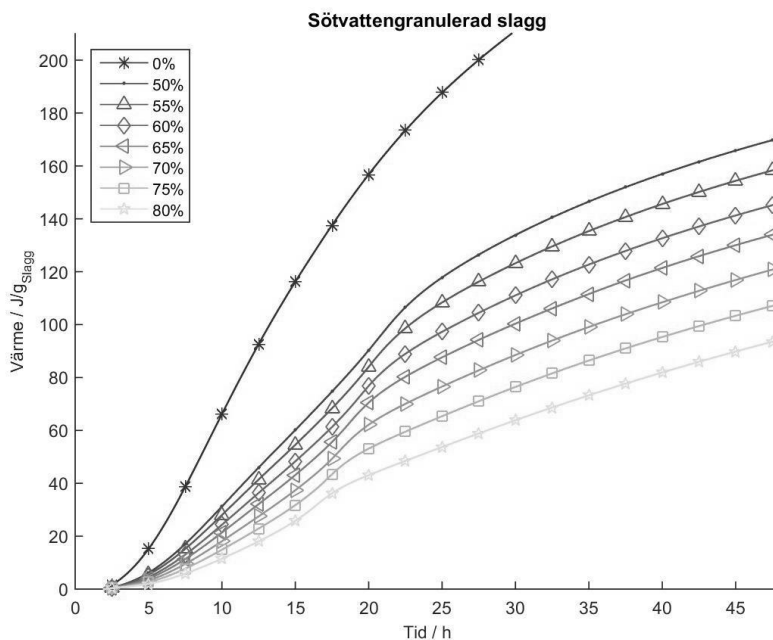
Figur 26. Total värmeutveckling per gram flygaska.

Sötvattensgranulerad masugnsslagg

Precis som flygaskan minskar värmeutvecklingen ju högre andelen slagg är. Figur 27 visar att provet som innehåller 90 vol.% slagg har låg värmeutveckling som är efter ett dygn är ungefär 81% lägre än referensprovet.

Till skillnad från 90 vol.% flygaska ökar värmeutvecklingen efter de första 15 timmarna, och efter ca tre dygn hade samtliga slagghalter högre värmeeffekt än referensprovet, vilket innebär högre reaktion än hos referensen. I fallet med flygaska hade inga halter av flygaskan högre värmeeffekt än referensprovet.

Utifrån detta valdes 90 vol.% slagg som högsta andelen utbytt material för fortsatta studier.



Figur 27. Total värmeutveckling per gram slagg.

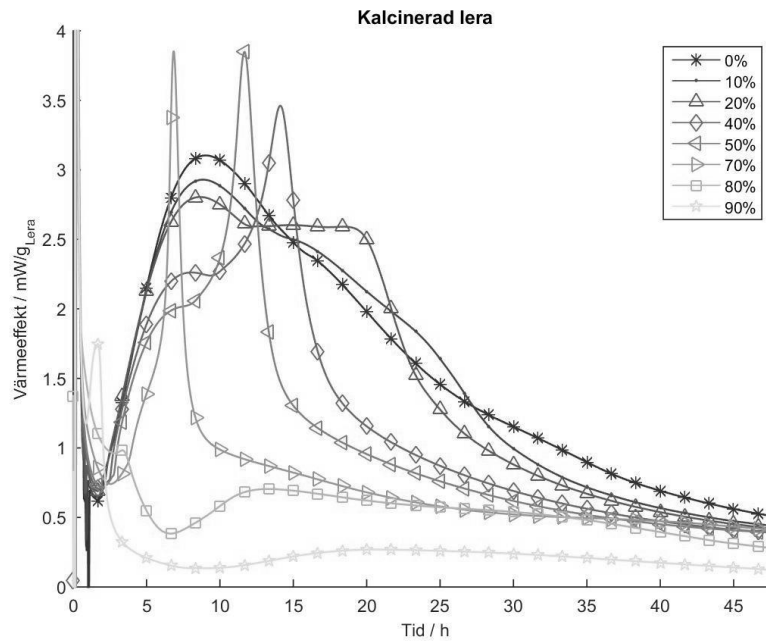
Kalcinerad lera

I figur 28 syns att gränsen hos den kalcinerade lera ligger ungefär runt 50 vol.%, vilket också är det värde som framkommit som en övre gräns vid diskussioner med Paul Sandberg och Lars Wadsö⁴. Vid högre halter än 70 vol.% är värmeeffekten relativt låg med en hög topp ca 6h efter blandning, vilket inte är önskvärt. Därför har författarna valt att gjuta med högst 50 vol.% lera. Efter att 50 vol.% lera hade valts genomfördes en sulfatoptimering där olika mängder CaSO_4

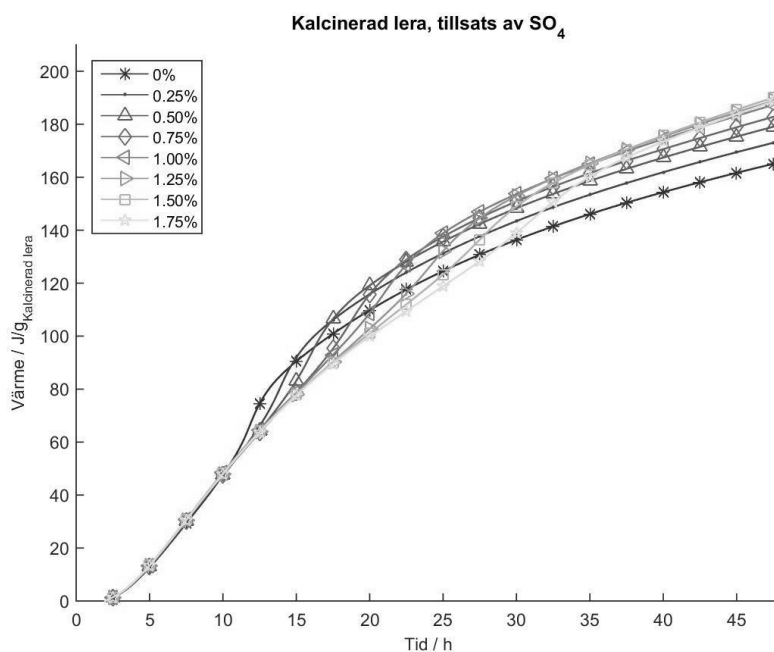
⁴ Lars Wadsö är professor vid avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Resultat och diskussion

(0-1,75% av bindemedelsvikten) tillsattes för att öka värmeutvecklingen. Resultaten i figur 29 visar att provet som innehåller 1% CaSO_4 ger störst värmeutveckling efter 24 timmar.



Figur 28. Plott av värmeeffekten per gram kalcinerad lera.



Figur 29. Plott av total värmeutveckling per gram kalcinerad lera.

9.2 Färska betongens egenskaper

Nedan i Tabell 5 presenteras lufthalt och sättmått för samtliga betongrecept.

Tabell 5. Lufthalt och sättmått för samtliga recept.

Recept	Lufthalt [%]	Sättmått [mm]
Referens	2,15	69
55 vol.% Flygaska	0,75	144
75 vol.% Flygaska	0,69	178
70 vol.% Slagg	2,50	128
90 vol.% Slagg	2,55	176
30 vol.% Lera	2,50	28
50 vol.% Lera	3,75	36

Flygaska

Båda recepten som innehöll flygaska gav en betong med lägre lufthalt än referensbetongen, vilket beror på att flygaskan är ett finare material än cement och därigenom fyller ut hålrummen.

Båda recepten hade en mycket lösare konsistens än referensreceptet, vilket är bra för arbetbarheten. Betong med lös konsistens behöver inte vibreras lika mycket som betong med styvare konsistens för att omsluta armeringen. Däremot får betong med lösare konsistens inte vibreras för länge, då det kan uppstå stenseparation. Den lösare konsistensen visar också att en mindre mängd vatten behövs för att uppnå samma arbetbarhet som referensreceptet.

Betongen bedömdes vara homogen av författarna vid gjutningen. Det uppstod ingen separation vid blandning, vibrering eller sättmåttstestet.

Sötvattengranulerad masugnsslagg

Som synes i figur 30 uppstod lite vattenseparation i kanten av betongen som innehöll 90 vol.% slagg. Däremot syntes ingen tydlig vattenseparation vid sättmåtsförsöket, se figur 31. Inget vatten rann ut ur betongmassan och den bedömdes därmed vara tillräckligt homogen.

Separationen beror troligtvis på att det finns för lite cement i betongen då cement är ett finare material än slagg, och därmed är bättre på att hålla kvar vattnet i betongmassan.

Även denna betong var mycket lösare än referensbetongen med ett sättmått på 195 mm.



Figur 30. Vattenseparation i kanten av betongmassan.



Figur 31. Efter sättmått är betongen fortfarande homogen.

Kalcinerad lera

Båda recepten som innehöll kalcinerad lera krävde tillsats av flyttillsatsmedel för att få en tillräckligt god arbetbarhet, se figur 32. Totalt krävdes 103,6g flyttillsatsmedel för betongen som innehöll 30 vol.% lera och 325,4g för betongen som innehöll 50 vol.% lera. Detta är inte förvånande då det är känt att kalcinerad lera försämrar arbetbarheten [24].

Kort efter att blandaren stängdes av blev betongen som innehöll 50 vol.% lera mycket styv. När sättmättet genomfördes direkt efter blandning blev sättmättet 36 mm, varpå betongen blandades ytterligare. När sättmättet genomfördes igen ungefär 5 minuter senare blev det 10 mm. Detsamma skedde med betongen som innehöll 30 vol.% lera men däremot tog det mycket längre tid, ungefär 15 minuter, före den började styvna rejält. Troligtvis finns det något i leran som suger åt sig vätskan och gör betongen styvare.

I denna studie har detta inte lett till några större problem då samtliga formar som gjöts är enkla. Däremot är det inte lämpligt att gjuta med sådan betong ute i produktionen. Om en betongprodukt med sådan hög andel lera skall industrialiseras måste receptet ändras för att göra betongens konsistens lösare och se till så att den inte styvnar för snabbt.

Betongen som innehåller 50 vol.% lera fick en högre lufthalt på 3,75%. En högre lufthalt är bra för uttorkningen men mindre bra för hållfastheten.



Figur 32. Betongmassan innan tillsats av flyttillsatsmedel.

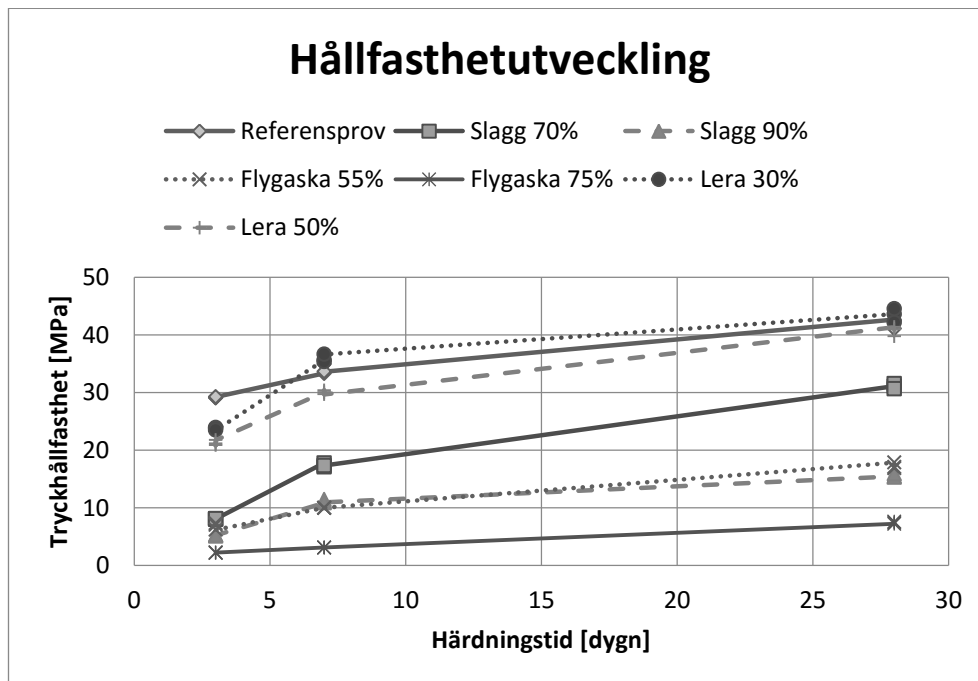
Felkällor vid gjutning

En stor felkälla är svårigheten att bedöma grusets fuktkvot som kan över- eller underskattas. Detta kan ske om gruset som brändes inte är representativt för all grus i betongsatsen. Om fuktkvoten underskattas kommer en större mängd vatten vägas upp vilket kan leda till ökad porositet och därmed försämra betongens hållfasthet och beständighet.

Om fuktkvoten istället överskattas kommer en mindre mängd vatten vägas upp vilket kan leda till styvare konsistens och sämre arbetbarhet. Det bästa hade varit att bränna eller värma upp all ballast, men med tanke på hur mycket ballast som har använts i denna studie var det bästa alternativet att homogenisera ballasten och sedan bränna ungefär 1 kg av ballasten (d.v.s. 1kg för gruset och 1 kg för makadamen) och därur bestämma fuktkvoten och dra av ballastens vattenmängd från den mängd vatten som tillförs.

9.3 Tryckhållfasthet

Resultaten från samtliga prov redovisas nedan i figur 33.



Figur 33. Hållfasthetutvecklingen hos samtliga recept.

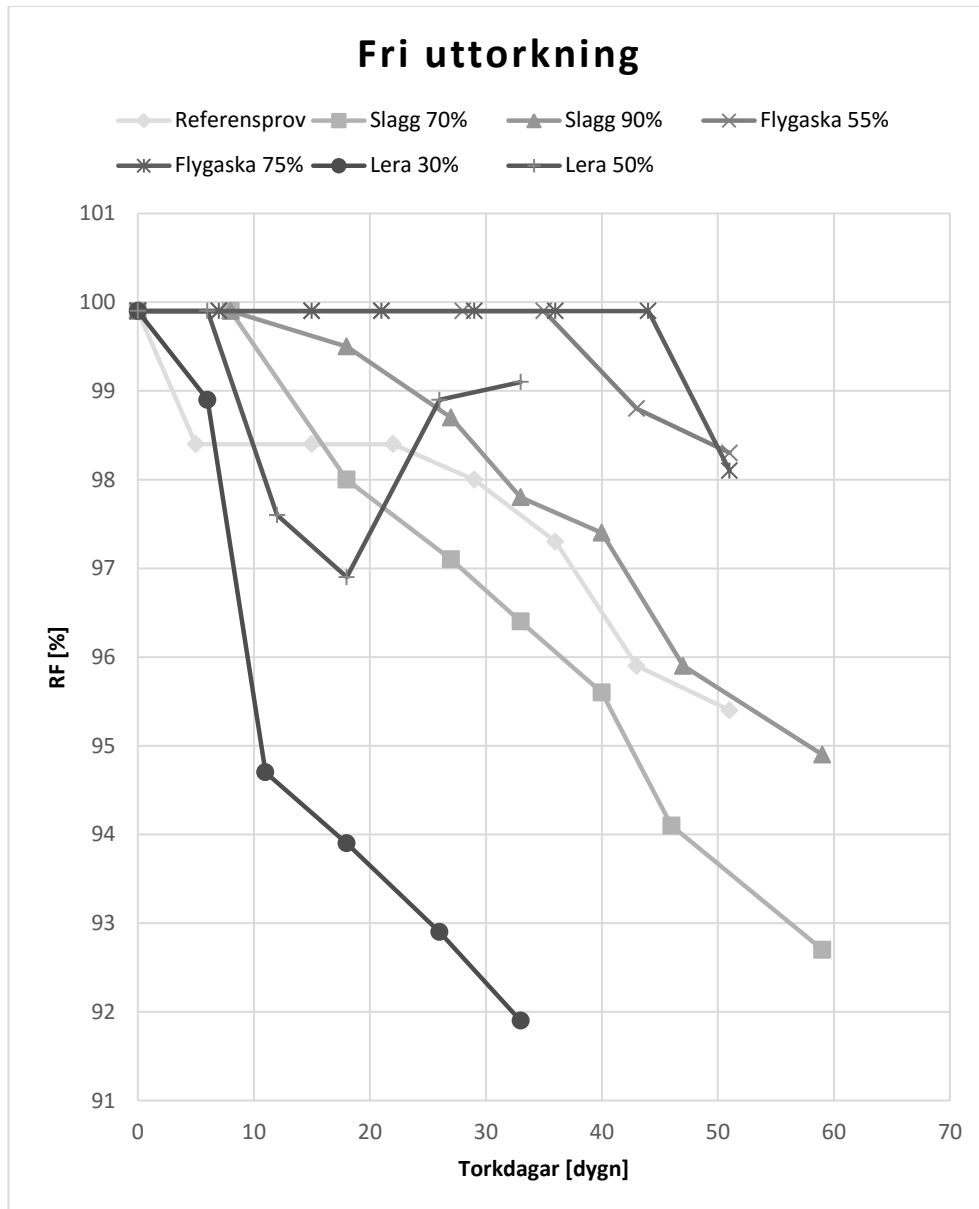
Precis som förväntat har referensprovet betydligt högre hållfasthetutveckling än recepten innehållandes flygaska och slagg. Detta beror på att flygaska och slagg börjar reagera vid en mycket senare tidpunkt, i vissa fall så sent som flera veckor efter gjutning [12].

Vad som dock är mycket intressant är att båda recepten som innehåller kalcinerad lera har ungefär samma 28d-tryckhållfasthet som referensproven. Detta beror troligtvis på den sulfatoptimeringen som gjordes där en liten mängd CaSO_4 tillsattes, vilket har lett till att ännu mer av den kalcinerade leran har reagerat och bildat hård CSH-gel. Om samma sak hade genomförts för flygaska och slagg hade dessa troligtvis också fått högre hållfasthet än nuvarande resultat.

9.4 Uttorkning av betong

Nedan i figur 34 presenteras den fria uttorkningen och i figur 35 presenteras självtuttorkningen för de olika betongsorterna.

Fri uttorkning



Figur 34. Den fria uttorkningen hos samtliga recept.

Uttorkningsprocessen av betong är en långsam process som måste undersökas under mycket lång tid. Med tanke på att flygaska, slagg och kalcinerad lera normalt börjar reagera senare än cement bör därför mätningarna göras under mycket lång tid. Det är inte ovanligt att mätningar på uttorkning genomförs i flera år. Dock har det ur ren byggnadsteknisk syn olika krav på snabb uttorkning, varför det kan vara mer intressant att vidare undersöka den tidiga uttorkningen mer.

Trots detta är det intressant att undersöka uttorkningen under de första dyggen. Som synes i figur 34 torkar betongen som innehåller 30 vol.% kalcinerad lera mycket snabbt under de första dyggen, samtidigt som betongen innehållandes flygaska inte torkar under hela studien. Precis som förväntat börjar referensprovet torka tidigt. En sak som dock är anmärkningsvärd är att uttorkningen stannar efter ca fem dygn och fortsätter sedan torka 20 dygn senare. Troligtvis beror uttorkningen under de första dyggen på uttorkning av överskottsvatten och inte på hydratationsprocessen. Om referensprovet i figur 34 jämförs med det i figur 35, där provet är förslutet, syns att det sker det i princip ingen uttorkning hos det förslutna provet under de fem första dyggen.

Flygaska

Som synes i figur 34 sker det i princip ingen uttorkning av betongen som innehåller flygaska. Det finns flera faktorer till varför denna betong torkar mycket långsamt. Ett av dessa beror på den låga cementhalten. Från kalorimetermätningen synes att värmeutvecklingen hos denna betong är mycket lägre än övriga recept. Detta innebär att cementreaktionen är lägre i denna betong, och därmed binds mindre vatten kemiskt. En annan faktor kan vara för att lufthalten är mycket låg. En lägre lufthalt innebär minskad porositet och permeabilitet som i sin tur gör att det blir svårare för vattenmolekyler, och andra kemikalier, att transportera ut ur betongen.

Sötvattengranulerad masugnsslagg

Betongen som innehåller 70 vol.% och 90 vol.% slagg torkar nästan ingenting första veckan efter gjutning. Detta kan bero på den låga cementhalten som leder till att det sker mycket lite reaktion under första dyggen.

Efter drygt lite mer än två veckor efter gjutning syns det i figur 34 att slaggbetongen börjar torka snabbt, vilket troligtvis beror på slaggreaktionen har kommit igång. Vad som är anmärkningsvärt är att betongen som innehåller 70 vol.% slagg torkar snabbare än betongen som innehåller 90 vol.% slagg. Författarna tror att detta beror på att tillgången till CH, som är nödvändig för att slaggen ska reagera, är för låg hos betongen som innehåller 90 vol.% slagg. Från kalorimetermätningarna är det redan känt att både värmeeffekten och

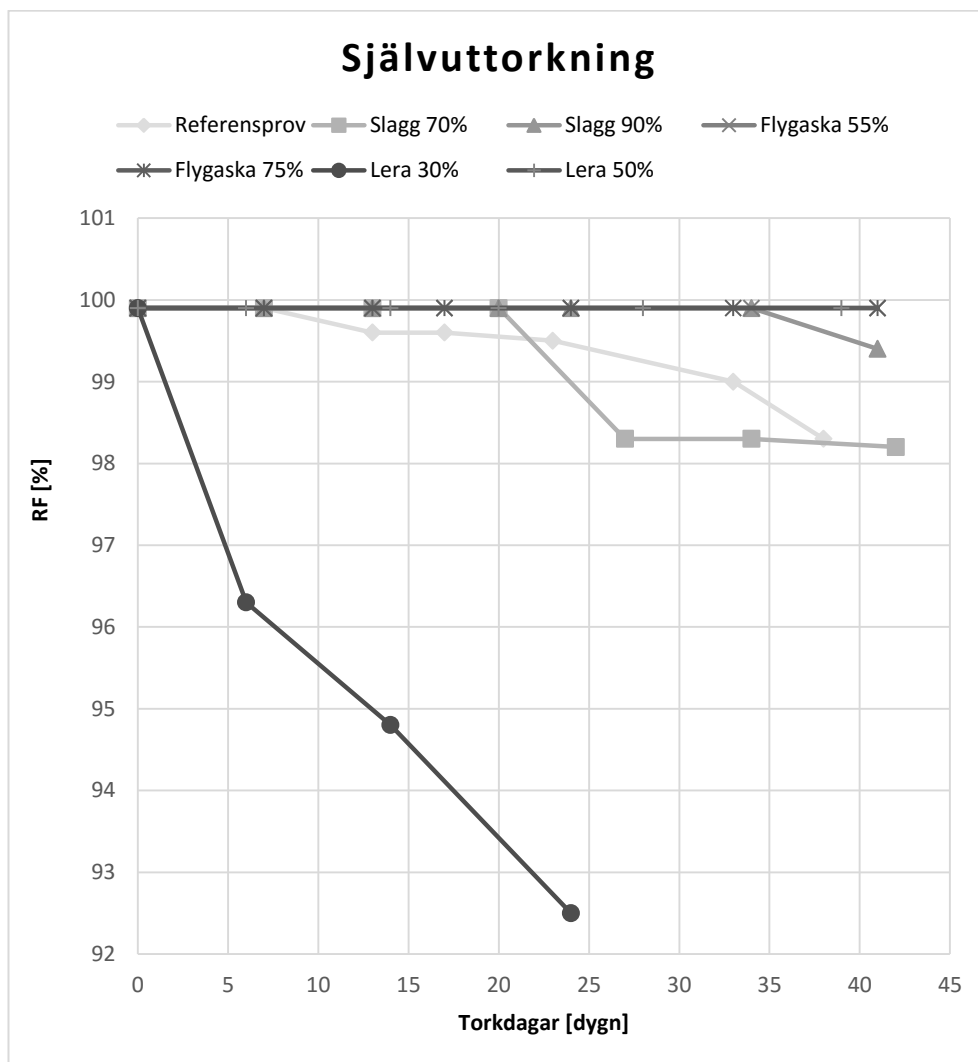
värmeutvecklingen är lägre hos bindemedlet med 90 vol.% slagg än 70 vol.% slagg, vilket är ytterligare bevis på författarnas påstående.

Kalcinerad lera

I figur 34 syns tydligt att betongen som innehåller 30 vol.% kalcinerad lera torkar relativt mycket snabbare än övriga recept. I receptet som innehåller 50 vol.% kalcinerad lera sker det en liten uttorkning under den första veckan. Efter den första veckan ökar uttorkningen av någon anledning. Detta kan bl.a. troligen bero på läckage under mätningarna där skarven mellan givaren och plaströret tätades för dåligt. Detta tros vara anledningen då givarna vid vissa tillfällen hade varit placerade i ungefär 14h, vilket är mer än kravet på 12h som rådet för byggkompetens, RBK, har tagit fram (vct 0,6). Där ett högre värde erhålls för 50 vol.% lera i figuren ovan har givarna för fuktmätning varit placerade i betongen över långhelger.

