LUND UNIVERSITY

Energieffektivisering av miljonprogrammets flerbostadshus genom beständiga tilläggsisoleringssystem

Molnar, Miklos; Jönsson, Johan; Sandin, Kenneth; Capener, Carl-Magnus

2013

Link to publication

Citation for published version (APA):
Molnar, M., Jönsson, J., Sandin, K., & Capener, C.-M. (2013). *Energieffektivisering av miljonprogrammets flerbostadshus genom beständiga tilläggsisoleringssystem*. Lund university, Division of Structural Engineering.

Total number of authors:
4

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Lund University
Division of Structural Engineering

Energieffektivisering av miljonprogrammets flerbostadshus genom beständiga tilläggsisoleringssystem

Slutrapport 2013

Miklós Molnár
Johan Jönsson
Kenneth Sandin
Carl-Magnus Capener

Report TVBK-3064
Lund 2013

CERBOF SBUF

Rapport: TVBK-3064

ISRN: LUTVDG/TVBK-13/3064(100)

ISBN: 978-91-979543-5-8

Energieffektivisering av miljonprogrammets flerbostadshus genom beständiga tilläggsisoleringssystem

Slutrapport februari 2013

Författare:

Miklós Molnár

Johan Jönsson

Kenneth Sandin

Carl-Magnus Capener

Lunds tekniska högskola

Avdelningen för konstruktionsteknik

Box 118

221 00 LUND

Telefon 046 222 34 53

Telefax 046 222 42 12

www.kstr.lth.se

FÖRORD

Studien genomfördes vid Lunds Tekniska Högskola inom ramen för projektet ”Energieffektivisering av miljonprogrammets flerbostadshus genom beständiga tilläggsisoleringssystem” under perioden 2009-2012. Målsättningen med projektet var att undersöka om tilläggsisoleringssystemen bestående av puts på isolering respektive putsade ventilerade skivor med tilläggsisolering har potentialen att kombinera energieffektivisering med långsiktig beständighet.

Projektet genomfördes i samarbete med Weber Saint Gobain Byggprodukter AB, Fasadex AB, medlemsföretag inom FoU Syd samt Bostadsbolaget, Göteborg. Projektet finansierades av CERBOF anslag nr 59, FoU Syd/SBUF anslag nr. 12211 samt Weber Saint Gobain Byggprodukter AB.

Ytterligare personer som har deltagit i projektets olika delstudier är Oskar Larsson, Jörgen Falk, Per-Olof Rosenkvist, Almedin Buza och Vedran Ladan. Författarna tackar för deras bidrag till projektet. Speciell tack riktas till Rolf Blank på Weber Saint Gobain Byggprodukter AB för hans insatser när det gäller att initiera projektet.

Lund, 2013-02-13

Miklós Molnár	Johan Jönsson	Kenneth Sandin	Carl-Magnus Capener
LTH Konstruktionsteknik	LTH Konstruktionsteknik	LTH Byggnadsmaterial	SP (tidigare Weber)

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING 4

1.1 Bakgrund 4

1.2 Arbetshypotes 4

1.3 Metod och genomförande 5

2 STUDERADE TILLÄGGSISOLERINGSSYSTEM 7

3 ENERGIBESPARING GENOM TILLÄGGSISOLERING 9

3.1 Simulering av fukt- och temperaturtillstånd 9

3.2 Mätningar i provhus 10

3.3 Simulering och mätning i demonstrationshus, Kyrkbyn 20

3.4 Slutsatser 34

4 BESTÄNDIGHETSEGENSKAPER HOS SYSTEMET PUTS PÅ ISOLERING 36

4.1 Bestämning av materialegenskaper genom laboratorieundersökningar 36

4.2 Bestämning av förmågan att fördela sprickor-systemuppbyggnad för optimal funktion 43

4.3 Simulering av mekaniskt beteende hos puts på isolering 49

4.4 Vatteninträngning genom sprickor i putsen - vart tar vattnet vägen? 56

4.5 Åtgärder för att begränsa risken för uppkomst av farliga sprickor samt för att försvåra inträngning av vatten mot byggnadsstommen 69

4.6 Slutsatser 73

5 BESTÄNDIGHETSEGENSKAPER HOS SYSTEMET PUTSAD VENTILERAD SKIVA 75

5.1 Fuktrelaterade materialegenskaper 75

5.2 Sprickfördelande egenskaper 81

5.3 Analys av påkänningar orsakade av temperatur- och fuktvariationer 84

5.4 Kvantitativ analys av putsade ventilerade skivfasaders sprickrelaterade beteende 90

5.5 Slutsatser 95

6 SAMMANFATTNING 99

REFERENSER 100

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Flerbostadshus från perioden för miljonprogrammet utgör en betydande del av bostadsbeståndet i våra urbana miljöer. Med dagens mått är beståndets energiprestanda låg. Även underhållsmässigt befinner sig stora delar av beståndet i ett eftersatt tillstånd. Ökande energipriser ger ökande utslag i boendekostnader samtidigt som ekonomiskt utrymme försvinner från nödvändiga reparationer och uppgraderingar. Eftersatt underhåll leder även till större koldioxidutsläpp.

De bärande delarna i det aktuella beståndet består till stora delar av betong, både i form av platsgjutna och prefabricerade stommar. Ytterskalet består ofta av dåligt isolerade sandwichelement av betong med mellanliggande isolering. Även tegel och putsad lättbetong är vanligt förekommande i ytterväggar. Teoretiskt sett torde isoleringsförmågan vara något bättre i den senare ytterväggstypen, men fukt från slagregn bedöms ha en kraftigt nedsättande inverkan på dessa väggars termiska prestanda. Utöver låg termisk prestanda dras aktuella ytterväggstyper även med beständighetsproblem (korroderande armering, frostnedbrytning, m.m.) samt fuktproblem på insidan. Fuktiga ytterväggar ger dessutom sämre komfort i form av lägre yttemperaturer på vintern. Dålig ljudisolering är ett annat problem i främst lättbetongväggar.

Det aktuella beståndets problem har under det senaste decenniet uppmärksammats och reparations- och uppgraderingsåtgärder i form av till exempel tilläggsisolering/putsning har genomförts på sina håll. En annan aktuell reparationsmetod består i tilläggsisolering och putsning på ventilerade skivor. Båda metoderna bedöms kunna förbättra såväl byggnadsskalets termiska prestanda som fuktegenskaper väsentligt. Användning av mindre beprövade energieffektiva ytterväggslösningar har i vissa fall visat sig leda till omfattande fuktrelaterade beständighets- och innemiljöproblem (läckande enstegstätade fasader).

Generellt för hantering av fasader gäller, både vid renovering och nybyggnad, att det inte genomförs en analys av om vald fasad har avsedd förmåga att motstå aktuella påkänningar från klimatlaster.

1.2 Arbetshypotes

Mot ovanstående bakgrund har projektets arbetshypotes varit att tilläggsisolering med efterföljande putsning eller applicering av en ventilerad skiva med puts väsentligt kan sänka energiförbrukningen i flerbostadshus från miljonprogrammet, i vissa fall med mer än 25 % jämfört med dagens förbrukningsnivåer. För att förverkliga och bibehålla dessa förbättringar måste aktuella reparationsmetoders långsiktiga funktion med avseende på fuktavvisning säkerställas. Utöver en klarläggning av möjligheterna till energieffektiviseringar med hjälp av de två aktuella tilläggsisoleringssystemen har därför även följande två frågor undersökts:

1. Hur påverkas oorganiska väggars isoleringsförmåga av fukt som finns kvar eller tränger in genom sprickor efter en tilläggsisoleringsåtgärd?
2. Hur påverkas putsens och fasadskivans sprickbenägenhet och därmed vattenavvisande förmåga av materialegenskaper, systemets uppbyggnad och klimateffekter?

1.3 Metod och genomförande

Projektet har genomförts enligt följande:

1. En litteraturstudie har genomförts för att klarlägga det svenska och internationella kunskapsläget. Intervjuer har genomförts med medlemmar i projektets referensgrupp, fastighetsägare, materialtillverkare och murnings- och putsningsentreprenörer.

2. En serie laboratorieundersökningar har genomförts för att klarlägga hygrotermiska och mekaniska egenskaper hos olika putssorter, putsbärande skivor, putsarmering, isoleringsmaterial, infästningar, m.m. Några av de viktigaste laboratorieundersökningarna:

    a. Fuktupptagning- respektive fuktavgivningsegenskaper (adsorptions- och desorptionsegenskaper) har bestämts hos olika putssorter och putsbärande skivor genom klimatisering i klimatskåp och genom nedsänkning i vattenbad.

    b. Rörelser som uppstår vid temperatur- och fuktvariationer i puts respektive putsbärande skivor har bestämts parallellt med mätningar av fuktupptagnings- och fuktavgivningsegenskaperna.

    c. Sprickutveckling i oarmerad puts, armerad puts (med olika utformning av armeringen) och putsade skivor har genomförts genom deformationsstyrda dragförsök. Inverkan av olika avvikelser vid utformning av skarvar i putsade ventilerade skivor, placering av armeringen har ingått.

    d. Elasticitetsmoduler för puts och mineralullsisolering har bestämts genom drag- respektive tryckförsök. Längdutvidgningskoefficienter har bestämts för puts.

    e. Tvärsnittsförändringars (orsakade av ojämnheter hos isolerskivorna) inverkan på sprickbenägenhet hos puts har studerats genom långtidsförsök på provkroppar bestående av putsade mineralullsskivor.

    f. Vatteninträngning genom sprickor av olika bredder har studerats under inverkan av konstant hydrostatiskt tryck motsvarande slagregn med kraftig vind (vindtryck på 600 Pa). Provkropparna bestod av putsad mineralullsisolering där man skapade en spricka med kontrollerad bredd. Metoden för att åstadkomma sprickan är utvecklad i projektet.

    g. Inläckande vattens väg genom tilläggsisolering av mineralull har studerats på provväggar av putsad mineralull.

3. Fältmätningar har genomförts för att studera effekterna av tilläggsisolering på uttorkning av fuktiga väggar samt för att studera temperatur- och fuktrelaterade rörelser i putsade skivor:

    a. Temperatur- och fuktgivare har monterats ut i ett flerbostadshus från 1950-talet beläget i området Kyrkbyn i Göteborg. Mätningarna startade våren 2010, ett halvår innan tilläggsisoleringen av fasaderna påbörjades. För att dokumentera de tilläggsisolerade väggarnas prestanda tills fortfarighetstillstånd har uppnåtts fortsätter datainsamlingen efter projektets avslutning. Borrprover har tagits ur väggarna och fuktinnehållet bestämts i laboratorium för att kunna validera resultaten från datorsimuleringar som genomfördes parallellt.

    b. Motsvarande mätningar som ovan har pågått sedan sommaren 2010 i ytterväggarna till ett provhus i Lund. Syftet med dessa mätningar var att studera temperatur- och fukttillstånden hos ytterväggar som har tilläggsisolerats med putsad

mineralull/putsad cellplast respektive ventilerad skiva. Även en oisolerad ytterväggingår som referensfall.

c. Deformationer i putsade ventilerade skivor orsakade av temperatur- och fuktpåverkan har studerats med LVDT-givare under ett kalenderår. Mätningarna har genomförts i ett provhus i Lund.

4. Modellering och datorsimuleringar avseende uttorkning av väggar samt rörelser och spänningstillstånd i putsad tilläggsisolering och putsade ventilerade skivor har genomförts. Exempel på viktigare studier:

    a. Simulering (WUFI) av temperatur- och fukttillstånd i väggar bestående av lättbetong med fasadtegel, putsad lättbetong samt putsade ventilerade skivor.

    b. Simulering (Brigade) av temperatur- och fuktinducerade påkänningar i fasader av med putsade isolerskivor. Simulering av spänningar orsakade av tvärsnittsförändringar i puts på isolerskivor.

    c. Simulering (Ansys och Brigade) av temperatur- och fuktinducerade påkänningar i fasader med putsade ventilerade skivor med data från egna fältmätningar samt data från SMHI.

5. Utvecklingsarbete har genomförts och råd till utveckling av produkter hos materialtillverkare har getts med avseende på:

    a. Metoder för applicering av putsarmering för optimal sprickbreddsbegränsande effekt.

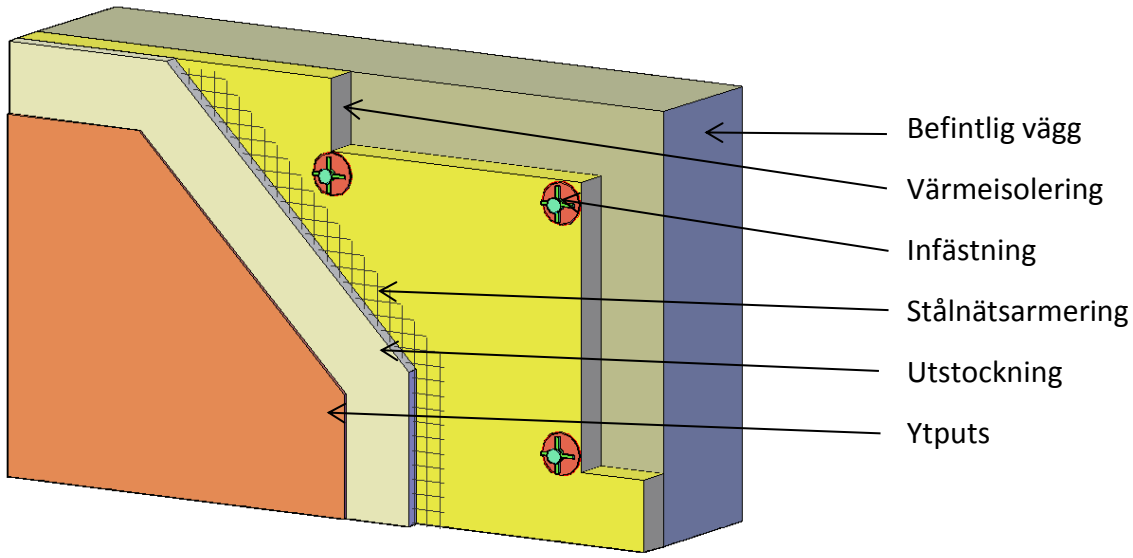
    b. Framtagning av isolerskivor för ändamålsenligt omhändertagande och utledning av inläckande regnvatten genom att kanterna snedfasas eller falsas.

6. Informationsspridning har skett genom publicering av vetenskapliga och populärvetenskapliga artiklar, deltagande i vetenskapliga konferenser samt seminarier riktade till industri- och samhällsrepresentanter.

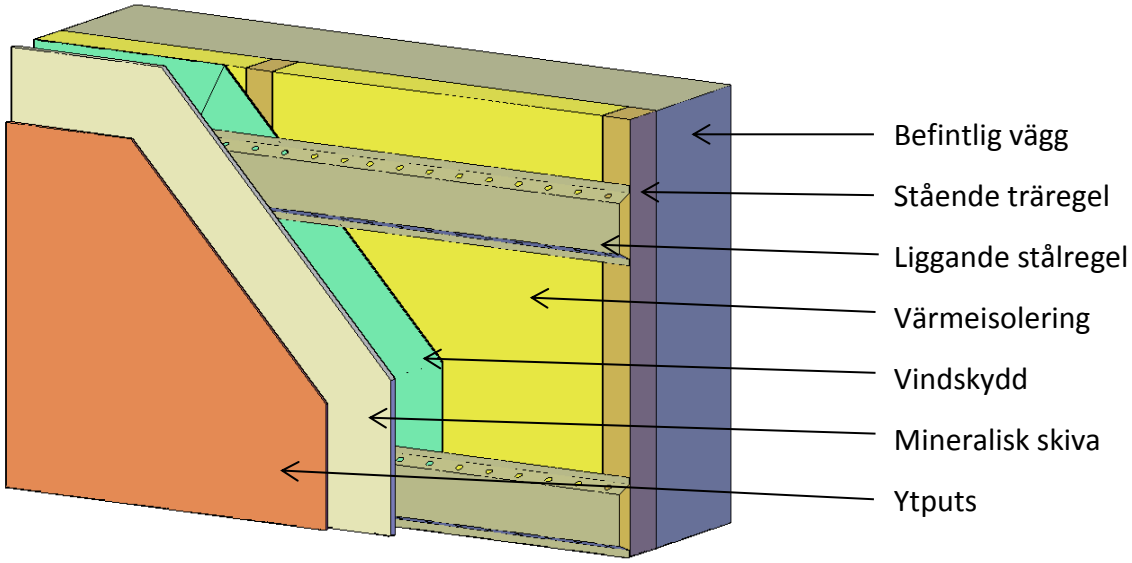
2 STUDERADE TILLÄGGSISOLERINGSSYSTEM

Tilläggsisolering av fasader kan göras på många sätt. Isoleringen kan placeras på ut- eller insidan. Isolermaterialet kan vara mineralull, cellplast, lättbetong, lättklinker etc. Puts direkt på värmeisolering var helt dominerande fram till 2007. Då blev det allmänt känt inom branschen att det förekom omfattande fuktproblem i många sådana väggar. Man övergick då i stor skala till tilläggsisoleringssystem med en luftspalt som skulle leda bort eventuellt inträngande regnvatten. Nya relativt oprövade metoder introducerades. Puts direkt på värmeisolering förekommer dock fortfarande och ”modifierade” system har introducerats.

De tilläggsisoleringssystem som studerats i aktuellt projekt är utvändig tilläggsisolering med puts på värmeisolering respektive putsad mineralisk skiva med bakomliggande luftspalt och värmeisolering. De principiellt olika system som studerats illustreras i Figur 2.1-2.



Figur 2.1. Tilläggsisolering med puts direkt på värmeisoleringen.



Figur 2.2. Tilläggsisolering med luftspalt och puts på mineralisk skiva.

Den bakomliggande väggen kan ha mycket varierande uppbyggnad, till exempel träregelstomme, lättbetong, betong, lättklinkerbetong eller tegelmurverk.

I Figur 2.1 är värmeisoleringen normalt stenull eller cellplast. Infästningen av isoleringen kan vara mekanisk eller klistring. Stenull har normalt mekanisk infästning genom olika typer av infästningar medan cellplast ofta klistras mot bakomliggande vägg. Ibland kompletteras klistringen med mekanisk infästning. Putsen kan vara antingen organisk (i allmänhet relativt tunn) eller oorganisk. Tjockleken på denna puts varierar kraftigt, men ligger normalt i intervallet 8-20 mm. Armeringen är antingen ett stålnät eller glasfibernät. I tunna putser används glasfibernät och i de riktigt tjocka putserna används stålnät.

I Figur 2.2 monteras värmeisolering av mineralull mellan reglar direkt mot den bakomliggande väggen. Reglarna är ofta liggande eller stående träreglar. Utanpå detta monteras ett vindskydd, antingen en mineralisk skiva eller en vindskyddsväv. Utanpå denna väv monteras läkt för att skapa en luftspalt. Är reglarna som monterats mot väggen liggande används ofta stående träläkt. Är de inre läkten stående används ofta liggande stålläkt som är perforerade för att skapa luftspalten. På de yttre läkten monteras sedan en mineralisk skiva som putsbärare till den slutliga putsen. Denna puts armeras normalt med glasfiberväv över skarvarna. Tjockleken och putssammansättningen varierar mellan olika system. Både organiska och oorganiska putser används. De organiska putserna är relativt tunna, några millimeter. De oorganiska putserna är tjockare, upp till 10 millimeter.

I aktuellt projekt har följande material ingått på ett eller annat sätt:

Värmeisolering av stenull, glasull och cellplast
Reglar och läkt av trä
Cementbaserade och glasgranulatbaserade skivor
Armering med stålnät och glasfibernät
Organiska tunna putser och oorganiska tjocka putser

Fabrikat och egenskaper hos de olika materialen redovisas i anslutning till redovisningen av respektive provningar.

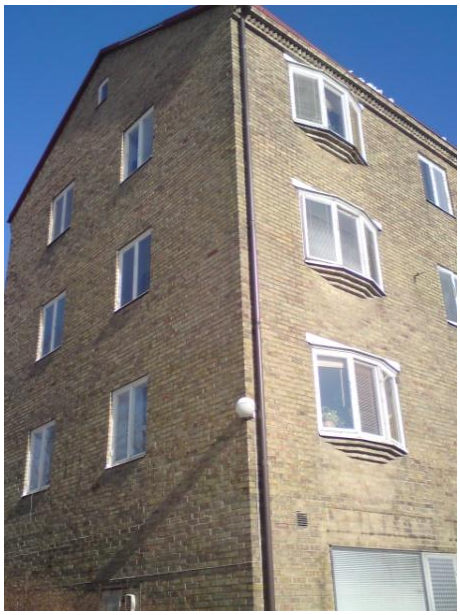
3 ENERGIBESPARING GENOM TILLÄGGSISOLERING

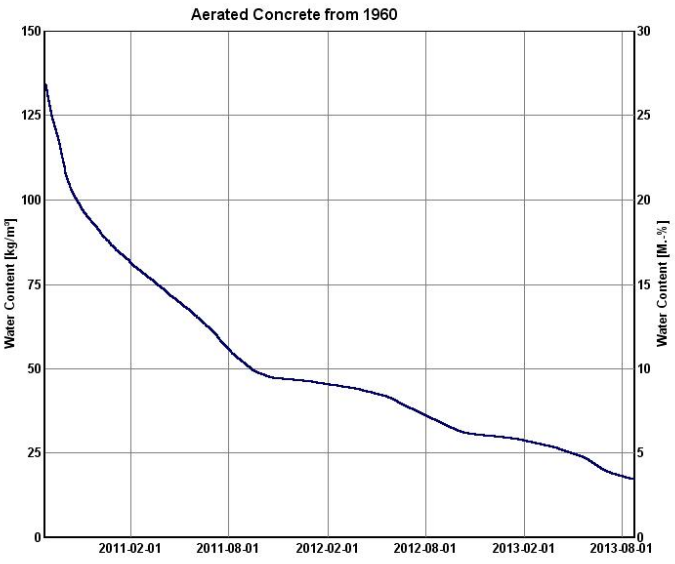
3.1 Simulering av fukt- och temperaturtillstånd

Fukt är en vanlig orsak till byggnadsdelars nedbrytning och kan i längden påverka brukarnas hälsa och komfort. Lösningarna för att komma tillrätta med fuktrelaterade skador är komplexa och ofta svåra att genomföra. Kunskap om de fysikaliska processer som styr det hygrotermiska beteendet möjliggör att förutse hur en byggnad svarar mot påverkan av klimat och olika utförande av klimatskalet samt hur hållbara lösningar skall genomföras.

Det hygrotermiska tillståndet hos enskilda byggnadsdelar, som utsätts för olika klimat, är viktigt att beakta då man ser till hela byggnaders prestanda. Idag är hygrotermiska transporter genom klimatskal väl studerade och realistiska analyser kan utföras med hjälp av de modeller och datorprogram som utvecklats de senaste åren. Det är relativt enkelt att beräkna temperaturtillstånd i delar av klimatskalet men vid flerskiktskonstruktioner och mer komplicerade beräkningar där hänsyn tas till fukt behövs hjälpmedel så som hygrotermiska modeller och datorprogram som tar hänsyn till detaljerade klimatdata och enskilda byggnadsmaterials egenskaper. Modellerna kan variera avsevärt i noggrannhet och i vilken grad modellen tar hänsyn till olika indata avgör kvalitén på resultaten. Det är viktigt hur hänsyn tas till parametrar som fukttransport, typ av flöde (steady-state, kvasi-statisk eller dynamisk), men även kvalitet och tillgänglighet på information som avser materialegenskaper och klimat etcetera kommer att avgöra hur realistiska resultat som erhålls. Genom att ta hänsyn till fukt kan även mer realistiska bedömningar göras avseende byggnaders energiprestanda. Då fukt inverkar på materials värmeledningsförmåga och värmetransport ökar i fuktiga material jämfört med torra, kan noggrannare energisimuleringar utföras.

Ett datorprogram som utvecklats av Fraunhofer IBP, WUFI, tar hänsyn till dynamiska flöden och använder sig av uppmätta timvärden för klimat vid beräkning. WUFI finns för en- och tvådimensionella beräkningar av värme- och fukttransport och medger beräkning av transienta hygrotermiska tillstånd för byggnadsdelar i flera skikt. WUFI 2D kan beräkna mer komplicerade konstruktioner och köldbryggor.





Figur 3.1. Exempel på resultat från simulering av fukttillstånd i vägg.

Den stora fördelen med simulering är att om det befintliga klimatskalet har karakteriserats kan dess hygrotermiska prestanda karakteriseras under olika förhållanden. Exempel på faktorer som kan studeras är förändringar i uteklimatet inklusive slagregnsbelastning, inverkan av förändringar i inomhusklimatet och ändringar i klimatskalet, genom exempelvis invändig eller utvändig tilläggsisolering.

3.2 Mätningar i provhus

3.2.1 Allmänt

För att studera uttorkningsförloppet av en blöt lättbetongvägg efter utvändig tilläggsisolering uppfördes 4 provväggar där 3 av väggarna tilläggsisolerades med olika system. Den fjärde väggen tilläggsisolerades inte utan fungerade som en referensvägg. Vid starten var fuktkvoten i lättbetongen cirka 40 viktsprocent. Fukttillståndet i väggarna mättes under två år. Uttorkningsförloppet simulerades även med beräkningsprogrammet WUFI. Med utgångspunkt från uppmätta fukttillstånd uppskattades även tilläggsisoleringens totala effekt med avseende på energibesparingen.

3.2.2 Provväggar

Alla provväggarna är cirka 1 m breda och 2.1 m höga. Väggarna är orienterade mot söder och det finns inget väsentligt taksprång men en hängränna.

Ursprungsväggarna består av tunnfogsmurade lättbetongväggar av 250 mm Celblock densitetsklass 400 med leveransfuktkvot 35 – 40 viktsprocent. Enligt tillverkaren är λ_{design}=0.10 W/mK.

Utsidan putsades med en traditionell treskiktsputs bestående av

Grundning med weber 105 vitgrund
Utstockning med 12 mm weber 131
KC-färg weber 244

Insidan behandlades med 6 mm weber base 262 vit.

Relativt snart upptäcktes att uttorkningen inåt var stor. För att minska denna uttorkning målades insida 15 nov 2010. Denna målning bestod av

Fixativ
0,5-1.0 mm Mineralux 8270 vit

Uppförandet av ursprungsväggarna gjordes i slutet av juni/början av juli 2010. För att förhindra uttorkning av byggfukten innan mätningarna startade monterades en plastfolie på utsidan.

De olika tilläggsisoleringssystemen på utsidan monterades under tiden 5-27 juli 2010. Under tiden förhindrades all uttorkning utåt med plastfolie när direkta arbeten inte pågick. 28 juli 2010 avlägsnades den utvändiga plastfolien och de kontinuerliga mätningarna startade.

De olika system som ingår i projektet är:

Provvägg 1
Ursprungsväggen utan ytterligare behandling.

Provvägg 2
På utsidan av ursprungsväggen monterades ett tilläggsisoleringssystem bestående av

Klisterbruk STO Byggklister
50 mm cellplast STO
3 mm StoLevell Classic med glasfibernät
Stolit 1.5 vit

Provvägg 3

På utsidan av ursprungsväggen monterades ett tilläggsisoleringssystem bestående av

50 mm mineralull Therm 321
10 mm Underlagsbruk Therm 340 med stålnätsarmering
10 mm Fasadbruk Therm 342
Silikatfärg vit

Provvägg 4

På utsidan av ursprungsväggen monterades ett tilläggsisoleringssystem bestående av

45 mm mineralull med horisontella reglar 45x45
Vindskydd Bison
Stående träläkt 70x22
12 mm Placocemskiva
6-7 mm Putsbruk EF med glasfibernät
Silikatfärg vit

Då det senare visade sig att vindskyddet var mycket tätt byttes detta ut den 14 april 2011 mot Tyvek Supro Grid.

Provväggarna visas i Foto 3.2.1.

Foto 3.2.1. Provväggarna från utsidan (de vita facken).

