



CHALMERS



Undersökning och optimering av materialsammansättning för hållfasthetsutveckling i komprimerade jordblock

Kandidatarbete inom Civilingenjörsprogrammet, Samhällsbyggnadsteknik

ALICE BERG
KAJSA BRYNÉUS
DANTE IBARRA JUNGEFORS
JEDRZEJ SADEJ

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE INOM SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK 2026

**Undersökning och optimering av
materialsammansättning för
hållfasthetsutveckling i komprimerade jordblock**

ALICE BERG
KAJSA BRYNÉUS
DANTE IBARRA JUNGEFORS
JEDRZEJ SADEJ



CHALMERS

Institutionen För Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026

Undersökning och optimering av materialsammansättning för hållfasthetsutveckling
i komprimerade jordblock

ALICE BERG

KAJSA BRYNÉUS

DANTE IBARRA JUNGEFORS

JEDRZEJ SADEJ

© ALICE BERG, KAJSA BRYNÉUS, DANTE IBARRA JUNGEFORS, JEDRZEJ
SADEJ 2026.

Handledare: Bruno Oliveira Gonçalves, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik.
Shea Hagy, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik.

Examinator: Helen Jansson, Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik.

Kandidatarbete 2026

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Två av de komprimerade jordblock som skapats under projektet samt
maskinen Auram Press 3000 som använts för detta.

Skriven i L^AT_EX

Göteborg, Sverige 2026

Undersökning och optimering av materialsammansättning för hållfasthetsutveckling i komprimerade jordblock

ALICE BERG

KAJSA BRYNÉUS

DANTE IBARRA JUNGEFORS

JEDRZEJ SADEJ

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Detta arbete undersöker hur olika stabiliserande medel bidrar till den uppmätta tryckhållfastheten i komprimerade jordblock. Närmare bestämt studeras den optimala materialsammansättningen av sand och lera, samt halterna stabiliserande bindemedel, som krävs för att kunna tillverka ett jordblock vilket är tillräckligt motståndskraftigt för att användas vid byggnation. Bakgrunden till projektet är det jobb som Ingenjörer utan gränser och Build up Nepal gör med komprimerade jordblock i utvecklingslandet Nepal. I relation till blockets mekaniska egenskaper undersöks de stabiliserande bindemedeln i egenskap av ekonomisk och miljömässig hållbarhet.

Studien genomfördes genom att tillverka flera olika komprimerade jordblock med varierande uppsättning stabiliserande bindemedel, i detta avseende kalk och eller cement. Efter härdning uppmättes blockens tryckhållfasthet där målet är att överstiga 4 MPa, som är i linje med Build up Nepals riktvärden. Samtliga block presterade över detta riktvärde. Resultaten visar även tydligt på att en blandning av de två stabiliserande bindemedlen cement och kalk medför den högsta uppmätta hållfastheten av samtliga block. Studien tyder därmed på att kombinationen av stabiliserande bindemedel kan vara fördelaktigt ur hållfasthetsperspektivet och vid optimering av materialanvändning. Något som är relevant i resursbegränsade sammanhang, men även ur ett ekonomi- och hållbarhetsperspektiv.

Nyckelord: Komprimerade jordblock, komprimerade stabiliserade jordblock, komprimerade ostabiliserade jordblock, stabiliserande bindemedel, kalk, cement, tryckhållfasthet, Nepal.

Undersökning och optimering av materialsammansättning för hållfasthetsutveckling
i komprimerade jordblock

ALICE BERG

KAJSA BRYNÉUS

DANTE IBARRA JUNGEFORS

JEDRZEJ SADEJ

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

The purpose of this study is to investigate how stabilizing agents of different characters acts and contributes to enhance the compressive strength of compressed earth blocks. More specifically, the optimal blend of soil and the percentage of stabilizing agent is studied in order to produce a compressed earth block that is resilient enough to be used in construction work, mainly housing. The study stems from the previous work that Engineers without borders Sweden and Build up Nepal is doing in Nepal, regarding compressed earth blocks and housing construction. In relation to the blocks mechanical properties, the stabilizing agents economic and environmental sustainability is taken into account when evaluating the blocks performance.

The study was done through experiments where several different types of compressed earth blocks were made with a variety of stabilizing agents, in this specific case cement and or lime. The blocks where after its hardening time tested on their compressive strength, where the target was to exceed Build up Nepals reference value at 4 MPa. The entire set of blocks performed over said reference value. The results further indicate that a combination of cement and lime provides the highest compressive strength among all tested blocks. Therefore, the combination of the two stabilizing agents would be the most beneficial, both in terms of compressive strength and material optimization. Which is relevant in scenarios where resources are limited but also when sustainability and economy is taken into account.

Keywords: Compressed earth blocks, compressed stabilized earth blocks, compressed unstabilized earth blocks, stabilizing agent, lime, cement, compressive strength, Nepal.

Tackord

Till att börja med skulle vi vilja rikta ett stort tack till våra handledare Bruno Oliveira Gonçalves och Shea Hagy, för den tid, energi och det engagemang de har lagt ner på att hjälpa oss i vårt arbete. Bruno har agerat som ett värdefullt stöd för oss under den tid vi har spenderat i labsalen, där hans snabba assistans och praktiska vägledning har hjälpt oss när problem uppstått. Shea som med livligt intresse och stort engagemang har delat med sig av sina erfarenheter och den kunskap han besitter beträffande komprimerade jordblock och stampad jord. Det har väglett oss och gett oss förståelse att kunna utveckla vårt arbete. Tack för den uppmuntran ni har gett oss under hela processen.

Därefter vill vi särskilt tacka vår examiner Helen Johansson som har visat ett oerhört intresse för vårt arbete från början till slut. Helen har stöttat och rådgivit oss under hela arbetets process. Hon skapade redan från början goda förutsättningar för oss i gruppen att självständigt utveckla arbetet till vårt eget, vilket skapade ett tryggt klimat som väckte genuint intresse för arbetets syfte och tes.

Slutligen vill vi tacka Ingenjörer utan gränser, däribland Henrik Gustavsson och Raine Isaksson, som tillsammans med Chalmers tekniska högskola har varit delaktiga att utforma en första tes för arbetet. Även ett stort tack till Aavash Shrestha från Build up Nepal. Tack för att ni har gett oss en inblick i arbetet med komprimerade jordblock på olika ställen i världen samt för att ni har varit behjälpliga i vårt arbete med att avgränsa och definiera vårt fokusområde.

Utan de nämnda personernas bidrag hade det här arbetet inte varit möjligt att genomföra, och för det är vi mycket tacksamma.

Göteborg, Juni 2026

Alice Berg, Kajsa Brynéus, Dante Ibarra Jungefors, Jędrzej Sadej

Innehåll

Figurer	x
Tabeller	xiii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	3
1.3 Frågeställningar	4
1.4 Avgränsningar	4
1.5 Implementering av AI	4
2 Teoretisk bakgrund	5
2.1 Komprimerade jordblock	5
2.2 Cement	5
2.3 Kalk	7
2.4 Lera	8
2.5 Tryckhållfasthet	9
2.6 Skrymdensitet	9
3 Material & Förstudie	10
3.1 Material till komprimerade jordblock	10
3.1.1 Cement	10
3.1.2 Släckt kalk	10
3.1.3 Sand	11
3.1.4 Lera	11
3.1.5 Vatten	11
3.2 Förstudie	12
3.2.1 Fraktionstest	12
3.2.2 Undersökning av materialblandning	13
3.2.3 Utformning av receptmixar	13
4 Metod	16
4.1 Auram Press 3000	16
4.2 Tillverkning av komprimerade jordblock	16
4.3 Framställning av resultat & Toni Teknik NORM	18
5 Resultat & Diskussion	19
5.1 Observationer & felkällor	26
6 Slutsats	29
6.1 Bemötande av arbetets frågeställningar	29
6.2 Rekommendationer & framtida arbete	30
Bibliography	31

A	Appendix Bilder	I
B	Appendix Resultat	XI
B.1	Prov A1	XII
B.2	Prov A2	XIV
B.3	Prov A3	XVI
B.4	Prov B1	XVIII
B.5	Prov B2	XX
B.6	Prov B3	XXII
B.7	Prov C1	XXIV
B.8	Prov C2	XXVI
B.9	Prov C3	XXVIII
B.10	Prov D	XXX

Figurer

1.1	Exempel på utformningen av ett ICSEB i användning inom Build up Nepal med genomgående hål för armering. Bild erhållen från A. Shrestha, representant för Build up Nepal (personlig kommunikation, apr, 2026).	2
3.1	Torkningsprocesses för leran och den slutgiltiga fraktionen på leran.	11
3.2	Studie av fraktionssammansättningen med hjälp av jar-test för lera respektive sand.	12
3.3	Resultaten av förstudien med val om vilken ostabiliserad jordblandning som bör väljas till slutliga laborationsförsök av komprimerade jordblock.	13
3.4	Översikt över projektets laborationsstrategi som innefattar delkategorier A till D med underliggande recept exempelvis A1-A3 samt tillkommande varierande faktor för de olika blocken.	14
4.1	Auram Press 3000, maskinen som används vid pressning av jordblocken.	16
4.2	Tillverkningsprocessen i fyra olika steg.	17
4.3	Förklaring av blockens dimensioner som redovisas i resultatet.	18
4.4	Bilder på maskinen Toni Technik NORM som användes vid utförandet av tryckhållfasthetstest.	18
5.1	Resultatet över block A1.1 i tre bilder. Blocket har cement som stabiliserande bindemedel där andelen är 5%.	19
5.2	Resultatet på medelvärde över tryckhållfasthet för de olika blockserierna presenterat i ett stapeldiagram. Stabiliserande bindemedel för blockserie A är cement, blockserie B, kalk och cement, blockserie C, kalk och blockserie D är ostabiliserat.	22
5.3	Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm ² vilket även är MPa.	24
5.4	Tre bilder över olika block efter tryckhållfasthetstest, visar hur blocken spruckit där dessa tre bilder representerar alla blocken eftersom inga block skiljde sig från dessa sprickbildningar.	24
5.5	Relationen mellan uppmätt skrymdensitet och tryckhållfasthet för samtliga block. En ökande trend i tryckhållfasthet kan ses för ökande skrymdensitet. Blockserie A, B och C innehåller stabiliserande bindemedel, medan blockserie D är ostabiliserad.	25
5.6	Exempel på blockens lutning, se ovensida, på grund av pressplåtarnas något felaktiga inställning.	27
A.1	Block A1.1 vars stabiliserande bindemedel är 5% cement.	I
A.2	Block A1.2 vars stabiliserande bindemedel är 5% cement.	I
A.3	Block A1.3 vars stabiliserande bindemedel är 5% cement.	I
A.4	Block A2.1 vars stabiliserande bindemedel är 6% cement.	II
A.5	Block A2.2 vars stabiliserande bindemedel är 6% cement.	II

A.6	Block A2.3 vars stabiliserande bindemedel är 6% cement.	II
A.7	Block A3.1 vars stabiliserande bindemedel är 7% cement.	III
A.8	Block A3.2 vars stabiliserande bindemedel är 7% cement.	III
A.9	Block A3.3 vars stabiliserande bindemedel är 7% cement.	III
A.10	Block B1.1 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 2% kalk.	IV
A.11	Block B1.2 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 2% kalk.	IV
A.12	Block B1.3 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 2% kalk.	IV
A.13	Block B2.1 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 4% kalk.	V
A.14	Block B2.2 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 4% kalk.	V
A.15	Block B2.3 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 4% kalk.	V
A.16	Block B3.1 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 6% kalk.	VI
A.17	Block B3.2 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 6% kalk.	VI
A.18	Block B3.3 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 6% kalk.	VI
A.19	Block C1.1 vars stabiliserande bindemedel är 6% kalk.	VII
A.20	Block C1.2 vars stabiliserande bindemedel är 6% kalk.	VII
A.21	Block C1.3 vars stabiliserande bindemedel är 6% kalk.	VII
A.22	Block C2.1 vars stabiliserande bindemedel är 8% kalk.	VIII
A.23	Block C2.2 vars stabiliserande bindemedel är 8% kalk.	VIII
A.24	Block C2.3 vars stabiliserande bindemedel är 8% kalk.	VIII
A.25	Block C3.1 vars stabiliserande bindemedel är 10% kalk.	IX
A.26	Block C3.2 vars stabiliserande bindemedel är 10% kalk.	IX
A.27	Block C3.3 vars stabiliserande bindemedel är 10% kalk.	IX
A.28	Block D1.1. Blocket innehåller endast sand och lera, ej något stabiliserande bindemedel.	X
A.29	Block D1.2. Blocket innehåller endast sand och lera, ej något stabiliserande bindemedel.	X
A.30	Block D1.3. Blocket innehåller endast sand och lera, ej något stabiliserande bindemedel.	X
B.1	Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm ² vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.	XIII
B.2	Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm ² vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.	XV
B.3	Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm ² vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.	XVII
B.4	Hållfasthetstest resultat för prov B1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm ² vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.	XIX
B.5	Hållfasthetstest resultat för prov B2 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm ² vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.	XXI

- B.6 Hållfasthetstest resultat för prov B3 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.XXIII
- B.7 Hållfasthetstest resultat för prov C1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.XXV
- B.8 Hållfasthetstest resultat för prov C2 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.XXVII
- B.9 Hållfasthetstest resultat för prov C3 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.XXIX
- B.10 Hållfasthetstest resultat för prov D1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.XXXI

Tabeller

2.1	Huvudfaser i Portlandcement och deras egenskaper	6
3.1	Receptmix för block A1–A3, cement som stabiliserande bindemedel. .	15
3.2	Receptmix för block B1–B3, cement och kalk som stabiliserande bindemedel.	15
3.3	Receptmix för block C1–C3, kalk som stabiliserande bindemedel. . . .	15
3.4	Receptmix för block D utan stabiliserande bindemedel.	15
5.1	Testdata för blockserie A (Cementserien), avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori A har cement som stabiliserande bindemedel med en ökning med fem, sex och sju procent för respektive underkategori.	20
5.2	Testdata för blockserie B (Kombinationsserien), avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori B har cement och kalk som stabiliserande bindemedel där kalk har en ökning med två, fyra och sex procent för respektive underkategori.	20
5.3	Testdata för blockserie C (Kalkserien), avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori C har kalk som stabiliserande bindemedel med en ökning med sex, åtta och tio procent för respektive underkategori.	21
5.4	Testdata för blockserie D, avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori D innehåller konstanta mängder jordmaterial, 65 % sand, 35% lera och 11.13% vatten.	21
5.5	Medelvärde av samtliga blocks tryckhållfasthet.	21
5.6	Sammanställning av ekonomi och klimatpåverkan för stabiliserande bindemedlen cement och släckt kalk.	25

1. Inledning

Kapitel ett innehåller arbetets bakgrund, syfte och problemformulering. Inledningen lyfter rapportens mål och presenterar komprimerade jordblock som byggnadsmaterial.

1.1 Bakgrund

Tillgång till ett tryggt och beständigt boende är ett av människans mest grundläggande behov [1]. I många delar av världen råder dock en omfattande bostadsbrist. Enligt internationella uppskattningar saknar över en miljard människor i världen tillgång till bostäder med god levnadsstandard [2], vilket särskilt drabbar låg- och medelinkomstländer där befolkningstillväxten är hög och urbaniseringen sker snabbt [3]. I dessa länder utgör kostnaden för konventionella byggmaterial, såsom cement, stål och brända tegelstenar, ett betydande hinder för utvecklingen av prisvärda bostäder, då byggkostnaderna i många fall överstiger hushållens ekonomiska kapacitet [4] [5]. Sammantaget innebär detta att stora delar av befolkningen saknar tillgång till säkra och långsiktiga hem. Behovet av kostnadseffektiva och tillgängliga byggmetoder är därför stort och förväntas öka i takt med den globala befolkningstillväxten [1].

Historiskt har många samhällen använt lokalt tillgängliga material för byggnation. Jordbaserade byggmetoder har använts i stora delar av världen under hundratals år, däribland *rammed earth*, där fuktig jord stampas i lager inuti en form, och *adobe block*, som är soltorkade lerstenar formade för hand eller i form [6]. Dessa metoder bygger på att lokalt jordmaterial används direkt i byggprocessen utan behov av industriellt producerade material. I takt med att industrialiserade byggnadsmaterial och standardiserade byggmetoder utvecklades, särskilt från slutet av 1800-talet, minskade användningen av jordbaserade byggtekniker [7] [8].

Under senare år har intresset för jordbaserade byggmetoder åter ökat. En vidareutvecklad variant av dessa metoder är så kallade komprimerade jordblock, eller på engelska *Compressed Earth Blocks* (CEB) [9]. Dessa block tillverkas genom att en jordblandning mekaniskt komprimeras i en press, ofta med tillsats av ett stabiliserande bindemedel såsom cement eller kalk. Genom komprimeringen minskar porvolymen i materialet och densiteten ökar, vilket resulterar i förbättrad tryckhållfasthet [10]. När ett stabiliserande bindemedel tillsätts benämns blocken ofta *Compressed Stabilized Earth Blocks* (CSEB). En vidareutveckling av tekniken är *Interlocking Compressed Stabilized Earth Blocks* (ICSEB), där blocken är självlåsande och kan muras med mycket lite eller inget bruk. Ett exempel på en sådan utformning syns i figur 1.1 nedan.



Figur 1.1: Exempel på utformningen av ett ICSEB i användning inom Build up Nepal med genomgående hål för armering. Bild erhållen från A. Shrestha, representant för Build up Nepal (personlig kommunikation, apr, 2026).

En viktig utmaning vid användning av jordbaserade byggmaterial är att jordens sammansättning varierar beroende på geografisk plats. Variationer i andelen av fraktionerna sand, silt och lera kan påverka blockens hållfasthet, krympning och vattenbeständighet [11]. För att uppnå mer förutsägbara och tillförlitliga materialegenskaper stabiliseras jordblandningen därför ofta genom tillsats av bindemedel som exempelvis cement [12]. Vid tillsats av bindemedel ökar materialets kohesion samtidigt som permeabiliteten minskar och den strukturella hållfastheten förbättras, vilket resulterar i ett mer beständigt och vattenresistent byggmaterial jämfört med ostabiliserade jordblock [13]. De kemiska reaktioner som ligger bakom dessa egenskaper beskrivs i avsnitt 2.2 och 2.3.

Tekniken har också uppmärksamats i internationella utvecklingsprojekt där målet är att möjliggöra kostnadseffektivt och lokalt anpassat bostadsbyggande [14]. Ett exempel är Ingenjörer utan gränser, som i tidigare arbete har samarbetat med organisationen Build up Nepal (BUN) kring just ICSEBs i Nepal [15]. Projektet har sitt ursprung i återuppbyggnadsarbetet efter de omfattande jordbävningarna i Nepal år 2015, vilka resulterade i att hundratusentals människor förlorade sina hem.