Den snabba uttorkningen hos 30 vol.% lera kan bero på att reaktionsprocessen är snabbare hos denna betong än referensbetongen. En indikator till detta är resultaten från kalorimetermätningarna som visar att detta recept, som är sulfatoptimerade, har större värmeutveckling än referensbetongen, mer om detta under diskussionen om självuttorkning.

Självtorkning



Figur 35. Självtorkningen hos samtliga recept.

Precis som i fallet med den fria uttorkningen bör självtorkningen studeras under mycket lång tid. Detta för att hydrationsprocessen kan pågå i flera månader. Dock finns det rent byggtekniska krav på betongens uttorkning.

Flygaska

Som synes i figur 35 torkar betongen som innehåller flygaska i princip ingenting. Detta beror troligtvis på den låga luft- och cementhalten, vilket beskrevs ovan under fri uttorkning.

Sötvattengranulerad masugnsslagg

Betongen som innehåller 90 vol.% slagg har efter mer än en månad i princip inte torkat någonting, till skillnad från när det fick torka fritt. Då började den torka efter lite mer än två veckor.

Betongen som innehåller 70 vol.% slagg börjar också torka senare än när det fick torka fritt. Efter ca 22 dygn har denna betong torkat mer än referensreceptet. Detta beror troligtvis på att slaggreaktionen startar senare än cementreaktionen.

Det är heller inte förvånande att 70 vol.% slagg börjar torka tidigare än 90 vol.% slagg. Detta beror på att betongen med mindre mängd slagg har dels på högre andel cement, dels högre värmeutveckling men också bättre tillgång till CH som slaggen kan reagera med.

Kalcinerad lera

Som synes i figur 35 börjar betongen som innehåller 30 vol.% lera torka snabbare och tidigare än övriga recept, vilket är positivt. Det som däremot är förvånande är att det sker ingen uttorkning i 50 vol.% lera. Detta tyder på att någonstans mellan 30-50 vol.% sker det ingen uttorkning i tidig ålder alternativt att det förekommit mätningsfel.

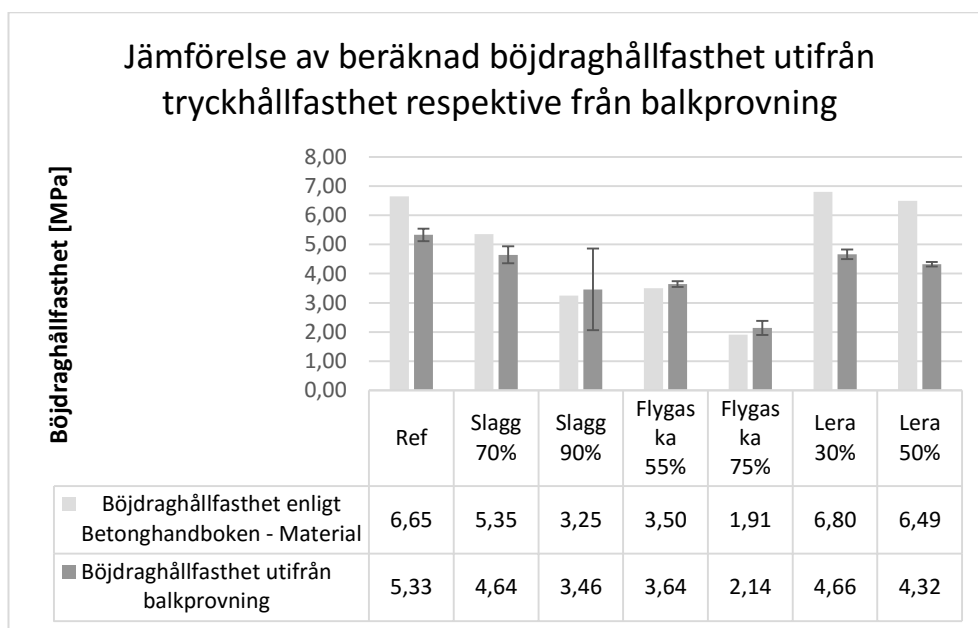
Felkällor

Det finns en rad faktorer som kan ha påverkat resultaten. En stor felkälla kan vara mätinstrumenten. I princip alla mätinstrument, från kalorimetern till temperaturgivare, har alltid en viss felkälla och detsamma gäller för dessa RF-givare. Sedan kan det ha skett temperaturändringar i rummet där samtliga prover förvarades i, vilket kan påverka hydratationsprocessen och givarna. Vidare finns även möjligheten till handhavandefel.

Under mätningarna måste det hållas koll på temperaturen då detta kan medföra stora fel. Detta eftersom RF är temperaturberoende. Om lufttemperaturen i plaströret är högre än den verkliga temperaturen i betongen, vilket ofta är fallet, kommer RF att underskattas [2].

9.5 Böjdraghållfasthet

Böjdraghållfastheten har beräknats enligt 8.8 **Empiriska samband mellan tryckhållfasthet – böjdraghållfasthet och tryckhållfasthet – elasticitetsmodul**, respektive enligt provning beskriven i 8.6 Böjdraghållfasthet och redovisas i figur 36.



Figur 36. En jämförelse mellan böjdraghållfastheterna utifrån 28-dygns tryckhållfasthet beräknade enligt två olika samband. För balkproverna finns även standardavvikelsen markerad.

Det blev en viss skillnad i resultat för böjdraghållfastheten beroende vilken metod som används och för vilka recept. Generellt var det inte allt för stora skillnader men tre recept sticker ut: 70 vol.% slagg samt båda lerrecepten (30.vol% respektive 50 vol.%).

För referensprovet fås en viss skillnad mellan det empiriska sambandet och balkprovningen. Det kan dels ha sin förklaring i att byggcementet redan innehåller flygaska vilket då skiljer sig från bakgrunden till det empiriska sambandet. För övrigt var det förväntat att böjdraghållfastheten för referensprovet skulle vara högre än både slagg- respektive flygaskabetongen.

När det gäller lerrecepten är det stor skillnad mellan det empiriska sambandet och balkprovningen, vilket kan indikera att när det gäller lera så är det empiriska sambandet kanske inte användbart. Båda metoderna säger mot varandra då det empiriska sambandet ger att en 30 vol.% ersättning av cement med lera ger en marginellt högre böjdraghållfasthet och att en 50 vol.% ersättning av cement ger

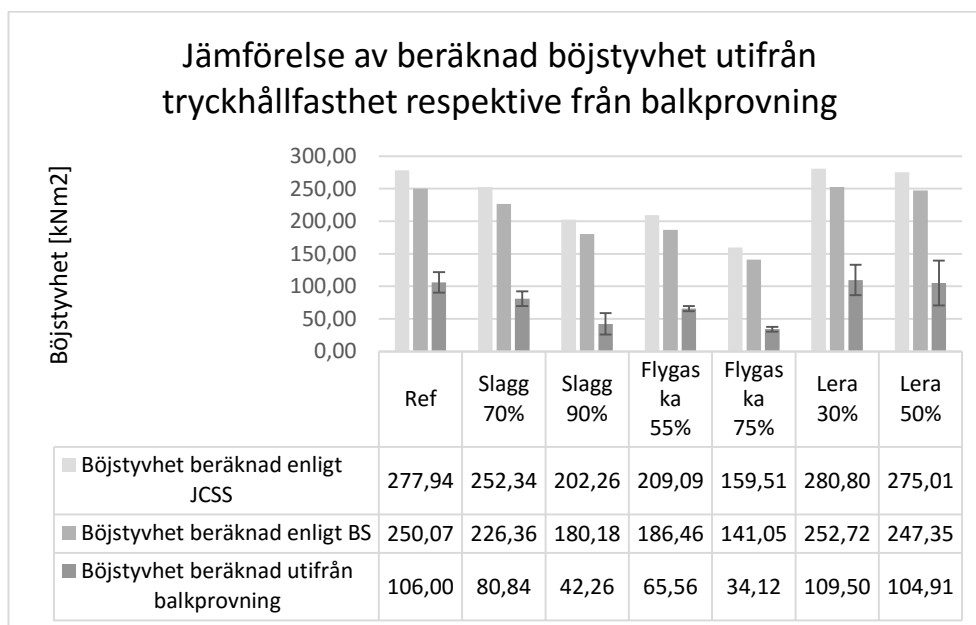
en likvärdig böjdraghållfasthet. Detta kan antyda att det finns ett gränsvärde för en maximal ersättningsgrad som vid överskridande ej längre bidrar till en ökande böjdraghållfasthet. Balkproverna å andra sidan visar att böjdraghållfastheten minskar med ökande ersättningsandel.

För recepten med slagg ges även här olika resultat beroende på metod. Enligt det empiriska sambandet minskar böjdraghållfastheten med ökande andel tillsatsmaterial vilket känns rimligt. Böjdraghållfastheten minskar även mycket vid en höjning från 70 till 90 vol.%. Dock ger balkprovningarna ett annorlunda resultat. Enligt balkprovningarna minskar förvisso böjdraghållfastheten relaterat till referensprovet för båda recepten men samtidigt ökar den med ökande ersättningsgrad. Att betongen med mer cement skulle få en sämre böjdraghållfasthet känns orimligt. Detta kan indikera att något har hänt med balkarna eller att provningen av dessa balkar har gjorts på något felaktigt sätt.

För recepten med flygaska stämmer det empiriska sambandet bra överens med balkprovningen, vilket gör att empirin kanske kan fungera på flygaskabetong till skillnad från övriga typer, även om det inte verkar rimligt att det för ett långsamreagerande material skulle ges en liknande böjdraghållfasthet med en balkprovning som med ett empiriskt samband baserat på ren portlandbetong. Båda metoderna ger dock samma utslag att med ökad andel flygaska minskar böjdraghållfastheten, vilket är rimligt. Detta beror förmodligen på att cementandelen minskar och andelen långsamreagerande material ökar.

9.6 Bøjstyvhet

Bøjstyvheten har beräknats 8.8 **Empiriska samband mellan tryckhållfasthet – böjdraghållfasthet och tryckhållfasthet – elasticitetsmodul**, respektive enligt provning beskriven i 8.5 **Bøjstyvhet** och redovisas i figur 37.



Figur 37. En jämförelse mellan bøjstyvhet enligt tre olika metoder. För balkproverna finns även standardavvikelsen markerad.

När det gäller bøjstyvheten så verkar något ha hänt med balkarna då referensprovet inte uppnår ett rimligt värde i förhållande till den hållfasthetsklass den uppnår (ca C35, under halva bøjstyvheten för balkarnas tvärsnitt). Detta gör att det finns tvivel när det gäller resten av utvärderingarna baserade på balkprovningen.

Balkprovningar

När det gäller balkprovningarna uppnås en bøjstyvhet för referensprovet till under hälften av den förväntade (för referensprovet), med tanke på vilken tryckhållfasthet referensprovet uppvisade vid kubtesterna av tryckhållfastheten. Detta kan bero på att betongen är armerad, men det är dock inte troligt att detta är anledningen då armeringen börjar inverka så pass mycket först vid balkens uppsprickning och ingång i stadium II. Mer troligt är att det genomförts ett systemfel vid provningen eller utvärderingen av provningen. Av alla övriga betongtyper var det bara den med 50 vol.% lera som fick en högre bøjstyvhet, följd av 30 vol.% lera, 70 vol.% slagg, flygaska 55 vol.%, flygaska 75 vol.% samt slagg 90 vol.%. Det är inte förvånande att betongtyperna med mest cement

hamnar närmast referensprovet och de med lägre andel cement hamnar längre ifrån.

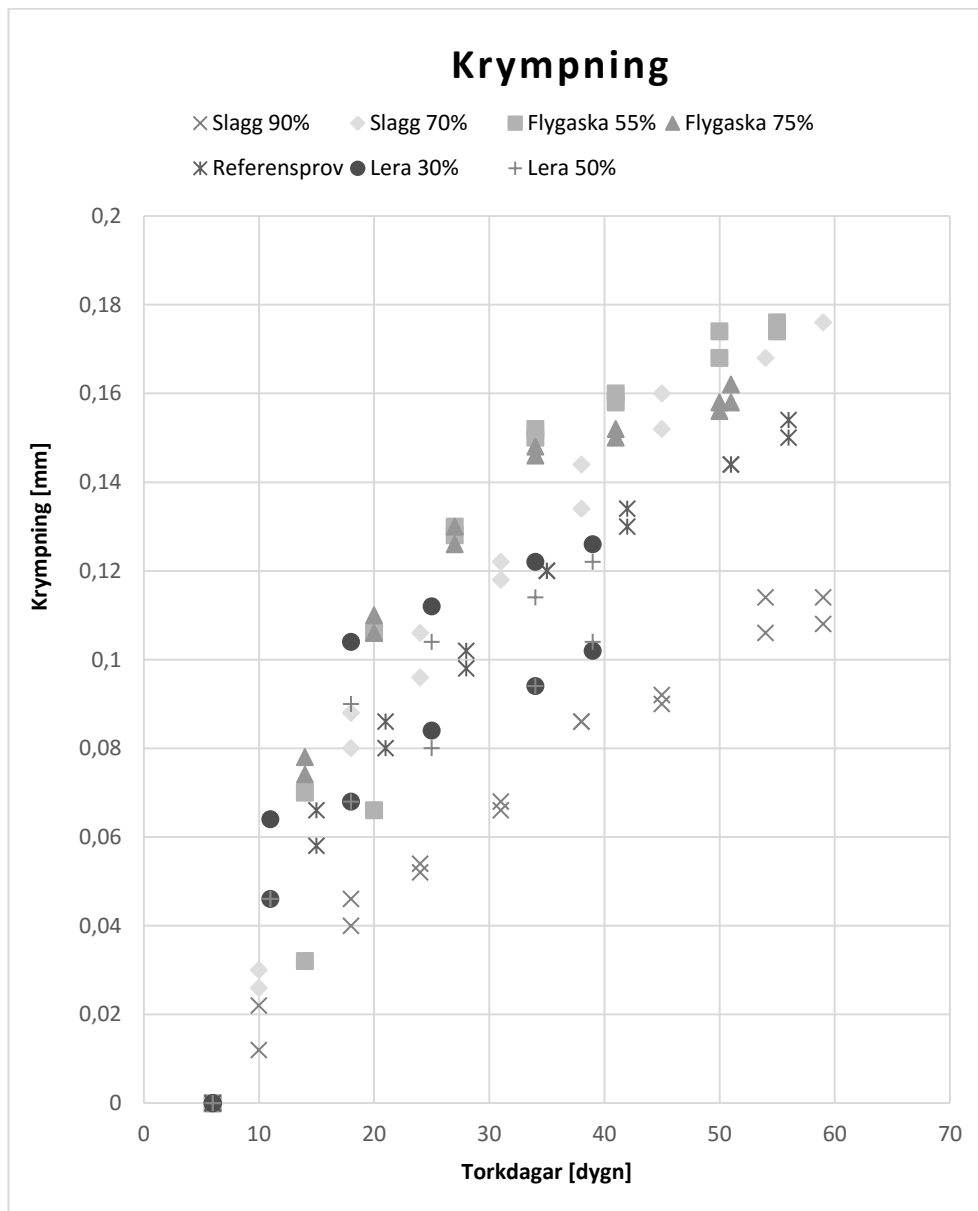
Jämförelse mellan balkprovningar och empiriska förhållanden

Vid en jämförelse av två olika sätt att räkna om en tryckhållfasthet till elasticitetsmodul och därigenom vidare till en böjstyvhet kom det fram att skillnaden mellan metoderna var ungefär lika stor för varje betongtyp, vilket kan indikera att sambanden kanske kan gälla även vid stora ersättningsgrader. Dock är det svårt att tro med tanke på att sambanden är byggda på ren portlandbetong vilket innebär att inverkan av alternativa material inte finns med i sambanden. Det framkom även att det är stor skillnad mellan resultatet utifrån balkprovningarna och de två empiriska sambanden, vilket var föga förvånande med tanke på att dels är det något som har påverkat balkarna vilket har gett utslag i utvärderingen av resultat och dels då sambanden bygger på ren portlandcement.

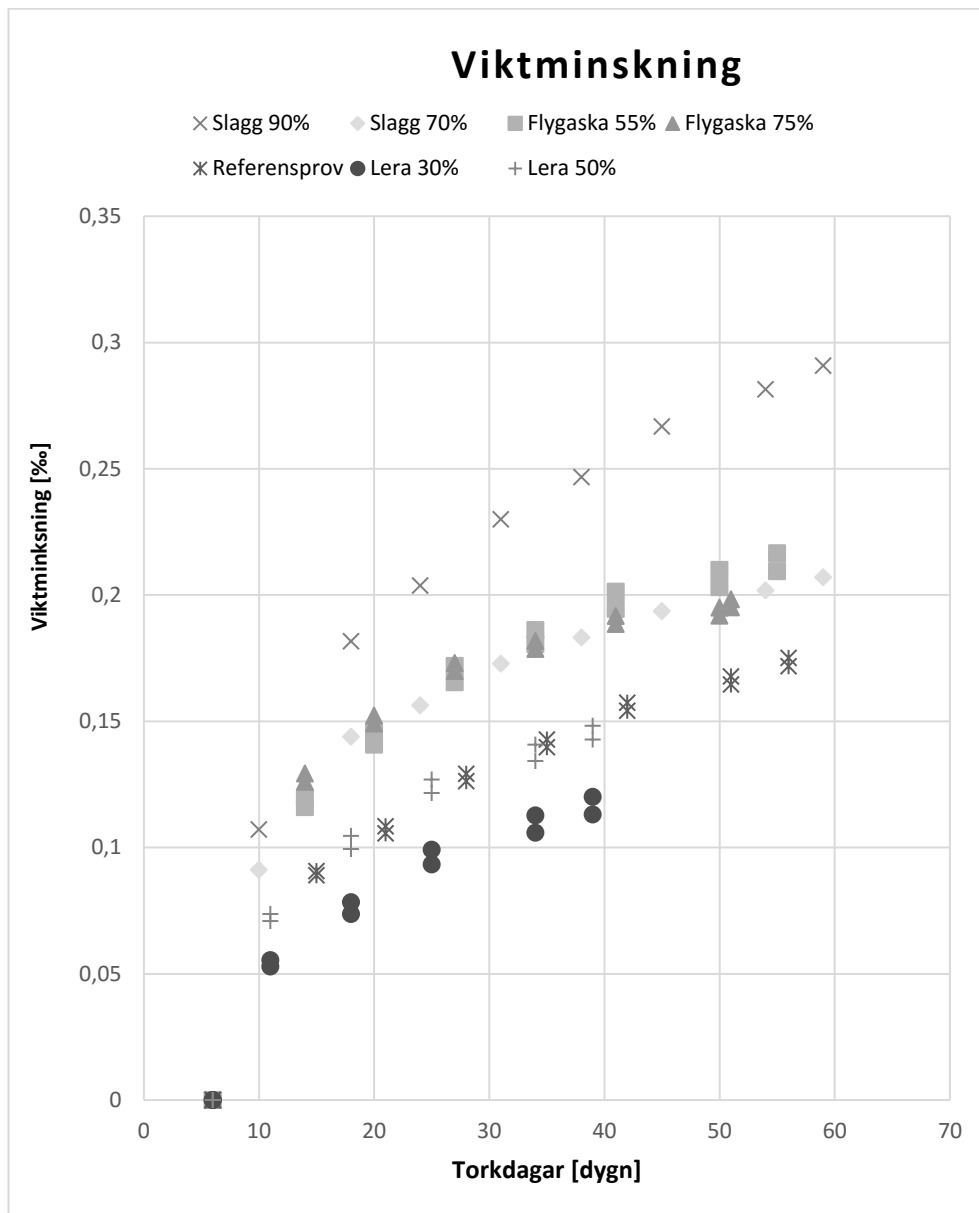
Utifrån detta kan det vara svårt att dra några slutsatser om hur böjstyvheten påverkas. Rent generellt tenderar det dock att böjstyvheten minskar med ökande andel slagg och flygaska, vilket alla tre utvärderingar är överens om. När det gäller leran finns det en mycket svag tendens till en liten ökning vid små mängder och en snarlik böjstyvhet vid 50 vol.% ersättning. Även de empiriska sambanden verkar vara överens med balkprovningarna i detta fall.

9.7 Krympning och viktminskning

Nedan i figur 38 presenteras krympning och i figur 39 presenteras viktminskning för samtliga provkroppar. I bilaga 5 presenteras krympning och viktminskning för varje recept i egen figur.



Figur 38. Krympning av samtliga provkroppar.



Figur 39. Viktminskning av samtliga provkroppar.

Krympningen som avses är den totala krympningen för prismor som har fått torka fritt, vilket gör att ingen skillnad kan göras mellan autogen krympning och uttorkningskrympning. Vidare skall det också beaktas att till skillnad från uttorkningsförsöken hade dessa prismor annan geometri och fick torka fritt åt alla håll vilket gör att dessa uttorkningar inte nödvändigtvis har följt samma uttorkningsförlopp.

Flygaska

Betongen som innehåller 55 vol.% flygaska uppvisar för ena prisma en högre krympning för hela mätperioden. Den andra prisma har dock initialt en lägre krympning vilken dock ökar vid ca 8 dygn och når den första prismans nivå vid ca 20 dygn för att sedan följa den första prismans krympning. Krympningen är således högre än för referensprovet. För båda prismorna är viktminskningen på grund av uttorkning samma och högre än referensprovets viktminskning.

Betongen som innehåller 75 vol.% flygaska uppvisar även den en större krympning än referensprovet där båda prismorna följer samma krympförlopp. Viktminskningen är även den högre för prismorna med flygaska.

I och med att flygaska reagerar långsamt är det troligt att krympningen kommer att fortsätta en längre tid, d.v.s. det är troligt att krympningen för flygaskan ökar.

Sötvattengranulerad masugnsslagg

Betongen med 70 vol.% slagg följer initialt referensprismornas krympningsförlopp där sedan referensprovets krympning avtar något vid ca 10 dygn, vilket leder till att i slutet av mätperioden uppvisar slaggen en högre krympning än referensprismorna. När det kommer till viktminskningen sker dock en högre viktminskning hos slaggen som sedan avtar något vid ca 10 dygn. I slutet av mätperioden har slaggen fortfarande en högre viktminskning än referensprovet.

Betongen som innehåller 90 vol.% slagg beter sig däremot underligt. Denna betong uppvisar en mindre krympning än referensprismorna samtidigt som slaggen uppvisar en större viktminskning än referensprismorna vilket är motsägelsefullt. I teorin är krympning och viktminskning kopplade till varandra, d.v.s. att om detta recept har minst krympning av alla recept, så borde viktminskningen också vara minst. Detta kan ha en förklaring i form av mätfel eller att mätdubbarna har rubbats ur sitt läge.

I och med att slagg reagerar långsamt är det troligt att krympningen kommer att fortsätta en längre tid, d.v.s. det är troligt att krympningen för slagg ökar.

Kalcinerad lera

Betongen som innehåller 30 vol.% lera uppvisar olika resultat för prismorna. Den ena prisma krymper till en början snabbare än referensprismorna för att sedan drastiskt avstanna och därefter krympa mindre än referensprismorna. Den andra prisma med lera krymper däremot långsammare än den andra lerprisma, dock snabbare än referensprismorna för att sedan krympa långsammare, men fortfarande mer än referensprismorna. Det verkar dock som att när lerprisma har fått torka lika länge så är den totala krympningen mindre än för referensprismorna.

När det gäller uttorkningen följer under det första dygnet lerprismorna och referensprismorna varandra åt. Därefter avtar lerprismornas uttorkning något. Detta gör det troligt att den lerprisma som har högre krympning än referensprismorna kommer efter lika lång torktid ha en mindre total krympning.

Betongen med 50 vol.% lera uppvisar ett snarligt krympningsförlopp som referensprismorna. Även uttorkningen uppvisar efter ca ett dygn snarlik uttorkningsförlopp.

10 Slutsatser

10.1 Flygaska

Det är möjligt att gjuta betong med höga halter av flygaska men däremot försämras samtliga undersökta egenskaper avsevärt när cement ersätts av 75 vol.% flygaska. Troligtvis kan egenskaperna förbättras genom att tillsätta CaSO_4 eller andra komponenter. För både 55 vol.% och 75 vol.% flygaska gavs en god arbetbarhet.