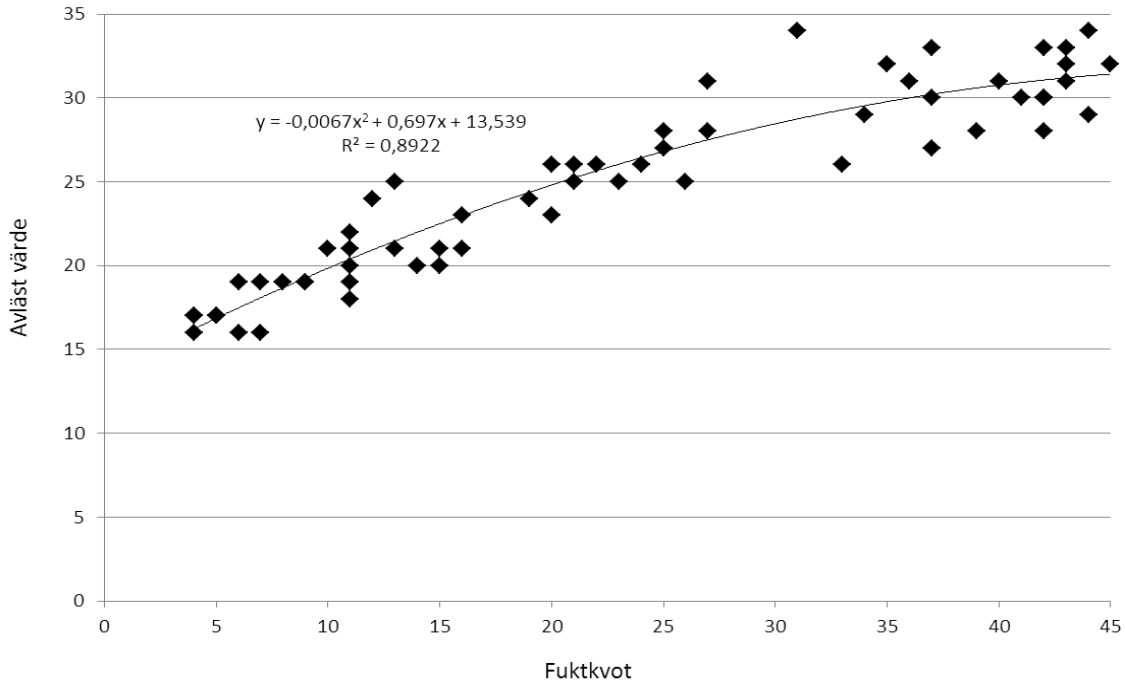
3.2.3 Mätningar

Relativ fuktmätning

Fukttillståndet mättes relativt genom att mäta den elektriska ledningsförmågan mellan elektroder som är inslagna till olika djup. Ju högre fukthalten är desto högre blir den elektriska ledningsförmågan. Avläsning gjordes med Protimeter träfuktmätare. Vid mätning i trä erhålls direkt fuktkvoten i viktsprocent. Det erhållna mätvärdet vid mätning i lättbetong motsvarar INTE fuktkvoten i lättbetongen. Det erhållna mätvärdet är dock ett relativt mått på fukttillståndet. Det erhållna mätvärdet är temperaturberoende och korrigerades alltid till 20°C.

Elektroderna är isolerade med krympslang förutom de yttersta 6 mm. Mätningar gjordes på djupen 50, 100, 150 och 200 mm. Avståndet mellan spetsarna är teoretiskt 30 mm. I praktiken kan avståndet avvika från dessa 30 mm beroende på att elektroderna kanske inte blir helt parallella. Teoretiskt innebär avvikelsen i avstånd mellan elektroderna att det avlästa värdet kan slå fel med +/- 5 enheter på mätdjupet 200 mm. På mindre mätdjup blir felet mindre.

Genom att bestämma den verkliga fuktkvoten vid olika tidpunkter och djup kan en kalibreringskurva mellan avläst mätvärde och en ungefärlig fuktkvot upprättas. I Figur 3.2.1 visas denna kalibreringskurva.



Figur 3.2.1. Kalibreringskurva avläst värde vs fuktkvot.

Som synes är kurvan mycket flack, speciellt vid höga fukttillstånd. Detta innebär att det verkliga fuktinnehållet kan sjunka relativt mycket, även om det erhållna mätvärdet inte sjunker speciellt mycket. Av kurvan framgår att när det avlästa värdet sjunker från 30 till 28 så sjunker fuktkvoten från 37 till 30 viktsprocent. Motsvarande ändring i fuktkvot när mätvärdet sjunker från 24 till 18 blir från 18 till 8 viktsprocent.

Eftersom kalibreringskurvan är flack blir felet i de kalibrerade fuktkvoterna större än avlästa enheter. Redan vid en vinkelavvikelse 1^{o} hos elektroderna blir felet i fuktkvot 10 viktsprocent! Detta innebär att man inte kan jämföra olika platser med utgångspunkt från de kalibrerade fuktkvoterna. De kalibrerade fuktkvoterna enbart kan användas till att följa samma mätpunkt vid olika tidpunkter. För att få en exakt bild av fuktkvoterna hänvisas till de direkta fuktkvotsmätningarna.

Direkt fuktkvotsmätning

Prover togs ut med kärnborr på djupen 0-50, 50-100, 100-150 och 150-200 mm inifrån. Fuktkvoten bestämdes genom uttorkning vid 105^{o}C.

De första proverna togs ut i samband med att den relativa fuktmätningen startade. Härefter togs prover ut när den relativa mätningen visade att mätvärdena förändrats väsentligt.

Temperaturmätning

Temperaturerna registrerades kontinuerligt med termoelement på djupen 50, 100, 150 och 200 mm inifrån samt på innerytan. Syftet med temperaturmätningarna var främst att temperaturkorrigera elektrodmätningarna.

3.2.4 Mätresultat

Här redovisas endast ett urval mätresultat. För en fullständig redovisning hänvisas till delrapporten TVBM-3167.

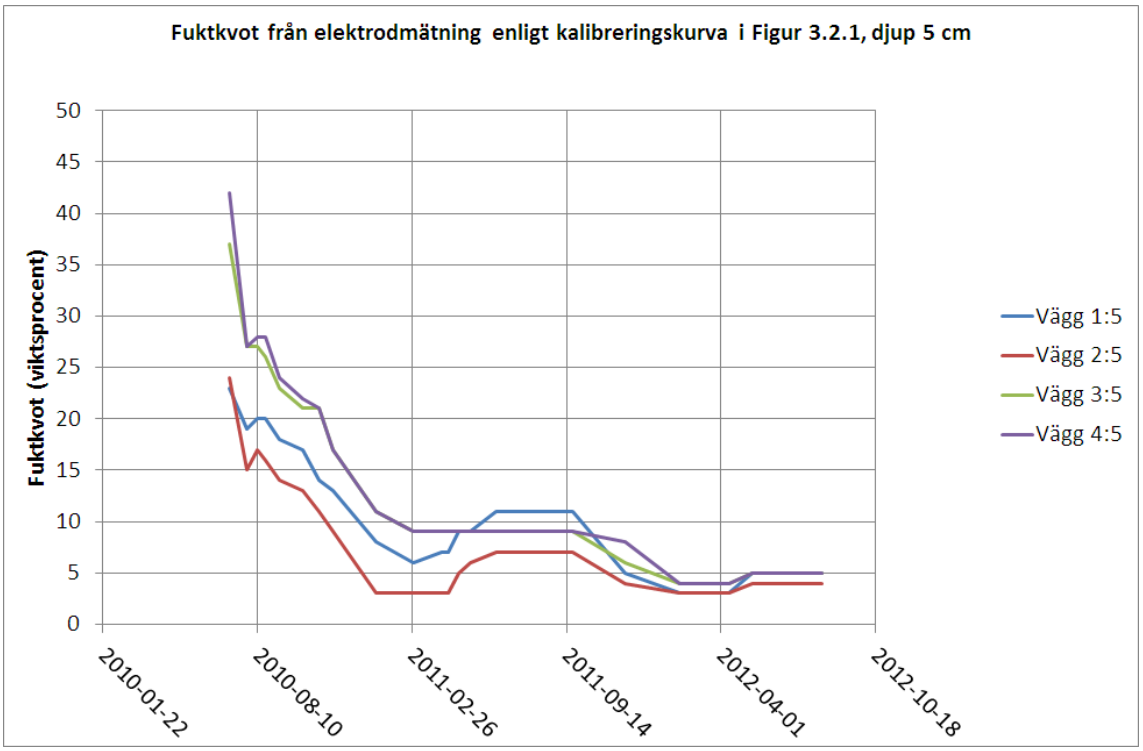
Relativ fuktmätning

Som nämnts tidigare är denna mätning enbart avsedd till att ge en bild av vad som händer mellan de tidpunkter då den direkta fuktkvotsmätningen gjorts. Värden får alltså inte uppfattas som exakta fuktkvoter. Man kan enbart bedöma förloppet för viss mätpunkt. Man kan inte jämföra olika mätpunkter.

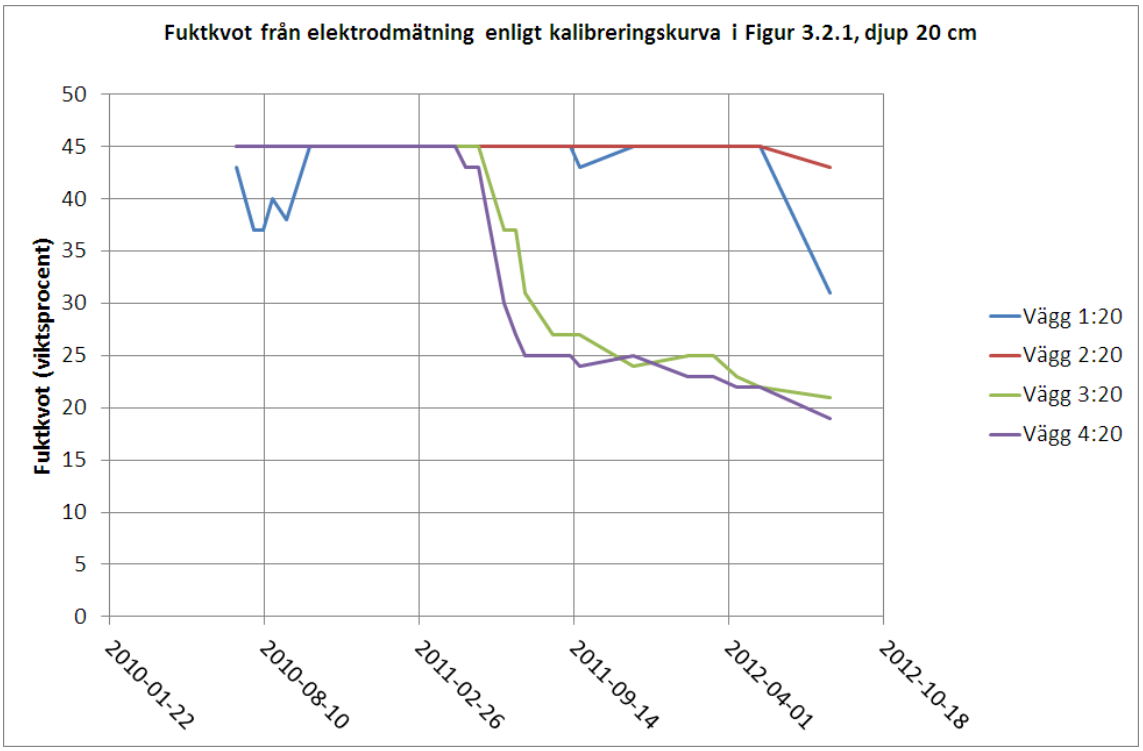
I Figur 3.2.2-3 visas de kalibrerade ”fuktkvoterna” enligt elektrodmätningarna på djupen 50 respektive 200 mm.

Som Figur 3.2.2-3 så sker uttorkningen snabbt och likvärdigt på djupet 50 mm i alla väggarna. På detta djup kan lättbetongen betraktas som torr efter cirka ett halvt år. Uttorkningen på detta djup sker inåt.

På djupet 200 mm är det stor skillnad mellan väggarna och uttorkningen sker långsammare. Vägg 1 och 2 är fortfarande mycket blöta efter 2 år. Väggarna 3 och 4 torkar kraftigt under sommaren. Under vintern sker däremot ingen väsentlig uttorkning.



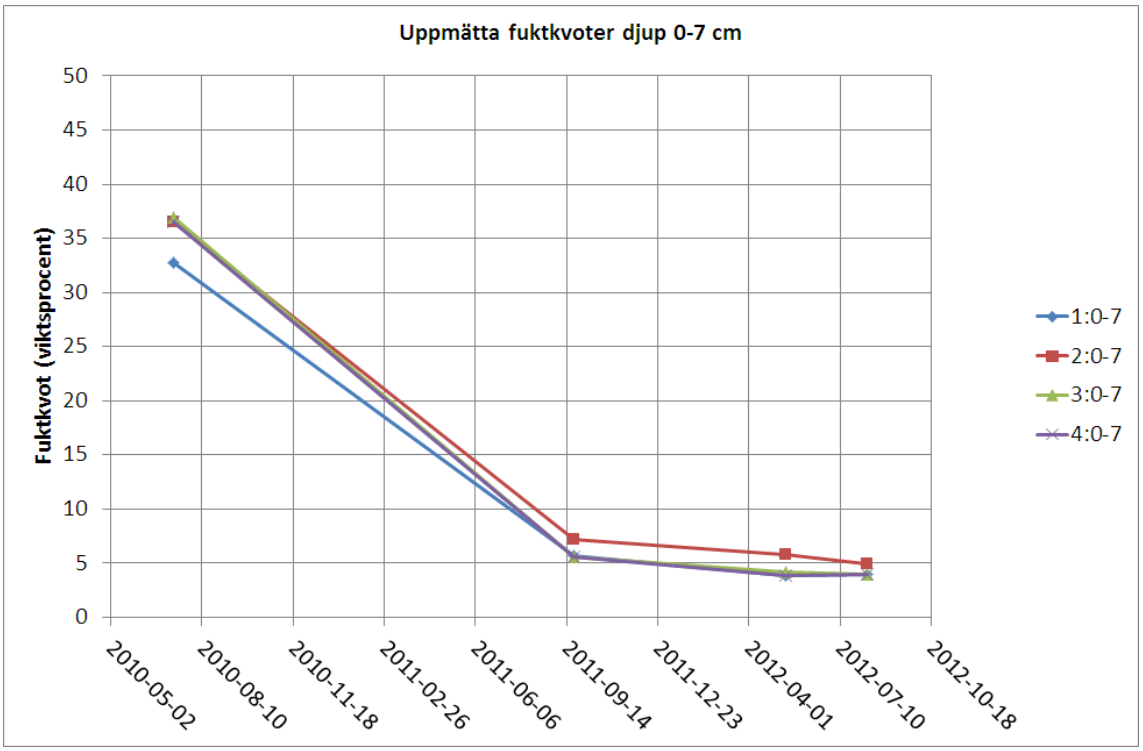
Figur 3.2.2. Kalibrerad fuktkvot på djupet 50 mm i de olika väggarna.



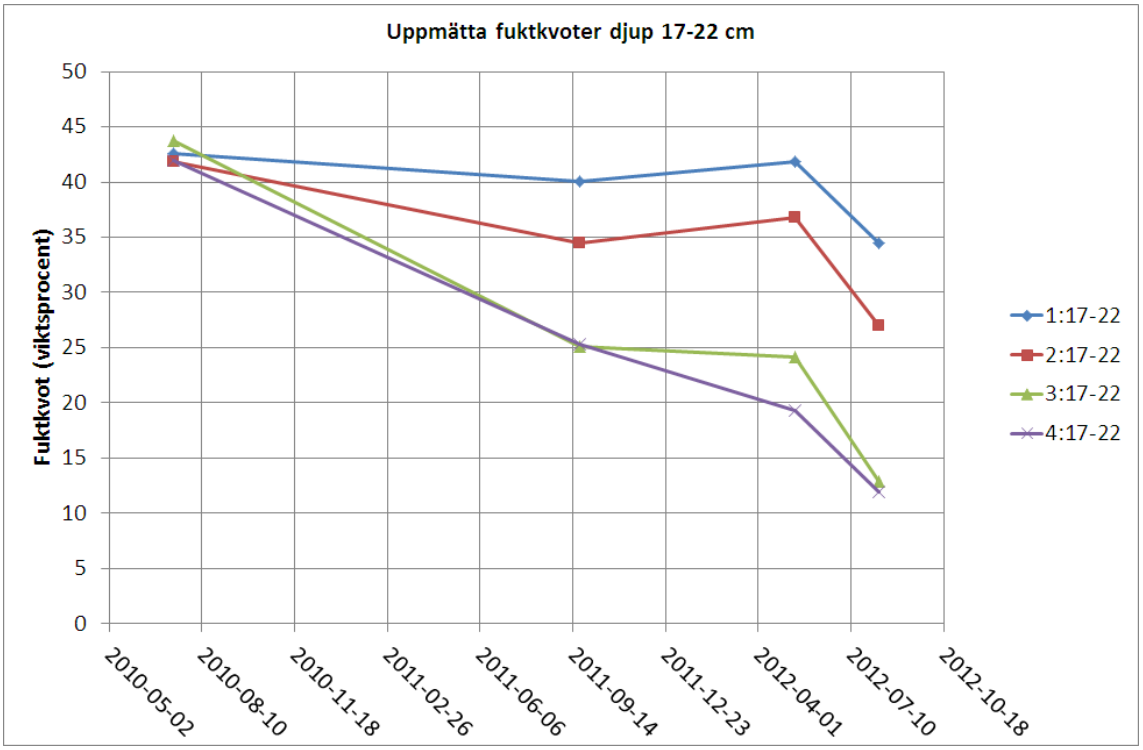
Figur 3.2.3. Kalibrerad fuktkvot på djupet 200 mm i de olika väggarna.

Direkt fuktkvotsmätning

I Figur 3.2.4-5 visas de uppmätta fuktkvoterna på djupen 0-70 respektive 170-220 mm.



Figur 3.2.4. Fuktkvot på djupet 0-70 mm i de olika väggarna.



Figur 3.2.5. Fuktkvot på djupet 170-220 mm i de olika väggarna.

Även Figur 3.2.4-5 visar att samtliga väggar torkar likvärdigt och snabbt på djupet 0-70 mm. Efter 1 år är väggarna helt torra och förblir torra i fortsättningen.

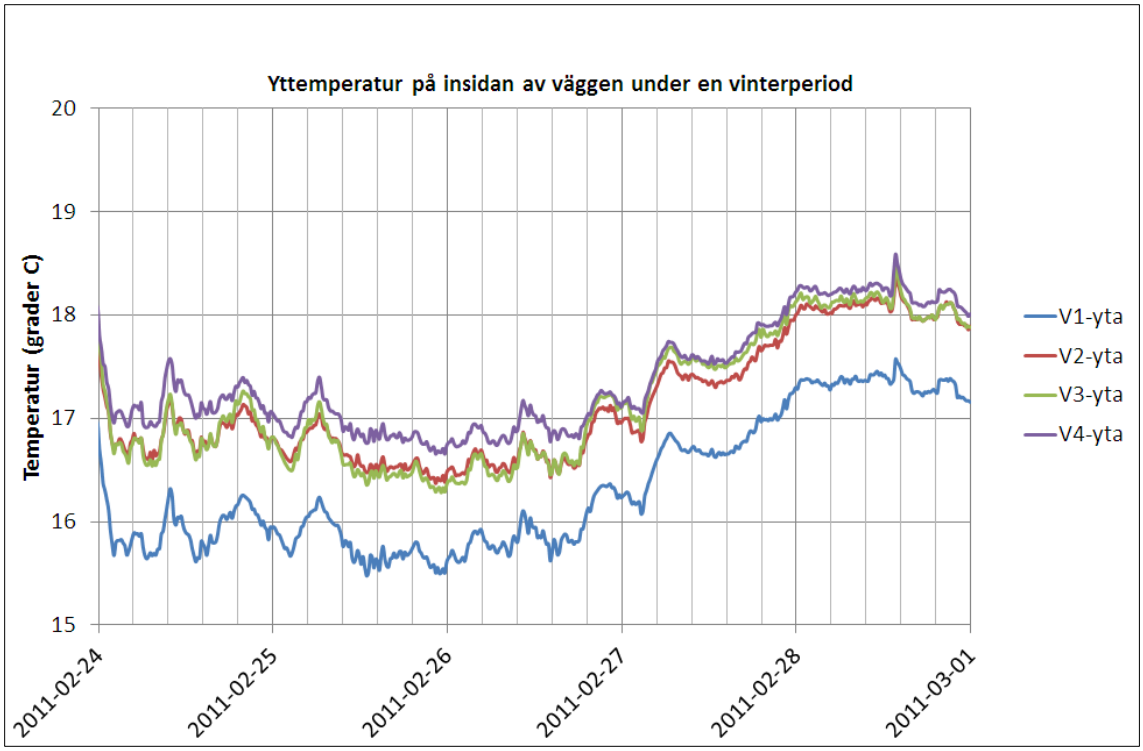
På djupet 170-220 mm sker däremot uttorkningen väsentligt långsammare samtidigt som det är stor skillnad mellan väggarna. Väggarna 3 och 4 torkar sakta men säkert. Efter 2 år är fuktkvoten cirka 10-15 viktsprocent. Vägg 2 torkar mycket långsammare. Efter 2 år är här fuktkvoten cirka 25-30 viktsprocent. Vägg 1 har överhuvudtaget inte torkat något.

Temperaturmätning

De temperaturer som är intressanta är främst yttemperaturen på insidan. I Figur 3.2.6-7 redovisas två exempel på hur yttemperaturen variera under några intressanta dygn.

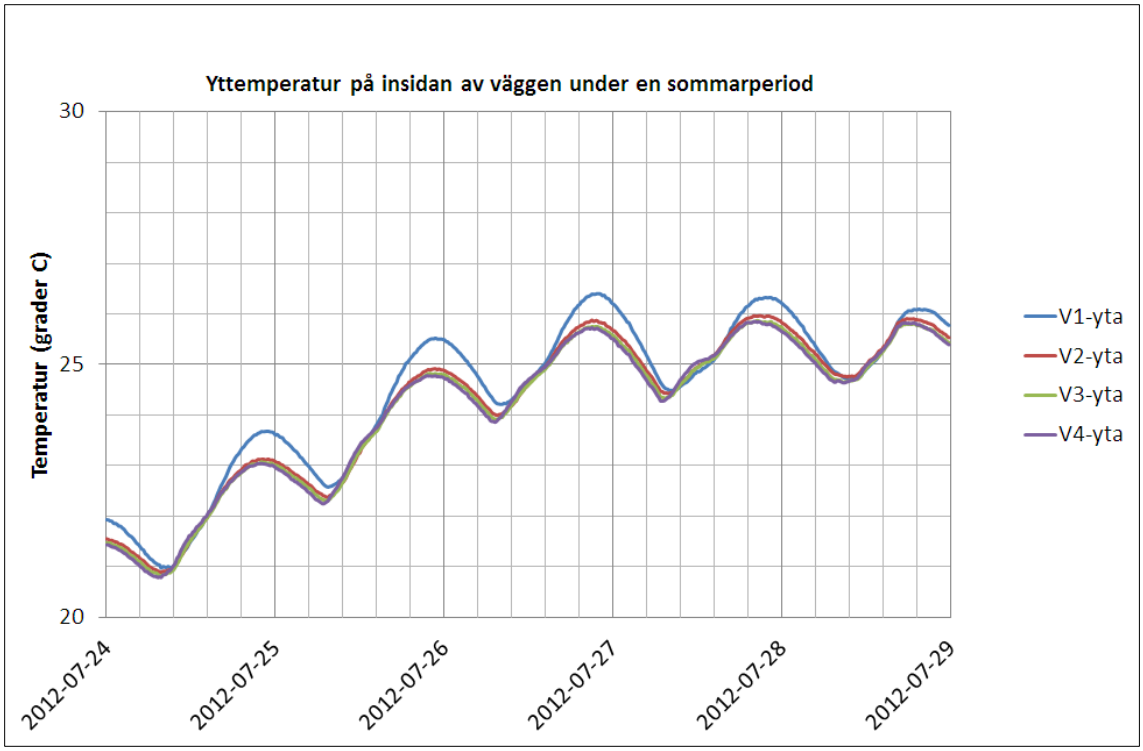
Figur 3.2.6 avser en kall vinterperiod. Utetemperaturen var under perioden mellan noll och 5 minusgrader.

Figur 3.2.7 avser en varm och solig sommarperiod.



Figur 3.2.6. Yttemperatur på insidan under en vinterperiod.

Som framgår av Figur 3.2.6-7 är yttemperaturen på insidan cirka en grad lägre under den kalla årstiden på den icke tilläggsisolerade väggen. På sommaren är det tvärtom. Den icke tilläggsisolerade väggen får då en högre yttemperatur.



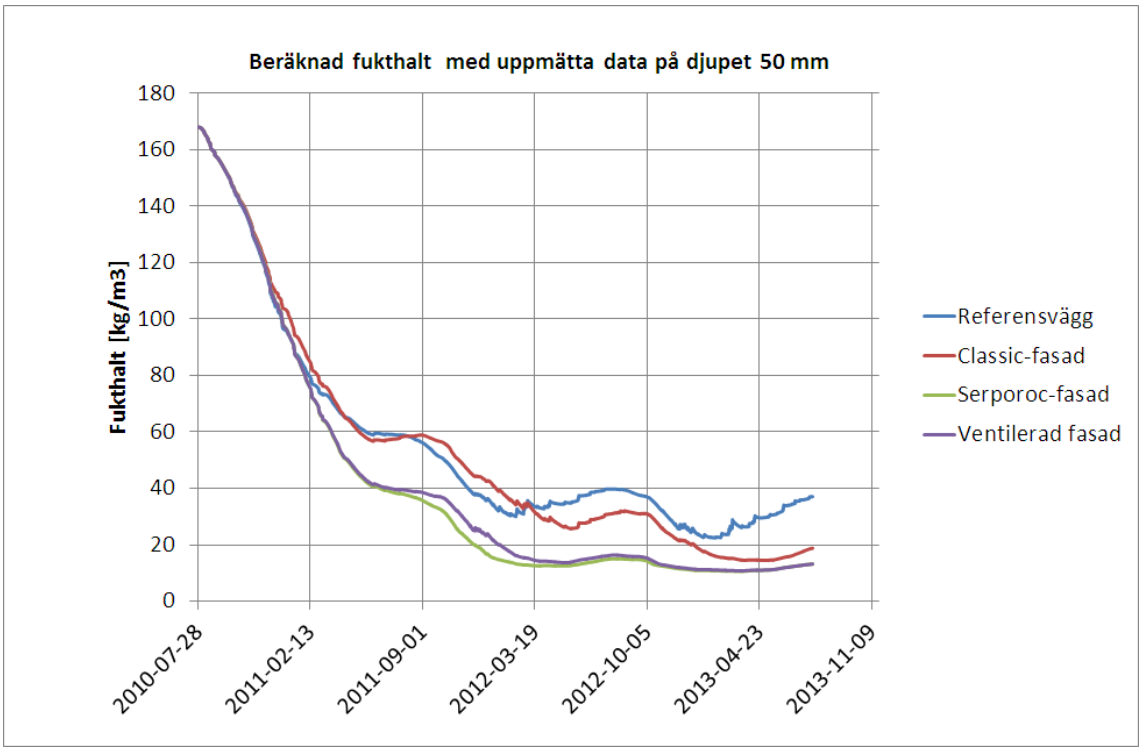
Figur 3.2.7. Yttemperatur på insidan under en sommarperiod.

3.2.5 Beräkningar

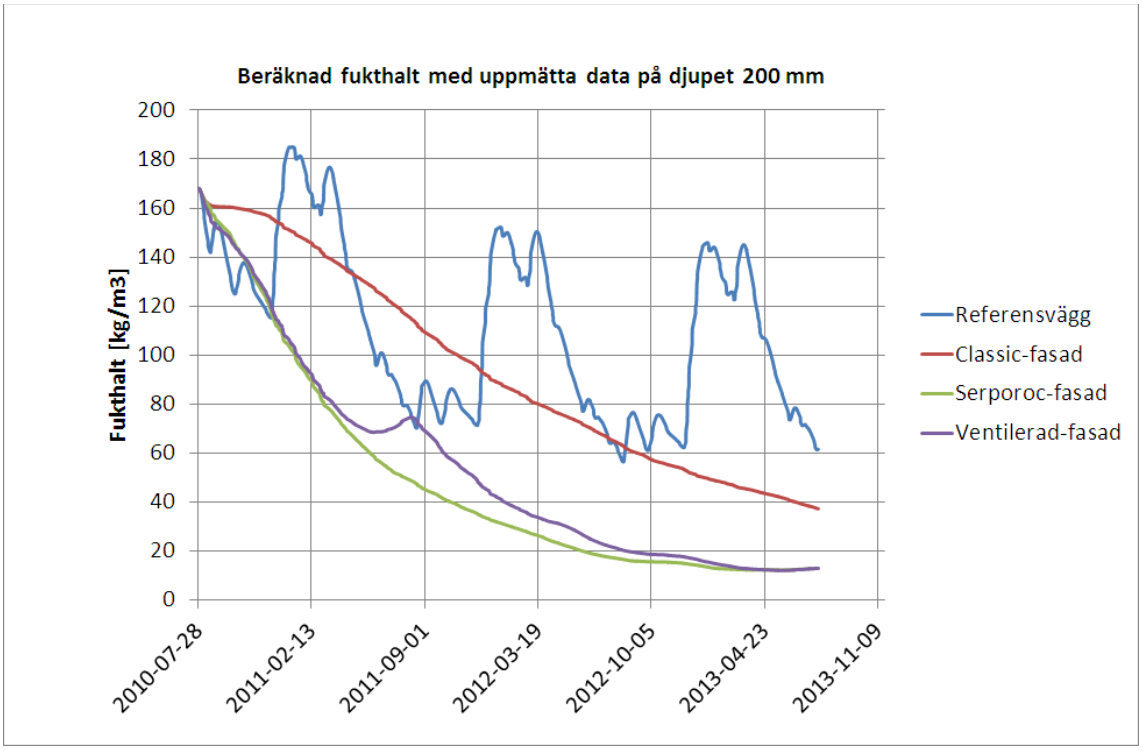
Det kommersiella beräkningsprogrammet WUFI används ofta för att uppskatta fukttillstånd och uttorkningstider. För att jämföra beräknade och uppmätta fukttillstånd gjordes sådana beräkningar även för provväggarna.

Beräkningar gjordes både med standardvärden på materialdata som finns inlagda i programmet och med verkliga materialdata som bestämdes i laboratorium. Vid beräkningarna användes normalvärden på klimatet i Lund. Det är alltså inte de exakta klimatdata som gällt för mätperioden.

