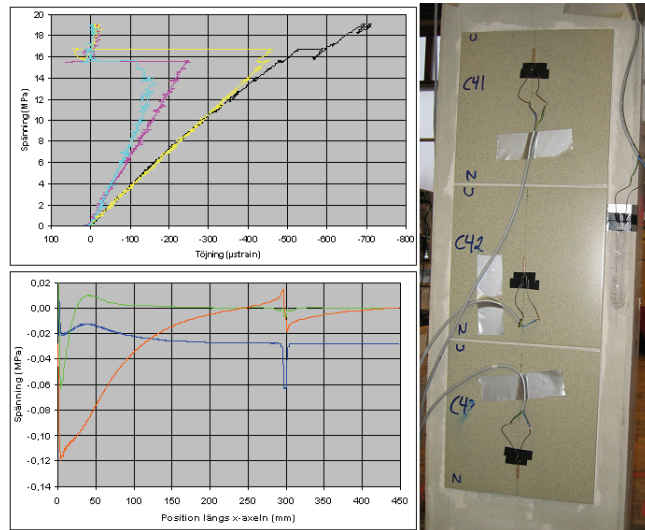


Mjukfogars inverkan på fast förankrade keramikgolv – En experimentell och numerisk studie



Martin Jonasson, Erik Månsson

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lund Universitet, 2007

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Department of Structural Engineering
Lund Institute of Technology
Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Mjukfogars inverkan på fast förankrade keramikgolv – En experimentell och numerisk studie

Effects of expansion joints on fixed anchored ceramic tile floorings
– An experimental and numerical study

Martin Jonasson
Erik Månsson

2007

Abstract

This Master's Thesis investigates whether expansion joints should be placed between fields of ceramic tiles, which are recommended by distributors today. This thesis concludes that expansion joints do not relieve in-plane stresses in ceramic tile coverings attached with the thin-set method. As shear stresses in the adhesive layer in the vicinity of expansion joints can reach critical levels, using expansion joints can on the contrary be a disadvantage.

If excessive shrinkage of the concrete floors can not be avoided, floating floors should be considered instead of floors attached with the thin-set method.

MJUKFOGARS INVERKAN PÅ FAST FÖRANKRADE KERAMIKGOLV
– EN EXPERIMENTELL OCH NUMERISK STUDIE

Rapport TVBK-5148
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK-07/5148+100p

Examensarbete
Handledare: Miklós Molnár
Februari 2007

FÖRORD

Examensarbetet har utförts i samarbete med CC Höganäs Byggkeramik AB och Byggkeramikrådet. Våra kontaktpersoner på respektive plats har varit Kenneth Klang och Niklas Bäckstedt.

Det bör påpekas att en missuppfattning av syftet med rapporten upptäcktes halvvägs genom arbetet. Vi trodde att uppdragsgivaren ville undersöka hur golvet skulle bete sig om bara mjukfogar används mellan alla plattor, när de i själva verket ville veta om deras rekommendationer på avstånd mellan mjukfogar är rimligt. De ville också veta om mjukfogarna är nödvändiga att använda, och om de ”hjälp eller stjälper” konstruktionen. Om inte detta missförstånd hade uppstått skulle förmodligen våra laborationer sett något annorlunda ut.

Vi vill tacka CC Höganäs Byggkeramik AB, Byggkeramikrådet och Starka betongindustrier för bidrag till provningsmaterial och information om keramikbranschen.

Ett stort tack även till vår handledare Miklós Molnár, som har varit ett stort stöd under detta arbete.

Trevlig läsning!

Martin Jonasson, Erik Månsson

Lund februari 2007

MJUKFOGARS INVERKAN PÅ FAST FÖRANKRADE KERAMIKGOLV
– EN EXPERIMENTELL OCH NUMERISK STUDIE

SAMMANFATTNING

Det finns huvudsakligen två varianter av keramiska golv som används i nuläget, tunnskiktmetoden och flytande golv. Idag finns problem vid plattsättning på större golvytor, såsom stora publika lokaler och industrier. Plattorna kan lossna och så kallad ”bom” uppstår. För dessa större konstruktioner delas golvet in i fält med mjukfogar emellan för att minska påfrestningarna som leder till bom.

Syftet med denna undersökning var att ta reda på om mjukfogar avlastar klinkergolv utförda med tunnskiktmetoden. Vi undersökte var brottet initieras i ett plattfält beroende på om mjukfogar används eller inte. För att minska antalet variabler, gjordes studien för en typ av fästmassa, fogbruk, mjukfog samt klinkerplatta. Keramiska beläggningar och betongunderlagets mekaniska beteende studerades med hjälp av FE-modellering i datorprogrammet BRIGADE, där alla material antogs vara linjärelastiska. För att verifiera rimligheten i FE-modellen genomfördes dessutom provning som skulle likna en del av ett golv.

Avlastningseffekten för normalspänningen i plattans plan för klinkerbeläggningen vid användning av mjukfogar är begränsad. De närmsta plattorna på var sida om fogen blir avlastade, men i gengäld uppstår en stor skjuvspänning i fästmassan. Spänningsbilden vid en mjukfog liknar den vid en fri kant, där det har visat sig att brott oftast uppstår. Skjuvbrott initieras i fästmassan 0-4 mm från en mjukfog eller en fri kant.

Fästmassans egenskaper avgör avlastningsområdets storlek. Fästmassan som användes i denna undersökning hade en elasticitetsmodul kring $E = 1 \text{ GPa}$ då tjockleken på fästmassan under klinkerplattorna var cirka 3 mm. Under dessa förutsättningar avlastar en mjukfog ett område på 0,45 m på var sida om fogen vilket medför att mjukfogar troligtvis inte gör någon nytta mellan plattfält. Används istället en flexibel fästmassa med en styvhet i storleksordning med mjukfog, avlastas ett område på 1 m på var sida om fogen. Problemet med bom löses alltså inte om en mer flexibel fästmassa används med liknande hållfasthetsvärden som vårt flytfix.

Då en lokal uppvärmning i form av exempelvis solinstrålning eller varmvatten-spolning belastar klinkerbeläggningen fortplantas inte spänningarna någon längre sträcka i golvkonstruktionen (0,3 m). Skjuvbrott initieras i fästmassan under anslutningar mellan belastade fogar och klinkerplattor.

Är det inte möjligt att begränsa töjningar från krympning i betongen och uppvärmning av klinkerbeläggningen så pass mycket att bom undviks bör en flytande golvkonstruktion användas istället för en fast förankrad konstruktion.

MJUKFOGARS INVERKAN PÅ FAST FÖRANKRADE KERAMIKGOLV
– EN EXPERIMENTELL OCH NUMERISK STUDIE

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

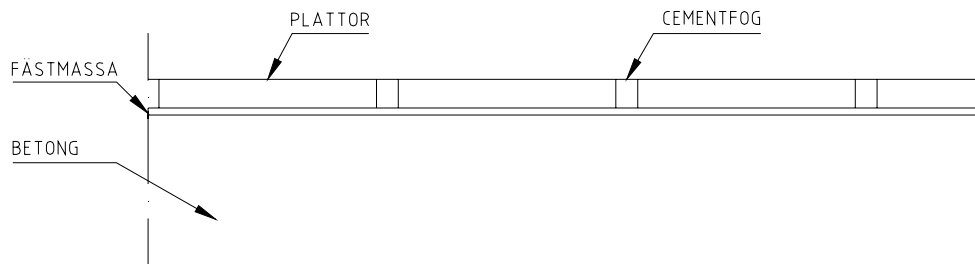
1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Problematisering	3
1.3	Syfte.....	3
1.4	Fokus/Avgränsning	3
1.5	Arbetets uppläggning	4
2	METOD	5
3	MODELLERING.....	7
4	BESTÄMNING AV DYNAMISK E-MODUL HOS INGÅENDE MATERIAL.....	9
4.1	Introduktion	9
4.2	Utförande	9
4.3	Resultat och Analys	10
4.4	Materialgenskaper i FE-modellering	11
5	FÖRSTUDIE: TRYCKPROVNING - KLINKERBELAGDA MARKSTENAR....	13
5.1	Introduktion	13
5.2	Provning.....	14
5.3	Sammanfattande resultat	22
6	KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING	23
6.1	Introduktion	23
6.2	Provning.....	25
6.3	Datorberäkning	33
6.4	Jämförelse: Provning – Beräkning	37
6.5	Sammanfattande resultat	39
7	GOLVKONSTRUKTIONER - MODELLERING	41
7.1	Introduktion	41
7.2	Fall 1: Platta på mark med fri kant - Krympning i betong.....	43
7.3	Fall 2: Snitt i ett golv - Lokal uppvärmning av klinkerskikt	54
7.4	Jämförelse: Modellering - Provningsresultat.....	60
7.5	Sammanfattande resultat	62
8	SLUTSATS.....	63
9	DISKUSSION.....	65
10	REFERENSLISTA	67
11	APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN	71
12	APPENDIX B: PROVNING PELARE	83
13	APPENDIX C: DYNAMISKA E-MODULER.....	89

MJUKFOGARS INVERKAN PÅ FAST FÖRANKRADE KERAMIKGOLV
– EN EXPERIMENTELL OCH NUMERISK STUDIE

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Användning av keramiska plattor har anor långt bak i tiden och är idag ett populärt material att sätta på väggar och golv. Det finns huvudsakligen två varianter av keramiska golv som är satta i cementbruk. Den första och vanligaste innebär en fast förankring av plattorna till underlaget. Då plattorna är fast förankrade kommer dessa att samverka med den underliggande betongens rörelser. Ursprunget till rörelserna kan vara såväl krympning och krypning i betongen samt volymökning i klinkerplattorna orsakade av temperaturdifferens eller fuktupptagning. Fast förankrat golv kan antingen utföras med tunt fästmassaskikt (~ 1-3 mm) eller tjockt fästmassaskikt (~ 40-50 mm). Fram till 1950-talet användes i stort sett bara metoden med tjockt fästmassaskikt, medan det i nuläget är den andra principen som används, den så kallade tunnskiktmetoden, se Figur 1-1.

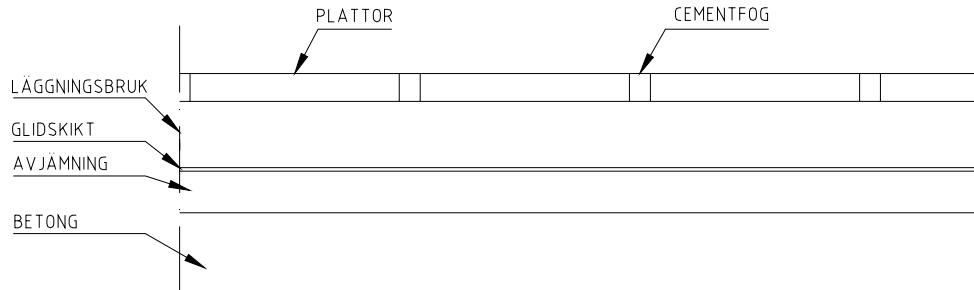


Figur 1-1. Illustration av golv med fast förankring

Den andra typen av golv har ett glidskikt mellan underlaget och plattorna, så att dessa verkar fritt från betongen, vilket kallas flytande golv, se Figur 1-2.

Vid större konstruktioner delas både fast förankrade och flytande golv in i fält med mjukfogar emellan för att minska spänningar i golvet. För fast förankrade golv går mjukfogen endast ner till fästmassan medan den för flytande golv utförs ända ner till glidskiktet. Genom denna sistnämnda lösning tar de mjuka fogarna upp eventuell volymökning i klinkerplattorna. Flytande golv används alltid med tjockt fästmassaskikt (~ 40-50 mm) och i huvudsak i hårt belastade miljöer. Idag används generellt fast förankrade konstruktioner.

INLEDNING



Figur 1-2. Illustration av flytande golv

För trafikbelastade golv, där mjukfogar används, krävs kantförstärkning utmed hela fogen för att keramikplattorna inte ska spricka. Denna förstärkning utförs med ett plattjärn eller en stålprofil längs med fogen.

Idag finns problem vid plattsättning på större golvytor, såsom stora publika lokaler och industrier. Plattorna kan lossna och då uppstår så kallad ”bom”. Uttrycket ”bom” kommer från det ljud som uppstår när man knacker på keramikplattor då dessa har lossnat från underlaget. Skadorna i ett golv inträffar oftast i mitten eller i utkanten av ett plattfält (Klang 2006, Wester 2006). Plattorna lossnar på grund av att beläggning och underlag har olika deformationsegenskaper vilket ger upphov till spänningar. Då skjuvspänningen i fästmassan blir för stor uppstår bom och då normalspänningen i klinkerskiktet har för högt värde uppstår klinkerhävning.

En äldre undersökning (Näslund 1960) redogör för att klinkerhävningensrisken ökar på platser i plattfältet där en vertikalt riktad spänningskomponent finns. Enligt denna författare kan spänningskomponenten uppkomma där det är fall på golvet, där fogarna har olika fyllnadsgrad eller genom plattornas inbördes nivåskillnad. Skillnaden i fyllnadsgrad kan uppstå för golv i industrier där starka kemikalier används och fogarna därmed fräts ner. Då fogarna i golvet har frätts ner olika mycket ändras tryckspänningsresultanten i plattskiktet.

En tidigare undersökning (SIAB Teknik 1995) kom fram till att även felaktigt val av fästmassa och bristande arbetsutförande kan vara orsak till problem. De rekommenderade därför att fästmassa med tillräcklig flexibilitet och tjocklek ska användas samt att arbetsutförandet ska förbättras.

1.2 Problematisering

Idag byggs det mycket nya hus och anläggningar där betongstomme är ett vanligt alternativ. Det tar lång tid för en normal betong att nå krympningens slutvärde, men det höga tempot i branschen gör att byggföretagen ändå vill lägga klinker i ett så tidigt skede som möjligt. Detta innebär att en betydande krympning finns kvar i betongen, vilket ger en risk för stora spänningar på sikt för nya golvkonstruktioner.

En metod som används för att förhindra att klinkerplattorna lossnar är att sätta mjukfogar med visst avstånd i golvet. Rekommendationer om hur mjukfogar ska sättas är baserade på grova uppskattningar och det är inte känt hur mycket klinkerplattorna avlastas med denna metod. Avlastas golvet tillräckligt av dessa mjukfogar eller behöver de användas med kortare intervall? Kan det till och med vara så att det inte gör någon skillnad med eller utan mjukfogar?

1.3 Syfte

Målet med undersökningen är att ta reda på om mjukfogar avlastar golvkonstruktioner så att brott i keramiska beläggningar kan undvikas. Om så är fallet, men inte byggkeramikbranschens rekommendationer om avstånd mellan mjukfogar är tillräckligt, ska vi ta reda på hur tätt de behöver sättas i framtiden.

Arbetet ska ge en fördjupad insikt och kunskap om bom-fenomenet och hur brott uppkommer i de enskilda plattorna. Vi ska undersöka var brottet initieras i ett plattfält beroende på om mjukfogar används eller inte. Syftet är också att förstå och beskriva klinkerbeläggningens beteende vid termiska- och fuktrelaterade laster i betonggolvet och klinkerbeläggningen.

1.4 Fokus/Avgränsning

I samråd med uppdragsgivarna, CC Höganäs Byggkeramik AB och Byggkeramikrådet, har vi bestämt följande avgränsningar.

Arbetet avser endast klinkerplattor på betonggolv som sätts med cementbaserad fästmassa enligt tunnskiktmetoden. Denna metod innebär att fästmassan bearbetas till angiven tjocklek med tandad spackel, varpå plattorna appliceras med tryck och rörelse för att få bra bakfyllnadsgrad.

Plattsättningen antas vara fackmannamässigt utförd, vi beaktar alltså inte eventuella fel i arbetsutförandet, såsom öppetid och appliceringmetod. För att minska antalet variabler, och då detta arbete är begränsat till ett halvår, görs studien för en typ av fästmassa, fogbruk, mjukfog samt klinkerplatta. Modellering sker i 2D, med linjära beräkningar.

1.5 Arbetets uppläggning

I denna rapport är arbetet upplagt enligt följande:

- Testning av ingående komponenter (kapitel 4)
- Förstudie (kapitel 5)
- Kalibreringsförsök (kapitel 6)
- Modellering av klinkerbeläggnings beteende (kapitel 7)

2 METOD

Keramiska beläggningar och betongunderlagets mekaniska beteende studeras med hjälp av FE-modellering. Provningar av komponenter och mindre golvpartier genomförs för att verifiera rimligheten i FE-modellen. Alla material i modellen antas vara linjärelastiska. Den dynamiska E-modulen mäts för de ingående materialen, för att förbättra datorberäkningen.

Provning görs för klinkerplattor som är 296×296 mm. Dessa appliceras på betongpelare som sedan trycks i en maskin varpå brottbeteendet samt töjningen då bom inträffar registreras. Detta görs både genom okulär besiktning samt genom att montera töjningsgivare på betong och klinker. För att vara bättre förberedda till denna provning görs en förstudie med mindre klinkerplattor av dimension 96×96 mm och mindre betongprov.

Vid laborationerna studeras det lokala brottbeteendet för tre klinkerplattor med cement- respektive mjukfogar. Resultaten jämförs med en simulering av samma dimensioner i datorprogrammet BRIGADE. Samverkan mellan många plattor är inte praktiskt möjligt att genomföra i provning då detta skulle kräva en provkropp som är flera meter lång.

För att simulera ett helt golv görs en större modell i datorprogrammet och bedömning om hur mjukfogar påverkar en hel golvkonstruktion sker sedan utifrån resultaten. Vi har valt att arbeta med två olika typer av golvkonstruktioner. Lasterna som verkar på dessa konstruktioner är betongkrympning och volymökning i klinkerbeläggning. För att efterlikna dessa, införs en negativ temperaturlast på betongen respektive positiv temperaturlast på klinkerplattorna.

3 MODELLERING

Vid modelleringen används BRIGADE/Plus, som är ett Finita Element program anpassat för konstruktions- och broberäkningar. Programmets beräkningsmotor är ABAQUS/Standard och användargränssnittet är ABAQUS/CAE.

Så här utförs tvådimensionell modellering i BRIGADE/Plus:

Först ritas formerna av de ingående ytorna och sedan införs materialegenskaper för dessa. Ytorna placeras på rätt plats och rektanglarna sammankopplas genom att ytornas frihetsgrader låses i kontaktpunkter (detta kan liknas vid att ytorna ”limmas” mot varandra och därmed har full samverkan). Därefter införs randvillkor och laster. Det sista som görs är att bestämma elementtyp och storlek på elementen varpå beräkning kan göras.

Vid beräkningarna sätts tvärkontraktionstalet till 0,2 för alla ingående material och elementtypen som används heter CPS4R. Detta innebär beräkning enligt:

- Plan spänning
- Fyrsidiga element
- Linjär beräkning
- Reducerad integration

Plan spänning kan användas då tjockleken är försumbar i förhållande till ytans storlek. Reducerad integration används för att detta mjukar upp konstruktionens styvhet och därmed efterliknar verkligheten bättre (Ottosen, Petersson 1992). I Figur 3-1 illustreras skillnaden mellan reducerad och ej reducerad integration för ett element.



Figur 3-1. Reducerad respektive ej reducerad integration. X står för integrationspunkter

För att få en mindre modell och korta ner beräkningstiden införs symmetrisnitt där det är möjligt, detta för att båda sidor om snittet ger samma resultat. Symmetrin liknas vid ett rullupplag och är därmed låst för rörelser vinkelrät mot symmetrilinjen, men fri att röra sig parallellt med linjen.

MODELLERING

För att modellera krympning i betong och volymökning i klinkerskiktet används ekvation 3-1 med tillhörande konstanter.

Ekvation 3-1 (Burström 2002)

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (3-1)$$

ε - töjning

α - längdutvidgningskoefficient

ΔT - temperaturskillnad

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad \text{Betong}$$

$$\alpha = 6 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad \text{Klinker}$$

$$\alpha = 11 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad \text{Cementfog}$$

$$\alpha = 160 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad \text{Mjukfog}$$

Beräkningsmodellen ger bara relevanta resultat så länge materialen i verkligheten beter sig linjärt. För laster över detta, då till exempel sprickor har uppkommit, kan inte denna modellering användas utan måste då göras om till en olinjär modell. Detta behandlas dock inte i detta arbete.

4 BESTÄMNING AV DYNAMISK E-MODUL HOS INGÅENDE MATERIAL

4.1 Introduktion

Denna laboration görs för att få startvärden för E-modulerna hos de ingående materialen, vilka används i de fortsatta kapitlens modelleringar. Resonansfrekvensmetoden är en enkel metod som används för att mäta styvheter och den går att använda på betong, keramik, trä och andra relativt hårda material. En annan metod som kan användas för att få fram elasticitetsmoduler är balkböjningsförsök där nedböjning mäts och sedan räknas om till en E-modul genom att använda balkteori. Denna metod används dock inte i detta arbete.



Figur 4-1. Bild av provutrustning

4.2 Utförande

Den dynamiska E-modulen har bestämts med hjälp av ett instrument som heter GrindoSonic MK5 "Industrial". Detta är en frekvensmätare som används för att mäta provkroppens egenfrekvens genom oförstörande provning. Mätområdet för maskinen är 50 MPa – 750 GPa (Manual GrindoSonic 1990).

För att mäta egenfrekvensen läggs materialet på en skumgummiplatta varpå en analog givare hålls mot provkroppen. Provingen sker genom att försiktigt slå på materialet med en "liten hammare", vilken består av en stålkula limmad på ett flexibelt plasticskaft, se Figur 4-1.

Givaren skickar vidare signalen till GrindoSonic och den omvandlas till en egenfrekvens, vilken sedan räknas om till en E-modul genom ekvation 4-1 (Spinner & Tefft 1961). Denna formel kan användas då mätning sker på ett homogent och isotropt material (RILEM 1994), vilket klinker och cementbundna material kan anses vara.

Ett försök har även gjorts på E-modul för mjukfog, cementfog och fästmassa. Vi tillverkade då en form av plywoodskivor och gjorde balkar av dessa material. Den dynamiska E-modulen beräknas med Ekvation C-1, Appendix C.

4.3 Resultat och Analys

Indata för provkropparna finns i Tabell C- 1 (Appendix C) och resultatet redovisas i Tabell 4-1.

Material	Dynamisk E-modul (GPa)
Klinker Keradur	50
Fästmassa	5
Cementfog	17
Mjukfog	0,07

Tabell 4-1 Dynamiska E-moduler för ingående material. Testresultat från Grindosonic

Styvhetsvärdena som tagits fram för cementfog och klinkerplattor kan anses vara representativa för de datormodeller som används i resterande kapitel. Fästmassa och mjukfog är däremot mer tveksamma av olika anledningar. Fästmassan består av ett tunt skikt på ~1-3 mm mellan betong och klinkerplatta. Det är svårt att uppskatta vilken styvhet ett sådant skikt egentligen har eftersom egenskaperna i gränsskiktet mellan betong och klinker dominerar över egenskaperna i själva fästmassan. På grund av detta är det inte fästmassans styvhet som är intressant i vårt fall, utan en sammansatt styvhet baserat på både fästmassan och gränsskikten. Mjukfogen har en elasticitetsmodul som ligger väldigt nära nedre gränsen på GrindoSonic's mätområde och måste därför beaktas som osäker.

Experimentella undersökningar (Vermeltfoort 2005) visar att gränsskikt mellan keramiska material och cementbaserade fästmassor får lägre E-modul och sämre drag- och skjuvhållfasthet jämfört med provkroppar tillverkade av enbart den cementbaserade fästmassan. Förklaringen till att gränsskiktet har lägre elasticitetsmodul kan vara att betongen suger vatten från fästmassan, vilket då medför sämre härdning i massan.

Klinkermaterialets E-modul är baserat på mätning av fyra provkroppar och cementfogens E-modul är baserad på mätning av tre provkroppar (egentligen fyra, men det sista provet gav orimliga värden på grund av spricka). E-modulerna för fästmassa och mjukfog är framräknade för en provkropp per material. Mjukfogens E-modul kan egentligen sättas till ett lågt värde i modellering, men vi valde ändå att räkna ut en styvhet med dynamisk mätning för att få en uppskattning av dess storlek.

E-modulen för fästmassa och cementfog är beroende av vilken konsistens blandningen har. Vid fogning av golv bestäms blandningens konsistens mest av arbetbarheten och inte för några exakta delar av cement och vatten. Eftersom spridningen är stor i mätningen av dynamisk E-modul för cementfog (10-29 GPa) räknar vi med ett medelvärde av dessa mätningar. De olika provkropparna är gjutna vid olika blandningstillfälle, vilket också förklarar spridningen i resultatet. Fästmassans E-modul är endast ett startvärde i de fortsatta beräkningarna och korrigeras i senare kapitel.

4.4 Materialegenskaper i FE-modellering

Dynamiska E-moduler är i vanliga fall något högre än den statiska E-modulen RILEM (1994). För betong är den dynamiska E-modulen cirka 15 % högre än den statiska (RILEM 1977). För enkelhetens skull har vi använt samma procentuella korrigering för våra material då elasticitetsmodulerna endast är en första uppskattning.

Vid den fortsatta modelleringen använder vi statiska E-moduler eftersom dessa bättre överensstämmer med de förlopp som modelleras. E-modulerna finns att se i Tabell 4-2 och värden i tabell är baserade på antagandet $E_{\text{stat}} = 0,85 \times E_{\text{dyn}}$.

Material	Statiska E-modul (GPa)
Klinker Keradur	43
Fästmassa	4
Cementfog	15
Mjukfog	0,06

Tabell 4-2 Ungefärliga statiska E-moduler för ingående material.

5 FÖRSTUDIE: TRYCKPROVNING - KLINKERBELAGDA MARKSTENAR

5.1 Introduktion

Denna förstudie gör vi för att få bättre grepp om keramiska belägningars mekaniska beteende vid tryckbelastning i belägningens plan. Brottbeteendet för de två olika varianterna av fogar studeras vilket ger bättre kunskap om var töjningsgivare ska placeras. En annan viktig aspekt är att identifiera bom för att på så vis följa brottets utbredning.

När vi bestämde hur laborationen skulle utföras utgick vi från en av Sveriges Provnings- och forskningsinstituts rapporter (SP AR 1994:56). I denna undersökning appliceras en klinkerplatta med fästmassa på en marksten av betong och denna trycks sedan i provningsmaskin. Därefter undersöks vid vilken betongtöjning bom uppstår.

Vi har ändrat på uppställningen något och valt att sätta tre mindre klinkerplattor med fog emellan på en lika stor provkropp, se Figur 5-1. Vi testar både att använda mjukfog och att använda cementfog, för att få en uppskattning om hur brottet uppstår för enskilda klinkerplattor. På markstenarna och på klinkerytan sätts töjningsgivare för att initieringen av bom ska registreras. Vi utförde plattsättningen själva för att få en känsla av materialen och eftersom detta försök enbart ska ge en indikation till upplägningen av huvudstudien som redovisas i kapitel 6.



Figur 5-1. Bild av provuppställning

5.2 Provning

5.2.1 Material

Vid laborationen har material nedan använts.