55 vol.% Flygaska

- Betong med högre volymhalter än 55% sker det i princip ingen uttorkning, vilket innebär att det inte är lämpligt att använda denna betong för bjälklag där det ska läggas mattor.
- Betong med högre volymhalter än 55% uppvisar en högre krympning, vilket i praktiken kan innebära att det finns risk för tvångskrafter om inte hänsyn tas till krympningen vid gjutning.
- Böjdraghållfastheten är ungefär hälften av referensprovets böjdraghållfasthet vilket innebär att en större andel armering kommer behöva användas om denna betongsort skulle användas inom byggnation (t.ex. i en platta på mark), vilket blir en kostnadsfråga, samt en fråga om det finns utrymme för den extra armeringen beroende på konstruktionselementets dimensioner.
- Böjstyvheten minskar med ökande andel flygaska vilket innebär att motståndet mot böjning minskar. I vissa fall kan detta vara acceptabelt, t.ex. på platser där människor inte befinner sig så ofta såsom långtidsförvaring där brukskraven är mindre än för t.ex. ett bostadshus. Det är dock oklart om just denna betong skulle klara av dessa krav.
- Då 55 vol.% av cementet ersätts är denna betong miljövänlig i det avseende att koldioxidutsläppet minskas direkt (för cementindustrin) genom ersättningen av cement samt att flygaskan (som är ett restavfall som annars gått till deponi) har kunnat återanvändas.

75 vol.% Flygaska

- Denna betong har mycket låg hållfasthet, ungefär 7,7 MPa efter 28 dygn (referensprovet hade ungefär 41 MPa).
- Det är inte heller lämpligt att gjuta bärande eller icke-bärande väggar med denna betong. Detta för att betongen har, även 40 dagar efter gjutning, en tendens att spricka och bilda kratrar, se figur 40, om den utsätts för borring eller slag. Betongen har mycket dålig vidhäftning vilket dels kan bero på för lite cement och för lite CH som kan reagera med flygaskan,

och därmed för låg cementering. Dock kan detta kanske uppvägas vid en sulfatoptimering, vilket behöver undersökas vidare.

- Då 75 vol.% av cementet ersätts är denna betong miljövänlig i det avseende att koldioxidutsläppet minskas direkt (för cementindustrin) genom ersättningen av cement samt att flygaskan (som är ett restavfall som annars gått till deponi) har kunnat återanvändas.



Figur 40. Krater som bildats vid borrning i betongen ca 5 dygn efter härdning. Foto: Abdel Ali.

10.2 Sötvattengranulerad masugnsslagg

Precis som med tillsats av flygaska är det möjligt att gjuta med denna betong och få god arbetbarhet.

70 vol.% Sötvattengranulerad masugnsslagg

- Denna betong har relativt bättre uttorkningsförmåga än referensreceptet och är därför lämpligare att använda om det önskas läggas mattor tidigt.
- Denna betong har också bra tryckhållfasthet, ca 31 MPa efter 28 dygn.
- Denna betong är lämplig att använda i huskonstruktioner men däremot kan det ställa till med problem då den luktar mycket illa p.g.a. svavelinnehåll. Det är dock oklart hur länge och hur omfattande lukten är vid stor skala vilket behöver undersökas vidare.

- Denna betong uppvisar en högre krympning, vilket i praktiken kan innebära att det finns risk för tvångskrafter om inte hänsyn tas till krympningen vid gjutning.
- Böjdraghållfastheten är mindre än referensprovets böjdraghållfasthet (ungefär 30% mindre enligt empiriska sambandet) vilket innebär att en större andel armering behöver användas om denna betongsort används inom byggnation (t.ex. i en platta på mark), vilket blir en kostnadsfråga, samt en fråga om utrymme finns för den extra armeringen beroende på konstruktionselementets dimensioner.
- Böjstyvheten minskar med ökande andel slagg vilket innebär att motståndet mot böjning minskar. I vissa fall kan detta vara acceptabelt, t.ex. på platser där människor inte befinner sig så ofta såsom långtidsförvaring där brukskraven är mindre än för t.ex. ett bostadshus. Det är dock oklart vilka konstruktionsdelar som skulle kunna använda denna sortens betong (t.ex. om en platta på mark kan byggas med denna betong) samt om denna betong skulle klara det i full skala. Detta bör undersökas vidare.
- Då 70 vol.% av cementet ersätts är denna betong miljövänlig i det avseende att koldioxidutsläppet minskas direkt (för cementindustrin) genom ersättningen av cement samt då ett slaggen (som är ett restavfall som annars gått till deponi) har kunnat återanvändas.

90 vol.% Sötvattengranulerad masugnsslagg

- Denna betong har vid fri uttorkning ungefär samma uttorkningsförmåga som referensbetongen.
- Dock erhålls en mycket sämre tryckhållfasthet om slagginnehållet ökas med 50 procentenheter, ca 15,5 MPa efter 28 dygn, i jämförelse med referensbetongen. Dock är det fortfarande en tillräckligt hög hållfasthet för de flesta huskonstruktionerna såsom t.ex. en platta på mark.
- Böjdraghållfastheten är ungefär 50% mindre än referensprovets böjdraghållfasthet vilket innebär att en större andel armering behöver användas om denna betongsort skulle användas inom byggnation, vilket blir en kostnadsfråga, samt en fråga om det finns utrymme för den extra armeringen beroende på konstruktionselementets dimensioner.
- Böjstyvheten minskar med ökande andel slagg vilket innebär att motståndet mot böjning minskar. I vissa fall kan detta vara acceptabelt, t.ex. på platser där människor inte befinner sig så ofta såsom långtidsförvaring där brukskraven är mindre än för t.ex. ett bostadshus. Det är dock oklart vilka konstruktionsdelar som skulle kunna använda denna sortens betong (t.ex. om en platta på mark kan byggas med denna

betong) samt om denna betong skulle klara det i full skala. Detta bör undersökas vidare.

- Även denna betong luktar illa. Det är även i detta fall oklart hur länge och i vilken omfattning den luktar.
- Då denna betong beter sig underligt vid mätningarna av krympning dras ingen slutsats utifrån den mätningen.
- Då 90 vol.% av cementet ersätts är denna betong miljövänlig i det avseende att koldioxidutsläppet minskas direkt (för cementindustrin) genom ersättningen av cement samt då ett slaggen (som är ett restavfall som annars gått till deponi) har kunnat återanvändas.

10.3 Kalcinerad lera

Båda betongrecepten som innehåller kalcinerad lera har mycket dålig arbetbarhet. Samma vatteninnehåll som övriga recept ger en mycket styv betong som är inte är lämplig att gjuta med i traditionell bemärkelse i husbyggnadsprojekt. Dessa recept är de enda recepten som behöver flyttillsatsmedel för att få en tillräckligt god arbetbarhet. Det är möjligt att andra tillsatsmedel kan hjälpa till att optimera leran utifrån ett arbetsbarhetsperspektiv. Detta behöver dock utredas vidare.

30 vol.% Kalcinerad lera

- Denna betong är den betong som torkar snabbast av alla recept, vilket också gör det till det bästa valet om det önskas lägga fuktkänsliga mattor tidigt.
- Denna betong är också den betong som har högst tryckhållfasthet av alla recept, ca 43 MPa efter 28 dygn.
- Om hela produktionsprocessen studeras, även från andra industrier, har denna betong med kalcinerad lera potential att bli det mest miljövänliga tillsatsmaterialet i och med den direkta reduktionen av koldioxid cementsättningen medför.
- Denna betong verkar uppvisa en mindre krympning än referensprovet vilket innebär att dagens byggmetoder gällande tvångskrafter på grund av krympning även bör fungera för denna betong. Det kan till och med vara så att man kanske kan minska hänsynen för krympning till viss del t.ex. genom att inte behöva korrigeras/ extradimensionera för tvångskrafter. Dock måste detta undersökas vidare.
- Denna betong har enligt det empiriska sambandet ca 5% högre böjdraghållfasthet vilket innebär att en likvärdig eller aningen mindre andel armering behöver användas om denna betongsort används inom byggnation.

- Böjstyvheten är aningen högre än för referensreceptet vilket innebär att den klarar samma krav som kan ställas ur brukskrav som referensbetongen som idag används inom byggbranschen.
- Denna betong har potential till att bli billigare än referensreceptet.
- Då 30 vol.% av cementet ersätts är denna betong miljövänlig i det avseende att koldioxidutsläppet minskas direkt med 30% genom ersättningen av cement.
- Då denna betong har presterat bättre än referensreceptet i samtliga studier, är det värt att genomföra djupare studier på denna betong. Det är troligt att sulfatoptimeringen förbättrade egenskaperna som undersöktes. Dock är det oklart hur stor effekten blev då ingen jämförelse kunde genomföras. Därför är det också värt att undersöka hur stor effekt sulfatoptimeringen hade på resultaten.

50 vol% Kalcinerad lera

- Denna betong torkar i princip ingenting så om det önskas en snabbare uttorkning bör mängden lera minskas.
- Denna betong har ungefär samma tryckhållfasthet som referensbetongen
- Denna betong är den mest miljövänliga betongen av alla recept. Med en ersättning av 50 vol.% och att ingen koldioxid avges från leran när den förbränns, innebär detta att koldioxidutsläppen minskas med 50%.
- Denna betong följer ungefär referensprovets krympningsförlopp, vilket innebär att dagens byggmetoder gällande tvångskrafter på grund av krympning även bör fungera för denna betong.
- Denna betong har enligt det empiriska sambandet ungefär likvärdig böjdraghållfasthet som referensprovet vilket innebär att en likvärdig andel armering behöver användas om denna betongsort används inom byggnation.
- Böjstyvheten är aningen högre än för referensreceptet vilket innebär att den klarar samma krav som kan ställas ur brukskrav som referensbetongen som idag används inom byggbranschen.
- Denna betong har också potential till att bli billigare än referensreceptet.
- Då denna betong har presterat bättre än referensreceptet i samtliga laborationer, är det värt att genomföra djupare studier på denna betong.

Slutsatser

11 Förslag för framtida studier

Det har genom detta arbete framkommit ett antal områden där vidare forskningen kan och bör genomföras för att vidare utvärdera användandet av stora mängder tillsatsmaterial.

Generellt för alla underökningar bör mängden provningar/provkroppar utökas då tre provkroppar är gränsfall till för få. Ytterligare bör provningstiden utökas så att mätningar genomförs kontinuerligt under mycket längre tid.

11.1 Utifrån materialperspektiv

- Utföra försök för att bestämma beständighetsegenskaper såsom kloridmigration, frostmotstånd och karbonatisering.
- Undersöka hur porstrukturen ändras baserat på andel ersatt material.
- Undersöka hur en mer välstuderad sulfatoptimering för att se om det skulle gå att ersätta mer cement med tillsatsmaterial samt för att undersöka hur stor skillnad sulfatoptimeringen gör.
- Utföra mätningar för slutet, begränsad samt fri uttorkning under längre tid och med fler recept samt i olika klimat.
- Utföra fler krympmätningar under längre tid med fler recept i olika klimat, samt på fler sidor än ändsidorna.
- Utföra mätningar av uttorkning och krympning för att se om det går att göra direkta kopplingar baserat på uttorkningsförlopp.
- Fler hållfasthetsmätningar samt flera typer av hållfasthetsmätningar (t.ex. tryck-, centriskt drag-, böjdrag-, spräckhållfasthet) för att kunna utröna ett empiriskt samband mellan dessa. Detta bör göras för både för icke-optimerade och sulfatoptimerade recept. Vidare bör även elasticitetsmodulen undersökas samt ett empiriskt samband undersökas för stora ersättningsmängder av cement.
- Elasticitetsmodulen bör bestämmas på fler sätt än ett för att avgöra huruvida provningsmetoden ger en betydande skillnad i elasticitetsmodul (t.ex. balkprovning kontra cylinderprovning).
- Utföra försök med tillsatsmedel för att se om arbetbarheten kan förbättras utan överdrivet användande av flyttillsatsmedel.
- Författarna tror att det går att gjuta med ännu högre volymhalt kalcinerad lera i och med sulfatoptimeringen om arbetbarheten kan förbättras.

11.2 Utifrån konstruktionsteknikperspektiv

- Utföra fullskaleförsök med krympning där tvångskrafter framtvingsas för att se huruvida det ger en minskad eller ökad påverkan i system.
- Vidare deformationsprövningar med olika metoder såsom exempelvis trepunktsuppställning för balkar med varierande härdningsförutsättningar och åldrar.
- Undersöka hur betongen skulle bete sig i form av pelare (t.ex. knäckningsförfarande), plattor, håldäcksbjälklag och väggar snarare än balkar.
- Undersöka hur vridmotståndet förändras med ersättningsgraden.
- Undersöka hur tvärkraftskapaciteten förändras med ersättningsmängden.
- Fortsatta utvärderingar av böjstyvheten genom olika mätmetoder.
- Undersöka huruvida lerans höga styvhet vid gjutning kan vara användbart vid andra appliceringar där hög styvhet är önskvärt, t.ex. 3D-printning av betong.

Litteraturförteckning

- [1] K. L. Scrivener, "Options for the future of cement," *The Indian Concrete Journal*, Vol. 88, Issue 7, pp. 11-21, 2014.
- [2] G. Fagerlund, "Kapitel 4: Cement och andra oorganiska bindemedel," i *Betong i ett Livscykelperspektiv*, Lund, Lunds Tekniska Högskola, 1992.
- [3] J. Laffely, "LC3 - a new recipe for the future of cement," *CPI - Concrete Plant International*, pp. 26-30, 2015.
- [4] Cementa, "www.cementa.se," 9 Maj 2015. [Online]. Available: <http://www.cementa.se/sv/bascement>.
- [5] L. Östlund, "Kap 5: Dimensionering genom provning," i *Betonghandbok - konstruktion*, Solna, AB Svensk Byggtjänst, 1990, pp. 451-488.
- [6] R. Ejvegård, *Vetenskaplig metod*, Indien: Studentlitteratur AB, 2012.
- [7] P. G. Burström, "Kapitel 12: Betong," i *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, Lund, Sverige, Studentlitteratur, 2007, pp. 204-271.
- [8] T. C. Powers, *A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete*, Washington D.C.: Highway Research Board, 1948.
- [9] A. Neville och J. Brooks, *Concrete Technology*, Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [10] G. Klingstedt, "Vatten," i *Betonghandboken Material*, Solna, Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 95-103.
- [11] S.-E. Johansson, "Kapitlet 2: Cement," i *Betonghandbok material utgåva 2*, Solna, Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 33-68.
- [12] R. Helmuth, *Fly Ash in Cement and Concrete*, USA: Portland Cement Association, 1987.
- [13] T. Isaksson, A. Mårtensson och S. Thelandersson, *Byggkonstruktion*, Lund: Studentlitteratur, 2011.
- [14] A. Fraay, J. Bijen och Y. de Haan, "The Reaction of Fly Ash in Concrete. A

- Critical Examination," *Cement and Concrete Research*, pp. 235-246, 1989.
- [15] P. K. Mehta och O. E. Gjrv, "Properties of Portland Cement Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume," *Cement and Concrete Research*, pp. 587-597, 1982.
- [16] S.-E. Johansson och Redaktionsgruppen, "Tillsatsmaterial," i *Betonghandboken i material, Kap. 6*, Solna, Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 123-145.
- [17] G. Fagerlund, *Betongkonstruktioners beständighet - En versikt*, Uppsala: AW Grafiska, 1992.
- [18] G. Fagerlund, *Betong i ett Livscykelperspektiv*, Lund: Lunds Tekniska Högskola, 1992.
- [19] S. Utsi och J.-E. Jonasson, "Estimation of the risk for early thermal cracking for SCC containing fly ash," *Materials and Structures*, pp. 153-169, 2012.
- [20] L. Crouch, R. Hewitt och B. Byard, "High Volume Fly Ash Concrete," Tennessee Technological University, Tennessee, 2007.
- [21] B. J.J. och N. A. M., *Concrete Technology*, Essex, England: Longman Scientific & Technical, 1990.
- [22] S.-E. Johansson, C. Ljungkrantz, G. Mller och N. Petersons, "Kapitel 6: Tillsatsmaterial," i *Betonghandbok - Material upplaga 2*, andra upplagan red., C. Ljungkrantz, G. Mller och N. Peterson, Red., Solna, AB Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 123-145.
- [23] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry: 2nd edition*, London, Storbritannien: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [24] B. Sabir, S. Wild och J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review," *Cement & Concrete Composites*, pp. 441-454, 2001.
- [25] C. Svensson, *Kompendium i Teknisk Geologi AK*, Lund: KFS i Lund AB, 2009.
- [26] P.-G. Andréasson, *Geobiosfren - en introduktion*, Lund: Studentlitteratur AB, 2006.
- [27] J. I. Bhatti och P. C. Taylor, "Sulfate Resistance of Concrete Using Blended

- Cements and Supplementary Cementitious Materials," Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2006.
- [28] P. G. Burström, "Kap 11: diverse egenskaper. Emissioner. Materialklassificering," i *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, Lund, Sverige, Studentlitteratur AB, 2007, pp. 192-203.
- [29] L.-O. Nilsson, G. Hedenblad och K. Norling-Mjörnell, "Kap. 11 Fuktegenskaper," i *Betonghandbok Högpresterande Betong, Material och Utförande*, Solna, Svensk Byggtjänst, 2000, pp. 209-225.
- [30] M. Åhs och L.-O. Nilsson, "Uttorkningstider och kristiska fuktillstånd - Kemisk fuktbinding och alkalitransport," Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2010.
- [31] N. Johansson, "Uttorkning av betong - Inverkan av cementtyp, betongkvalitet och omgivande fuktförhållanden," Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2005.
- [32] A. Johansson och N. Petersons, "Kap. 8 Betongmassa," i *Betonghandboken Material*, Solna, AB Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 175-248.
- [33] A. Hillerborg, "Kapitel 13: Deformationer under last," i *Betonghandbok - Material upplaga 2*, Solna, Sverige, AB Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 456-483.
- [34] G. Fagerlund, "Mineraliska tillsatsmaterial i cement," *Bygg & Teknik*, pp. 23-24, April 2011.
- [35] T. A. Østnor och H. Justnes, "Durability of mortar with calcined marl as supplementary cementing material," *Advances in Cement Research*, pp. 344-352, 2014.
- [36] L. Transjö, "Kalcinering," Nationalencyklopedin AB, 2015. [Online]. Available: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kalcinering>. [Använd 15 03 2015].
- [37] R. f. byggkompetens, "Rådet för byggkompetens," 31 mars 2015. [Online]. Available: http://www.rbk.nu/ladda-ner--bestall/fuktmatningsmanual__36. [Använd 31 mars 2015].
- [38] T. Isaksson och A. Mårtensson, *Byggkonstruktion: Regel- och formelsamling*, 2:4 red., Lund: Studentlitteratur AB, 2010.
- [39] JCSS, "Danska Tekniska Universitetet - Joint Committee on Structural Safety,"

- maj 2002. [Online]. Available: http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code. [Använd 1 maj 2015].
- [40] G. Möller, N. Petersens och L. Elfgren, "Kapitel 11: Hållfasthet," i *Betonghandbok - Material*, Solna, AB Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 307-439.
- [41] H. Justnes, T. Østnor, K. De Weerdts och H. Vikan, "Calcined marl and clay as mineral addition for more sustainable concrete structures," i *36th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES*, Singapore, 2011.
- [42] S. Wild, J. Khatib och A. Jones, "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticized metakaolin concrete," *Cement and Concrete Research*, pp. 1537-1544, 1996.
- [43] J. J. Brooks och M. A. M. Johari, "Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete," *Cement & Concrete Composites*, vol. 23, pp. 495-502, 2001.
- [44] K. Pettersson, "Beständighet hos vissa material i förbindelse med betong," i *Betonghandboken i material, Kap. 24*, Solna, Svensk Byggtjänst, 1994, pp. 849-853.
- [45] Naturvårdsverket, "www.naturvardsverket.se," 9 Maj 2015. [Online]. Available: <http://naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/EU-och-internationellt/Internationellt-miljoarbete/miljokonventioner/Klimatkonventionen/Klimatkonventionen-och-Kyotoprotokollet/>.

Bilaga 1: Betongrecept och färska betongens egenskaper

Referensprovet

Tabell 6. Beräknat recept för referensprovet.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	350,00	3010,00	116,28	0,35	38,644
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2292,36		1000,00	2,29	253,11

Tabell 7. Uppvägda mängder för referensreceptet.

	Vikt [kg]
Cement	38,644
Tillsatsmaterial	-
Vatten	19,481
Grus	108,135
Sten (8-11mm)	86,461
Fuktkvot Grus	2,79%
Fuktkvot Sten	0,45%

Tabell 8. Referensreceptets lufthalt, sättmått och densitet.

Lufthalt	2,15%
Sättmått	69 mm
Densitet	2343 kg/ m ³

70 vol.% Sötvattengranulerad masugnsslagg

Tabell 9. Beräknat recept med 70 vol.% slagg.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	105,00	3010,00	34,88	0,11	11,593
Slagg	236,05	2900,00	81,40	0,24	26,062
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2283,41		1000,00	2,28	252,12

Tabell 10. Uppvägda mängder för receptet med 70 vol.% slagg

	Vikt [kg]
Cement	11,596
Slagg	26,066
Vatten	20,32
Grus	107,314
Sten (8-11mm)	86,779
Fuktkvot Grus	2,01%
Fuktkvot Sten	0,82%

Tabell 11. Lufthalt, sättmått och densitet hos receptet med 70 vol.% slagg.

Lufthalt	2,50%
Sättmått	128 mm
Densitet	2346 kg/ m ³

90 vol.% Sötvattensgranulerad masugnsslagg

Tabell 12. Beräknat recept med 90 vol.% slagg.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	35,00	3010,00	11,63	0,04	3,864
Slagg	303,49	2900,00	104,65	0,30	33,509
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2280,85		1000,00	2,28	251,83

Tabell 13. Uppvägda mängder för receptet med 90 vol.% slagg.

	Vikt [kg]
Cement	3,864
Slagg	33,507
Vatten	14,8718
Grus	112,402
Sten (8-11mm)	86,6086
Fuktkvot Grus	6,92%
Fuktkvot Sten	0,62%

Tabell 14. Lufthalt, sättmått och densitet hos receptet med 90 vol.% slagg.

Lufthalt	2,55%
Sättmått	176 mm
Densitet	2313 kg/ m ³

55 vol.% Flygaska

Tabell 15. Beräknat recept med 55 vol.% flygaska.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	157,50	3010,00	52,33	0,16	17,390
Slagg	147,09	2300,00	63,95	0,15	16,241
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2246,95		1000,00	2,25	248,09

Tabell 16. Uppvägda mängder för receptet med 55 vol.% flygaska.

	Vikt [kg]
Cement	17,39
Flygaska	16,241
Vatten	17,77
Grus	109,945
Sten (8-11mm)	86,529
Fuktkvot Grus	4,51%
Fuktkvot Sten	0,53%

Tabell 17. Lufthalt, sättmått och densitet hos receptet med 55 vol.% flygaska.

Lufthalt	0,75%
Sättmått	144 mm
Densitet	2329 kg/m ³

75 vol.% Flygaska

Tabell 18. Beräknat recept med 75 vol.% flygaska.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	87,50	3010,00	29,07	0,09	9,661
Slagg	200,58	2300,00	87,21	0,20	22,147
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2230,44		1000,00	2,23	246,27

Tabell 19. Uppvägda mängder för receptet med 75 vol.% flygaska.

	Vikt [kg]
Cement	9,662
Flygaska	22,148
Vatten	19,351
Grus	108,777
Sten (8-11mm)	86,211
Fuktkvot Grus	3,40%
Fuktkvot Sten	0,16%

Tabell 20. Lufthalt, sättmått och densitet hos receptet med 75 vol.% flygaska.

Lufthalt	0,69%
Sättmått	178 mm
Densitet	2306 kg/ m ³

30 vol.% Kalcinerad lera

Tabell 21. Beräknat recept med 30 vol.% kalcinerad lera.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	245,00	3010,00	81,40	0,25	27,051
Lera	92,44	2650,00	34,88	0,09	10,207
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2279,80		1000,00	2,28	251,72

Tabell 22. Uppvägda mängder för receptet med 30 vol.% kalcinerad lera.

	Vikt [kg]
Cement	28,276
Lera	10,669
Vatten	21,774
Grus	112,461
Sten (8-11mm)	90,178
Fuktkvot Grus	2,27%
Fuktkvot Sten	0,23%
Flyttillsats	103,6 g

Tabell 23. Lufthalt, sättmått och densitet hos receptet med 30 vol.% kalcinerad lera.

Lufthalt	2,50%
Sättmått	28 mm
Densitet	2320 kg/ m ³

50 vol.% Kalcinerad lera

Tabell 24. Beräknat recept med 50 vol.% kalcinerad lera.

Komponent	Vikt [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Volym [dm ³]	Vikt [kg]/liter	Vikt [kg]
Cement	175,00	3010,00	58,14	0,18	19,322
Lera	154,07	2650,00	58,14	0,15	17,011
Vatten	210,00	1000,00	210,00	0,21	23,187
Grus	952,80	2650,00	359,55	0,95	105,201
Sten	779,56	2650,00	294,17	0,78	86,073
Luft	0,00	0,00	20,00	0,00	0,000
Summa	2271,43		1000,00	2,27	250,79

Tabell 25. Uppvägda mängder för receptet med 50 vol.% kalcinerad lera.

	Vikt [kg]
Cement	20,197
Lera	17,782
Vatten	21,915
Grus	111,9445
Sten (8-11mm)	90,2778
Fuktkvot Grus	1,80%
Fuktkvot Sten	0,34%
Flyttillsats	325,4 g

Tabell 26. Lufthalt, sättmått och densitet hos receptet med 50 vol.% kalcinerad lera.