Skillnaden mellan de två beräkningarna är relativt liten. I Figur 3.2.8-9 redovisas beräkningarna med verkliga materialdata på djupen 50 respektive 200 mm. (Referensvägg=vägg1, Classic-fasad=vägg2, Serporoc-fasad=vägg3, Ventilerad-fasad=vägg4). Observera att i dessa figurer anges fukthalt i stället för fuktkvot. Värdena kan omräknas till fuktkvot genom att dividera med 4 (fyra).



Figur 3.2.8. Beräknad fukthalt med uppmätta data på djupet 50 mm i de olika väggarna.



Figur 3.2.9. Beräknad fukthalt med uppmätta data på djupet 200 mm i de olika väggarna.

3.2.6 Energibesparing genom tilläggsisoleringen

Energibesparingen vid en tilläggsisolering av en lättbetongvägg består av 4 olika delar, nämligen

- själva tilläggsisoleringen
- minskat fuktinnehåll i lättbetongen medför ett lägre λ-värde
- förhöjd yttemperatur på insidan
- minskad avdunstning från väggen

Applicerar man ytterligare värmeisolering är det självklart att värmemotståndet ökar och därmed mindre energiflöde genom väggen. Enligt lättbetongtillverkaren ska man vid U-värdesberäkningar använda λ=0.100 W/mK. Detta ger då U-värden för de olika väggarna enligt följande

vägg 1	U=0.37 W/m^{2}K
vägg 2	U=0.25 W/m^{2}K
vägg 3	U=0.24 W/m^{2}K
vägg 4	U=0.25 W/m^{2}K

Tilläggsisoleringen medför alltså att energiflödet minskar med cirka 30-35 % efter en tilläggsisolering med 45-50 mm isolering. Härvid har man inte tagit hänsyn till att lättbetongen utan värmeisolering är blöt. Man överskattar därför lättbetongens värmemotstånd och därmed underskattas energiflödet i denna vägg. Jämförelsen är därför inte relevant. Den verkliga energibesparingen vid en tilläggsisolering blir alltså större.

Beräkningen av U-värdet för den icke tilläggsisolerade väggen enligt ovan är gjord på ”traditionellt sätt”. För att få en mer realistisk beräkning måste man ta hänsyn till att väggen i fortfarighetstillstånd är relativt blöt. Med utgångspunkt från utförda mätningar kan man grovt approximera fuktkvoten i den yttre halvan till 30 viktsprocent och i den inre halvan 7 viktsprocent.

λ-värdets fuktberoende varierar enligt olika källor. Här väljs ett ”medelvärde” Δλ=0.004 W/mK per viktsprocent fuktkvot. λ för helt torr lättbetong har valts till 0.09 W/mK.

Med ovanstående antaganden blir U-värdet för den icke tilläggsisolerade väggen U=0.55 W/m^{2}K. Fukten i lättbetongen medför alltså att värmeflödet i den icke tilläggsisolerade väggen i verkligheten ökar med cirka 50 % jämfört med en traditionell beräkning.

Tar man hänsyn till fukten kommer energiflödet totalt att minska med cirka 50 % efter en tilläggsisolering med 45-50 mm isolering.

Det ska påpekas att angivna siffror inte får uppfattas som generella. De gäller endast de aktuella provväggarna i Lund under aktuell period. Annan orientering, annat läge i Sverige och annan konstruktion ger andra siffror.

Enligt utförda mätningar höjs yttemperaturen under vintern på insidan med cirka 1 grad efter tilläggsisoleringen. Förutom den förbättrade komforten kan man sänka inomhustemperaturen utan att detta upplevs som negativt. Hur mycket man kan sänka temperaturen beror på ett antal faktorer. Att sammantaget ange en siffra är omöjligt. I extremfall, till exempel ett rum med flera ytterväggar, torde man kunna sänka temperaturen med upp till en grad efter en tilläggsisolering med cirka 50 mm isolering. Vid en utetemperatur kring noll grader medför detta en ytterligare energibesparing med cirka 5 %.

Allt regnvatten som väggen absorberar ska avdunsta. För detta krävs energi och en del av denna energi tas inifrån, vilket medför en ökning av energiförbrukningen. Avdunstningen sker främst under den varma årstiden och påverkar då inte byggnadens energiförbrukning. En viss del sker dock under den kalla årstiden. Hur mycket detta medför med tanke på energiförbrukningen är svårt att ange. Jämfört med tidigare angivna siffror på energiförbrukningen torde denna del vara av mindre betydelse.

En bedömning av hur mycket energiflödet minskar efter 50 mm tilläggsisolering ger enligt traditionellt sätt att räkna resultatet cirka 30 %. Tar man hänsyn även till andra gynnsamma effekter så blir denna siffra i stort sett dubbelt så stor, det vill säga 50-60 %.

3.3 Simulering och mätning i demonstrationshus, Kyrkbyn

3.3.1 Inledning

Enligt dagens standarder och EU:s energifärdplan för att uppnå 2050 års mål är energiprestandan hos flerbostadshus från 1950-talet och senare dålig. Externa tilläggsisolersystem används ofta för att förbättra prestandan hos dessa byggnader, men de hygrotermiska effekterna som orsakas av dessa renoveringar är inte helt utredda. Den studerade byggnaden som uppfördes under början av 1950-talet, Figur 3.3.1, ligger i Kyrkbyn på Hisingen i Göteborg och har lättbetongväggar med en halvstens tegelskalmur utanpå. Tegelfasaden har åldrats av väder och vind och dess fogar försämrats. Då en avskiljande luftspalt saknas mellan teglet och lättbetongen har regnvatten letat sig in och absorberats av lättbetongen, vilket i sin tur orsakade hygieniska problem och hälsorisker för de boende när vattnet tog sig hela vägen in till tapeter och insidan av lägenheter.

Figur 3.3.1. Den studerade byggnaden före renoveringen (Foto taget i slutet av mars 2010 av Kenneth Sandin, LTH).

3.3.2 Bakgrund till studien

En kontinuerligt hög vattenhalt i lättbetongväggarna kan resultera i olika typer av fuktrelaterade skador och hygieniska problem, men kan också inverka på isolerförmågan hos lättbetongen, då fukt och termiska egenskaper hos byggnadsmaterial är tätt sammankopplade (Sandin 1984). Flera av byggnadens 19 lägenheter hade drabbats av fuktrelaterade skador i främst söderfasaden men även västerfasaden. Detta hade pågått under flera år i större och mindre omfattning beroende på klimatförhållanden och tid på året. Fastighetsägaren höjde inomhustemperaturen vintertid i lägenheterna för att driva ut fukten vilket resulterade i en hög energiåtgång för uppvärmning av fastigheten och en ohållbar lösning. Misslyckade försök att minska fasadernas vattenupptagning gjordes även med olika typer av hydrofoberingsmedel.

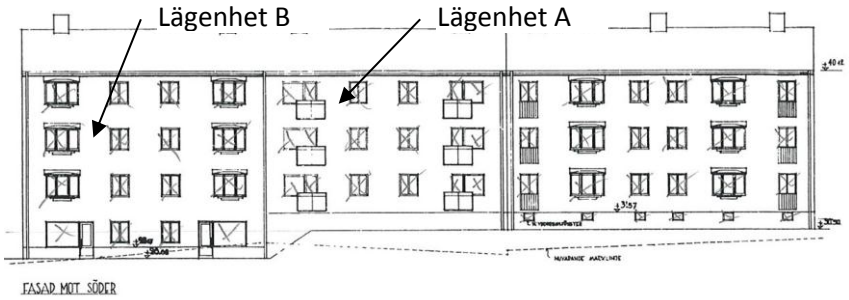
För att förbättra byggnadens hygrotermiska prestanda, stoppa en fortsatt vattenupptagning i lättbetongen, och medge en uttorkning av väggarna valdes ett tilläggsisolersystem med mineralull och tjockputs (ETICS – external thermal insulation composite system). Valet av puts berodde även på att man ville bevara det tidstypiska utseendet av byggnaden och dess plats i det kulturhistoriska området där både tegel och putsade fasader är typiska. Även fönstren var i dåligt skick och byttes i samband med renoveringen till mer energieffektiva för att minska byggnadens energiförbrukning men även för att förbättra lägenheternas termiska komfort.

De undersökta väggarna består av 20 cm lättbetong och har ett halvstens tegelskal direkt utanpå. Avsaknaden av ordentlig luftspalt har bidragit till den starka vattenupptagningen hos lättbetongen och de efterföljande inomhusproblemen. Tilläggsisolering med icke-hygroskopiska isolermaterial så som mineralull är mycket effektiva sätt att förebygga regnvatten från att nå längre in i väggarna och tillåta dem att torka ut. Väl utförda och genomtänkta anslutningsdetaljer är dock viktiga. Renoveringen påbörjades under hösten 2010 och avslutades under vintern. Det tilläggsisolersystem som användes består av 50 mm tjock mineralull och en tvåskiktsputs utanpå. Putsen består av en grundningsputs som appliceras på mineralullen och därefter ett genomfärgat rivputsskikt, totalt ca 20 mm puts. De ursprungliga fönstren med ett ungefärligt U-värde på U=3 W/m^{2}K, se Figur 3.3.2, var i dåligt skick och byttes ut mot energieffektiva 3-glasfönster med U=1.0 W/m^{2}K.

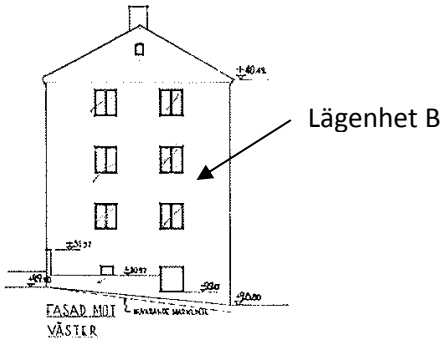
Figur 3.3.2. Byggnaden före renovering, de ursprungliga fönstren var i ett dåligt energimässigt skick och byttes ut under renoveringen (Foto av Carl-Magnus Capener, SP).

3.3.3 Fältstudie och datorsimuleringar

I mars 2010, ett halvår innan renoveringen påbörjades, påbörjades en fältstudie för att bedöma fasadens skick och mäta fuktkvot i lättbetongen i olika väggar. Trådlös utrustning monterades inne i två lägenheter för att kontinuerligt mäta fuktkvot, relativ fuktighet och temperatur på olika djup i lättbetongväggarna; tredje våningen mot söder (lägenhet A), och andra våningen mot söder och väster (lägenhet B), se Figurer 3.3.3 och 3.3.4.



Figur 3.3.3. Fasad mot söder. Indikativ position för lägenheternas placering och motsvarande mätpunkter i vägg.



Figur 3.3.4. Fasad mot väster. Indikativ position för lägenhet B och motsvarande mätpunkter i vägg.

Den utrustning som användes för trådlös övervakning var GE HygroTrac v2 sensorer som tillåter tre mätare i varje sändare, två RF/temperatur givare (Hygrosticks) och en (wood moisture equivalent) WME-fuktkvotsgivare för den relativa träfuktkvoten. Alla sensorer kalibrerades genom laboratoriepersonal vid Lunds Tekniska Högskola och kommer att återkalibreras efter att projektet har slutförts. Mätning pågår dock fortfarande (februari 2013). Data från de trådlösa sensorerna tas sedan emot av en gateway placerad i källaren av byggnaden och vidarebefordras till en server med 3G-router.

Mätutrustningen består dels av elektroder för en relativ bestämning av fukttillståndet och dels RF-givare. Elektroderna monterades på djupet 80 mm från väggens insida, dvs. cirka 50 mm in i lättbetongen. Det erhållna mätvärdet vid mätning i lättbetong motsvarar inte fuktkvoten i lättbetong utan är ett relativt mått på fukttillståndet vilket kan korreleras mot fuktkvot genom att kalibrera mot uppmätta värden från exempelvis borrkärnor som torkas, se även tidigare förklaring i avsnitt 3.2. RF-givarna på djupen 70, 150 och 200 mm in i lättbetongen. Med samma utrustning mättes även inomhusklimatet i de två lägenheterna. Den trådlösa utrustningen är ett smidigt sätt att få data på

hur väggarnas fukttillstånd förändras med tiden utan att störa hyresgästerna. I Figurer 3.3.5 och 3.3.6 visas den monterade utrustningen vid två mätpunkter.

Figur 3.3.5. HygroTrac givare monterade i lägenhet A på våning 3, sydlig riktning (Foto av Kenneth Sandin, LTH).

Figur 3.3.6. HygroTrac givare monterade i lägenhet B på våning 2, sydlig riktning (Foto av Kenneth Sandin, LTH).

För att bestämma fuktkvoten i lättbetongen på olika djup uttogs borrkärnor på olika djup i samband med monteringen av utrustning. Analysen av dessa utfördes av Kenneth Sandin vid avdelningen för Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola. Tabell 3.3.1 visar mätvärdena från borrkärnan på tredje våningen mot söder och resultaten visar på höga fuktinnehåll i väggen vid mättillfället, med ökande fuktkvot längre ut i lättbetongen.

Tabell 3.3.1. Resultat från analysen av en borrkärna, uppmätta fuktkvoter i lättbetongen på olika djup i väggen, tredje våningen mot söder.

Djup i lättbetongen från insidan (cm)	*Fuktkvot (vikts-%)*
0-3	*19.1*
4-8	*24.1*
8-12	*25.0*
13-16	*26.7*
16-19	*29.0*

Innan renoveringen påbörjades modellerades väggarnas hygrotermiska beteende med hjälp av WUFI Pro 5.1, vilket är ett verktyg som kan simulera dynamiska fukt- och temperaturvariationer under klimatpåverkan för bland annat fasader. Programvaran har experimentellt verifierats för många typer av byggnadsdelar (Künzel 1995, Karagiozis 2001) och liknande uppbyggnader som det studerade huset (Tariku 2006). Den befintliga byggnadens vägg och två alternativa putsade tilläggsisolersystem utvärderades, bland annat det som valdes. Materialdata och begynnelsevillkor för fukt levererades från mätningar och materielltillverkare samt från materialdatabaser som MASEA Datenbank (Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung) och IBP Fraunhofer Material Database.

Eftersom byggnaden härrör från tidigt 1950-tal, saknas exakta materialdata och rimliga antaganden måste göras. Då vissa material åldras, kommer deras egenskaper att förändras med tiden. Detta är säkerligen fallet då lättbetong genomgår karbonatisering. Matsushita et al. (2004) rapporterade om förändringar i mikrostrukturen lättbetong under karbonatisering och graden av karbonatisering med tiden. Eftersom byggnaden är nära 60 år gammal kan en hög grad av karbonatisering genom väggarna förväntas vilket kan inverka bland annat på lättbetongens fuktlagringsfunktion och dess vatteninnehåll.

För den jämförande hygrotermiska analysen av väggarna före och efter renoveringen, användes normaliserade klimatdata för utomhusklimatet för Göteborg från Lunds Universitet.

Hygrotermiska materialparametrar för modellering av vägg

De parametrar som används vid beräkningen av ursprunglig vägg och med tilläggsisolersystem beskrivs i Tabell 3.3.2 och 3.3.3. Initiala fuktförhållanden i lättbetongen sätts från resultaten från borrkärnorna, se Tabell 3.3.1.

Tabell 3.3.2. Hygrotermiska egenskaper för material använda vid modelleringen.

Property\ Material	*Solid brick masonry*	*Aerated concrete from the 1960-ies*	*Mineral wool*	*EPS*
Density [kg/m3]	*1900*	*500*	*85*	*20*
Porosity [m3/m3]	*0.24*	*0.76*	*0.95*	*0.95*
Thermal conductivity [W/mK]	*0.6*	*0.14*	*0.036*	*0.036*
Moisture dependent thermal conductivity supplement [%/M.-%]	*15.0*	*4.0*	*-*	*-*
Vapour diffusion resistance factor, dry [-]	*10.0*	*8*	*1.3*	*35*
Reference water content [kg/m3]	*18*	*19.2*	*-*	*-*
Free water saturation [kg/m3]	*190*	*323*	*-*	*-*
Water absorption coefficient [kg/(m2s0.5)]	*1*	*0.085*	*-*	*-*

* Closest reference found for AAC from the 1950-ies

Tabell 3.3.3. Forts. hygrotermiska egenskaper för material använda vid modelleringen.

Property\ Material	Interior mineral plaster	Exterior mineral render, base coat	Exterior mineral render, final coat	Exterior acrylic stucco
Density [kg/m3]	*1900*	*1900*	*1690*	*1100*
Porosity [m3/m3]	*0.24*	*0.24*	*0.29*	*0.12*
Thermal conductivity [W/mK]	*0.8*	*0.8*	*0.7*	*0.7*
Moisture dependent thermal conductivity supplement [%/M.-%]	*8.0*	*8.0*	*8.0*	*-*
Vapour diffusion resistance factor, dry [-]	*19*	*19*	*12*	*1000*
Reference water content [kg/m3]	*45*	*45*	*5.7*	*10*
Free water saturation [kg/m3]	*210*	*210*	*180*	*100*
Water absorption coefficient [kg/(m2s0.5)]	*0.017*	*0.03*	*0.0022*	*0.0013*

För det ursprungliga tegelmaterialet har vattenabsorptionskoefficienten modifierats för att simulera läckande fogar i fasaden och ett läckage har dessutom antagits motsvarande en rimlig mängd fukt till lättbetongen för att höja fuktnivåerna till värden som motsvarar de i Tabell 3.3.1 minst en gång per år. På insidan har ett ångmotstånd antagits för att simulera några lager färg eller en ångtät tapet.

Alla simuleringar beräknades med ett startdatum i augusti 2010 motsvarande starten av renoveringen och väderskyddandet av fasaderna. Simuleringarna beräknas sedan under en period av 3 år för att se effekten av de olika tilläggsisolersystemen jämfört med referensfallet.

Väggtvärsnitt och ingående material– referensfallet innan renovering

Den ursprungliga referensväggen består av en autoklaverad lättbetong med ett halvstens tegelskal direkt utanpå och en mineralisk puts på insidan. Från insidan och ut:

- Mineralisk puts, 15 mm
- Lättbetong, 200 mm
- Tegel, 65 mm

Väggtvärsnitt och ingående material - efter tilläggsisolering

För det renoverade fallet har två alternativ med putsad tilläggsisolering undersökts utanpå den befintliga väggen. Det första fallet är med en mineralisk puts på mineralull, inifrån och ut:

- Mineralull, 50 mm
- Puts, grundningsskikt, 10 mm
- Puts, andra skiktet, rivputs, 10 mm

Det andra alternativet är en organisk tunnputs på expanderad polystyren, EPS, inifrån och ut:

- Expanderad polystyren, 50 mm
- Organisk tunnputs, 3 mm

Randvillkor

Som beskrivs i texten ovan har utomhusklimatet simuleras med normaliserade klimatdata för Göteborg. Inneklimat valdes enligt standard EN 15026, vilken specificerar villkoren som en funktion av utomhusklimatet och fuktbelastning på insidan. Ytövergångskoefficienter valdes utifrån material och vald färgton, och slagregnskoefficient beroende på byggnadstyp och väggens orientering.

Analys av resultat från den hygrotermiska simuleringen

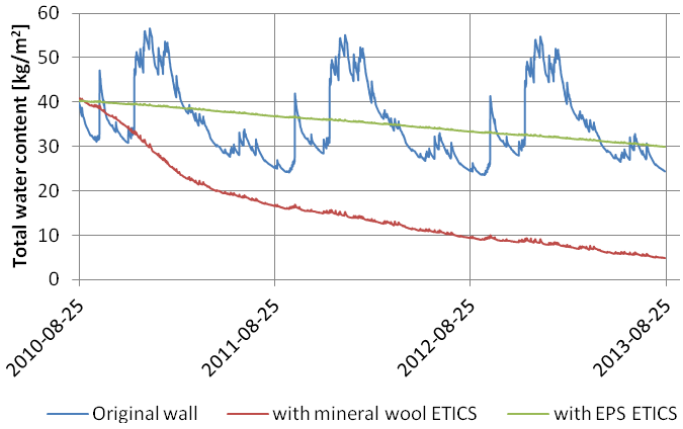
Resultaten analyserades och värmeöverföringen och det dynamiska U-värdet beroende på materialens fuktinnehåll undersöktes. Detta jämfördes med teoretiska U-värden för torra väggar och även för u80-värden, dvs. då väggen befinner sig i jämvikt med ett omgivande klimat på 80 % relativ fuktighet.

3.3.4. Resultat från datorsimuleringar

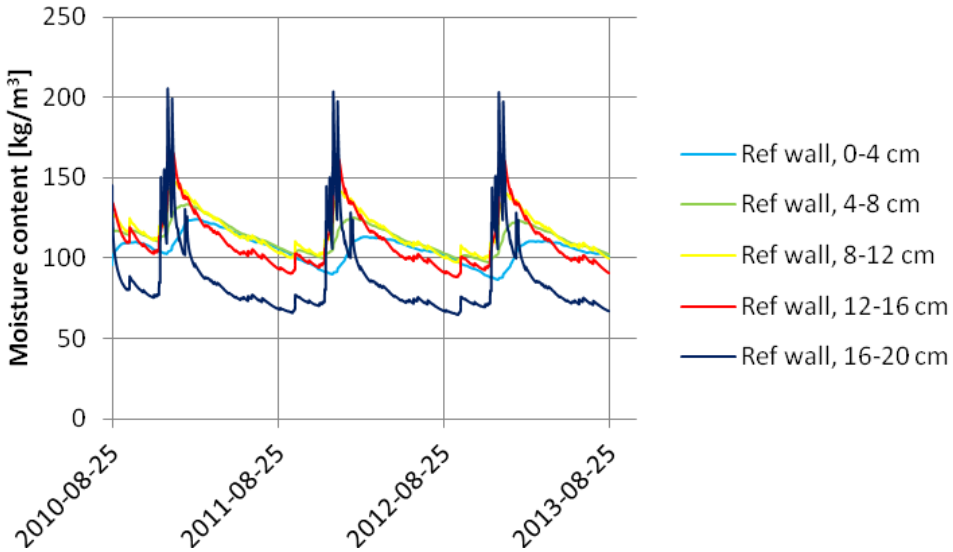
Det är alltid svårt att modellera äldre byggnader med avseende på materialegenskaper. Även om de sökta egenskaperna anges från tiden för konstruktionen, kommer åldrande från fysiska och kemiska reaktioner att ändra materialegenskaperna. I studien jämförs referensväggen med två varianter av putsade tilläggsisolersystem; ett med mineralull och ett med expanderad polystyren (EPS) som isolering. EPS lösningen har en organisk tunnputs och mineralullslösningen har en mineralisk

tvåskiktsputs. För referensväggen har vattenabsorptionskoefficienten för teglet (som inkluderar fogbruket) ändrats för att möjliggöra en större vattenupptagning i lättbetongen, motsvarande de faktiska värdena som uppmättes i fältstudien.

I Figur 3.3.7 anges väggarnas totala fuktinnehåll med tiden för de tre undersökta fallen uttryckt som kg/m^2, dvs. tänkt som ett tvärsnitt genom väggarna. Det är tydligt att det är svårt att infoga sådana mängder av vatten som uppmättes i fältstudien enbart genom att justera vattenabsorptionskoefficienten, se referensvägg "Original wall". Även om fukthalten i det yttersta skiktet av lättbetongen överensstämmer väl med de uppmätta nivåerna, se Figur 3.3.8, kommer resten av väggen inte att ta upp så mycket vatten som uppmättes i fält. Det är uppenbart att lättbetongens materiellparametrar behöver studeras ytterligare och speciellt materialets sorptionsisotermer.

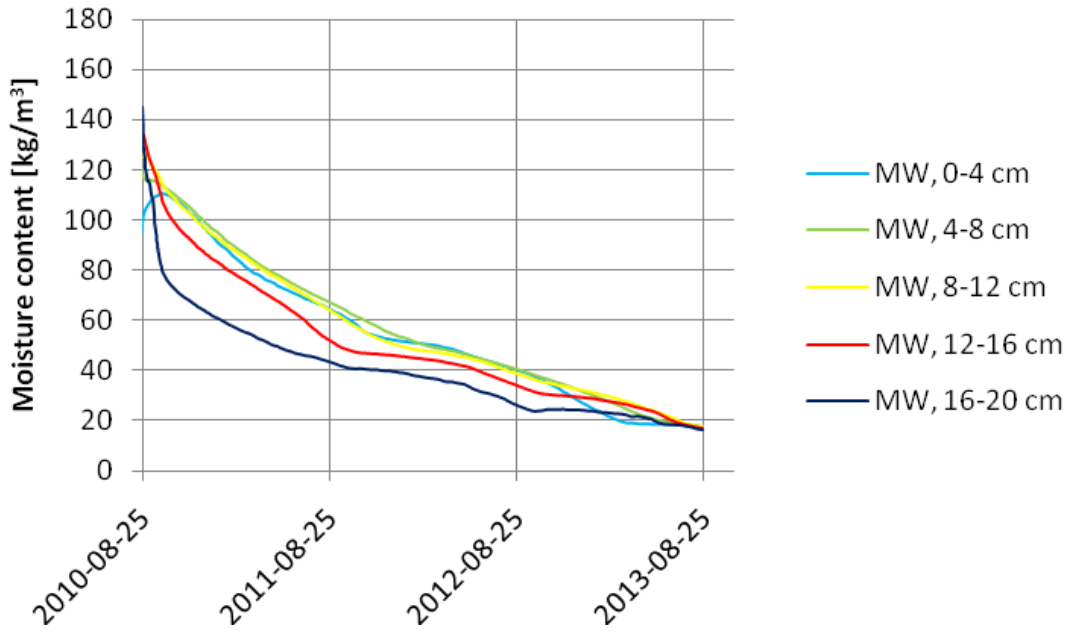


Figur 3.3.7. Total fukthalt som en funktion av tiden för alla tre undersökta fallen.



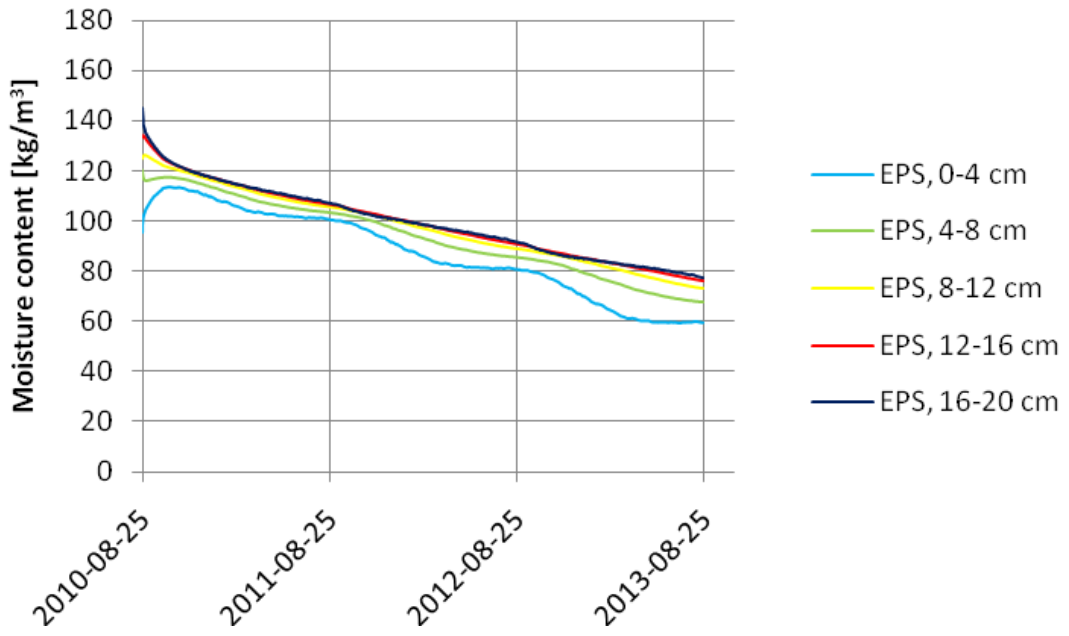
Figur 3.3.8. Fukthalt vid olika djup i lättbetongen i den ursprungliga väggen, utan någon tilläggsisolering.

För den renoverade väggen med puts på mineralull skiljer sig beteendet åt från den ursprungliga referensväggen, se Figur 3.3.9. Simuleringarna visar på en snabb uttorkning i lättbetongens yttre del, 16-20 cm djup, och en långsammare uttorkning mitt i lättbetongen.



Figur 3.3.9. Fukthalt vid olika djup i lättbetongen med en putsad tilläggsisolering med mineralull.

För tilläggsisolersystemet med EPS visas fuktfördelningen i Figur 3.3.10. Här är fuktfördelningen jämnare över lättbetongen då det höga ånggenomgångsmotståndet hos tilläggsisolersystemet har en stor inverkan på uttorkning mot utsidan och minskar uttorkningshastigheten.