I dagsläget används cement i BUN:s blockproduktion [15]. Cement bidrar till relativt hög tryckhållfasthet redan efter kort härdningstid [16], vilket är en viktig egenskap ur byggnationssynpunkt. Inom BUN tillämpas ett riktmärke om cirka 4 MPa som minsta tryckhållfasthet för att säkerställa tillräcklig bärförmåga i konstruktioner (A. Shrestha, Build up Nepal, personlig kommunikation, feb. 2026.). Detta värde utgör därmed en viktig referenspunkt vid utvärdering av alternativa materialsammansättningar i detta arbete.

Samtidigt är cement förenat med både höga kostnader och betydande klimatpåverkan. Tillverkningen av cement kräver stora mängder energi och ger upphov till omfattande utsläpp av koldioxid, vilket gör materialet till en betydande källa till utsläpp inom byggsektorn. Cementindustrin uppskattas stå för cirka 5–8 procent av de globala utsläppen av koldioxid [17]. Detta beror på den stora mängd cement som tillverkas årligen. Därför undersöks i detta arbete möjligheten att minska cementhalten i blocken, både av ekonomiska och miljömässiga skäl. Ett potentiellt alternativ är användning av släckt kalk. Produktion av kalk sker generellt vid lägre bränningstemperaturer, cirka 900–1000 °C, till skillnad från produktionen av Portlandcementklinker som bränns vid cirka 1450 °C. Detta kan vara en bidragande faktor till skillnader i materialens klimatpåverkan [18][19]. Hållfasthetsutvecklingen i kalkbaserade material sker dock ofta långsammare än i cementbaserade material [16].

Därmed innebär valet av stabiliserande bindemedel en avvägning mellan hållfasthet, kostnad och klimatpåverkan. Det finns därför ett behov av att undersöka hur olika bindemedel och materialsammansättningar påverkar egenskaperna hos komprimerade jordblock. Ökad kunskap inom detta område kan bidra till utvecklingen av mer hållbara och kostnadseffektiva byggnadsblock. Något är särskilt relevant i projekt som BUN, där lokala material och begränsade resurser ställer höga krav på materialens effektivitet och tillförlitlighet.

1.2 Syfte

Syftet med detta kandidatarbete är att experimentellt undersöka hur olika bindemedel påverkar egenskaperna hos komprimerade jordblock, varav den huvudsakliga egenskapen som kontrolleras är blockens uppmätta tryckhållfasthet. I kombination med blockens mekaniska egenskaper undersöks de ingående stabiliserande bindemedlens hållbarhetsgrad och kostnad där målet är att ta fram ett komprimerat jordblock som håller sig inom kostnadsramen för ett utvecklingsland såsom Nepal, samtidigt som det bidrar till en sänkt miljöpåverkan och uppfyller standarden för ett motståndskraftigt komprimerat jordblock.

Studien fokuserar primärt på en laboratorieundersökning av fyra typer av byggnadsblock; cementstabiliserade block, byggnadsblock med släckt kalk som stabiliserande bindemedel, block med en kombination av cement och hydrauliskt kalk samt block helt utan stabiliserande bindemedel. Det sistnämnda blocket innehåller följaktligen enbart jordblandning och vatten. Sammanfattningsvis är målet med denna studie att bidra med kunskap om hur val av det stabiliserande bindemedlet påverkar byggnadsblockens mekaniska egenskaper samt kostnad och miljöpåverkan. Undersökningen kommer att ske under kontrollerade laboratorieförhållanden, med särskilt fokus på tillämpningar i situationer likt byggprojekt som BUN.

1.3 Frågeställningar

Med bakgrund i kandidatarbets syfte har följande frågeställningar formulerats. Frågeställningarna som arbetet har för avsikt att svara på lyder:

1. *Hur påverkar andelen och val av stabiliserande bindemedel den uppmätta tryckhållfastheten hos komprimerade jordblock?*
2. *Vilka materialsammansättningar uppnår en tryckhållfasthet över 4 MPa efter definierad härdningstid på 28 dagar?*
3. *Vad är den ungefärligt uppmätta miljöpåverkan och kostnad för respektive stabiliserande bindemedel?*

1.4 Avgränsningar

För att säkerställa ett genomförbart kandidatprojekt inom den givna tids- och resursramen har ett antal avgränsningar gjorts för projektet. Undersökningen av potentiella materialsammansättningar av stabiliserande bindemedel i de komprimerade jordblocken begränsas till en litteraturstudie. Varken fältstudier eller kvalitetskontroller av nuvarande produktion i Nepal ingår i arbetet.

Vidare avgränsas studien till laboratorietester av byggnadsblock. Dessa block testas under kontrollerade förhållanden. Eventuella variationer som kan uppstå vid en storskalig produktion och vid produktion på plats i faktiska byggprojekt behandlas inte. Möjligheten för att utsätta respektive byggnadsblock fullt representativt för de klimatförhållanden vi finner i ett utomhusklimat som i Nepal begränsas av laboratoriets kapacitet.

Avseende stabiliserande bindemedel i byggnadsblocken avgränsas i denna studie till användning av cement, släckt kalk som substitut till cement samt en kombination av dessa två. Även ostabiliserade block ingår i undersökningen. Andra potentiella stabiliserande bindemedel så som bitumen och flygaska inkluderas inte.

1.5 Implementering av AI

Till detta arbete har AI använts som ett hjälpmedel. Dem AI-verktyg som använts är OpenAIs ChatGPT, Anthropics Claude AI samt Googles Google Gemini. Verktygen har främst använts för att söka igenom efter rapporter efter specifik information, vilket har effektiviserat arbetet av att läsa igenom mycket text och hitta det som eftersökts. Därtill har AI varit en bra resurs för att felsöka i arbetes Latex kod. Verktygen har också använts för att hitta synonymer till ord och omformulering av meningar som redan skrivits i arbetet, för att kunna skapa en mer logisk och lättläst rapport.

2. Teoretisk bakgrund

Under kapitel två lyfts den teoretiska bakgrunden som ligger till stöd för projektet. De ingående materialen som används för arbetes laborativa del lyfts upp samt de tester som har utförts.

2.1 Komprimerade jordblock

Komprimerade jordblock representerar en teknisk vidareutveckling av traditionella jordbaserade byggmetoder, där mekanisk komprimering ersätter manuell formning. Pressningen ger blocken en jämnare form och högre densitet än vad som är möjligt vid handformning, vilket leder till förbättrad hållfasthet [20]. Tillverkningen kräver relativt enkel utrustning och bygger i stor utsträckning på manuellt arbete, vilket gör tekniken tillgänglig i regioner där kapital och industriell infrastruktur är begränsad [21]. En ytterligare fördel är att råmaterialet, jord, i många fall finns tillgängligt direkt på eller nära byggplatsen, vilket minskar behovet av kostsamma transporter och importerade material [22].

Däremot påverkas blockens egenskaper i hög grad av jordens sammansättning och fördelningen mellan sand, silt och lera. En välgraderad jord ger tätare packning och därmed högre densitet och tryckhållfasthet [23]. Vattenhalten vid pressning måste också hållas inom ett optimalt intervall, ett överskott försämrar hållfastheten medan ett underskott försvårar kompakteringen [24]. Eftersom jordmaterialets sammansättning varierar geografiskt behöver blockens prestanda ofta verifieras genom lokal testning [25].

För att förbättra materialegenskaperna hos blocken tillsätts ofta ett stabiliserande bindemedel som cement eller kalk. Detta ökar tryckhållfastheten samt förbättrar blockens motståndskraft mot vatten och erosion [26]. De kemiska processer som sker vid tillsats av respektive bindemedel behandlas i avsnitt 2.2 och 2.3.

Eftersom CSEB används i bärande konstruktioner finns krav på att blocken uppfyller fastställda tekniska egenskaper. I Nepal anges i NBC 203:2015 en minsta tryckhållfasthet på 3,5 MPa [27]. Inom BUN tillämpas ett riktvärde om 4 MPa, vilket utgör referenspunkten vid utvärdering av materialsammansättningarna i detta arbete.

2.2 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel där främsta användningsområde är idag för att binda samman partiklar i byggnadsmaterial [28]. Det vanligaste cementet är Portland cement, vilket huvudsakligen består av kalciumbaserade föreningar. För att förstå cementets effekt på byggnadsmaterial likt komprimerade jordblock är det

viktigt att betrakta de kemiska reaktioner som sker vid kontakt med vatten. Detta kallas hydratisering. Cement består huvudsakligen av fyra klinkerfaser: Alit (C_3S), Belit (C_2S), Aluminatfas (C_3A) och Ferritfas (C_4AF) [29]. Av dessa är Alit och Belit de faser som har störst bidrag till cementets strukturella integritet, vilket visas i tabell 2.1[28]. När vattnet tillsätts i jordblandningen så reagerar aliten. Detta visas i ekvation 2.1.



Tabell 2.1: Huvudfaser i Portlandcement och deras egenskaper .

Beteckning	Kemiskt namn	Funktion i härdningsprocessen
C_3S	Trikalciumsilikat	Tidig hållfasthet
C_2S	Dikalciumsilikat	Långsiktig hållfasthet (>28 dygn)
C_3A	Trikalciumaluminat	Snabb reaktion och hög värmeutveckling
C_4AF	Tetrakalciumaluminiumferrit	Bidrar främst till cementets färg

Denna reaktion resulterar i skapandet av kalciumsilikathydrater (C-S-H) och kalciumhydroxid (CH). C-S-H fungerar som den huvudsakliga bindande fasen i cement och bidrar till att binda samman jordpartiklarna i blocket. Just i fallet för komprimerade jordblock är cement avgörande, då C-S-H-gelen kan bidra till att fylla ut porer och minska lerans tendens att svälla vid fukt [30]. Samtidigt så bidrar kalciumhydroxid till att höja jordblandningens pH-värde. Detta är något som över tid kan initiera sekundära reaktioner med jordens mineraler och i slutändan ytterligare stärka jordblockens hållfasthet

Hydratiseringsprocessen sker över tid och det leder till att materialet successivt härdar, vilket därmed leder till ökad hållfasthet [28]. Cement-gelen bildar även en sammanhängande struktur mellan partiklar som förbättrar materialets egenskaper. Detta gör det lämpligt som ett stabiliserande bindemedel i byggnadsmaterial som exempelvis jordblock. I det stabiliserade jordblock detta arbete behandlar bidrar cement till en ökad kohesion mellan jordpartiklarn och förbättrar därmed tryckhållfastheten.

För produktion av cement krävs kalksten. Stenen bryts ned genom sprängning, som sedan krossas och mals till ett råmjöl. Detta råmjöl upphettas i en råugn som når en temperatur på cirka 1450 °C, vilket leder till kemiska reaktioner där cementklinker bildas. Klinkern kan sedan kylas ner och mals tillsammans med en mindre mängd gips för att skapa cement [19]. Detta visar på de energikrävande och betydande miljöpåverkan cementproduktionen har. Något som kan uttryckas genom dess globala uppvärmningspotential (GWP). Det cement som används i detta arbetes tester har ett GWP-värde till 0,569kg CO₂-ekv per kg cement [31]. Cementet har dessutom ett antaget inköpspris på 7 kr/kg (Muntlig kommunikation, B. Oliveira Goncalves, Maj, 2026), vilket kommer vara av relevans vid jämförelse av de olika materialsammansättningarna ur ett ekonomiskt perspektiv.

2.3 Kalk

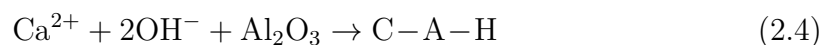
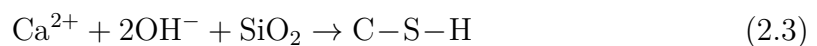
Kalk är ett av världens äldsta byggmaterial och har använts i murbruk, puts och konstruktioner i olika kulturer genom historien i tusentals år [32]. Råmaterialet för kalk är kalksten, en sedimentär bergart som bildats över miljontals år [18]. Kalksten består huvudsakligen av kalciumkarbonat från skal och skelett av marina organismer som sjunkit till havsbotten och blandats med oorganiskt sediment från vittring och erosion av landmassor. Beroende på mängden inblandade föroreningar såsom lera, silt och sand kan kalkstenen ge upphov till olika typer av kalk med varierande egenskaper, däribland hydraulisk kalk och ren byggekalk.

Produktionen av släckt kalk börjar med att kalksten (kalciumkarbonat, CaCO_3) bryts och sedan bränns i ugn vid cirka 900°C - 1000°C , varvid koldioxid avgår och osläckt kalk (kalciumoxid, CaO) bildas [18]. När vatten sedan tillsätts reagerar den osläckta kalken (kalciumoxid, CaO) i en kraftigt exoterm reaktion och bildar släckt kalk (kalciumdihydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)

De reaktioner som främst bidrar till hållfasthetsutvecklingen vid kalkstabilisering är de pozzolaniska reaktionerna. När kalk tillsätts till en lerig jord frigörs kalcium- och hydroxidjoner, vilket höjer pH-värdet [33]. Den ökade alkaliniteten medför att kiseldioxid och aluminiumoxid löses ut från lermineralen och reagerar med kalciumjoner och vatten, varvid kalciumsilikathydrater (C-S-H) och kalciumaluminathydrater (C-A-H) bildas. De pozzolaniska reaktionerna sker långsamt och kan ta månader till år [34]. Reaktionsprodukterna bidrar till en successiv ökning av materialets hållfasthet över tid [35]. Dessa reaktioner som äger rum redovisas simplificerat nedan genom ekvation 2.2 - 2.4 [33].

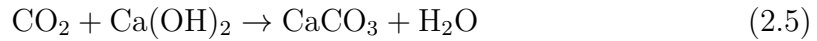


De frigjorda kalciumjonerna reagerar därefter med kiseldioxid (SiO_2 från lermineral) och aluminiumoxid (Al_2O_3 från lermineral) och bildar hydratiseringsprodukter enligt:



Vid tillsats av kalk till jord sker ett jonbyte där kalciumjoner ersätter svagare bundna katjoner på lerpartiklarnas yta. I det tidiga skedet av stabiliseringen leder detta till att jorden övergår till en mer smulig och granulär struktur, vilket förbättrar dess hanterbarhet och underlättar kompaktering. Samtidigt reduceras jordens tendens till svällning och krympning [36]. Därför är kalkstabilisering särskilt effektiv i leriga jordar, eftersom dessa kan innehålla reaktiva lermineral som möjliggör de pozzolaniska reaktionerna.

Under härdning reagerar släckt kalk även med koldioxid från atmosfären i en process kallad karbonatisering, varvid kalciumkarbonat återbildas [18]. Detta innebär att en del av den frigjorda koldioxiden återbinds när kalciumhydroxid reagerar med atmosfärisk koldioxid och återbildar kalciumkarbonat enligt ekvation 2.5 nedan.



Det bör dock noteras att inte alla jordar reagerar effektivt med kalk. Vissa lermineral är inaktiva och i en del jordar kan specifika mineral förhindra en permanent stabilisering [18]. Om en jord inte kan stabiliseras bör detta identifieras tidigt i testfasen, varefter jorden antingen modifieras eller ersätts med ett mer lämpligt material. I fall där jorden innehåller otillräckliga mängder reaktiva lermineral kan tillsats av pozzolaniska material möjliggöra eller förstärka de sekundära cementeringsreaktionerna genom att tillföra reaktiv kiseldioxid och aluminiumoxid [37]. Pozzolaniskt material är just ett kisel- eller aluminat-rikt material som i finfördelad form reagerar med kalciumhydroxid och vatten och bildar stabila föreningar med bindeegenskaper. Exempel på förekommande pozzolaner är vissa vulkaniska askor och krossade tegelmaterial [18].

Enligt tillverkaren Nordkalk uppgår koldioxidutsläppet för den typen av kalk som användes i studien till 1,02 kg CO₂-ekvivalenter per kg för släckt kalk tillverkat år 2024 [38]. Detta värde inkluderar inte karbonatiseringens bidrag, vilket innebär att det verkliga nettoutsläppet över materialets livscykel kan vara lägre. Utöver klimatpåverkan är kostnaden för kalk också av betydelse. Priset på släckt kalk påverkas av flera faktorer, däribland energikostnader vid kalcinering och den efterföljande produktionsprocessen [39]. Kalcinering är en energiintensiv process där bränsle- och energimix vid anläggningen påverkar både produktionskostnad och klimatpåverkan. Eftersom energipriser och andra produktionsfaktorer varierar geografiskt skiljer sig priset på kalk mellan olika länder. Kalken som användes i denna studie inköptes i Sverige genom Granngården till ett pris av 17,9 kr/kg [40].

2.4 Lera

Den mest aktiva fraktionen i en jordblandning är lera och det är på grund av dess partikelstorlek och mineralogiska uppbyggnad. Leran skiljer sig från sand och silt, som främst fungerar som ett mekaniskt skelett. Lermineralerna besitter en netto-negativ laddning som attraherar vattenmolekyler och joner [35]. Detta ger leran dess karakteristiska plasticitet, men innebär också att materialet brukar svälla vid fuktupptagning och krympa vid torkning [41]. Något som i sin tur kan leda till en sprickbildning i de komprimerade jordblocken.

När ett kalciumbaserat bindemedel, som kalk eller cement, tillsätts till en lerhaltig jord sker en omedelbar förändring av materialets egenskaper. Kalciumjoner (Ca²⁺) från bindemedlet ersätter mindre joner på lerpartiklarnas yta. Denna process benämns som ett katjonbyte [35]. Detta minskar lerans vattenbindande förmåga och

leder till flockulering, där de fina lerpartiklarna klumpar ihop sig till större aggregat. Denna process är avgörande för tillverkandet av komprimerade jordblock då den sänker jordens plasticitetsindex och gör den mer lätthanterlig under komprimering av blocken [35] [42].

Ur ett materialtekniskt perspektiv fungerar leran som en viktig reaktiv komponent i de komprimerade jordblocken. Cementen verkar genom att skapa bryggor av kalciumsilikathydrater mellan jordpartiklarna [42]. En av lerans roller blir här att fylla ut porerna i blocket, vilket ökar blockets densitet och minskar dess permeabilitet. Över tid sker även pozzolaniska reaktioner mellan stabiliseringsmedlets kalciumhydroxid och lerans kisel och aluminiummineraler. Detta resulterar i ytterligare cementerande produkter [35]. Det är dock av betydelse att lerhalten balanseras. En för hög lerhalt leder till att mängden cement eller kalk inte räcker till för att reagera med alla lerans partiklar. Det kan leda till minskad hållfasthet men också en ökad risk för erosion [42]

2.5 Tryckhållfasthet

Tryckhållfasthet är en av de viktigaste egenskaperna hos komprimerade jordblock, eftersom de i en konstruktion främst utsätts för trycklaster [10] [24]. För att kunna avgöra om ett block är lämpligt att använda i bärande väggar krävs därför att dess tryckhållfasthet bestäms genom provning.