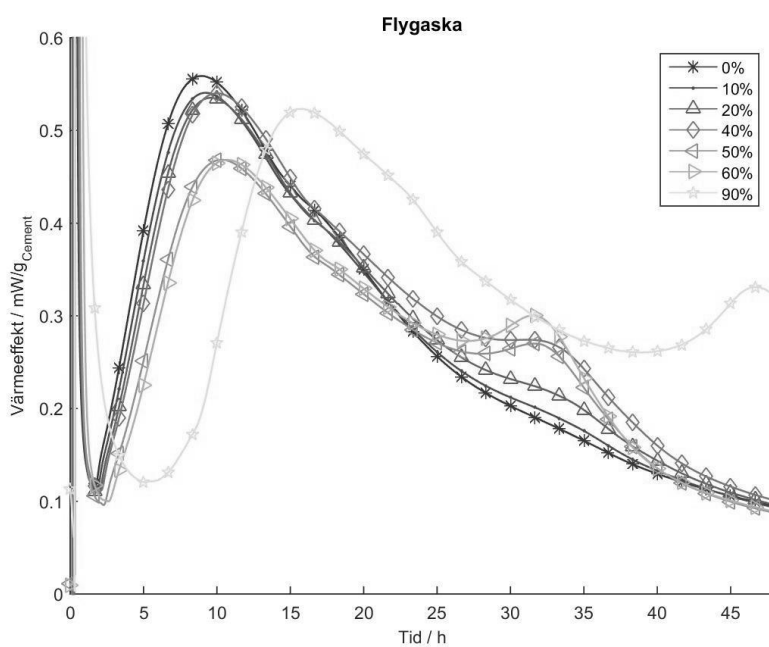
Lufthalt	3,75%
Sättmått	36 mm
Densitet	2279 kg/ m ³

Bilaga 2: Värmeutveckling

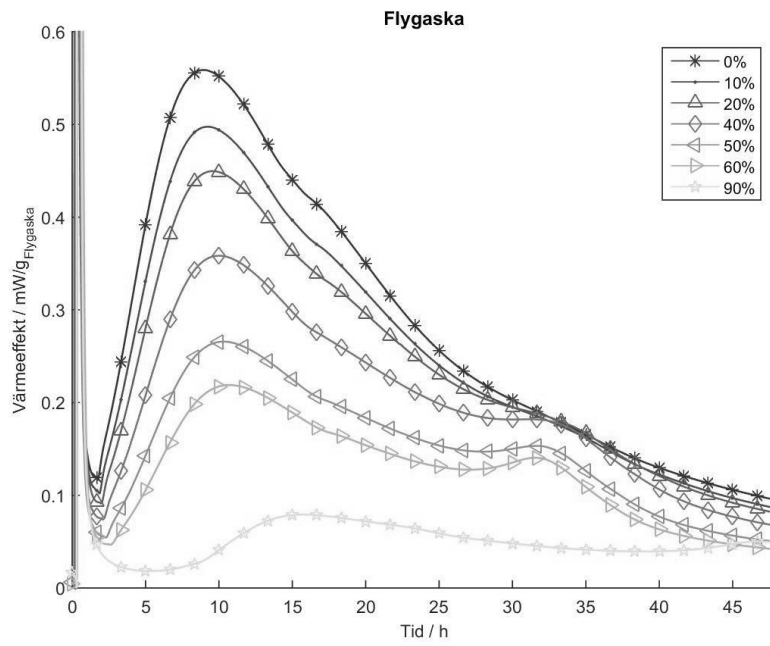
0-90 vol.% Flygaska

Tabell 27. Uppmätta mängder på 0-90 vol.% flygaska som undersöktes i sju dygn.

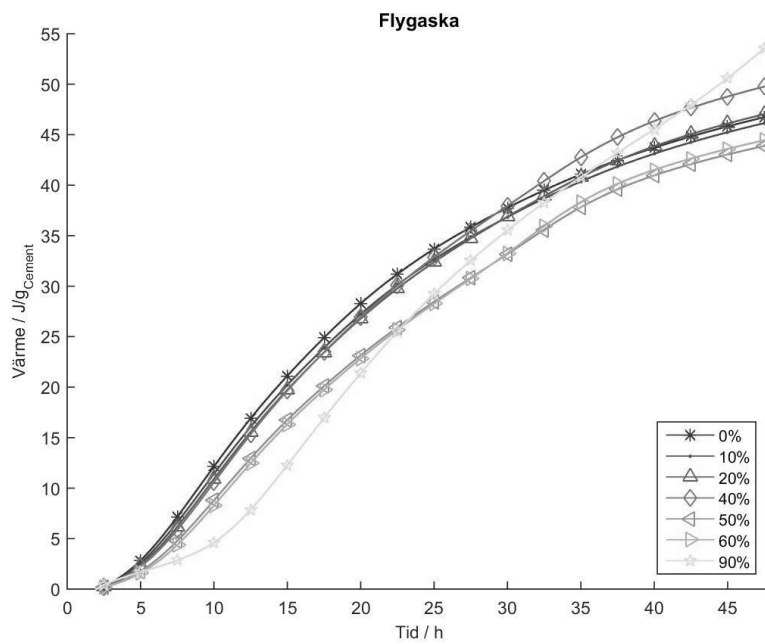
Kanal	Flygaska [vol.%]	Cement [g]	Flygaska [g]	Vatten [g]
1	0	3,993	0,000	2,421
2	10	3,593	0,311	2,401
3	20	3,205	0,610	2,408
4	40	2,400	1,217	2,413
5	50	2,003	1,527	2,406
6	60	1,606	1,829	2,411
7	90	0,401	2,250	2,399



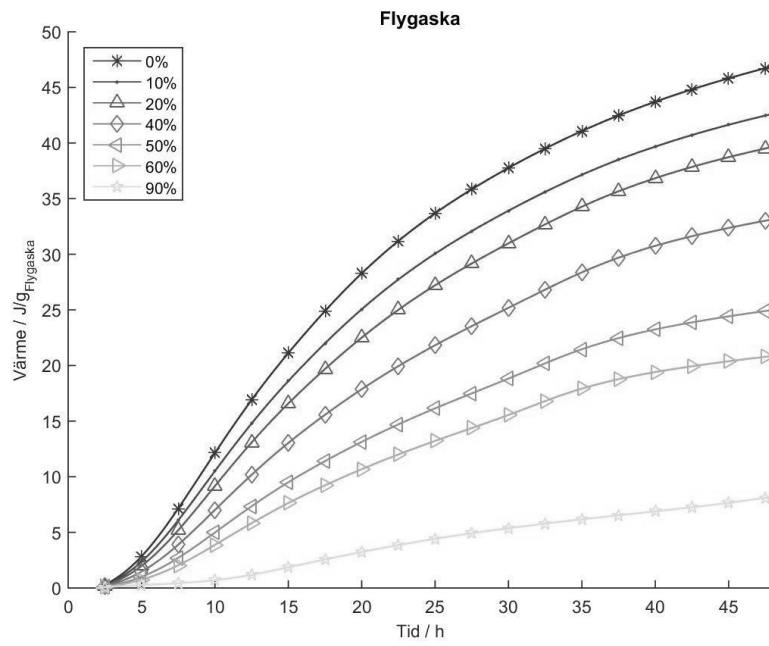
Figur 41. Plott av värmeeffekten per gram cement.



Figur 42. Plott av värmeeffekten per gram flygaska.



Figur 43. Plott av total värmeutveckling per gram cement.

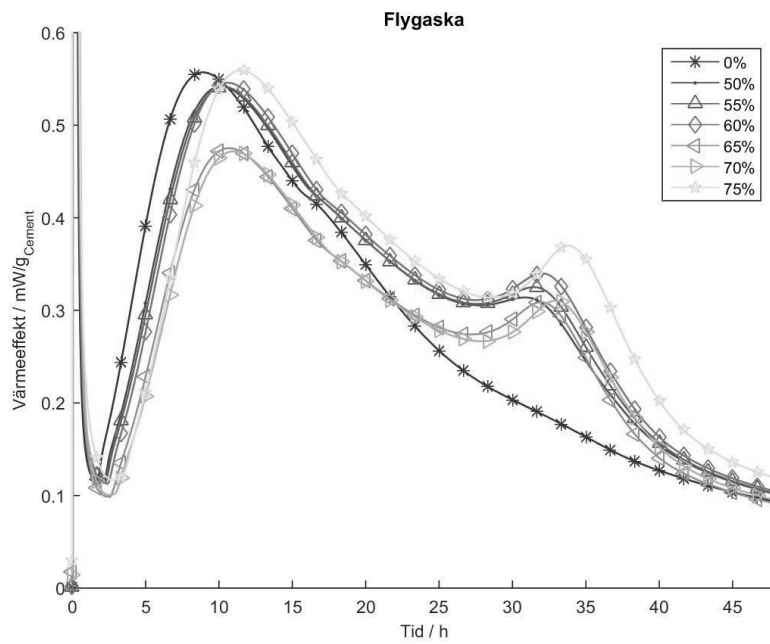


Figur 44. Plott av total värmeutveckling per gram flygaska.

50-75 vol.% Flygaska

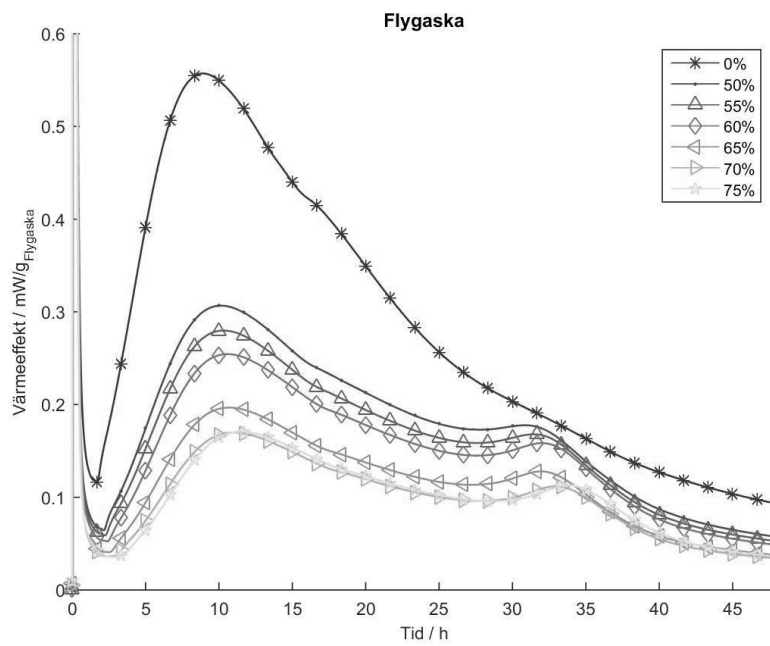
Tabell 28. Uppmätta mängder på 50-75 vol.% flygaska samt referensreceptet.

Kanal	Flygaska [vol.%]	Cement [g]	Flygaska [g]	Vatten [g]
1	0	3,998	0,000	2,411
2	50	2,007	1,539	2,403
3	55	1,803	1,687	2,413
4	60	1,602	1,836	2,408
5	65	1,406	1,990	2,406
6	70	1,205	2,141	2,415
7	75	1,009	2,297	2,405

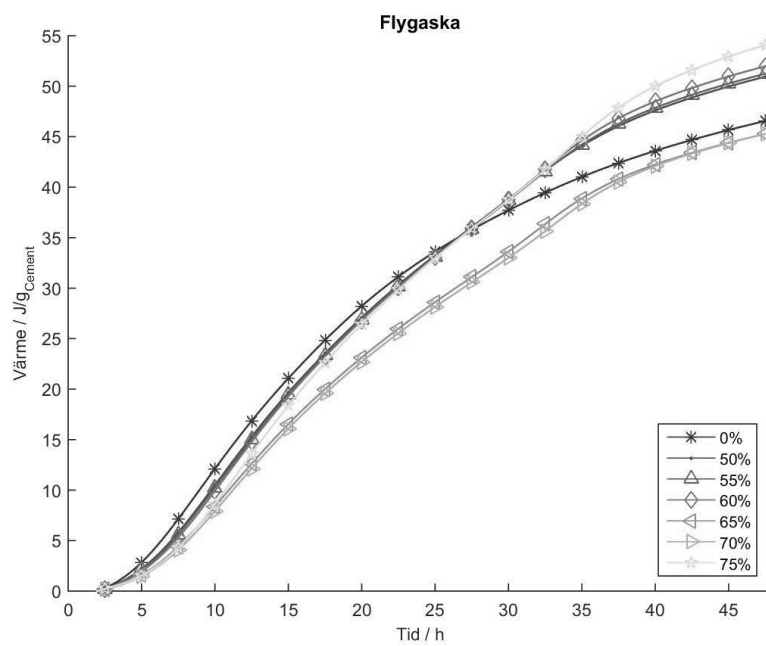


Figur 45. Plott av värmeeffekten per gram cement.

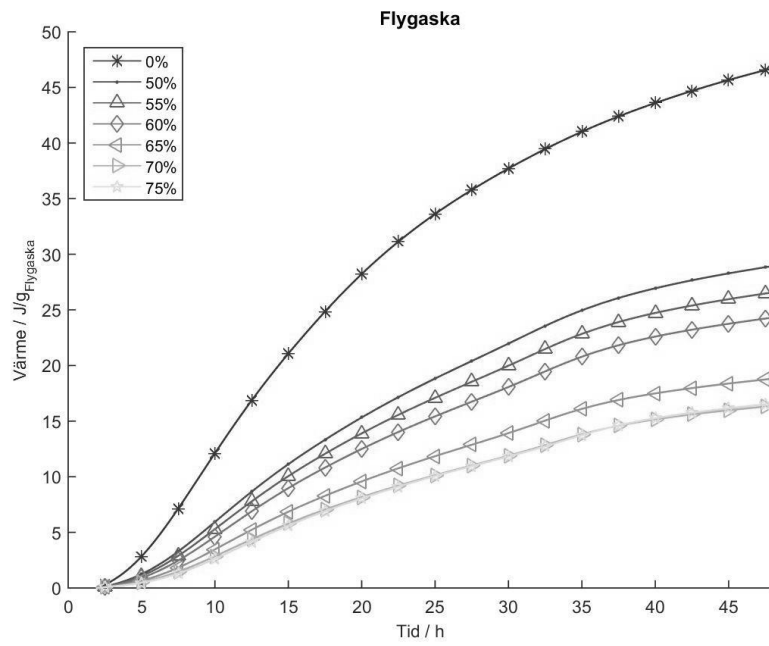
Bilaga 2: Värmeutveckling



Figur 46. Plott av värmeeffekten per gram flygaska.



Figur 47. Plott av total värmeutveckling per gram cement.

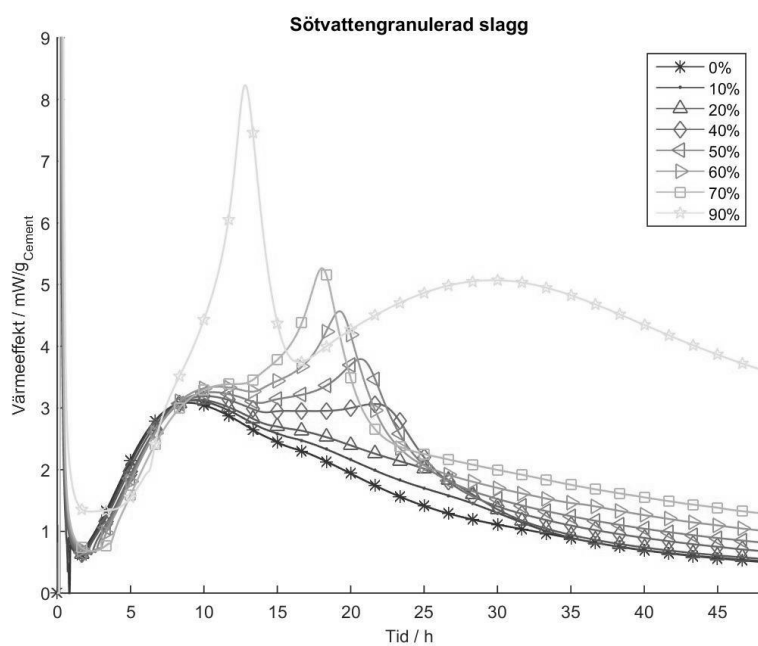


Figur 48. Plott av total värmeutveckling per gram flygaska.

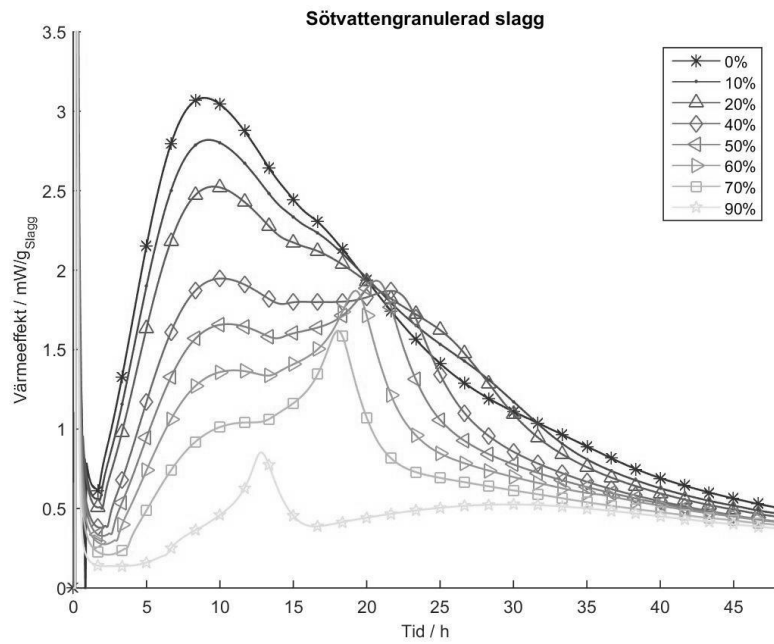
0-90 vol.% Sötvattengranulerad masugnsslagg

Tabell 29. Uppmätta mängder på 0-90 vol.% slagg. Mätningen pågick under sju dygn.

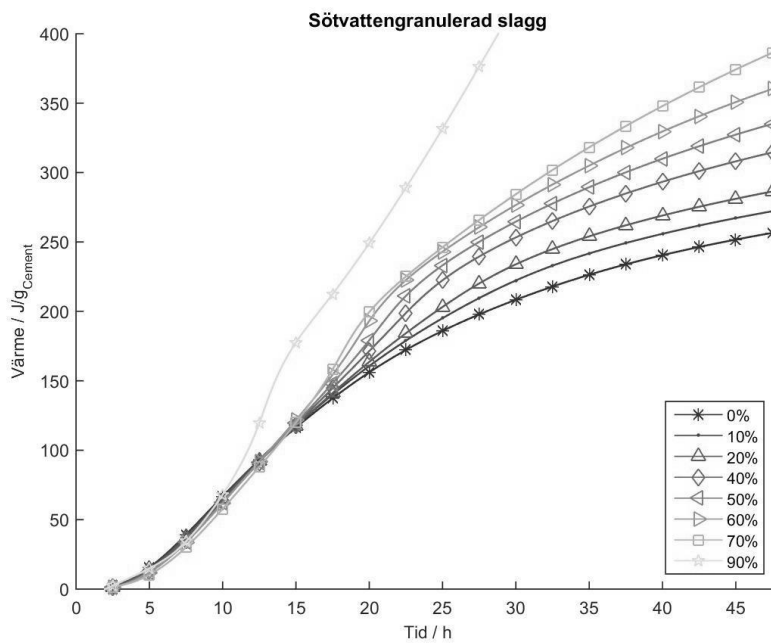
Kanal	Slagg [vol.%]	Cement [g]	Slagg [g]	Vatten [g]
1	0	3,999	0,000	2,399
2	10	3,601	0,388	2,419
3	20	3,199	0,771	2,419
4	40	2,406	1,538	2,400
5	50	2,009	1,931	2,419
6	60	1,603	2,312	2,403
7	70	1,201	2,705	2,428
8	90	0,402	3,476	2,434



Figur 49. Plott av värmeeffekten per gram cement.

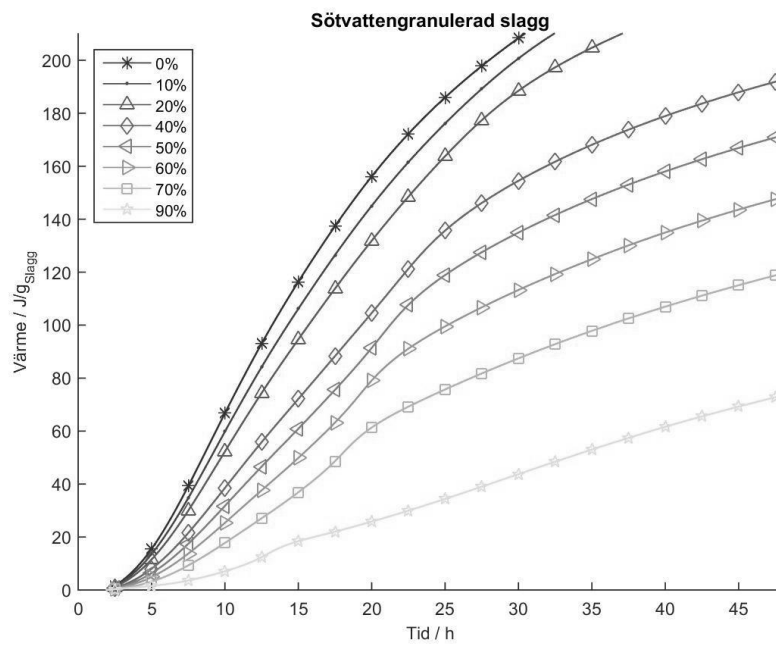


Figur 50. Plott av värmeeffekten per gram slagg.



Figur 51. Plott av total värmeutveckling per gram cement.

Bilaga 2: Värmeutveckling

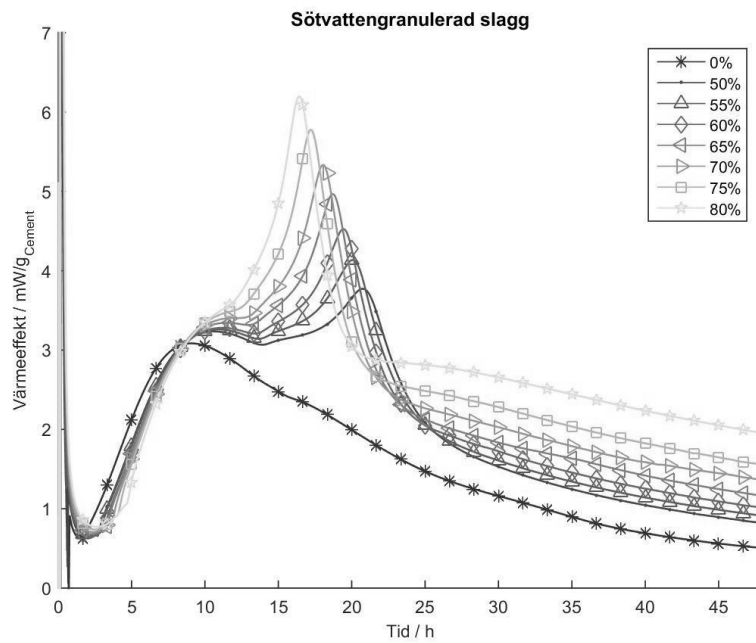


Figur 52. Plott av total värmeutveckling per gram slagg.

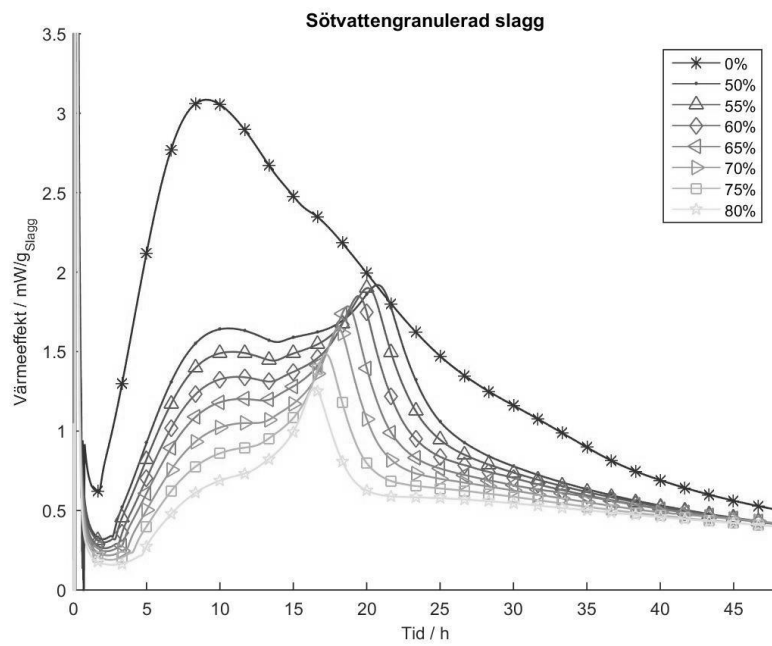
50-80 vol.% Sötvattengranulerad masugnsslagg

Tabell 30. Uppmätta mängder på 50-80 vol.% slagg samt referensreceptet.