Klinkerplattor: CC Höganäs Grynna $96 \times 96 \times 8$

Fästmassa: CC Höganäs flytfix FB 1200

Cementbaserad fog: CC Höganäs klinkerfog FB 20

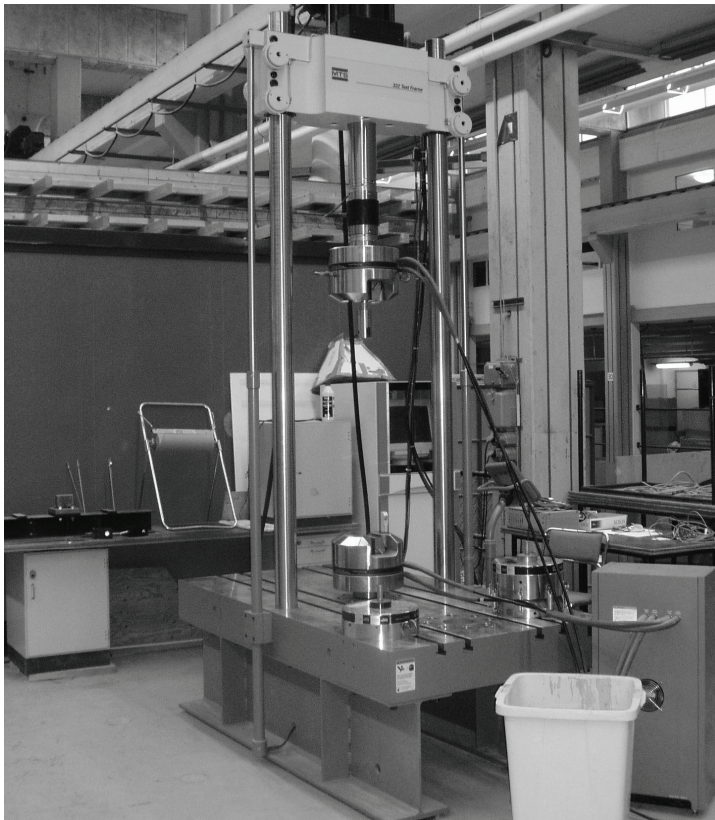
Mjukfog: CC Höganäs rörelsefogmassa FB 53

Betong: Nordform prefabricerad marksten $175 \times 350 \times 70$

Provningssmaskin MTS 322 Test frame, se Figur 5-2

Användningsområde: Statiskt och dynamisk tryck- och dragprovning.

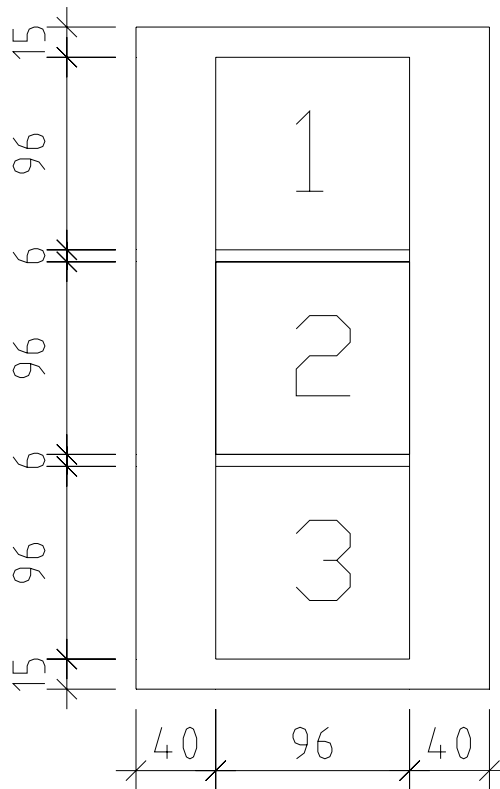
Mätområde: 0-50 och 0-500 kN



Figur 5-2. Bild av provningsutrustning

5.2.2 Provkroppar och försöksuppställning

Samtliga trycktytor på betongen sågades planparallella varefter fästmassan blandades till enligt anvisning. Flytfix och klinkerplattor applicerades sedan på ena sidan av markstenen. Efter 5 timmar och tillräcklig härdning av fästmassan gjordes fogning. Fogarna fuktades sedan under 3 dygn för att cementet skulle härda under goda förhållanden. Töjningsgivare limmades fast på var sida av provkropparna C1 och M1 för att kontrollera ifall någon böjningseffekt för betongkroppen uppstod. Utseende och mått för provkropp kan ses i Figur 5-3.



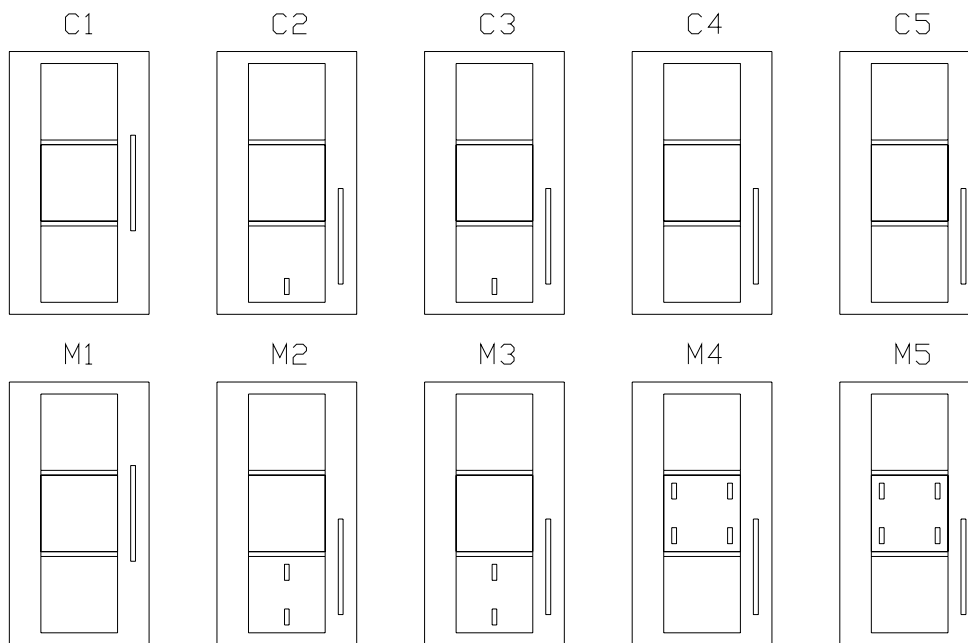
Figur 5-3. Mått och plattnumrering för provkropp

FÖRSTUDIE: TRYCKPROVNING - KLINKERBELAGDA MARKSTENAR

Provningsen utförs enligt följande:

Provkropparna monteras i provningsmaskinen och lasten ökas stegvis med 25 kN under 14 laststeg från 0-350 kN. Efter varje laststeg sker en okulär besiktning där även förekomsten av bom undersöks genom att försiktigt knacka på klinkerplattorna med en stålstav. Töjningsgivare monteras på provkropparna enligt Figur 5-4 för att fånga upp beteendet då bom uppstår.

För enkelhetens skull har provkropparnas namn förkortats där C är cementfog och M är mjukfog mellan plattorna. Siffrorna är ett sätt att hålla reda på vilken provkropp som är vilken och vi testar 5 stycken av vardera fogtyp. Trådtöjningsgivarna på klinkerplattorna sitter 10 mm från fog/kant och är 20 mm långa. Betongtöjningsgivarens längd är 120 mm. När både positiva och negativa töjningar (drag och tryck) förekommer inom mätområdet blir den töjning som töjningsgivarna registrerar ett medelvärde av detta och måste beaktas när ett sådant område är aktuellt.



Figur 5-4. Placering av töjningsgivare för marksten, C=Cementfogar; M=Mjukfogar

□ = töjningsgivare

5.2.3 Resultat och Analys

5.2.3.1 Manuell undersökning

Den inledande provningen av markstenen visade att betongen klarade en last motsvarande 33 MPa. I de fortsatta försöken valde vi därför att inte gå över denna last då bakfyllnadsgraden ska kontrolleras under plattorna efter provningen. Lasten då bom upptäcktes är markerat med ett "X" i Tabell 5-1 nedan. Den fortsatta utbredningen av bom studerades också, detta är markerat med ett "O". Illustrationer för var bom uppstod finns i sin helhet i Figur 5-5. För de flesta proven med cementfog uppstod bom vid de yttre kanterna och spred sig in mot mitten. För proven med mjukfog uppstod bom längs fogarna och spred sig sedan in mot plattans centrum.

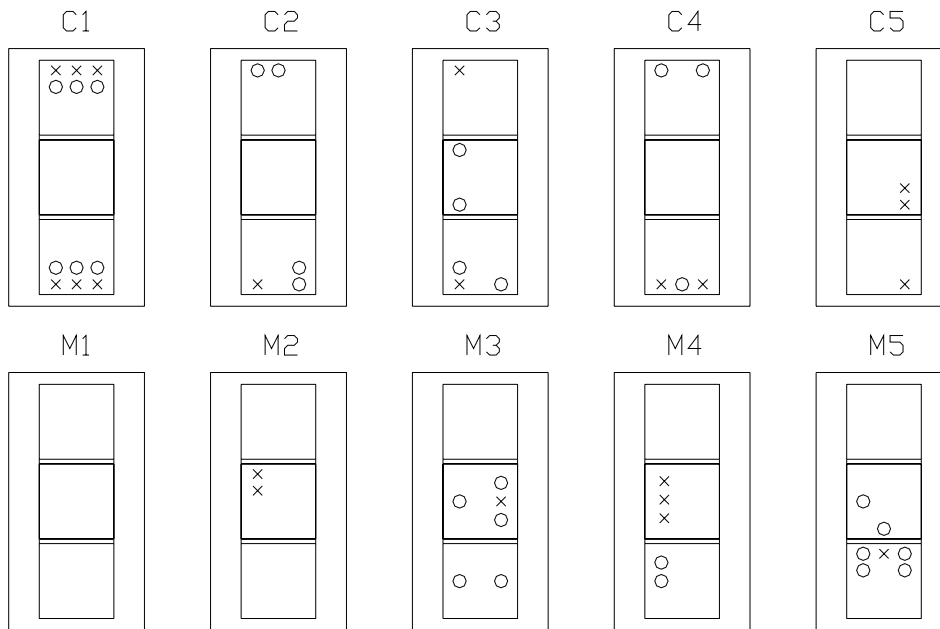
Laststeg [MPa]		Bom upptäckt									
		C1	C2	C3	C4	C5	M1	M2	M3	M4	M5
0,0	2,0										
2,0	4,1										
4,1	6,1										
6,1	8,2										
8,2	10,2										
10,2	12,2										
12,2	14,3										
14,3	16,3				X						
16,3	18,4	X		X	O						X
18,4	20,4	O	X	O							O
20,4	22,4		O								
22,4	24,5					X			X		
24,5	26,5								O	X	
26,5	28,6						X			O	

Tabell 5-1. Protokoll: Manuell undersökning av bom för marksten.

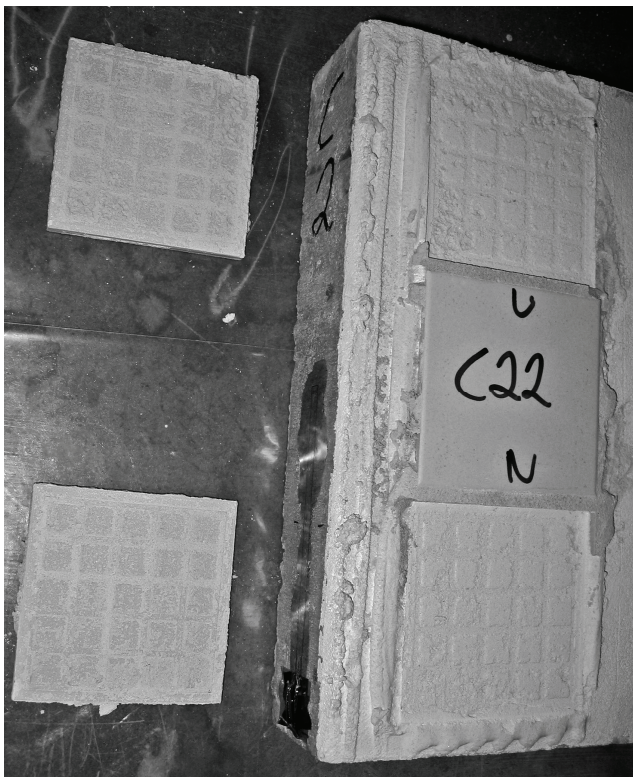
X = Uppkomst av bom, O = Utbredning av bom

För prov M1 uppstod ingen bom inom ovan nämnda intervall (0-28,6 MPa).

FÖRSTUDIE: TRYCKPROVNING - KLINKERBELAGDA MARKSTENAR



Figur 5-5. Förekomst av bom för marksten: X = första uppkomst, O = fortsatt utbredning



Figur 5-6. Utseende av marksten efter tryckning

Brottytan är alltid mellan klinker och fästmassa, som kan ses i Figur 5-6. Därför kommer vi i det fortsatta arbetet bara undersöka detta skikt vid modellering, inte fästmassa-betong.

5.2.3.2 Registrering med töjningsgivare

Givarnas position för proven är förkortade i detta kapitel. Förkortningarna är följande:

n = nedre

ö = övre

v = vänster

h = höger

m = mitt

- = ingen töjningsgivare

Det kan exempelvis stå klinker 3nv, vilket innebär trådtöjningsgivare längst ner till vänster på nedersta klinkerplattan. Plattnumrering är som i Figur 5-3.

I Diagram 5-1 visas spänning mot töjning för provkropp C3. Vid belastningen 10 MPa kan plattan inte ta mer töjning och börjar då avlastas vilket innebär att plattan har släppt från underlaget. Betongtöjning läses sedan ut för denna spänning (180 μ strain för C3). Detta har gjorts för samtliga försök och finns i Tabell 5-2. Resterande diagram för töjningsgivarna finns i Appendix A.

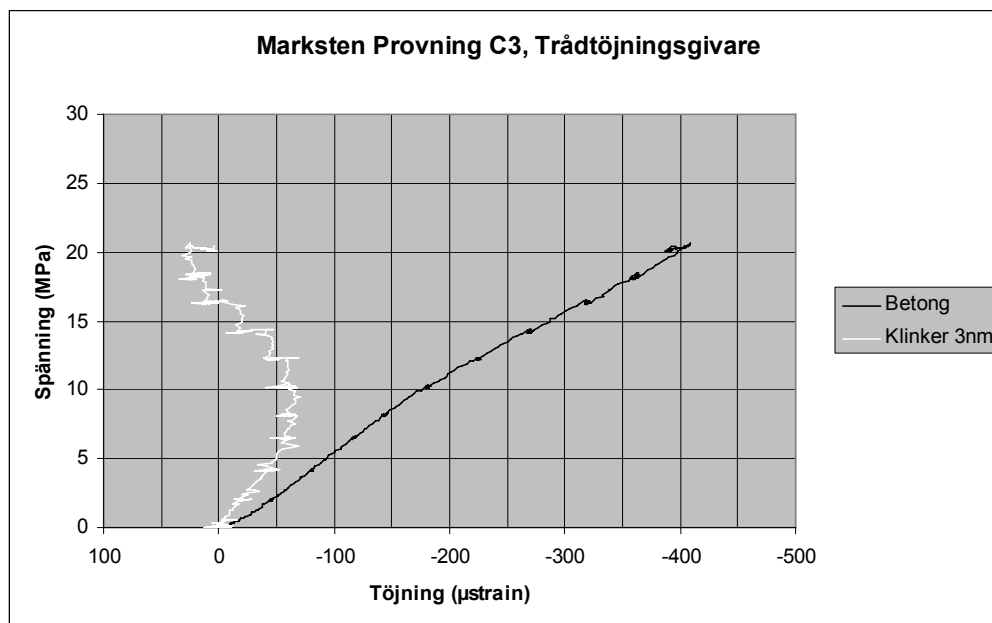


Diagram 5-1. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning C3, töjningsgivare för betong och klinkerplatta

FÖRSTUDIE: TRYCKPROVNING - KLINKERBELAGDA MARKSTENAR

Diagram 5-1 visar att provkroppen har linjärt beteende tills betongens töjning nått ungefär 50 μstrain . När detta sker försämras samverkan mellan betong och klinkerplatta, och detta händer på grund av att brott har uppstått i fästmassan.

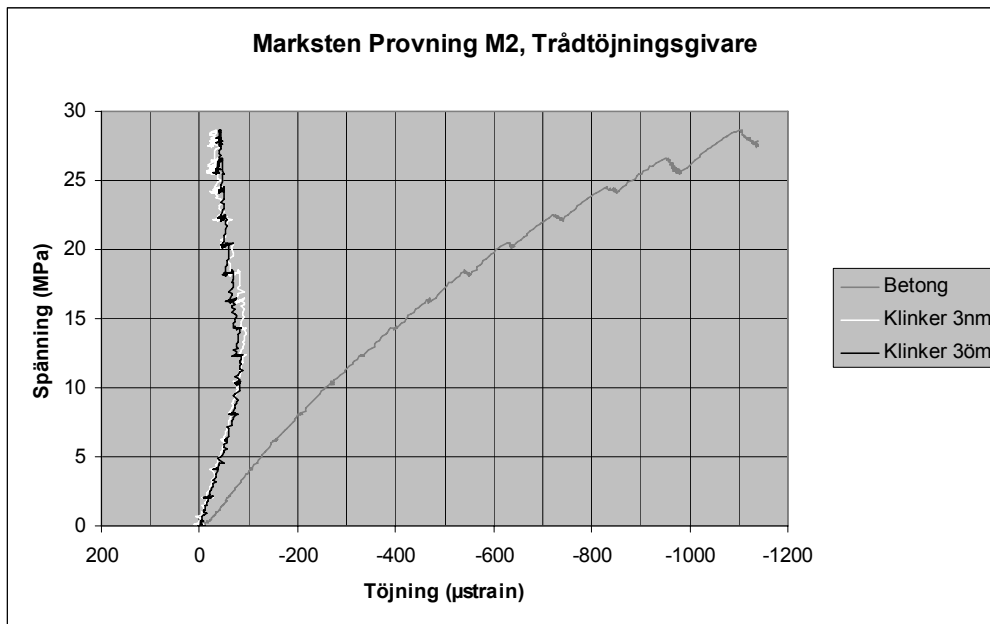


Diagram 5-2. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M2, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

Diagram 5-2 visar att provkroppen har linjärt beteende tills betongens töjning nått ungefär 270 μstrain , därefter minskar töjningen i klinkerplattan. Spridningen mellan de olika provkropparna är alltså stor.

FÖRSTUDIE: TRYCKPROVNING - KLINKERBELAGDA MARKSTENAR

En jämförelse av betongtöjning mellan den manuella undersökningen för bom gentemot maximal töjning registrerat med töjningsgivare finns i Tabell 5-2 med värden från Appendix A.

Prov	Platta/position	Trådtöjningsgivare Maximal töjning		Manuell undersökning Första uppkomst av bom	
		Last (MPa)	Betong (μ strain)	Last (MPa)	Betong (μ strain)
C1	-	-	-	18	490
C2	3/nm	8	180	20	550
C3	3/nm	10	180	18	370
C4	-	-	-	20	550
C5	-	-	-	25	800
M1	-	-	-	-	-
M2	3/öm	12	330	29	1100
M2	3/nm	14	400	29	1100
M3	3/öm	12	200	25	530
M3	3/nm	12	200	25	530
M4	2/öv	16	300	27	520
M4	2/öh	16	280	27	520
M4	2/nv	20	390	27	520
M4	2/nh	18	350	27	520
M5	2/öv	20	590	18	530
M5	2/öh	20	590	18	530
M5	2/nv	18	200	18	530
M5	2/nh	18	200	18	530

Tabell 5-2. Töjning i betong vid bom. Jämförelse mellan trådtöjningsgivare och manuell undersökning

Vidhäftningsbrott upptäcks tidigt vid användning av trådtöjningsgivare, vilket kan ses i Tabell 5-2. Vid den manuella undersökningen krävs större utbredning av brottet för att det ska ge utslag.

Att knacka efter bom med en stålstav visade sig fungera bra då brottets utbredning ska studeras. Laststegen är dock något stora i vår undersökning, vilket ger ett relativt osäkert värde på brottlasten. Att använda töjningsgivare på klinkerytan är inte en bra metod för att följa utbredningen av brottet, eftersom det då krävs många givare på plattorna. Töjningsgivarna som är placerade nära fri kant eller vid fog ger förmodligen ett mer exakt värde på brottlasten än vid manuell undersökning. För att registrera när bom inträffar ska därför givarna placeras nära en kant eller fog, eftersom det är där brottet har initierats i provningen.

5.3 Sammanfattande resultat

För de flesta proven med cementfog uppstod bom vid de yttre kanterna och spred sig in mot mitten. För proven med mjukfog uppstod bom längs fogarna och spred sig sedan in mot plattans centrum. Brottytan i fästmassan är alltid i gränsskiktet mellan klinker och fästmassa.

Vidhäftningsbrott upptäcks tidigt vid användning av rätt placerade trådtöjningsgivare. Vid den manuella undersökningen krävs större utbredning av brottet för att det ska ge utslag. Att knacka efter bom med en stålstav visade sig fungera bra då brottets utbredning ska studeras. Töjningsgivarna som är placerade nära fri kant eller vid fog ger ett mer exakt värde på brottlasten än vid manuell undersökning. Givarna ska därför placeras nära en kant eller fog för att brott ska upptäckas, eftersom våra provningar visar att brottet initieras i dessa områden.

6 KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING

6.1 Introduktion

Denna undersökning görs för att uppskatta fästmassans E-modul i gränsskiktet mellan klinkerplattor och ett underlag av betong. Startvärdet på fästmassans E-modul kommer från kapitel 4 och är där framprovad till 4 GPa. Genom att montera töjningsgivare på klinkerplattans yta och betongkroppen fås de verkliga töjningarna. Dessa jämförs sedan med töjningsvärden från datormodellen och genom att passningsräkna kan styvheten på fästmassaskiktet uppskattas. Kunskaper om fästmassans mekaniska egenskaper används sedan vid modellering av klinkerbeläggningars beteende vid termiska och fuktrelaterade laster, kapitel 7.

Vi vill även identifiera de spänningstillstånd i fästmassan som ger upphov till brott och i senare kapitel jämförs detta resultat med golvkonstruktionerna. Detta görs genom att se vid vilken töjning som brott uppstår och vid vilken last detta sker. Provkroppen modelleras sedan upp i datorn och spänningarna i fästmassan räknas ut vid provningens brottlaster.

När vi bestämde hur laborationen skulle utföras utgick vi från en av Sveriges Provnings- och forskningsinstituts rapporter (SP AR 1994:56). I den undersökningen appliceras en klinkerplatta med fästmassa på en marksten av betong och trycks sedan i provningsmaskin, därefter undersöks vid vilken betongtöjning brott uppstår.

Vi har ändrat på uppställningen något och valt att sätta tre större klinkerplattor med fog emellan på en stor provkropp, se Figur 6-1. Vi testar både att använda mjukfog och cementfog, för att få en uppskattning om hur brottet uppstår i enskilda klinkerplattor. På betongen och på klinkerytan sätts töjningsgivare för att initieringen av brott ska registreras. Då resultaten i denna provning är av större vikt än vid förstudien så utförde vi inte plattsättningen själva, utan anlät en auktoriserad plattsättare från CC Höganäs.



Figur 6-1. Bild av provuppställning

6.2 Provning

6.2.1 Material

Klinkerplattor: CC Höganäs Keradur 296 × 296 × 8

Fästmassa: CC Höganäs flytfix FB 1200

Cementbaserad fog: CC Höganäs klinkerfog FB 20

Mjukfog: CC Höganäs rörelsefogmassa FB 53

Betong: Starka Betongpelare C32/40; 400 × 400 × 1500

Provningsmaskin M.A.N, se Figur 6-2

Användningsområde: Statisk tryckprovning.

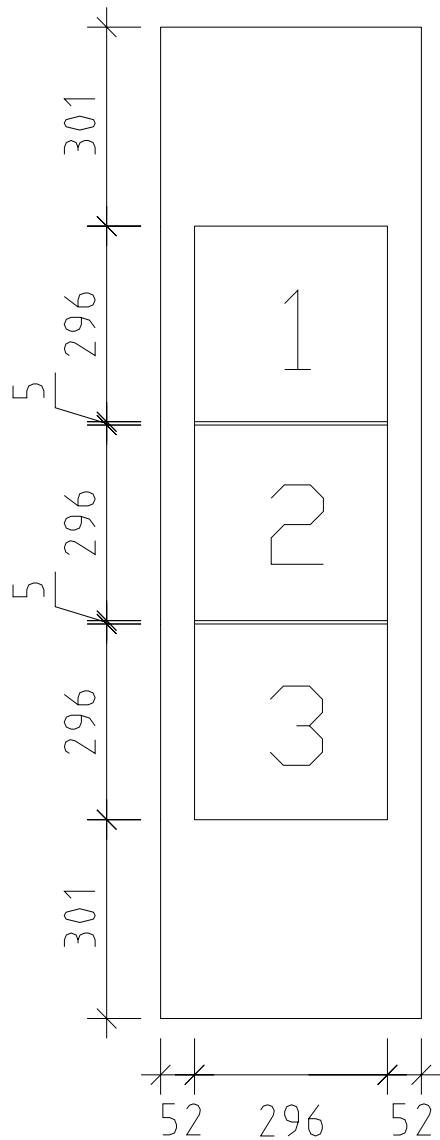
Mätområde: 1000-10 000 kN



Figur 6-2. Bild av provningsutrustning

6.2.2 Utförande

Klinkerplattorna appliceras enligt Figur 6-3 och provningen utförs enligt följande: Provkroppen lyfts in i maskinen och cementpulver appliceras på tryckytan då dessa i flera fall inte är planparallella. Lasten ökas stegvis enligt Tabell 6-1. Efter varje laststeg sker en okulär besiktning där även förekomsten av bom undersöks genom att försiktigt knacka på klinkerplattorna med en stålstav.



Figur 6-3. Mått och plattnumrering för pelare

KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING

För enkelhetens skull har provkropparnas namn förkortats, där C är cementfog och M är mjukfog mellan plattor. Siffrorna är ett sätt att hålla reda på vilken provkropp som är vilken och vi testar 4 stycken med cementfog och 2 stycken med mjukfog.

För C1 och M1 sitter givarna 4 mm från fog/kant.

För C2 sitter översta givaren 70 mm från fogen och den understa 40 mm från kanten.

För M2 sitter översta givaren 40 mm från fogen och den understa mitt på platta 3.

För C3 och C4 sitter den övre och undre givaren 40 mm från respektive kant, medan den mittersta sitter mitt på platta 2.