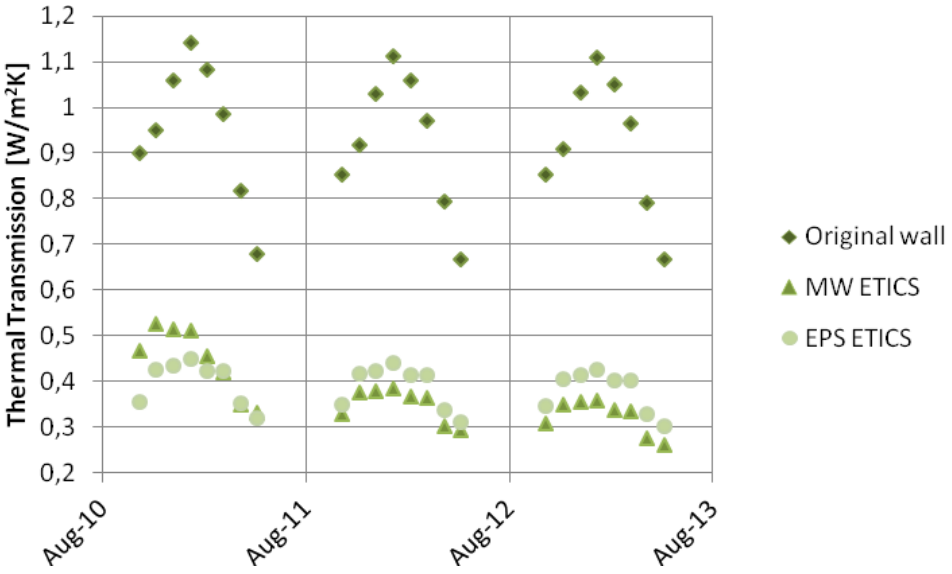
Figur 3.3.10. Fukthalt vid olika djup i lättbetongen med en putsad tilläggsisolering med EPS.

Inverkan av tilläggsisolersystemen med avseende på uttorkning av fukt har också undersökts. Nedan redovisas fuktens inverkan på väggarnas termiska egenskaper med tiden då väggarna torkar ut. De teoretiska U-värdena för torra väggar och vid motsvarande u80 för de olika fallen redovisas i Tabell 3.3.4.

Tabell 3.3.4. Teoretiska U-värden för de olika fallen på torra och u80 fuktnivåer.

Fall	*Torr [W/m2K]*	*u80 [W/m2K]*
Referensvägg innan renovering	*0.579*	*0.657*
Tilläggsisolering med mineralull	*0.318*	*0.344*
Tilläggsisolering med EPS	*0.320*	*0.346*

De transienta resultaten visas i Figur 3.3.11. Den förhöjda fukthalten har en betydande inverkan på de ursprungliga väggarna och ger U-värden högt över U80-nivå under större delen av simuleringen. För de tilläggsisolerade väggarna förbättras den termiska prestandan. Fukten har dock fortfarande en stor inverkan i fallet med tilläggsisolering av EPS under flera år, medan väggen med tilläggsisolering av mineralull har nått u80-värden redan år två.

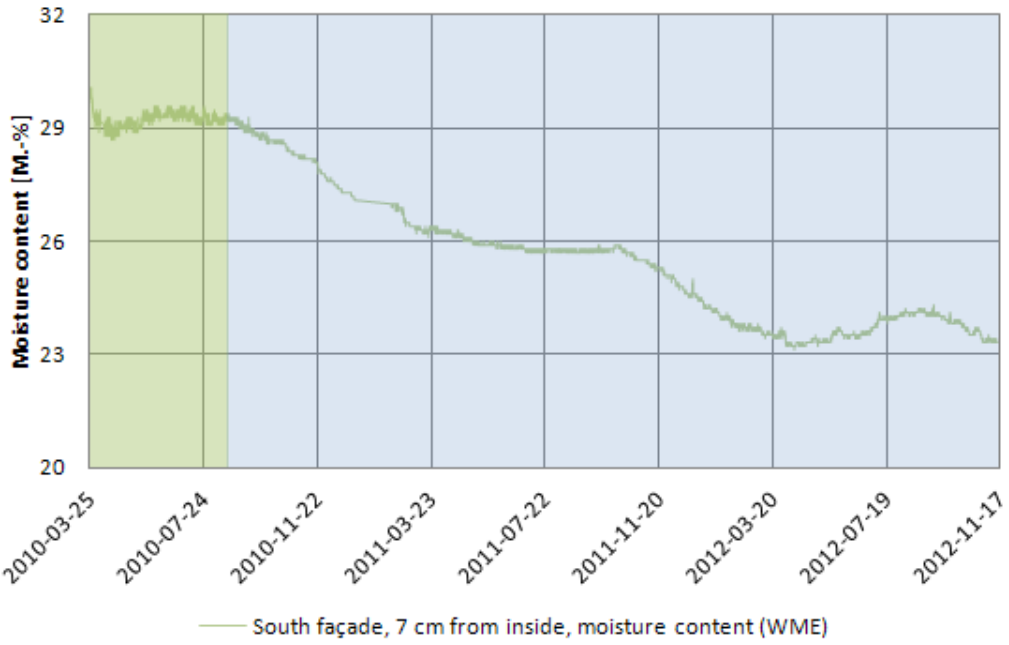


Figur 3.3.11. Transienta U-värden för de tre undersökta fallen, den ursprungliga väggen och de två med tilläggsisolering.

3.3.5. Resultat från fältmätningar

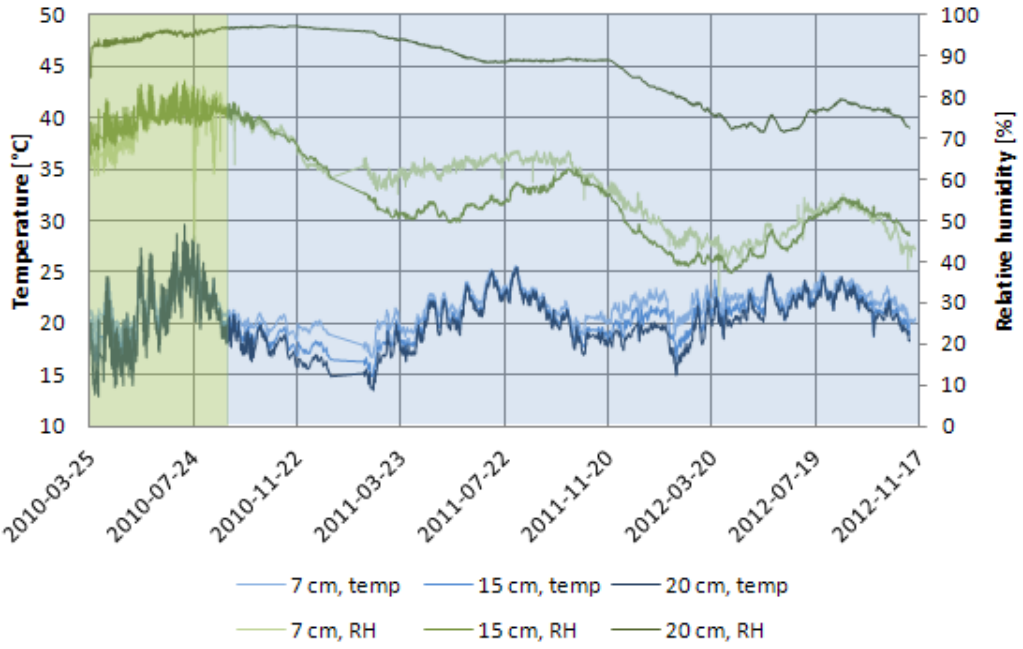
Trots mindre problem med det trådlösa mätsystemet, och den mottagande enhetens placering i källaren på byggnaden har det trådlösa systemet arbetade enligt förväntningarna och insamlad mätdata har gett mycket information. För det första kan man dra slutsatsen att fuktförhållandena varierar över fasaderna beroende på höjd på byggnaden och riktning av exponerad yta. Den högsta fukthalten och relativa fuktigheten fanns i söderläge och högst upp i huset. Figur 3.3.12 visar data på WME-fukthalt vid ett djup av 5 cm i lättbetongen mätt från insidan av Lägenhet A

Det är uppenbart att det valda tilläggsisolersystemet möjliggör en snabb uttorkning av lättbetongen. Säsongsmässiga förändringar i hastigheten för uttorkningen kan observeras då den högre fukthalten i luften utomhus under sommaren saktar ner uttorkningen.



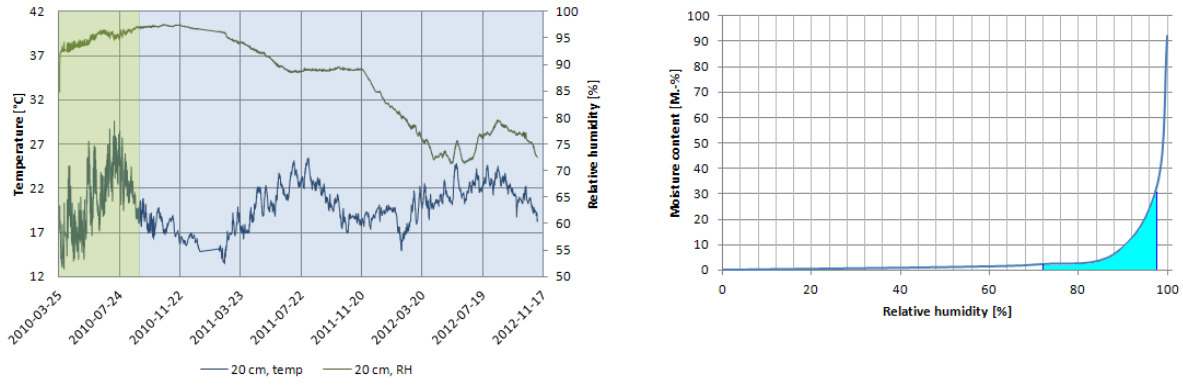
Figur 3.3.12. Resultat från fältmätning, söderläge, 3: e våningen, Lägenhet A. Figuren visar WME fukthalt före-(grön skuggning) och efter renovering (blå skuggning) vid ett djup motsvarande 5 cm i lättbetongen mätt från insidan.

Väderutsatthet, solstrålning och termiska effekter måste också betraktas som faktorer som påverkar vattenupptagningen och fuktnivåerna i fasaderna. De trådlösa givarna som var monterade på olika djup i lättbetongväggarna och kunde följa den relativa fuktigheten.



Figur 3.3.13. Relativ fuktighet och temperatur på olika djup i lättbetongen i söderläge, tredje våningen, före och efter renovering.

Resultaten från mätningarna med de trådlösa givarna indikerade fuktkvotsnivåer som är i närheten av de som uppmättes i borrkärnorna, se Tabell 3.3.1. Det bör påpekas att bestämning av fuktkvoten vid höga nivåer på den relativa fuktigheten kan vara behäftade med osäkerheter. Av Figur 3.3.14 b) framgår att vid relativa fuktigheter över 95 % kan små förändringar i relativa fuktigheten innebära stora förändringar i lättbetongens fuktkvot. För att undanröja osäkerheter avseende lättbetongväggars fuktkvot, rekommenderas att mätning med fuktighetsgivare kombineras med fuktkvotsbestämning på borrkärnor.

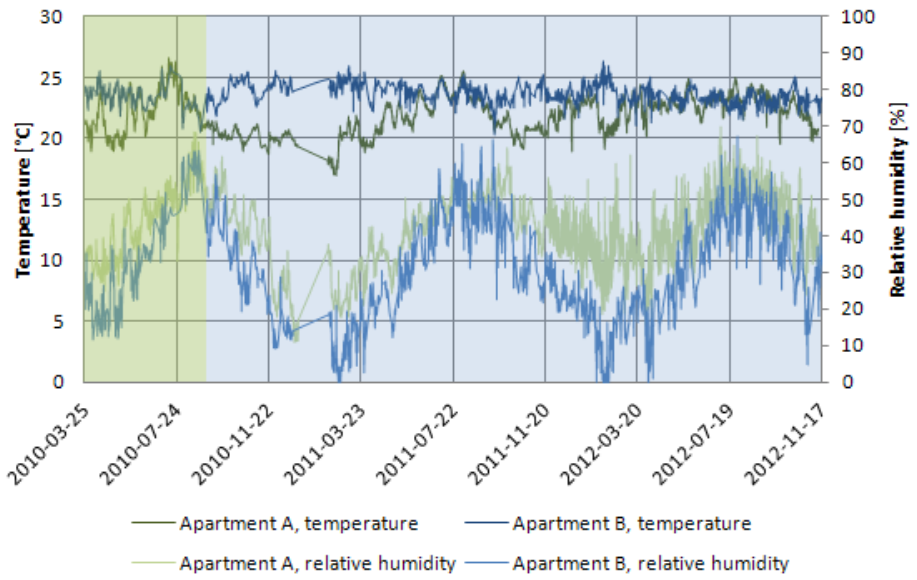


a) *b)*

Figur 3.3.14. a) Relativa fuktigheter som uppmättes i lättbetongen; b) Desorptionsisoterm för lättbetong, baserat på data från Kumaran et al. (2002).

Under de första månaderna ses ingen tydlig minskning av den relativa fuktigheten för denna punkt då fuktkapaciteten hos lättbetong är hög vid höga relativa fuktigheter, medan mätpunkter med lägre startvärde på relativa fuktigheten minskade tidigare, se Figur 3.3.13. En hög fuktkapacitet innebär att det krävs en stor minskning av fuktinnehåll i materialet för att den motsvarande relativa fuktigheten ska sjunka. Under de kalla vintermånaderna har luften en låg genomsnittlig fukthalt utomhus, vilket är den drivande kraften och uttorkningspotentialen och även den yttre delen av lättbetongen har säkerligen haft en betydande uttorkning utan att det kan tydligt detekteras med RF-givare.

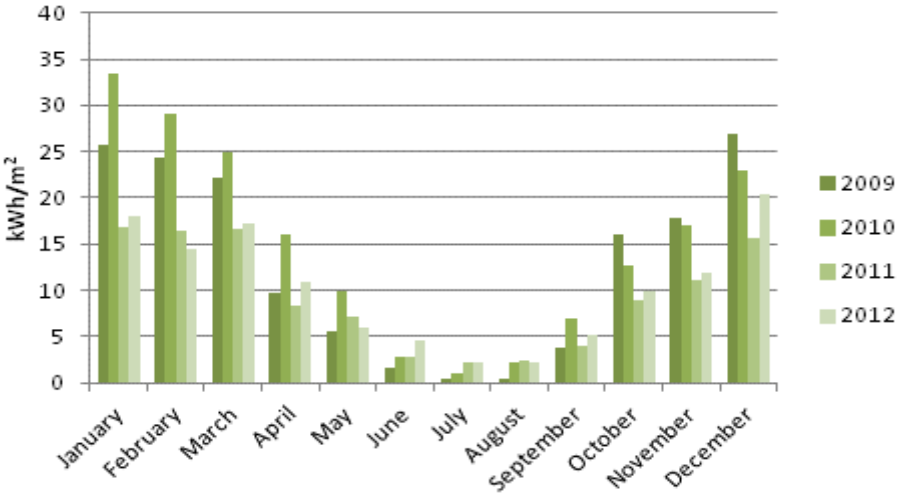
Den termiska komforten inomhus påverkades också av renoveringen, vilket visas i Figur 3.3.15. Det är emellertid svårt att dra definitiva slutsatser baserade på den korta mättiden med årliga variationer och den stora variationen i brukarnas beteende, t.ex. vädring, matlagning, duschning, resmönster (dvs. när de är hemma eller ej) och preferens för inomhustemperaturen. Det är dock möjligt att skönja en minskning av övergradstemperaturer under sommaren, vilket förbättrar komforten under dessa dagar.



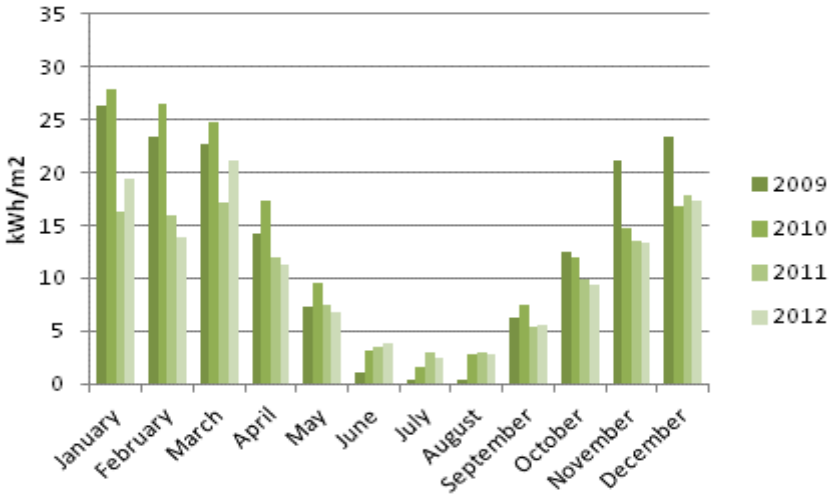
Figur 3.3.15. Inomhus temperatur och relativ fuktighet i de två lägenheterna.

3.3.6. Energiförbrukning – uppmätt och beräknad

Fastighetsägaren har vidarebefordrat energistatistik för levererad fjärrvärme för byggnaden för de tre senaste åren. Tyvärr är inte den energi som levererats för uppvärmning av byggnaden separerad från det tappvarmvatten som används av hyresgästerna. Baserat på tidigare forskning om brukarnas energibeteende (Sjögren 2007, Warfvinge 2008) är det dock möjligt att uppskatta en ungefärlig användning och fördelning av tappvarmvatten under året och därigenom få fram den energi som används för uppvärmningen, Figur 3.3.16. Resultaten visar på en stor besparing i uppvärmningsenergi under tiden efter renoveringen. Även den graddagskorrigerade statistiken visar på en tydlig förbättring i energiprestanda, Figur 3.3.17. De uppmätta värdena för sommarmånaderna varierar stort och variationen beror på den relativt stora osäkerheten kring brukarbeteenden för tappvarmvattenförbrukning och schablonavdraget från den levererade fjärrvärmen.



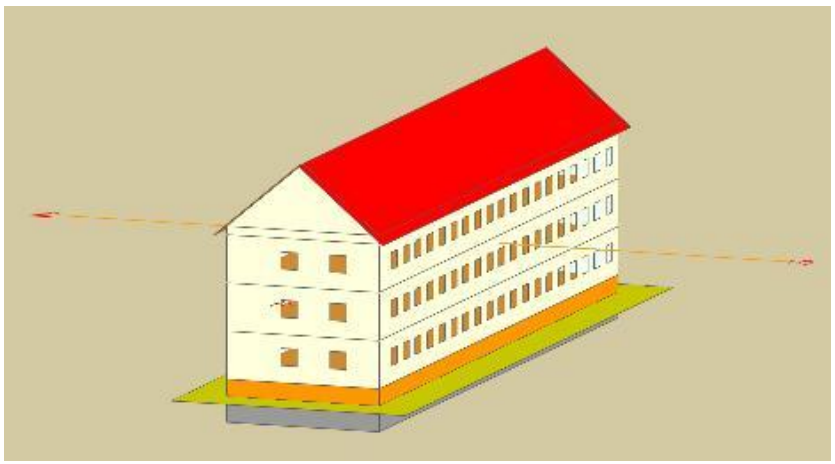
Figur 3.3.16. Uppmätta värden på tillförd energi med fjärrvärme för uppvärmning (reducerat för tappvarmvatten).



Figur 3.3.17. Graddagskorrigerade värden på tillförd energi med fjärrvärme för uppvärmning (reducerat för tappvarmvatten).

De uppmätta värdena indikerar en minskning av tillförd energi på 27 % från 2010 till 2011. Januari månad 2011 jämfört med 2010 visade en nedgång i energi med 45 % vilket även visar på en stor minskning av levererad effekt. Om det antagna varmvattnet lika med 40 kWh/(m2*a) dras av från den levererade fjärrvärmen, fås en ytterligare reduktion i värmetillförsel för uppvärmning på ca 5 procentenheter. För den graddagskorrigerade energin är minskningen inte så dramatisk men ändå betydande.

Energiberäkningar utfördes med ytterligare en mjukvara från WUFI och Fraunhofer; WUFI Plus kan simulera hela hus och även ta hänsyn till fuktens inverkan på värmeflöden och energiförbrukning. Det studerade huset i Kyrkbyn modellerades utifrån sitt ursprungskick, Figur 3.3.18, och därefter med olika renoveringsåtgärder; fönsterbyte, tilläggsisolering eller fönsterbyte och tilläggsisolering. De olika renoveringsåtgärderna analyserades och effekten av enskilda åtgärder separerades samtidigt som fuktens inverkan studerades.



Figur 3.3.18. Modell i WUFI Plus av demonstrationshuset i Kyrkbyn sett från sydväst.

Standardiserade värden på brukarrelaterad indata för energiberäkningen har hämtats från Svebys branschstandard för energi i byggnader (Levin 2009). Dock har uppmätta inomhustemperaturer använts i beräkningarna för att komma så nära verklig energiförbrukning som möjligt. Det finns en potential att justera inomhustemperaturen nedåt ett par grader då yttemperaturer på väggar och fönster höjts genom renoveringsåtgärderna och därigenom åstadkomma ytterligare energibesparing utan att för den delen sänka komforten för de boende.

I Tabell 3.3.5 redovisas energiförbrukningen för byggnaden; dels den faktiska uppmätta, före renovering och efter, men också den beräknade, med och utan hänsyn till fuktens inverkan på energiförbrukningen. För att studera fuktens inverkan ansattes fukthalter motsvarande de som uppmättes i söderfasadens lättbetong, en genomsnittlig FK=25 % genom väggen. Övriga fasader lämnades torra.

Tabell 3.3.5. Uppmätt (med hänsyn till schablonavdrag för DHW) och beräknat energibehov för uppvärmning med olika renoveringsalternativ samt med hänsyn till fuktens inverkan på värmeflöden.

Fall	*kWh/m^2*år*
*Byggnad före renovering, **uppmätt** medelvärde 2009/2010*	*161.5*
*Byggnad före renovering, **beräknat** värde, fuktig söderfasad*	*162.3*
*Byggnad före renovering, **beräknat** värde, torra fasader*	*157.1*
*Byggnad efter renovering, fönsterbyte till energieffektiva 3-glasfönster, **beräknat** värde, fortsatt fuktig söderfasad*	*147.9*
*Byggnad efter renovering, fönsterbyte till energieffektiva 3-glasfönster, **beräknat** värde, torra fasader*	*142.7*
*Byggnad efter renovering, 50 mm tilläggsisolering, **beräknat** värde, torra fasader*	*137.7*
*Byggnad efter renovering, fönsterbyte och 50 mm tilläggsisolering, **beräknat** värde, torra fasader*	*123.3*
*Byggnad efter renovering, fönsterbyte och 50 mm tilläggsisolering, **uppmätt** medelvärde 2011/2012*	*126.0*

Tabell 3.3.5 visar på en reducering i uppmätt energibehov för uppvärmning med 22.0 % med både fönsterbyte och tilläggsisolering. Detta kan jämföras med den beräknade minskningen på 21.5 % (utan hänsyn till fuktens inverkan) och 24.0 % med hänsyn till fukt i sydfasaden. Fönsterbytet gav en besparing på ca 9 % och tilläggsisoleringen 12 % respektive 15 % utan och med hänsyn till fukten i väggarna. För fönsterbytet fås inte denna skillnad då de fuktiga väggarna i sig inte åtgärdas.

3.4 Slutsatser

Tilläggsisolering av slagregnsutsatta oorganiska väggar med ett mineralullskikt på 50 millimeter, i kombination med fönsterbyte, leder till att energiförbrukningen för uppvärmning på årsbasis kan sänkas med 20-30 procent. Drygt hälften av besparingarna hänför sig till tilläggsisoleringen. Tjockare isolering kan ge ännu större energibesparingar men leder ofta till komplikationer i form av invecklade och dyra anslutningsdetaljer vid fönster och balkonger.

De kallaste månaderna kan uppvärmningsbehovet sänkas med uppemot 50 procent, vilket innebär att effektbehovet för uppvärmning kan sänkas efter en energirenovering.

Tilläggsisolering leder även till en väsentlig förbättring av slagregnsutsatta oorganiska ytterväggars termiska och fuktrelaterade egenskaper, vilket har stor betydelse för en sund inomhusmiljö och upplevd komfort hos brukare. Exempelvis:

- på insidan av väggen minskar relativa fuktigheten vintertid från 65-70 procent till 45-50 procent;
- på insidan av väggen minskar relativa fuktigheten under sommaren och hösten från 75-80 procent till 55-60 procent, vilket undanröjer risken för mikrobiell påväxt i tapeter och föremål i kontakt med ytterväggar;
- temperatursvängningarna på insidan av väggen minskar med 1-2 grader, vilket upplevs som ökad komfort av brukare.

Förutom den förbättrade komforten kan man sänka inomhustemperaturen utan att detta upplevs som negativt. Den möjliga sänkningen av temperaturen måste beräknas från fall till fall.

Mätningarna i provhuset vid LTH visar att lättbetong tilläggsisolerad med putsad mineralullsisolering och tilläggsisolering med luftspalt och putsad skiva torkar ut lika snabbt medan en tilläggsisolering med puts på cellplast torkar ut betydligt långsammare. En putsad lättbetongvägg utan hydrofoberande egenskaper kommer aldrig att torka ut då den ständigt kommer att bli återuppfuktad när den är utsatt för regn.

Allt regnvatten som väggen absorberar ska avdunsta. För detta krävs energi och en del av denna energi tas inifrån, vilket medför en ökning av energiförbrukningen. Avdunstningen sker främst under den varma årstiden och påverkar då inte byggnadens energiförbrukning. En viss del sker dock under den kalla årstiden.

Fältstudien vid Kyrkbyn i Göteborg visar att tilläggsisolersystemet med mineralull har haft en gynnsam effekt på fukthalten i väggarna - fuktupptagningen hos lättbetongen har upphört. Energiprestandan har förbättras av renoveringen med fönsterbyte och tilläggsisolersystemet med puts på mineralull. Efter cirka två års uppföljning efter renoveringen har åtgärderna gett avsedd effekt.

De hygrotermiska simuleringar som utförts stämmer väl överens med den uttorkning som uppmätts. En bedömning av hur mycket energiflödet minskar efter 50 mm tilläggsisolering ger enligt traditionellt sätt att räkna resultatet cirka 30 %. Tar man hänsyn även till andra gynnsamma effekter så blir denna siffra i stort sett dubbelt så stor, det vill säga 50-60 %.

4 BESTÄNDIGHETSEGENSKAPER HOS SYSTEMET PUTS PÅ ISOLERING

Puts på isolering är en tilltalande lösning för många äldre hus där de termiska egenskaperna i ytterväggen är undermåliga enlig dagens standard. Puts på isolering kan även vara en lösning då fasaden är i dåligt skick och det finns behov av renovering. Denna typ av fasadlösning påverkar energiprestandan på två sätt, dels genom att väggen kompletteras med ytterligare isolering men även att materialen i den befintliga konstruktionen med tiden kommer att bli torrare, vilket positivt påverkar förmågan att isolera. För att fasaden ska fungera som tänkt, och under lång tid, är det ytterst viktigt att fukt i befintlig konstruktion kan torka ut i två riktningar dvs. både till ute- och inomhusmiljön. Andra egenskaper som är viktiga, är att putsen förblir fri från större sprickor och att putsen har egenskapen att kunna sprickfördela så att endast ofarliga mikrosprickor uppstår.

För att finna svar på hur en beständig fasad ska utformas har ett stort antal försök utförts för att bestämma de olika komponenternas mekaniska egenskaper. Från simuleringar av putsade fasader identifieras kritiska områden och vilken inverkan exempelvis fönsteröppningar och varierande putstjocklek har på spänningsnivån och spänningsmönstret. Vidare redovisas också var gränsen går för farliga sprickor och vattnets väg i fasasystemet. Slutligen diskuteras också inverkan av placering och mängd armering i putsen för att erhålla en robust fasad.

4.1 Bestämning av materialegenskaper genom laboratorieundersökningar

I avsnitt 4.3 utförs tredimensionella datorsimuleringar för att studera hur spänningarna i en putsad fasad påverkas av fasadens geometri, isoleringens styvhet och putstjocklek. För att genomföra denna typ av simuleringar krävs materialegenskaper för putsbruket och isoleringen som indata till beräkningarna. Egenskaper såsom E-modul, draghållfasthet, böjdraghållfasthet och termisk längdutvidgningskoefficient är utvärderade med försök.

4.1.1 Material

Materialen som användes och testades visas i Tabell 4.1.1. Putsen är ett fiberförstärkt underlagsbruk speciellt utformat för puts på isolering. Isoleringen från Weber och Paroc är stenull medan Isovers produkt är glasull.