Tryckprovning används som standardmetod för denna typ av byggnadsmaterial och innebär att materialet belastas successivt tills brott uppstår [24]. Den maximala lasten vid brott ger ett mått på materialets bärförmåga och används för att jämföra olika materialsammansättningar. Metoden är särskilt relevant för jordblock då deras hållfasthet kan variera beroende på tillverkning och andelen stabiliserande bindemedel. Tryckprovning blir därför ett verktyg för att utvärdera hur olika materialkombinationer presterar.

2.6 Skrymdensitet

Skrymdensitet är ett mått på materialets packningsgrad. Det definieras som förhållandet mellan massa och dess volym[43]. Det kan i denna studie användas som en indikator för jordblockens kvalitet, då en hög skrymdensitet innebär en mer kompakt struktur med färre porutrymmen.

Genom komprimering ökar skrymdensiteten, vilket reducerar luftfyllda hålrum och ökar den inre friktionen i materialet[43]. En högre densitet leder generellt till förbättrad tryckhållfasthet och lägre vattenabsorption, vilket gör blocken mer motståndskraftiga mot erosion [44]. Skrymdensiteten för varje block beräknas enligt ekvation 2.6, där ρ betecknar blockets skrymdensitet, m blockets massa och V blockets volym.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

3. Material & Förstudie

I detta kapitel presenteras först de ingående materialen i de komprimerade jordblocken. Därefter behandlas de förundersökningar som var relevanta att genomföra inför arbetets initiala laborationsdel, där olika receptmixar för de komprimerade jordblocken prövades.

3.1 Material till komprimerade jordblock

De rubriker som följer i avsnitt 3.1 beskriver de material som användes i de komprimerade jordblocken. Cement och släckt kalk användes i blocken som stabiliserande medel medan sand och lera utgjorde blockens jordblandning. Observera att sand och lera utgör 100% av blockens jordblandning. Andelen vatten, cement och släckt kalk beräknas sedan i procent utav jordblandningen med hjälp av ekvationer 3.1, 3.2 och 3.3.

3.1.1 Cement

För denna studie användes byggcement. Cementmängden för varje block valdes att beräknas med torr cementhalt enligt ekvation 3.1 [45] där recepten och andelen torr cementhalt redovisas i avsnitt 3.2.3. Cementhalten är angiven som w_{cement} , cementens vikt som m_{cement} och den totala vikten av torra beståndsdelar som m_{torr} . Detta innebär att cementvikten definieras utanför totala mängden torrvikt jordmaterial.

$$w_{\text{cement}} = \frac{m_{\text{cement}}}{m_{\text{torr}} + m_{\text{cement}}} \quad (3.1)$$

3.1.2 Släckt kalk

Kalken som användes i denna studie var släckt teknisk kalk, kalciumdihydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, av Nordkalk SL, tillverkad i Landskrona med kalksten från Gotland enligt standarden EN 459-2. Halten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uppgick till 91,5% och partikelfördelningen klassas som fin, med 97% av pulvret under 0,09 mm. Beräkningarna för andelen släckt kalkhalt sker likt beräkningen för cementhalten enligt ekvation 3.2 [45]. Detta innebär att kalkvikten definieras utanför totala mängden torrvikt jordmaterial.

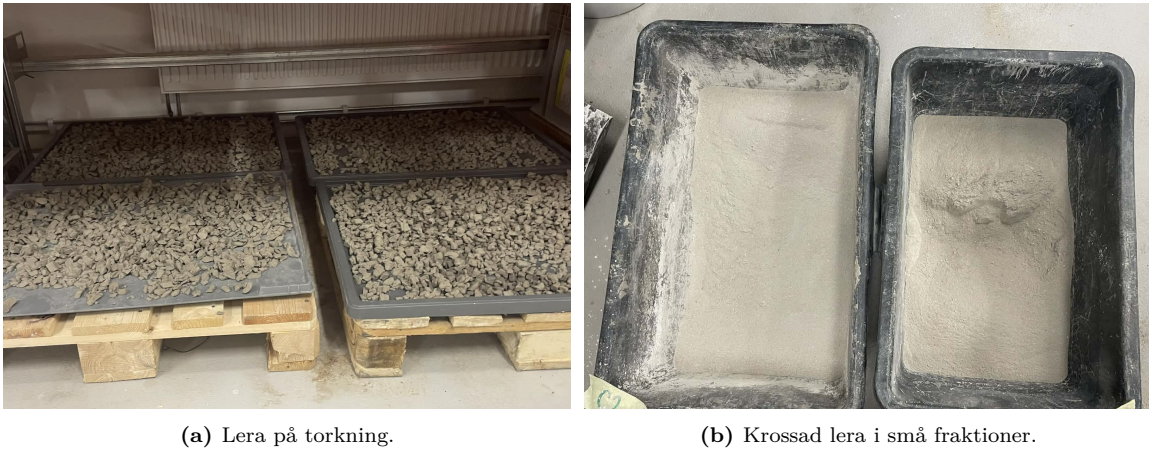
$$w_{\text{kalk}} = \frac{m_{\text{kalk}}}{m_{\text{torr}} + m_{\text{kalk}}} \quad (3.2)$$

3.1.3 Sand

Sanden som användes i projektet utgör fraktioner mellan 0-4 mm och utgör sorten naturgrus. Projektets förstudie visade även att sanden innehöll en andel silt av 0.04%, detta redovisas i avsnitt 3.2.1. Andelen sand som utgjorde jordblandningen i blocken var konstant för samtliga block.

3.1.4 Lera

Leran som användes under projektet är hämtad från Ängelholm i Skåne och köpt från Platskolan i Ängelholm [46]. Leran var fuktig vid leverans vilket gjorde blandningsprocessen krävande. För att förbättra blandningsförmågan och få ett bättre resultat torkades och krossades till mindre fraktioner innan de kunde användas i laborationen. Leran placerades på lastpallar ovanpå stora plastlock, där den fick lufttorka i cirka 7 dagar tills torr, för att sedan krossas till mindre fraktioner med hjälp av maskinen *JAW-CRUSHER RETSCH BB200*. I figur 3.1a syns hur leran torkades i labbsalen och figur 3.1b visar den torkade och krossade fraktionen av leran. Andelen lera som utgjorde jordblandningen i blocken var konstant för samtliga block.



(a) Lera på torkning.

(b) Krossad lera i små fraktioner.

Figur 3.1: Torkningsprocessen för leran och den slutgiltiga fraktionen på leran.

3.1.5 Vatten

Vattenhalten för blocken definierades enligt ekvation 3.3 [45] och redovisas senare i avsnitt 3.2.3 där den sammanställda vattenhalten för blocken blev 11.13%. Vattenhalten är angiven som w_{vatten} , vattnets vikt som m_{vatten} och den totala vikten av torra beståndsdelar som m_{torr} . Detta innebär att vattenvikten definieras utanför totala mängden torrvikt jordmaterial.

$$w_{\text{vatten}} = \frac{m_{\text{vatten}}}{m_{\text{torr}} + m_{\text{vatten}}} \quad (3.3)$$

3.2 Förstudie

Förstudien behandlar ett fraktionstest för att studera fraktionerna i lera och naturgruset som användes för att producera blocken. Därtill undersöks den optimala jordblandningen för jordblocken, varpå 9 olika receptmixar tas fram.

3.2.1 Fraktionstest

För att studera fraktionsinnehållet av lera och sand hos jordblandningen gjordes ett fraktionstest [13]. Vid utförandet av fraktionstestet fylldes en glasburk upp till hälften med det material som ska undersökas. Därefter fylldes glasburken upp med vatten och en droppe diskmedel adderades, varpå burken skakades tills allt material och vatten har blandats. Efter 24-48 timmar bildades det lager som visade andelen av de olika fraktionerna för materialet, resultat visas i figur 3.2a och 3.2b. I figur 3.2 visas, uppifrån och ner, vatten överst, under vattnet finare fraktioner och längst ner mot botten grövre fraktioner. Slutsatsen från bilderna kan ses i figur 3.2 där burk 3.2a med lera inte har någon större tydlig fraktionsskillnad och innehåller alltså bara lera. För burken med sand 3.2b användes tumstock för att konstatera det översta lagret till en andel av på 0.04% silt. Detta innebär att majoriteten av materialet i burken är sand.



(a) Resultat lera.

(b) Resultat sand.

Figur 3.2: Studie av fraktionssammansättningen med hjälp av jar-test för lera respektive sand.

3.2.2 Undersökning av materialblandning

För att kunna ge kvalitativa resultat till rapportens frågeställning gjordes först en förundersökning av den optimala materialsammansättningen för blocken. Detta gjordes genom en litteraturstudie, med rådgivning från sakkunnig inom området, Shea Hagy. Beslutet togs att först studera jordblandningen, det vill säga andelen sand, lera och vatten som utgör den huvudsakliga delen av blockens sammansättning. Första tillverkningssteget blev därav att identifiera proportionerna för de olika materialen, som skulle komma att vara kontinuerliga för samtliga block.

Laborativa försök gjordes i form av ett antal provblock med olika jordblandningar. Efter torkning utvärderades blocken för att konstatera vilken jordblandning som visade sig mest optimal för framtida laborationsförsök. Utvärderingen tog hänsyn till hur väl blocket pressades av maskinen, blockets utseende, hurvida blocket upplevdes sprött eller robust och slutligen om blocket höll enklare belastning. En optimal blandning skulle vara enkel att pressa, hantera och därtill prestera bra under ett balltest. Ett balltest används i tidigt blandningsskede för att utvärdera och kunna förbättra jordblandningen [18]. Balltest innefattar att man rullar en boll av blandningen, som man sedan släpps från axelhöjd i marken. Om bollen går sönder i två till fyra bitar indikerar det på en bra blandning av vatten och jordmaterial. I figurer 3.3a, 3.3b, 3.3c nedan visas tre olika testblock med olika mängder sand, lera respektive vattenhalt. Fler block än dessa tre skapades under undersökningen av jordblandning, men redovisas inte i figurer.



(a) Testblock 1 - 60% sand, 40% lera, 9% vattenhalt av jordblandningen.



(b) Testblock 2 - 60% sand, 40% lera, 8% vattenhalt av jordblandningen.



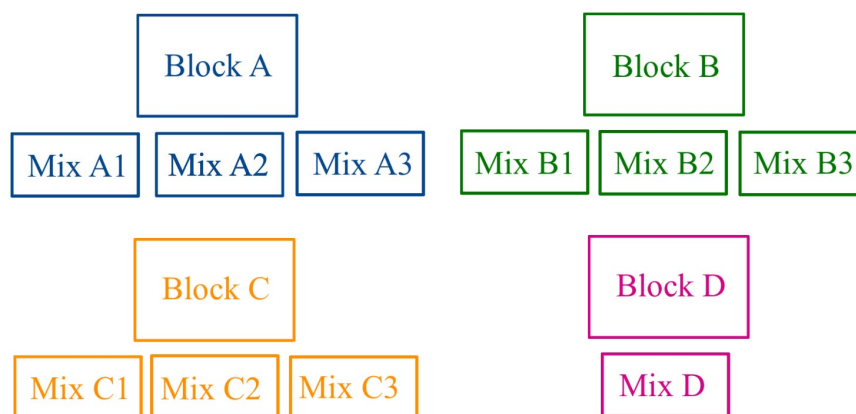
(c) Testblock 3 - 55% sand, 45% lera, 8% vattenhalt av jordblandningen.

Figur 3.3: Resultaten av förstudien med val om vilken ostabiliserad jordblandning som bör väljas till slutliga laborationsförsök av komprimerade jordblock.

3.2.3 Utformning av receptmixar

Undersökningen av provblocken påvisade att den mest optimala jordblandningen var 65% sand och 35% lera. Därtill undersöktes den mest ideala vattenhalten till 11.13% av jordblandningen, som beräknas enligt ekvation 3.3. Därför användes denna jordblandningen i de fortsatta försöken. Därefter valdes att undersöka cement, släckt kalk och kombinationen av de två sistnämnda för att undersöka vilket bindemedel som skulle bidra till de starkaste blocken, med hänsyn till hållfasthet. Vilka

andelar bindemedel som skulle användas baserades på tidigare studier av produktion av komprimerade jordblock. Blocken benämns till A, B, C och D, med tillhörande underkategorier A1, A2 och A3 liksom figur 3.4a. Tillhörande tabell 3.4b redovisar även den varierande faktorn för respektive blockserie.



(a) Översikt över benämning av blocken, uppdelningen är A-D där skillnaden är typen av stabiliserande bindemedel medan underkategorier representerar att andelen stabiliserande bindemedel är förändrad.

Block typ	Översiktligt innehåll	Varierande faktor
Block A	Lera, sand och cement	Cement
Block B	Lera, sand, cement och kalk	Kalk
Block C	Lera, sand och kalk	Kalk
Block D	Lera, sand	-

(b) Översikt över blockens materialblandningar och den varierande faktor.

Figur 3.4: Översikt över projektets laborationsstrategi som innefattar delkategorier A till D med underliggande recept exempelvis A1-A3 samt tillkommande varierande faktor för de olika blocken.

För att kunna undersöka eventuella avvikelser på blocken gjordes tre stycken prover utav varje recept. Detta innefattar alltså nio block från varje bokstavskategori. Det tillkommer även tre stycken ostabiliserade referensblock som innehåller samma jordblandning som de övriga blocken, men helt utan stabiliserande bindemedel. Totala mängden block under andra delen av laborationen blev därav 30 stycken. Den varierade faktorn för de olika blocken var andelen stabiliserande medel och därför hölls blandningen lera, sand och vattenhalt konstant för alla block.

Tabell 3.1, 3.2 och 3.3 visar framtagna receptmixar för de olika blocken A, B och C med olika procenthalter av stabiliserande bindemedel. I tabell 3.4 visas receptmixen för block D, som inte innehåller något stabiliserande bindemedel. Receptens mängd är för att kunna tillverka tre stycken block. Observera att mängden sand och lera är fixerad på 65% respektive 35% för samtliga block, därmed anges bara dess vikt.

Tabell 3.1: Receptmix för block A1–A3, cement som stabiliserande bindemedel.

A1	Mängd [%]	Vikt [kg]
Sand	-	9.26
Lera	-	4.99
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{cement}	5 ^{**}	0.75
A2		
Sand	-	9.17
Lera	-	4.94
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{cement}	6 ^{**}	0.85
A3		
Sand	-	9.07
Lera	-	4.88
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{cement}	7 ^{**}	0.98

Tabell 3.2: Receptmix för block B1–B3, cement och kalk som stabiliserande bindemedel.

B1	Mängd [%]	Vikt [kg]
Sand	-	9.17
Lera	-	4.94
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{cement}	4 ^{**}	0.56
w_{kalk}	2 ^{***}	0.28
B2		
Sand	-	8.97
Lera	-	4.83
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{cement}	4 ^{**}	0.55
w_{kalk}	4 ^{***}	0.55
B3		
Sand	-	8.78
Lera	-	4.73
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{cement}	4 ^{**}	0.54
w_{kalk}	6 ^{***}	0.81

Tabell 3.3: Receptmix för block C1–C3, kalk som stabiliserande bindemedel.

C1	Mängd [%]	Vikt [kg]
Sand	-	9.17
Lera	-	4.94
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{kalk}	6 ^{***}	0.85
C2		
Sand	-	8.97
Lera	-	4.83
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{kalk}	8 ^{***}	1.10
C3		
Sand	-	8.78
Lera	-	4.73
w_{vatten}	11.13 [*]	1.88
w_{kalk}	10 ^{***}	1.35

Tabell 3.4: Receptmix för block D utan stabiliserande bindemedel.

D	Mängd [%]	Vikt [kg]
Sand	-	9.17
Lera	-	4.94
w_{vatten}	11.13 ^{***}	1.88

*Vattenhalten beräknad med avseende på total jordblandning.

**Cementhalten beräknad med avseende på total jordblandning.

***Kalkhalten beräknad med avseende på total jordblandning.

4. Metod

Metoden för denna rapport delas in i en förstudie och experimentell del. I förstudien, som beskrivs under kapitel tre tillsammans med material, undersöks jordblandningen för blocken med provningar i laborationsmiljö. I följande kapitel beskrivs den experimentella delen, alltså tillverkningen av de komprimerade jordblocken. De receptmixar av blocken som togs fram i förstudien provas.

4.1 Auram Press 3000

I detta arbete används en manuell press vid namn *Auram Press 3000*. Pressen genererar via ett hävstångssystem en kompressionskraft i storleksordningen 100–150 kN [20]. Auram Press 3000 användes för att skapa samtliga jordblock. Maskinen visas i figur 4.1. Utförandet av pressning görs enligt handbok genom att addera rätt mängd material i formen för att sedan stängas och pressas med hjälp av maskinens hävarm. Efter pressning kan blocket lyftas iväg för att härda.



(a) Auram Press 3000 framifrån.



(b) Auram Press 3000 från sidan.

Figur 4.1: Auram Press 3000, maskinen som används vid pressning av jordblocken.

4.2 Tillverkning av komprimerade jordblock

I följande lista beskrivs tillverkningen av de komprimerade jordblocken.

Blandning: Vid tillverkning av blocken vägdes först alla torra ingredienser upp, bestående av sand, torkad lera samt respektive stabiliserande bindemedel. Därefter blandades dessa med spade i en stor ren låda, se bild 4.2a. När blandningen blivit homogen adderades en mängd av 11.13% vatten (1.88 kg) som blandades samman tills hela blandningen blev enhetlig. Sedan fick mixen stå och vila i tio minuter för att ge tid till de torra materialen att reagera med vattnet.

4. Metod

Pressning: Vid pressning av blocken fylldes en av maskinens två formar upp med rikligt av material, för att sedan skrapa av överflödet med materialfördelaren tillhörande maskinen som visas till höger i 4.2b. Därefter låstes maskinens pressplåtar fast i höjd med formens övre kant, för att sedan kunna lägga på tryck med hävarmen. Tre stötar gjordes med hävarmen innan det slutliga trycket gjordes och de färdigpressade blocket lyftes upp med botten av formen, visas i 4.2b.

Torkning: Blocken togs varsamt bort från maskinen och förvarades på en trähylla i labbet som i figur 4.2c och 4.2d. Samtliga block placerades på hyllorna och härdades i 28 dagar i laboratoriets kontrollerande temperatur på 20 grader.



(a) Blandning av torra ingredienser och vatten.



(b) Färdigpressat jordblock.



(c) Hyllan där blocken torkades.