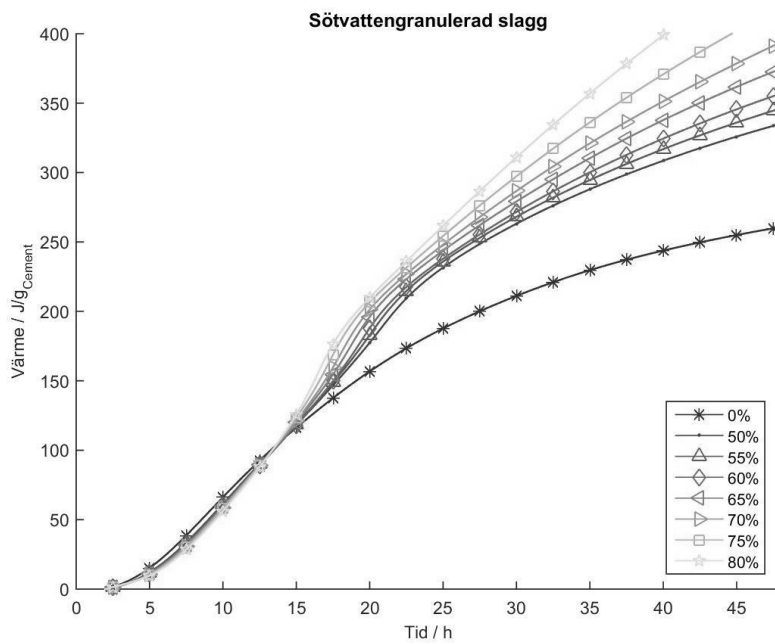
Kanal	Slagg [vol.%]	Cement [g]	Slagg [g]	Vatten [g]
1	0	4,001	0,000	2,433
2	50	2,001	1,932	2,404
3	55	1,802	2,120	2,409
4	60	1,601	2,315	2,414
5	65	1,406	2,505	2,406
6	70	1,207	2,703	2,408
7	75	1,001	2,893	2,417
8	80	0,796	3,081	2,404



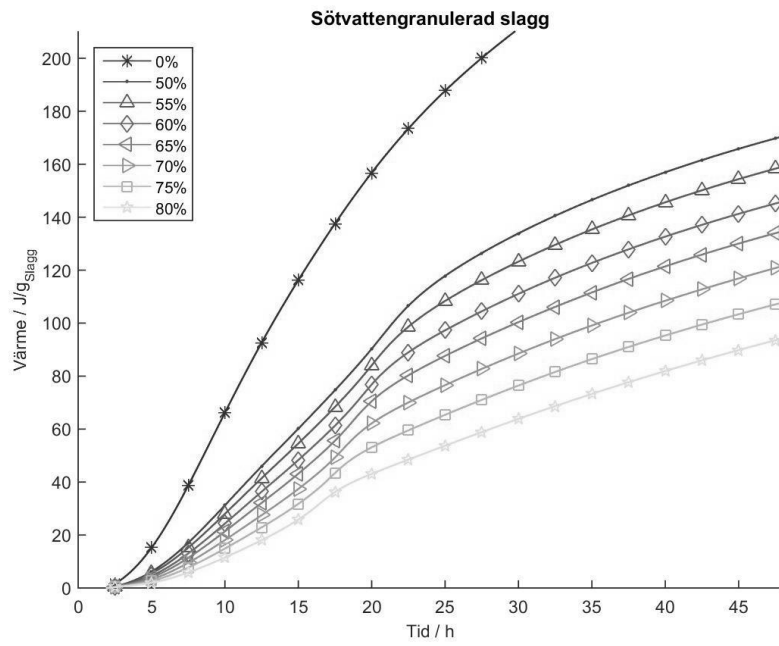
Figur 53. Plott av värmeeffekten per gram cement.



Figur 54. Plott av värmeeffekten per gram slagg.



Figur 55. Plott av total värmeutveckling per gram cement.

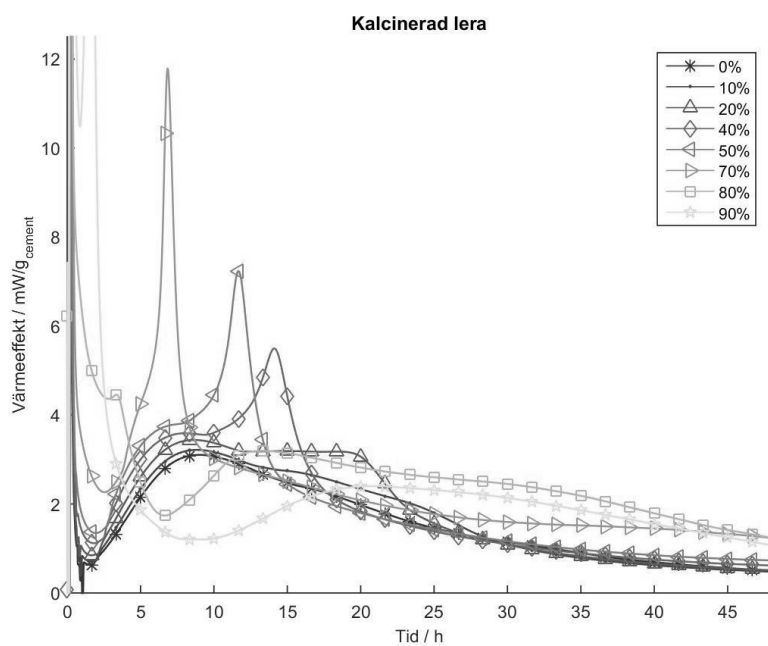


Figur 56. Plott av total värmeutveckling per gram slagg.

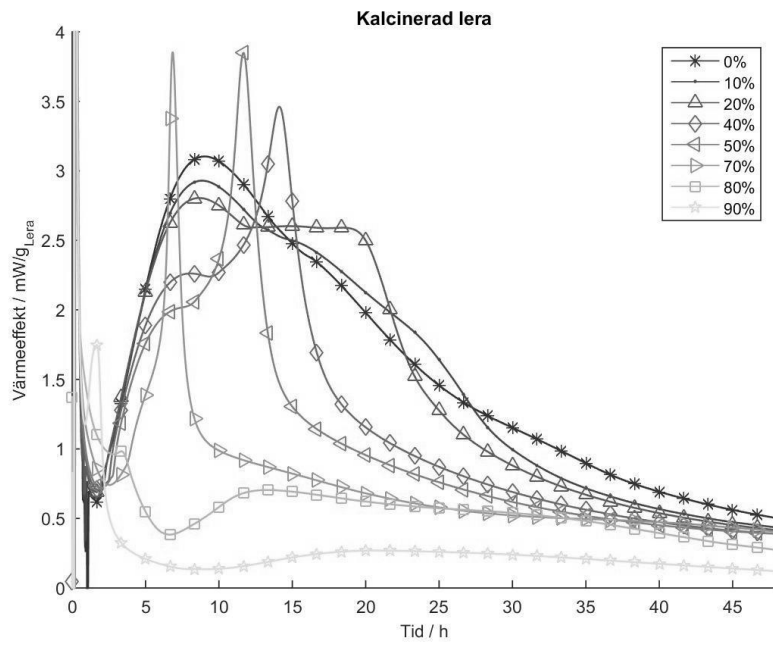
0-90 vol.% Kalcinerad lera

Tabell 31. Uppmätta mängder på 0-90 vol.% kalcinerad lera.

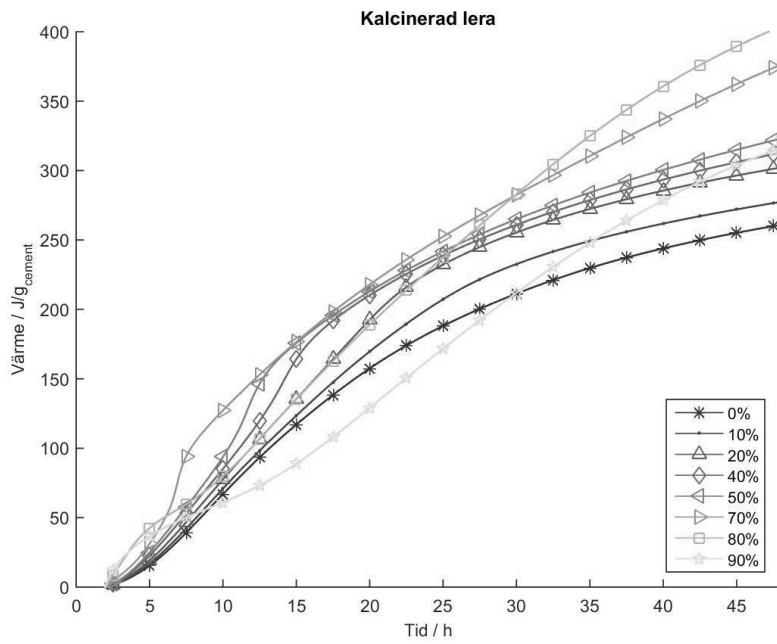
No	Lera [vol.%]	Cement [g]	Lera [g]	Vatten [g]
1	0	4,000	0,000	2,419
2	10	3,603	0,353	2,404
3	20	3,102	0,701	2,404
4	40	2,400	1,410	2,413
5	50	2,002	1,762	2,418
6	70	1,200	2,471	2,410
7	80	0,799	2,825	2,416
8	90	0,401	3,173	2,406



Figur 57. Plott av värmeeffekten per gram cement.

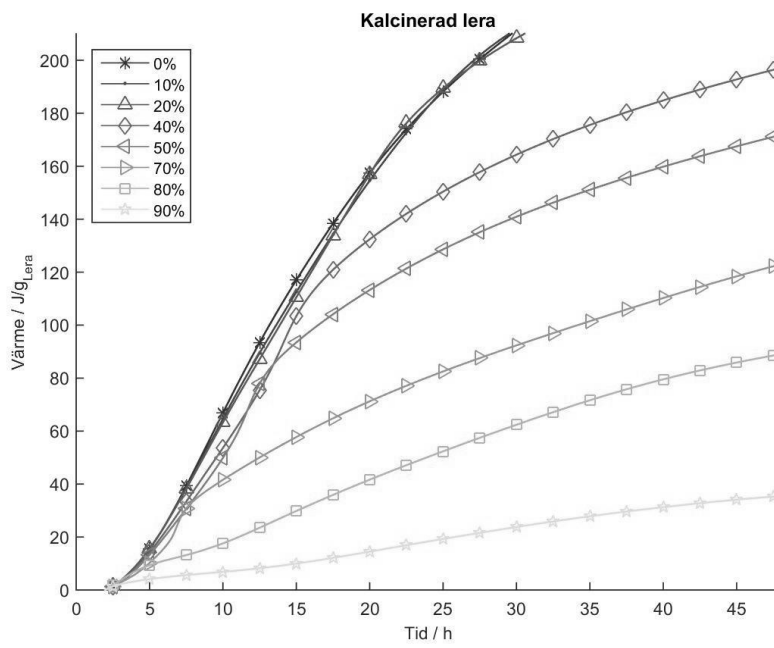


Figur 58. Plott av värmeeffekten per gram kalcinerad lera.



Figur 59. Plott av total värmeutveckling per gram cement.

Bilaga 2: Värmeutveckling

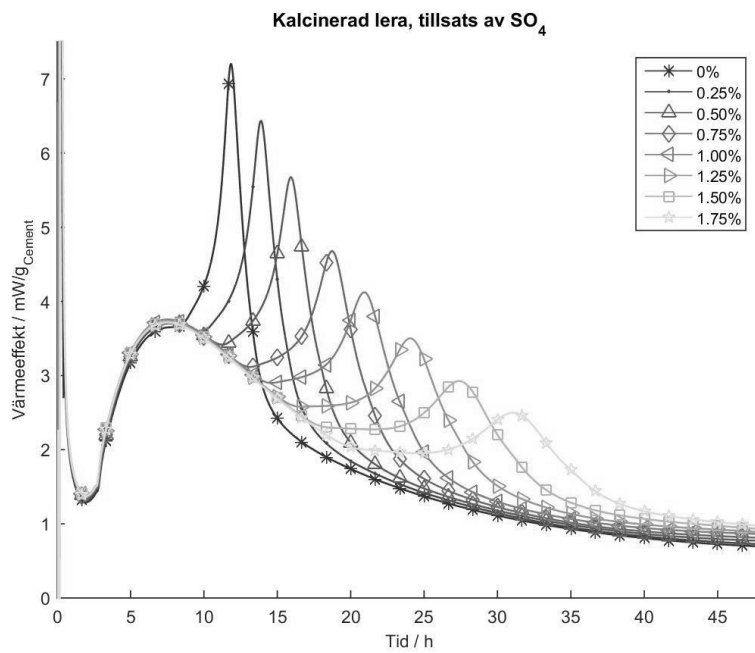


Figur 60. Plott av total värmeutveckling per gram kalcinerad lera.

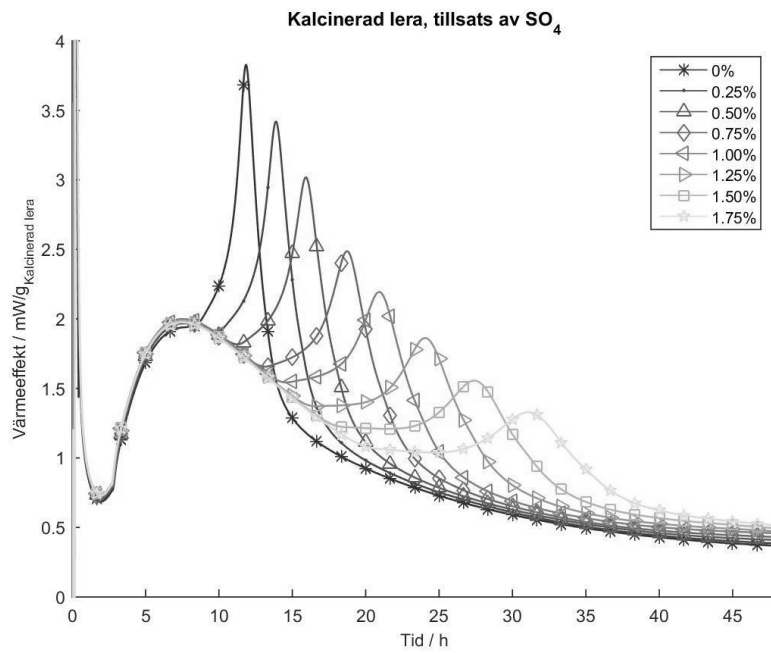
50 vol.% Kalcinerad lera med tillsats av CaSO_4

Tabell 32. Uppmätta mängder på 50 vol.% kalcinerad lera som har optimerats med CaSO_4 .

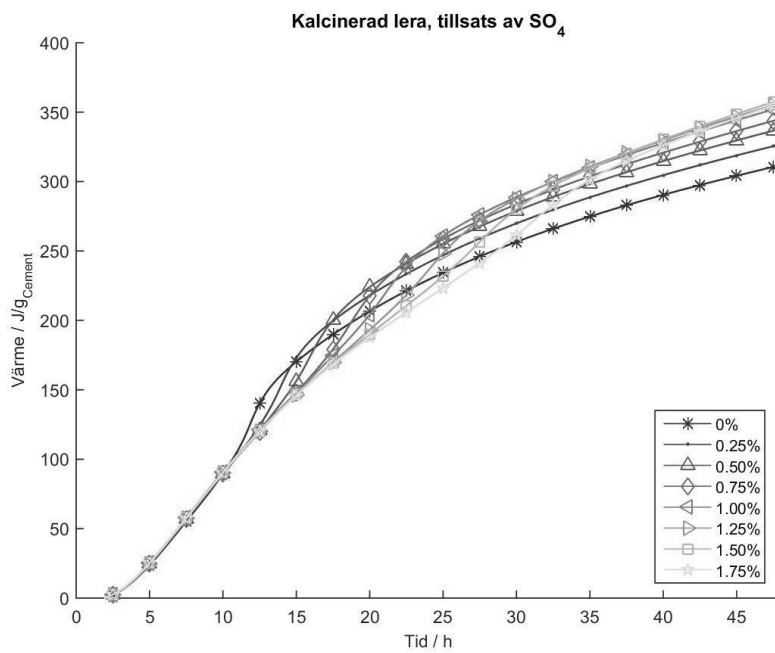
No	CaSO_4 [%]	Cement [g]	Lera [g]	CaSO_4	Vatten [g]
1	0,00	2,000	1,763	0,000	2,400
2	0,25	2,000	1,763	0,200	2,407
3	0,50	2,002	1,762	0,040	2,425
4	0,75	2,001	1,762	0,060	2,427
5	1,00	2,000	1,758	0,080	2,394
6	1,25	2,000	1,760	0,101	2,420
7	1,50	2,000	1,760	0,121	2,424
8	1,75	2,000	1,761	0,141	2,412



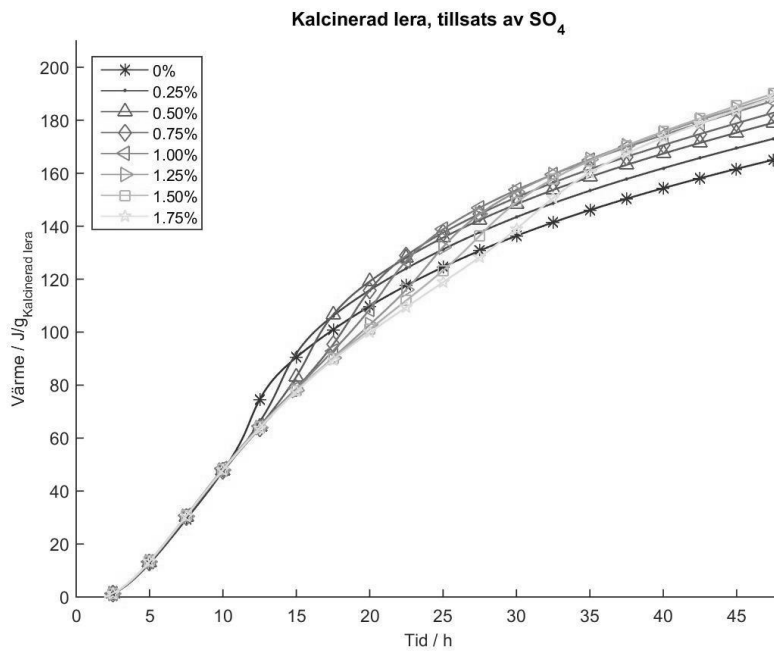
Figur 61. Plott av värmeeffekten per gram cement.



Figur 62. Plott av värmeeffekten per gram kalcinerad lera.

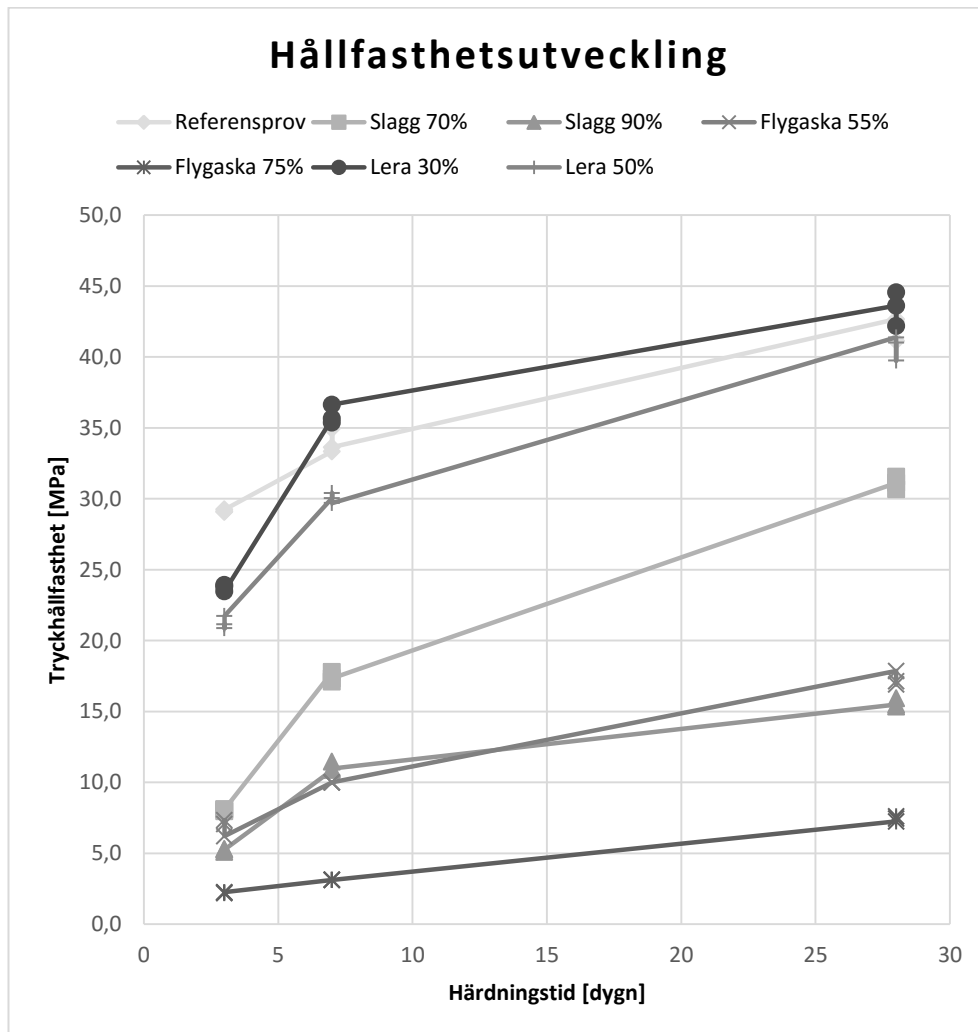


Figur 63. Plott av total värmeutveckling per gram cement.



Figur 64. Plott av total värmeutveckling per gram kalcinerad lera.

Bilaga 3: Hållfasthetsutveckling



Tabell 33. Hållfasthetsutvecklingen för samtliga recept.

55 vol.% Flygaska

Tabell 34. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för kuber med 55 vol.% flygaska.

Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	224	158	7,1
2	3	225	165	7,3
3	3	224	139	6,2
4	7	225	225	10,0
5	7	225	225	10,0
6	7	224	224	10,0
7	28	224	400	17,9
8	28	222	380	17,1
9	28	225	380	16,9

75 vol.% Flygaska

Tabell 35. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för kuber med 75 vol.% flygaska.

Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	225	49	2,2
2	3	224	50	2,2
3	3	222	50	2,3
4	7	224	70	3,1
5	7	225	70	3,1
6	7	224	70	3,1
7	28	221	160	7,2
8	28	224	170	7,6
9	28	222	165	7,4

70 vol.% Sötvattensgranulerad masugnsslagg

Tabell 36. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för kuber med 70 vol.% slagg.

Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	226	180	8,0
2	3	225	182	8,1
3	3	226	183	8,1
4	7	225	400	17,8
5	7	225	385	17,1
6	7	225	390	17,3
7	28	225	700	31,1
8	28	225	710	31,6
9	28	225	690	30,7

70 vol.% Sötvattensgranulerad masugnsslagg

Tabell 37. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för kuber med 90 vol.% slagg.

Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	227	120	5,3
2	3	226	115	5,1
3	3	230	121	5,3
4	7	230	250	10,9
5	7	227	260	11,5
6	7	228	250	11,0
7	28	226	350	15,5
8	28	225	345	15,3
9	28	226	360	15,9

30 vol.% Kalcinerad lera

Tabell 38. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för kuber med 30 vol.% kalcinerad lera.

Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	230	550	23,9
2	3	229	545	23,8
3	3	230	540	23,5
4	7	230	820	35,7
5	7	229	810	35,4
6	7	229	839	36,6
7	28	227	990	43,6
8	28	230	970	42,2
9	28	229	1020	44,5

50 vol.% Kalcinerad lera

Tabell 39. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för kuber med 50 vol.% kalcinerad lera.