Tabell 4.1.1 Försöksschema: Testat material och typ av försök

Leverantör/Produkt	E-modul (MPa)	Draghållfasthet (MPa)	Böjdraghållfasthet (MPa)	Längdutvidgnings-koefficient (1/K)
Weber/Therm 340	x	x	x	x
Weber/Therm 321	x *			
Paroc/Fas 2	x *			
Isover/Taurus	x *			
	*Både i vinkelrät och parallell riktning			

4.1.2 Utvärdering av längdutvidgningskoefficient för putsbruket Therm 340

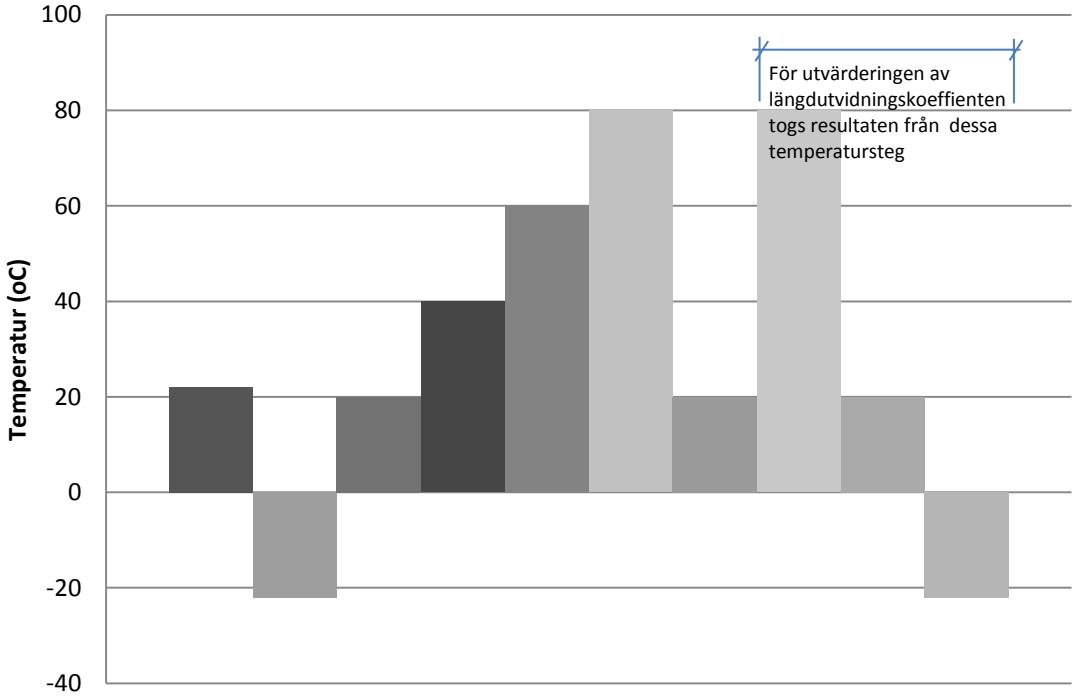
För att utvärdera längdutvidgningskoefficienten (α) gjöts 10 stycken provkroppar med dimensionen 300x90x16 mm vilka klimatiserades i 2 månader i 22 ^{o}C och 50 % relativ fuktighet. Längdändringen mättes över en mätlängd av cirka 100 mm, centralt i provkroppens längsriktning. Längdförändringen

mättes med ett handhållet instrument kallat Setzdehnungmesser av märket Staeger vars mätnoggrannhet är 0,001 mm.

Temperaturschemat vilket användes kan ses i Figur 4.1.1. Temperaturen varierades mellan -22, 20, 40, 60, 80 °C vid konstant relativ fuktighet på 50 %. Mätning av längdförändring utfördes efter 3-4 dygn efter temperaturförändring. Efter att ha konstaterat att responsen på längdförändringarna är stabil vid temperaturväxlingar valdes de tre sista mätvärdena för att utvärdera längdutvidgningskoefficienten. Längdutvidgningskoefficienten beräknas enligt Ekvation 4.1.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T \cdot L} (1/^{o}C) \qquad (4.1)$$

där
∆L=längdförändringen
∆T=temperaturförändringen
L=mätlängden



Figur 4.1.1 Temperaturschema vid utvärdering av längdutvidgningskoefficient för underlagsbruket Therm 340

Utvärderingen visar att längdförändringen mellan olika temperaturer med god approximation är konstant. Värdena ligger mellan 6.1e-6 och 7.9e-6 med medelvärdet 6.9e-6.

4.1.3 Utvärdering av elasticitetsmodul samt böjdraghållfasthet för putsbruket Therm 340

Elasticitetsmodulen (E_m) och böjdraghållfastheten (f_m) är utvärderad enligt SS-EN 310 på provkroppar med dimensionen 400x90x16 mm.

Elasticitetsmodulen beräknas enligt Ekvation 4.2:

$$E_m = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_{1)}} \text{ (MPa)} \quad (4.2)$$

där L= avståndet mellan upplag (mm)
b=provkroppens bredd (mm)
t=provkroppens tjocklek (mm)
F_2-F_1= lastintervallet på den raka delen av last-deformationskurvan (N)
a_2-a_1= skillnaden i utböjning motsvarande lastintervallet F_2-F_1 i millimeter

Böjdraghållfastheten beräknas enligt Ekvation 4.3:

$$f_m = \frac{3F_{\max}L}{2bt^2} \text{ (MPa} \quad (4.3)$$

där
F_{max}=maximal last (N) medan övriga parametrar enligt Ekvation 4.2

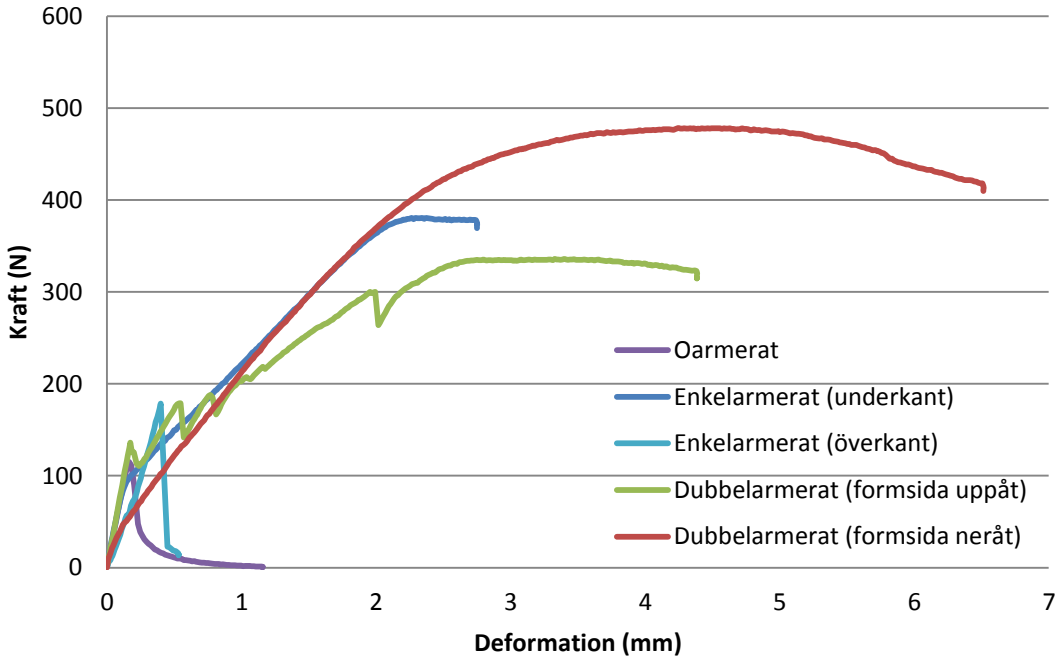
I detta försök testades fem olika varianter av provkroppar, enligt Tabell 4.1.2. Provkropparna var antingen oarmerade, enkelarmerade eller dubbelarmerade med stålnät. Enkel- och dubbelarmerade provkroppar testades även med undersidan uppåt. Innan testen utfördes härdades och klimatiserades provkropparna i 22 ^{o}C och 50 % relativ fuktighet.

Tabell 4.1.2 Försöksschema för utvärdering av elasticitetsmodul och böjdraghållfasthet för underlagsbruket Therm 340. Provkropparna armeras med stålnät med rutnät 19x19 mm.

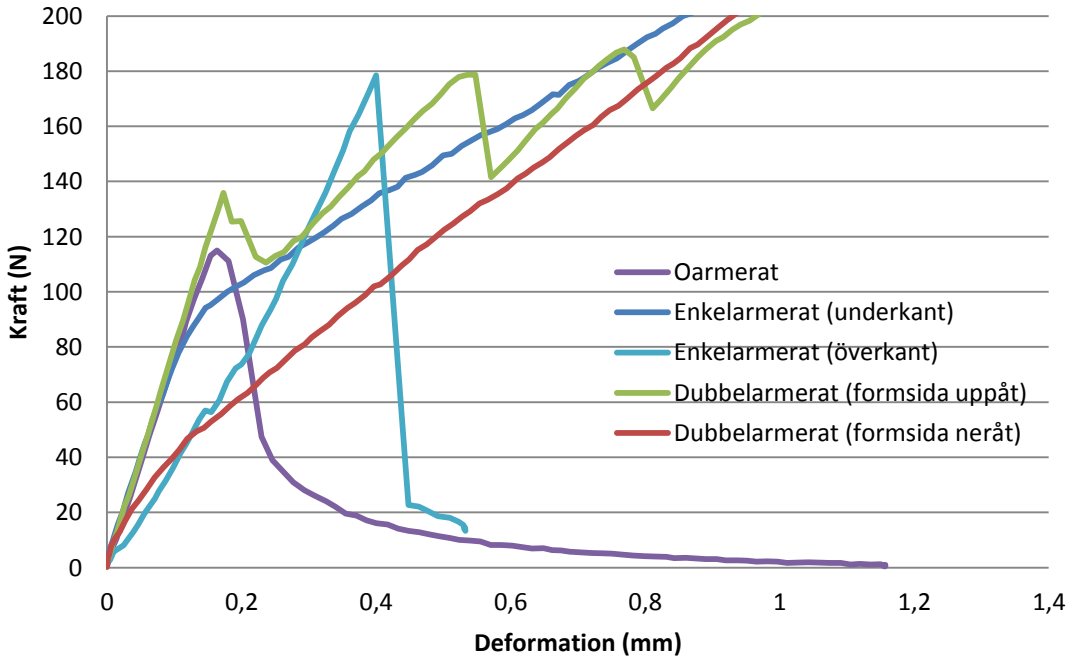
Variant	Antal
Oarmerad (5st)	5 st
Enkelarmerad (underkant)	5 st
Enkelarmerad (överkant)	5 st
Dubbelarmerad (formsida neråt)	5 st
Dubbelarmerad (formsida uppåt)	5 st

Från Figurerna 4.1.2 och 4.1.3, vilka visar exempel på arbetskurvor för de respektive testerna, kan följande observeras:

Provkropparna av oarmerad, enkelarmerad (underkant) samt dubbelarmerad puts (formsidan uppåt) har samma initiella styvhet. Efter uppsprickning, för de armerade provkropparna, börjar armering att ta kraft vilket medför lägre styvhet och högre brottslast.



Figur 4.1.2 Arbetskurvor, vid böjning av putsremsor 400x90x16 mm (deformationsområde 0-7 mm)



Figur 4.1.3 Arbetskurvor, vid böjning av putsremsor 400x90x16 mm (deformationsområde 0-1.4 mm)

När det gäller de två övriga typer av provkroppar, enkelarmerade (överkant) och dubbelarmerade (formsidan neråt) är styvheten lägre än de tre andra varianterna samtidigt som både segheten och brottlasten är högre. Det skulle vara rimligt att oarmerad och enkelarmerad (överkant) puts hade samma styvhet och brottlast, men tydligen påverkar armeringens så pass mycket att skillnad uppstår. Orsaken till att den dubbelarmerade sektionens egenskaper skiljer sig åt beroende på om formsidan vid provning är uppåt eller neråt är placeringen av armeringen. Mot formsidan ligger armeringen i princip i provkroppens yta. Detta innebär att armeringen saknar eller delvis saknar täckskikt och att den vid belastning aktiveras direkt utan att bruket behöver spricka upp, med lägre styvhet som följd.

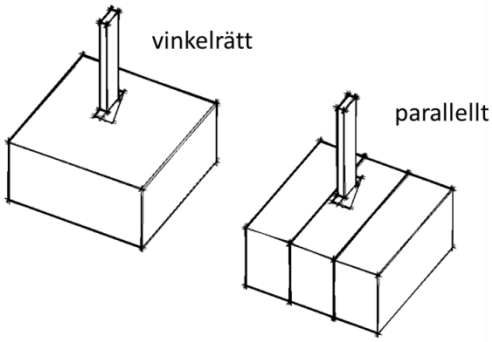
Endast elasticitetsmodulen och böjdraghållfastheten för det oarmerade tvärsnittet är utvärderade. Elasticitetsmodulen varierar mellan 7.6–10.8 GPa, med medelvärdet 9.5 GPa. Böjdraghållfastheten varierar mellan 1.8–2.9 MPa, med medelvärdet 2.4 MPa.

4.1.4 Utvärdering av elasticitetsmodul för mineralullsisolering

Utvärderingen av elasticitetsmodulen har utförts på mineralullsisolering från tre olika leverantörer - Paroc, Weber och Isover. Två av produkterna var stenull och den tredje glasull, enligt Tabell 4.1.3. E-modulen utvärderades i två riktningar, vinkelrätt samt parallellt (skivans längsriktning) fibrerna. För att kunna utföra testen i den parallella riktningen enligt standarden SS-EN-826 krävdes att provkroppen byggdes upp av flera skivbitar, se Figur 4.1.4. Arbetskurvor uppmätta i försöken visas i Figurerna 4.1.5-4.1.6

Tabell 4.1.3 Produkter som blev testade för att bestämma E-modulen.

Leverantör	Material	Antal (vinkelrätt)	Antal (parallellt)
Paroc	stenull	5 st	5 st
Weber	stenull	5 st	5 st
Isover	glasull	5 st	5 st

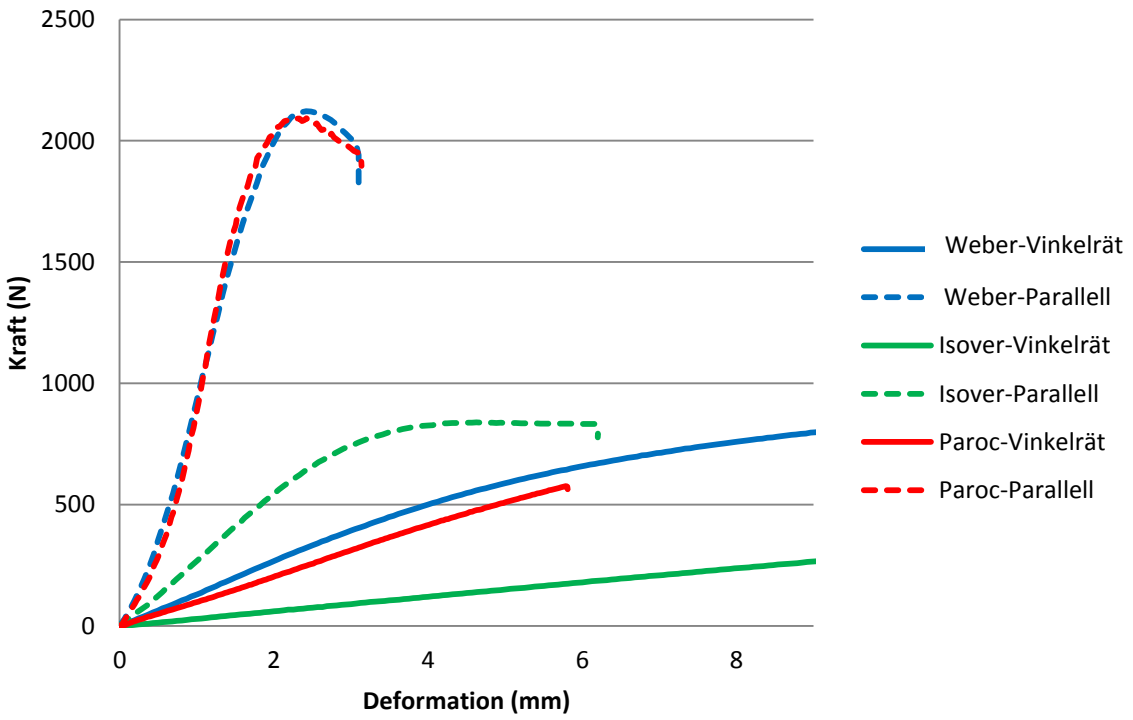


Figur 4.1.4 Vinkelrät riktning och parallell riktning (skivans längsriktning)

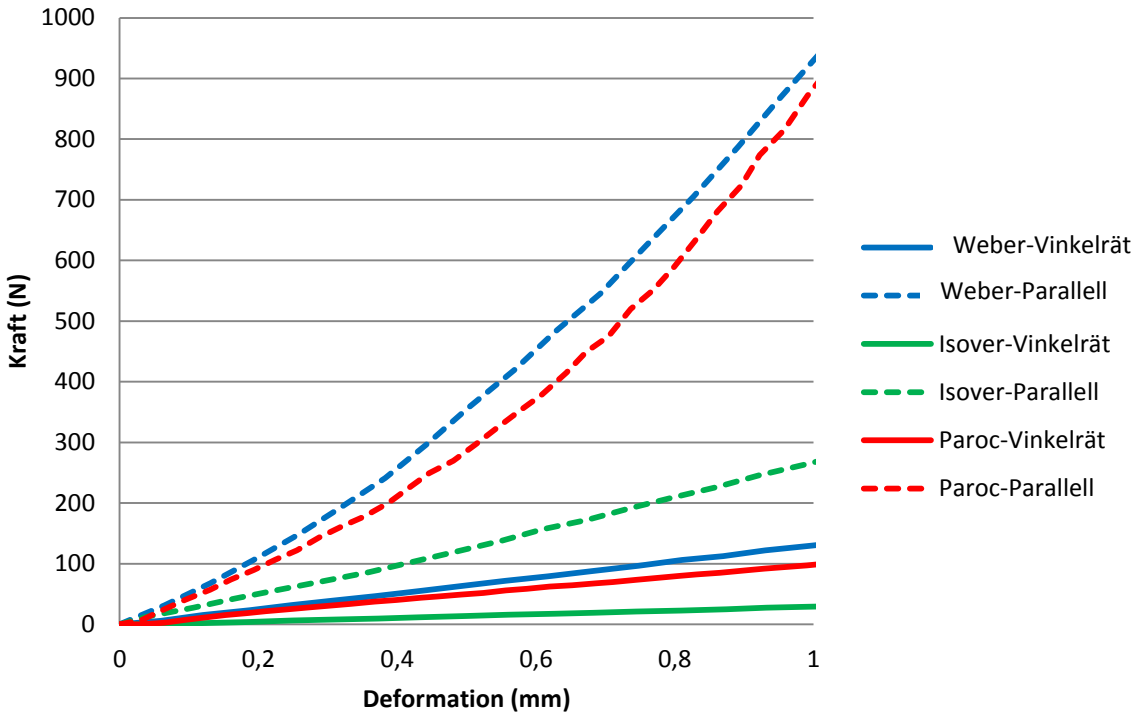
Elasticitetsmodulen beräknas enligt Ekvation 4.4.

$$E = 10^3 \frac{F_e}{A_0} \frac{d_0}{X_e} \text{ [kPa]} \qquad (4.4)$$

där
F_e= kraften (N) på den linjära delen av last-deformationskurvan
A_0= arean på provkroppen (mm^2)
d_0= initiell tjocklek på provkroppen (mm)
X_e= deformationen vid F_e (mm)



Figur 4.1.5 Arbetskurvor, vid tryckprov av mineralull, deformationsområde 0-9 mm.



Figur 4.1.6 Arbetskurvor, vid tryckprov av mineralull, deformationsområde 0-1 mm.

Utvärderingen av elasticitetsmodulen har skett i området 0-1 mm, och resultatet ses i Tabell 4.1.4. Störst styvhet parallellt med fiberriktningen har stenullsskivorna från Weber, följt av stenullskivor

från Paroc och glasullskivor från Isover. Styvheten på isoleringen från Weber är cirka 2 gånger större än Paroc och cirka 4 gånger större än Isover. Styvheten parallellt fiberriktningen (oavsett produkt) är cirka 6-8 gånger större än riktning vinkelrätt fibrerna.

Tabell 4.1.4 Resultat från utvärdering av elasticitetsmodulen för tre olika typer av mineralull.

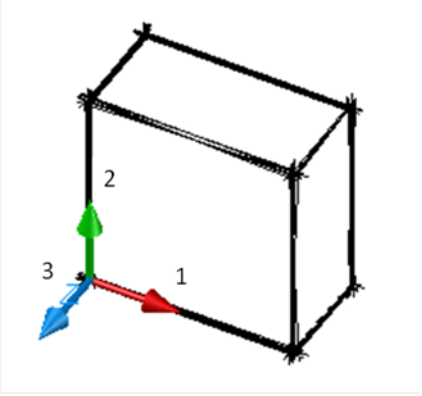
	E-modul [MPa] (vinkelrätt)	E-modul [MPa] (parallellt)
Paroc	0.176	1.157
Weber	0.338	2.025
Isover	0.069	0.576

4.1.5 Sammanställning av resultat från provningarna och indata för simuleringen

För att beräkna skjuvmodulen (G) antas tvärkontraktionstalet (ν) och skjuvmodulen beräknas enligt Ekvation 4.5:

$$G = \frac{\mathrm{E}}{2(1+\nu)}\ [\mathrm{MPa}] \qquad (4.5)$$

där
E=E-modulen (MPa)
ν=tvärkontraktionstalet



Figur 4.1.7. Materialriktningar 1 och 2 ligger i planet på isolering och putsen. 3 är vinkelrätt planet.

Tabell 4.1.5 Materialparametrar för mineralull och putsbruk, se Figur 4.1.7 för materialriktningar

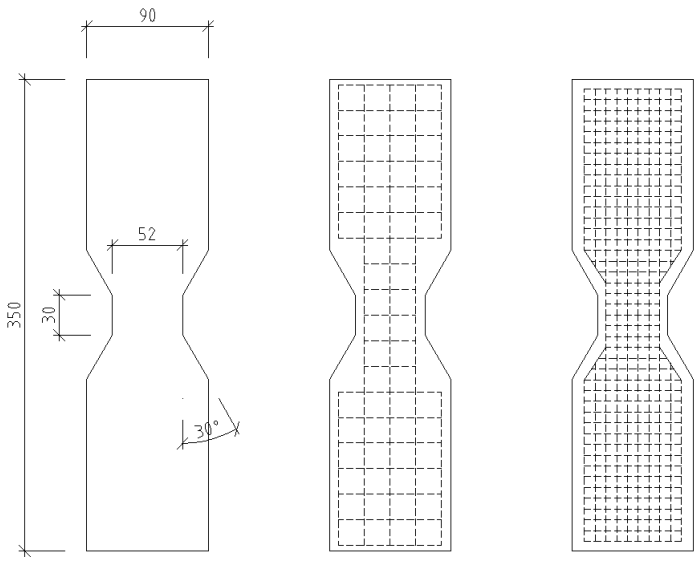
	Paroc	Weber	Isover	Therm 340
E_1	0,338 MPa	2,025 MPa	1,157 MPa	9480 MPa
E_2	2,025 MPa	2,025 MPa	1,157 MPa	9480 MPa
E_3	2,025 MPa	0,338 MPa	0,176 MPa	9480 MPa
ν_{12}	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_{13}	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_{23}	0,2	0,2	0,2	0,2
G_{12}	0,141 MPa	0,844 MPa	0,482 MPa	3950 MPa
G_{13}	0,844 MPa	0,141 MPa	0,073 MPa	3950 MPa
G_{23}	0,844 MPa	0,141 MPa	0,073 MPa	3950 MPa
α	-	-	-	6.93e-6

4.2 Bestämning av förmågan att fördela sprickor-systemuppbyggnad för optimal funktion

I detta avsnitt utförs ett antal test vilka visar på vilken inverkan armeringen har på putsens förmåga att motstå dragspänningar samt förmågan att fördela sprickor. När det gäller traditionell puts på isolering, dvs. cirka 20-25 mm KC-bruk, fungerar putsnätet om det är av stål dels som putsbärare och dels som armering för att undvika sprickor. I nyare system med tunnare putsskikt och putsnät av glasfiber fungerar isoleringen som putsbärare och glasfibernätet som armering.

4.2.1 Material och provkroppar

Testen utfördes på provkroppar med måtten 400x90x16 mm, med en avsmalning med bredden 52 mm, enligt Figur 4.2.1. Putsbruket som användes var ett underlagsbruk från Weber med beteckningen Therm 340. I de fall då provkropparna var armerade användes ett rutnät av ståltråd med diameter 1 mm och maskvidden 19 mm alternativt ett glasfibernät med maskvidden 6 mm, se Figur 4.2.1. Armeringen kommer från Webers putssystem där stålnätet har beteckningen Weber 323-nät och glasfibernätet Therm 397 EF-nät. I detta test finns tre olika konfigurationer enligt Tabell 4.2.1, oarmerad puts, puts med centriskt placerad armering samt dubbelarmerad puts med stålnät alternativt glasfibernät. Provkropparna har härdats och klimatiserats i 22 ^{o}C och 50 % RF i två månader före provningen.



Figur 4.2.1 Provkroppens geometri och armeringskonfiguration (stålnät-mitten, glasfibernät-höger)

Enligt Tabell 4.2.1 utfördes totalt 40 försök, 8 av dessa var oarmerade och övriga armerade med antingen stål eller glasfibernät i ett eller två lager. Provningen utfördes i en MTS-maskin där kraft och deformation registrerades. Deformationen uppmättes dels med en extern LVDT-givare (mätlängden 30 mm) i det avsmalnande partiet och dels över hela systemet. Knutpunkten mellan provkropp och MTS utformades med hjälp av en aluminiumprofil med godstjockleken 2 mm, vilken klistrades fast mot putsytan med epoxilim, enl. Figur 4.2.2.

Tabell 4.2.1 Försöksschema: armeringskonfiguration och antal test

Provkropp	Antal (st)
Oarmerad	8
Enkelarmerad (stålnät)	8
Enkelarmerad (glasfibernät)	8
Dubbelarmerad (stålnät)	8
Dubbelarmerad (glasfibernät)	8

Figur 4.2.2 Provkroppen med knutpunkt

4.2.2 Resultat från provningen

De undersökta provkropparna uppvisade stor skillnad gällande brottlast och förmågan att fördela sprickor, se Figur 4.2.4-9. När det gäller de oarmerade och enkelarmerade provkropparna, sker alltid brottet vid avsmalningen. För de oarmerade provkropparna är brottet sprött (töjningen är i storleksordningen 0.3 mm/m) och kraften för att skapa den första sprickan i provkropparna med oarmerad puts är större än för provkropparna med armering. Förklaringen finns i armeringens inverkan på brukets homogenitet - störst inverkan erhålls då armeringen är av glasfiber. Likaså påverkas styvheten, där högst styvhet uppnås då provkroppen är oarmerad och lägst då provkroppen är armerad med glasfiber. Efter första sprickan börjar armeringen att ”arbeta” med lägre styvhet som följd.

Det finns stora skillnader i förmågan att fördela sprickor beroende på armeringens mängd och placering. I fallet med enkelarmering är den sprickfördelande förmågan begränsad, i huvudsak på grund av den begränsade armeringsmängden men även armeringens placering förhållandevis långt från putsens ytor. När armeringsmängden dubbleras förändras egenskaperna och möjligheten av sprickfördela. I Figur 4.2.3 visas typiskt sprickmönster för provkropparna där första sprickan alltid uppstår i avsmalningen. Övriga sprickor bildas sedan växelvis på ömse sidor av avsmalningen enligt numreringen. Det var inte möjligt att urskilja den typen av mönster när armering utförs med glasfibernät. I avsnitt 5 utförs motsvarande test med resultaten att ett regelbundet sprickmönster uppträder. Detta är motsägelsefullt men kan förklaras med att bruket inte är av samma typ för de olika proven.

Om man jämför antalet sprickor som utvecklas är det möjligt att konstatera att sprickvidden grovt uppskattat är uppemot 10 gånger mindre då provkroppen är dubbelarmerad jämfört med enkelarmerad (gäller vid armering med stålnät). Genom att betrakta Figur 4.2.4 och 4.2.6 är det möjligt att göra följande slutsats: Ett ungefärligt värde på avståndet mellan sprickorna för de provkroppar som är dubbelarmerade med stålnät är 20 mm, vilket motsvarar rutmönstret på armeringsnätet. En uppskattning av sprickvidden vid maximal belastning, enligt försöken, är 0.04mm.

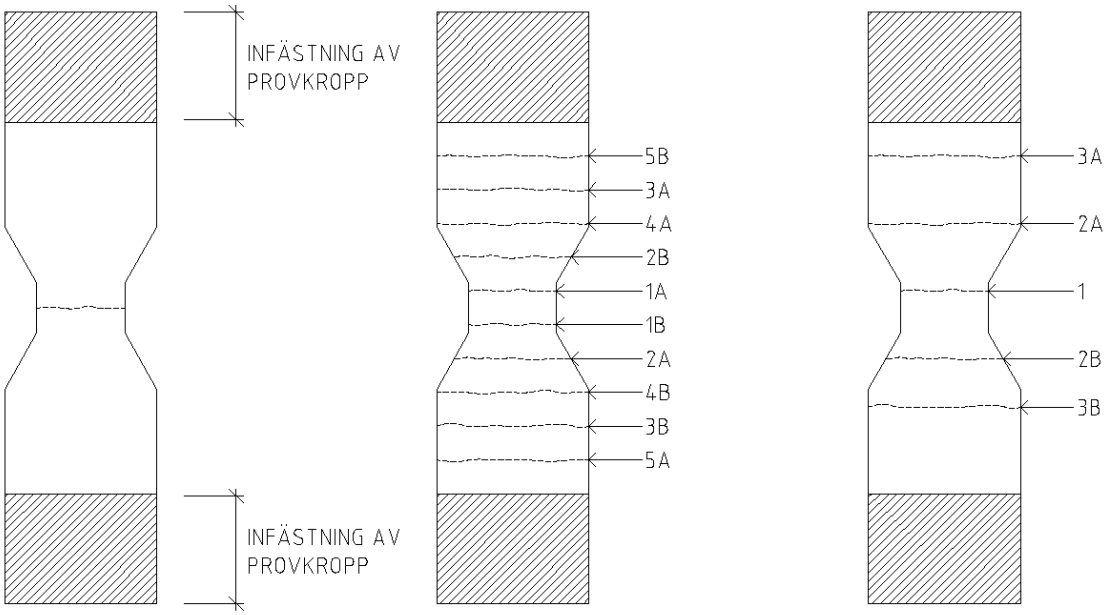
Motsvarande siffra är 5 st om provkroppen är armerad med glasfibernät och en grov uppskattning gällande avståndet mellan sprickorna är 40 mm, vilket leder till en sprickvidd på 0.3 mm vid maximal belastning.