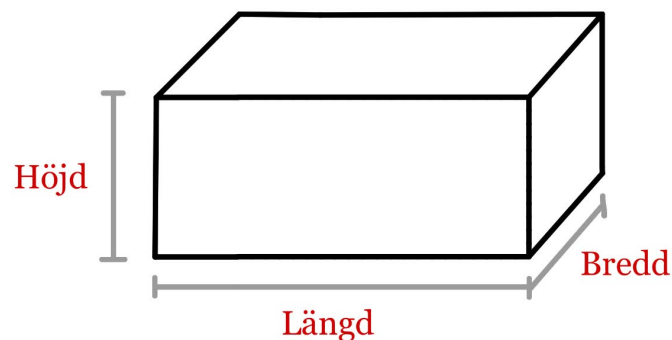


(d) Torkning av pressade jordblock i trähylla.

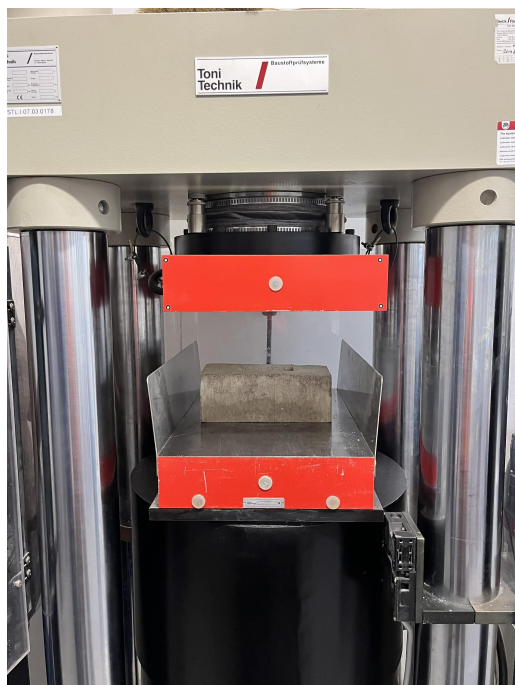
Figur 4.2: Tillverkningsprocessen i fyra olika steg.

4.3 Framställning av resultat & Toni Technik NORM

Blocken studerades innan trycktestet genom att mätas, vägas samt fotograferas med ingående detaljerade bilder som redovisas i kapitel 5. Måtten var framtagna enligt modellen visad i figur 4.3 nedan. Efter härdningen prövades samtliga block till brottsgräns genom vertikalt tryck med hjälp av maskinen *Toni Technik NORM* som visas nedan i figur 4.4. Först lades blocket centrerat på bottenplattan för att sedan stänga säkerhetsluckan och utsätta blocket med tryck till brottsgräns.



Figur 4.3: Förklaring av blockens dimensioner som redovisas i resultatet.



(a) Bild tagen framifrån på Toni Technik NORM.

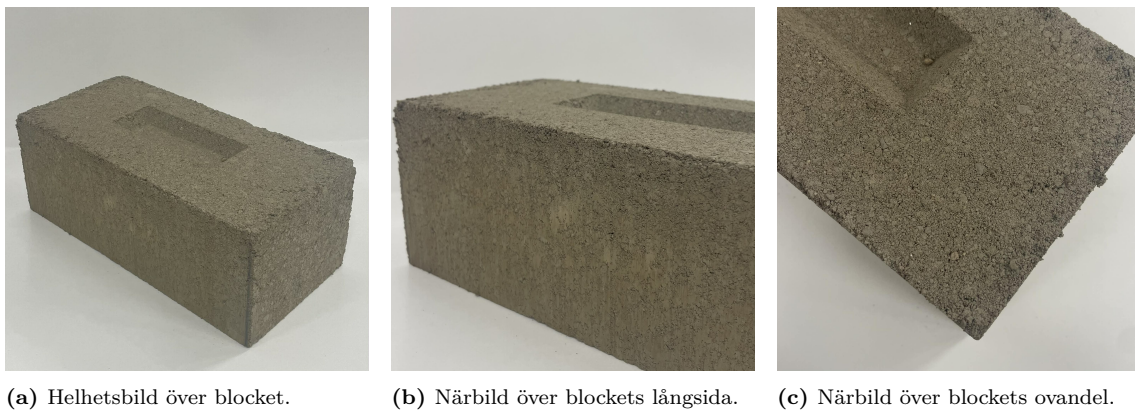


(b) Bild på hela uppsättningen av Toni Technik NORM.

Figur 4.4: Bilder på maskinen Toni Technik NORM som användes vid utförandet av tryckhållfasthetstestet.

5. Resultat & Diskussion

I detta kapitel redovisas resultat tillsammans med diskussion av resultatet. Visuella och materiella skillnader observerades vid tillverkningen av blocken. Jämfört med de ostabiliserade blocken i förstudien som istället fick ett sprött ytskikt, lätt gick sönder och höll ihop dåligt fick blocken i det huvudsakliga studien skarpa kanter och med ett robust ytskikt. De färdigställda blocken var i linje med de förväntade resultatet där bilder på block A1.1 visas figur 5.1. Sammanställning av bilder på alla blocken finns i appendix A.



Figur 5.1: Resultatet över block A1.1 i tre bilder. Blocket har cement som stabiliserande bindemedel där andelen är 5%.

Översikt och sammanfattade resultat redovisas i tabell 5.1, 5.2, 5.3 och 5.4 nedan, där mått, vikt, skrymdensitet samt den resulterande tryckhållfasthet som respektive block påvisade under brottsgränstillstånd presenteras. Den uppmätta tryckhållfastheten är markerat i grått. I tabell 5.5 anges det sammanräknade medelvärde för varje blockserie A1-A3, B1-B3, C1-C3 och D.

Tabell 5.1: Testdata för blockserie A (Cementserien), avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori A har cement som stabiliserande bindemedel med en ökning med fem, sex och sju procent för respektive underkategori.

Block A	Längd [mm]	Höjd [mm]	Bredd [mm]	Vikt [g]	Skrymdensitet [kg/m ³]	Tryckhållfasthet [MPa]
A 1.1	240	90	115	4301.9	1716.9	5.06
A 1.2	239	91	114	4412.2	1779.6	5.94
A 1.3	239	91	114	4400.0	1774.6	5.89
A 2.1	240	91	115	4621.0	1839.9	7.84
A 2.2	240	91	115	4485.7	1786.0	6.78
A 2.3	240	91	114	4514.2	1813.1	7.15
A 3.1	240	91	114	4493.3	1806.7	7.80
A 3.2	239	91	114	4478.1	1806.1	7.75
A 3.3	239	92	114	4416.5	1761.9	7.15

Tabell 5.2: Testdata för blockserie B (Kombinationsserien), avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori B har cement och kalk som stabiliserande bindemedel där kalk har en ökning med två, fyra och sex procent för respektive underkategori.

Block B	Längd [mm]	Höjd [mm]	Bredd [mm]	Vikt [g]	Skrymdensitet [kg/m ³]	Tryckhållfasthet [MPa]
B 1.1	240	91	114	4402.2	1768.1	5.95
B 1.2	240	92	115	4423.7	1742.2	6.08
B 1.3	240	91	115	4443.4	1769.2	6.14
B 2.1	240	94	115	4576.8	1764.1	7.27
B 2.2	240	93	115	4575.3	1782.5	7.50
B 2.3	240	93	115	4578.7	1783.8	7.42
B 3.1	240	95	114	4695.2	1806.4	8.39
B 3.2	240	93	115	4729.9	1842.7	8.54
B 3.3	240	95	115	4857.1	1852.4	9.43

Tabell 5.3: Testdata för blockserie C (Kalkserien), avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori C har kalk som stabiliserande bindemedel med en ökning med sex, åtta och tio procent för respektive underkategori.

Block C	Längd [mm]	Höjd [mm]	Bredd [mm]	Vikt [g]	Skrymdensitet [kg/m ³]	Tryckhållfasthet [MPa]
C 1.1	240	93	115	4516.3	1759.5	4.50
C 1.2	240	94	114	4430.6	1722.7	4.07
C 1.3	239	94	115	4433.3	1715.9	4.07
C 2.1	240	94	115	4535.4	1748.1	4.66
C 2.2	240	93	115	4441.2	1730.2	4.15
C 2.3	240	93	114	4471.1	1757.2	4.39
C 3.1	240	94	114	4554.1	1770.8	4.96
C 3.2	240	93	114	4481.2	1761.1	4.60
C 3.3	240	95	114	4580.0	1762.1	4.98

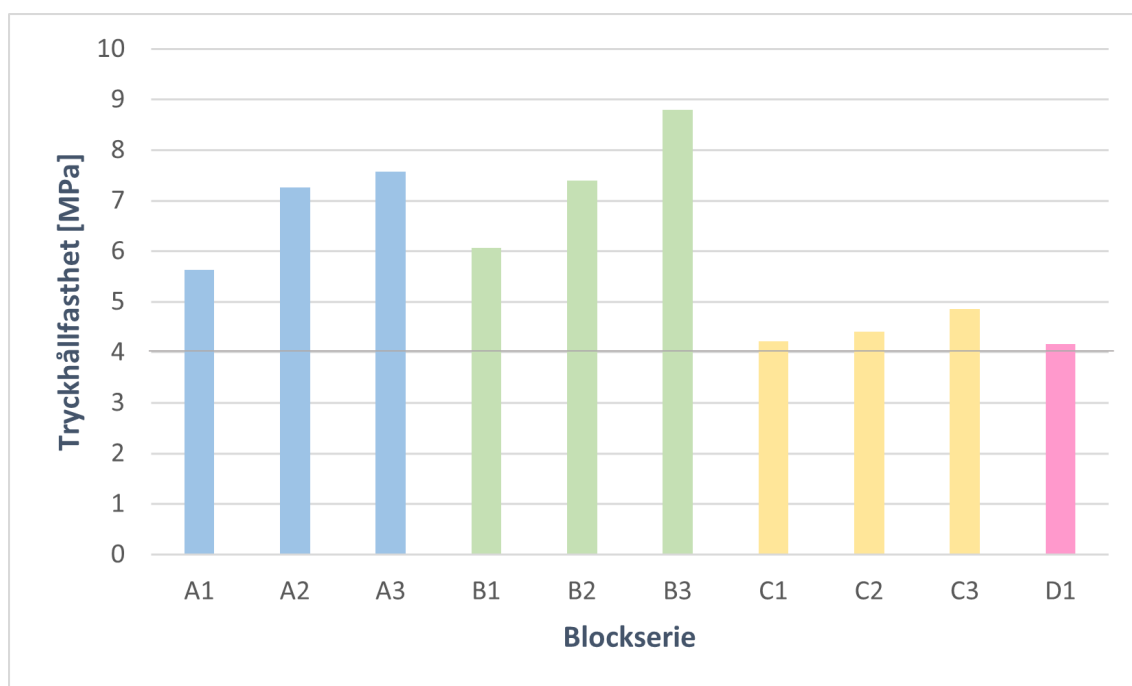
Tabell 5.4: Testdata för blockserie D, avseende dimensioner, vikt samt tryckhållfasthet. Kategori D innehåller konstanta mängder jordmaterial, 65 % sand, 35% lera och 11.13% vatten.

Block D	Längd [mm]	Höjd [mm]	Bredd [mm]	Vikt [g]	Skrymdensitet [kg/m ³]	Tryckhållfasthet [MPa]
D 1.1	235	90	113	4830.0	2021.0	3.98
D 1.2	235	88	112	4631.3	1999.6	4.20
D 1.3	235	90	112	4839.0	2042.8	4.29

Tabell 5.5: Medelvärde av samtliga blocks tryckhållfasthet.

Block	Medelvärde tryckhållfasthet [MPa]
A1	5.63
A2	7.26
A3	7.57
B1	6.06
B2	7.40
B3	8.79
C1	4.21
C2	4.40
C3	4.85
D1	4.16

Det som direkt kan tolkas från resultatet är att ett block med stabiliserande bindemedel ger en ökad tryckhållfasthet. Samtidigt håller blocken en gemensam trend i att en högre andel stabiliserade bindemedel får högre tryckhållfasthet. Däremot finns det skillnad i hur väl en ökad andel kalk eller cement ger en högre tryckhållfasthet. Cementserien A uppvisade en tydlig ökning i tryckhållfasthet redan vid 5 % cementtillsats och nådde över 7 MPa vid 6–7 %. Detta resultat redovisas med ett stapeldiagram över medelvärdet för de olika blockserierna i figur 5.2. Det fanns redan en markant ökning mellan block A1 och A2 på 2 MPa med endast en procentenhet mer cement. Trots detta är inte trenden linjär eftersom för block A3 var ökningen endast 0,31 MPa. Vidare analys visar att serie A2 har en hög varians i tryckhållfasthet. Detta minskar säkerheten för ett representativt medelvärde som påverkat A2.



Figur 5.2: Resultatet på medelvärde över tryckhållfasthet för de olika blockserierna presenterat i ett stapeldiagram. Stabiliserande bindemedel för blockserie A är cement, blockserie B, kalk och cement, blockserie C, kalk och blockserie D är ostabiliserat.

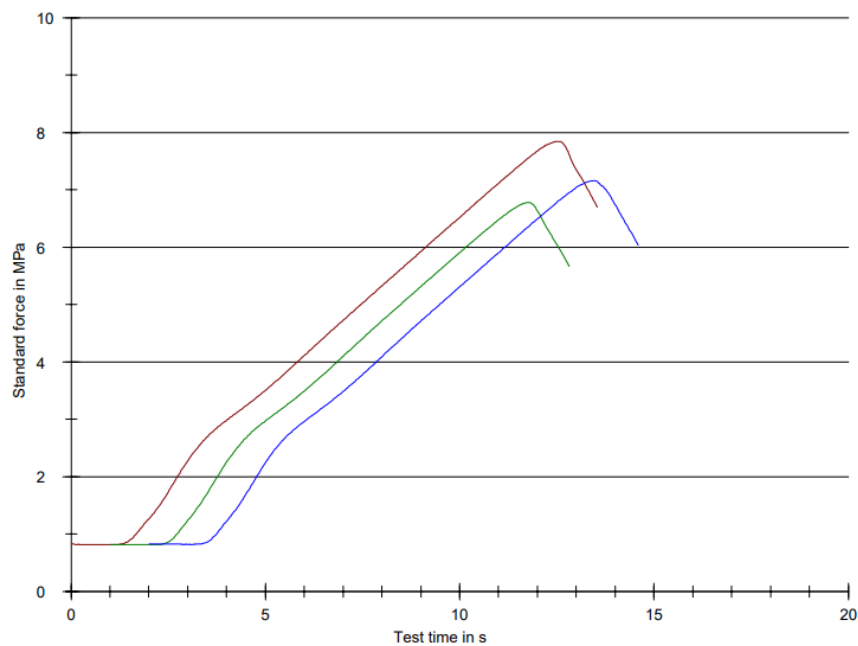
Kalkserien C uppvisade däremot betydligt lägre hållfasthet jämfört med cementbaserade block. Skillnaden uppgick till cirka 2–4 MPa jämfört med cementserien. Kombinationsserien B överträffade dock cementserien med blocket B3, med 4 % cement och 6 % kalk som uppnådde 9,43 MPa. Detta värde var även det högst uppnådda inom experimentet och blockserien B3 fick även det högsta medelvärdet på 8,79 MPa. Referensblocken i serie D uppnådde ett medelvärde på 4,16 MPa, vilket ligger strax över det riktvärde på 4 MPa som används i Nepal. Samtliga block med undantag för D1.1 presterade också över riktvärdet med en tryckhållfasthet över 4 MPa. Att referensblocken D gav dessa resultat indikerar att den valda jordsammansättningen i sig har relativt god bärförmåga. Stabiliseringens effekt bör därför ses i

relation till denna redan befintliga styrka då jordblandningen var konstant över alla block.

Att block B3.3 nådde projektets maximala tryckhållfasthet på 9,43 MPa med 4% cement och 6% kalk kunde också förväntas eftersom dess höga andel bindemedel. Block C3.3 i kalkserien hade däremot också en andel av 10% stabiliserande bindemedel men presterade inte lika bra. Jämför man dessa resultat skiljer det 4,45 MPa. Att kalkserien C med enbart kalk inte skulle prestera bäst var dock ett mer väntat resultat eftersom kalk kräver mer tid för att härda ordentligt. Utöver det är skillnaden i medelvärde för block C3 och C1 0,7 MPa. Medan skillnaden mellan B1 och B3 är 2,73 MPa. Detta indikerar på att det kan finnas en möjlig synergieffekt då en ökning av endast andelen kalk i C-blocken inte gav en så stor ökning som i kombinationsblocken B. För att ytterligare utvärdera denna möjlighet skulle det krävas en blockserie med 10% cement för att direkt kunna jämföra skillnaderna mellan dem block med 10% stabiliserande bindemedel.

En möjlig förklaring varför kalken inte presterade relativt bra är att kalkens hållfasthetsutveckling i hög grad är beroende av pozzolaniska reaktioner, vilka är långsammare än cementens hydratisering. Eftersom blocken testades efter 28 dagar kan kalkblockens långsiktiga hållfasthet inte ha utvecklats helt. Det är därför sannolikt att en längre härdningstid hade gynnat kalkblocken C. Det är även möjligt att skillnaden mellan kombinationsserien B och kalkserien C hade minskat vid exempelvis 56 eller 90 dagars provning. Kalkens reaktioner är även starkt beroende av lerans mineralogi. En detaljerad mineralogisk analys av leran hade kunnat ge ytterligare förklaring till varför kalkserien inte uppvisade högre hållfasthet. Dessutom rekommenderas det att kontinuerligt fukta kalkblocken under härdning, detta genomfördes inte i denna studie och kan även ha påverkat resultatet [18].

Vid undersökning av brottsgränstillstånd skapades grafer tillhörande varje block. Graferna från tryckhållfasthetstestet tillhörande A1 bestående av 5% cement och visas i figur 5.3 som ett urklipp från en pdf av protokollet. Fullständigt protokoll från block A1 och resterande kan hämtas i appendix B. I Figur 5.3 beskriver de tre olika färgerna A1.1-A1.3, där A1.1 tillhör grön, A1.2 tillhör röd och A1.3 tillhör blå. Under testet var det få synliga sprickor innan blocken gick i brott, samtidigt som det inte splittrades eller exploderade vid brott. Efter brottet är det även en mjukare kurva vilket också indikerar på ett plastiskt brott [47]. Sprickbildningen och hur blocken höll ihop efter hållfasthetsprovet redovisas i figur 5.4. Endast dessa bilder redovisas eftersom sprickbildningen inte hade större variation än valda i figuren.



Figur 5.3: Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa.



(a) Bild typ av spricka efter test.