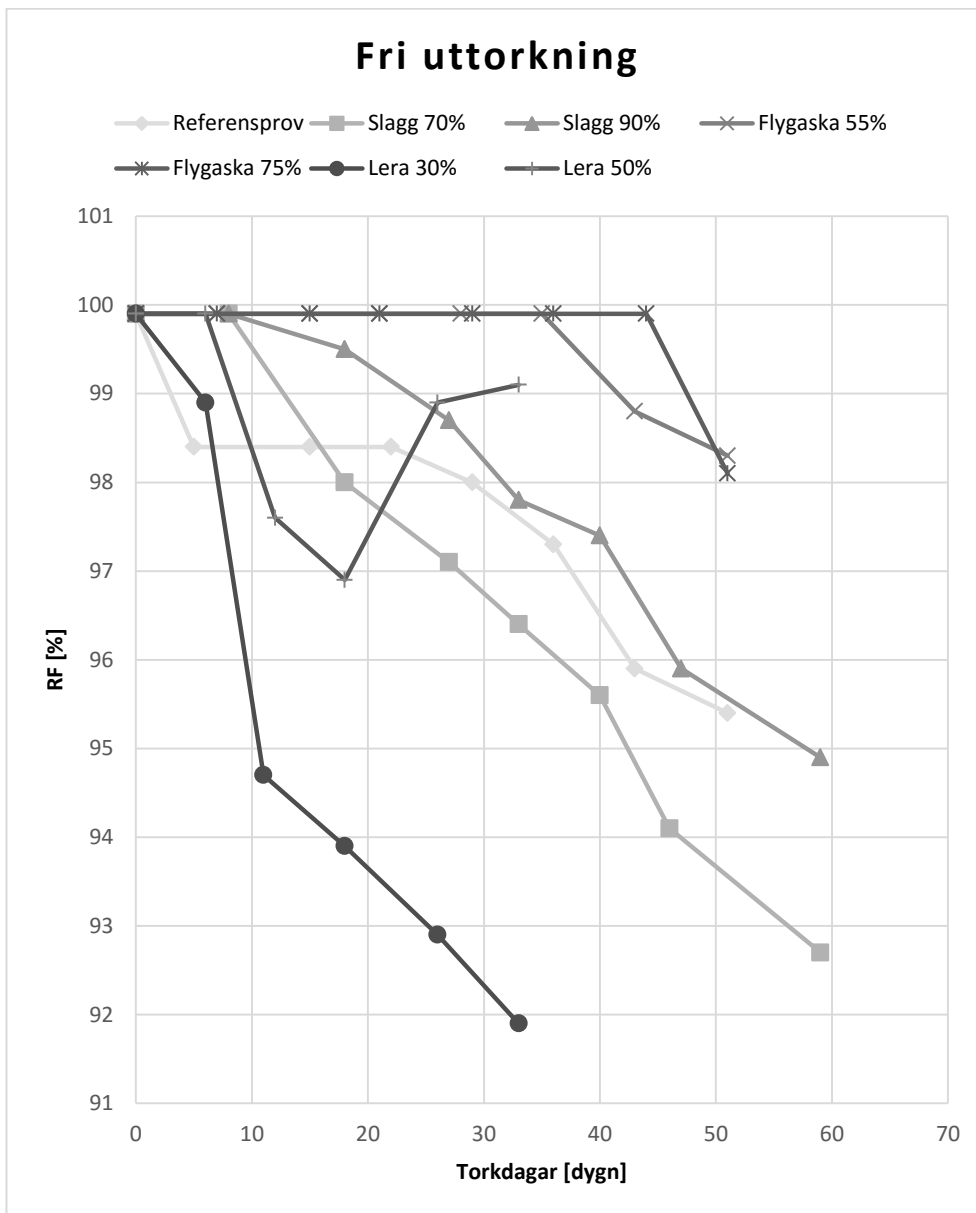
Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	227	480	21,1
2	3	230	480	20,9
3	3	230	500	21,7
4	7	228	685	30,0
5	7	227	690	30,4
6	7	229	680	29,7
7	28	226	935	41,4
8	28	229	910	39,7
9	28	228	935	41,0

Referensrecept

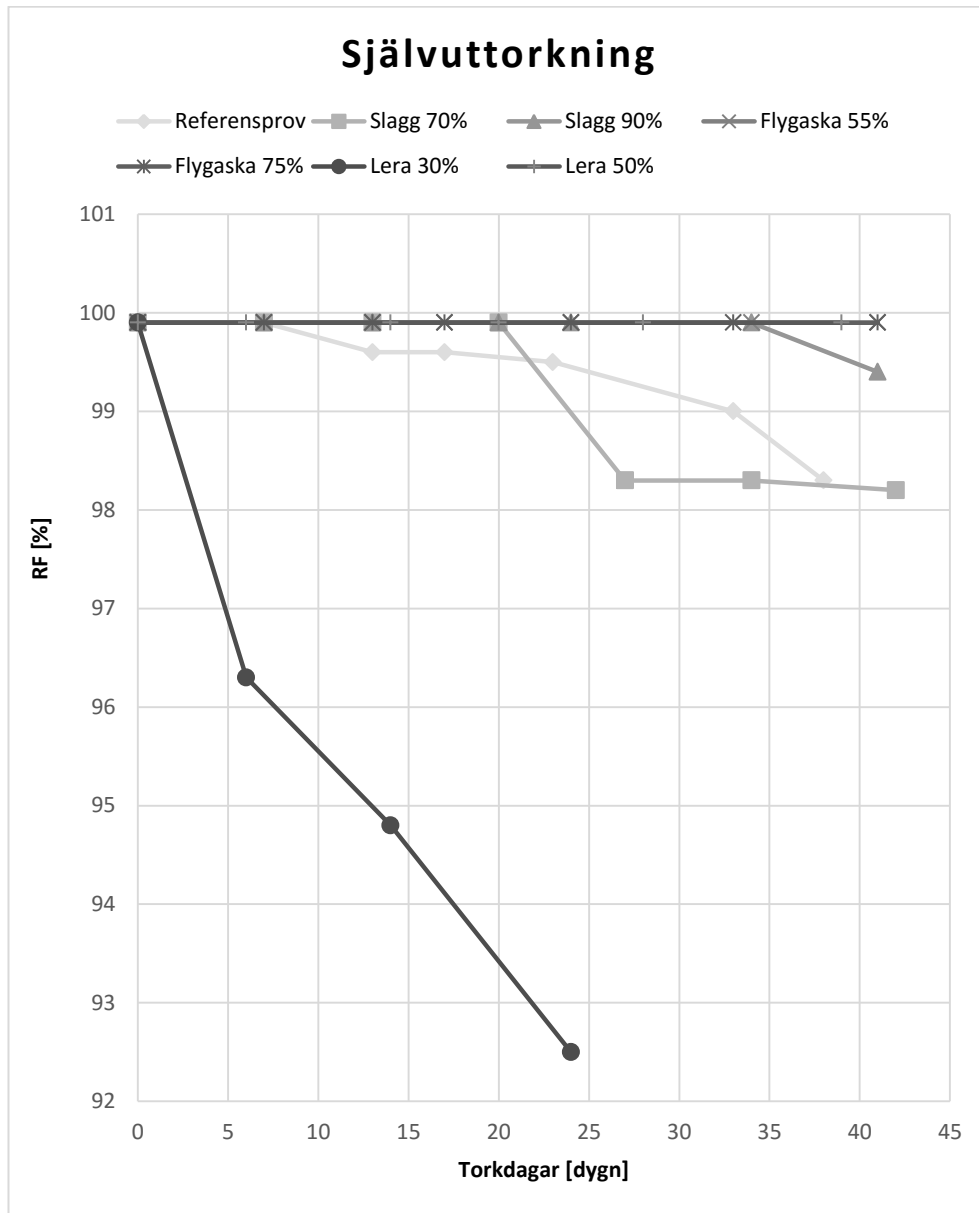
Tabell 40. Ålder, tvärsnittsarea och tryckhållfasthet för referensrecept.

Provkropp	Dygn	Area [cm ²]	Tryck [kN]	Tryck [MPa]
1	3	227	660	29,1
2	3	225	655	29,1
3	3	225	658	29,2
4	7	225	750	33,3
5	7	229	800	34,9
6	7	226	760	33,6
7	28	225	960	42,7
8	28	225	925	41,1
9	28	225	955	42,4

Bilaga 4: Uttorkning

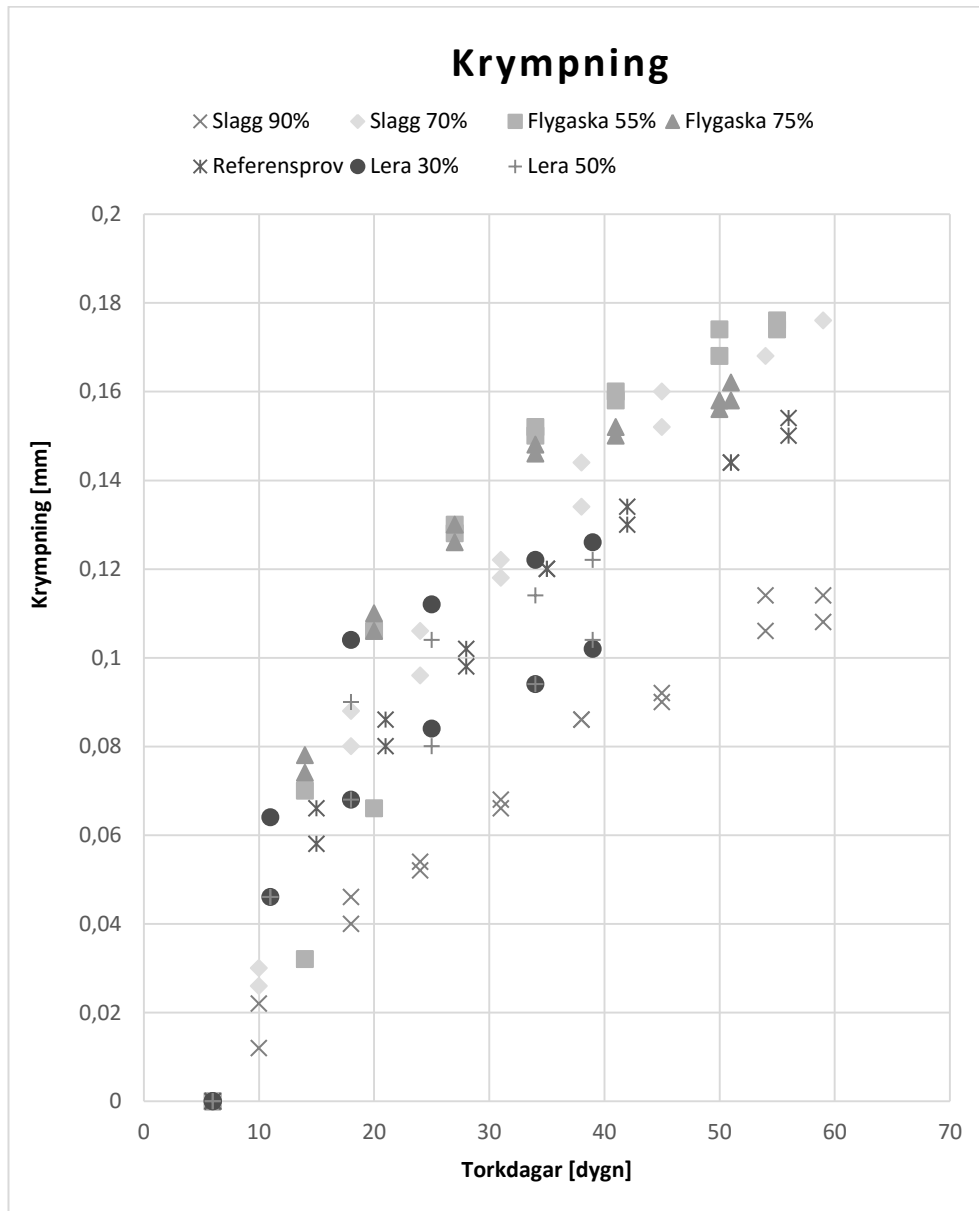


Tabell 41. Den fria uttorkningen för samtliga recept.

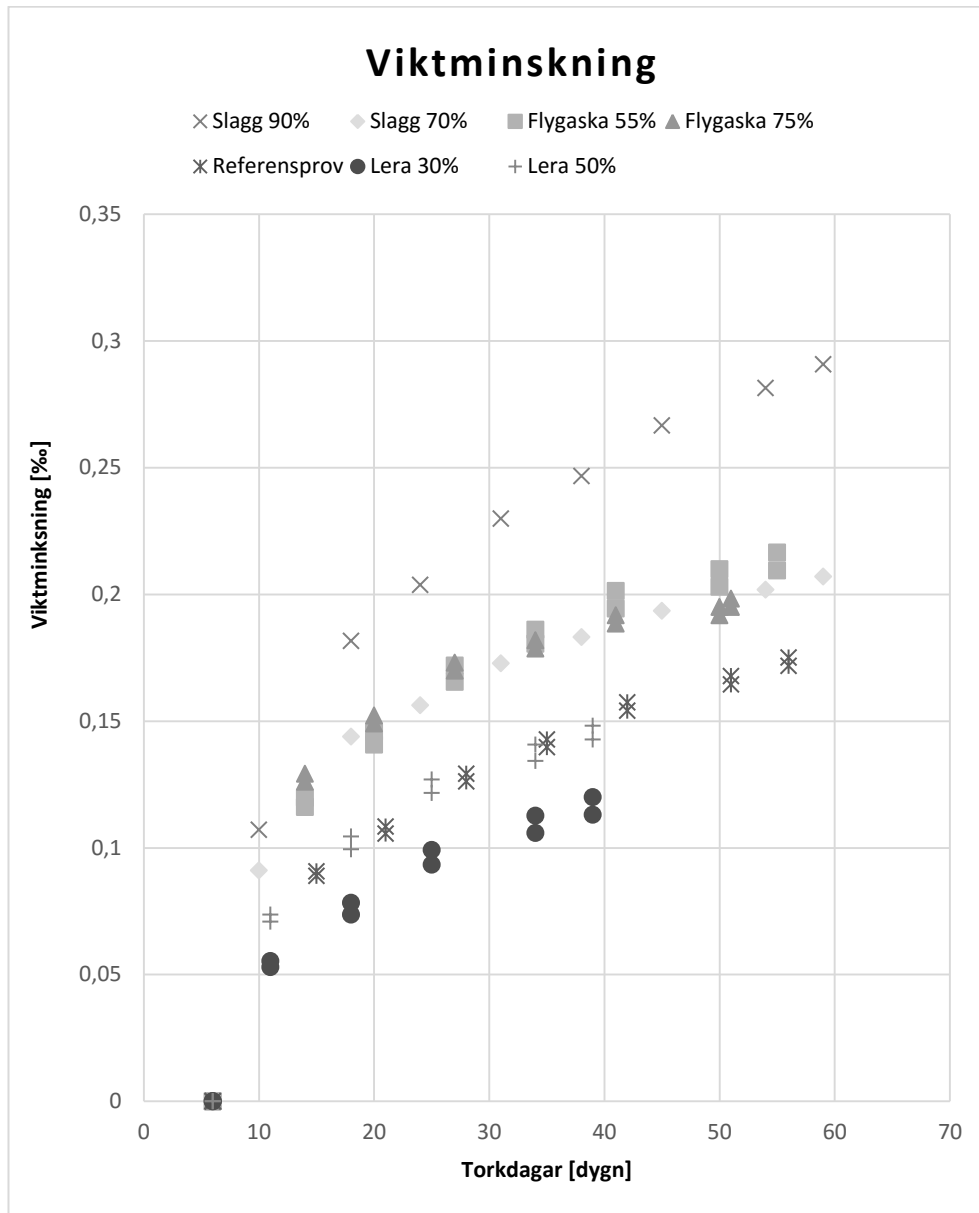


Tabell 42. Självtorkningen för samtliga recept.

Bilaga 5: Krympning och viktminskning

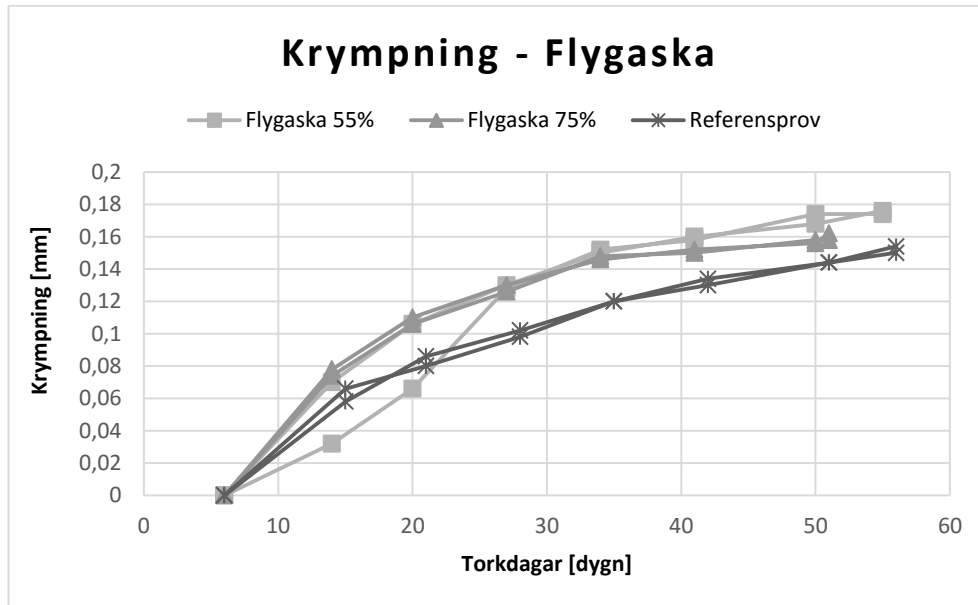


Tabell 43. Krympningen hos samtliga recept.

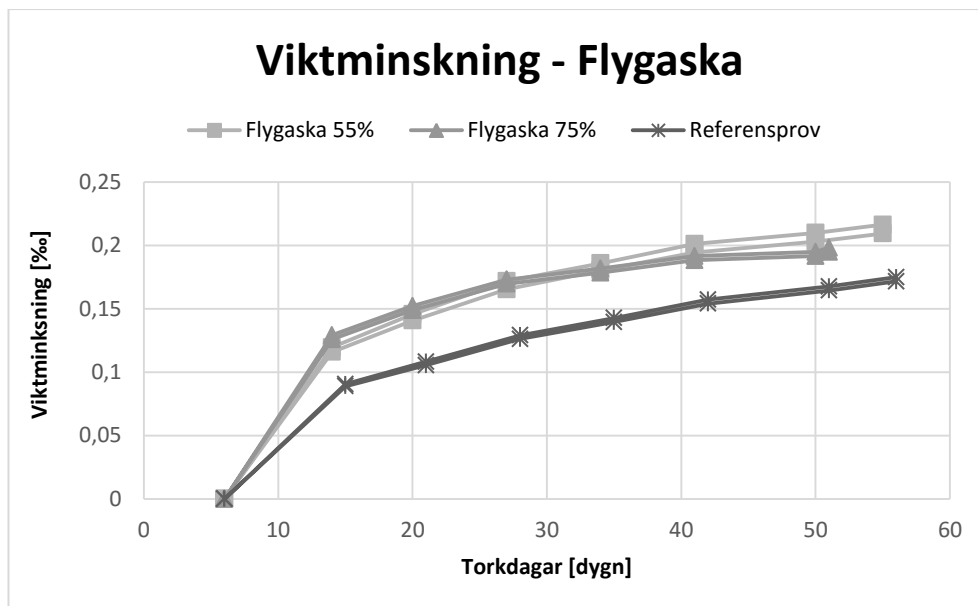


Tabell 44. Viktminskningen hos samtliga recept.

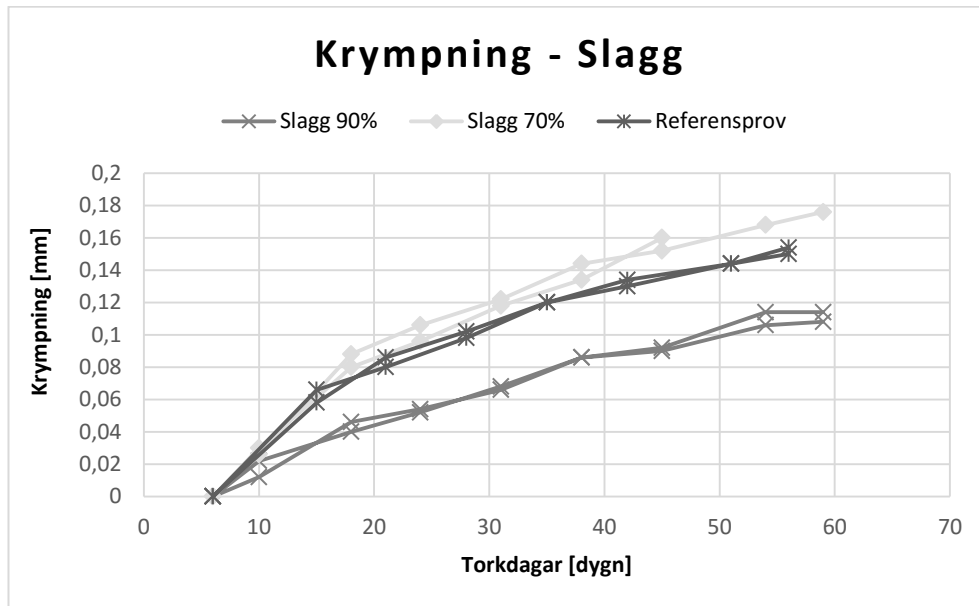
Jämförande diagram



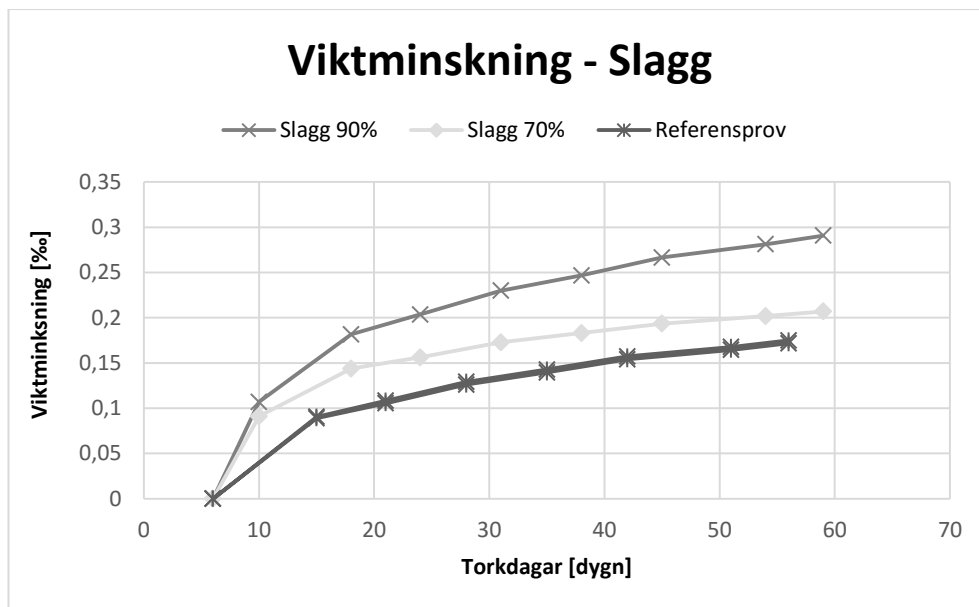
Figur 65. Krympning för proven med 55 vol.% respektive 75 vol.% flygaska samt för referensproven.



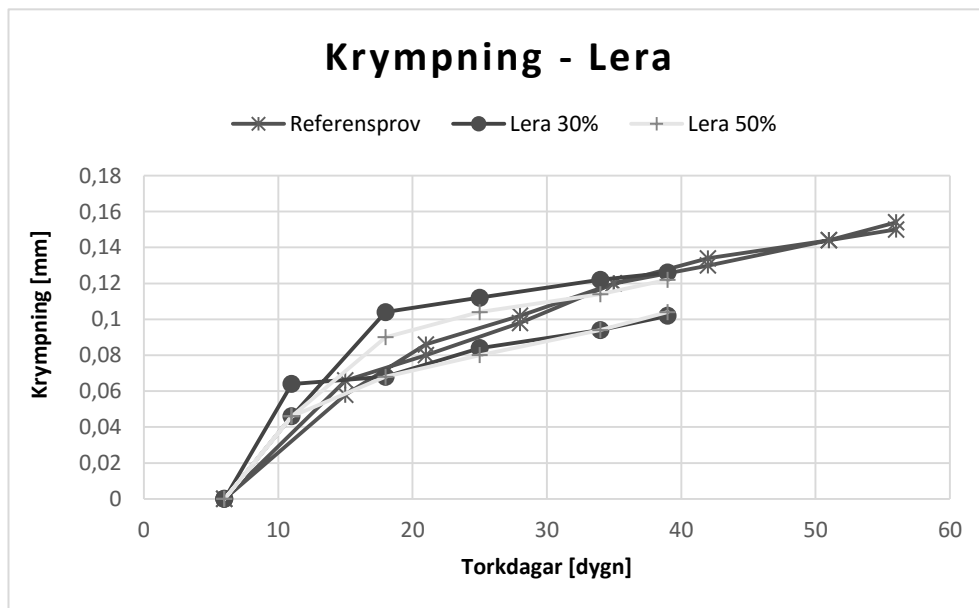
Figur 66. Viktminskning för proven med 55 vol.% respektive 75 vol.% flygaska samt för referensproven.