Brottlasten är cirka dubbelt så stort för de dubbelarmerade provkropparna jämfört med de enkelarmerade p.g.a. dubblerad armeringsmängd. Medelvärdet för brottspänningen för de oarmerade provkropparna är 0.96 MPa. Medelvärdet för motsvarande brottöjning är 0.28 mm/m.

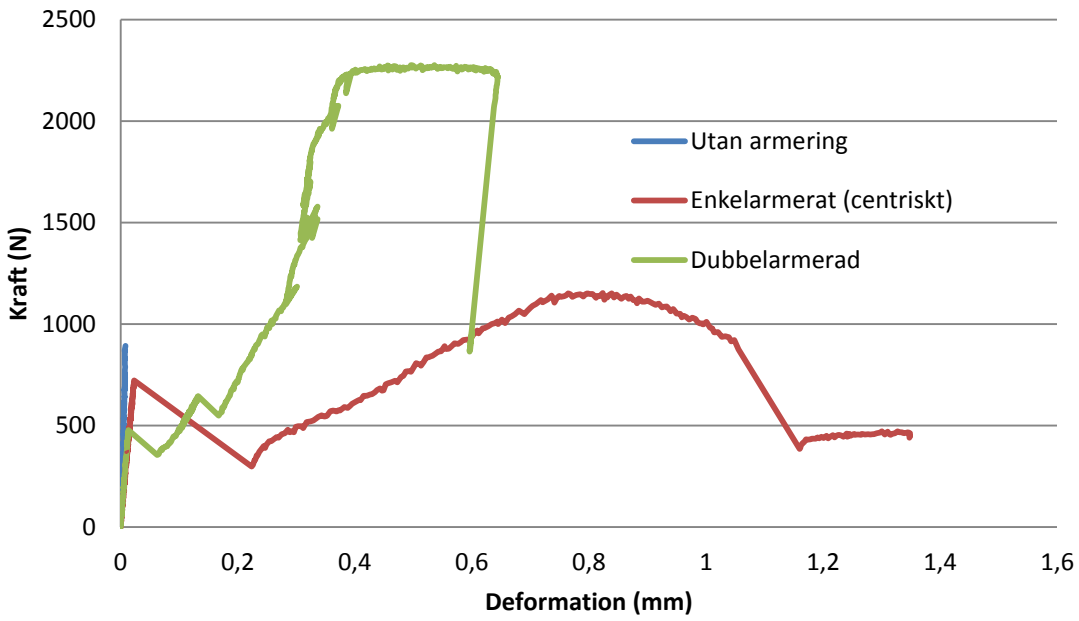
Maximal brottspänning utvärderades endast för de oarmerade provkropparna enligt Ekvation 4.6

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{bt} \left(\mathrm{N/mm^2}\right) \qquad (4.6)$$

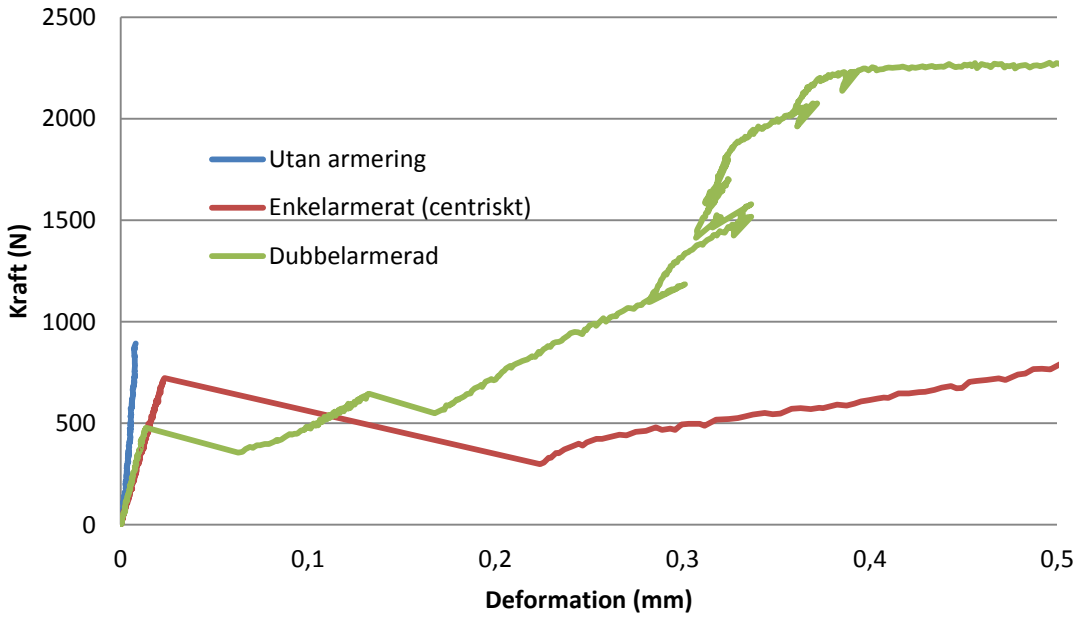
där
F_{max}=maximal last (N)
b= bredd (mm)
t=tjocklek (mm)



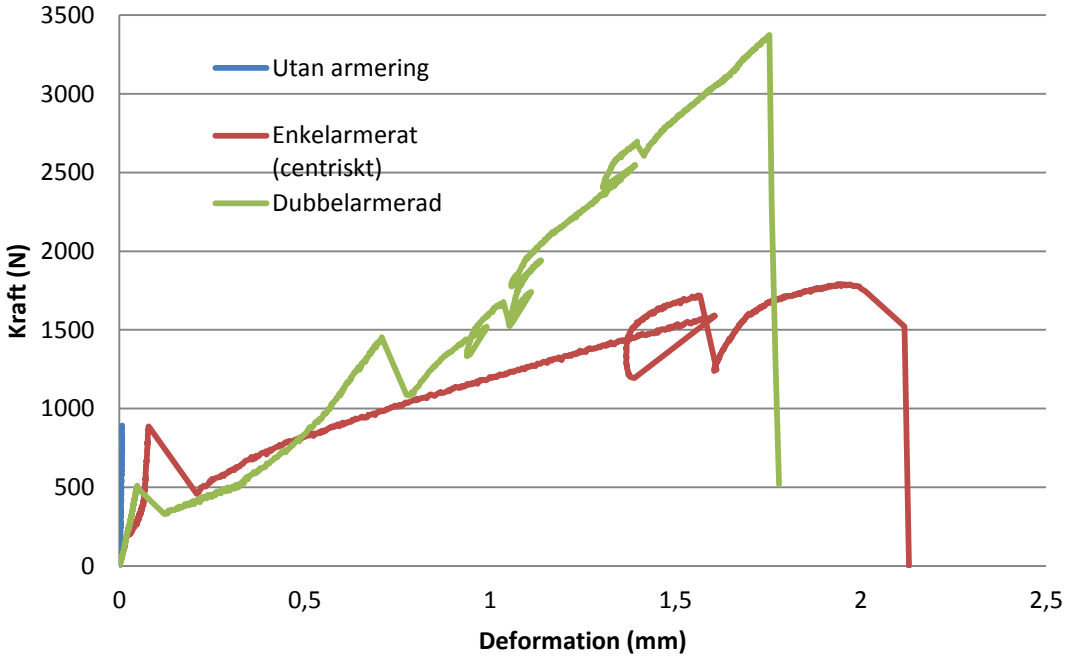
Figur 4.2.3 Typiskt sprickmönster: oarmerat och enkelarmerat med stål alt. glasfibernät (vänster), dubbelarmerat med stålnät (mitten), dubbelarmerat med glasfibernät (höger)



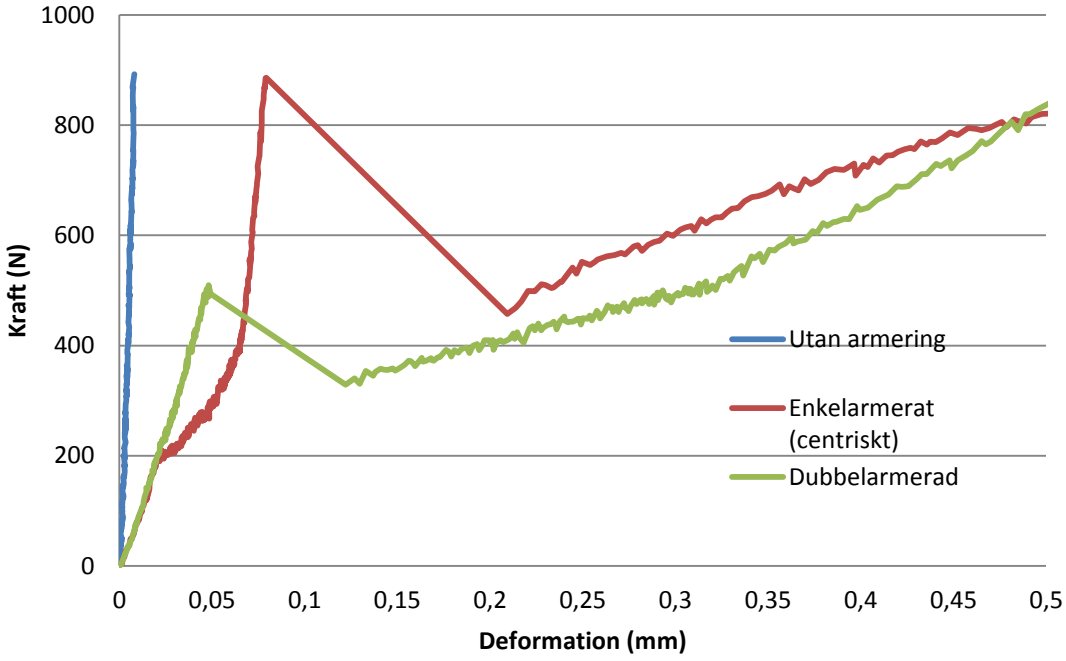
Figur 4.2.4 Typiska arbetskurvor för provkroppar med olika armeringsinnehåll (stålnät), mätområde 0-1.6 mm



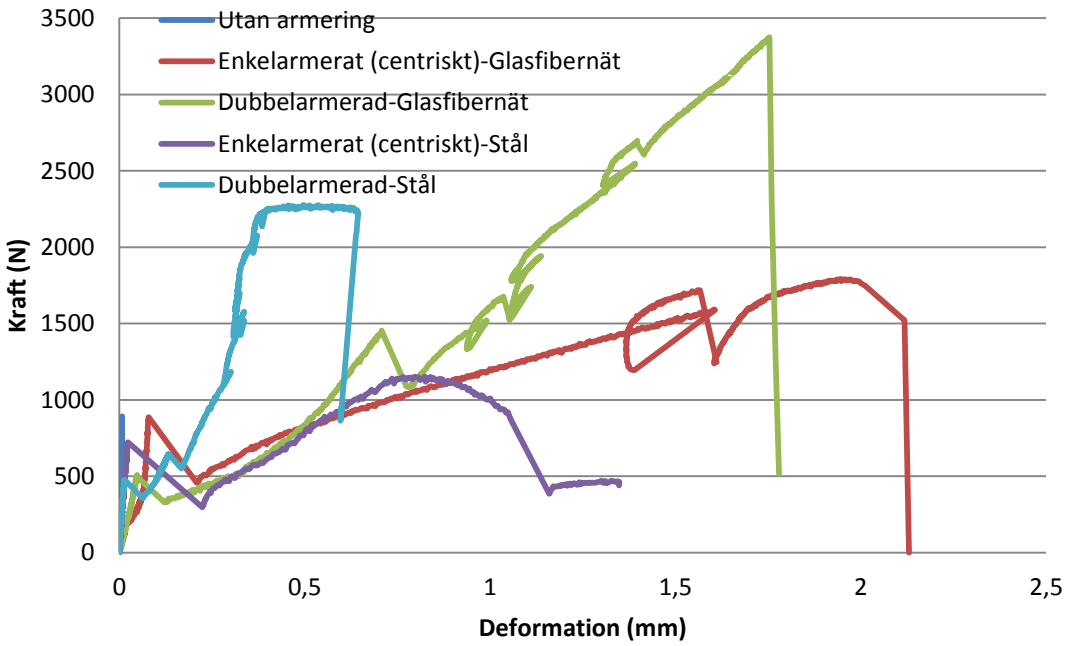
Figur 4.4.5 Typiska arbetskurvor för provkroppar med olika armeringsinnehåll (stålnät), mätområde 0-0.5 mm



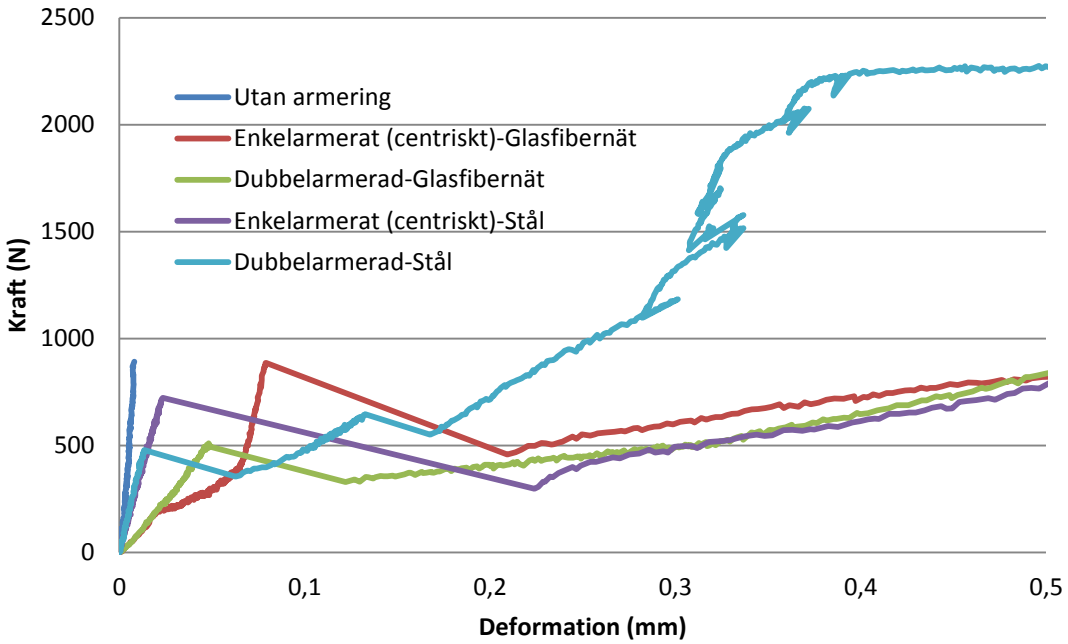
Figur 4.2.6 Typiska arbetskurvor för provkroppar med olika armeringsinnehåll (glasfibernät), mätområde 0-2.5 mm



Figur 4.2.7 Typiska arbetskurvor för provkroppar med olika armeringsinnehåll (glasfibernät), mätområde 0-0.5 mm



Figur 4.4.8 Jämförelse mellan resultat, enkel- och dubbelarmerade med stålnät och glasfibernät, mätområde 0-2.5 mm



Figur 4.4.9 Jämförelse mellan resultat, enkel- och dubbelarmerade med stålnät och glasfibernät, mätområde 0-0.5 mm

4.2.3 Lärdomar och slutsatser från provningen

Enligt försök är det inte möjligt att med ett lager nätarmering, oavsett om det är stål eller glasfiber erhålla en sprickfördelande struktur när denna utsätts för dragspänningar. Bäst sprickfördelande effekt uppnås då nätarmering appliceras i två lager nära putsens ytor. Störst sprickfördelande effekt uppnåddes för de provkroppar där stålnät användes. Försöken visar också att putsens styvhet minskar då armering används, vilket är positivt ur sprickfördelningssynpunkt.

4.3 Simulering av mekaniskt beteende hos puts på isolering

I detta avsnitt påvisas effekterna av hur olika materialegenskaper, materialtjocklek, avvikelser från putsens teoretiska uppbyggnad och geometri, påverkar spänningsbilden i putsade fasader. Vanligt förekommande avvikelser är variationer i putsens tjocklek eller armeringens placering. Programmet som har använts är ett kommersiellt FEM-program, Brigade. Simuleringarna är linjärelastiska och materialen likaså. Alla simuleringar är utförda i tre dimensioner och modellerna skapade i Autodesks program AutoCad.

Materialegenskaperna som används i simuleringarna är redovisas i kapitel 4.1 och Tabell 4.1.5. Modellerna är uppbyggda av två olika volymer med materialen isolering och puts. Armeringsnätet av stål med maskvidden 19x19 mm och tråddiametern 1 mm används i vissa fall och modelleras som en yta inbäddad i putsskiktet. Lasten som används i simuleringarna är antingen en positiv eller negativ temperaturförändring på 40^{o}C, vilket leder till en expansion alternativt en kontraktion. Gränsskiktet mellan puts och isolering antas vara sådan att fullständig samverkan mellan materialen uppstår, vilket även är verifierat med praktiska försök. Resultaten ska inte tolkas som de spänningar som uppstår i verkligheten, utan tolkas kvalitativt och bidra till en ökad förståelse för hur olika faktorer påverkar spänningsmönstret i putsen.

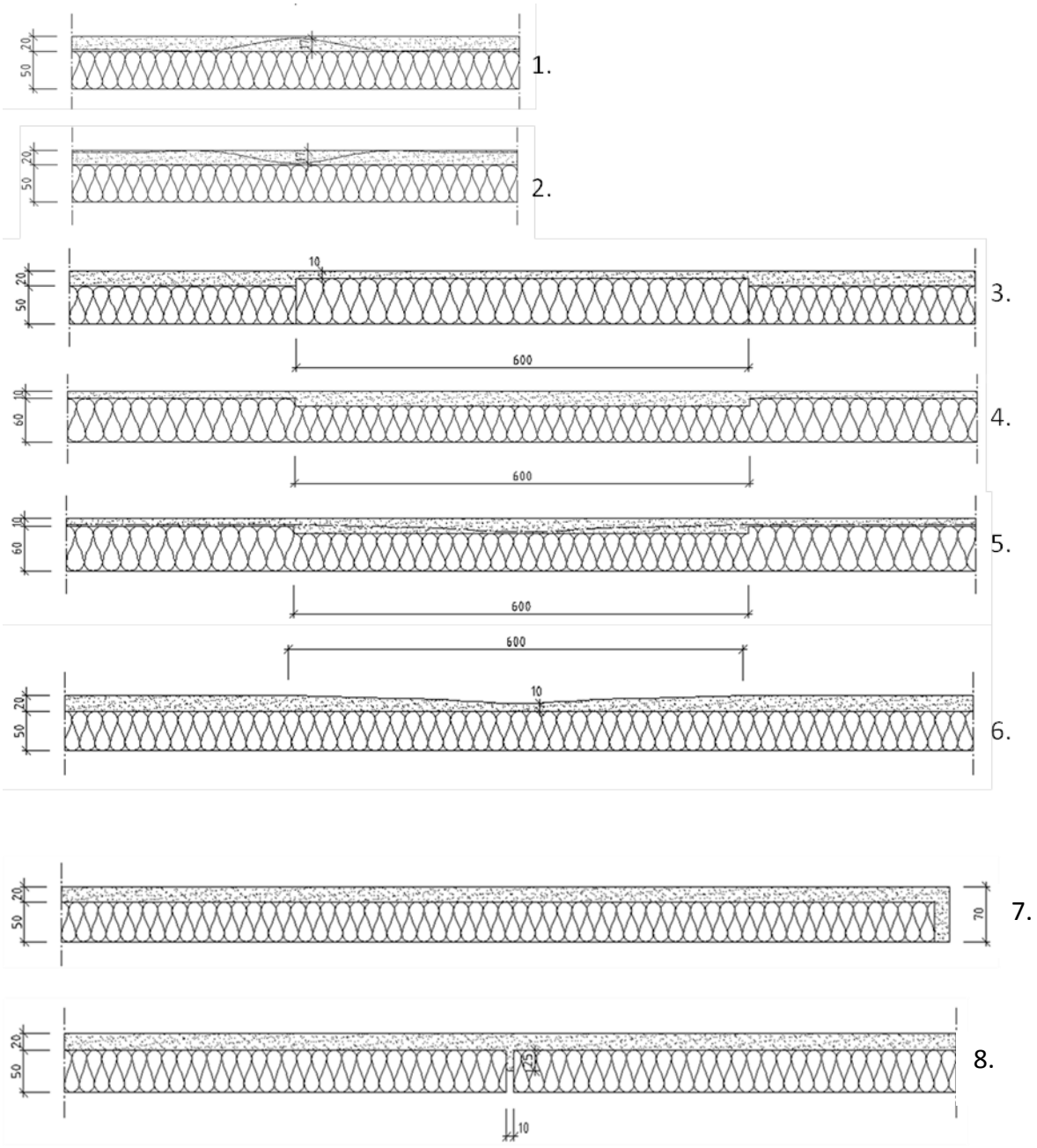
Simuleringarna är uppdelade i två kategorier, där de första hanterar effekten av specifika parametrar. I den andra delen simuleras beteendet hos en fasad i en respektive två plan.

4.3.1 Resultat- simuleringar med specifika parametrar

Geometriförändringar i putsen orsakade av varierande putstjocklek, eller av att isoleringen inte ligger i samma plan, leder till spänningskoncentrationer/variationer, Figur 4.3.1 (bild 3-6). De farligaste fallen uppstår vid skarpa övergångar från tjockare till tunnare puts, där dragspänningarna ökar med upp till 3 gånger. Lokala förändringar i nätarmeringens läge (Figur 4.3.1, bild 1-2) eller glipor mellan isolerskivorna som fylls med putsbruk (Figur 4.3.1 bild 8) har begränsad inverkan på spänningsbilden.

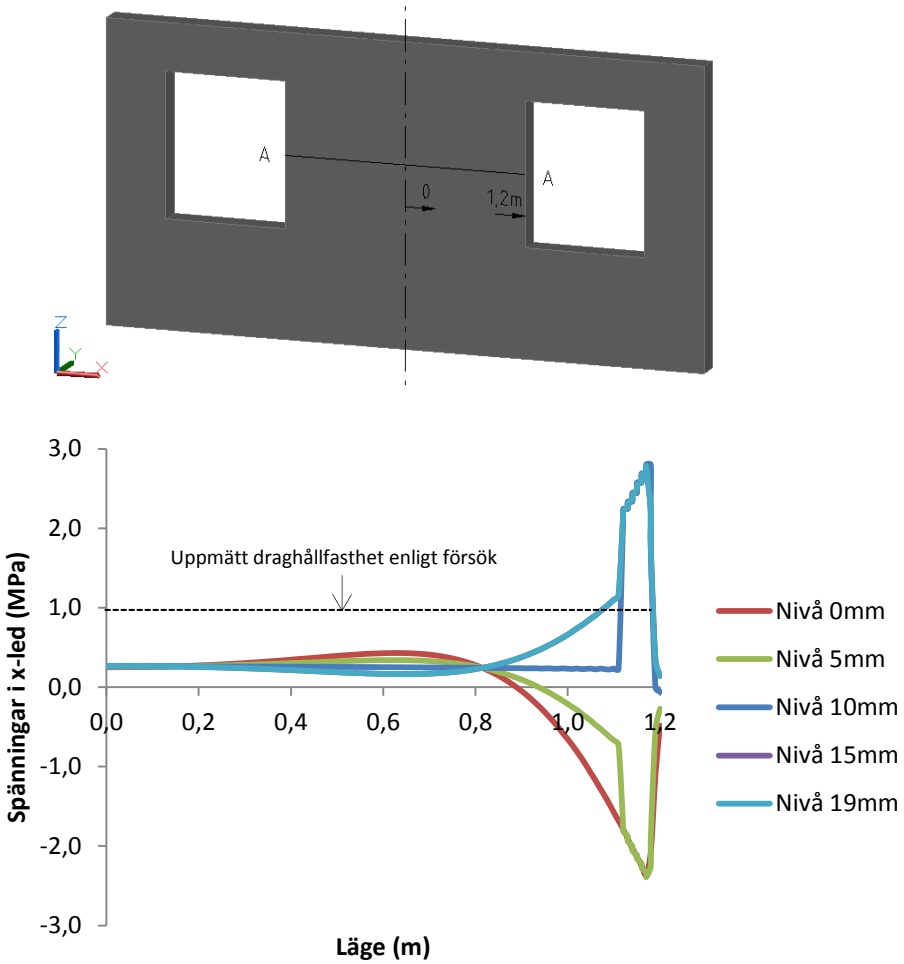
I det fall där putsen putsas runt hörnet, antingen i fönster/dörr-smyg (Figur 4.3.1 bild 7) eller angränsande fasad, uppstår en böjande effekt i putsen dvs. rörelser ut ur putsplanet. Enligt figur 4.3.2, vilken ska tolkas som partiet mellan två öppningar i en fasad, är det den närmaste biten (0,4 m) mot smygen som påverkas av den böjande effekten.

Beroende på om putsen påverkas av en negativ eller positiv temperaturskillnad blir det drag eller-tryckspänningar på ytan respektive i gränsskiktet mot putsen. I smygar sker en vinkeländring p.g.a. de mothållande krafter som uppstår mot ändarna på isoleringen, antingen som tryckkrafter eller dragkrafter. Spänningarnas storlek ökar, upp till en gräns, med ökande längd mellan öppningarna.



Figur 4.3.1 Bild 1 och 2 lokal avvikelse av armeringens läge. 3 och 4, putsens tjocklek avviker p.g.a. förskjutning av isolering. 5 samma som 4 dock med armeringsnät. 6, putsens tjocklek avviker p.g.a. lokal svacka i putsen. 7, putssmyg vid öppning. 8, glipa mellan isolering.

Simulering med olika isoleringsprodukter visar att ju styvare (hårdare) isoleringen är, desto större blir spänningarna i putsen.



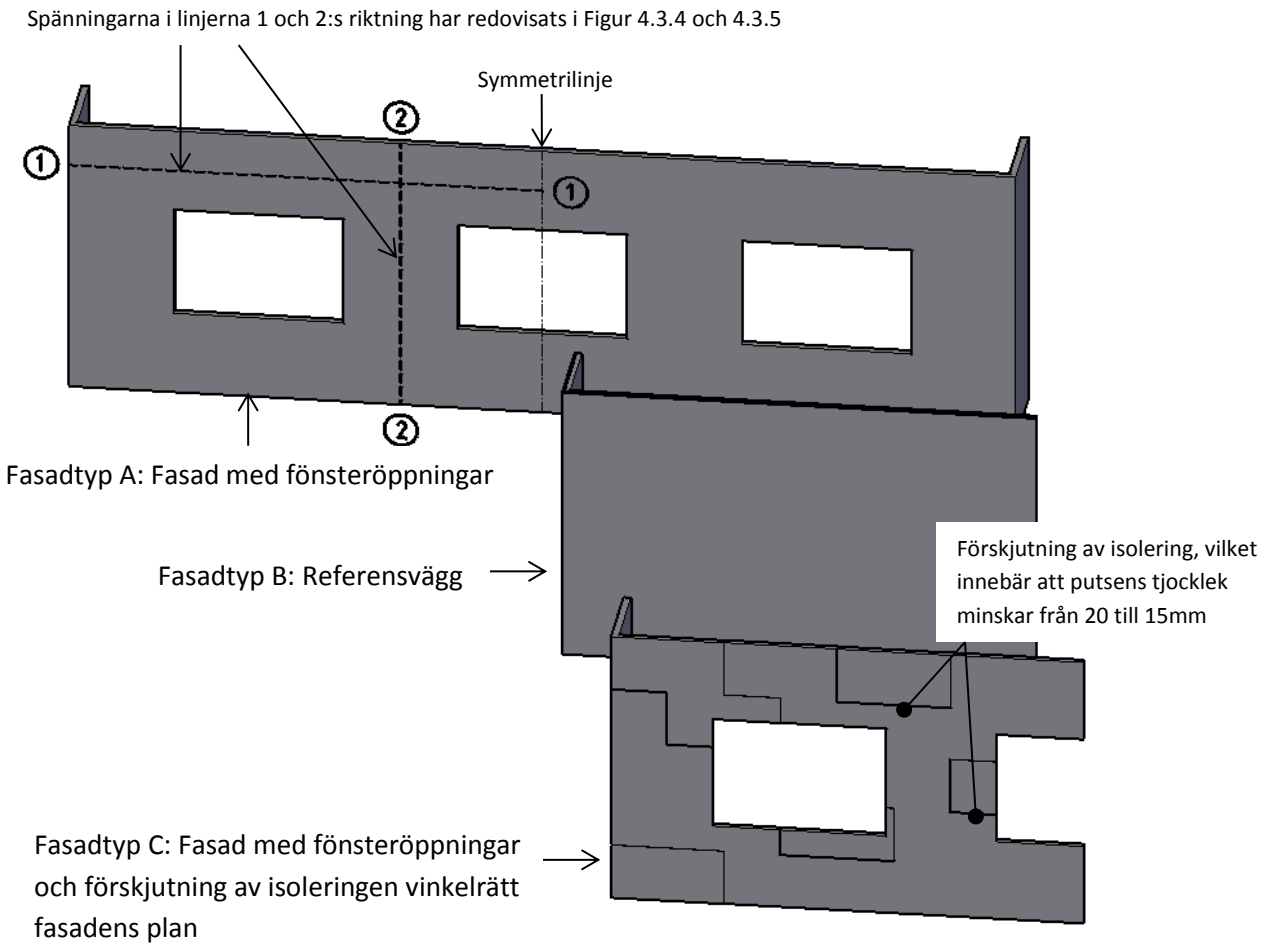
Figur 4.3.2 Spänningar putsen (i linjen A-A, översta bilden) i på olika djup, total tjocklek på putsen är 20 mm. Lasten är en temperaturminskning på 40°C, vilket får putsen att kontrahera.