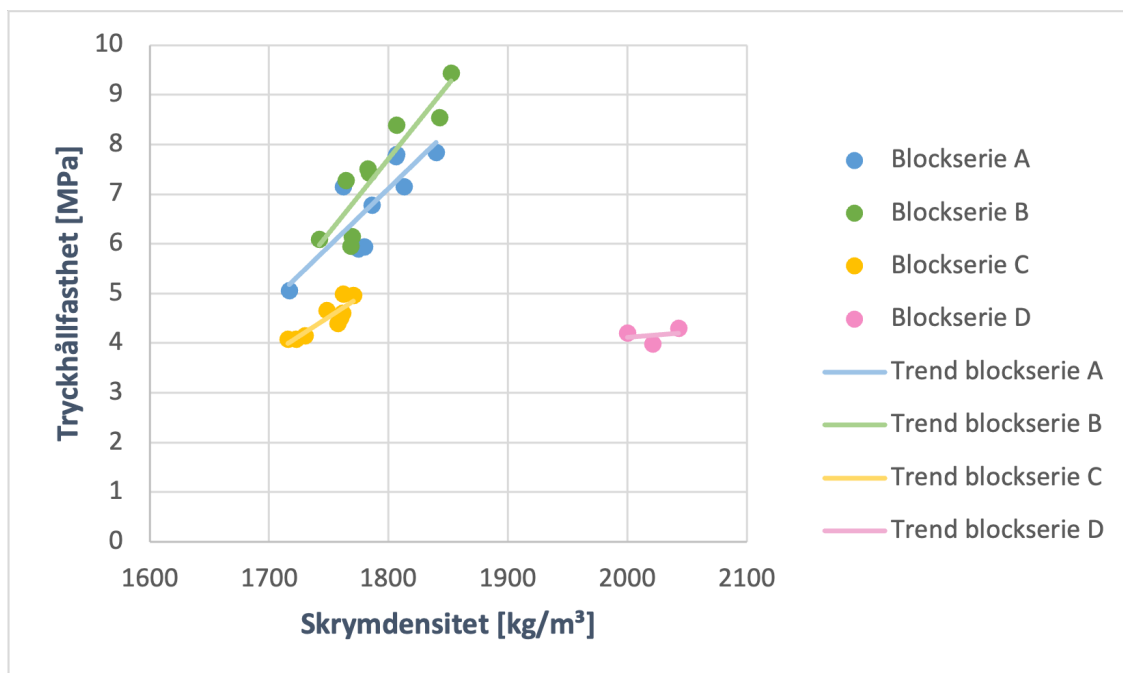
(b) Bild typ av spricka efter test.

(c) Bild blockets ovandel.

Figur 5.4: Tre bilder över olika block efter tryckhållfasthetstest, visar hur blocken spruckit där dessa tre bilder representerar alla blocken eftersom inga block skiljde sig från dessa sprickbildningar.

Utifrån resultaten finns det en korrelation mellan skrymdensiteten och tryckhållfastheten där block med högre skrymdensitet har också bättre tryckhållfasthet. I figur 5.5 nedan visas en tydligt positivt samband för de stabiliserade jordblocken där tryckhållfastheten ökar när skrymdensiteten ökar. Detta var ett väntat resultat eftersom en högre kompaktering av material får en högre inre friktion som kan leda till en bättre sammanhållning och därmed högre tryckhållfasthet. De ostabiliserade jordblocken, blockserie D, avviker däremot från detta påstående. De uppvisar en högre skrymdensitet gentemot de stabiliserade jordblocken men en relativt låg tryckhållfasthet. Den mest troliga förklaringen bakom detta är att blockserie D utan stabiliserande bindemedel resulterade i tyngre block med lägre volym eftersom det

blev en högre kompaktering under tillverkningen. Detta bidrar i sin tur till en högre skrymdensitet jämfört med resterande blockserier.



Figur 5.5: Relationen mellan uppmätt skrymdensitet och tryckhållfasthet för samtliga block. En ökande trend i tryckhållfasthet kan ses för ökande skrymdensitet. Blockserie A, B och C innehåller stabiliserande bindemedel, medan blockserie D är ostabiliserad.

Som det nämndes tidigare i teoriavsnittet ger cement generellt hög tryckhållfasthet men förknippas ofta med hög klimatpåverkan. I denna studie har dock kalk inte visat sig vara ett mer miljövänligt alternativ baserat på dess GWP-värde. Tabell 7.1 summerar de framtagna värdena för kostnad samt miljöpåverkan. Där ser man att i svenska förhållanden uppgår klimatpåverkan för kalk till cirka 1,02 kg CO₂-ekvivalenter per kg, med ett pris på 17,9 kr/kg, medan motsvarande värden för cement är 0,569 kg CO₂-ekvivalenter per kg cement och ett pris cirka 7 kr/kg. Baserat enbart på dessa värden, och inom ramen för denna studies kontext, framstår cement som mer fördelaktigt både ur ett klimat- och kostnadsperspektiv.

Tabell 5.6: Sammanställning av ekonomi och klimatpåverkan för stabiliserande bindemedlen cement och släckt kalk.

Land	Material	Klimatpåverkan (kg CO ₂ -ekv/kg)	Pris (SEK/kg)
Sverige	Cement	0.569	~7,00
	Kalk	1.02	17.90
Nepal	Cement	0.88	~0.93
	Kalk	— ^a	4

^a Klimatpåverkan av nepalesiskt producerad kalk kunde inte fastställas.

Svårigheter uppstod dock vid insamling av jämförbar data för Nepal. För nepalesisk cement identifierades ett GWP-värde på cirka 0,88 kg CO₂-ekvivalenter per kg cement [48]. Ett pris från en nepalesisk byggvaruhandel angavs till 15,2 nepalesiska rupier per kg, vilket motsvarar ungefär 0,93 kr/kg [49]. För kalk kunde endast ett pris på cirka 67 rupier per kg, vilket motsvarande cirka 4 kr/kg, identifieras, men detta avsåg små kvantiteter i detaljhandel och inte kalk som primärt säljs som byggnadsmaterial [50]. Något GWP-värde för nepalesiskt producerad kalk kunde inte fastställas, vilket begränsar möjligheten till en fullständig jämförelse av koldioxid-ekvivalenter. Det är viktigt att beakta att klimatpåverkan kan mätas på fler sätt än bara materialets GWP-värde. Därför ger dessa värden bara en indikation men saknar helhetsbilden för den faktiska påverkan på miljön. Likt klimatpåverkan är den framtagna kostnaden mer av ett exempel än ett absolut värde. Kostnaden för materialen skiljer sig från olika producenter, försäljare, kvaliteten och kvantiteten av beställt material. En bättre metod för ett säkrare värde hade varit att summera flera försäljare och ta fram ett medelvärde materialpriset.

5.1 Observationer & felkällor

Under tillverkningen av blocken A till D fungerade metoden mestadels bra. Däremot uppträdde det ett par komplikationer. Pressningen av blockserie B3 bestående av 4% cement och 6% kalk var svår att utföra. Vid kompakteringen av blocket krävdes det tre personer att få ner hävarmen. Detta innebär att blockserien inte hade kunnat användas ur ett produktions perspektiv. Dessutom kändes blandningen av kalkserien C för torr och var även den ganska svår att pressa. Detta tyder på att serien inte var optimerad och att en högre vattenhalt hade förmodligen fungerat bättre för denna serie. Det är ett fel som kan ha varit en bidragande faktor för resultatet av serie C, som inte blev lika högt som resterande blockkategorierna.

Ytterligare en observation var att de stabiliserade blocken uppvisade mindre dimensionsförändring jämfört med de ostabiliserade blocken. Bedömningen baserades på jämförelse med pressformens dimensioner med en längd på 240 mm, bredd 115 mm och höjd 90 mm. Skillnaden kan förklaras av att både kalk- och cementstabilisering reducerar jordens krymp- och svällningsbenägenhet [36]. Det noterades även att pressplåten var ojämnt inställd vid tillverkningen, vilket medförde en viss lutning på blockens ovansida, se 5.6. Höjdmåttet togs därför på blockens högsta punkt, vilket sannolikt förklarar varför flera block uppvisade en höjd något över 90 mm. Även bredddimensionen avvek marginellt från formens mått, men differensen uppgick till cirka 1 mm och kan därmed tillskrivas som mätosäkerhet. För de ostabiliserade blocken observerades däremot tydligare krympning, särskilt i längdriktningen där samtliga block minskade med cirka 5 mm. Alltså har stabiliseringen reducerat blockens volymkrympning.



Figur 5.6: Exempel på blockens lutning, se ovansida, på grund av pressplåtarnas något felaktiga inställning.

Resultaten för klimatanalysen baserades enbart på materialens GWP-värde uttryckt i koldioxidekvivalenter. Även om detta är en etablerad indikator för klimatpåverkan omfattar den inte samtliga miljöaspekter, utan ger främst en förenklad bild av materialens bidrag till växthusgasutsläpp. De redovisade värdena för svensk kalk och cement hämtades från respektive tillverkare. Dessa uppgifter representerar därmed enskilda producenters deklarerade värden och kan inte betraktas som fullt representativa för den samlade svenska produktionen. Resultaten bör därför tolkas som indikativa snarare än generella. För nepalesisk cement identifierades endast en tillgänglig källa för klimatdata, vilket ytterligare begränsar tillförlitligheten i jämförelsen. Även kostnadsanalysen bygger på enstaka marknadspriser per material och kan därför ses som en enskild observation snarare än ett marknadsgenomsnitt. En mer precis metod hade varit att samla in flera prisuppgifter och beräkna ett medelvärde för att minska osäkerheten.

Vidare är en generell felkälla under arbetets genomförande är den mänskliga faktorn. Moment såsom mätning av dimensioner, vägning av material och blandning av jord och bindemedel har utförts manuellt. Detta kan ha skapat mindre variationer i dimensioner, skrymdensitet. Även skillnader i mängd material tillsatt för packning mellan provkroppar kan ha påverkat resultaten. Dessa osäkerheter bedöms dock vara begränsade eftersom arbetet genomfördes noggrant enligt metoden. Det bör även beaktas att tillverkning av komprimerade jordblock generellt är en hantverksbaserad process, vilket innebär att en viss variation är naturlig och förväntad.

Andelen av de stabiliserande bindemedlen var ej identiska mellan de olika blockserierna. Detta försvårar en direkt jämförelse mellan de olika serierna på grund av dess variation av total mängd bindemedel. Vidare begränsades antalet provkroppar till tre block per serie, vilket innebär att enskilda avvikelser kan få stor inverkan på medelvärdet och därmed öka osäkerheten i resultaten. Ett större antal prover hade varit fördelaktigt, men begränsades av arbetets tidsram.

Blockserien A1 stod på torkning i 29 dagar istället för 28 dagar, på grund av förhinder och att gruppen inte kunde påbörja tryckhållfasthets-försök den dagen. Detta bör dock inte ha en avsevärd påverkan på resultatet då differensen i tid är så pass minimal. Torkningsförhållandena kan ha påverkat utfallet. Jordblocken har sannolikt exponerats för olika mängder luft i hänsyn till dess placering på trähyllan, vilket kan ha lett till skillnader i fukthalt vid provningstillfället och därmed påverkat slutgiltiga resultaten. Under torkningen placerades även vissa block på ojämn yta. Det innebär att delar av blocken inte hade full kontakt med underlag vilket kan medföra positiva och negativa utfall.

6. Slutsats

Sista kapitlet för denna rapport sammanfattar resultatet och bemöter projektets frågeställning. Slutligen diskuteras eventuella frågeställningar för framtida projekt.

6.1 Bemötande av arbetets frågeställningar

1. **Hur påverkar andelen och val av stabiliserande bindemedel den uppmätta tryckhållfastheten hos komprimerade jordblock?**

Generellt kan man konstatera att en ökning i andelen stabiliserande bindemedel leder till en ökning av tryckhållfastheten. Stabilisering med endast cement ger höga värden på tryckhållfasthet redan vid 5% tillsats. Kalkstabilisering har inte visat sig vara lika fördelaktig. Baserat på att dess medelvärden för tryckhållfasthet har den knappt bidragit med 1 MPa ökning jämfört med ostabiliserade blocken. Den mest effektiva materialsammansättning av stabiliseringen observerades vid kombinationen av cement och kalk, mer specifikt förhållandet med 4% cement och 6% kalk. Andelen stabiliserande bindemedel påverkar hållfastheten där en högre procent kalk och/eller cement leder till en ökad tryckhållfasthet, detta är en trend som följer alla de stabiliserande blocken.

2. **Vilka materialsammansättningar uppnår en tryckhållfasthet över 4 MPa efter definierad härdningstid på 28 dagar?**

Samtliga block förutom ett uppnådde en tryckhållfasthet över 4 MPa. Det block som underpresterade var block D1.1, vilket uppvisade en tryckhållfasthet på 3,98 MPa, vilket dock är tämligen nära referenspunkten för arbetet på 4 MPa, som grundar sig i BUN:s riktvärde. Däremot klarar blocket kravet på Nepals NBC 203:2015 standard på minsta tryckhållfasthet som ligger på 3,5 MPa. Resterande block av typ D presterar över 4 MPa. Sammanfattningsvis innebär detta att de prövade materialsammansättningarna hade gått att använda som byggkomponenter baserat på deras tryckhållfasthet.

3. **Vad är den ungefärligt uppmätta miljöpåverkan och kostnad för respektive materialsammansättning?**

Utifrån framhållna värden kan man se att kalken är cirka 2,5 gånger dyrare än cement i Sverige. Liknande förhållande återfinns för GWP-värdet för klimatpåverkan. Kalkens GWP-värde var cirka 80% högre än cementets värde. Samma jämförelse för nepalesisk kalk och cement uppgår cementens GWP-värde till 0,88 kg CO₂-ekv/kg cement till ett pris av cirka 0,93 kr/kg. För nepalesisk kalk saknades information om dess GWP-värde men priset identifierades till cirka 4 kr/kg, men eftersom det inte specifikt avsåg byggkalk bedöms uppgif-

ten som osäker. Baserat på dessa uppgifter återstår cement som det billigare alternativet även i Nepal.

6.2 Rekommendationer & framtida arbete

Detta arbete har bakgrund i arbetet som görs med BUN. För att bättre kunna applicera arbetets resultat på deras verksamhet gällande produktionen av komprimerade jordblock, skulle det vara av hög relevans att testa och experimentera med den jordblandning som finnes lokalt på plats. Detta arbetet har använt sig av lera och sand från Sverige, vilket inte speglar den jordblandning som finns i Nepal.

Därtill hade det varit av intresse att producera interlocking bricks likt de som används i Nepal för att undersöka om samma minskning av cementhalten hade klarat riktvärdet om 4 MPa. I dessa typer av block finns det möjlighet för armeringsstänger att stödja konstruktionen genom två hål i blocken. Utformningen påverkar även blockets mekaniska egenskaper, därav dess tryckhållfasthet. Detta eventuellt i kombination med en geografiskt relevant jordblandning. Trots att detta arbetes resultat kan vara av mindre relevans för det specifika arbetet som BUN gör, kan det förhoppningsvis hjälpa projekt i utvecklingsländer att optimera deras materialblandning inom byggnation med komprimerade jordblock.

Litteraturförteckning

- [1] “Housing.” *UN-Habitat*, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://unhabitat.org/topic/housing>. Hämtad: 2026-03-18.
- [2] “Un searches for solutions to the global housing crisis.” *United Nations Geneva*, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.ungeneva.org/en/news-media/news/2025/05/106848/un-searches-solutions-global-housing-crisis>. Hämtad: 2026-03-18.
- [3] J. Woetzel, S. Ram, J. Mischke, N. Garemo, and S. Sankhe, “A blueprint for addressing the global affordable housing challenge,” tech. rep., McKinsey Global Institute, New York, NY, USA, 2014-10. [Online]. Hämtad från: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Urbanization/Tackling%20the%20worlds%20affordable%20housing%20challenge/MGI_Affordable_housing_Full%20Report_October%202014.pdf. Hämtad: 2026-04-15.
- [4] B. Sultan and S. Kajewski, “The behaviour of construction costs and affordability in developing countries: A yemen case study,” tech. rep., Queensland University of Technology. [Online]. Hämtad från: <https://eprints.qut.edu.au/165/1/KajewskiCIB.pdf>. Hämtad: 2026-04-22.
- [5] F. Muhammed, K. Yamaguchi, K. Handayani, and A. Hagishima, “Affordable housing in developing regions: A systematic review of materials, methods and critical success factors with case insights,” *Buildings* 2025, vol. 15, no. 22, p. 4015, 2025. [Online]. Hämtad från: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/22/4015>. Hämtad: 2026-04-05.
- [6] A. Heringer, L. Blair Howe, and M. Rauch, *Upscaling earth: Material Process Catalyst*. Zurich: gta Verlag, 2019.
- [7] “Earth-based materials, the tomorrow’s solution for low-carbon construction?” *Alcimed*, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.alcimed.com/en/insights/earth-based-materials-the-tomorrows-solution-for-low-carbon-construction/>. Hämtad: 2026-03-19.
- [8] Dachverband Lehm e.V., Weimar, Germany, *Building with Earth: Consumer Information*, 2004. [Online]. Hämtad från: https://www.earthbuilding.info/pdf/DVL_consumerinfo_gb.pdf. Hämtad: 2026-04-18.
- [9] J. Bredenoord and Y. Kulshreshtha, “Compressed stabilized earthen blocks and their use in low-cost social housing,” *Sustainability* 2023, vol. 15, no. 6, 2023. [Online]. Hämtad från: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/5295>.

Hämtad: 2026-03-22. doi: <https://doi.org/10.3390/su15065295>.