Anledningen till valet på avstånd från fog/kant är att vi trodde att vi skulle fånga upp när brott uppkommer tidigare ju närmare kanten/fogen som givaren satt (Prov C1, M1). Det var emellertid inte på detta vis eftersom töjningen varierade mellan tryck och drag och därmed gav ett medelvärde av detta. Vi valde därför i resterande prov att sätta givarna 40 mm från kant och dessutom sattes ytterligare en givare på ett avstånd så att dennas töjning blev jämförbar med betonggivarens töjning (Prov C2, C3, C4, M2). Dessa extra givare sattes i mitten av en klinkerplatta med undantag för prov C2 där den satt 70 mm från fog, vilket dock ändå ger jämförbart resultat med betonggivaren.

Töjningsgivarna på klinkerplattorna är 20 mm långa. Töjningsgivaren, som sitter mitt på betongens högersida, är 120 mm lång.

Trådtöjningsgivarnas placeringar finns även illustrerade i Figur 6-4.

KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING



Figur 6-4. Placering av töjningsgivare för provkropparna, □ = töjningsgivare

Resultat och Analys

6.2.2.1 Manuell undersökning

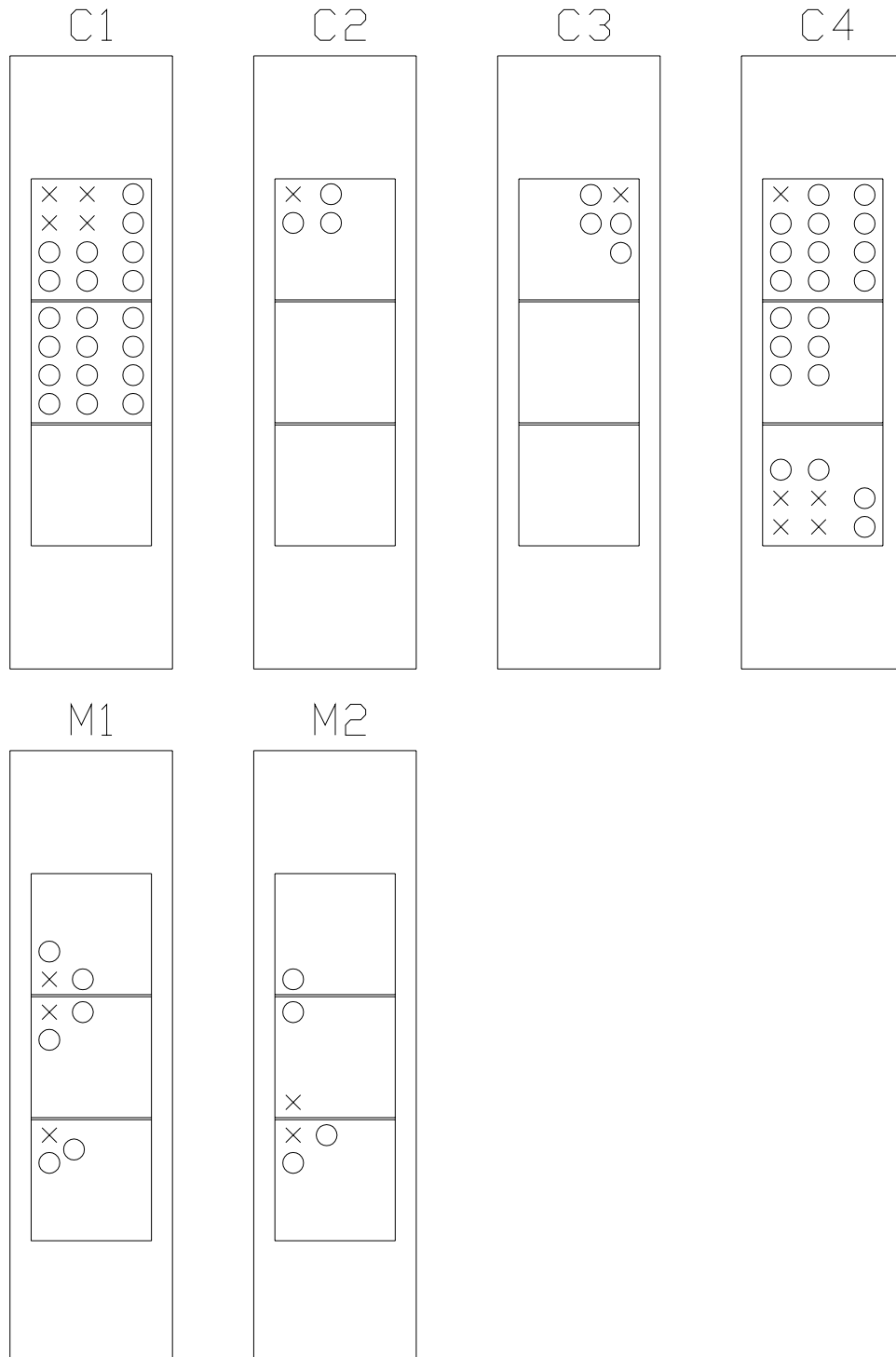
Enligt uppskattning baserade på gällande normer ska pelaren tåla 30,5 MPa. I de fortsatta försöken valde vi därför att inte gå över denna belastning då vi ville kontrollera bakfyllnadsgraden under plattorna efter provningen. Uppkomst av bom är markerat med ett "X" i Tabell 6-1. Den fortsatta utbredningen av bom studerades också, detta är markerat med ett "O". Illustrationer för var bom uppstod finns i Figur 6-5. För alla proven med cementfog uppstod bom vid de yttre kanterna och spred sig in mot mitten. För proven med mjukfog uppstod bom längs fogarna och spred sig sedan in mot plattans centrum, vilket även skedde i förstudien (kapitel 5).

Laststegsintervall [MPa]		Bom upptäckt					
		C1	C2	C3	C4	M1	M2
0	3,1						
3,1	6,3						
6,3	6,9						
6,9	7,5						
7,5	8,1						
8,1	8,8						
8,8	9,4						
9,4	10,0						
10,0	10,6						
10,6	11,3			X			
11,3	11,9						
11,9	12,5			O	X	X	
12,5	13,1				O		
13,1	13,8						
13,8	14,4		X				O
14,4	15,0	X	O		X		
15,0	15,6	O			O		
15,6	18,8						

Tabell 6-1. Protokoll: Manuell undersökning av bom för pelare
X = Uppkomst av bom, O = Utbredning av bom

Det är ingen mening att göra jämförelser med förstudien när det gäller värdena, då väldigt stora osäkerheter finns gällande den manuella undersökningen i förstudien. Bland annat var det svårt att höra skillnader i ljud vid knackning på dessa mindre plattor.

KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING



Figur 6-5. Förekomst av bom: X = första uppkomst, O = fortsatt utbredning

6.2.2.2 Registrering med töjningsgivare

I Diagram 6-1 visas spänningar och töjningar för provkropp C4. Vid belastning 13 MPa kan den undre plattan inte ta mer töjning och börjar då avlastas, vilket innebär att plattan har släppt från underlaget. Betongtöjning läses sedan ut för denna spänning (380 μ strain för C4). Detta har gjorts för samtliga försök och kan ses i Tabell 6-2. Resterande diagram för töjningsgivarna finns i Appendix B.

Plattnumrering är som i Figur 6-3. Förkortningar enligt följande:

n = nedre

ö = övre

m = mitt

- = inga resultat

Det kan exempelvis stå klinker 3n, vilket innebär trådtöjningsgivare längst ner i mitten på nedersta klinkerplattan.

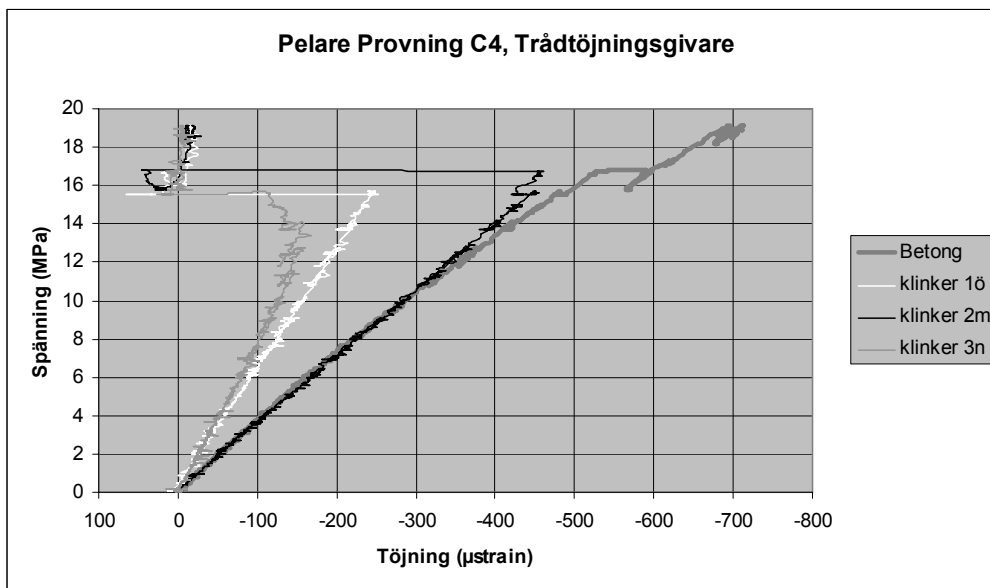


Diagram 6-1. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning C4, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING

En jämförelse av betongtöjning mellan den manuella undersökningen för bom gentemot maximal töjning registrerat med töjningsgivare finns i Tabell 6-2 med värden från Appendix B.

Prov	Platta/position	Trådtöjningsgivare Maximal töjning		Manuell undersökning Första uppkomst av bom	
		Last (MPa)	Betong (μ strain)	Last (MPa)	Betong (μ strain)
C1	2/n	17	370	15	310
C1	3/n	15	320	15	310
C2	3/ö	-	-	14	-
C2	3/n	-	-	14	-
C3	1/ö	11	530	11	520
C3	2/m	15	670	11	520
C3	3/n	18	890	11	520
C4	1/ö	16	490	15	460
C4	2/m	17	540	15	460
C4	3/n	13	380	15	460
M1	2/n	9	260	13	400
M1	3/ö	-	-	13	400
M2	2/n	11	140	13	150
M2	3/m	13	170	13	150

Tabell 6-2. Töjning i betong vid brott. Jämförelse mellan trådtöjningsgivare och manuell undersökning

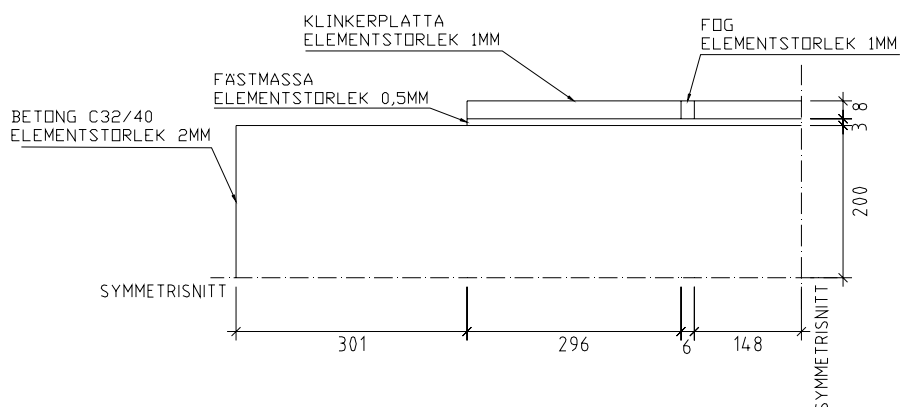
En anledning till att resultaten skiljer sig är att tryckytorna på några av pelarna var sneda. Det räckte inte att jämna till ytorna med cementpulver för alla prov och på prov C3 användes även metallskivor i ett försök till jämnare belastning. Även detta visade sig svårt, vilket fick följden att pelaren fortfarande blev snedbelastad, dock mindre. Det prov som blev mest lyckat var prov C4.

Att knacka efter bom med stålstav visade sig fungera bättre än i kapitel 5, då plattorna är större i denna provning och därmed ger större yta att knacka på. Att använda töjningsgivare på klinkerytan är inte en bra metod för att följa utbredningen av brottet, eftersom det då krävs många givare på plattorna. Töjningsgivarna placerade nära fri kant eller vid fog ger ett mer exakt värde på brottlasten än vid manuell undersökning. Givarna ska dock inte sitta för nära en kant då denna del av plattan inte är i tryck och mätningen blir i så fall ett medelvärde av drag och tryck.

6.3 Datorberäkning

6.3.1 FE-modell

Modellering utförs enligt Kapitel 3.



Figur 6-6. Modellering av pelare: mått, upplagsvillkor och elementstorlek

Upplagsvillkoren för modellen ges av symmetrilinjerna. Den horisontella linjen är låst i vertikalled och den vertikala linjen är förhindrad att röra sig i horisontalled. Den last som verkar på provkroppen är insatt som en spänning och angriper markbetongen vinkelrät tryckytan.

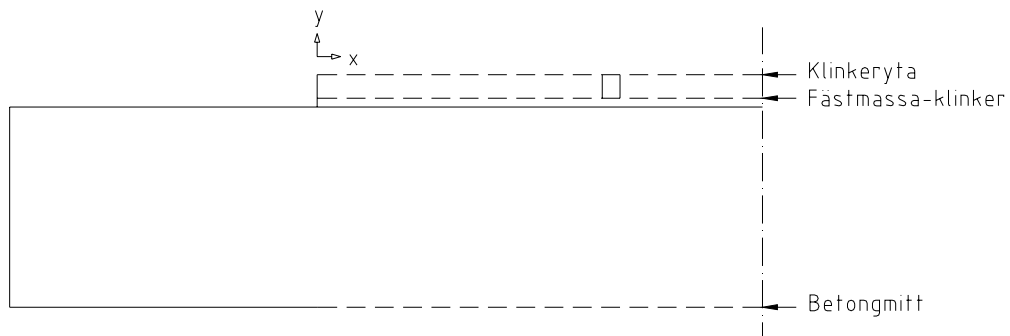
Klinkerns, mjukfogens och cementfogens E-moduler har uppskattats enligt avsnitt 4.4. Om provningsresultatens töjningar från töjningsgivare räknas om till en E-modul enligt Hooke's lag fås som minst 28 GPa och som mest 36 GPa vilket ger ett medelvärde på 32 GPa. Detta är ungefär samma styvhet som vid uppskattning baserad på gällande normer ($E = 33$ GPa) och vi använder därför den senare, eftersom osäkerheter i provning kan ge felaktigt resultat. Fästmassans E-modul uppskattas genom passningsräkning. Beräkningarna inom det linjärelastiska området upprepas tills överensstämmelse med provningarna nås. För att få resultatutskrift i BRIGADE införs en "path" (rad av nodpunkter) på varje sträcka som undersöks. De sträckor som undersöks är klinkerytan, gränsskikten mellan klinker/fästmassa och det horisontella symmetrisnittet.

Material	E-modul (GPa)
Mjukfog	0,06
Cementfog	15
Klinker	43
Fästmassa	4
Betong	33

Tabell 6-3. E-moduler för ingående material

6.3.2 Resultat och Analys

I detta avsnitt redovisas spänningar och töjningar som uppkommer vid en trycklast motsvarande 1 MPa i ett linjärelastiskt system. Spänning eller töjning vid annan last interpoleras linjärt.



Figur 6-7. Illustration av skikt i modelleringen. Datautskriften finns för området 0-449 mm. Streckade linjer markerar skiktsträckor.

I fästmassan tar vi fram normalspänningen i plattans plan, (σ_{xx}) och vinkelrätt plattans plan (σ_{yy}) samt skjuvspänningen (σ_{xy}). Vi tar också fram töjningen i plattans plan (ϵ_{xx}) för betongmitt och för klinkerytan (Se Figur 6-7).

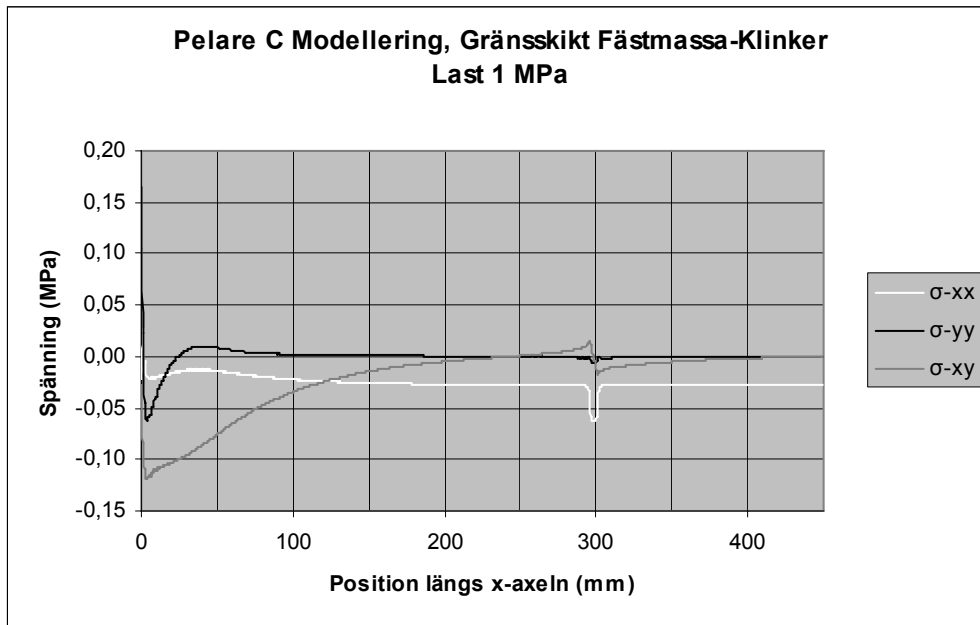


Diagram 6-2. Spänningsdiagram: Modellerat beteende hos tryckbelastad pelare. Skiktet mellan fästmassa och klinker, cementfog mellan plattorna

I Diagram 6-2 redovisas det principiella spänningsutseendet. De kritiska spänningsvärdena finns längst till vänster i området närmast den fria kanten. För att få mer rättvisande värden på brottinitieringen studeras i detalj σ_{xy} och σ_{yy} för området 0–8 mm från fri kant (Diagram 6-3 och Diagram 6-4). FE-modellering ger ofta höga spänningstoppar i närheten av kanter. Vi gör därför en känslighetsanalys för att få fram hur mycket spänningarna varierar i närliggande områden varpå ett medelvärde tas av dessa. För att avläsning hos skjuvspänningstoppen i Diagram 6-3 ska underlättas är värdena på y-axeln i omvänd ordning. σ_{xy} är som högst mellan 3-4 mm från fri kant och värdena från de olika skikten är någorlunda lika, medelvärdet blir cirka 0,12 MPa för lasten 1 MPa. σ_{yy} är som störst i området 0-1 mm från fri kant, men värdena skiljer sig något åt och därför tas ett medelvärde för de olika skikten i detta område. Medelvärdet blir cirka 0,07 MPa (drag) vid lasten 1 MPa.

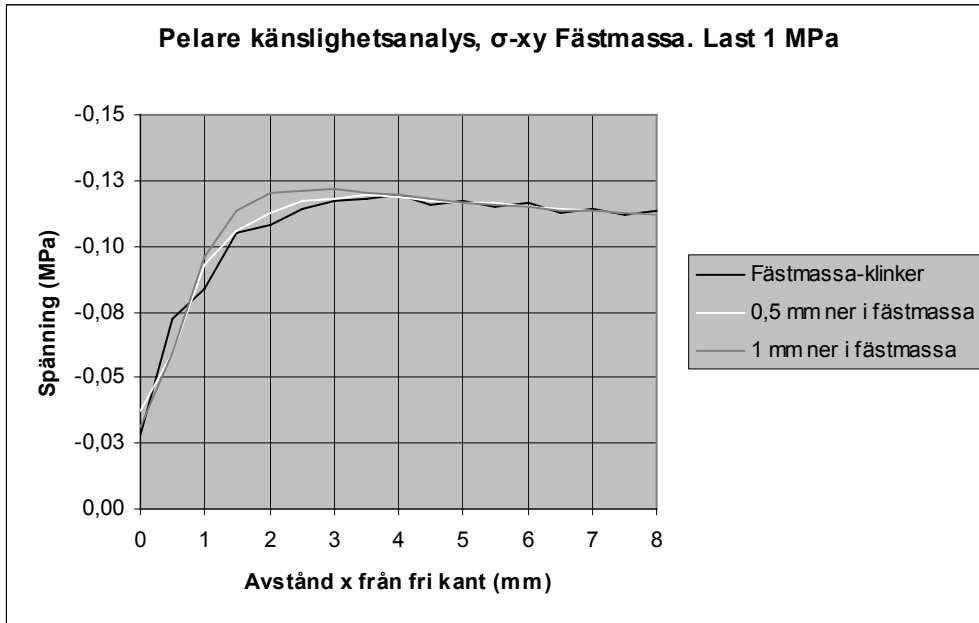


Diagram 6-3. Skjuvspänningsdiagram: Modellerat beteende hos tryckbelastad pelare. Känslighetsanalys. 0-8 mm från fri kant

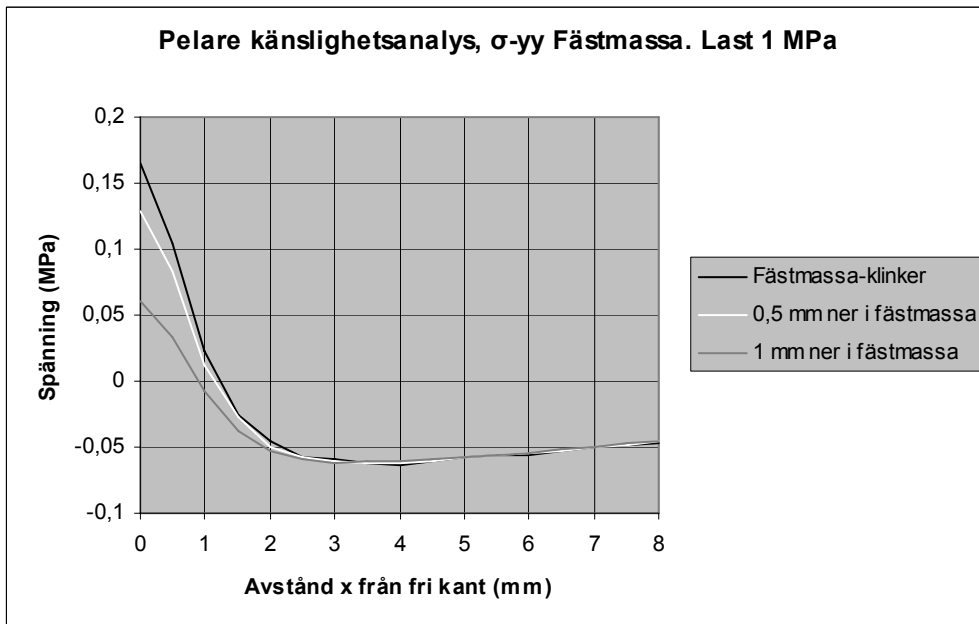


Diagram 6-4. Normalspänningsdiagram: Modellerat beteende hos tryckbelastad pelare. Känslighetsanalys. 0-8 mm från fri kant

6.4 Jämförelse: Provning – Beräkning

6.4.1 Spänningstillstånd som initierar brott

De kritiska spänningar som enligt modelleringen påverkar konstruktionen vid belastningen 1 MPa är $\sigma_{yy} = 0,073$ MPa vid fri kant (drag) och $\sigma_{xy} = 0,12$ MPa 4 mm från fri kant. Dessa modelleringsvärden multipliceras sedan med det betongspänningsvärde som vid provningen gav en icke linjär töjning i klinkerytan, till exempel 10 MPa för prov C1. En jämförelse kan sedan göras mellan dessa värden och de hållfasthetsvärden som en tidigare undersökning (van der Pluijm 1999) kom fram till, se Tabell 6-4. Detta ger en ytterst grov uppskattning om hur mycket belastning fästmassan tål, men kan vara intressant att jämföra med modelleringsresultat. Värdena bör dock inte jämföras rakt av med varandra, då det inte handlar om samma provkropp eller fästmassa. De fetstilta siffrorna i tabellen är medelvärden av de olika spänningarna och återkommer i kapitel 7 vid jämförelse mellan golv och pelare.

TTG Klinker		Modell		van der Pluijm	
Prov kropp	Linjärt	Linjärt	Linjärt	Hållfasthetsvärden	
	Betong	σ_{yy}	σ_{xy}	σ_{yy}	σ_{xy}
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
C1 3n	10,0	0,73	1,20	0,3-0,6	0,5-1,7
C3 1ö	10,0	0,73	1,20		
C4 3n	6,0	0,44	0,72		
Medel		0,63	1,04		

Tabell 6-4. Spänningstillstånd som initierar brott i fästmassan.

Vi redovisar bara den töjningsgivare på klinkerytan som först initierade olinjärt beteende för varje provkropp. Givare på prov C2 redovisas inte då denna provkropp var snedbelastad och kan ge osäkra värden. Inom området 0-4 mm från fri kant kan både σ_{xy} och σ_{yy} leda till brott, antingen var för sig eller genom en kombinerad effekt. Det bör påpekas än en gång att modellen enbart hanterar linjärt beteende, och så fort någon spricka uppstår så blir beteendet annorlunda vilket inte kan hanteras i modellen.

6.4.2 Passningsräkning av fästmassans E-modul

Då det är svårt att veta hur stor E-modulen är för fästmassaskiktet, på grund av gränsskikt som dominerar egenskaperna (se avsnitt 4.3), har vi utfört en passningsräkning av pelarmodellen för att efterlikna provningen. Prov C4 var den provning som blev mest lyckad med hänsyn till snedbelastning och därför försöker vi efterlikna detta prov i den fortsatta beräkningen, men vi har även kontrollräknat modelleringen med värden från C2 och C3 och fick liknande resultat. Styvheten på fästmassan som erhöles från den dynamiska mätningen är $E = 4$ GPa. Detta var startvärdet i beräkningen och övriga materials egenskaper hölls konstanta. E-modulen för fästmassan ändrades därefter tills lika stora töjningar uppnåddes på klinkerytan för de sträckor där det fanns töjningsgivare.

KLINKERBELAGDA BETONGPELARE I TRYCKBELASTNING

Den elasticitetsmodul för fästmassan som ger likartade töjningar är 1 GPa. Resultatet av passningsräkningen kan ses i Diagram 6-5 samt Diagram 6-6.