4.3.2 Simuleringar av fasad i ett och två plan

I Figur 4.3.3 och 4.3.6 visas de modeller som användes när spänningar i putsen simulerades på en fasad i ett och två plan. I modellen har även angränsande väggar och smygar vid öppningarna tagits med. Tjockleken på putsen är 20 mm och isoleringen 50 mm. För att minska storleken på beräkningsfilen har symmetrilinje/er införts så att endast halva eller en fjärdedel av fasaden simuleras.

Olika fasadtyper har simulerats för att se inverkan av öppningar i fasaden samt tjockleksförändringar i putsen, fasadtyp A och C. Tjockleksförändringen i putsen från 20 till 15 mm skapas genom att vissa isoleringsskivor har förskjutits vinkelrätt fasadens plan. För att göra en jämförelse simuleras också fasadtyp B, fri från öppningar och tjockleksförändringar.

Resultaten från beräkningarna redovisas i linjerna 1 och 2.



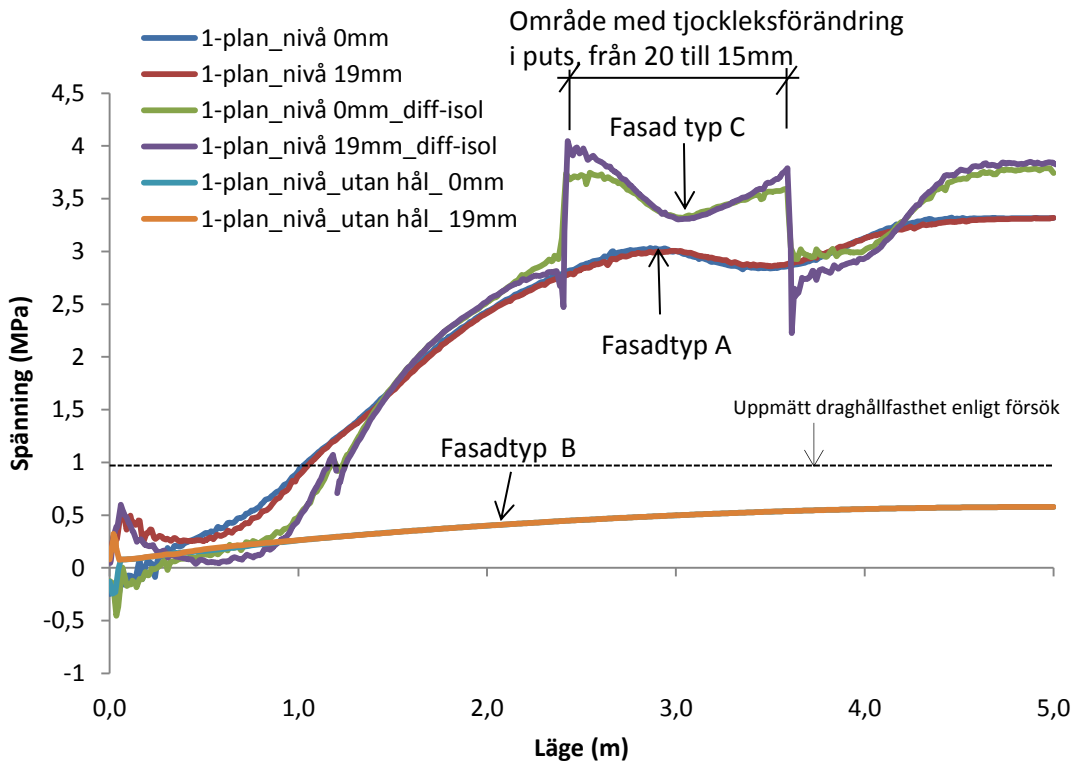
Figur 4.3.3 Fasadtyperna A, B och C, i ett plan, vilka simuleras

4.3.3 Resultat

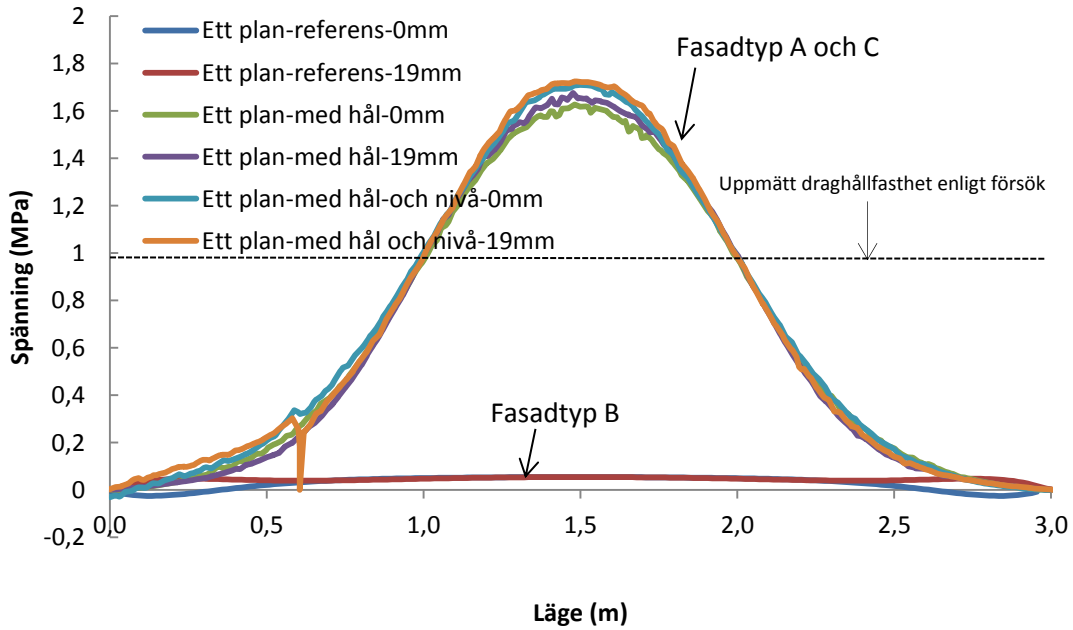
Fasad i ett plan

I Figur 4.3.4 visas resultaten från beräkningarna i linje 1-1. Riktningen på spänningarna som utvärderas är samma riktning som linjens utbredning. Spänningarna utvärderas dels i ytan (nivå 0mm) och i gränsskiktet mellan puts och isolering (nivå 19 mm). Det som kan observeras är att både drag- och tryckspänningar uppstår, där angränsande vägg möter framsidan. Storleksmässigt är spänningarna i samma storleksordning, oavsett om väggarna innehåller öppningar eller inte.

Jämförelse mellan fasadtyp A (med öppning) och fasadtyp B (referens) visar att spänningarna längre bort från smygen kan öka med upp till 6 gånger. Inverkan av tjockleksförändringar är tydlig och avspeglar sig som spänningskoncentrationer i övergången mellan de olika putstjocklekarna. I detta fall ökar spänningarna som mest med cirka 30 %, då tjockleken plötsligt minskar från 20 till 15 mm. Resultaten stödjs av försök, se Figur 4.3.8, där putsen tjocklek ändras från 10 till 20 mm. Provkroppen är 1200x600 mm, med tjockleksförändringen placerad i mitten på den långa sidan. Ett antal dagar efter putsning uppstår en längsgående spricka, vilken endast initierats av vattenavgången vid härdning. Geometriförändringar är att betrakta som inbyggda dilatationsfogar med stor sannolikhet för sprickbildning.



Figur 4.3.4 Spänningarna längs linje 1-1 för de olika fasadtyperna A, B och C i ett plan. Läge 0 m är vid angränsande vägg, läge 5 m vid symmetrilinje

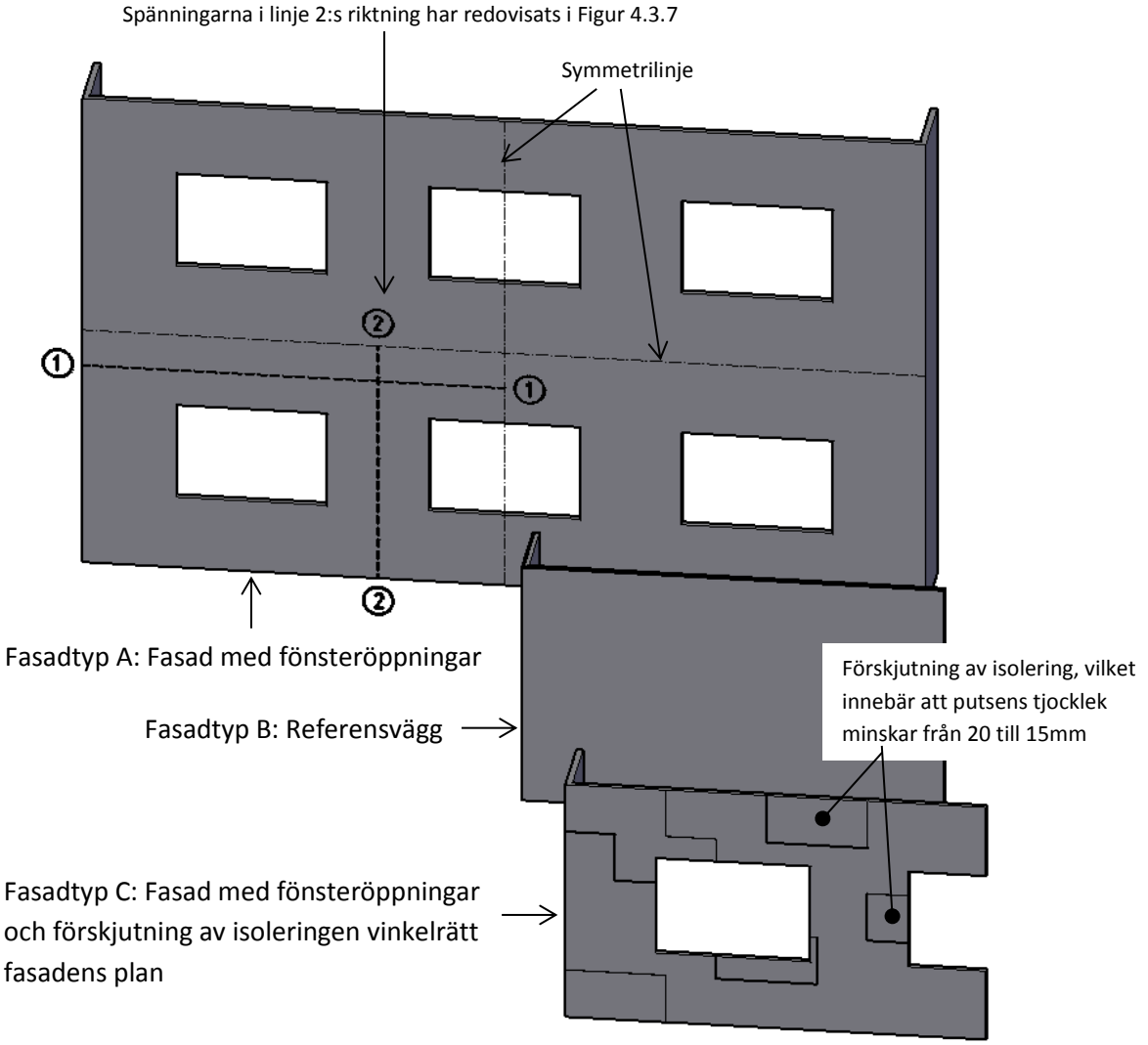


Figur 4.3.5 Spänningar längs linje 2-2 för de olika fasadtyperna A, B och C i ett plan. Läge 0 m är vid ovankant fasad, läge 3 m vid underkant fasad

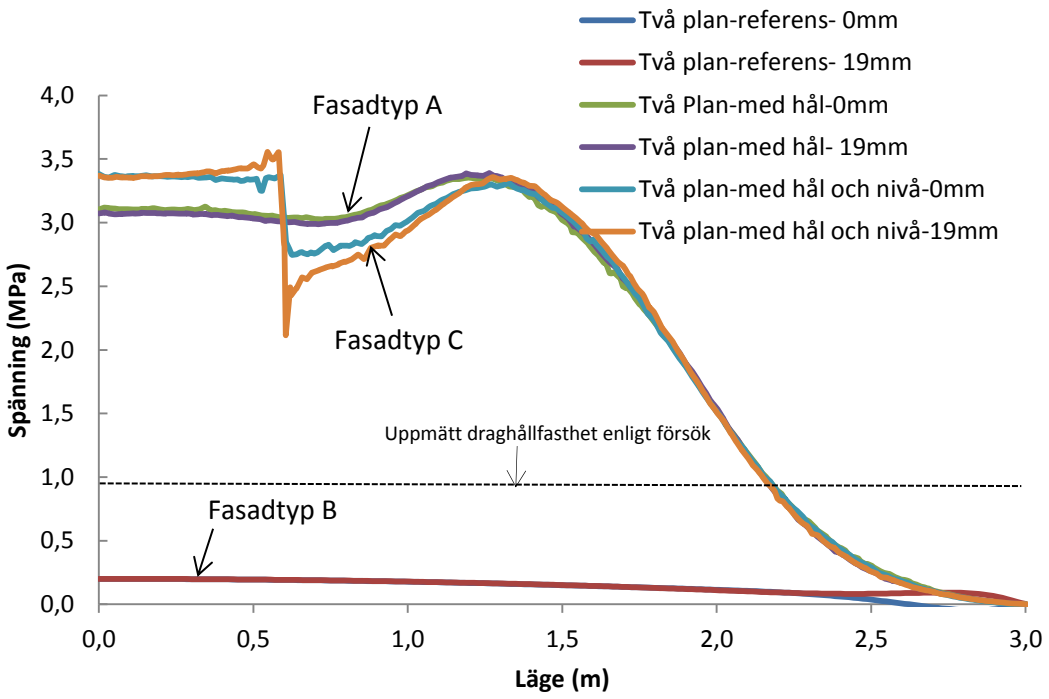
Figur 4.3.5 visar spänningarna i linje 2-2. Maximal spänning är cirka hälften så stora jämfört med spänningarna längs linje 1-1. Jämförelse mellan fasadtyp A (med öppning) och fasadtyp B (referens) visar att spänningarna ökar med cirka 30 ggr, detta p.g.a. att det putsade tvärsnittet minskar då fasaden förses med fönsteröppningar. Inverkan av tjockleksförändringarna enligt fasadtyp C är mindre än vid linje 1-1 och påverkar inte ytan, dock i underkant, vilket i läget 0.6 m visar sig genom att en lokal spänningskoncentration uppstår.

Fasad i två plan

Från simuleringen med två identiska våningsplan visas endast resultaten från linje 2-2, eftersom spänningarna i linje 1-1 i princip är identiska med resultaten från simuleringen med ett plan. Vid jämförelse mellan fasadtyp A i ett och två plan, blir spänningarna i linje 2-2 cirka dubbelt så stora jämfört med om fasaden är i ett plan.
Påverkan av tjockleksförändringen i fasadtyp C är i princip samma som linje 1-1 i Figur 4.3.5 dvs. spänningarna ökar med cirka 30 %, då tjockleken minskar från 20 till 15 mm.



Figur 4.3.6 Fasadtyperna A, B och C, i två plan, vilka simuleras



Figur 4.3.7 Spänningar längs linje 2-2, två plan. Läge 0m är vid symmetrilinje, läge 3 m vid underkant fasad.

4.3.4 Slutsatser från simuleringarna

Simuleringarna visar att storleken på spänningarna påverkas i stor omfattning då fasaden förses med fönsteröppningar. Simuleringarna visar även att det är viktigt att ha jämntjock puts, plötsliga förändringar i putsen är att betrakta som dilatationsfogar, se Figur 4.3.8. I områden med tunnare putstjocklek ökar spänningarna, vilket ökar sannolikheten för sprickbildning. Andra områden som bör uppmärksammas är runt hörn vid angränsande vägg eller vid fönster/dörrsmyg. I dessa områden utvecklas böjdragspänningar p.g.a. mothållande krafter. Simuleringarna visar också att spänningarna ökar med ökande styvhet på isoleringen.

Figur 4.3.8 Spricka i oarmerad puts orsakad av geometriförändring

4.4 Vatteninträngning genom sprickor i putsen - vart tar vattnet vägen?

I detta avsnitt utförs ett antal tester för att öka förståelsen för vad som händer när en spricka i putsen utsätts för hydrostatiskt vattentryck. Frågor som besvaras av testen är: kan vatten transporteras in i isoleringen? Hur påverkar horisontella och vertikala isolerskarvar vattenledningen? Kan vatten transporteras i gränsskiktet mellan puts och isolering? Vad händer om vatten når isolerhållarna? Kan vatten nå bakomliggande stomme?

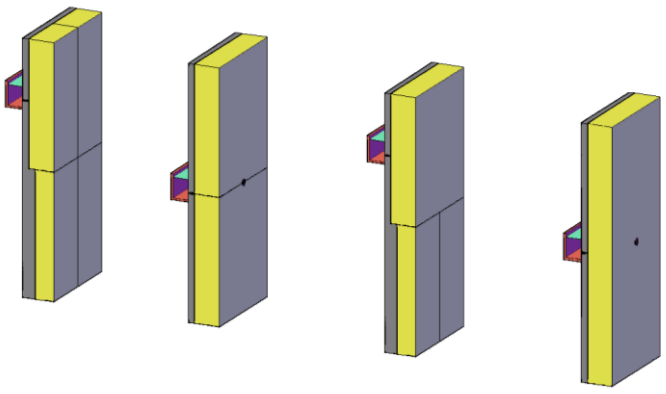
Totalt har fyra olika typer av test utförts för att undersöka vilka de grundläggande egenskaperna och vilka fenomen som uppstår. För att komplettera dessa grundläggande tester utfördes ytterligare en testserie där inverkan av sprickans bredd på vattenflödet studerades. Sist presenteras en modifierad version av standarden E 2273-03 ”Determining the Drainage Efficiency of Exterior Insulation and Finish Systems (EIFS) Clad Wall Assemblies”, vilken beskriver en metod för att testa dräneringsförmågan på fasadsystem med puts på isolering.

4.4.1 Provkropp och försöksuppställning - grundläggande egenskaper

Materialen som använts för provkropparna är:
Putsbruk: Therm 340, underlagsbruk
Isolering: Paroc Fas 2, t=50 mm, stenull
Isolerhållare: Therm 312 TB-fäste samt Ejot IDK-T

Provkropparna är 200 mm breda och 500 mm höga. Putsen läggs på isolering och får härda cirka 3 veckor innan testen utförs. Sprickan i putsen har en ”naturlig” form men har framställts genom att böja provkroppen till brott. Försvagningar har gjutits in i sidorna på provkropparna alternativt en geometriförändring i putsen och isoleringen, för att få sprickan på rätt placering. I de fall som en geometriförändring har utförts har tjockleken på isoleringen minskats från 50 till 38 mm, vilket innebär att tjockleken på putsen ökar från 13 till 25 mm. Vid sprickan limmas en behållare av plast fast för att möjliggöra vattenpåfyllning. Vattentrycket ovanför sprickan varierar mellan 15-50 mm (150-500 Pa) beroende på sprickans form. Sprickans bredd varierar mellan 0.1-1 mm.

Fyra olika varianter av provkroppar har testats, enligt Figur 4.4.1.



Figur 4.4.1 Från vänster till höger, Test 1, 2, 3 och 4

Test 1

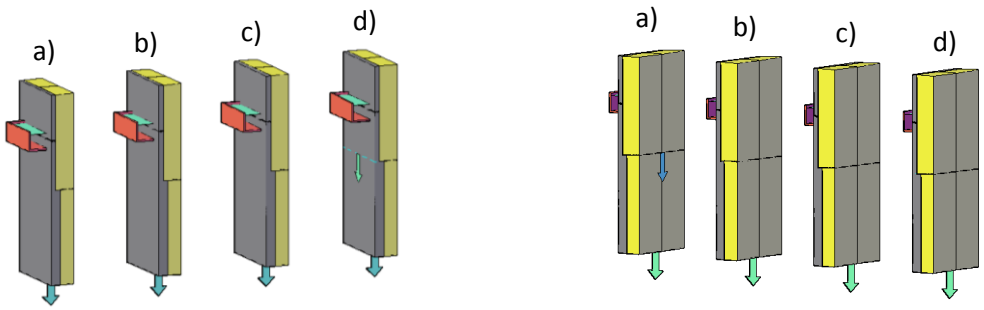
Sprickan i putsen är belägen cirka 120 mm ovanför geometriförändringen och isoleringen består av fyra skivor. Fyra provkroppar.

Test 2
Sprickan i putsen sammanfaller med horisontell isoleringsskarv och isolerfäste. Två olika isolerfästen är testade. Fyra provkroppar med isolerfästen från Weber och fyra från Ejot.

Test 3
Sprickan i putsen är belägen cirka 120 mm ovanför geometriförändringen och isoleringen består av tre skivor. Fyra provkroppar.

Test 4
Sprickan i putsen sammanfaller med isolerfästet. Två olika typer av isolerfäste är testade. Två från Weber och två från Ejot. Ingen isoleringsskarv.

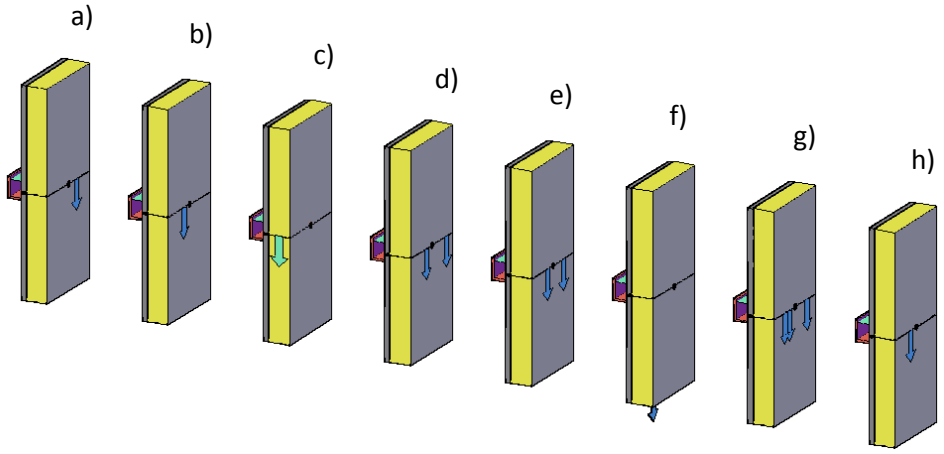
4.4.2 Resultat- grundläggande egenskaper
Test 1:
Vattnet transporteras i vertikal isoleringsskarv från sprickan i putsen till botten på provkroppen enligt Figur 4.4.2. I ett av fallen, 1a, leds vattnet även från vertikal isoleringsskarv till horisontell skarv och droppar på baksidan av isoleringen. I 1d har en oavsiktlig spricka bildats i putsen vilket medför att vattnet letar sig ut till ytan på putsen och vätar denna under sprickan.



Figur 4.4.2. Resultat från Test 1. Vänster bild betraktad framifrån, höger bild betraktad bakifrån.

Test 2
Sprickan i putsen och den horisontella skarven i isoleringen befinner sig i samma läge, vilket medför att vattnet med lätthet rinner ut på baksidan av isoleringen, se Figur 4.4.3.

Mängden vatten som rinner ut är beroende av hur hårt isolerskivorna är pressade mot varandra. Som exempel är det stor skillnad på flödet i provkropp 2f och 2g. Vad gäller 2f var isolerskivorna så hårt pressade att det var lättare för vattnet att transporteras mellan putsen och isoleringen med droppar som följd, i underkant provkropp. På provkropp 2g finns en cirka 0.5 mm bred glipa mellan isoleringen, vilket medför att vattnet rinner ut i tunna strålar på baksidan av isoleringen. I en av provkroppen 2c, rann vattnet ut på sidan av isoleringen. Detta orsakades av att provkroppen vid testet lutade åt ett håll.

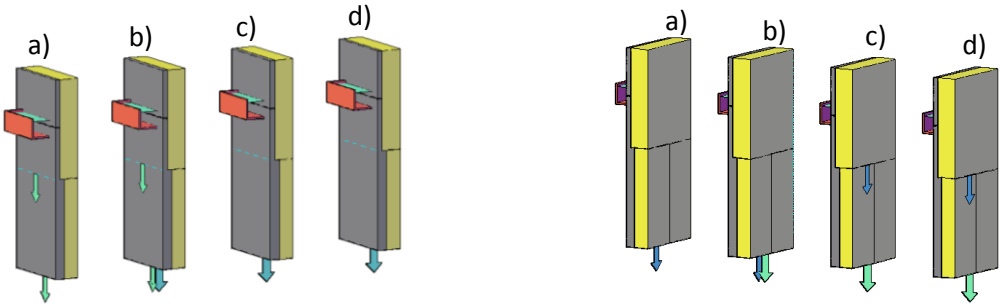


Figur 4.4.3. Resultat från Test 2. Betraktad bakifrån. Pilar indikerar lägen för vattenläckage.

Test 3

I tre av fallen 3b, c och d transporterades vattnet mellan puts och isolering till den vertikala isolerskarven och ut i botten på provkroppen, enligt Figur 4.4.4. Provkropp 3a skiljer sig från de övriga, då vattnet endast transporterades genom gränsskiktet puts och isolering och p.g.a. en oavsiktlig spricka i putsen även ledde ut vattnet till ytan av denna. Det sistnämnda gäller även 3b.

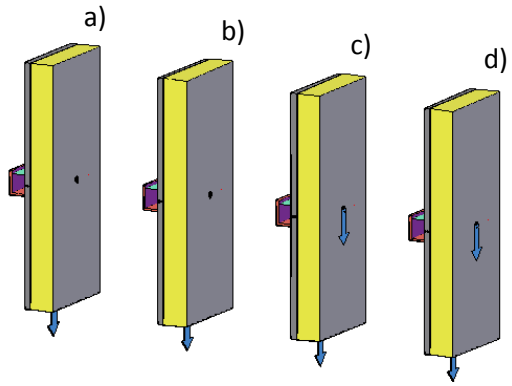
Den stora skillnaden som kunde registreras är mellan grupperna 3a,b och 3c,d , och det gäller både respons och mängden vatten som rinner ut på baksidan och under provkroppen. För gruppen 3a,b tar det c:a. ½ -1h innan vattnet når botten på provkroppen medan för 3c,d sker det inom cirka 10 s efter påfyllning av vatten. Mängden vatten som rinner ut är också avsevärt större för denna grupp av provkroppar. Orsaken till detta är att det kan ha bildats små ”kanalsystem” på baksidan av putsen där vattnet lätt kan transporteras. Detta inträffar om putsnätet ligger an isolering och putsbruket inte omsluter nätet.



Figur 4.4.4 Resultat från Test 3. Vänster bild betraktad framifrån, höger bild betraktad bakifrån.

Test 4:

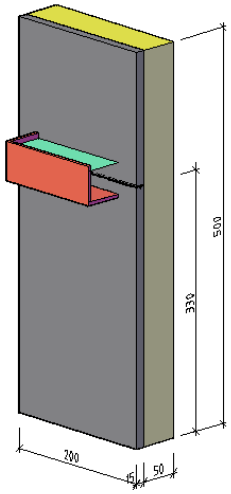
För alla fyra provkroppar transporterades vatten mellan puts och isolering till botten på provkroppen. Inget vattenläckage uppstod vid putsfäste för provkropp 4a och b (Weber). För provkropp 4c och d sker ett mindre läckage i form av enskilda droppar i anslutningen till putsfästet (Ejot).



Figur 4.4.5 Resultat från Test 4. Betraktad bakifrån. Pilar indikerar lägen för vattenläckage.

4.4.3 Inverkan av sprickans bredd på vattenflödet - provkropp och försöksuppställning

För att komplettera de grundläggande försöken utfördes ytterligare test, detta för att studera inverkan av sprickans bredd i putsen på mängden vatten som kan tränga in och passera i gränsskiktet mellan puts och isolering. Totalt utfördes 9 test där sprickans bredd är antingen 0.2, 0.5 eller 1 mm. Provkroppen visas i Figur 4.4.6. I alla test är putsens tjocklek 15 mm och isoleringen saknar skarvar. Sprickans ”raka” bredd är 140 mm, men eftersom sprickan är oregelbunden har den totala sprickans bredd ökats med uppskattningsvis 10 %. Oregelbundenheten leder även till att vattentrycket varierar mellan cirka 30-60 mm (300-600 Pa). Testet pågår under 1h. Vattnet som droppar i underkant, mellan puts och isolering, samlas upp i en plastpåse och vägs. Provkroppen vägs innan testet påbörjas och efter avslutat test, detta för att avgöra hur mycket vatten som stannat kvar i putsen.