- [10] B. Mohamed, J. Ahmed, A. S.C., and B. Sadok, “Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (ceb),” *Construction and Building Materials*, vol. 104, pp. 44–51, 2016. [Online]. Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306887>. Hämtad 2026-04-03. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>.
- [11] G. Minke, *Earth Construction Handbook: The Building Material Earth in Modern Architecture*. Southampton: WITpress, 2000.
- [12] J. Dethier, *The art of earth architecture: Past, present, future*. London: Thames and Hudson, 2020.
- [13] H. Shrestha Darshan, *Manual for Engineer: CSEB Green Buildings in Nepal*. Centre of Resilience Development (CoRD), Nepal, 2012-07.
- [14] “Interlocking stabilised soil blocks: Appropriate earth technologies in uganda,” tech. rep., UN-HABITAT.
- [15] “About us.” *Build up Nepal*, u.d. [Online.] Hämtad från: <https://www.buildupnepal.com/about-us/>. Hämtad: 2026-02-10.
- [16] K. Nagaraja, G. Lokesh, and A. M. Maruthi Swamy, “Comparative analysis of strength and durability in cseb stabilized with cement, lime, and fly ash,” *International Journal of Creative Research Thoughts*, vol. 10, pp. 1–10, aug 2022. [Online], Hämtad från: <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2208600.pdf>, Hämtad 2026-02-10.
- [17] Z. Huang, J. Wang, L. Bing, Y. Qiu, R. Guo, Y. Yu, M. Ma, L. Niu, D. Tong, R. M. Andrew, P. Friedlingstein, J. G. Canadell, F. Xi, and Z. Liu, “Global carbon uptake of cement carbonation accounts 1930–2021,” *Earth System Science Data*, vol. 15, no. 11, pp. 4947–4958, 2023. Hämtad från: [:/essd.copernicus.org/articles/15/4947/2023/](https://essd.copernicus.org/articles/15/4947/2023/), doi: =10.5194/essd-15-4947-2023. Hämtad: 2026-04-23.
- [18] Holmes, S. and Rowan, B., *Lime Stabilized Construction: A Manual and Practical Guide*. International Organization for Migration, Islamabad, Pakistan, 2015.
- [19] “Cementproduktion steg-för-steg.” *Heidelberg Materials*, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/cementproduktion-steg-f%C3%B6r-steg>. Hämtad: 2026-05-05.
- [20] “Compressed stabilised earth block.” *Auroville Earth Institute*, u.d. [Online.] Hämtad från: <https://dev.earth-auroville.com/compressed-stabilised-earth-block/>. Hämtad: 2026-03-27.
- [21] S. Sinha, J. S. Sudarsan, and A. A. Abhyankar, “Compressed stabilized earth

- blocks for sustainable building construction: A prisma-guided systematic review and tccm analysis,” *Buildings*, vol. 16, no. 8, p. 1633, 2026. [Online]: Hämtad från: url <https://www.mdpi.com/2075-5309/16/8/1633> Hämtad: 2026-04-25.
- [22] A. Ranesi, R. Cruz, V. Sousa, and J. A. Bogas, “Energy consumption and carbon emissions of compressed earth blocks stabilized with recycled cement,” *Materials MDPI*, vol. 18, no. 17, p. 4194, 2025. [Online]. Hämtad från: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12429946/>. Hämtad: 2026-03-14.
- [23] S. N. Malkanthi and A. A. D. A. J. Perera, “Particle packing application for improvement in the properties of compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt,” *Engineering, Technology amp; Applied Science Research*, vol. 9, p. 4538–4542, Aug. 2019. [Online]. Hämtad från: <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/3002>, Hämtad: 2026-03-24. doi:10.48084/etasr.3002.
- [24] L. Mango-Itulamya and N. Fagel, “Study of parameters influencing the compressive strength of compressed earth blocks,” *Journal of Physics: Conference Series*, p. 6, 2022-11. [Online]. Hämtad från : <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2368/1/012004>, Hämtad: 2026-03-27, doi:10.1088/1742-6596/2368/1/012004.
- [25] M. Hussain, H. Zmamou, A. Provost, A. Mahieu, N. Leblanc, D. Levacher, E. Chenot, and A. Kane, “Feasibility for the recovery of excavated soils in compressed earth blocks as a sustainable building material,” *Environments*, vol. 10, no. 8, 2023.
- [26] M. Mahdad, A. Benidir, and A. Brara, “Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: Influence of different stabilisers and compaction levels,” *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 9, pp. 44–60, June 2018.
- [27] Department of Urban Development and Building Construction, “Nepal national building code: Nbc 203:2015 –guidelines for earthquake resistant building construction: Low strength masonry,” tech. rep., Ministry of Urban Development, Government of Nepal, Kathmandu, Nepal, 2015.
- [28] A. M. Neville, *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited, 5 ed., 2011.
- [29] B. Hökfors, *Phase chemistry in process models for cement clinker and lime production*. PhD thesis, Umeå University, Department of Applied Physics and Electronics, 2014. [Online]. Hämtad från: <https://umu.diva-portal.org/smash/record.jsf?language=en&pid=diva2%3A696534&dswid=6714>. Hämtad: 2026-04-23.
- [30] A. K. Jha and P. V. Sivapullaiah, “Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil,” *Engineering Geology*,

vol. 198, pp. 53–64, 2015.

- [31] Heidelberg Materials Cement Sverige AB, “Environmental Product Declaration: CEM II/A-LL 42.5 Byggcement Skövde,” June 2025. Environmental Product Declaration (EPD), valid until 2030-06-23.
- [32] D. Carran, J. Hughes, A. Leslie, and C. Kennedy, “A short history of the use of lime as a building material beyond europe and north america,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 6, no. 2, pp. 117–146, 2012-03. [Online]. Hämtad från: <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.511694>, Hämtad: 2026-03-29, doi:10.1080/15583058.2010.511694.
- [33] P. Akula and D. N. Little, “Analytical tests to evaluate pozzolanic reaction in lime stabilized soils,” *MethodsX*, vol. 7, 2020.
- [34] J. R. Prusinski and S. Bhattacharja, “Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1652, no. 1, pp. 215–227, 1999. [Online]. Hämtad från: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1652-28>, Hämtad: 2026-04-12. doi:10.3141/1652-28.
- [35] F. Bell, “Lime stabilization of clay minerals and soils,” *Engineering Geology*, vol. 42, no. 4, pp. 223–237, 1996-07. [Online]. Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013795296000282?via%3Dihub>. Hämtad: 2026-04-10. doi: 10.1016/0013-7952(96)00028-2.
- [36] A. A. Firoozi, C. G. Olgun, A. A. Firoozi, and M. S. Baghini, “Fundamentals of soil stabilization,” *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1–16, 2017. [Online]. Hämtad från: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40703-017-0064-9>. Hämtad: 2026-04-13. doi:10.1186/s40703-017-0064-9.
- [37] “Lime stabilization: Reactions, properties, design, and construction,” tech. rep., Transportation Research Board, National Research Council, 1987-07. [Online]. Hämtad från: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/state-of-the-art/5/5.pdf>. Hämtad: 2026-05-01.
- [38] Nordkalk, “Sustainability report 2024,” tech. rep., Nordkalk Corporation, Pargas, Finland, Pargas, Finland, 2025. [Online]. Hämtad från: <https://www.nordkalk.com>, Hämtad: 2026-04-23.
- [39] A. Laveglia, L. Sambataro, N. Ukrainczyk, N. De Belie, and E. Koenders, “Hydrated lime life-cycle assessment: Current and future scenarios in four eu countries,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, pp. 1–21, 2022. [Online]. Hämtad från: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133224>. Hämtad: 2026-04-20.
- [40] “Släckt teknisk kalk nordkalk 10kg.” *Granngården*, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.granngården.se/slackt-teknisk-kalk-nordkalk-10kg>.

Hämtad: 2026-04-15.

- [41] J. A. Bogas, S. Real, R. Cruz, and B. Azevedo, “Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement,” *Journal of Building Engineering*, vol. 79, 2023. [Online]. Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223020727>. Hämtad 2026-04-20. doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107892.
- [42] P. J. Walker, “Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 17, no. 4, pp. 301–310, 1995. [Online]. Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946595000199>. Hämtad: 2026-04-23. doi: 10.1016/0958-9465(95)00019-9.
- [43] S. H. Schoenholtz, H. Van Miegroet, and J. A. Burger, “Bulk density,” in *Encyclopedia of Soils in the Environment* (D. Hillel, ed.), pp. 153–160, Oxford: Elsevier, n.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/bulk-density>. Hämtad: 2026-04-28.
- [44] J. Morel, A. Pkka, and P. Walker, “Compressive strength testing of compressed earth blocks,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 303–309, 2007. [Online] Hämtad från: https://www.researchgate.net/publication/222914532_Compressive_strength_testing_of_compressed_earth_blocks. Hämtad: 2026-05-02, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.
- [45] L. Bogren, “Cement reduction in sustainable building blocks,” tech. rep., KTH, 2024. [Online]. Hämtad från: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1880292/FULLTEXT01.pdf>. Hämtad: 2026-05-12.
- [46] A. Hazarika, L. Huang, and A. Baba Ahmadi, “Characterisation, activation, and reactivity of heterogenous natural clays,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 57, no. 68, pp. 1–17, 2024. [Online]. Hämtad från: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02335-9>. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02335-9>.
- [47] P. Burström, *Byggnadsmaterial: tillverkning, egenskaper och användning*. Lund, Sverige: Studentlitteratur, 4th ed., 2021.
- [48] A. Chaulagain, P. Lama, A. Adhikari, S. Mandal, and B. Uprety, “Comparative life cycle assessment of decarbonization pathways for cement production in nepal,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 28, 2025-10. [Online]., Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525004167>, Hämtad: 2026-04-05, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101284.
- [49] “Shivam opc cement grade 43.” *Gharbanau*, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.gharbanau.com/products/shivam-opc-cement-grade-43-436>.

Hämtad: 2026-05-07.

- [50] "Calcium hydroxide (chuna) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 900 gm." BMMushroom.shop, u.d. [Online]. Hämtad från: <https://www.bmmushroom.shop/products/calcium-hydroxide-chuna-caoh2-900gm>, Hämtad:2026-05-07.

A. Appendix Bilder



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.1: Block A1.1 vars stabiliserande bindemedel är 5% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.2: Block A1.2 vars stabiliserande bindemedel är 5% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.3: Block A1.3 vars stabiliserande bindemedel är 5% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.4: Block A2.1 vars stabiliserande bindemedel är 6% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.5: Block A2.2 vars stabiliserande bindemedel är 6% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

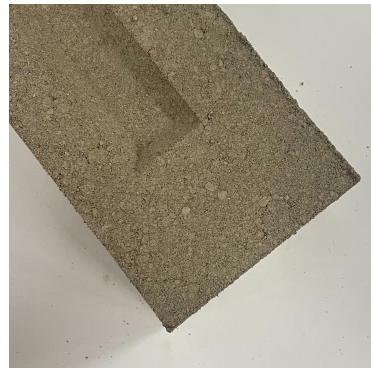
Figur A.6: Block A2.3 vars stabiliserande bindemedel är 6% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.7: Block A3.1 vars stabiliserande bindemedel är 7% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.8: Block A3.2 vars stabiliserande bindemedel är 7% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.9: Block A3.3 vars stabiliserande bindemedel är 7% cement.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.10: Block B1.1 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 2% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.11: Block B1.2 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 2% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

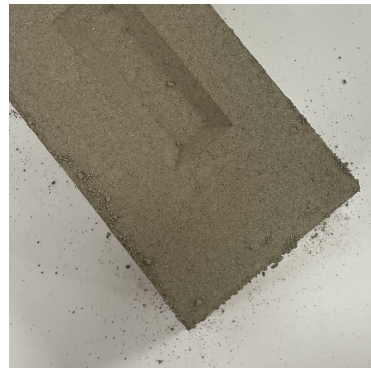
Figur A.12: Block B1.3 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 2% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

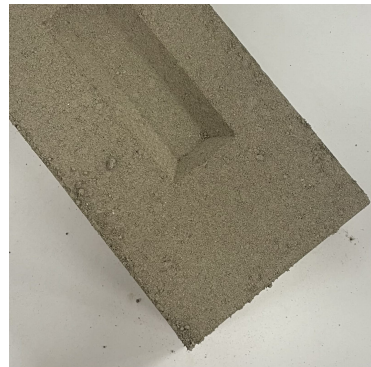
Figur A.13: Block B2.1 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 4% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.14: Block B2.2 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 4% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

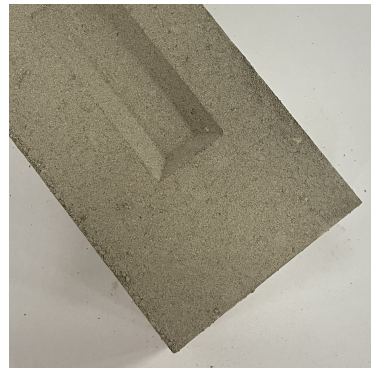
Figur A.15: Block B2.3 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 4% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.16: Block B3.1 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 6% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.

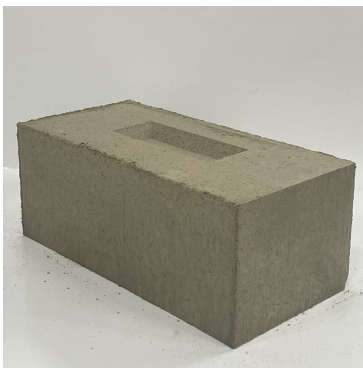


(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

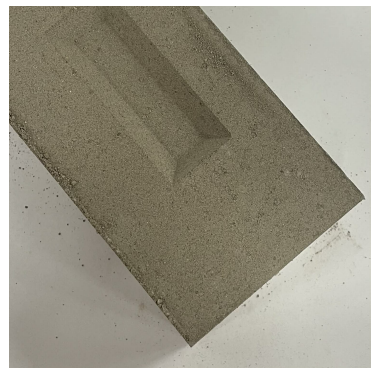
Figur A.17: Block B3.2 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 6% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.

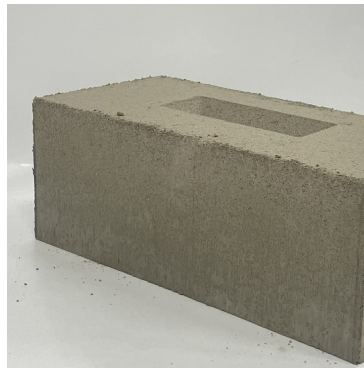


(c) Närbild över blockets ovandel.

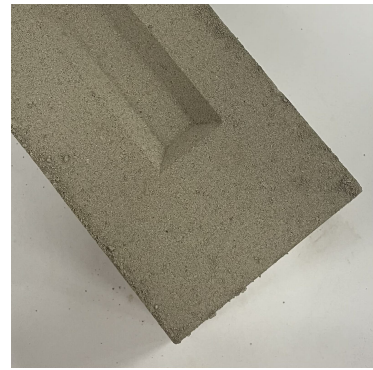
Figur A.18: Block B3.3 vars stabiliserande bindemedel är 4% cement och 6% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.19: Block C1.1 vars stabiliserande bindemedel är 6% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.20: Block C1.2 vars stabiliserande bindemedel är 6% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.

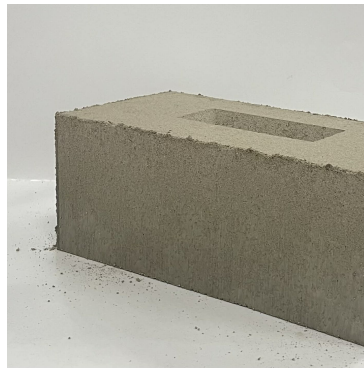


(c) Närbild över blockets ovandel.

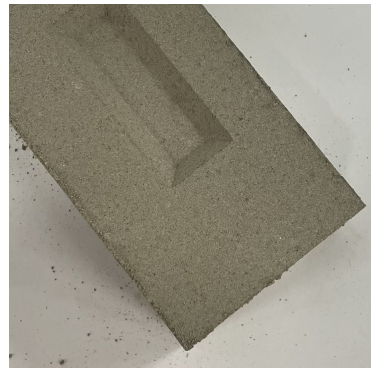
Figur A.21: Block C1.3 vars stabiliserande bindemedel är 6% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.22: Block C2.1 vars stabiliserande bindemedel är 8% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.23: Block C2.2 vars stabiliserande bindemedel är 8% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

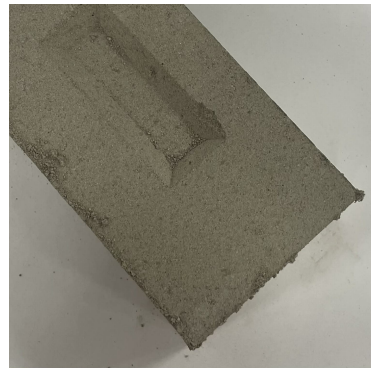
Figur A.24: Block C2.3 vars stabiliserande bindemedel är 8% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.25: Block C3.1 vars stabiliserande bindemedel är 10% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.26: Block C3.2 vars stabiliserande bindemedel är 10% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

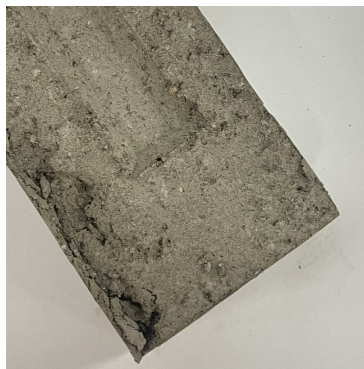
Figur A.27: Block C3.3 vars stabiliserande bindemedel är 10% kalk.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.28: Block D1.1. Blocket innehåller endast sand och lera, ej något stabiliserande bindemedel.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.29: Block D1.2. Blocket innehåller endast sand och lera, ej något stabiliserande bindemedel.



(a) Helhetsbild över blocket.



(b) Närbild över blockets långsida.



(c) Närbild över blockets ovandel.

Figur A.30: Block D1.3. Blocket innehåller endast sand och lera, ej något stabiliserande bindemedel.