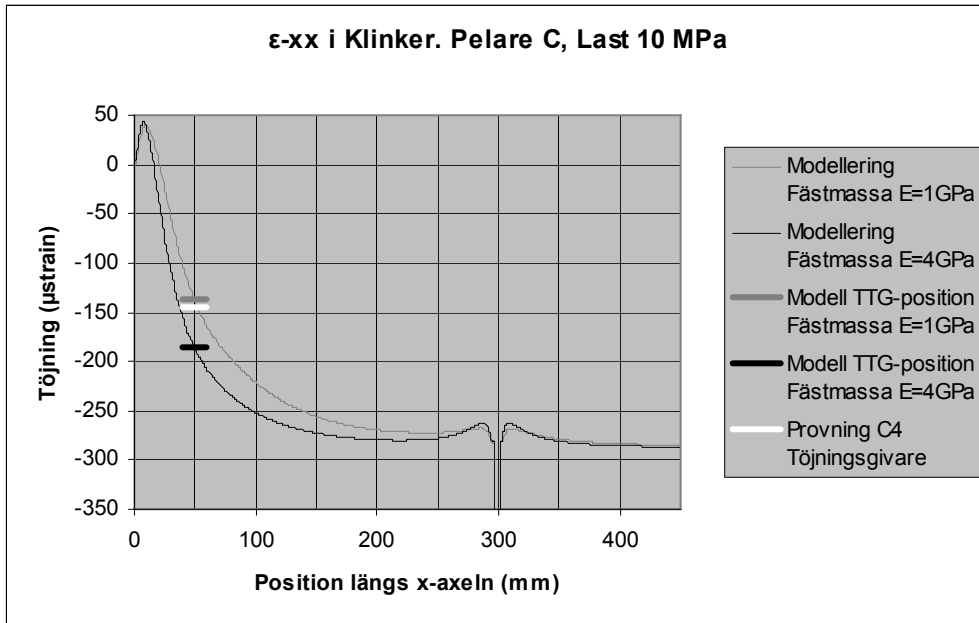


Diagram 6-5. Töjning i klinkerytan. Jämförelse mellan provning och modellering med fästmassa E=1GPa och E=4GPa, cementfog mellan plattorna. Last 10 MPa

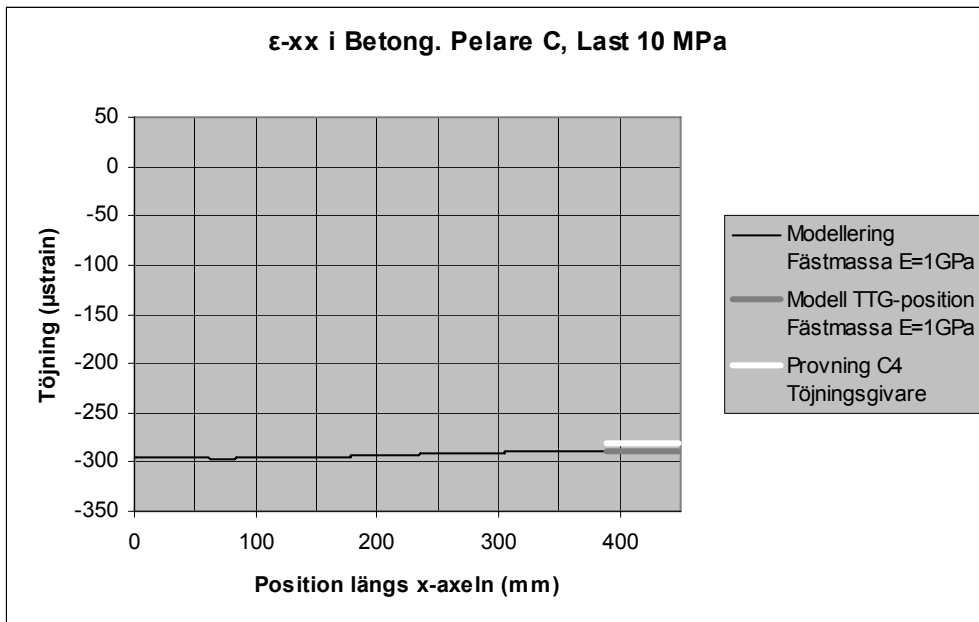


Diagram 6-6. Töjning i betongen. Jämförelse mellan provning och modellering med fästmassa E=1GPa, cementfog mellan plattorna. Last 10 MPa

6.5 Sammanfattande resultat

För alla proven med cementfog uppstod bom vid de yttre kanterna och spred sig in mot mitten av plattan. För proven med mjukfog uppstod bom längs fogarna och spred sig sedan in mot plattans centrum. Beteendet är likadant som i förstudien, kapitel 5.

Att knacka efter bom med stålstav visade sig fungera bättre än i kapitel 5, då plattorna är större i denna provning och därmed ger större yta att knacka på. Töjningsgivarna placerade nära fri kant eller vid fog ger ett mer exakt värde på brottinitieringslasten än vid manuell undersökning. Givarna ska dock inte sitta för nära en kant då denna del av plattan inte är i tryck. Mätningen blir då ett medelvärde av drag och tryck.

Brottinitierande spänningstillstånd i fästmassan finns inom området 0-4 mm från fri kant. Där kan både σ_{xy} och σ_{yy} leda till brott, antingen var för sig eller genom en kombinerad effekt. De största spänningarna inom detta område är $\sigma_{xy} = 1,04$ MPa och $\sigma_{yy} = 0,63$ MPa (drag). Dessa spänningvärden kan i fortsättningen anses vara ungefärliga hållfasthetsvärden för brott i fästmassan.

Styvheten på fästmassan som erhöles från den dynamiska mätningen är $E = 4$ GPa. Detta var startvärdet i beräkningen och övriga materials egenskaper hölls konstanta. E-modulen för fästmassan ändrades därefter tills lika stora töjningar uppnåddes på klinkerytan för de sträckor där det fanns töjningsgivare. Den elasticitetsmodul för fästmassan som ger likartade töjningar är 1 GPa och det är denna styvhet som används i den fortsatta FE-modelleringen av klinkerbeläggnings mekaniska beteende, kapitel 7.

7 GOLVKONSTRUKTIONER - MODELLERING

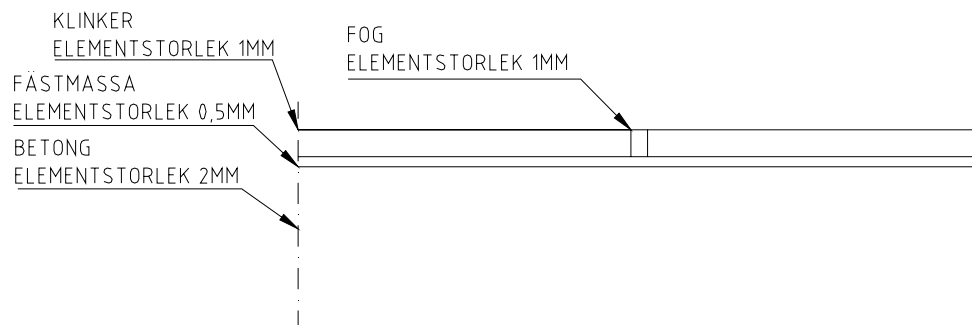
7.1 Introduktion

I detta kapitel modelleras klinkerbelägningars mekaniska beteende då mjukfogar används mellan plattfält respektive när bara cementfogar finns. Det mekaniska beteendet undersöks för två olika fall där lasterna som undersöks är krympning i betong (Fall 1) och volymökning i klinkerplattor på grund av lokal temperaturlast (Fall 2). I dessa fall studerar vi spänningsbilden för enskilda plattor och undersöker vilka laster som krävs för brottinitiering i fästmassan. För Fall 2 undersöks dessutom hur lång sträcka en lokal last fortplantas i ett golv. Vi vill även se hur fästmassans E-modul påverkar uppbyggnadssträckan av normalspänning i plattans plan i klinkerskiktet, detta undersöks i Fall 1. En närmare beskrivning av upplagsvillkor samt belastning för de två fallen finns i avsnitt 7.2 och 7.3. Modelleringen är utförd enligt kapitel 3 med en linjärelastisk FE-modell.

De ingående materialens E-moduler kan ses i Tabell 7-1, med betong C32/40 ($E = 33 \text{ GPa}$). Värde på fästmassans E-modul är från början baserat på dynamisk provning från kapitel 4, men har sedan passningsräknats fram till 1 GPa i avsnitt 6.4.2 för att bättre överensstämna med provningsresultat.

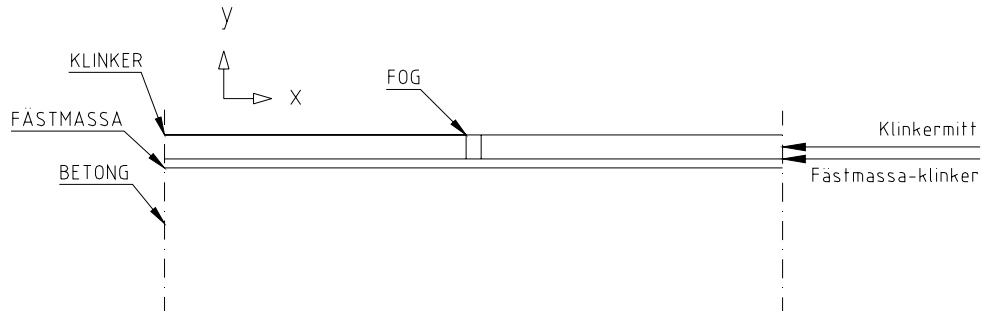
Material	E-modul (GPa)
Mjukfog	0,06
Cementfog	15
Klinker	43
Fästmassa	1
Betong	33

Tabell 7-1. E-moduler för ingående material



Figur 7-1. Modellering av golv: Elementstorlekar

Skikten där datautskrift tas i modelleringen finns illustrerade i Figur 7-2.



Figur 7-2. Illustration av skikt i modelleringen. Datautskrifter finns för området 0-5719 mm. Detta är en del av hela golvet, ej i rätt skala.

I gränsskiktet fästmassa-klinker tar vi fram normalspänningen vinkelrätt plattans plan (σ_{yy}) samt skjuvspänningen (σ_{xy}). Detta för att se hur stora spänningarna blir för enskilda plattor. Vi tar också fram normalspänningen i plattans plan (σ_{xx}) i mitten av klinkerplattorna (Se Figur 7-2) för att undersöka klinkerhävningens risk. För båda fallen i detta kapitel finns översiktsbilder av de framtagna spänningstillstånden som redovisar det principiella utseendet.

För att veta vilka spänningsnivåer som skulle kunna leda till brott för fästmassan jämförs spänningstopparna för respektive avsnitt mot hållfasthetsvärden från tidigare undersökning (van der Pluijm 1999) samt brottinitierande värden från kapitel 6, se Tabell 7-2. En sammanfattning av dessa jämförelser finns senare i detta kapitel.

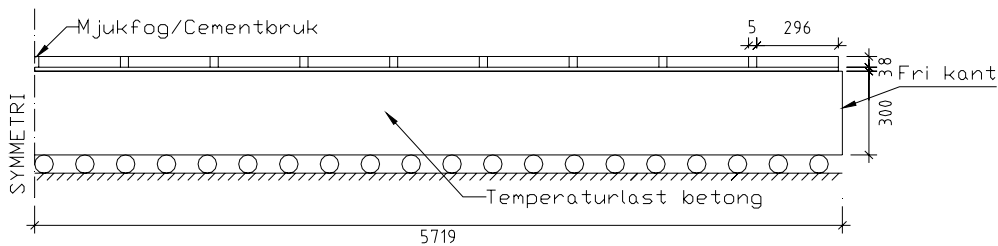
	Provning	van der Pluijm
Fästmassa	Från kapitel 6	Hållfasthetsvärden
	MPa	MPa
σ_{yy} (drag)	0,6	0,3 - 0,6
σ_{xy}	1,0	0,5 - 1,7

Tabell 7-2. Brottinitierande värden för fästmassan.

7.2 Fall 1: Platta på mark med fri kant - Krympning i betong

7.2.1 FE-modell

Första fallet är en platta på mark med fri kant, där lasten utgörs av krympning i betongen, se Figur 7-3. Två olika fogvarianter undersöks för golvet: Enbart cementfogar (C), eller cementfogar med mjukfog vid symmetrisnitt (M). Antalet plattor i verkliga modellen är 19 stycken. Modellens upplagsvillkor är att den vid symmetrisnitt är låst i x-led och att den är låst i y-led på betongens undersida. Lasten på betongen motsvarar en krymptöjning = 0,3 ‰, vilket enligt Ekvation 3-1 ger temperaturskillnad på -30 grader jämfört med övriga delar. Lastens absoluta storlek är inte huvudprioritet i detta arbete, utan istället vad som händer med spänningarna i fästmassan och klinkerbeläggningen då mjukfogar används i golvet. Dessa spänningar jämförs med spänningar från Fall 2 (avsnitt 7.3) och kapitel 6. Vi undersöker hur E-modulen i fästmassan påverkar uppbyggnadssträckan för σ_{xx} i klinkerskiktet.



Figur 7-3. Principskiss över Fall 1 med måttsättning (Ej skalenlig). Upplagsvillkor: Låst i y-led på undersidan av betongen och låst i x-led vid symmetrisnitt. Alla fogar är av cementbruk utom den vid symmetrisnitt där antingen mjukfog eller cementbruk är placerad.

7.2.2 Resultat och Analys

Resultatutskrifter finns för gränsskiktet fästmassa-klinker och ett skikt mitt i klinkerplattorna, se Figur 7-2. Diagram finns där hela golvet syns samt en detaljerad bild av området kring symmetrisnittet, då det är där skillnaderna mellan mjukfog och cementfog finns.

7.2.2.1 Normalspänning i plattans plan mitt i klinkerskiktet

σ_{xx} i klinkerskiktet byggs snabbt upp från kanterna och når sin topp redan i närliggande platta (Diagram 7-1). Mjukfogen i symmetrisnittet avlastar endast den närmaste plattan och spänningen är återigen uppe på samma nivå i plattan därefter, se även Diagram 7-2 för en detaljerad bild av symmetrisnittet.

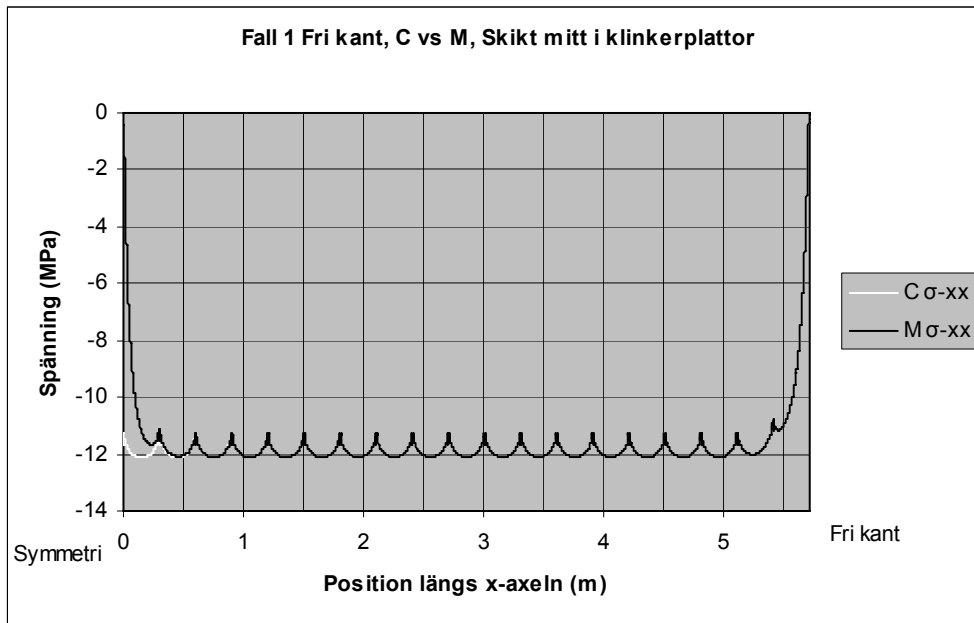


Diagram 7-1. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Skiktet mitt i klinkerplattor, jämförelse mellan enbart cementfogar och när mjukfog används. Last på betong -30 grader.

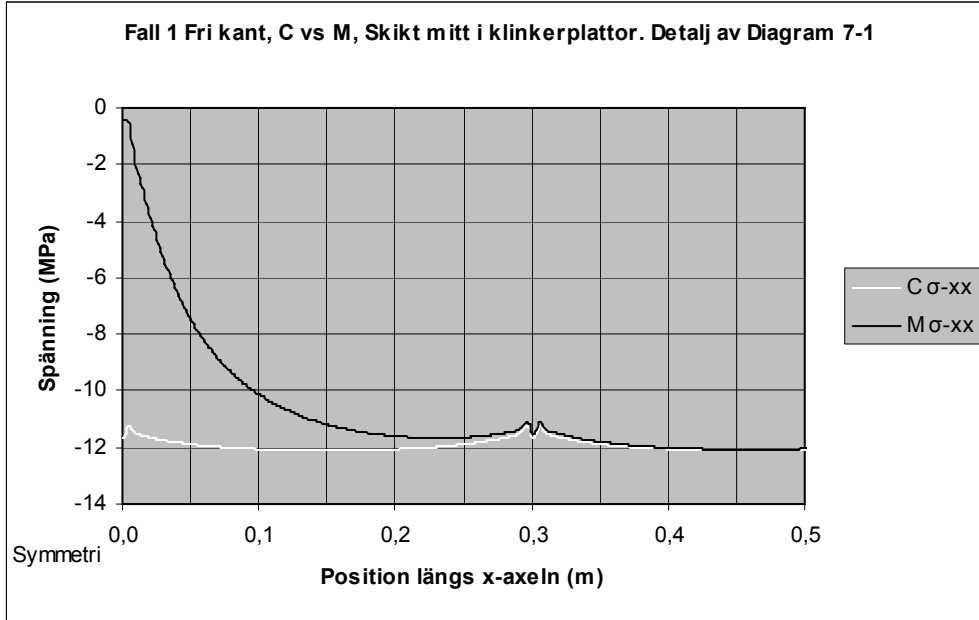


Diagram 7-2. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Skiktet mitt i klinkerplattor, jämförelse mellan enbart cementfogar och när mjukfog används. Första 0,5 m från symmetrisnitt. Last på betong -30 grader.

7.2.2.2 Normalspänning vinkelrätt plattans plan i gränsskiktet fästmassa-klinker

I Diagram 7-3 redovisas hur spänningarna ser ut för golvet som helhet. Fästmassan klarar inte några större värden på dragspänning och vi väljer därför att göra en närmare analys i Diagram 7-4 av området närmast symmetrisnittet där dragspänningen är som högst. Vi studerar inte området vid den fria kanten då spänningsnivån är lägre än den vid symmetrisnitt och för att utseendet är likadant för mjukfog och cementfog.

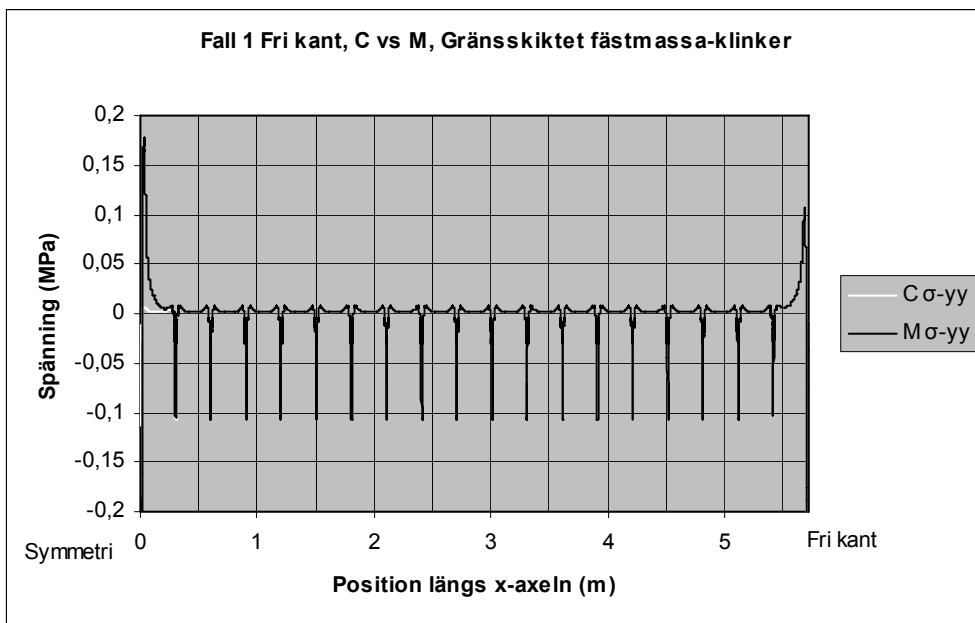


Diagram 7-3. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Gränsskiktet fästmassa-klinker, jämförelse mellan enbart cementfogar och när mjukfog används. Last på betong -30 grader.

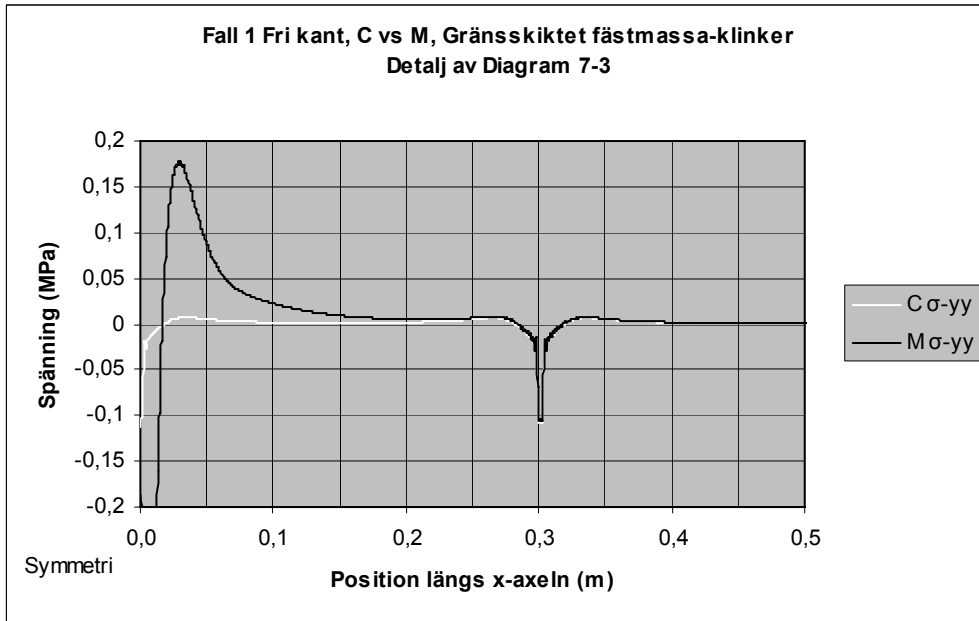


Diagram 7-4. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Gränsskiktet fästmassa-klinker, jämförelse mellan enbart cementfogar och när mjukfog används. Första 0,5 m från symmetrisnitt. Last på betong -30 grader.

Då mjukfog används uppstår en tryckspänning precis vid fogmitt och en dragspänning cirka 20 mm från vänsterkanten (Diagram 7-4). Detta sker på grund av att klinkerplattan böjs ner i fästmassan vid mjukfogskanten och området 20 mm in från kanten håller då emot. Böjeffekten uppkommer för att kraft förs in i underkant av keramikplattan och det finns inte någon styv fog som kan hålla emot plattan där, vilket medför fri expansion av klinker i ovankant. Dragspänningstoppen är 0,17 MPa vilket är lägre än båda hållfasthetsvärden i Tabell 7-2 och brott bör därmed inte uppstå på grund av denna spänning. Känslighetsanalys för toppen har gjorts men någon skillnad längre ner i fästmassan fanns inte.

7.2.2.3 Skjuvspänning i gränsskiktet fästmassa-klinker

I Diagram 7-5 är det principiella utseendet för σ_{xy} redovisat. För att se skillnaderna för spänningarna då mjukfog eller cementfog används i symmetrisnittet, görs en noggrannare analys av området nära denna fog i Diagram 7-6. Vi studerar inte området vid den fria kanten då spänningsnivån är lägre än den vid symmetrisnitt och för att utseendet är likadant för mjukfog och cementfog.

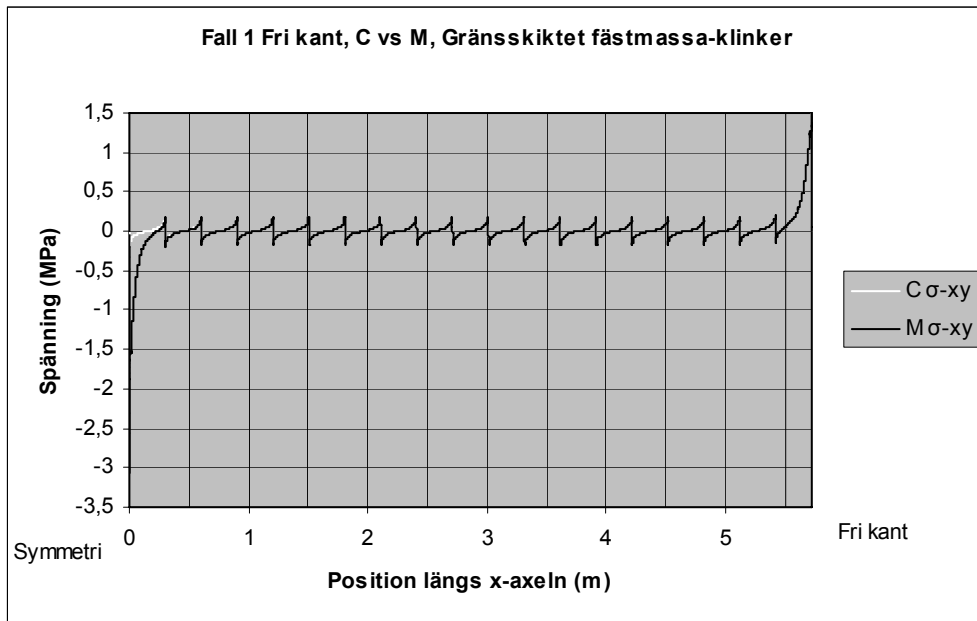


Diagram 7-5. Skjuvspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Gränsskiktet fästmassa-klinker, jämförelse mellan enbart cementfogar och när mjukfog används. Last på betong -30 grader.

Precis som för modelleringen i kapitel 6 ökar σ_{xy} kraftigt vid den kant som ligger intill mjukfogen (Diagram 7-6). Toppen verkar vara orimligt hög och därför görs en analys för punkter upp till 1 mm ner i fästmassan. Analysen finns i Diagram 7-7 och medelvärde för toppen avläses till 2,3 MPa vilket är betydligt högre än båda hållfasthetsvärdena i Tabell 7-2 och det är därmed risk för brott på grund av denna spänning.