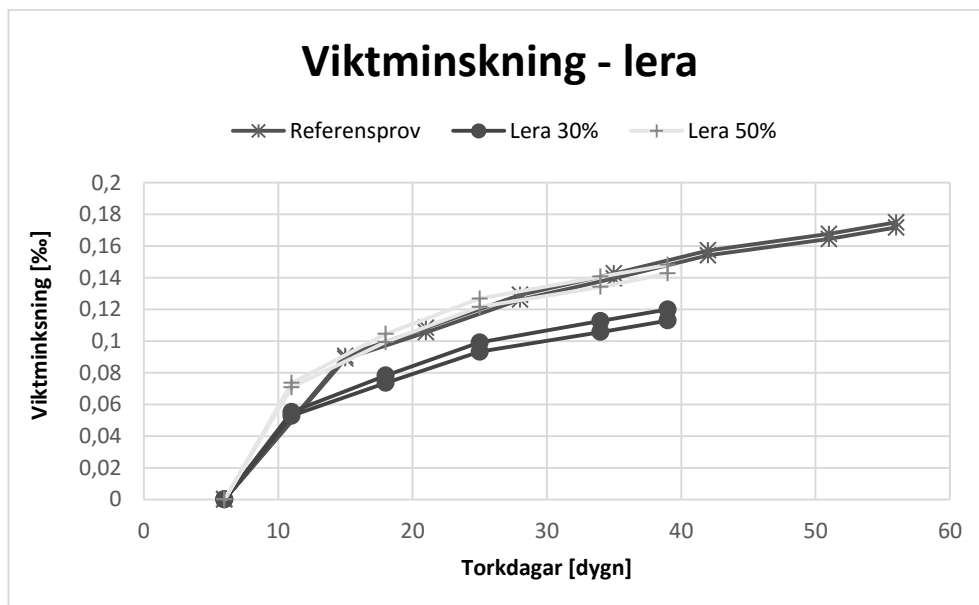
Figur 67. Krympning för proven med 70 vol.% respektive 90 vol.% slagg samt för referensproven.



Figur 68. Viktninskning för proven med 70 vol.% respektive 90 vol.% slagg samt för referensproven.



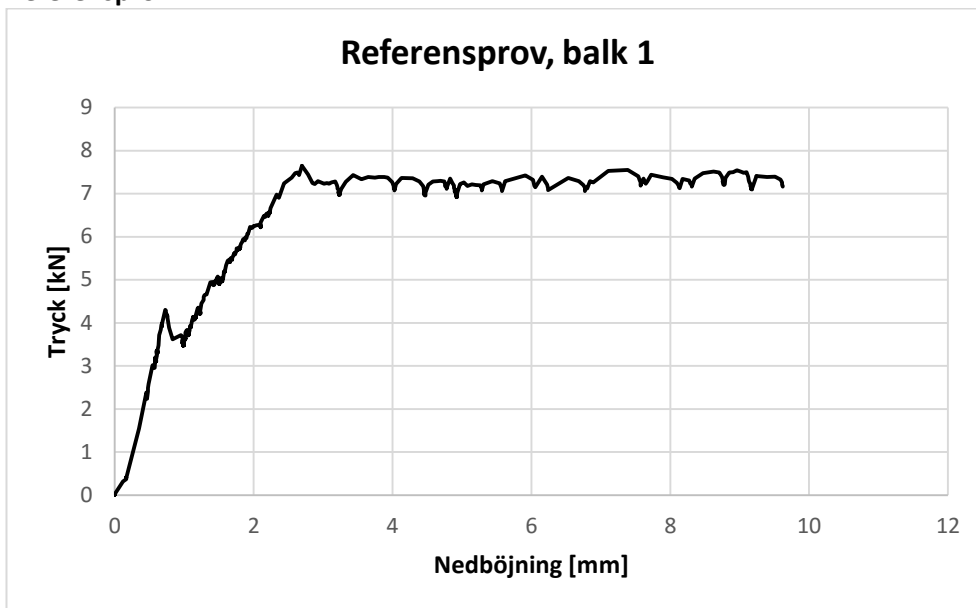
Figur 69. Krympning för proven med 30 vol.% respektive 50 vol.% lera samt för referensproven.



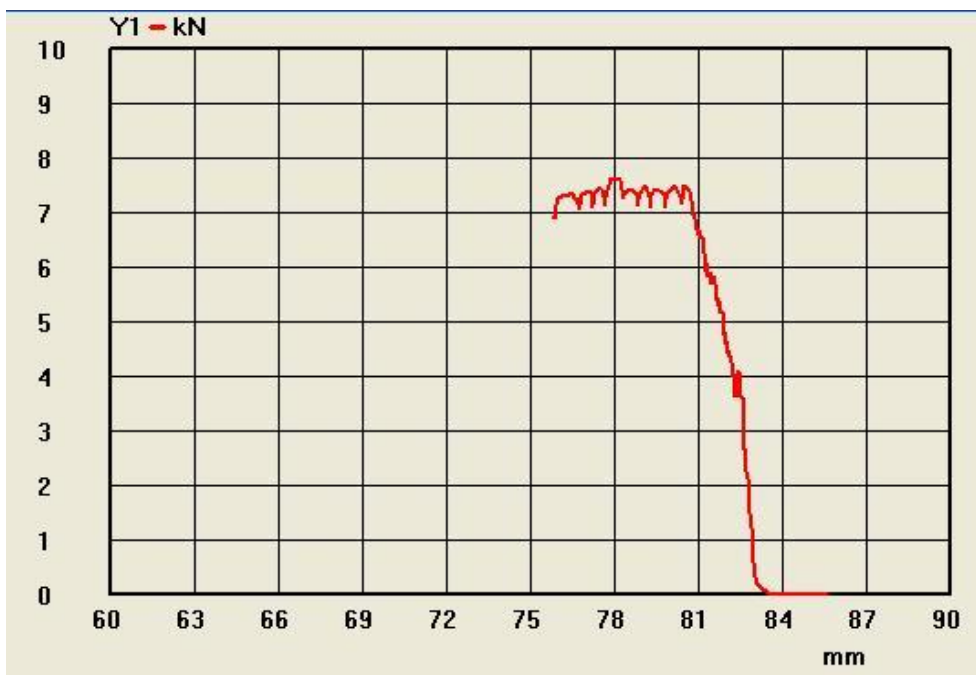
Figur 70. Viktminskning för proven med 30 vol.% respektive 50 vol.% lera samt för referensproven.

Bilaga 6: Bøjstyvhet och bøjdraghållfasthet

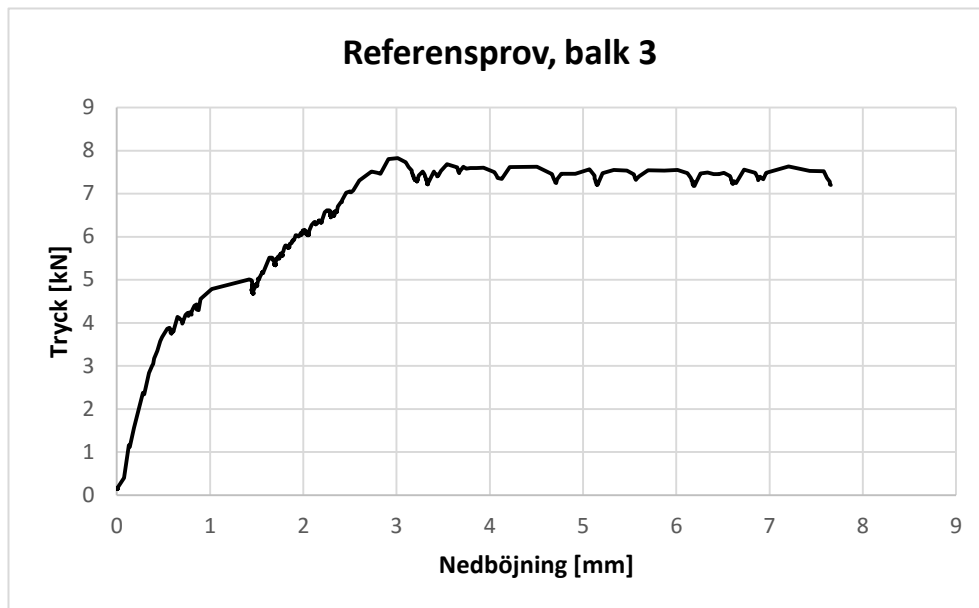
Referensprov



Figur 71. Tryck-nedböjningsdiagram av referensprov balk 1.



Figur 72. Tryck-nedböjningsdiagram av referensprov balk 2.



Figur 73. Tryck-nedbøjningsdiagram av referensprov balk 3.

Bilaga 6: Bøjstyvhet och bøjdraghållfasthet

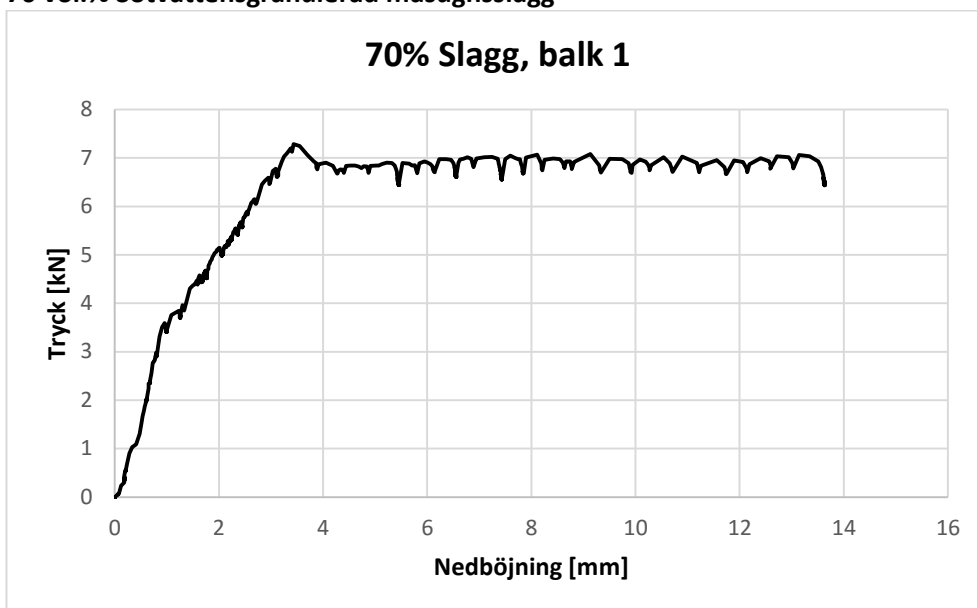
Tabell 45. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedböjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Bøjstyvheten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P_1 [kN]	v_1 [mm]	P_2 [kN]	v_2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	2,39	0,46	1,55	0,35	12,40	99,19
2	2,00	0,30	1,00	0,20	15,99	127,94
3	2,84	0,35	2,37	0,28	11,36	90,88
Medel					13,25	106,00
Std					1,98	15,88

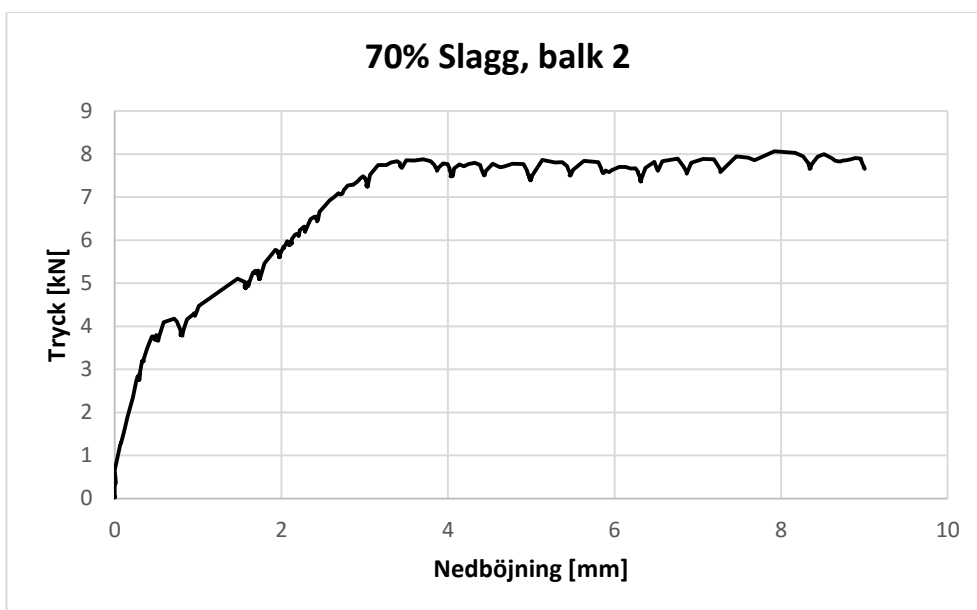
Tabell 46. Sprickmoment och bøjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärde och standardavvikelsen.

Balk	Sprickmoment [kNm]	Bøjdraghållfasthet [MPa]
1	0,89	5,59
2	0,85	5,31
3	0,81	5,08
Medel		5,33
Std		0,21

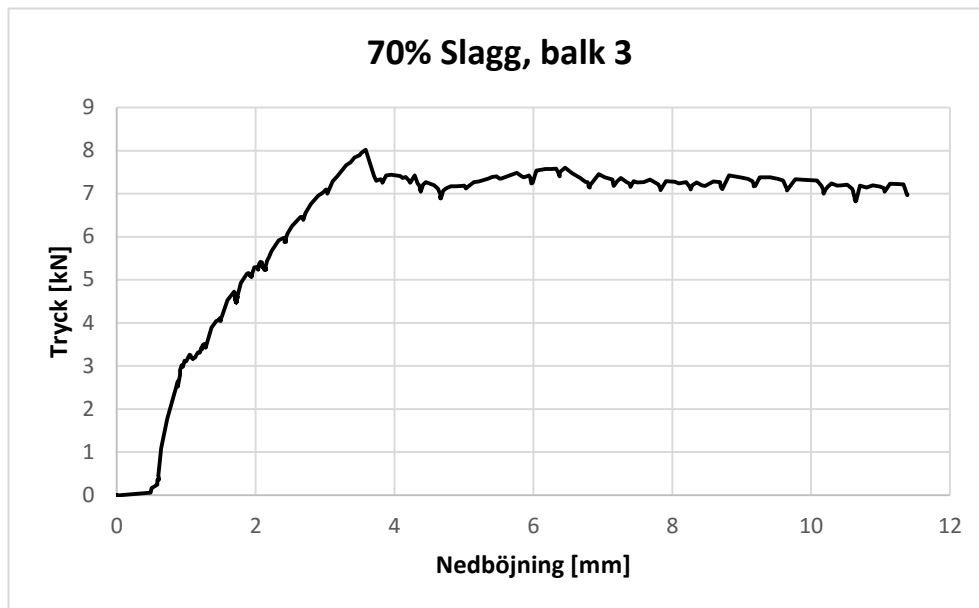
70 vol.% Sötvattensgranulerad masugnsslagg



Figur 74. Tryck-nedböjningsdiagram av 70 vol.% slagg balk 1.



Figur 75. Tryck-nedböjningsdiagram av 70 vol.% slagg balk 2.



Figur 76. Tryck-nedböjningsdiagram av 70 vol.% slagg balk 3.

Bilaga 6: Böjstyvhet och böjdraghållfasthet

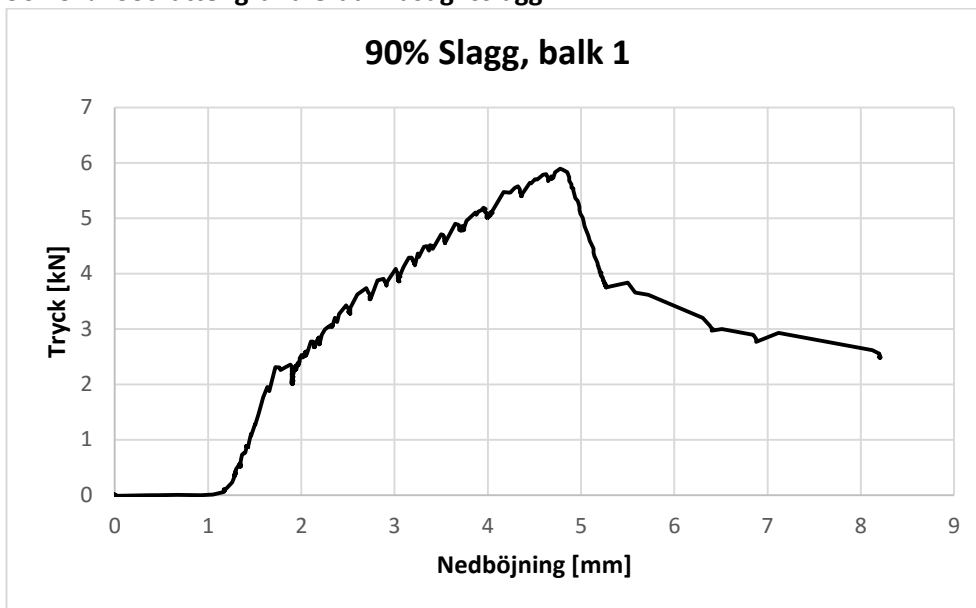
Tabell 47. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedböjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Böjstyvheten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P_1 [kN]	v_1 [mm]	P_2 [kN]	v_2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	2,98	0,79	1,92	0,59	8,24	65,93
2	2,34	0,22	1,24	0,07	11,65	93,17
3	2,65	0,88	1,09	0,64	10,43	83,43
Medel					10,11	80,84
Std					1,41	11,27

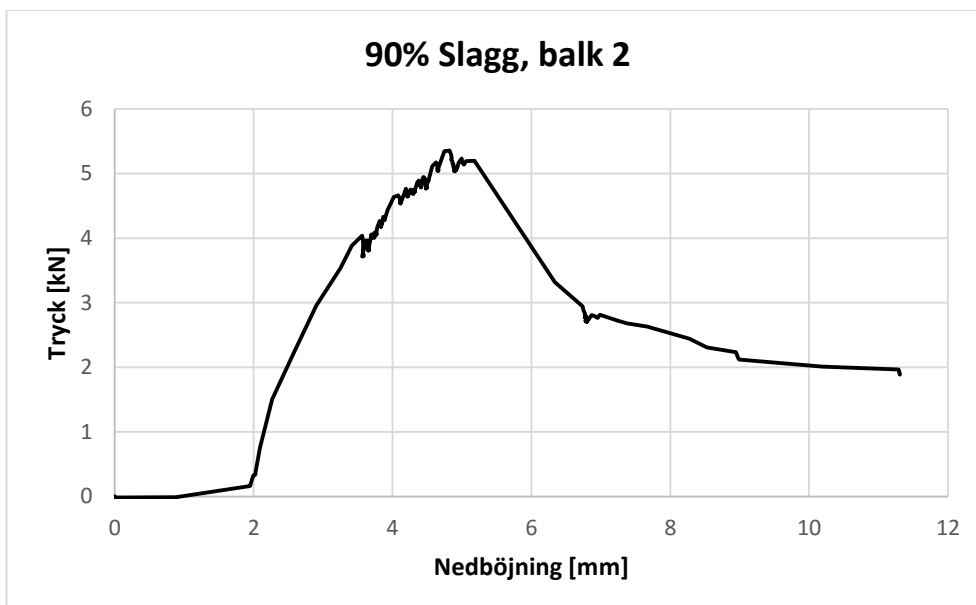
Tabell 48. Sprickmoment och böjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärde och standardavvikelsen.

Balk	Sprickmoment [kNm]	Böjdraghållfasthet [MPa]
1	0,76	4,73
2	0,79	4,95
3	0,68	4,25
Medel		4,64
Std		0,29

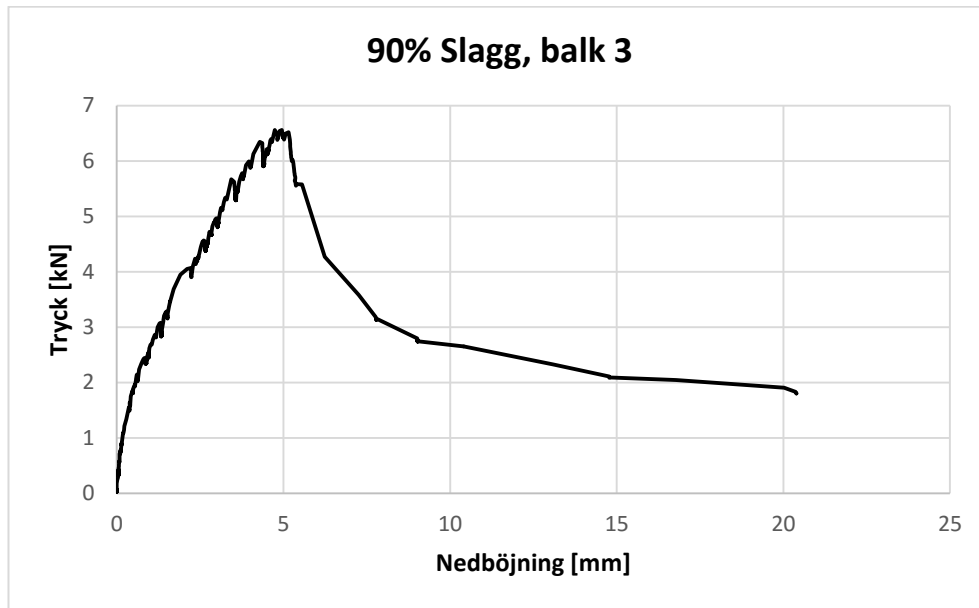
90 vol.% Sötvattengranulerad masugnsslagg



Figur 77. Tryck-nedböjningsdiagram av 90 vol.% slagg balk 1.



Figur 78. Tryck-nedböjningsdiagram av 90 vol.% slagg balk 2.



Figur 79. Tryck-nedböjningsdiagram av 90 vol.% slagg balk 3.

Bilaga 6: Bøjstyvhet och bøjdraghållfasthet

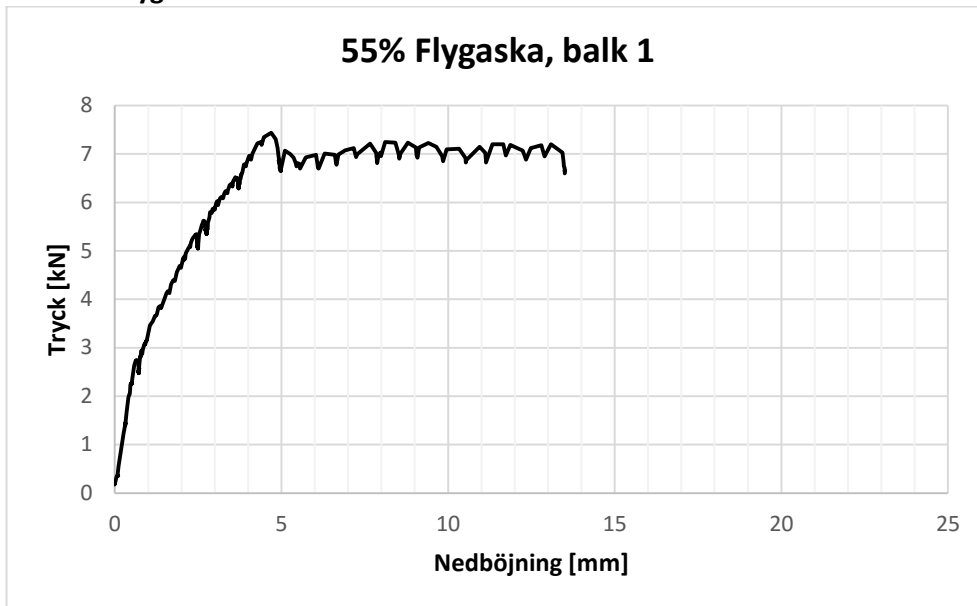
Tabell 49. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedböjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Bøjstyvheten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P_1 [kN]	v_1 [mm]	P_2 [kN]	v_2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	1,76	0,59	0,77	0,40	8,18	65,43
2	2,23	0,58	1,51	0,26	3,67	29,36
3	1,93	0,52	1,33	0,28	4,00	31,99
Medel					5,28	42,26
Std					2,05	16,42

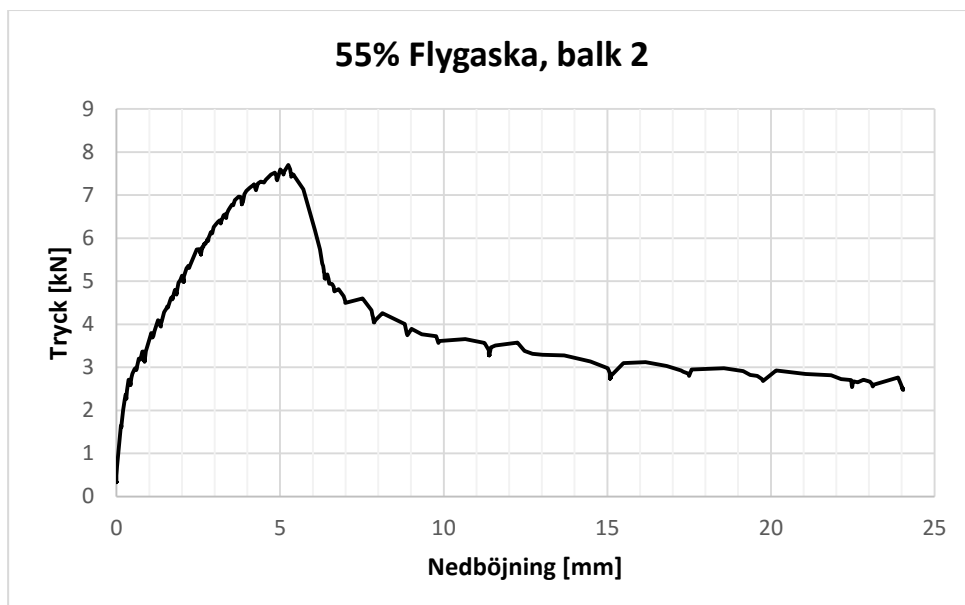
Tabell 50. Sprickmoment och bøjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärde och standardavvikelsen.