B. Appendix Resultat

B.1 Prov A1

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

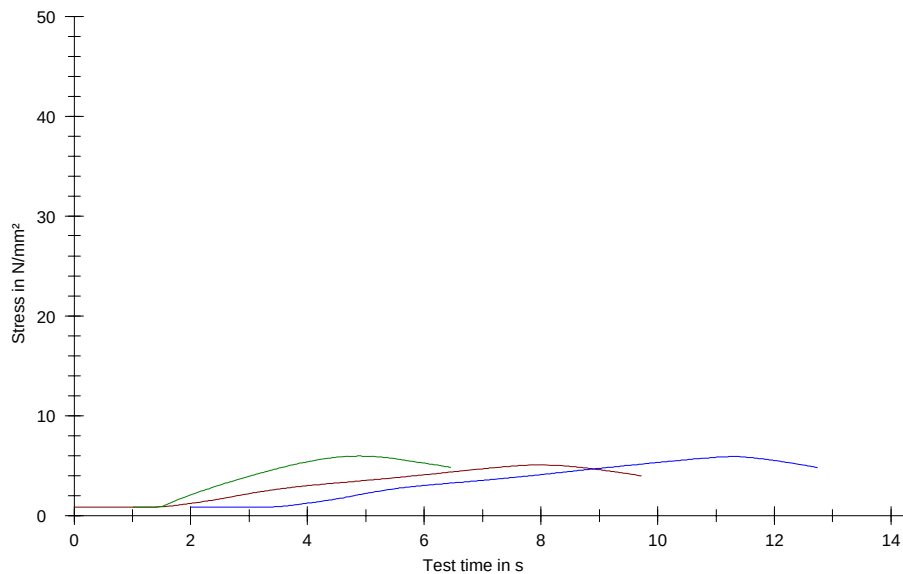
28.04.2026

Parameter table:

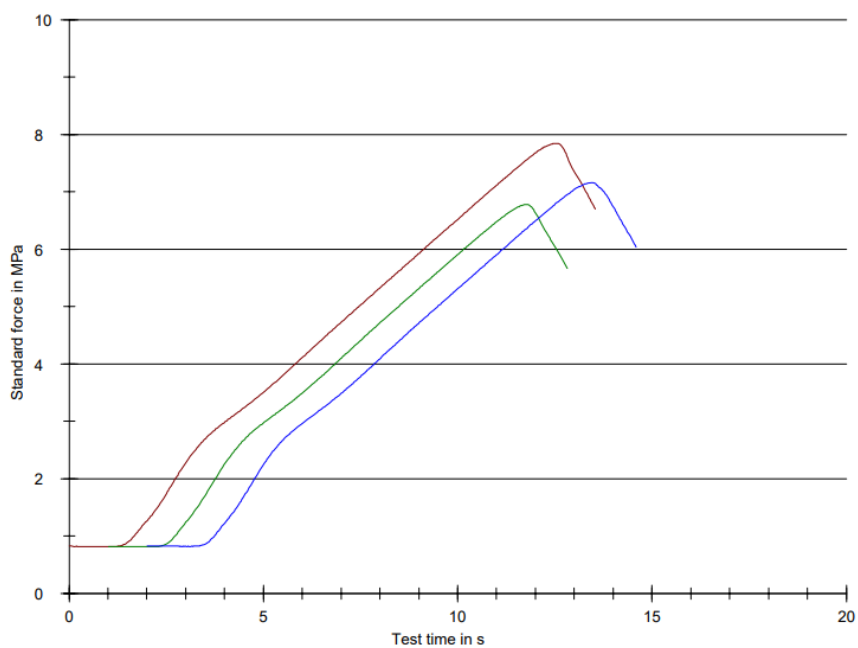
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,72	140,87	5,06
2	1,78	161,89	5,94
3	1,77	160,54	5,89

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,76	154,43	5,63
s	0,03	11,76	0,50
v	1,98	7,62	8,80



Figur B.1: Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.2 Prov A2

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

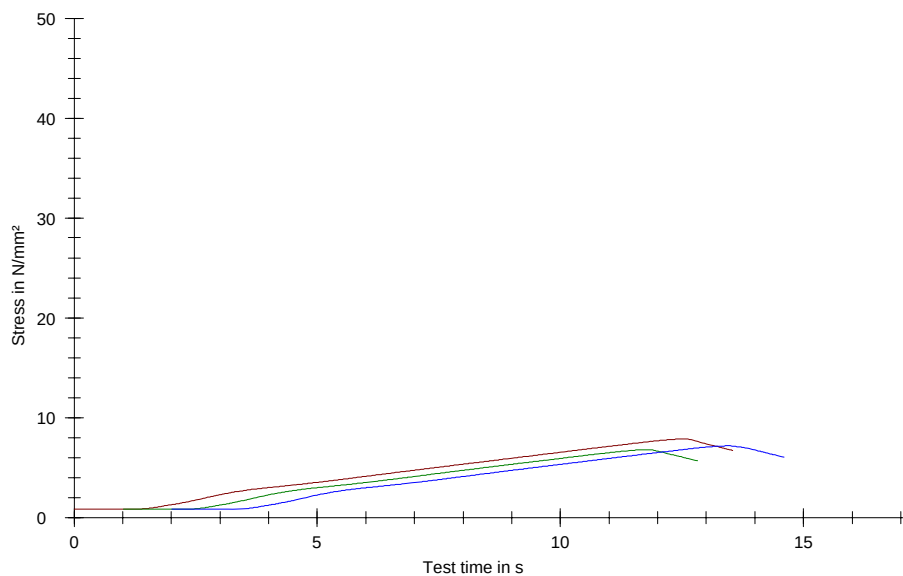
28.04.2026

Parameter table:

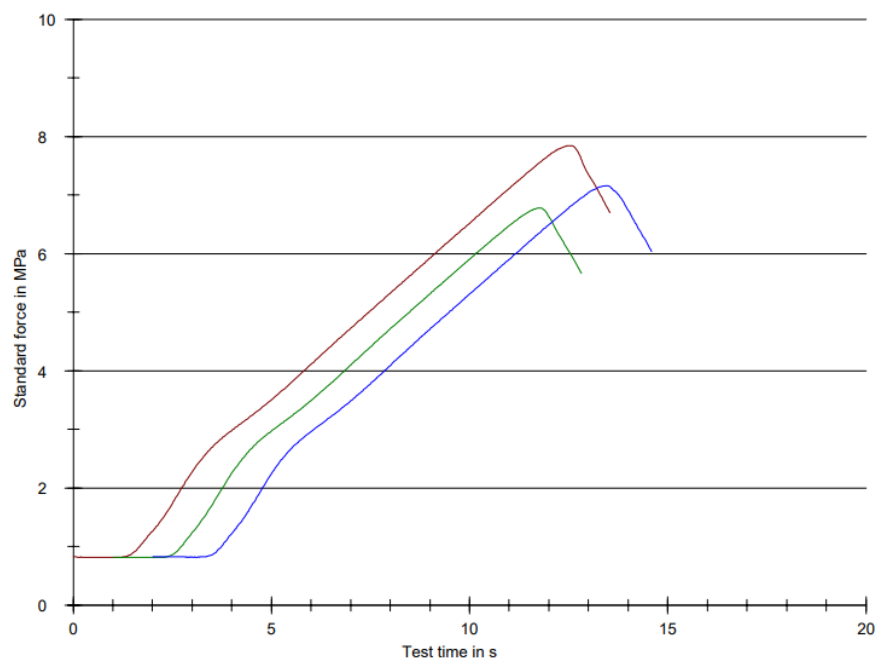
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	: 0 T	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,84	216,41	7,84
2	1,79	187,04	6,78
3	1,81	195,76	7,15

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,81	199,74	7,26
s	0,03	15,08	0,54
v	1,49	7,55	7,43



Figur B.2: Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.3 Prov A3

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

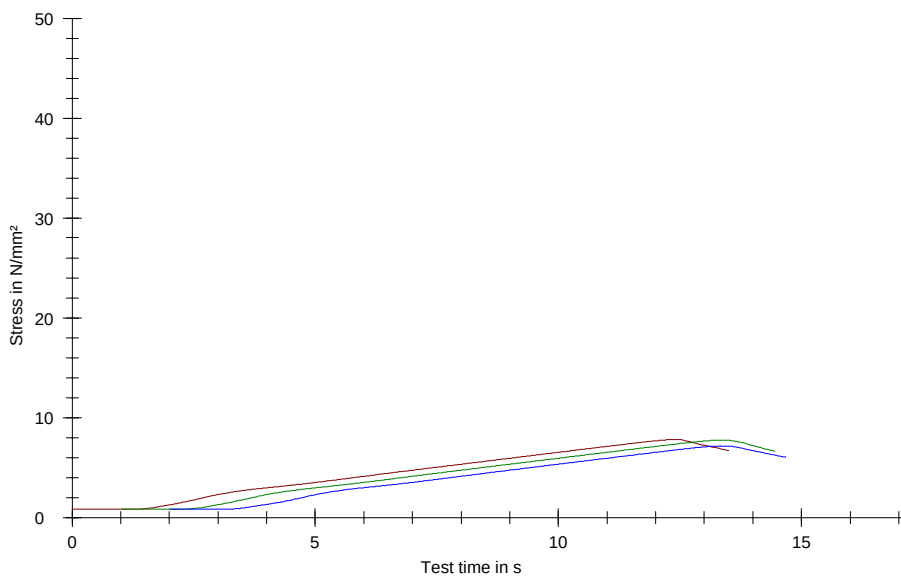
28.04.2026

Parameter table:

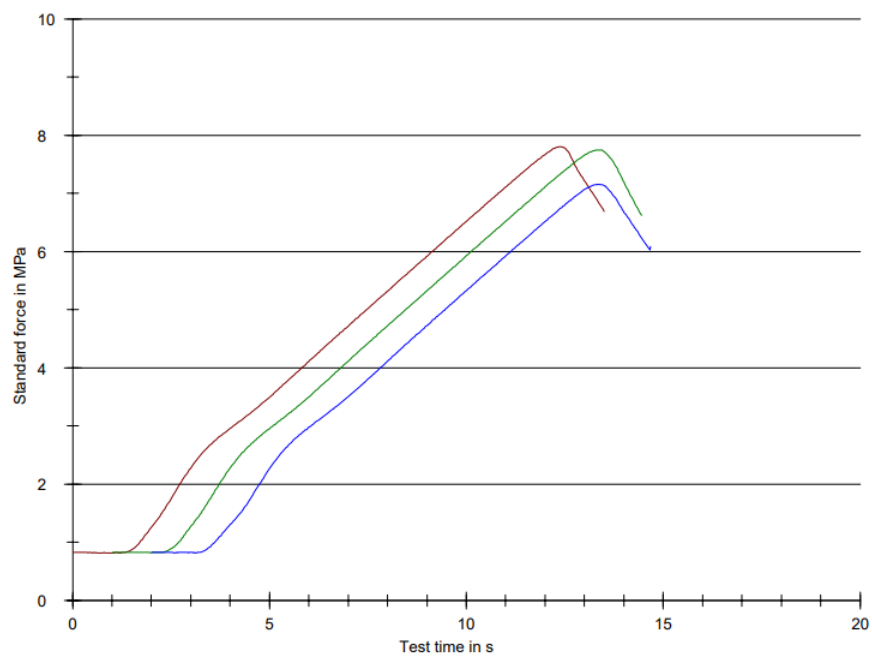
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,80	213,40	7,80
2	1,81	211,03	7,75
3	1,76	194,88	7,15

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,79	206,44	7,57
s	0,03	10,08	0,36
v	1,40	4,88	4,74



Figur B.3: Hållfasthetstest resultat för prov A1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.4 Prov B1

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

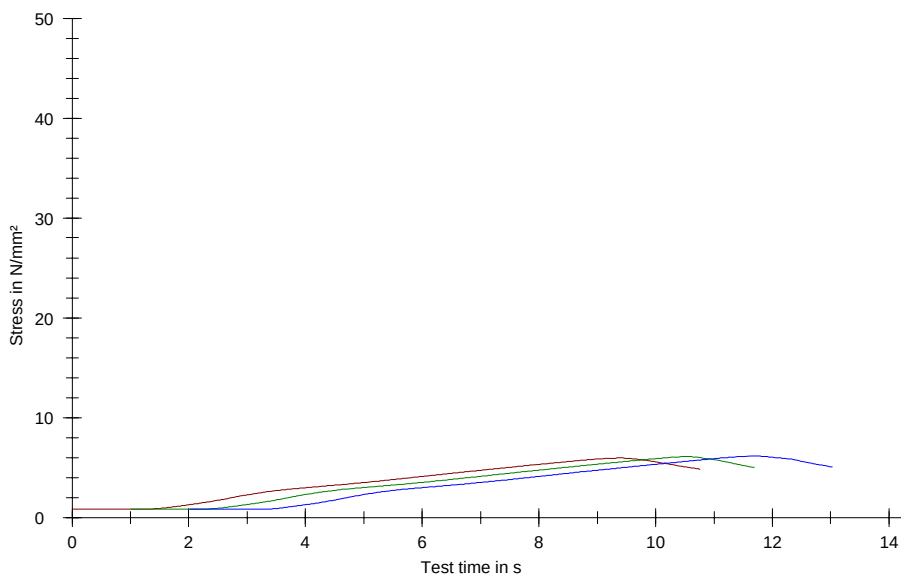
28.04.2026

Parameter table:

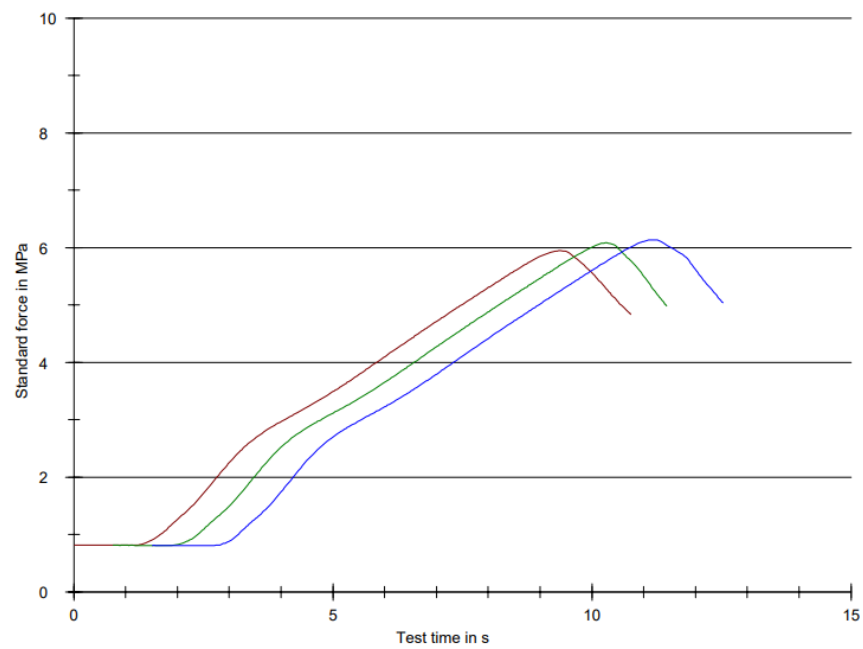
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,77	162,66	5,95
2	1,74	167,82	6,08
3	1,77	169,35	6,14

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,76	166,61	6,05
s	0,02	3,50	0,10
v	0,87	2,10	1,62



Figur B.4: Hållfasthetstest resultat för prov B1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.5 Prov B2

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

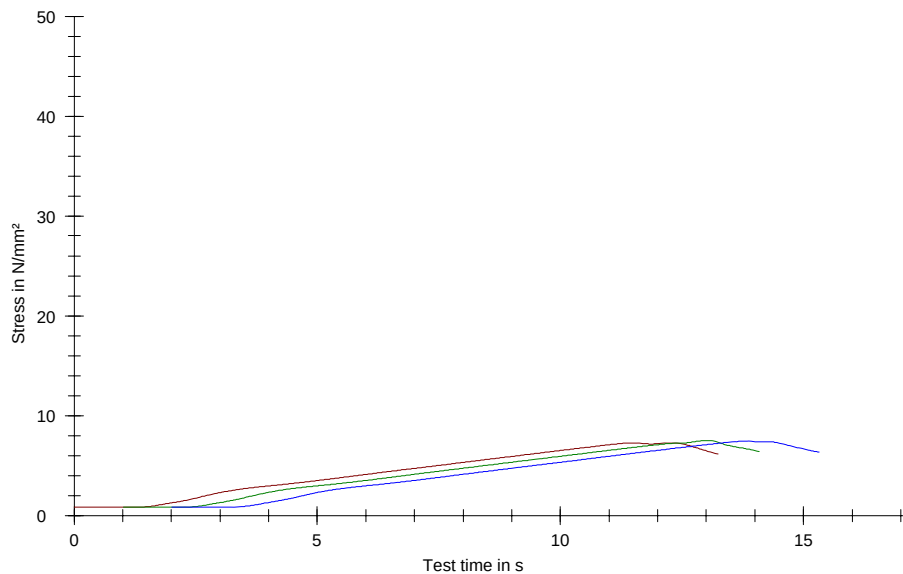
28.04.2026

Parameter table:

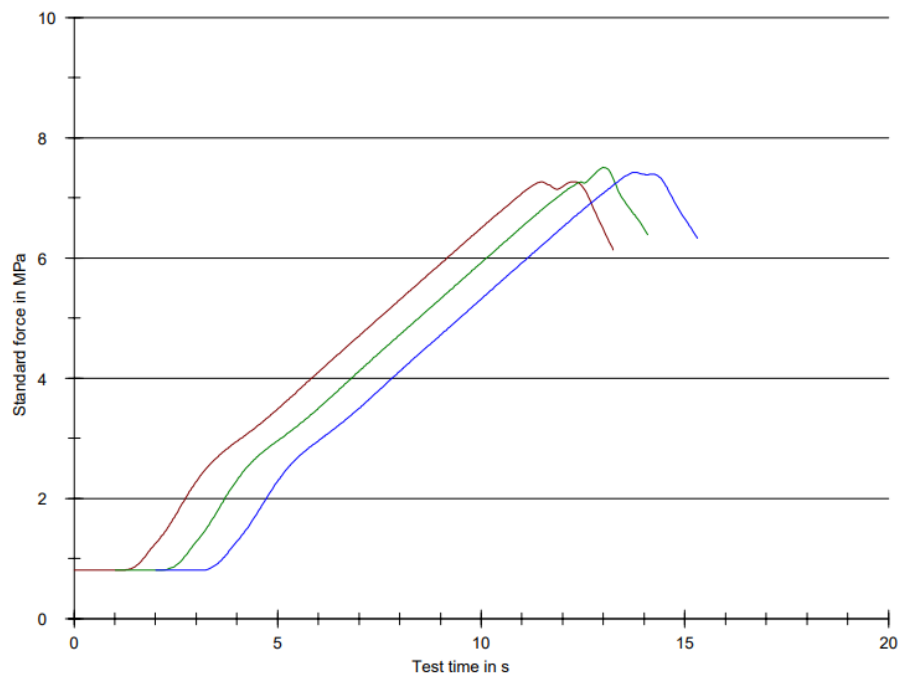
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,76	200,52	7,27
2	1,78	207,07	7,50
3	1,78	204,89	7,42

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,78	204,16	7,40
s	0,01	3,33	0,12
v	0,62	1,63	1,63



Figur B.5: Hållfasthetstest resultat för prov B2 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.6 Prov B3

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

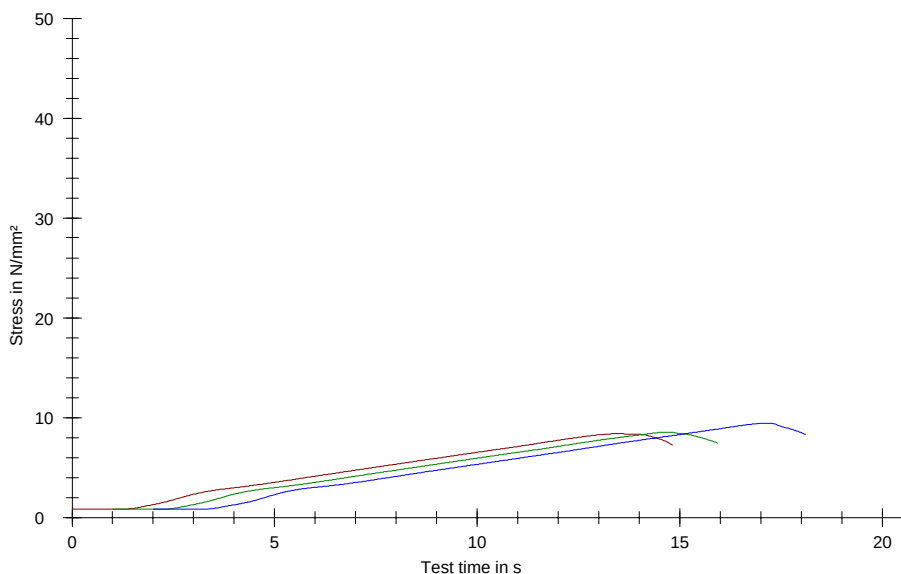
28.04.2026

Parameter table:

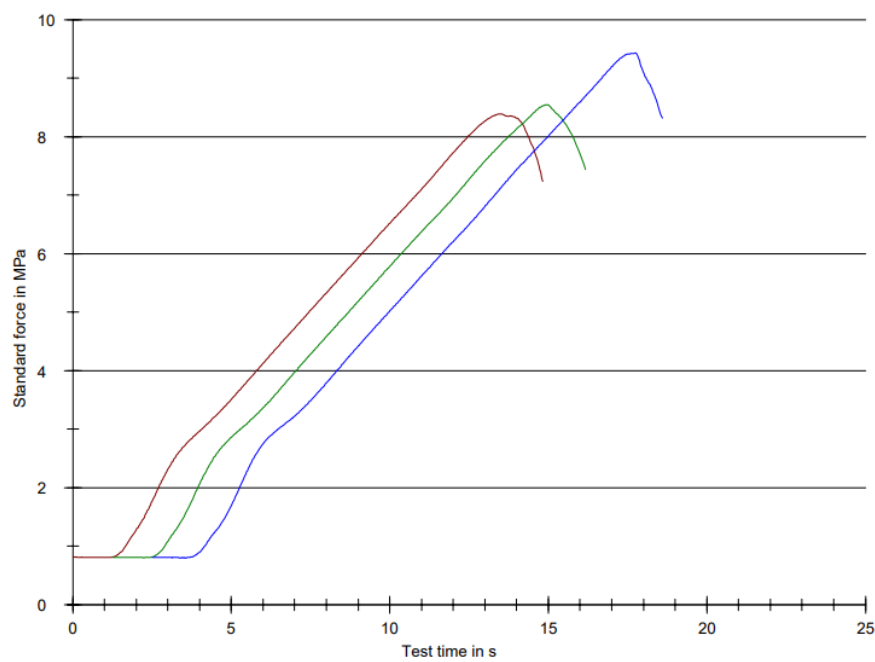
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,81	229,43	8,39
2	1,84	235,81	8,54
3	1,85	260,18	9,43

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,83	241,80	8,79
s	0,02	16,23	0,56
v	1,32	6,71	6,39



Figur B.6: Hållfasthetstest resultat för prov B3 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.7 Prov C1

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

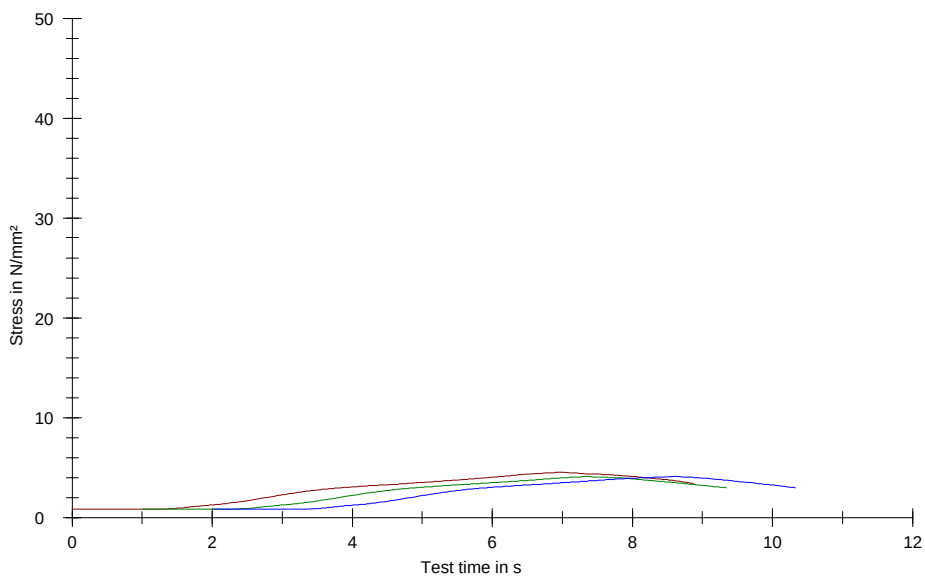
28.04.2026

Parameter table:

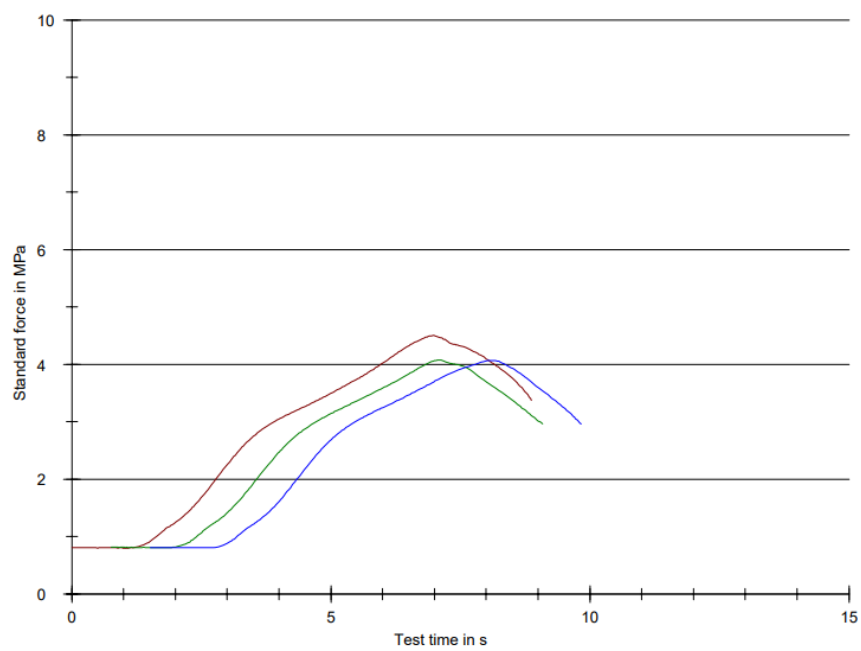
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
2	1,76	124,21	4,50
3	1,72	111,36	4,07
4	1,72	111,81	4,07

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,73	115,79	4,21
s	0,02	7,29	0,25
v	1,35	6,30	5,91



Figur B.7: Hållfasthetstest resultat för prov C1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.8 Prov C2

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

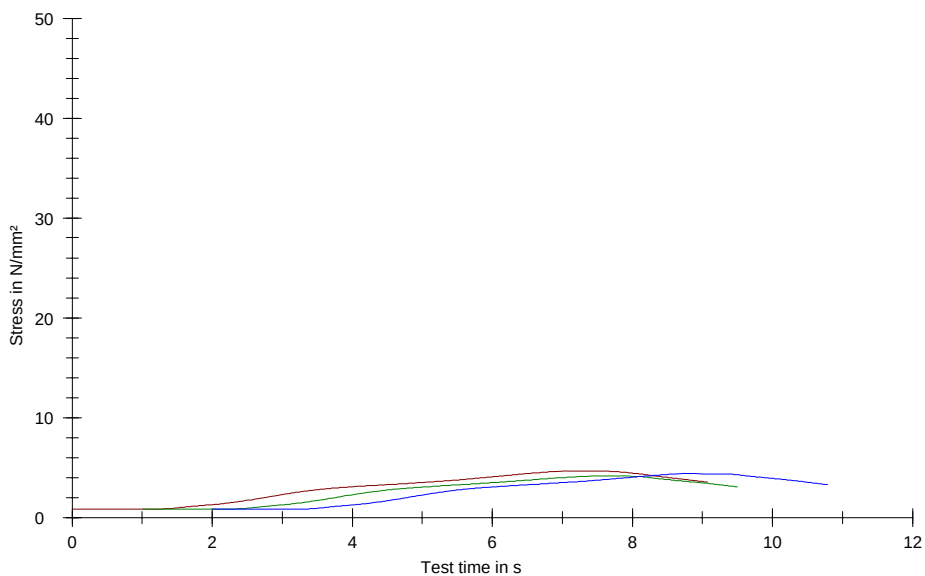
28.04.2026

Parameter table:

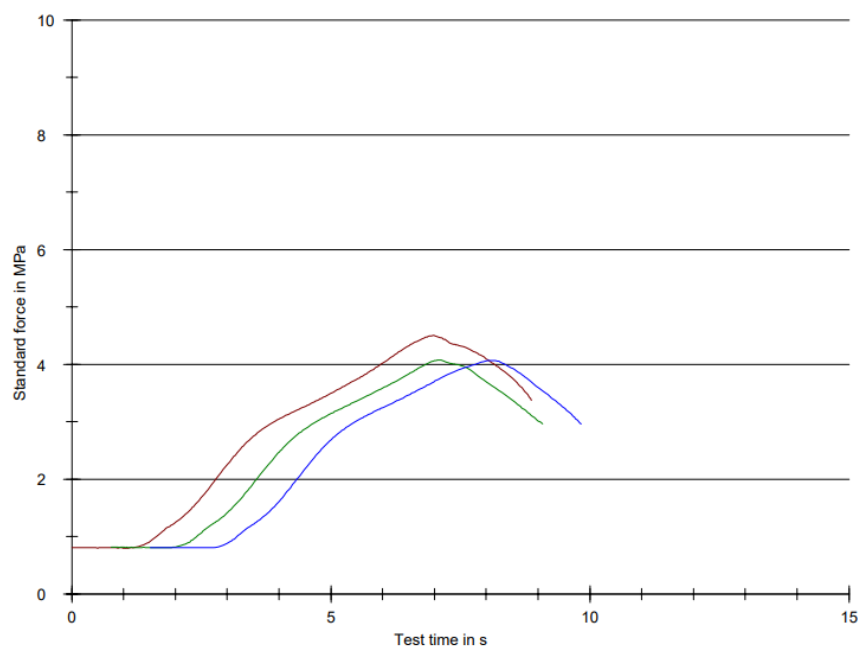
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,75	128,71	4,66
2	1,73	114,55	4,15
3	1,76	120,25	4,39

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,75	121,17	4,40
s	0,01	7,13	0,26
v	0,79	5,88	5,83



Figur B.8: Hållfasthetstest resultat för prov C2 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.9 Prov C3

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

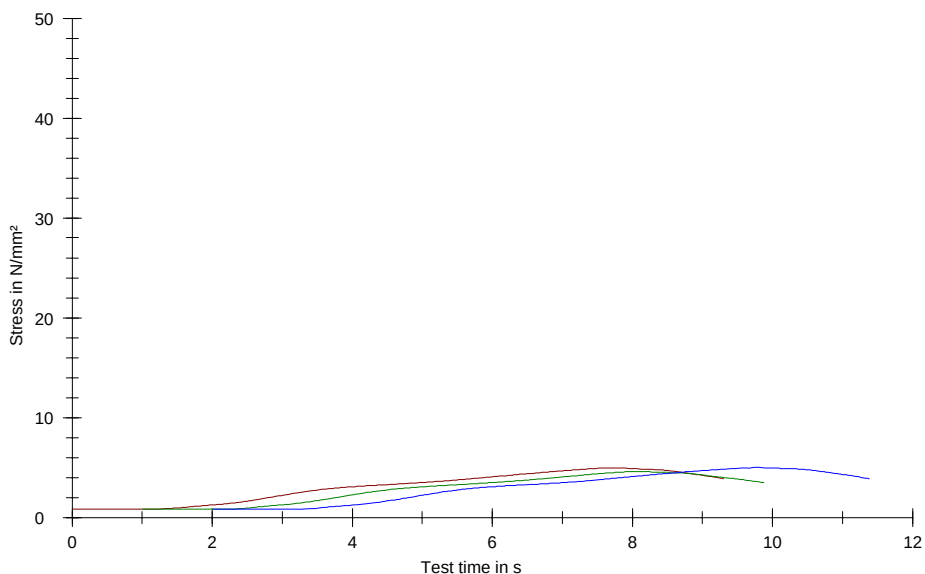
28.04.2026

Parameter table:

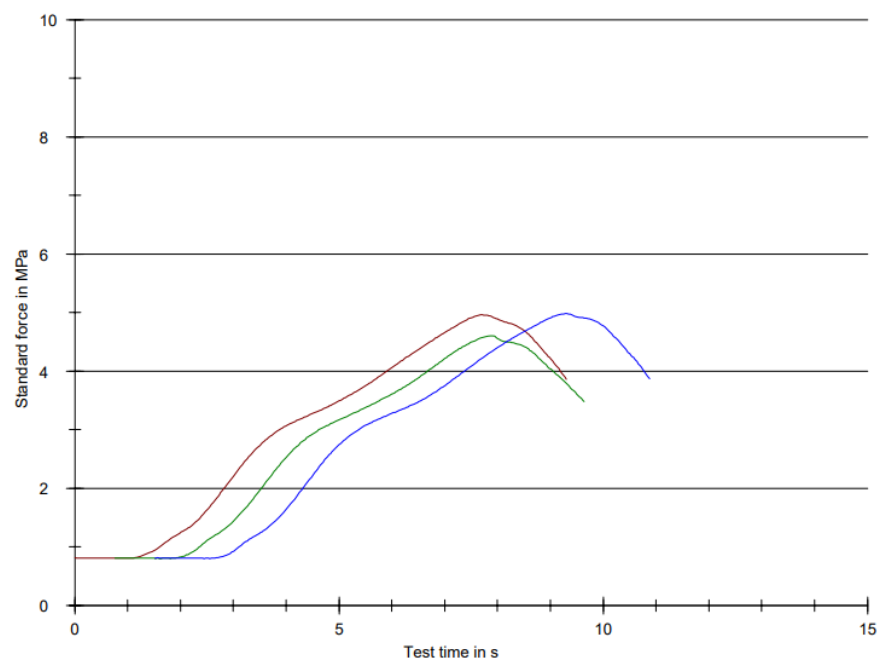
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	1,77	135,63	4,96
2	1,76	125,95	4,60
3	1,76	136,26	4,98

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	1,76	132,61	4,85
s	0,01	5,78	0,21
v	0,30	4,36	4,36



Figur B.9: Hållfasthetstest resultat för prov C3 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

B.10 Prov D

**Toni
Technik**

Simple standard protocol

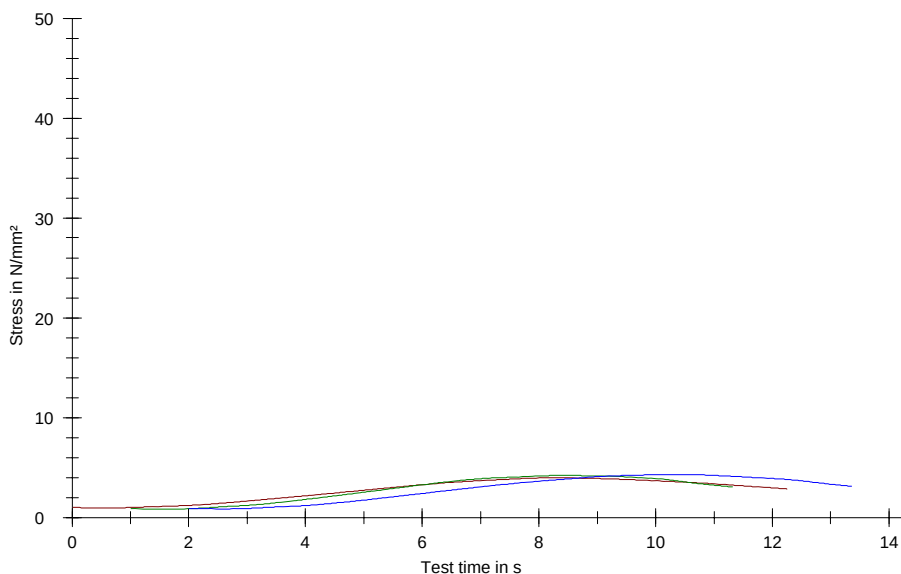
28.04.2026

Parameter table:

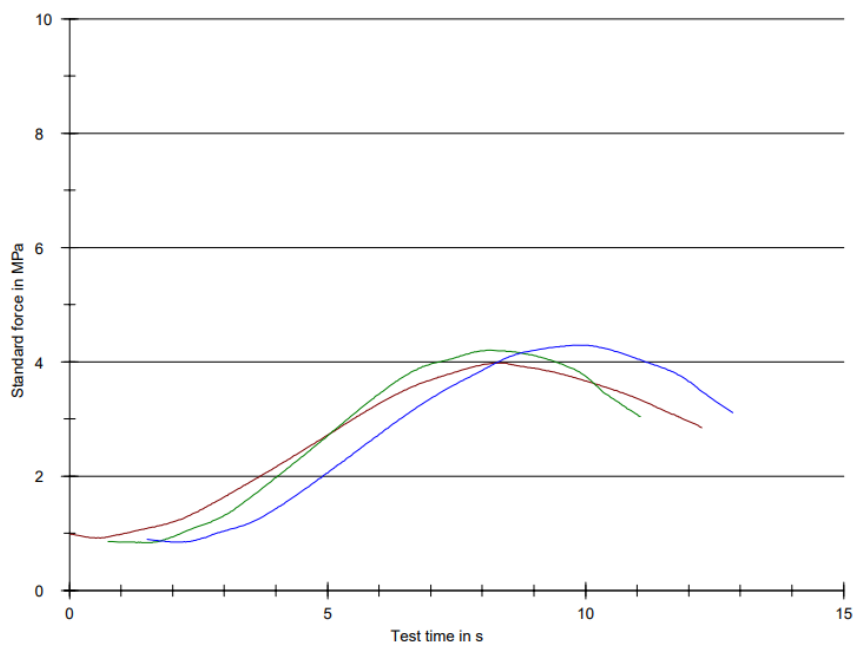
Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0051
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 3 MN
Creation date	:	Extensometer
Age	:	Extensometer2
Other	:	

Results:

Nr	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
1	2,02	105,65	3,98
2	2,00	110,54	4,20
3	2,04	112,86	4,29

Series graphics:**Statistics:**

Series n = 3	ρ g/cm ³	F_m kN	σ_m N/mm ²
$\bar{x}$	2,02	109,68	4,16
s	0,02	3,68	0,16
v	1,07	3,36	3,84



Figur B.10: Hållfasthetstest resultat för prov D1 där X-axel beskriver tid i sekunder och Y-axel hållfastheten i N/mm^2 vilket även är MPa. Röd beskriver första provet, blå andra provet och blå beskriver sista provet.

DEPARTMENT OF SOME SUBJECT OR TECHNOLOGY
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden
www.chalmers.se



CHALMERS