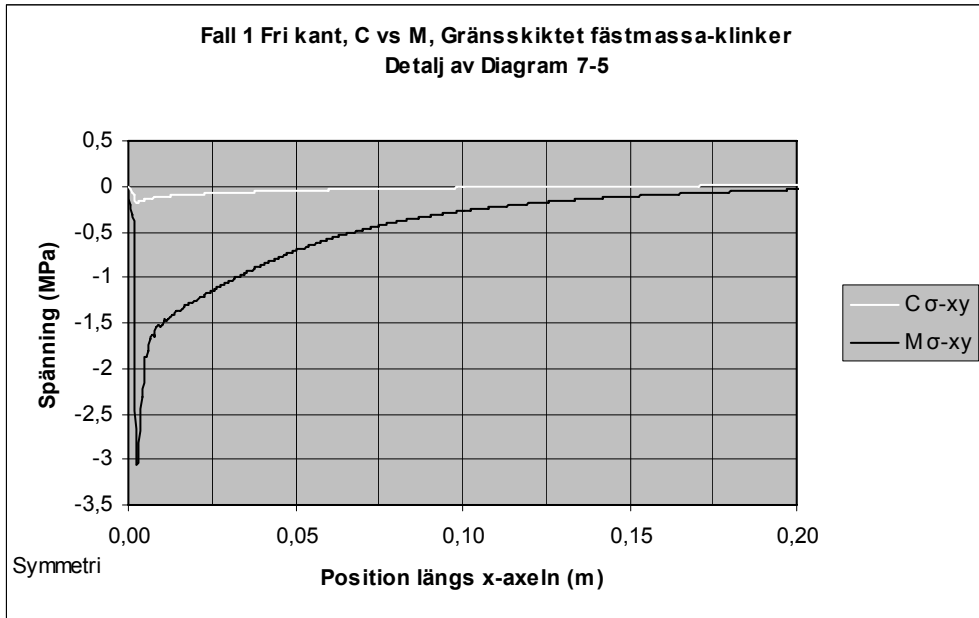


Diagram 7-6. Skjuvspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Gränsskiktet fästmassa-klinker, jämförelse mellan enbart cementfogar och när mjukfog används. Första 0,2 m från symmetrisnitt. Last på betong -30 grader.

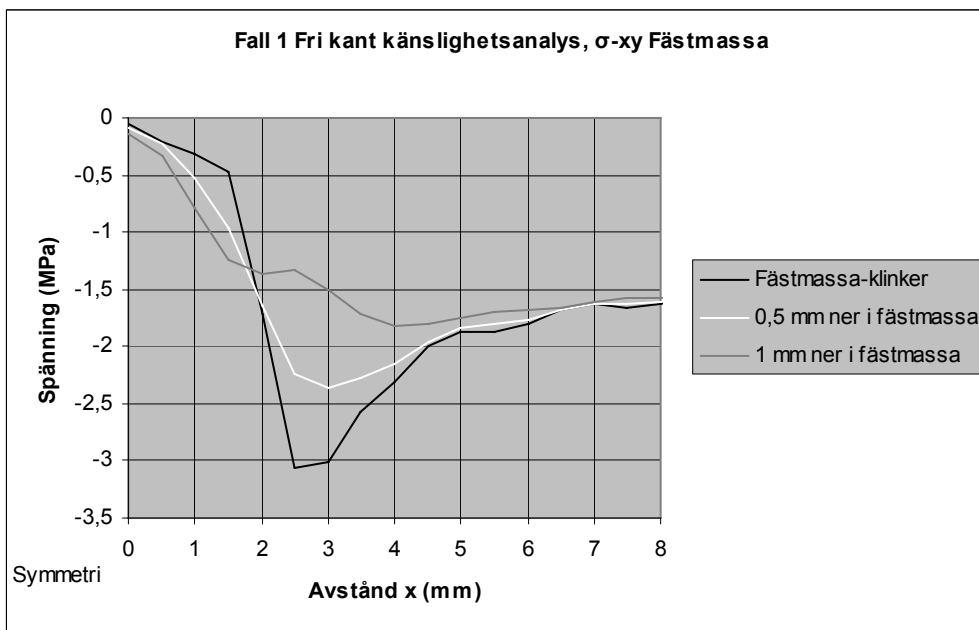


Diagram 7-7. Skjuvspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, resultatutskrift från gränsskiktet fästmassa-klinker samt 0,5 och 1 mm ner i fästmassa, 0-8 mm från symmetrisnitt. Last på betong -30 grader.

7.2.2.4 Uppbyggnadssträcka för normalspänning i plattans plan mitt i klinkerskiktet

Undersökningen har gjorts för den E-modul som erhöles efter passningsräkning i kapitel 6.3 (Fästmassa $E = 1 \text{ GPa}$). Vi valde att undersöka styvheter både över och under detta värde, då det finns en osäkerhet i hur styv fästmassan med tillhörande gränsskikt egentligen är.

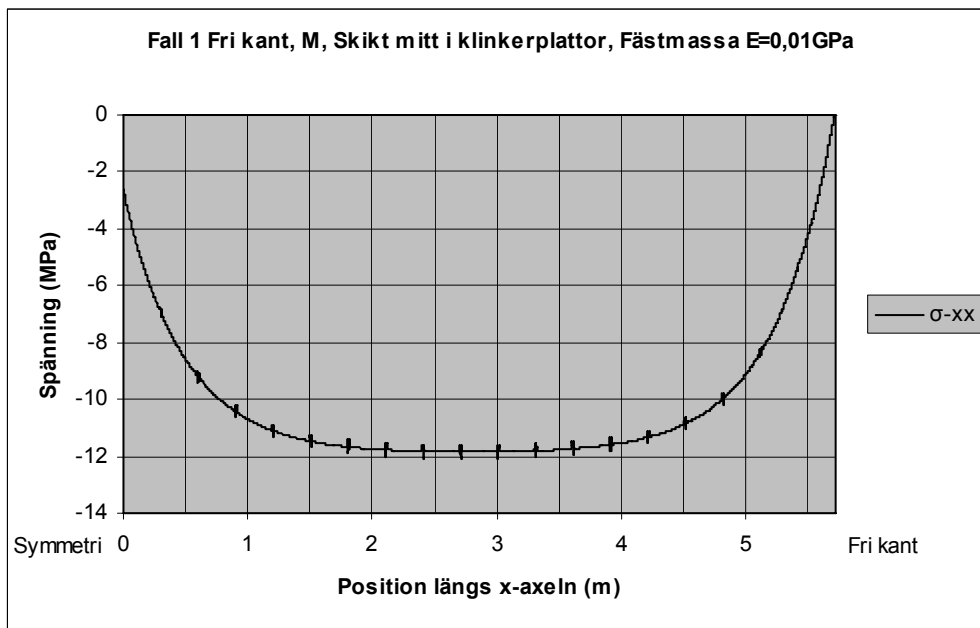


Diagram 7-8. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Skiktet mitt i klinkerplattor. Fästmassans E-modul = 0,01 GPa. Last på betong -30 grader.

När fästmassan är mycket flexibel ($E = 0,01 \text{ GPa}$) fås ett parabelformat utseende av σ_{xx} i klinkerskiktet. Detta innebär att det tar en lång sträcka för uppbyggnad av spänning och möjligtvis skulle mjukfogar kunna avlasta detta golv.

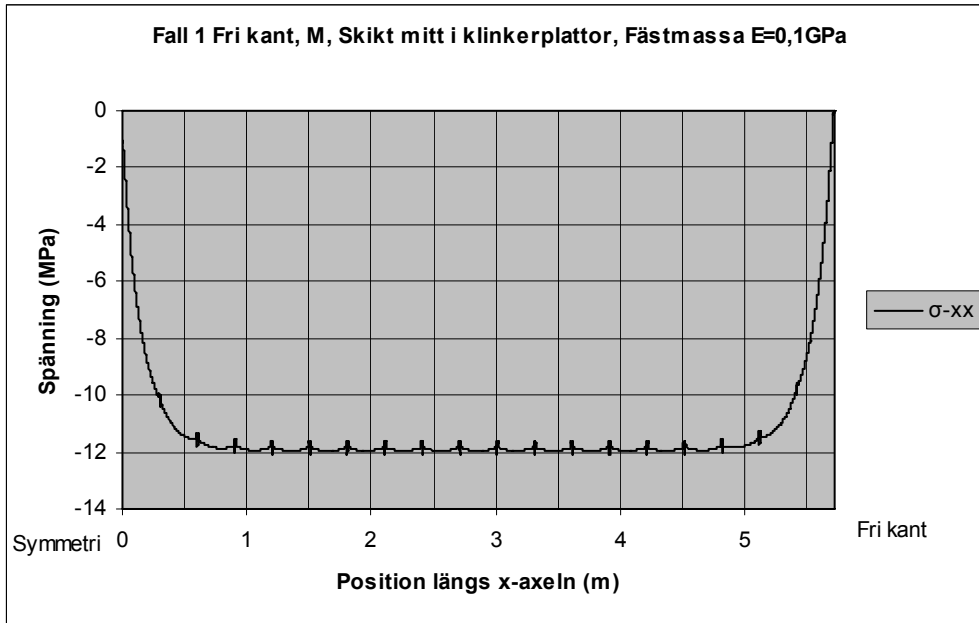


Diagram 7-9. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Skiktet mitt i klinkerplattor. Fästmassans E-modul = 0,1 GPa. Last på betong -30 grader.

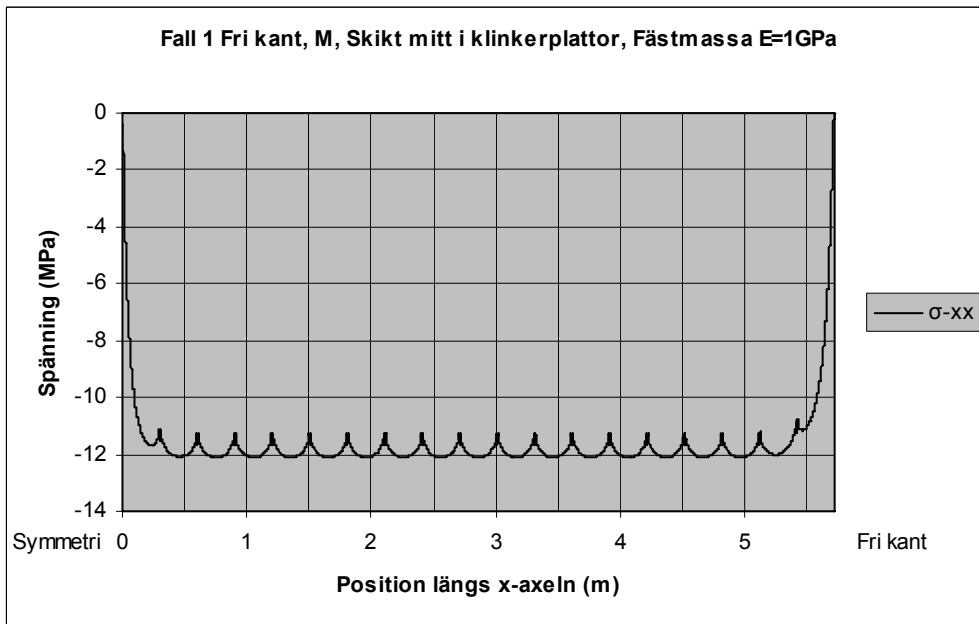


Diagram 7-10. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Skiktet mitt i klinkerplattor. Fästmassans E-modul = 1 GPa. Last på betong -30 grader.

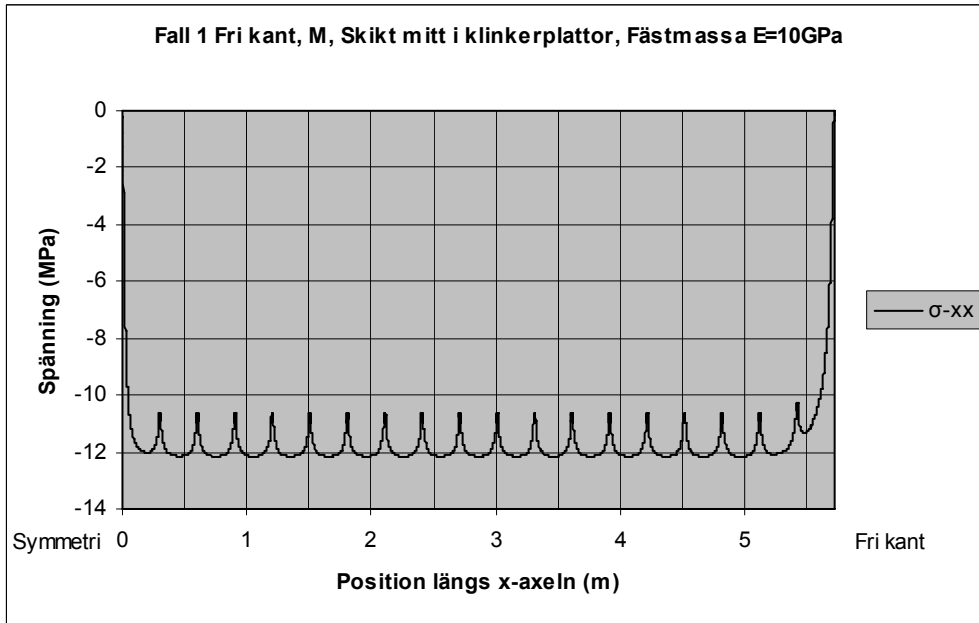


Diagram 7-11. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 1 modellering, Skiktet mitt i klinkerplattor. Fästmassans E-modul = 10 GPa. Last på betong -30 grader.

I Diagram 7-8 till Diagram 7-11 ses hur styvheten påverkar spänningsbilden. En låg elasticitetsmodul för fästmassan ger lång överföringsträcka innan σ_{xx} är maximal igen. Genom att läsa av hur lång uppbyggnadssträckan är för respektive E-modul fås uppbyggnadssträckans beroende av fästmassans styvhet, denna finns i Diagram 7-12. Den E-modul som vi fick fram efter passningsräkningen i kapitel 6.3 ger en överföringssträcka på 0,45 m. För att avlasta golvkonstruktionen med mjukfogar behövs alltså fogar mellan varje platta. Detta är dock inte praktiskt möjligt att lägga så tätt och golvet kan då heller inte tåla större belastningar.

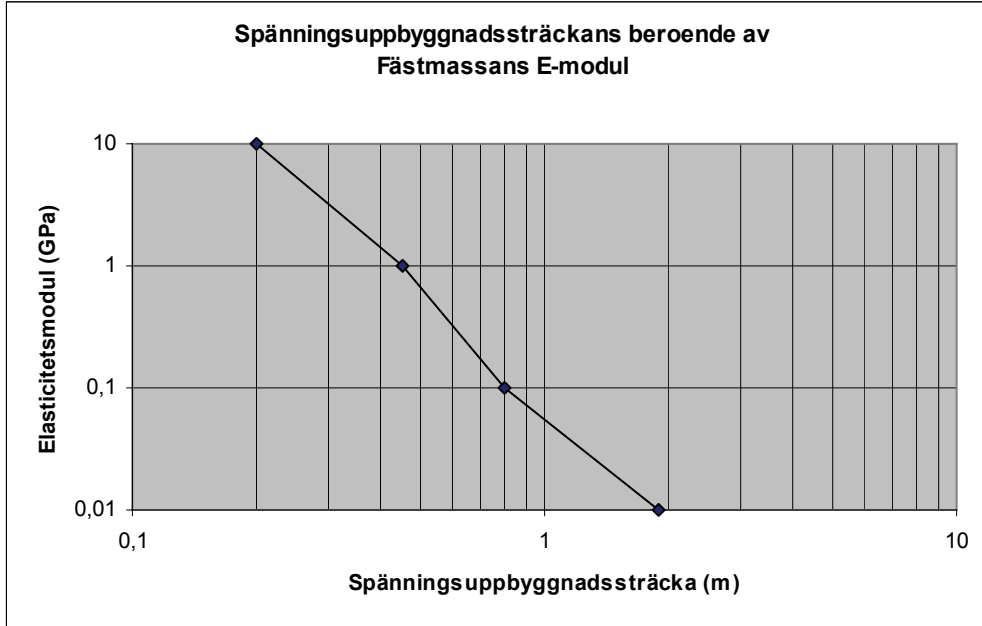
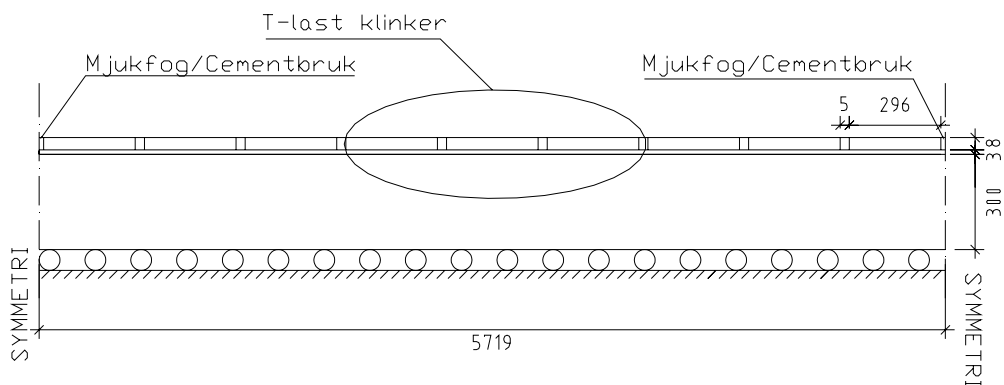


Diagram 7-12. Spänningsuppbyggnadssträckans beroende av fästmassans styvhet

7.3 Fall 2: Snitt i ett golv - Lokal uppvärmning av klinkerskikt

7.3.1 FE-modell

I detta fall införs en temperaturlast på sex plattor i mitten av golvet, vilket kan likna solljusinstrålning eller varmvattenspolning på ytan, se Figur 7-4. Lasten i modellen tillkommer genom att klinkerplattorna och fogarna har en temperaturskillnad på +30 grader jämfört med övriga delar och vi undersöker hur lång sträcka den lokala lasten fortplantas i golvet. Modellen är ett cirka sex meter långt snitt i ett större golv där vi ska undersöka spänningarna i fästmassan och klinkerbeläggningen då mjukfogar används i golvet. Två olika fogvarianter undersöks för golvet: Enbart cementfogar (C), eller cementfogar med mjukfogar vid symmetrisnitt (M). Antalet plattor i verkliga modellen är 19 stycken. Modellens upplagsvillkor är att den vid symmetrisnitt är låst i x-led och att den är låst i y-led på betongens undersida.



Figur 7-4. Principskiss över Fall 2 med mått på material (Ej skalenlig) Upplagsvillkor: Låst i y-led på undersidan av betongen och låst i x-led vid symmetrisnitten. Alla fogar är av cementbruk utom de vid symmetrisnitt där antingen mjukfog eller cementfog är placerad.

7.3.2 Resultat och Analys

Resultatutskrifter finns för gränsskiktet fästmassa-klinker och ett skikt mitt i klinkerplattorna, se Figur 7-2. Diagram finns där hela golvet syns samt en detaljerad bild av området kring en belastad fog.

7.3.2.1 Normalspänning i plattans plan mitt i klinkerskiktet

I Diagram 7-13 är σ_{xx} i klinkerskiktet visad. Den lokala lasten ger en hög spänning för de plattor som är belastade. Denna spänning avtar snabbt (0,3 m) och är redan efter en obelastad platta nära noll.

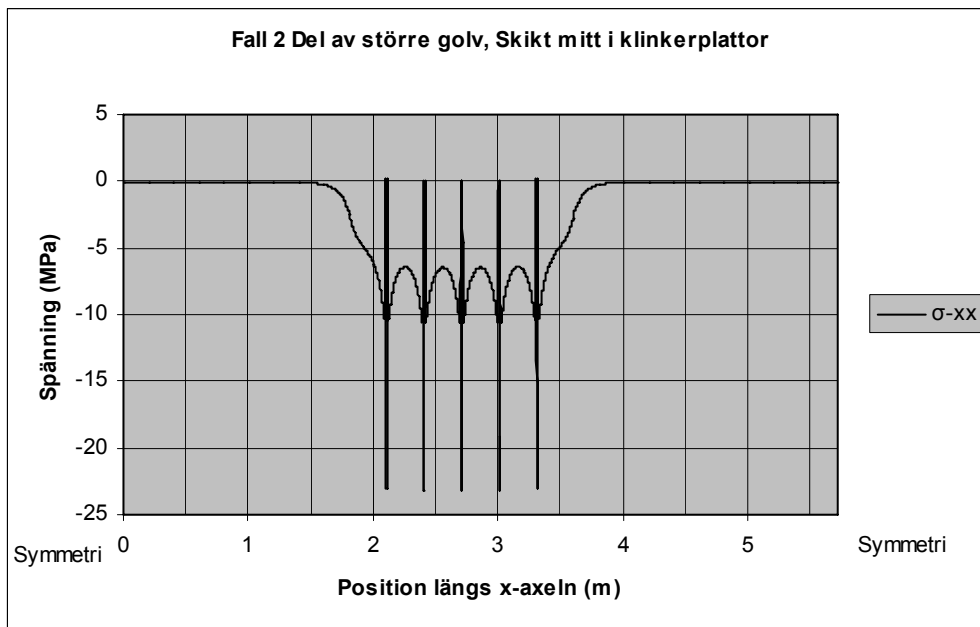


Diagram 7-13. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 2 modellering, utbredning av lokal påverkan. Skiktet mitt i klinkerplattor Last på klinker +30 grader.

7.3.2.2 Normalspänning vinkelrätt plattans plan i gränsskiktet fästmassa-klinker

Diagram 7-14 visar σ_{yy} i fästmassan för hela golvet. Spänningstopparna i detta diagram är inte rättvisande eftersom BRIGADE skriver ut alla fyra värden från de närliggande integrationspunkterna om dessa värden skiljer sig mycket ifrån varandra. I Diagram 7-15 är medelvärde av dessa integrationspunkter tagna och vi studerar sedan spänningstoppen för nodpunkter 0-1 mm ner i fästmassan vid en belastad fog och räknar om till ett medelvärde. Känslighetsanalysen ger att dragspänningstoppen får ett medelvärde på 0,9 MPa vilket är högre än båda hållfasthetsvärden enligt Tabell 7-2. Brott skulle därför kunna uppstå på grund av denna spänning.

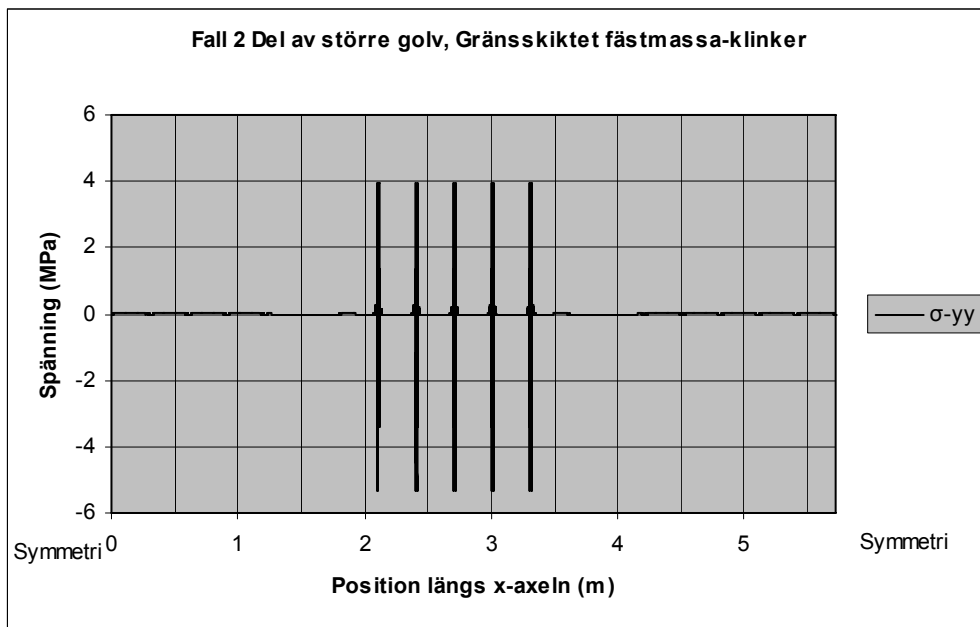


Diagram 7-14. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 2 modellering, utbredning av lokal påverkan. Gränsskiktet fästmassa-klinker. Last på klinker +30 grader.

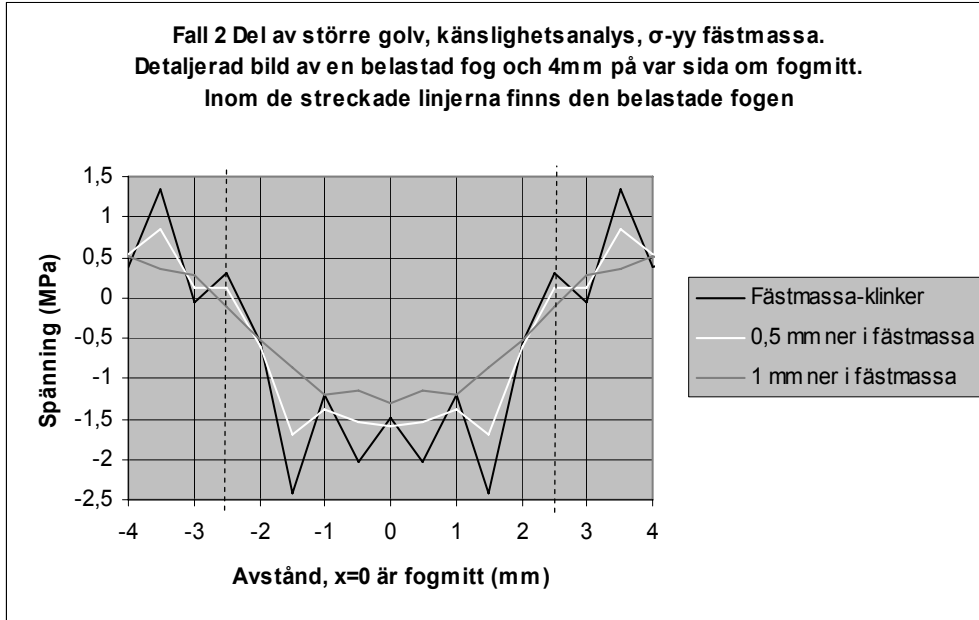


Diagram 7-15. Normalspänningsdiagram: Golv Fall 2 modellering, resultatutskriften från gränsskiktet fästmassa-klinker samt 0,5 och 1 mm ner i fästmassa, 4 mm på var sida om belastad fog. Last på klinker +30 grader.

7.3.2.3 Skjuvspänning i gränsskiktet fästmassa-klinker

σ_{xy} i fästmassan varierar vid lokal last i golvet enligt Diagram 7-16. Spänningen är som högst i fästmassan under området där fog och klinkerplatta möts. Topparna verkar orimligt höga varför vi väljer att göra en känslighetsanalys av detta område vilket är redovisat i Diagram 7-17 (fogen finns mellan -2,5 till 2,5 mm i diagrammet). Medelvärde för spänningstoppen avläses till 1,8 MPa vilket är högre än båda hållfasthetsvärdena i Tabell 7-2 och det är därmed risk för brott på grund av denna spänning.