Balk	Sprickmoment [kNm]	Bøjdraghållfasthet [MPa]
1	0,48	3,00
2	0,86	5,36
3	0,32	2,02
Medel		3,46
Std		1,40

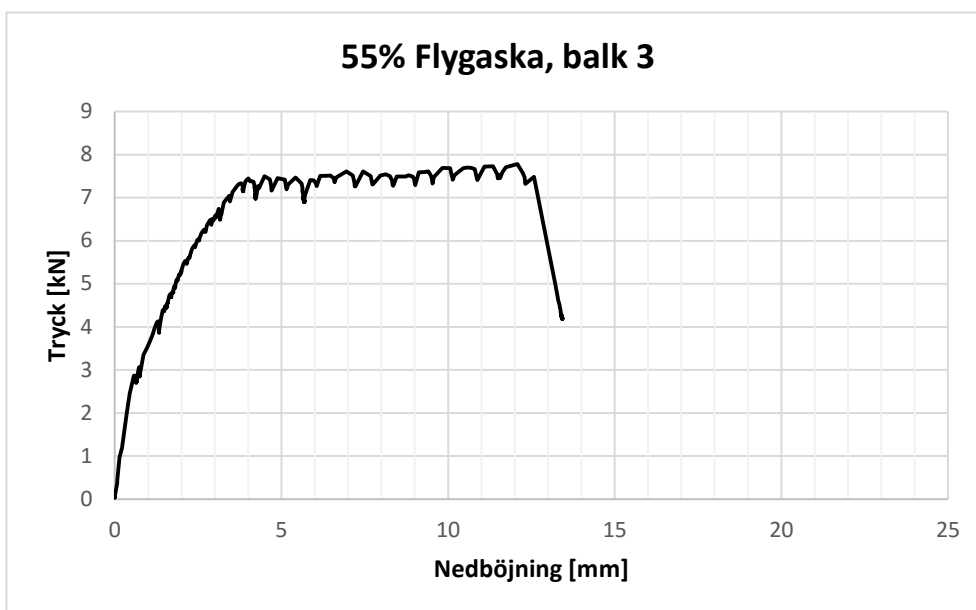
55 vol.% Flygaska



Figur 80. Tryck-nedböjningsdiagram av 55 vol.% flygaska balk 1.



Figur 81. Tryck-nedböjningsdiagram av 55 vol.% flygaska balk 2.



Figur 82. Tryck-nedböjningsdiagram av 55 vol.% flygaska balk 3.

Bilaga 6: Bøjstyvhet och bøjdraghållfasthet

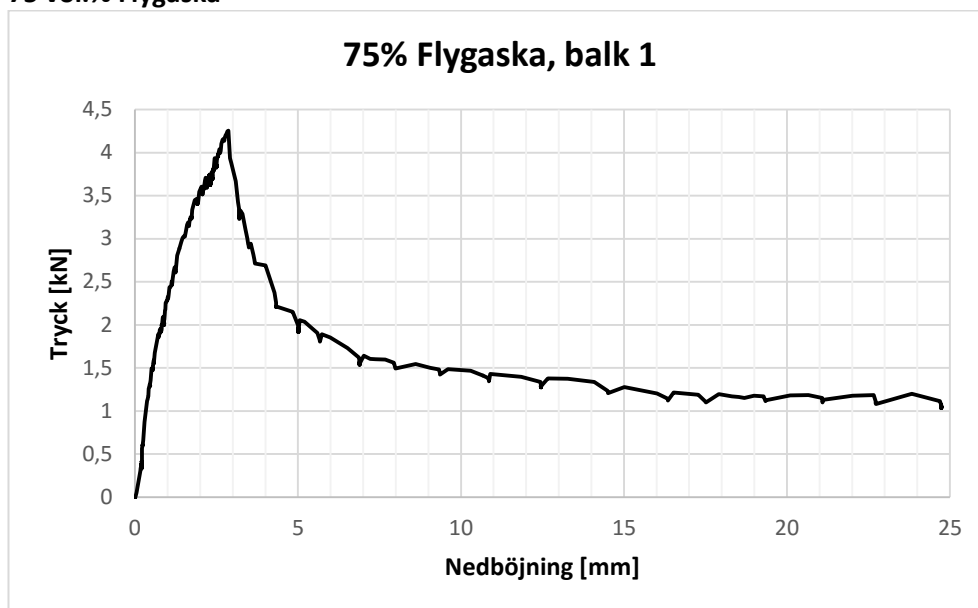
Tabell 51. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedböjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Bøjstyvheten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P1 [kN]	v1 [mm]	P2 [kN]	v2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	2,23	0,47	1,40	0,31	8,82	70,56
2	2,00	0,21	1,64	0,13	7,59	60,76
3	2,45	0,44	2,01	0,36	8,17	65,37
Medel					8,20	65,56
Std					0,50	4,00

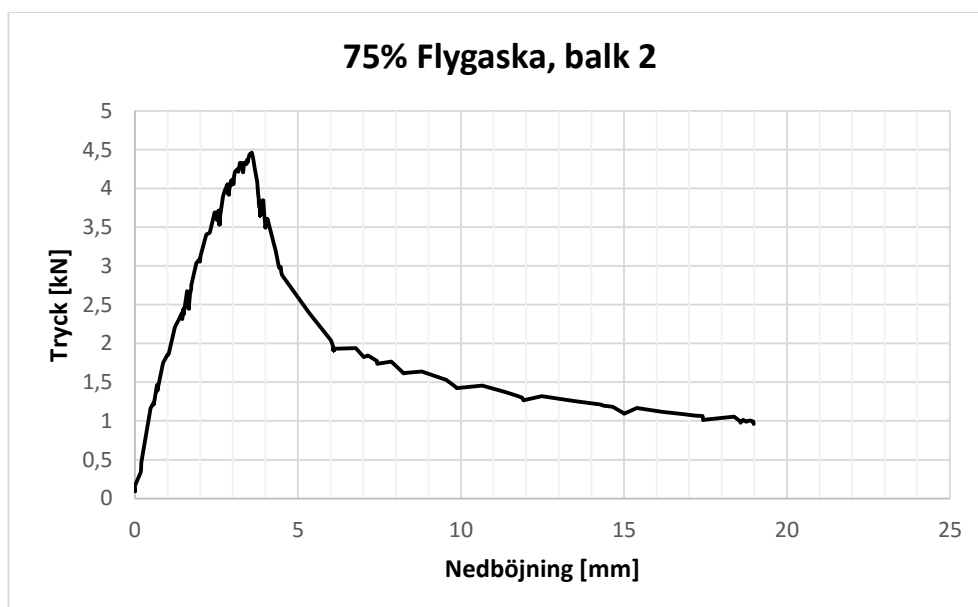
Tabell 52. Sprickmoment och bøjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärde och standardavvikelsen

Balk	Sprickmoment [kNm]	Bøjdraghållfasthet [MPa]
1	0,58	3,61
2	0,57	3,55
3	0,60	3,77
Medel		3,64
Std		0,09

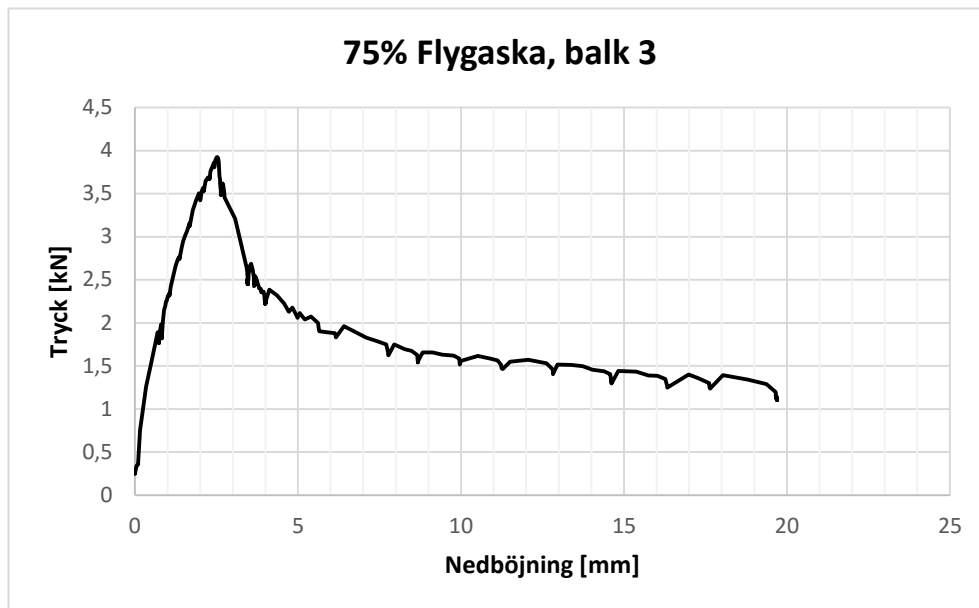
75 vol.% Flygaska



Figur 83. Tryck-nedbøjningsdiagram av 75 vol.% flygaska balk 1.



Figur 84. . Tryck-nedbøjningsdiagram av 75 vol.% flygaska balk 2.



Figur 85. . Tryck-nedböjningsdiagram av 75 vol.% flygaska balk 3.

Bilaga 6: Bøjstyvhet och bøjdraghållfasthet

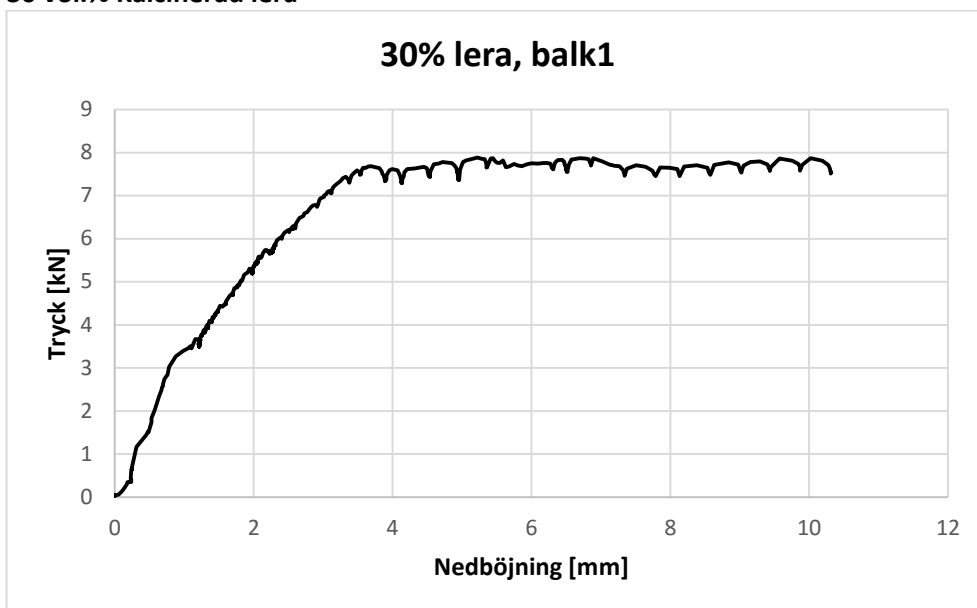
Tabell 53. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedböjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Bøjstyvheten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P_1 [kN]	v_1 [mm]	P_2 [kN]	v_2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	1,26	0,42	0,87	0,29	4,74	37,89
2	1,17	0,48	0,36	0,18	4,40	35,21
3	1,26	0,49	0,75	0,15	3,66	29,26
Medel					4,27	34,12
Std					0,45	3,61

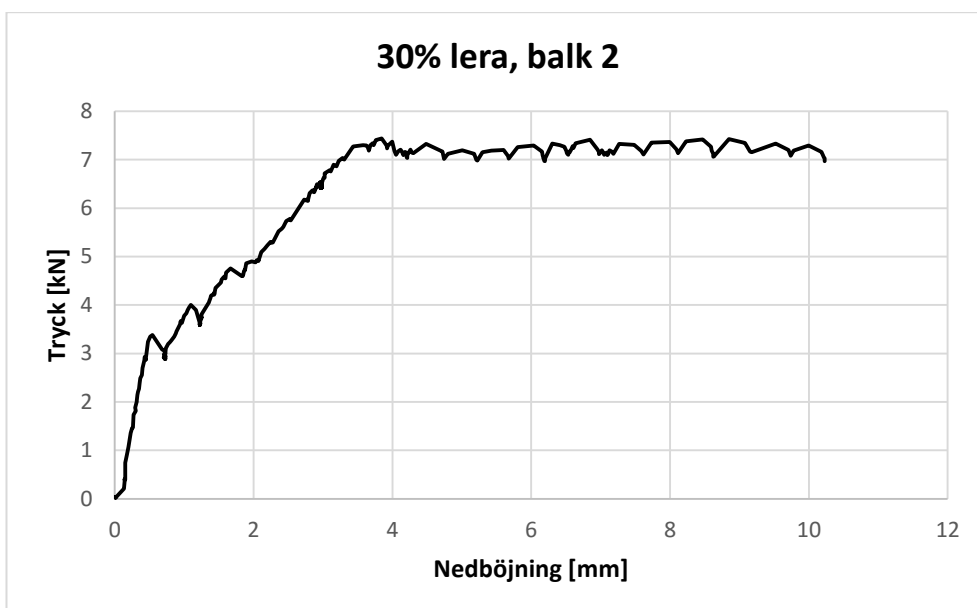
Tabell 54. Sprickmoment och bøjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärde och standardavvikelsen.

Balk	Sprickmoment [kNm]	Bøjdraghållfasthet [MPa]
1	0,32	1,99
2	0,31	1,95
3	0,40	2,48
Medel		2,14
Std		0,24

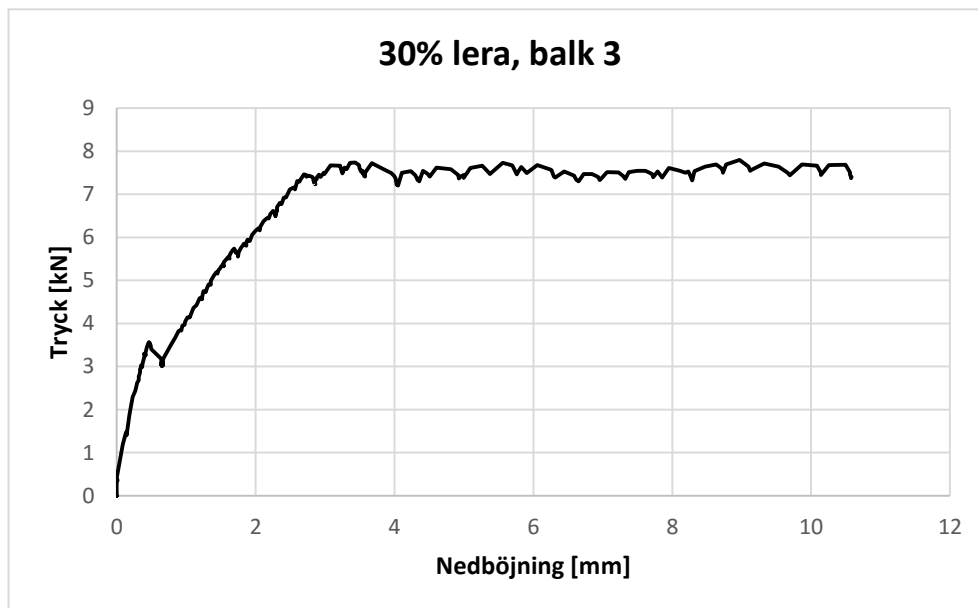
30 vol.% Kalcinerad lera



Figur 86. Tryck-nedbøjningsdiagram av 30 vol.% kalcinerad lera balk 1.



Figur 87. Tryck-nedbøjningsdiagram av 30 vol.% kalcinerad lera balk 2.



Figur 88. Tryck-nedböjningsdiagram av 30 vol.% kalcinerad lera balk 3.

Bilaga 6: Bøjstyvhet och böjdraghållfasthet

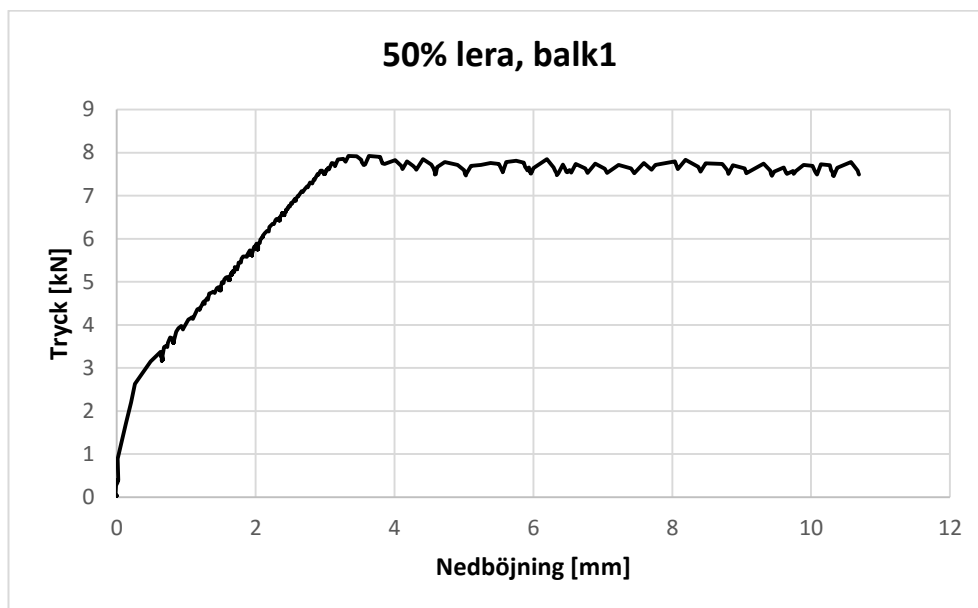
Tabell 55. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedböjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Bøjstyvheten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P_1 [kN]	v_1 [mm]	P_2 [kN]	v_2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	1,16	0,31	0,65	0,24	10,78	86,24
2	2,00	0,31	1,07	0,20	12,59	100,74
3	1,89	0,18	1,41	0,14	17,69	141,53
Medel					13,69	109,50
Std					2,93	23,41

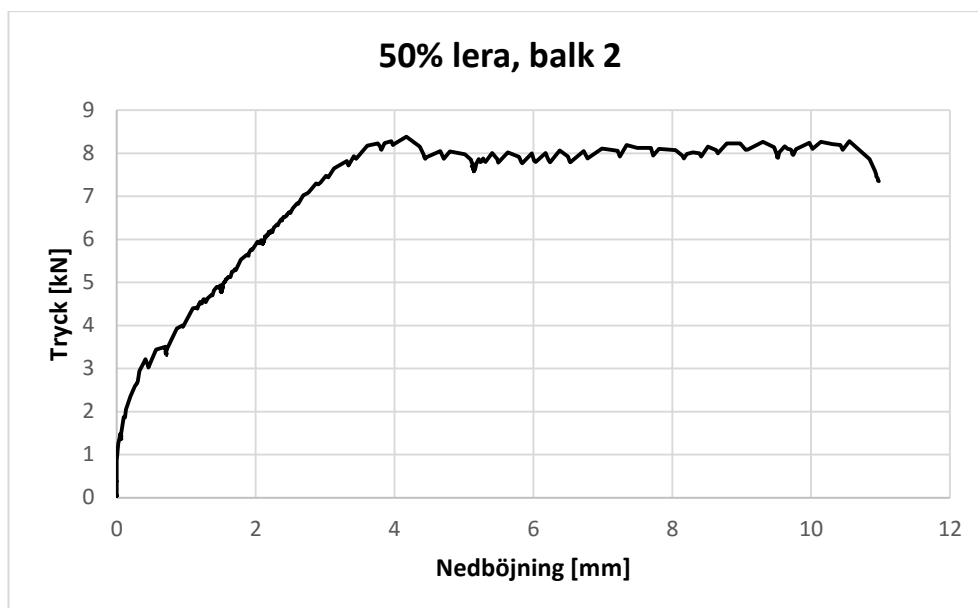
Tabell 56. Sprickmoment och böjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärdet och standardavvikelsen.

Balk	Sprickmoment [kNm]	Bøjdraghållfasthet [MPa]
1	0,78	4,85
2	0,71	4,44
3	0,75	4,69
Medel		4,66
Std		0,17

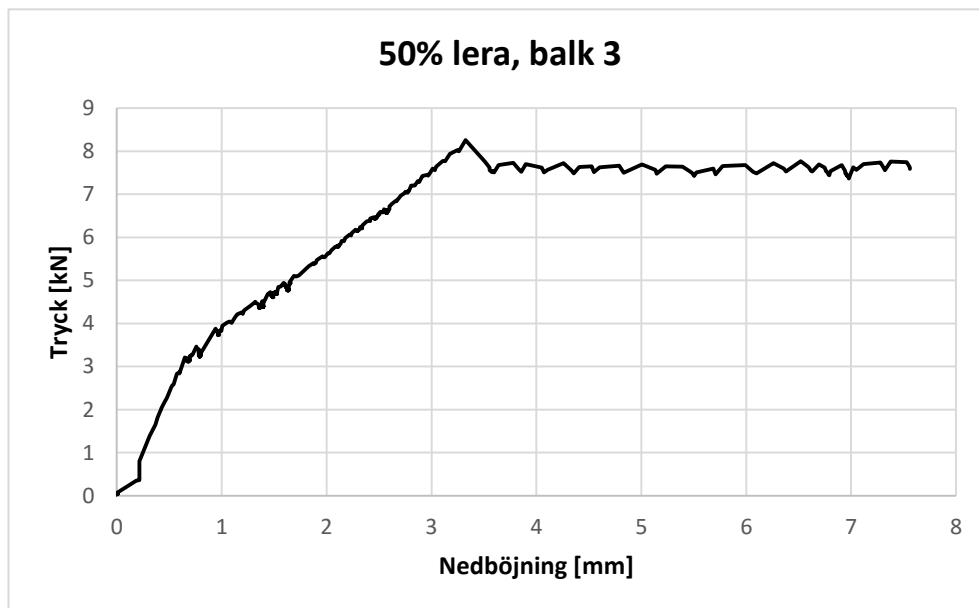
50 vol.% Kalcinerad lera



Figur 89. Tryck-nedbøjningsdiagram av 50 vol.% kalcinerad lera balk 1.



Figur 90. Tryck-nedbøjningsdiagram av 50 vol.% kalcinerad lera balk 2.



Figur 91. Tryck-nedböjningsdiagram av 50 vol.% kalcinerad lera balk 3.

Bilaga 6: Bøjstyhvet och bøjdraghållfasthet

Tabell 57. E är Elasticitetsmodulen som har räknats ut genom att ta ut lasterna P_1, P_2 och nedbøjningarna v_1, v_2 längs den linjära delen i diagrammen. Bøjstyhveten har därefter beräknats enligt 8.8. Medelvärde och standardavvikelsen redovisas också.

Balk	P_1 [kN]	v_1 [mm]	P_2 [kN]	v_2 [mm]	E [GPa]	EI [kNm ²]
1	1,71	0,13	0,89	0,01	11,07	88,52
2	1,87	0,10	1,35	0,05	19,10	152,82
3	1,82	0,39	1,39	0,31	9,17	73,40
Medel					13,11	104,91
Std					4,30	34,43

Tabell 58. Sprickmoment och bøjdraghållfasthet för respektive balk samt medelvärde och standardavvikelsen.

Balk	Sprickmoment [kNm]	Bøjdraghållfasthet [MPa]
1	0,71	4,43
2	0,68	4,28
3	0,68	4,26
Medel		4,32
Std		0,07