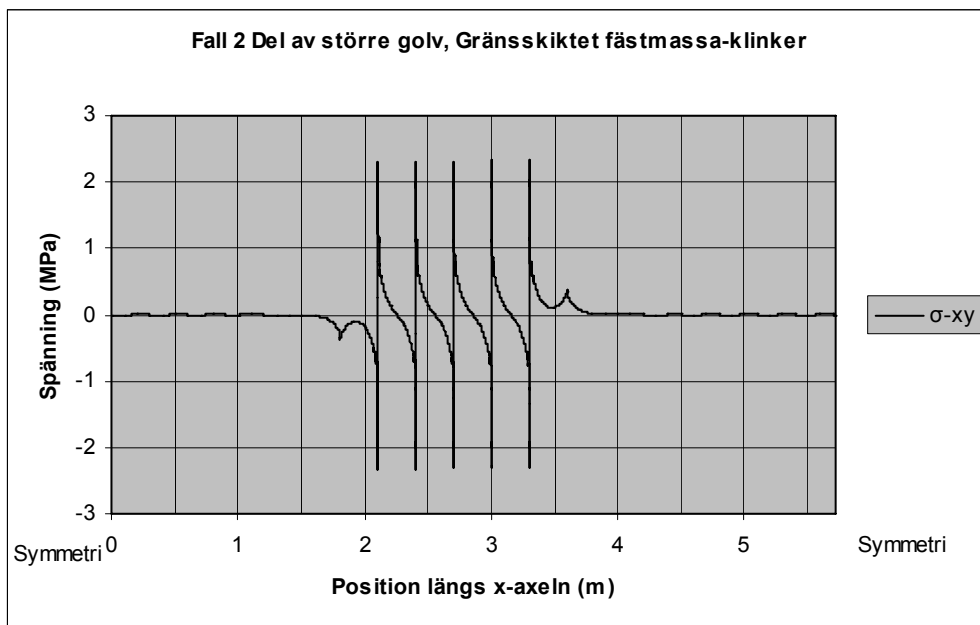


Diagram 7-16. Skjuvspänningsdiagram: Golv Fall 2 modellering, utbredning av lokal påverkan. Gränsskiktet fästmassa-klinker. Last på klinker +30 grader.

Sträckan som krävs för att spänningarna från belastat område ska avta kan ses i Diagram 7-18, där sista belastade plattan (~1,8-2,1 m) och första obelastade (~1,5-1,8 m) finns redogjord. Skjuvspänningen avtar snabbt från belastat område, och går mot noll redan efter första obelastade plattan.

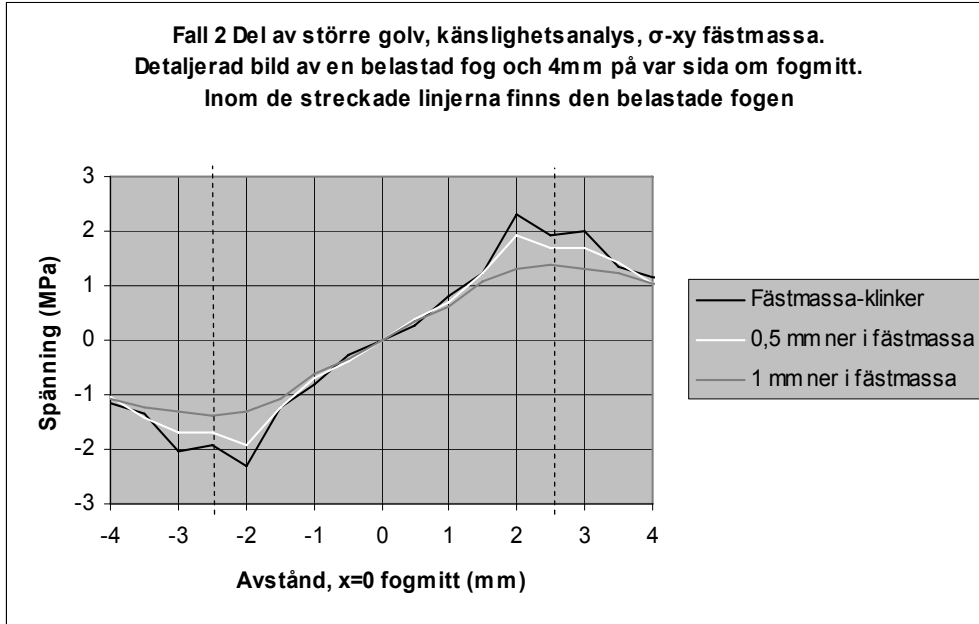


Diagram 7-17. Skjuvspänningsdiagram: Golv Fall 2 modellering, resultatutskriften från gränsskiktet fästmassa-klinker samt 0,5 och 1 mm ner i fästmassa, 4 mm på var sida om belastad fog. Last på klinker +30 grader.

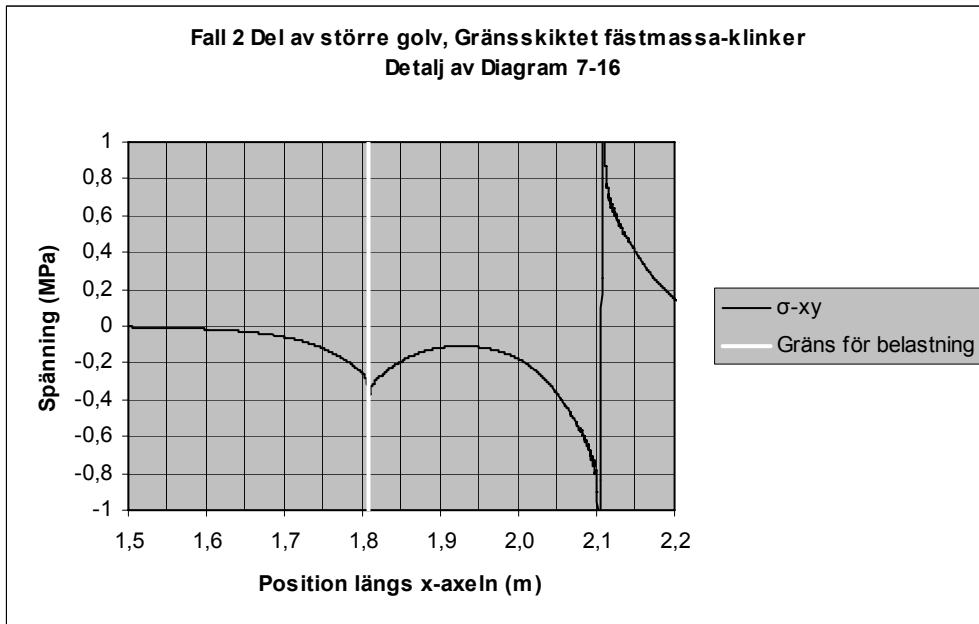


Diagram 7-18. Skjuvspänningsdiagram: Golv Fall 2 modellering, utbredning av lokal påverkan. Gränsskiktet fästmassa-klinker. Last på klinker +30 grader. Området 1,5 - 2,2 m från symmetrisnitt

7.4 Jämförelse: Modellering - Provningsresultat

Jämförelsen av spänningar kan göras direkt mellan modelleringar för pelare och golv eftersom de olika modellerna har likadana elementindelningar och material-egenskaper. Spänningarna från Fall 1 och 2 samt hållfasthetsvärden för fästmassan finns i Tabell 7-3. Provningsvärden som redovisas i tabellen är baserade på brottinitierande värde i avsnitt 6.4.1.

Fästmassa-klinker	Modellering		Provning	van der Pluijm
	Fall 1	Fall 2	Från kapitel 6	Hållfasthetsvärden
	MPa	MPa	MPa	MPa
Mjukfog σ -yy (Drag)	0,17	0,90	0,6	0,3 - 0,6
Mjukfog σ -xy (Skjuv)	2,30	1,80	1,0	0,5 - 1,7
Cementfog σ -yy (Drag)	0,01	0,90	0,6	0,3 - 0,6
Cementfog σ -xy (Skjuv)	0,20	1,80	1,0	0,5 - 1,7

Tabell 7-3. Jämförelse av de olika golvkonstruktionernas spänningar mot kritiska spänningar baserat på olika hållfasthetsvärden för fästmassan. Last i Fall 1 är betongkrypning=0,3 ‰ och last i Fall 2 är en temperaturskillnad +30 °C på klinker jämfört med övriga material

För Fall 1, då mjukfog används vid symmetrisnitt, kan σ_{xy} leda till brottinitiering. Detta sker inom området 0-4 mm från denna fog. σ_{xy} är i detta fall så stor att den överskrider båda hållfasthetsvärdena i Tabell 7-3. Det är därför troligt att σ_{xy} kommer vara den spänning som initierar brott.

I Fall 2, då en lokal last verkar på sex plattor i mitten av golvet, finns ingen skillnad för avlästa spänningvärden mellan mjukfog och cementfog i symmetrisnittet. Detta beror på att spänningarna bara sprids 0,3 m från belastat område. Brottet kan både ske på grund av σ_{xy} och σ_{yy} (Tabell 7-3), antingen var för sig eller genom en kombinerad effekt. Detta sker i fästmassan under anslutningar mellan belastade fogar och klinkerplattor.

GOLVKONSTRUKTIONER - MODELLERING

I Tabell 7-4 har vi räknat ut vilken last som krävs för att initiera olinjärt beteende. Genom linjär interpolation räknas kritisk last fram utifrån hållfasthetsvärdet.

Fästmassa-Klinker	Last som krävs för att initiera icke linjärt beteende		
	Brottmod	Fall 1 (‰) (Golvet krymper)	Fall 2 (°C) (Klinker värms upp)
Mjukfog	Dragbrott	0,8 - 1,1	15 - 20
	Skjuvbrott	0,13 - 0,14	17 - 18
Cementfog i ostört fält	Dragbrott	14 - 18	15 - 20
	Skjuvbrott	1,5 - 1,7	17 - 18

Tabell 7-4. Belastning som behövs för att initiera olinjärt beteende i Fall 1 och Fall 2 beroende på vilka hållfasthetsvärden som är aktuella.

Då modelleringen i kapitel 6 är gjord på samma sätt som för modellering i detta kapitel används värdena från kapitel 6 som jämförelse när vi räknar ut lägsta belastning innan brott sker. För Fall 1 ger σ_{xy} strängast krav, vilket innebär en tillåten betongkrympning på 0,13 ‰. För Fall 2 ger också σ_{xy} strängast krav, vilket innebär en tillåten temperaturskillnad i klinkerplattor på +17°C jämfört med övriga material.

7.5 Sammanfattande resultat

I verkligheten fungerar golvbeläggningar inte som de renodlade fall som finns i detta kapitel utan som en sorts samverkan mellan dessa, samt en rad andra faktorer som inte är med i denna rapport. De värden som är framräknade i detta kapitel kan inte användas rakt av i ett verkligt fall, men kan ses som en indikation på vilka belastningar i fästmassan som krävs för brottinitiering.

En kombinerad effekt av krympning i betongen och lokal temperaturlast i klinkerplattorna kan ge högre spänningar i fästmassan än de ger var för sig. Inte så mycket i normalspänning vinkelrätt plattans plan, men desto mer i skjuvspänning. Detta gäller både vid fallet lokal belastning i klinkerplattor vid mjukfog respektive cementfog.

7.5.1 Fall 1

Genom egen provning och tidigare undersökningar uppskattas att det krävs en betongkrympning på 0,13 ‰ för att initiera skjuvbrott, vilket uppkommer i fästmassan 0-4 mm från en mjukfog eller en fri kant.

σ_{xx} byggs snabbt upp i klinkerskiktet från kanterna och når sin topp redan i närliggande platta. Mjukfogen i symmetrisnittet avlastar endast den närmaste plattan och spänningen är återigen uppe på samma nivå i plattan därefter. En låg elasticitetsmodul för fästmassan, liknande den för mjukfog, ger längre uppbyggnadssträcka innan σ_{xx} i klinkerskiktet är maximal igen (0,8 m för $E = 0,1$ GPa). Den E-modul som vi fick fram efter passningsräkningen i avsnitt 6.4.2 (1 GPa) ger dock en uppbyggnadssträcka på 0,45 m. För att avlasta golvkonstruktionen med mjukfogar behövs alltså fogar mellan varje platta. Detta är dock inte praktiskt möjligt att lägga så tätt och golvet kan då heller inte tåla större belastningar.

7.5.2 Fall 2

Genom egen provning och tidigare undersökningar uppskattas att det krävs en temperaturskillnad mellan underlag och klinkerbeläggning på mer än 17°C för att initiera ett skjuvbrott i fästmassan.

Den lokala lasten ger en hög σ_{xx} i klinkerplattorna som är belastade. Denna spänning avtar snabbt (0,3 m), och redan efter en obelastad platta är den nära noll. När mjukfogarna är placerade på modellens kanter finns ingen skillnad mot om det är cementfogar på samma ställe. Detta för att spänningarna inte sprider sig särskilt långt och därför inte når dessa fogar.

Om den lokala lasten istället skulle verka på de tre närmaste plattorna på var sida om mjukfogen skulle detta innebära en positiv effekt jämfört med om en cementfog skulle vara placerad på samma ställe. Den positiva effekten gäller dock bara den närmsta plattan. Effekterna kommer ifrån att volymökningen i plattorna närmast fogen då kan ske obehindrat vid denna fog.

8 SLUTSATS

Huvudfrågan i detta arbete är om mjukfogar avlastar de spänningar som, på grund av betonggolvens krympning eller lokala termiska laster på klinkerplattorna, uppstår i en fast förankrad klinkerbeläggning på betongunderlag med plattsättning enligt tunnskiktmetoden.

Avlastningseffekten för normalspänningen i plattans plan för klinkerbeläggningen vid användning av mjukfogar är begränsad. De närmsta plattorna på var sida om fogen blir avlastade, men i gengäld uppstår en stor skjuvspänning i fästmassan. Spänningsbilden vid en mjukfog liknar den vid en fri kant, där det har visat sig att brott oftast uppstår. Genom egen provning och tidigare undersökningar uppskattas att det krävs en betongkrympning på 0,13 ‰ för att initiera skjuvbrott, vilket uppkommer i fästmassan 0-4 mm från en mjukfog eller en fri kant.

Fästmassans egenskaper avgör avlastningsområdets storlek. Fästmassan som användes i denna undersökning hade en elasticitetsmodul kring $E = 1 \text{ GPa}$ då tjockleken på fästmassan under klinkerplattorna var cirka 3 mm. Under dessa förutsättningar avlastar en mjukfog ett område på 0,45 m på var sida om fogen. Detta avstånd motsvarar ungefär en platta (om 296 x 296-plattor används) vilket medför att mjukfogar troligtvis inte gör någon nytta mellan plattfält. Används istället en flexibel fästmassa med en styvhet i storleksordning med mjukfog, avlastas ett område på 1 m på var sida om fogen. Problemet med bom löses alltså inte om en mer flexibel fästmassa används med liknande hållfasthetsvärden som vårt flytfix.

Då en lokal uppvärmning i form av exempelvis solinstrålning eller varmvattenspolning belastar klinkerbeläggningen fortplantas inte spänningarna någon längre sträcka i golvkonstruktionen (0,3 m). Genom egen provning och tidigare undersökningar uppskattas att det krävs en temperaturskillnad mellan underlag och klinkerbeläggning på mer än 17°C för att initiera ett skjuvbrott i fästmassan, vilket uppkommer under anslutningar mellan belastade fogar och klinkerplattor.

Är det inte möjligt att begränsa töjningar från krympning i betongen och uppvärmning av klinkerbeläggningen så pass mycket att bom undviks bör en flytande golvkonstruktion användas istället för en fast förankrad konstruktion.

Vi har, efter att ha utfört laborationer, kommit fram till att rätt placerade töjningsgivare är ett bra sätt att fånga upp beteendet och registrera töjningen som krävs för vidhäftningsbrott. Alternativet att knacka och lyssna efter bom är ett bra komplement till töjningsgivarna, men brottet upptäcks avsevärt mycket senare. Denna manuella metod är dock bra för att följa utbredningen av bom. Om utbredningen ska följas på samma sätt med hjälp av töjningsgivare skulle det behövas ett mycket stort antal givare, vilket är tidsödande och dyrt.

9 DISKUSSION

En osäkerhet i provningsresultaten är att betongpelarna kom ny tillverkade från fabrik och därmed har kvarvarande krympning. Plattorna applicerades på pelarna en vecka efter leverans och vi väntade sedan två veckor innan själva provningen. Under denna tid finns det risk för krympning i betongen och därmed en spänningsuppbyggnad i klinkerplattorna, och detta värde borde egentligen läggas till i den resulterande töjningen. Detta är inte möjligt eftersom vi inte har något värde på hur stor denna initiala töjning är.

En annan osäkerhet för provningsresultaten är att den relativa fuktigheten i laborationshallen inte är känd, vilket kan påverka härdningen av fogar. Det är dock troligt att RF var lågt eftersom provningen utfördes på vinterhalvåret. Det som också kan påverka relevansen av provningsresultatet är hur snabbt lastpåföringen sker. I verkligheten ökar töjningen mycket långsamt och då sker en spänningsrelaxation på grund av krypning. För vårt fall tog provningen cirka en halvtimme, och därmed fångas inte eventuell krypning över längre tid upp.

Verknings sättet för de golvmodeller vi valt är måhända inte precis som för ett golv i verkligheten, men de duger i vårt fall eftersom det huvudsakliga syftet med detta arbete är att undersöka om mjukfogar avlastar golvkonstruktionen.

De betongtöjningar och temperaturer som är framräknade i kapitel 7 kan inte användas rakt av i ett verkligt fall, men kan ses som en indikation på vilka belastningar i fästmassan som krävs för brottinitiering.

Framtida studier skulle kunna undersöka följande:

- FE-modellering med materialmodell som inkluderar brottbeteende.
- Provning: Noggrannare undersökningar av fästmassans skjuvegenskaper.
- Provning: Högre pelare med fler plattor, med cementbruk mellan alla plattor utom de i mitten där mjukfog sätts. Detta för att verifiera hur många plattor som en mjukfog avlastar.

10 REFERENSLISTA

Böcker:

Burström, Per-Gunnar (2002). *Byggnadsmaterial*. Studentlitteratur. Upplaga 3. Lund.

Byggkeramikhandboken (2005). Byggkeramikrådet. Åsö-Kopia AB. Stockholm.

Manual GrindoSonic (1990). J.W. Lemmens Inc.
Operating Instructions for the GrindoSonic MK5 "Industrial" instrument.
samt *Impulse excitation, a technique for dynamic modulus measurement.*

RILEM (1977) *Materials and structures*. pp.357-364. Bordas-Dunod. Paris, France

RILEM (1994). *Technical recommendations for the testing and use of construction materials*. pp.83-86. E & FN Spon. London, UK.

Ottosen, Niels Saabye & Petersson, Hans (1992). *Introduction to the finite element method*. pp.398. Pearson Education Ltd. Dorchester, UK.

Van der Pluijm, Rob (1999). *Out-of-Plane Bending of Masonry, Behaviour and Strength*. pp.227-234. Netherlands

Vermeltfoort, Ad (2005). *Brick-mortar interaction in masonry under compression*. *Bouwstenen* 85. pp.15-20. Eindhoven, Netherlands

Muntliga:

Klang, Kenneth. Produktion/Teknik. CC Höganäs Byggkeramik AB. 2006-10-16

Wester, Anders. Distriktschef Hus Syd. Skanska Sverige AB. 2006-10-19

REFERENSLISTA

Artiklar:

Lanevik, Hans & Yttergren, Björn (1995)., ”Keramiska plattor, vidhäftningsbrott vid plattsättning på betong”. *SIAB Teknik*.

Näslund, Ivan (1960). ”Keramiska beläggningar och beklädnader”. *Byggmästaren*. Samlingsvolym 1960. s 135-143.

Pettersson, Rolf & Sandström, Matz & Svensson Bertil (1994).
”Krympningens inverkan på vidhäftningen hos keramiska plattor satta på betong”.
Rapport SP AR 1994:56

Spinner, S & Tefft, W.E. (1961). ”A method for determining mechanical resonance frequencies and for calculating elastic moduli from these frequencies”.
Proceedings ASTM. Vol 61, 1961

11 APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

Detta appendix innehåller diagram från provningen på marksten (kapitel 5) för spänningar och töjningar. X-axeln har enheten μstrain , vilket är töjningen $\times 10^{-6}$. Y-axeln har enheten MPa.

Rubrikens namn kan till exempel heta Marksten Provning C1 eller Marksten Provning M1 Detta innebär marksten med cementfog/mjukfog prov nummer 1.

Givarnas position i aktuellt prov är förkortade i diagrammen i detta appendix för att förklaringsrutan ska ta mindre plats. Förkortningarna är som följer.

n = nedre

ö = övre

v = vänster

h = höger

m = mitt

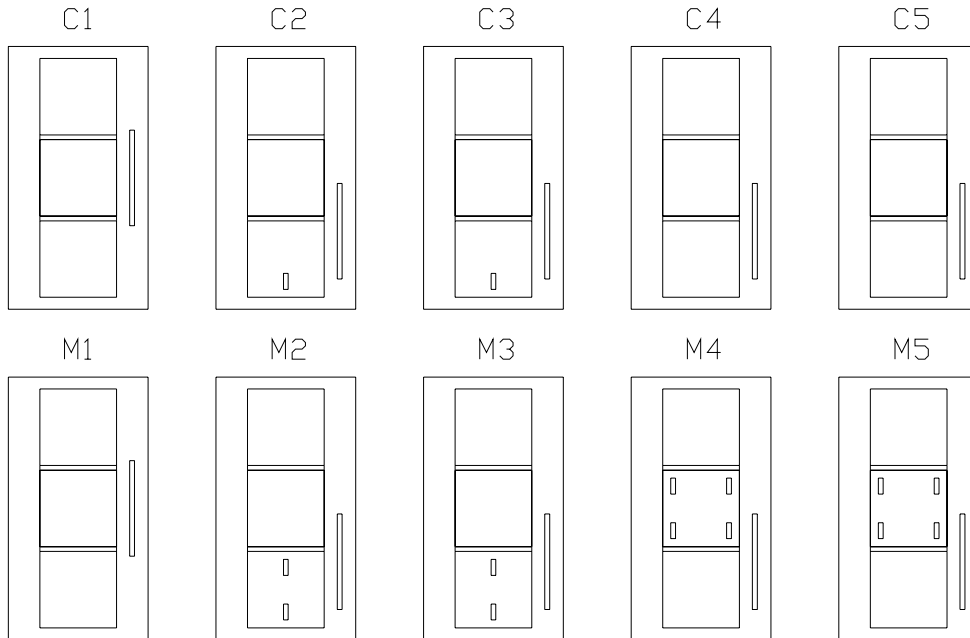
klinker 1 = övre klinkerplattan

klinker 2 = mittersta klinkerplattan

klinker 3 = nedersta klinkerplattan

Det kan exempelvis stå klinker 3nv, vilket innebär trådtöjningsgivare längst ner till vänster på nedersta klinkerplattan. Töjningsgivarna är placerade på klinkerplattorna enligt Figur A- 1 och sitter 10 mm från fog/kant samt är 20 mm långa. Töjningsgivaren på betongen är 120 mm lång.

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN



Figur A- 1 Placering av trådtöjningsgivare

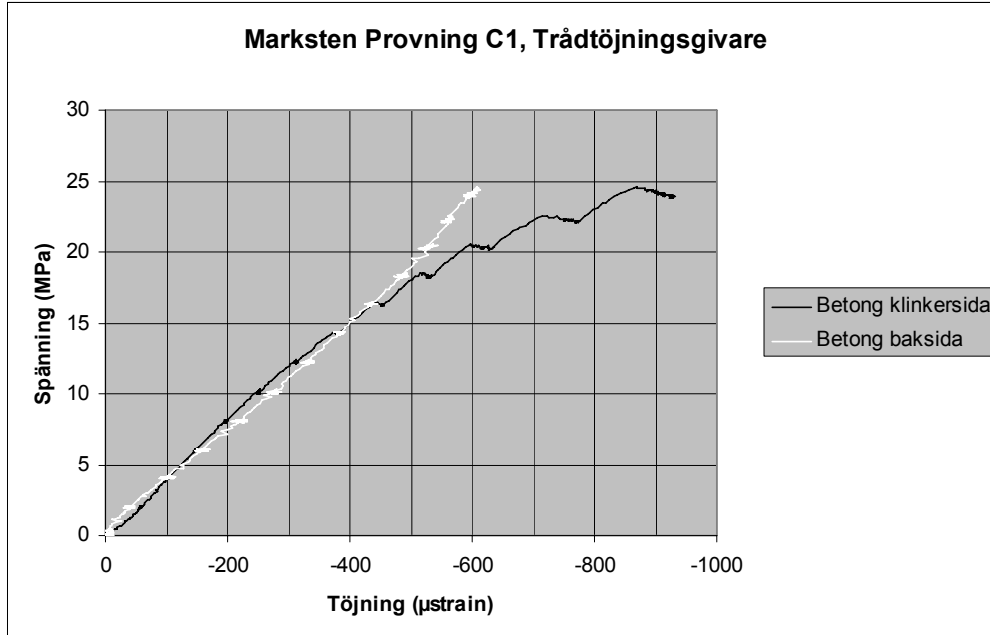


Diagram A- 1. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning C1, töjningsgivare för betong

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

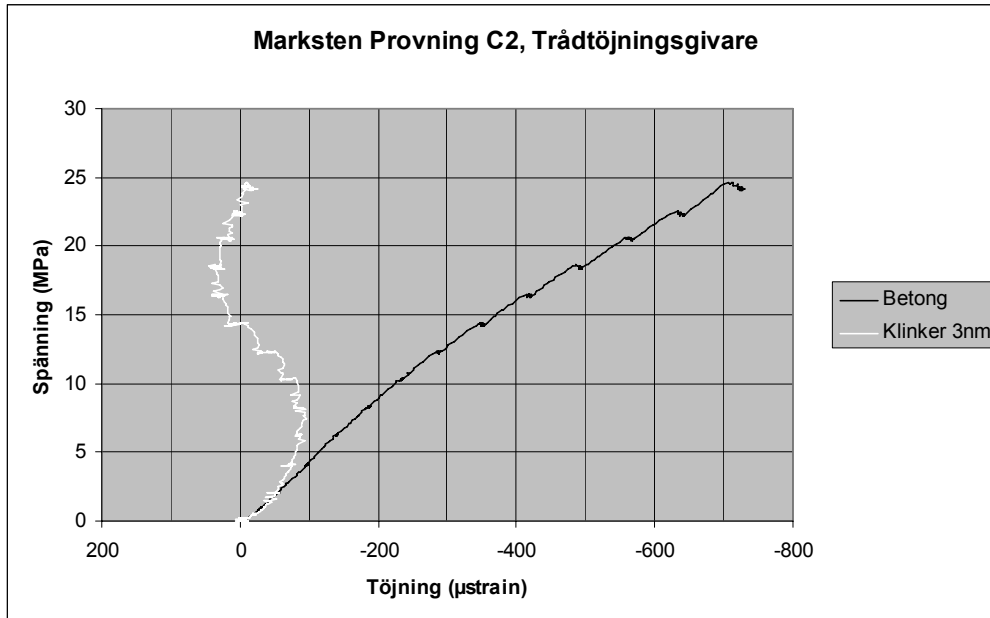


Diagram A- 2. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning C2, töjningsgivare för betong och klinkerplatta

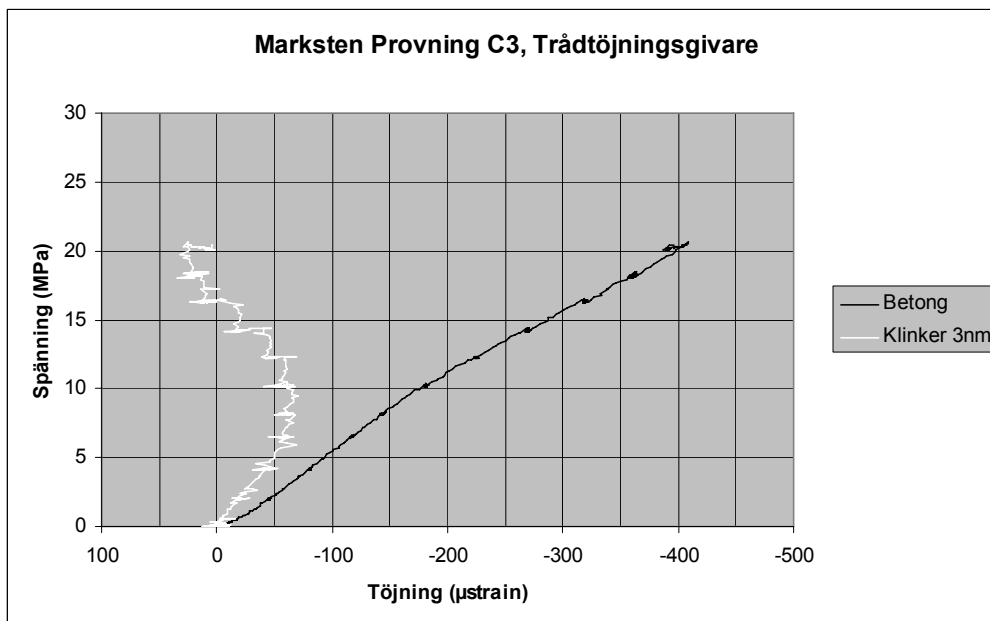


Diagram A- 3. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning C3, töjningsgivare för betong och klinkerplatta

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

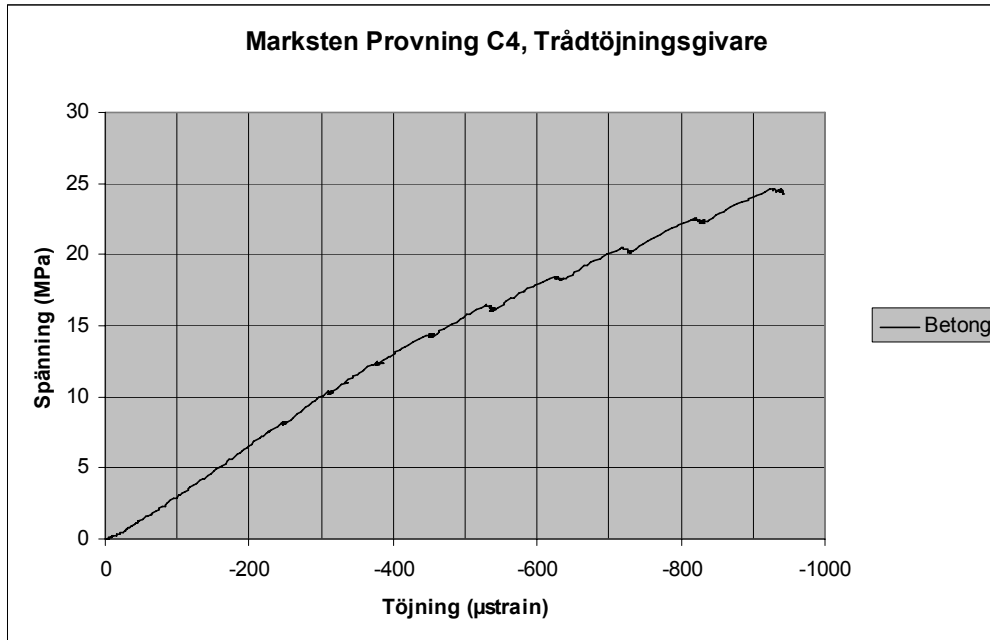


Diagram A- 4. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning C4, töjningsgivare för betong

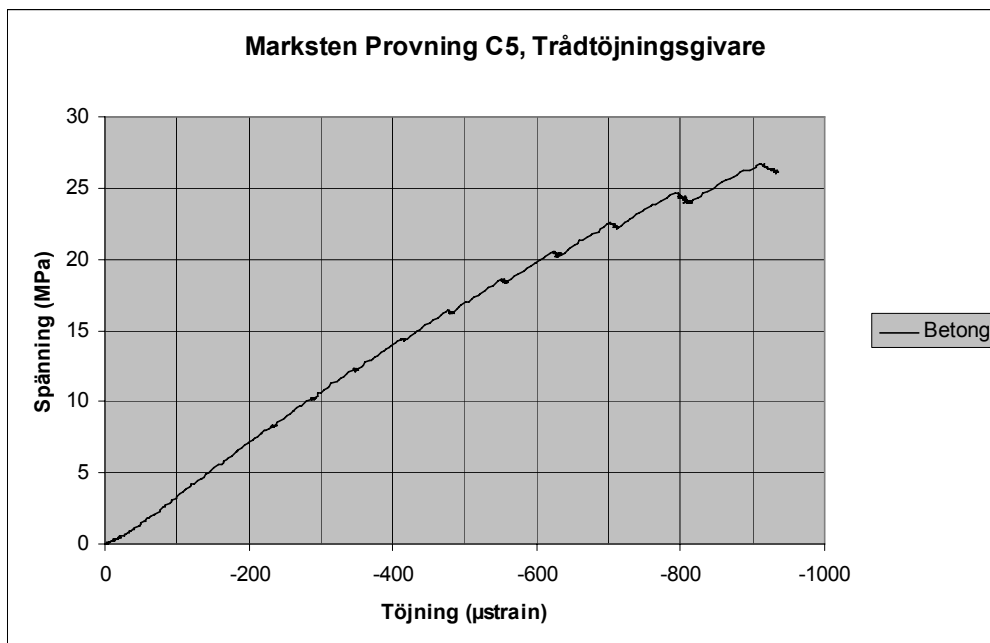


Diagram A- 5. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning C5, töjningsgivare för betong

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

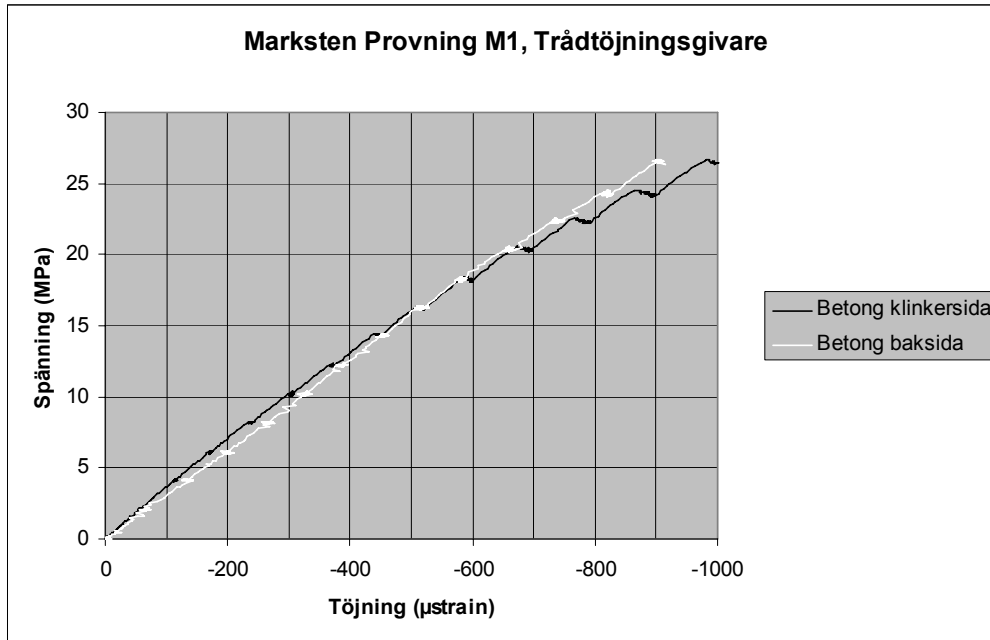


Diagram A- 6. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M1, töjningsgivare för betong

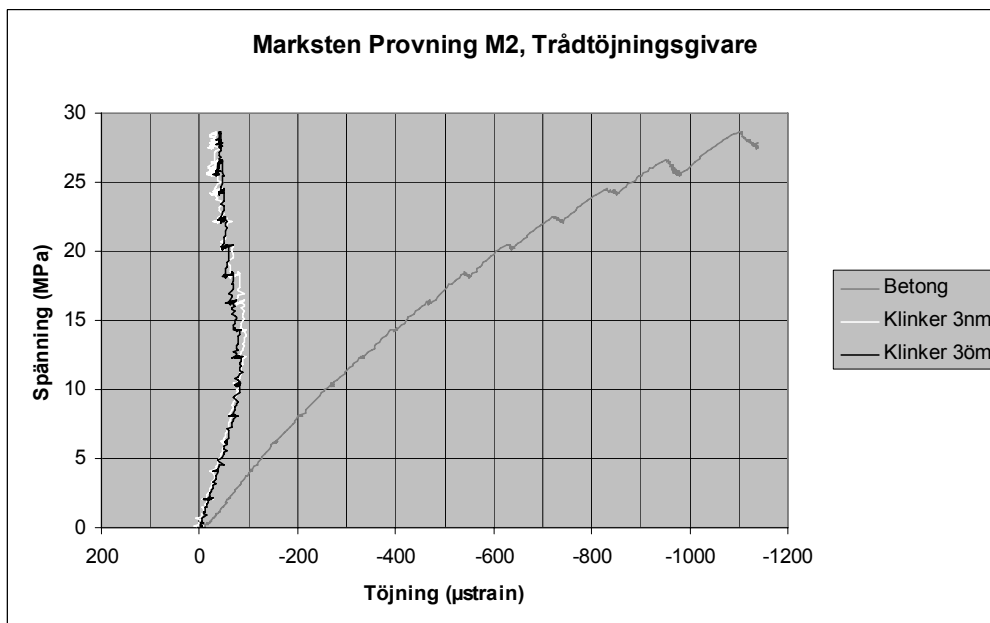


Diagram A- 7. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M2, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

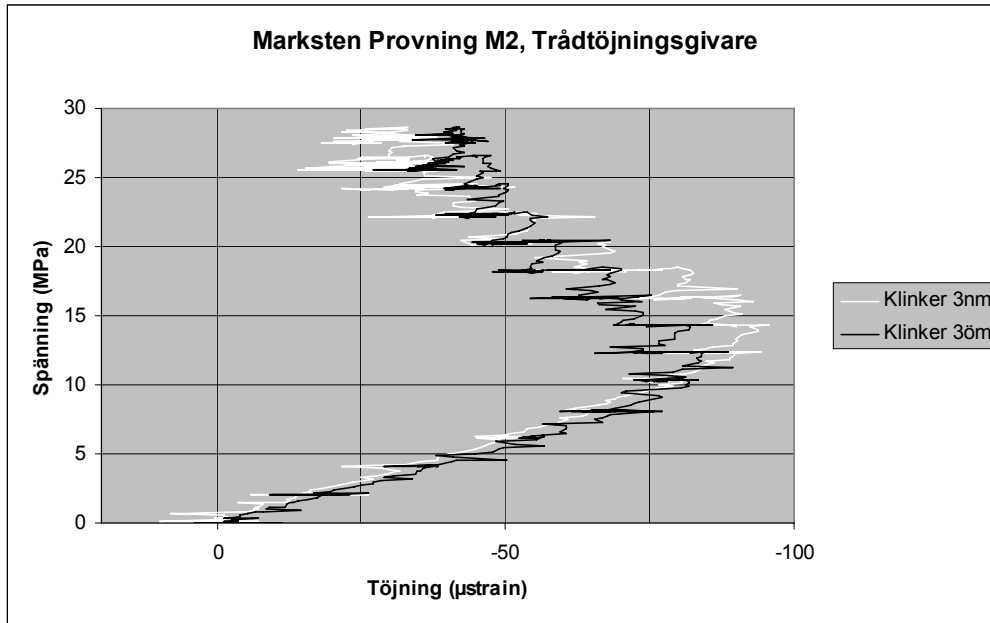


Diagram A- 8. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M2, töjningsgivare för klinkerplattor

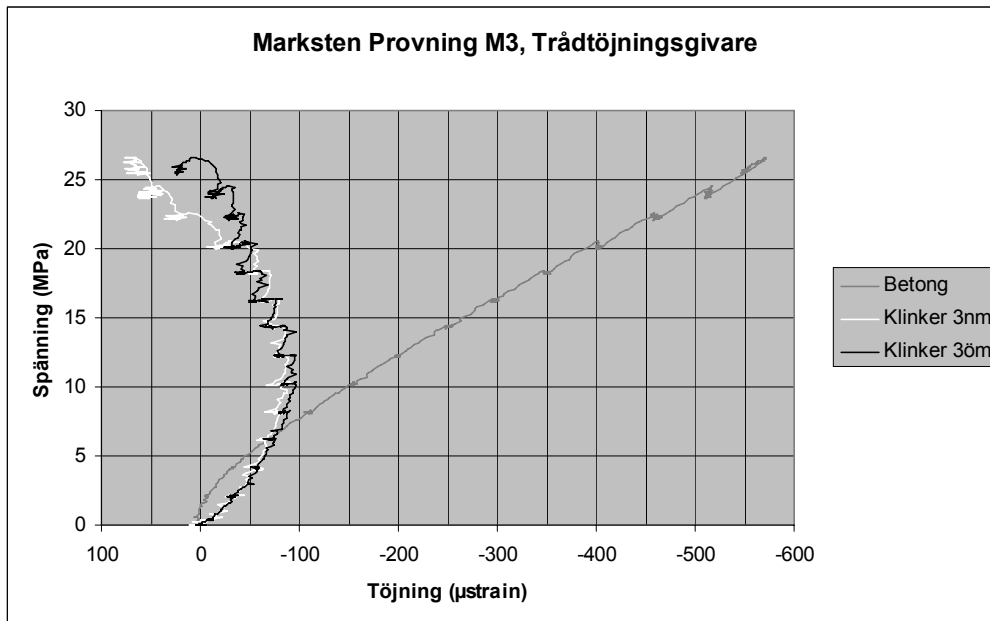


Diagram A- 9. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M3, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

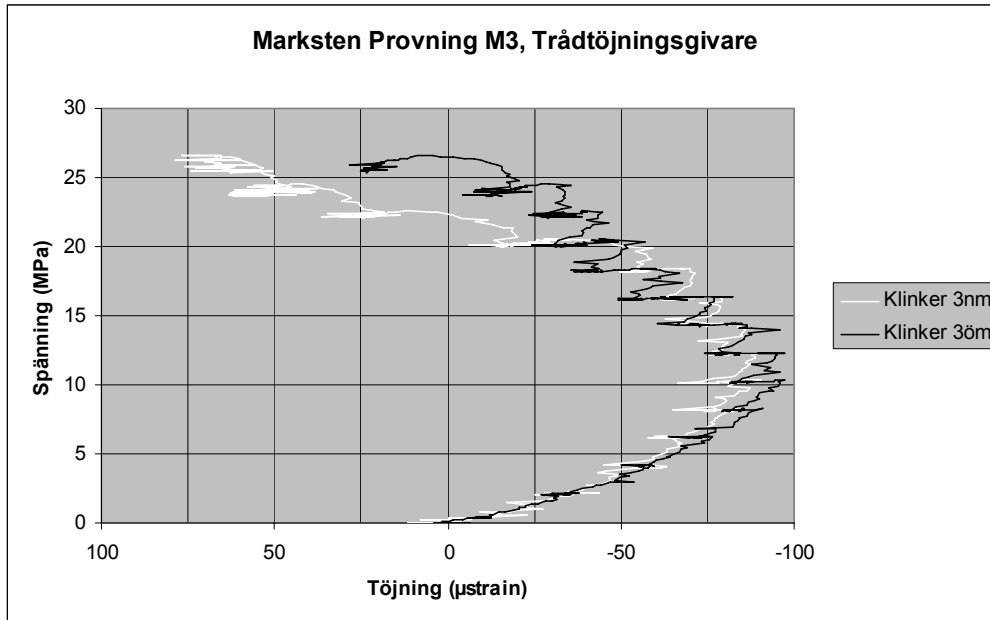


Diagram A- 10. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M3, töjningsgivare för klinkerplattor

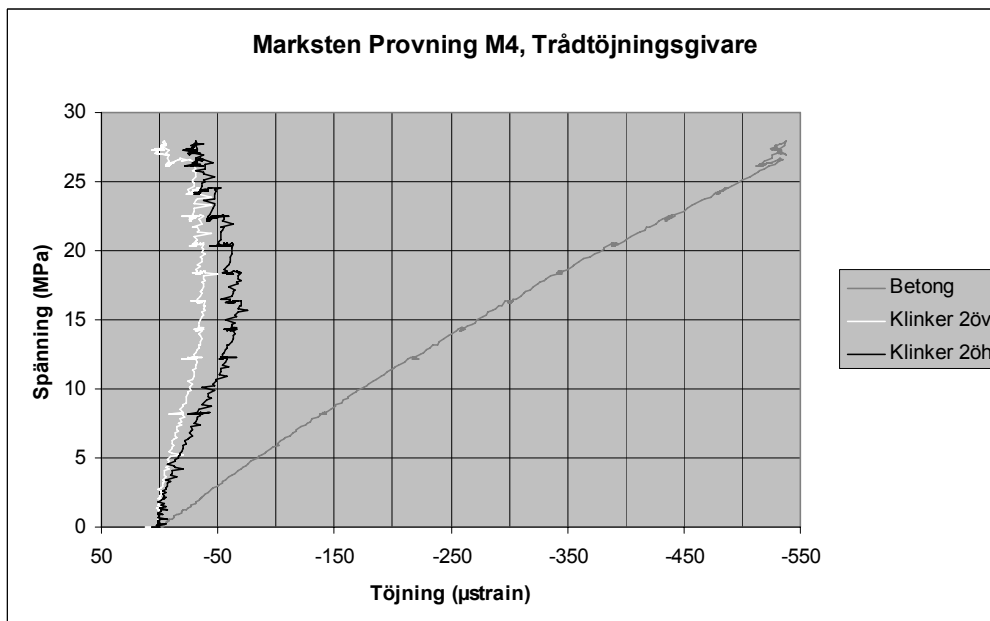


Diagram A- 11. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M4, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

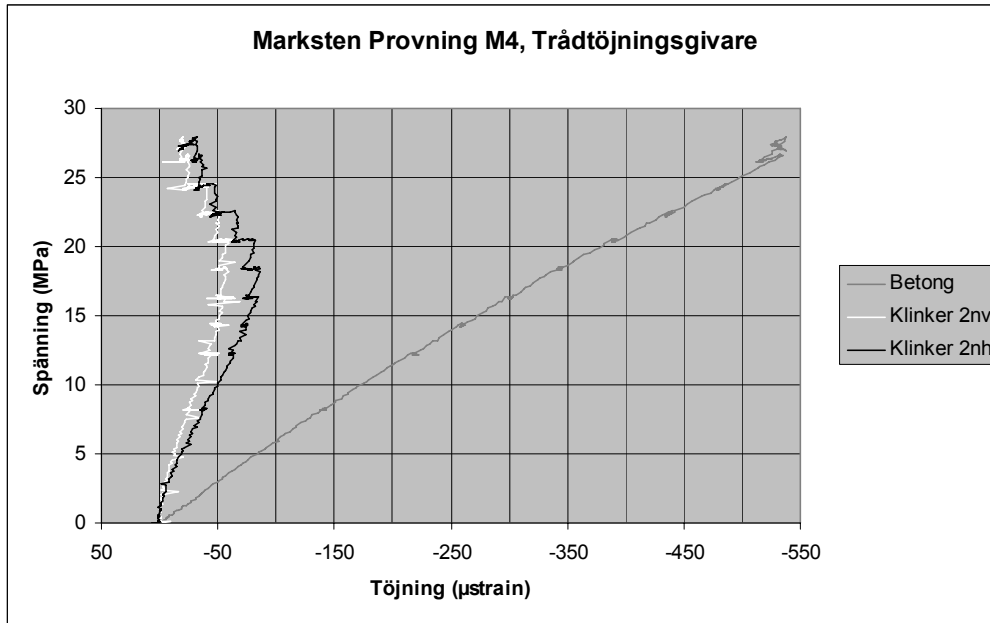


Diagram A- 12. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M4, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

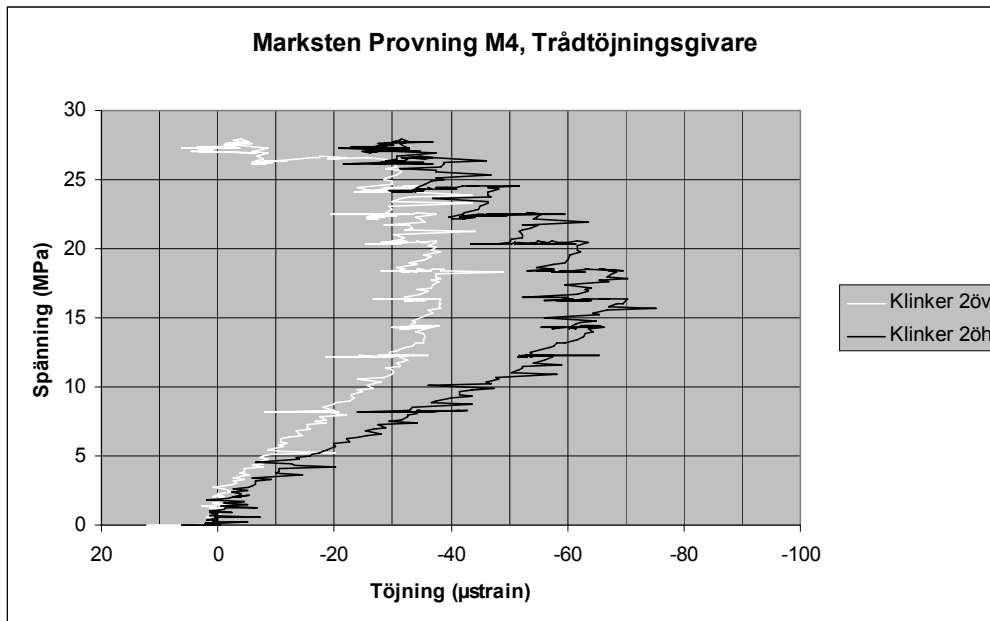


Diagram A- 13. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M4, töjningsgivare för klinkerplattor

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

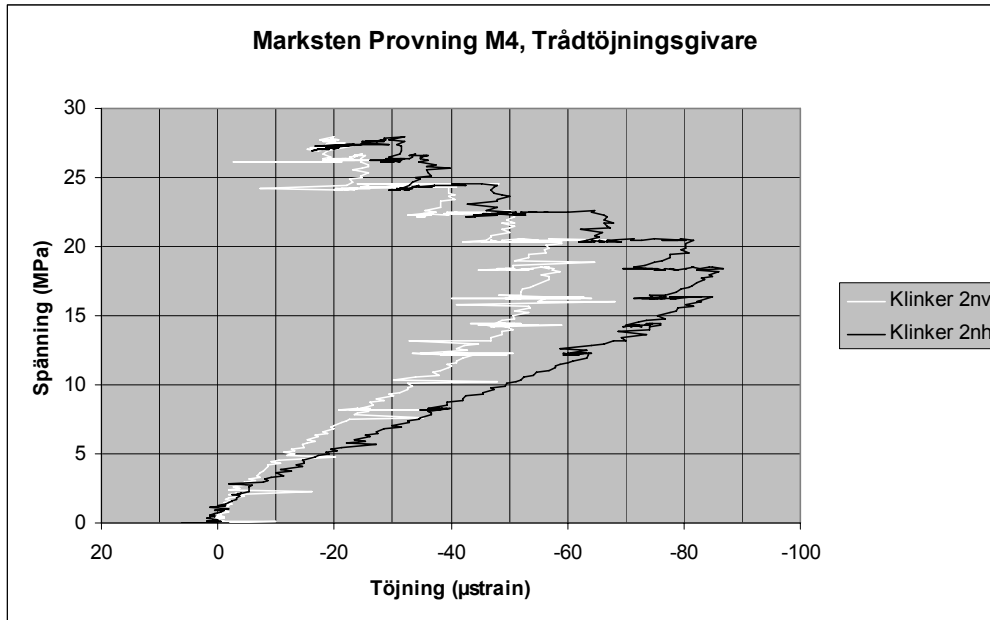


Diagram A- 14. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M4, töjningsgivare för klinkerplattor

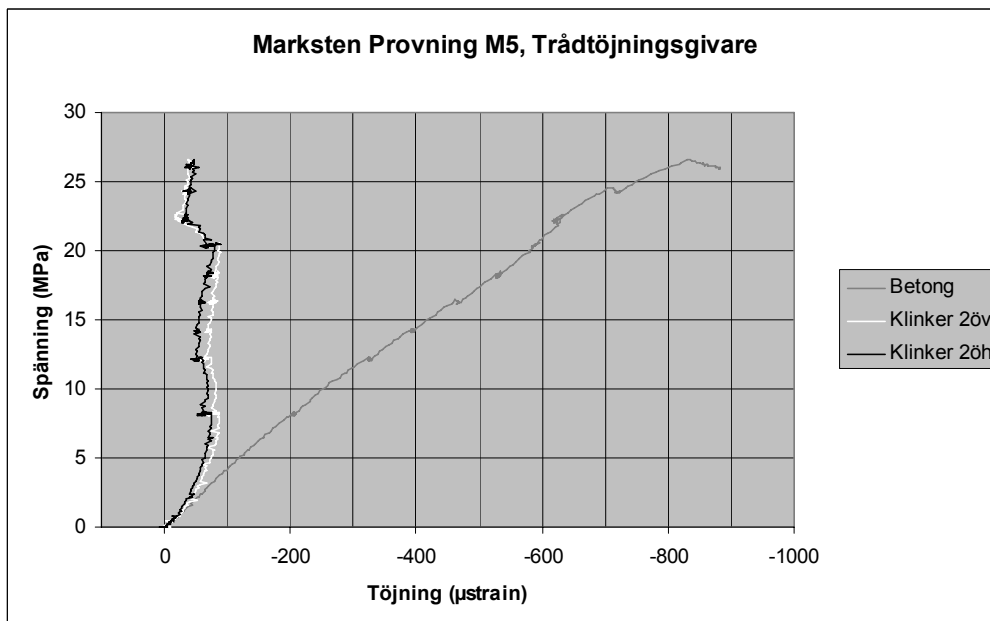


Diagram A- 15. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M5, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

APPENDIX A: PROVNING MARKSTEN

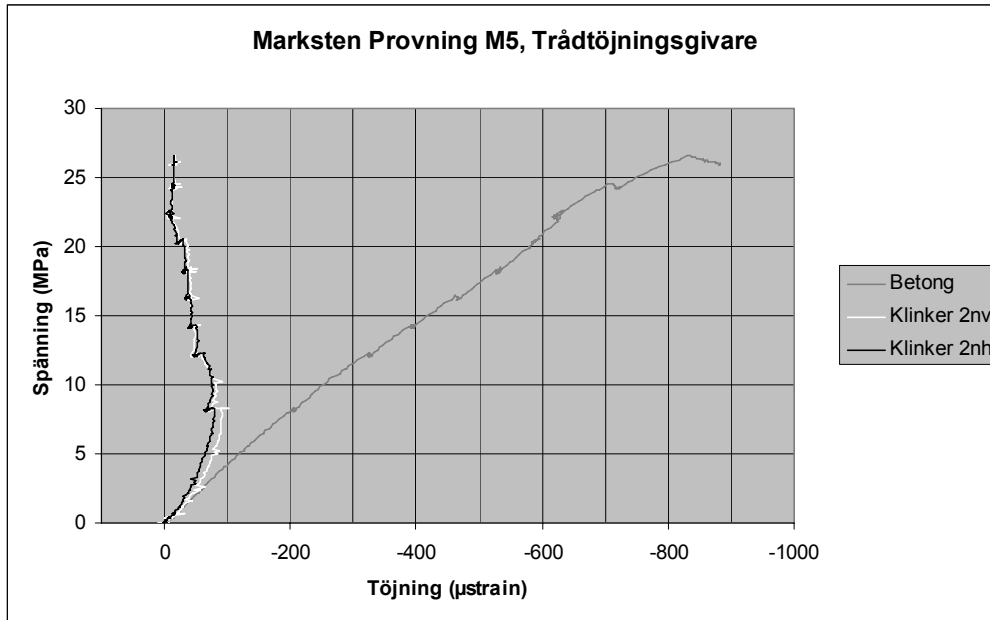


Diagram A- 16. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M5, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

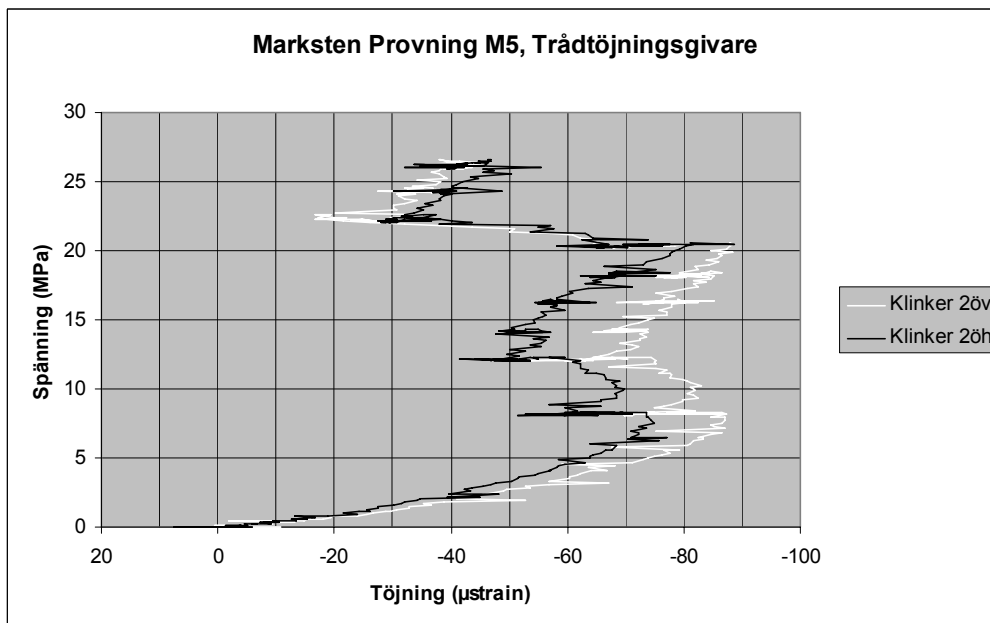


Diagram A- 17. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M5, töjningsgivare för klinkerplattor

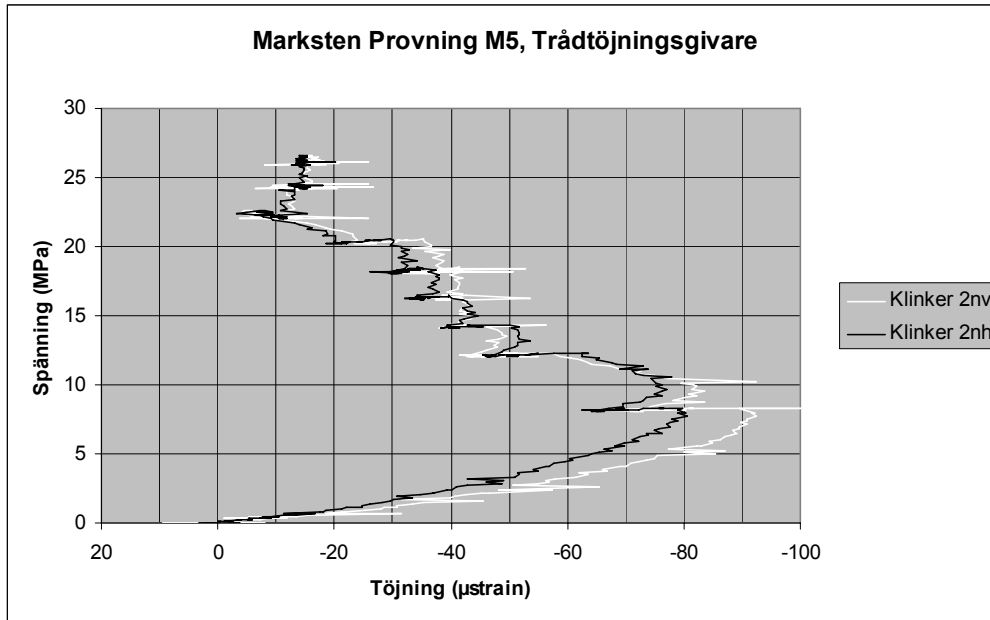


Diagram A- 18. Last-Töjningsdiagram: Marksten Provning M5, töjningsgivare för klinkerplattor

12 APPENDIX B: PROVNING PELARE

Detta appendix innehåller diagram från provningen för pelare (kapitel 6) för spänningar och töjningar. X-axeln har enheten μstrain , vilket är töjningen $\times 10^{-6}$. Y-axeln har enheten MPa.

Rubrikens namn kan till exempel heta Pelare Provning C1 eller Pelare Provning M1. Detta innebär pelarprov cementfog/mjukfog prov nummer 1.

Givarnas position i aktuellt prov är förkortade i diagrammen i detta appendix för att förklaringsrutan ska ta mindre plats. Förkortningarna är som följer.

n = nedre

ö = övre

m = mitt

klinker 1 = övre klinkerplattan

klinker 2 = mittersta klinkerplattan

klinker 3 = nedersta klinkerplattan

Det kan exempelvis stå klinker 3nv, vilket innebär trådtöjningsgivare längst ner till vänster på nedersta klinkerplattan.

Töjningsgivare är placerade enligt Figur B- 1.

För C1 och M1 sitter givarna 4 mm från fog/kant.

För C2 sitter översta givaren 70 mm från fogen och den understa 40 mm från kanten.

För M2 sitter översta givaren 40 mm från fogen och den understa mitt på platta 3.

För C3 och C4 sitter den övre och undre givaren 40 mm från respektive kant, medan den mittersta sitter mitt på platta 2.

Töjningsgivarna på klinkerplattorna är 20 mm långa.

Töjningsgivaren, som sitter mitt på betongens högersida, är 120 mm lång.

APPENDIX B: PROVNING PELARE



Figur B- 1. Placering av töjningsgivare för provkropparna med cementfog och mjukfog

APPENDIX B: PROVNING PELARE

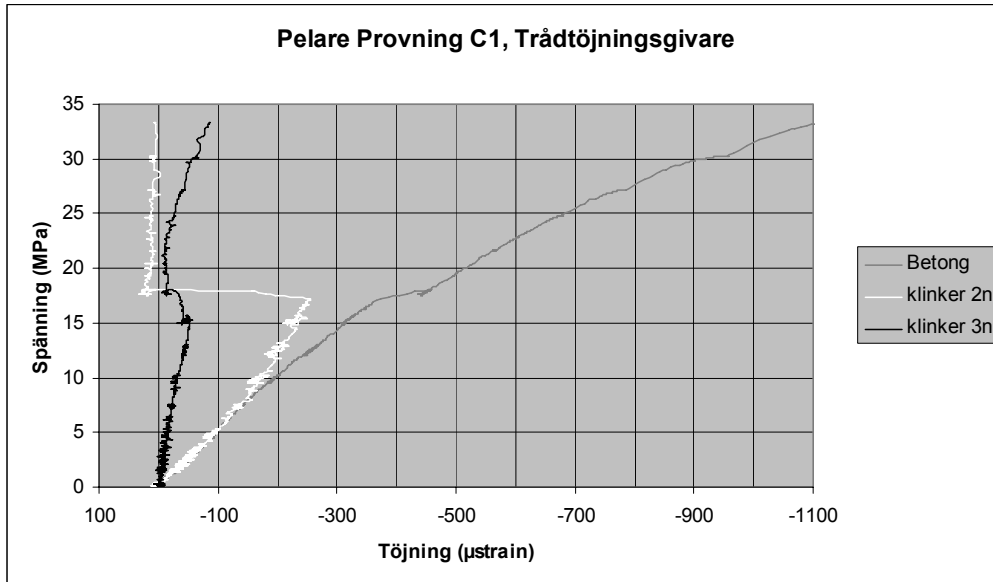


Diagram B- 1. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning C1, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

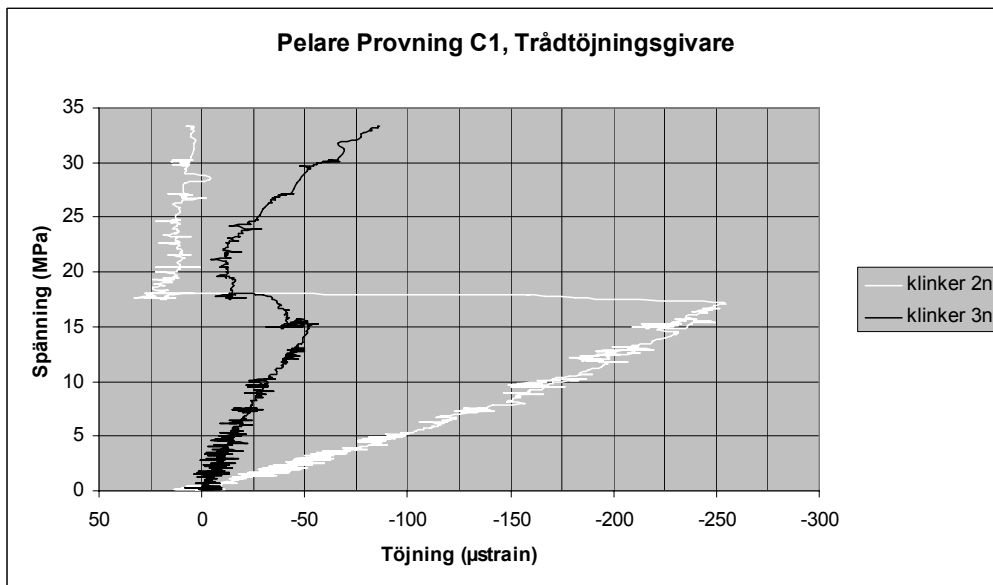


Diagram B- 2. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning C1, töjningsgivare för klinkerplattor

APPENDIX B: PROVNING PELARE

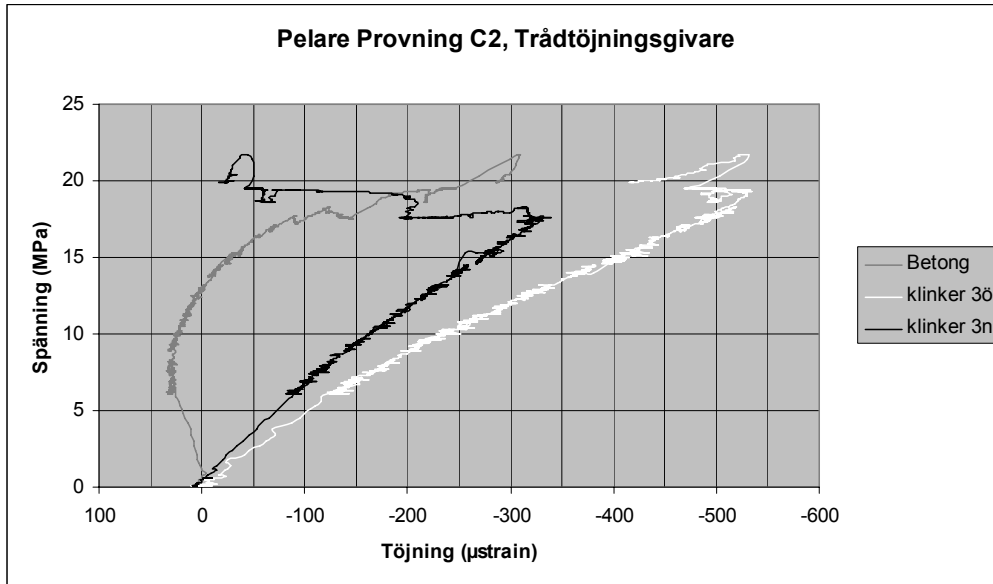


Diagram B- 3. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning C2, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

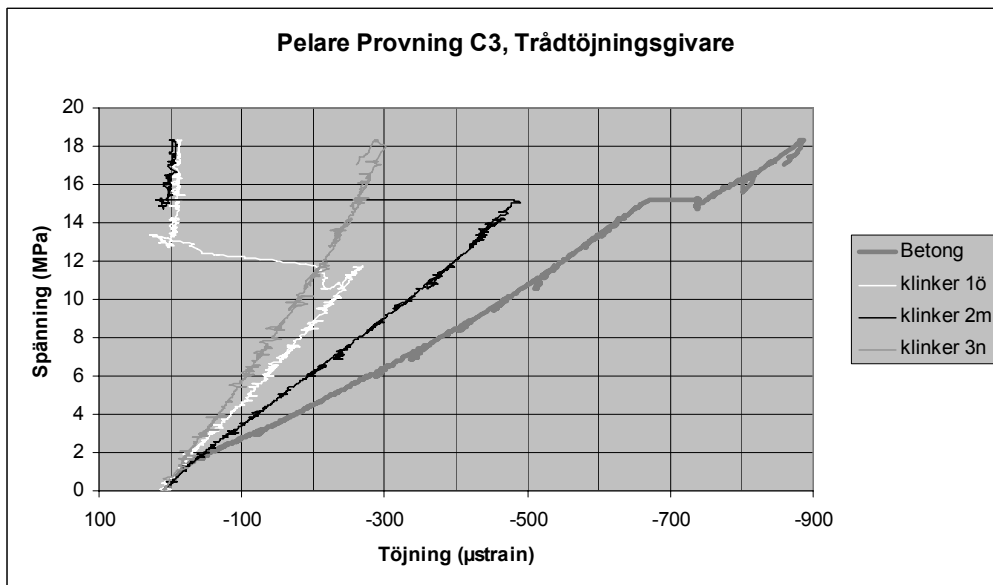


Diagram B- 4. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning C3, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

APPENDIX B: PROVNING PELARE

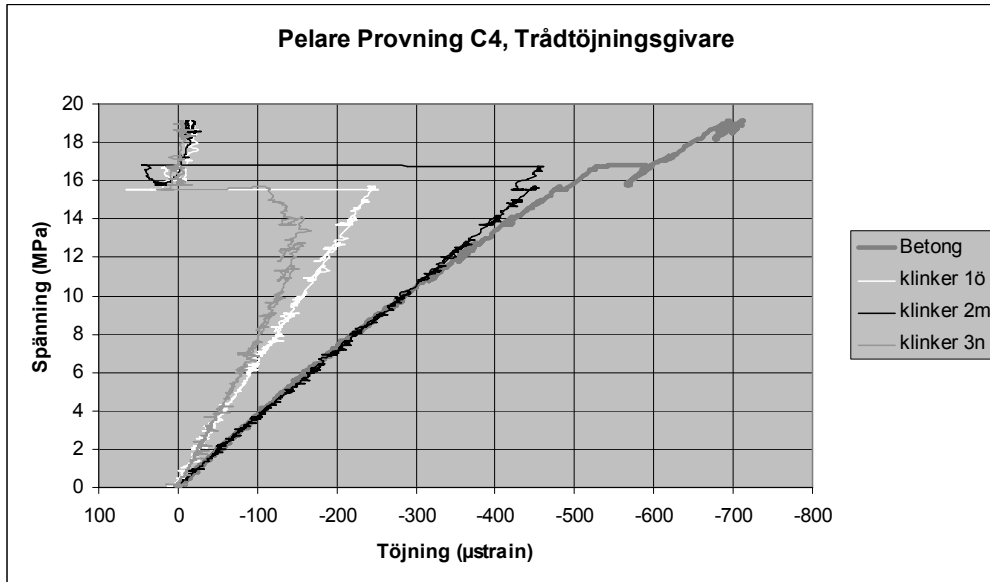


Diagram B- 5. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning C4, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

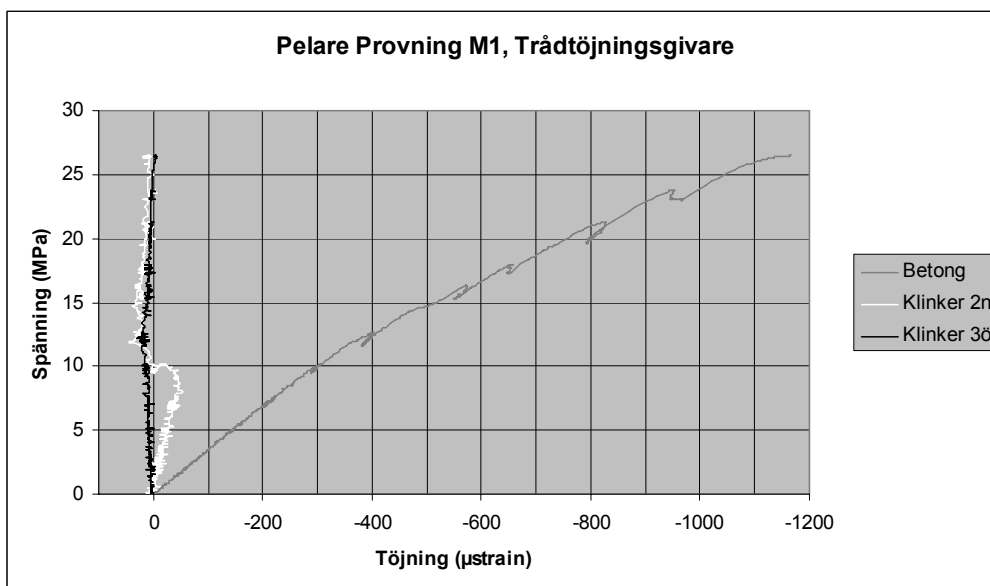


Diagram B- 6. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning M1, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

APPENDIX B: PROVNING PELARE

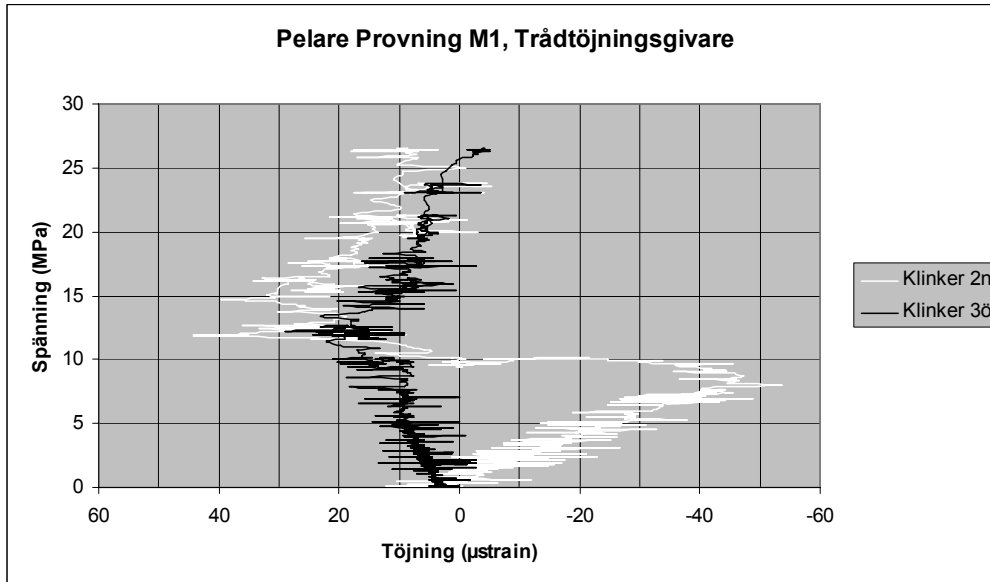


Diagram B- 7. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning M1, töjningsgivare för klinkerplattor

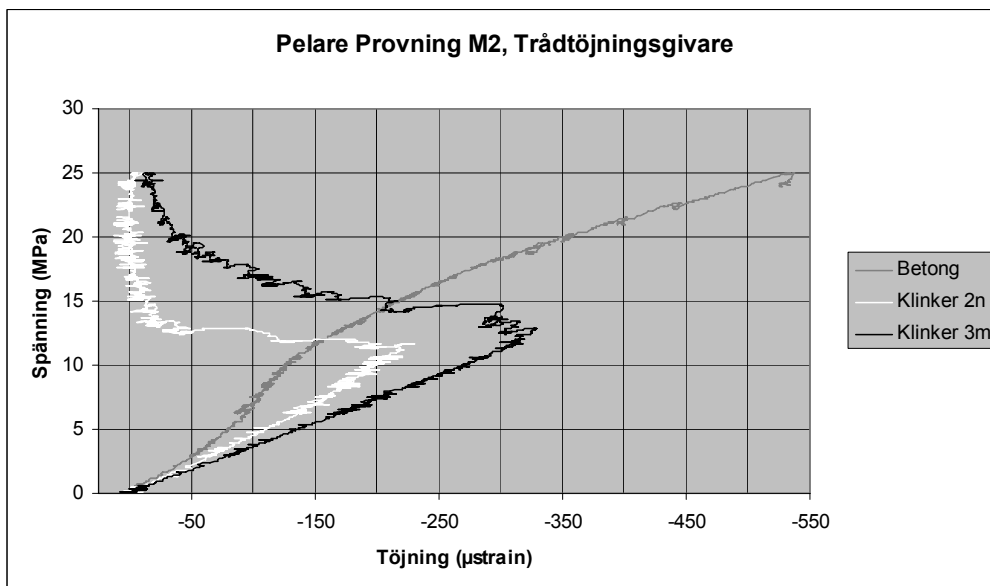


Diagram B- 8. Last-Töjningsdiagram: Pelare Provning M2, töjningsgivare för betong och klinkerplattor

13 APPENDIX C: DYNAMISKA E-MODULER

I detta appendix redovisas dimensioner och vikt på provkropparna i Kapitel 4. I Tabell C- 1 finns indata och resultat för materialen baserade på formeln nedan

Den dynamiska E-modulen beräknas med Ekvation C-1 (Spinner & Tefft 1961).

$$E = C \cdot \frac{\rho \cdot l^4 \cdot f^2}{h^2} \cdot T \quad (C-1)$$

l = längd (m)

b = bredd (m)

h = höjd (m)

m = vikt (kg)

ρ = densitet (kg/m^3)

ν = Tvärkontraktionstal = 0,2

$T = T_1 + T_2$ = Korrektionsfaktor

$$T_1 = 1 + 6,585 \left(1 + 0,0752\nu + 0,8109\nu^2 \right) \left(\frac{h}{l} \right)^2$$

$$T_2 = -0,868 \left(\frac{h}{l} \right)^4 - \frac{8,34 \left(1 + 0,2023\nu + 2,173\nu^2 \right) \left(\frac{h}{l} \right)^4}{1 + 6,338 \left(1 + 0,1408\nu + 1,536\nu^2 \right) \left(\frac{h}{l} \right)^2}$$

C = konstant = 0,94642

f = egenfrekvens (Hz)

APPENDIX C: DYNAMISKA E-MODULER

Klinker Keradur 1			Klinker Keradur 2			Klinker Keradur 3		
längd	0,296	m	längd	0,296	m	längd	0,296	m
bredd	0,060	m	bredd	0,061	m	bredd	0,082	m
höjd	0,008	m	höjd	0,008	m	höjd	0,008	m
m	0,314	kg	m	0,321	kg	m	0,430	kg
ρ	2210	kg/m ³	ρ	2206	kg/m ³	ρ	2217	kg/m ³
v	0,2		v	0,2		v	0,2	
T	1,01		T	1,01		T	1,01	
C	0,9464		C	0,9464		C	0,9464	
f	443,2	Hz	f	441,8	Hz	f	445,3	Hz
E-dyn	49,5	GPa	E-dyn	49,1	GPa	E-dyn	50,1	GPa
E-stat	42,1	GPa	E-stat	41,8	GPa	E-stat	42,6	GPa

Klinker Keradur 4			Fästmassa			Mjukfog		
längd	0,296	m	längd	0,119	m	längd	0,119	m
bredd	0,078	m	bredd	0,031	m	bredd	0,031	m
höjd	0,008	m	höjd	0,013	m	höjd	0,013	m
m	0,416	kg	m	0,057	kg	m	0,069	kg
ρ	2252	kg/m ³	ρ	1184	kg/m ³	ρ	1444	kg/m ³
v	0,2		v	0,2		v	0,2	
T	1,01		T	1,08		T	1,08	
C	0,9464		C	0,9464		C	0,9464	
f	447,9	Hz	f	1821	Hz	f	200	Hz
E-dyn	51,6	GPa	E-dyn	4,8	GPa	E-dyn	0,07	GPa
E-stat	43,8	GPa	E-stat	4,1	GPa	E-stat	0,06	GPa

Cementfog 1			Cementfog 2			Cementfog 3		
längd	0,119	m	längd	0,124	m	längd	0,119	m
bredd	0,029	m	bredd	0,023	m	bredd	0,029	m
höjd	0,011	m	höjd	0,011	m	höjd	0,011	m
m	0,081	kg	m	0,059	kg	m	0,072	kg
ρ	2121	kg/m ³	ρ	1932	kg/m ³	ρ	1937	kg/m ³
v	0,2		v	0,2		v	0,2	
T	1,06		T	1,05		T	1,06	
C	0,9464		C	0,9464		C	0,9464	
f	2907	Hz	f	1629	Hz	f	1979	Hz
E-dyn	29,8	GPa	E-dyn	10,0	GPa	E-dyn	12,4	GPa
E-stat	25,3	GPa	E-stat	8,5	GPa	E-stat	10,5	GPa

Tabell C- 1. Beräknade dynamiska E-moduler hos ingående material från frekvensmätning i GrindoSonic