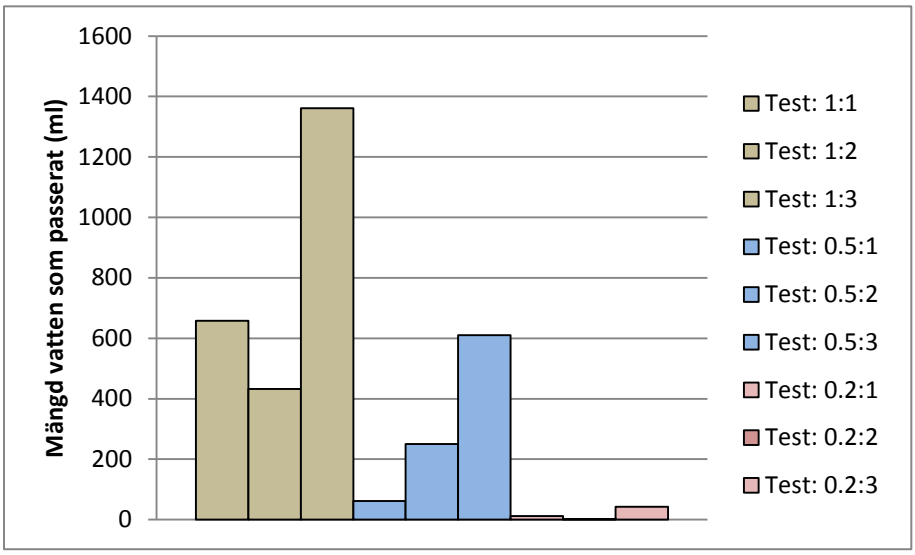


Figur 4.4.6 Provkroppen som används i testet för att avgöra vilken inverkan sprickans bredd i putsen har på vattenflödet mellan puts och isolering.

4.4.4 Resultat- inverkan av sprickans bredd på vattenflödet

Försöken visar på stora variationer vad gäller mängden vatten som passerar i gränsskiktet mellan puts och isolering. Enligt Figur 4.4.7 varierar uppsamlad vattenmängd för provkropparna med samma sprickvidd med en faktor 3, 10 och 40 (0.2, 0.5 och 1 mm). Störst vattenmängd som passerar systemet är för de provkroppar som har sprickvidden 1mm, medelvärdet är cirka 800 ml. Motsvarande värde för 0.5 och 0.2 mm är 300 ml och 20 ml. I ett av testen med den minsta sprickvidden, 0.2 mm, var inte mängden vatten som tränger genom systemet tillräckligt för att orsaka läckage i form av fritt vatten i underkant provkropp.

Mängden vatten som fastnar i putsen ligger mellan 12-20 volym-%. Vid 20 volym-% är putsen mättad och detta inträffar för de provkroppar där sprickans bredd är 1 och 0.5 mm.



Figur 4.4.7 Mängd vatten som passerar mellan puts och isolering. Test:1:2 ska tolkas som provkropp 2 med sprickvidden 1mm.

När det gäller att bestämma flödet av vatten som passerar mellan puts och isolering uppstår problemet under vilken tid som flödet ska bestämmas. Eftersom tidpunkten för läckaget blir fördröjt p.g.a. att putsen suger en del vatten, kan det redovisade flödet betraktas som ett fiktivt flöde, eftersom tiden som används i dessa försök, är den totala försökstiden 1h. Medelflödet för de tre olika sprickvidderna varierar mellan 0.5 och 5 ml/hmm^2. Vilket innebär hur mycket vatten (ml) som har passerat 1 mm^2 spricka under tiden 1 h.

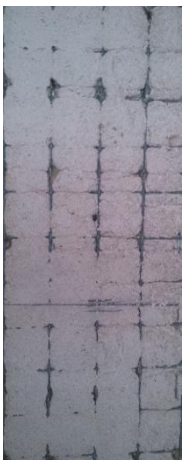
4.4.5 Lärdomar från testen

Vatten transporteras i gränsskiktet mellan puts och isolering. Vatten transporteras inte genom isolering, enligt försöken. Dock observerade av en slump att vissa områden i isoleringen faktiskt skiljer sig ifråga om hydrofobering. Figur 4.4.9a) visar ett normalt område där vattnet inte tränger in i isoleringen medan 4.4.9b) visar ett område vilket saknar hydrofobering och där vattnet rinner rakt genom isoleringen. Figur 4.4.9c) visar baksidan på detta område. Omfattningen av sådana felaktigheter har inte kontrollerats. Inga test i vertikalt läge på isolering har utförts för att avgöra om det finns möjlighet att vattnet rinner ut på baksidan på isoleringen.

Figur 4.4.9 Exempel på skillnader i hydrofobering av isolering. Första bilden a) uppvisar normalt beteende där vattnet ligger på ytan, b) visar område där hydrofobering saknas och vattnet rinner rakt igenom, c) baksidan på samma område.

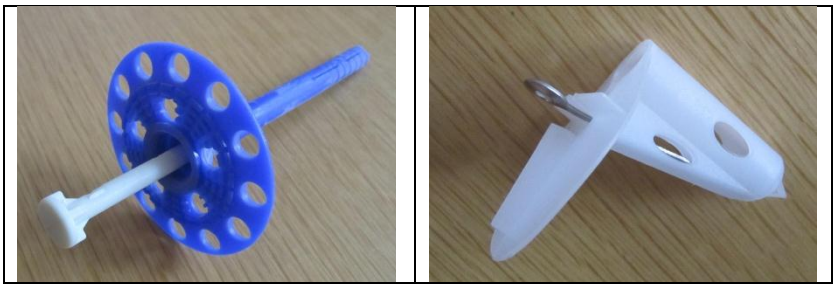
Vatten som transporteras mellan puts och isolering kan ledas till baksidan av isoleringen beroende på typ av isolerhållare eller om det finns skarvar i isoleringen. Mängden vatten som kan transporteras till baksidan av isoleringen är beroende av var sprickan i putsen är belägen i förhållande till isolerhållaren, skarvar i isoleringen samt eventuella glipor mellan isolerskivorna.

Den faktor som har största inverkan på vattenflödet i gränsskiktet mellan puts och isolering är förekomsten av eventuella håligheter. I många fall hamnar putsnätet nära isoleringen med följd att bruket inte omsluter nätet, se Figur 4.4.10. På detta vis är det möjligt att små ”kanalsystem” bildas där vattnet har lätt att transporteras. Detta är en trolig förklaring till varför provkropparna c) och d) i test 3 skiljer sig markant från de övriga både vad gäller flöde och den korta responstiden för vattenläckage.



Figur 4.4.10 Exempel på ”kanalsystem” orsakad av att putsbruket inte omsluter armeringsnätet.

Två olika typer av isolerhållare, se Figur 4.4.11, testades och det visar sig att utformningen av dessa påverkar förmågan att leda in vatten till baksidan av isoleringen. Isolerhållaren till höger är utformad med en lutande kanal och perforerade väggar, vilket leder till att eventuellt inträngande vatten leds utåt. Traditionellt utformade isolerhållare saknar denna funktion, vilket kan leda till att vatten leds in mot stommen.



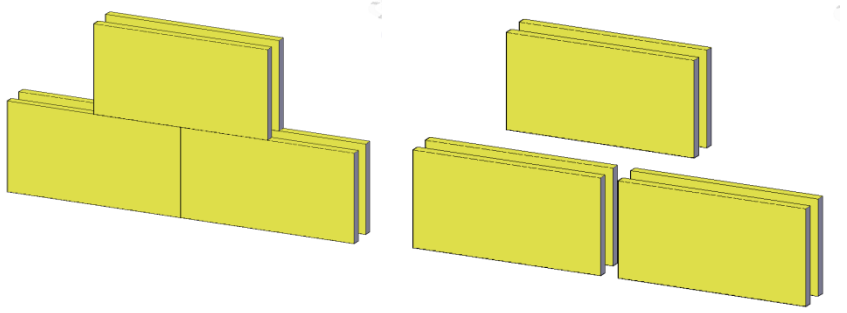
Figur 4.4.11 Isolerhållare, Ejot IDK-T (vänster), Therm 312 TB-fäste.

4.4.6 Förslag på nya tester och produkter

Denna undersökning påvisar att vatten kan tränga in bakom isoleringen till byggnadsstommen. Vattentillförseln har i undersökningen skett genom spricka i putsen medelst hydrostatiskt vattentryck, vilket är en grov uppskattning av verkliga förhållanden. För att skapa mer verklighetstrogna förhållanden borde de redovisade testen återigen utföras i en s.k. regnmaskin där vattenmängd och vindtryck varieras enligt standard för regntäthet för fönster/dörr.

Andra test vilka hade varit intressanta och lärorika att utföra är t.ex. hur tjockleken på isoleringen och antal överlappande lager påverkar förmågan att leda vatten till baksidan? Flera lager borde försvåra för vattnet att tränga in till baksidan av isoleringen. En annan variant är att skarvarna mellan isoleringen utförs med en s.k. halvt-i-halvt sammanfogning se Figur 4.4.12, vilket gör det svårare för vattnet att leta sig fram till baksidan av isolering.

Eftersom den testade isoleringen är hydrofoberad rinner vattnet på ytorna. Om istället den yttre delen närmast putsen inte är hydrofob, skulle eventuellt läckage av vattnen samlas i denna region för att sedan torka ut utåt, under torrare perioder.



Figur 4.4.12 Vattenavledning genom två isolerskivor med förskjutna skarvar

4.4.7 Test på provvägg i full skala

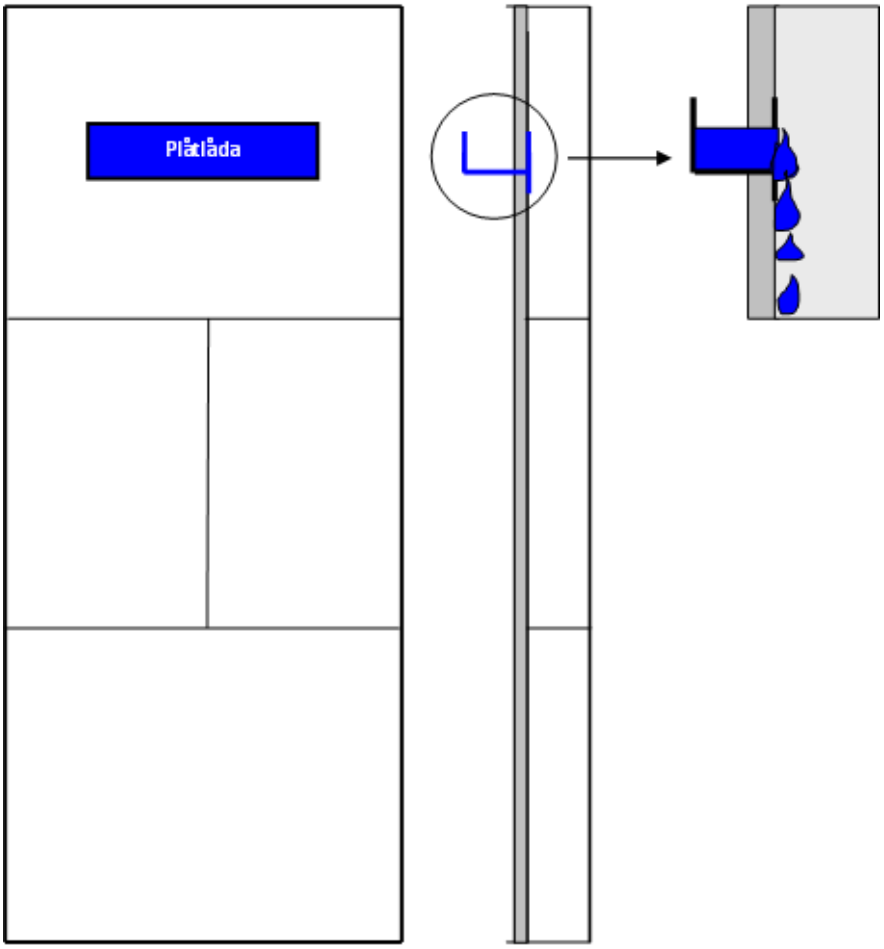
I ASTM-metoden E 2273-03 ”Determining the Drainage Efficiency of Exterior Insulation and Finish Systems (EIFS) Clad Wall Assemblies” beskrivs en metod för att testa dräneringsförmågan hos fasad-system med puts på isolering. I korthet innebär metoden att man skär bort en remsa av mineralullen högt upp på en provvägg, ända in till den bakomliggande vindskyddsskivan. Vatten sprutas sedan in i den utskurna skåran med viss intensitet. Under provväggen finns en balja för att samla upp det bortdränerade vattnet. Baljan vägs var 15 minut under 75 minuter. Vatten samlas upp även 60

minuter efter att vattensprutningen avslutats. Dräneringseffekten anges sedan som totalt uppsamlad vattenmängd i förhållande till den tillförda vattenmängden genom skåran, uttryckt i procent.

Resultatet från metoden är indirekt ett mått på hur mycket vatten som stannar kvar i väggen. Resultatet säger dock ingenting om hur vattnet dräneras eller om vattnet finns i isoleringen eller i det bakomliggande vindskyddet. Huvuddelen av vattnet rinner mellan isoleringen och vindskyddsskivan. Metoden säger alltså ingenting om hur mycket vatten som absorberas av vindskyddsskivan. Utgångspunkten för den modifierade provningsmetoden är att vattnet som belastar konstruktionen inte direkt får tränga in till vindskyddet. Antingen utsätts ytan på mineralullen för direkt vattenbelastning under visst övertryck eller får vattnet tränga in till halva isolertjockleken. Därefter studeras visuellt hur vattnet transporteras nedåt och genom fuktmätningar fastställs fukttillståndet i den bakomliggande skivan.

Provväggen

Den provade väggen är 1800 mm hög och 800 mm bred. I höjdled finns 3 stenullsskivor. Skivan i mitten har en vertikal skarv i mitten. Upptill, cirka 30 cm från överkanten, finns en urgröpning i putsen där vattenbelastningen sker. Utanför denna urgröpning monteras en stålbalja med små hål i nederkanten så att vattnet ska kunna nå den bakomliggande isoleringen. En översiktlig skiss visas i Figur 4.4.13



Figur 4.4.13 Principiell utformning av provväggen

De horisontella skarvarna i mineralullen finns 25 respektive 85 cm under hålen i baljan. De ingående materialen som använts är:

Träregelstomme med 13 mm gips (plastfolie monterad på baksida gipsskiva)
100 mm stenull Serporoc Therm 321, densitet 85 kg/m^3
Stålnätsarmerad KC-puts, 15 mm tjock

Provningens utförande

Efter en inledande provning med intakt stenullsisolering gjordes en urgröpning i stenullen in till halva isolertjockleken. Vatten fylls i baljan till olika höjd över hålen. Vattennivån hålls konstant (10 eller 30 mm) genom succesiv påfyllning. Påfylld vattenmängd mäts. Fukttillståndet i gipsskivan bestäms genom mätning med GANN ytfuktindikator. Mätning görs i ett rutnät med avstånden 0, 25, 55, 85, 115 och 145 cm under hålen i baljan. I sidled på avstånden 0, 10, 20 och 37 cm från mittlinjen.

Innan provningen påbörjades visade GANN-indikering 15-18 på den torra gipsskivan. Fuktmätningen utförs både under tiden det finns vatten i baljan och efteråt under uttorkningen. Uttorkningen sker endast i en riktning på grund av plastfolien på insidan.

Resultat och slutsatser från provning

Vid intakt isolering sker ingen vatteninträngning. Inte ens vid vattenövertrycket 50 mm sker någon vatteninträngning. Vid vattenövertryck 30 mm och stenullen urgröpt till halva djupet sjunker vattennivån snabbt och putsen blir blöt direkt enligt Foto 4.4.1.

Foto 4.4.1. Putsen blir blöt direkt.

Flera påfyllningar gjordes. Vattennivån sjunker snabbt. Efter en tid rinner vatten ut nedtill precis under den vertikala skarven mellan stenullsskivorna mitt på väggen. Mätning med GANN gav höga värden i gipsskivan. Slutsatsen av försöket är att vatten snabbt rinner ner i isoleringen och når bakomliggande gipsskiva.

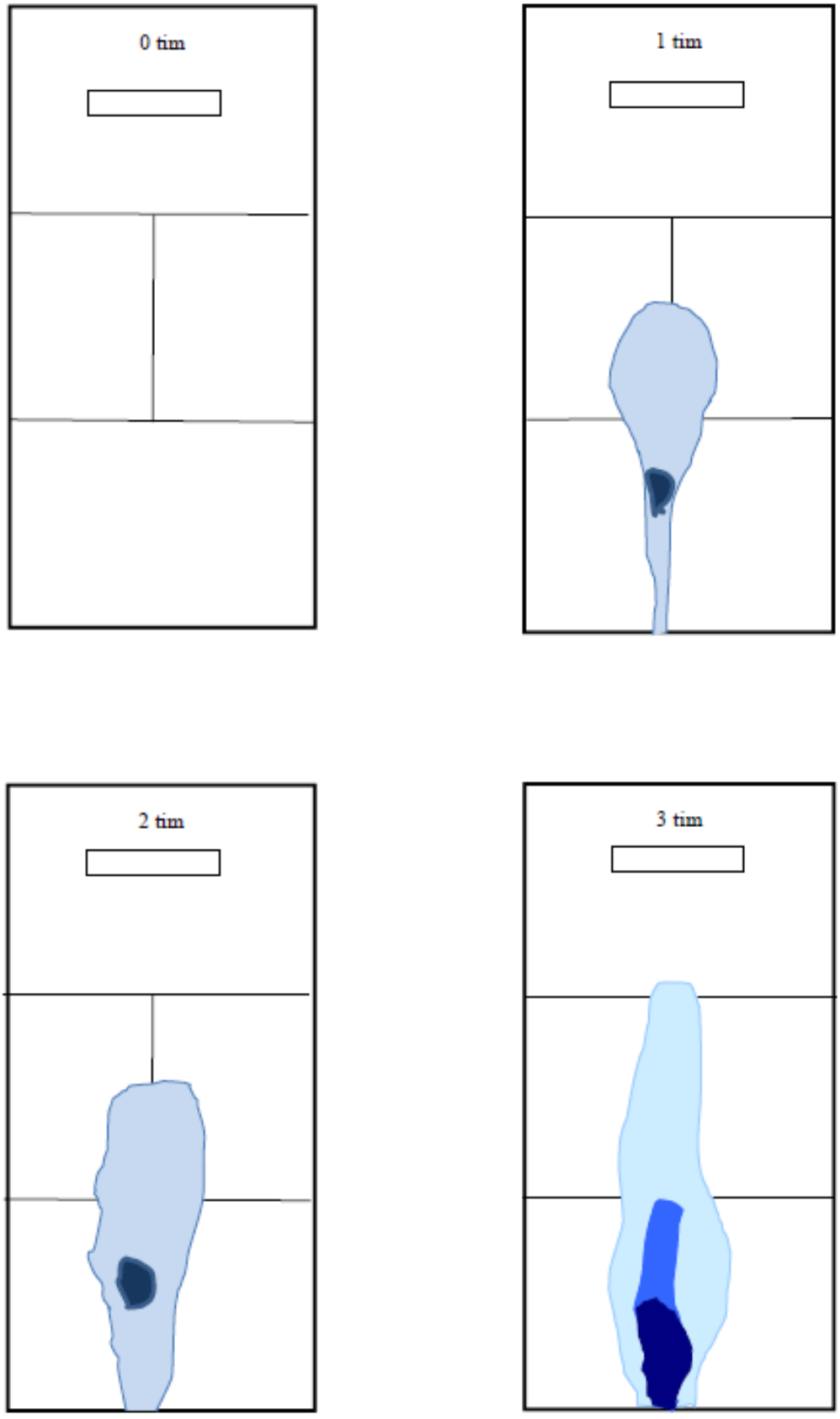
Efter detta försök beslöts att låta väggen torka ut och därefter göra ett nytt försök med mindre vattenövertryck. Vid detta försök undersöktes även fukttillståndet i gipsskivan mer detaljerat.

Vid vattenövertryck 10 mm och stenullen urgröpt till halva blev putsen blöt på samma sätt som i Foto 4.4.2. Inget rinnande vatten fanns på putsytan, vilket visar att det inte var fråga om något läckage. Vattnet rinner mellan puts och isolering och fuktar upp putsen bakifrån. Nivån i baljan hade sjunkit 3 mm och nytt vatten påfylldes till nivån 10 mm (c:a 1 dl).
Efter 20 minuter påfylldes ytterligare 1 dl.
Efter 35 minuter syns en tydlig vertikal uppfuktning av putsen vid den vertikala skarven mellan stenullsskivorna. Ytterligare 2 dl vatten fylls på. Efter 40 minuter görs mätning i gipsskivan. Inga förhöjda fukttillstånd kunde konstateras.
Efter 50 minuter rinner vatten ut nedtill mitt under den vertikala skarven mellan stenullsskivorna enligt Foto 4.4.3.
Efter 70 minuter påfylldes ytterligare 3 dl vatten.
Efter 2 timmar var baljan tom. 6 dl vatten påfylldes.
Efter 3 timmar var baljan tom och uppfuktningen avbröts.

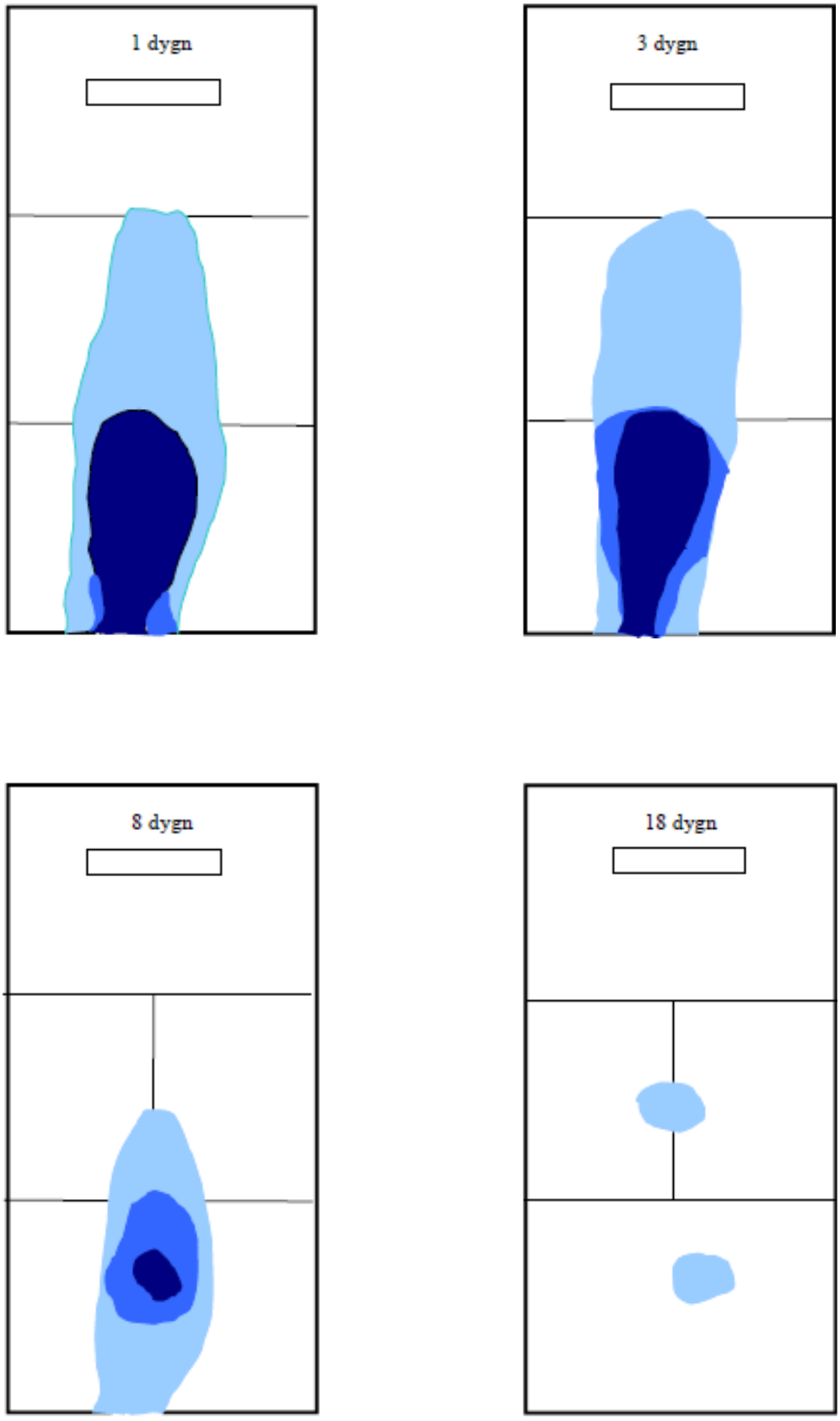
Foto 4.4.3 Vattenflöde direkt under den vertikala skarven mellan mineralullsskivorna.

4.4.8 Resultat- uppfuktning- och uttorkningsförlopp i gipsskivan enligt GANN-mätning.

Resultaten redovisas i Figur 4.4.14-15. Fukttillstånden anges i intervall med olika blå nyanser enligt Tabell 4.4.1. Den mörkaste blå nyansen anger att gipsen är vattenmättad.



Figur 4.4.14 Fuktindikering i gipsskivan under uppfuktning. Mätningarna är utförda med GANN-mätare.



Figur 4.4.15 Fuktindikering i gipsskivan under uppfuktning. Mätningarna är utförda med GANN-mätare.

Tabell 4.4.1 Fukttillstånd enligt mätning med GANN.

Mätvärde	Färgskala	Tolkning
20-40		
40-100		
mer än 100		Vattenmättnad

Som framgår av Figur 4.4.14-15 sker vatteninträngning till den bakomliggande gipsskivan relativt snabbt. Redan efter 1 h är fukttillståndet mycket högt i en fläck bakom den understa mineralullsskivan direkt under den vertikala skarven mellan skivorna i mitten. Härefter sprider sig fuktfronten uppåt och åt sidorna. Förloppet kan tolkas så att vatten tränger ner genom den översta skivan och når den horisontella skarven. Här ansamlas vatten och så småningom tränger vatten ner genom den vertikala skarven mellan skivorna i mitten. När vattnet når den nedre horisontella skarven sker en ansamling. En vattenpelare byggs upp och vattnet tränger inåt och fuktar upp gipsskivan samtidigt som vatten härefter strömmar utmed gipsskivan och fuktar upp den nedanförliggande delen. Efter någon timma strömmar även vatten ut nedtill på framsidan enligt Foto 4.4.3. Observera att detta vattenflöde sker direkt under den vertikala skarven mellan mineralullsskivorna i mitten.

Uttorkningen efter uppfuktningen går enligt Figur 4.4.15 relativt långsamt. I aktuellt fall tog det cirka 3 veckor innan väggen var torr. Här ska observeras att uttorkningsklimatet var mycket gynnsamt. Under praktiska förhållanden torde uttorkningstiden bli väsentligt längre. Under ogynnsamma förhållanden kan man förvänta sig att uttorkningstiden blir 3-5 gånger längre.

Sammanfattningsvis kan konstateras att vatten lätt tränger in vid otätheter och transporteras nedåt. På vägen nedåt tränger vattnet in mot den bakomliggande skivan och fuktar upp denna. Uttorkningstiden efter denna vatteninträngning är relativt lång.

4.4.9 Kommentarer angående modifierat standardtest

Med det modifierade testet finns möjlighet att utvärdera vilken väg vattnet tar i systemet samt mängden vatten som absorberas i vindskyddsskivan. Metoden möjliggör även att studera uppfuktning- och uttorkningsförloppet i vindskyddsskivan. Om vatten kommer in bakom isoleringen kan detta ge stora problem i form av mögelangrepp och dylikt på fuktkänsliga material. Är den bakomliggande väggen en lättbetongvägg försämras även värmeisoleringen.

4.4.10 Förslag på nya tester och produkter

Denna undersökning påvisar att vatten kan tränga in bakom isoleringen till byggnadsstommen. Vattentillförseln har i undersökningen skett genom spricka i putsen medelst hydrostatiskt vattentryck, vilket är en grov uppskattning av verkliga förhållanden. För att skapa mer verklighetstrogna förhållanden borde de redovisade testen återigen utföras i en s.k. regnmaskin där vattenmängd och vindtryck varieras enligt standard för regntäthet för fönster/dörr.

Andra test vilka hade varit intressanta och lärorika att utföra är t.ex. hur tjockleken på isoleringen och antal överlappande lager påverkar förmågan att leda vatten till baksidan? Flera lager borde försvåra för vattnet att tränga in till baksidan av isoleringen. En annan variant är att skarvarna mellan

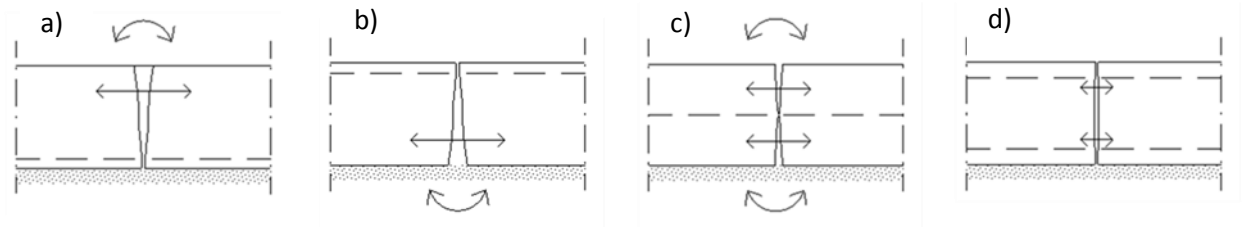
isoleringen utförs med en s.k. halvt-i-halvt sammanfogning se Figur 4.4.12, vilket gör det svårare för vattnet att leta sig fram till baksidan av isolering.

Eftersom den testade isoleringen är hydrofoberad gör det att vattnet rinner på ytorna. Om istället den yttre delen närmast putsen inte är hydrofob, skulle eventuellt läckage av vattnen samlas i denna region för att sedan torka ut utåt, under torrare perioder.

4.5 Åtgärder för att begränsa risken för uppkomst av farliga sprickor samt för att försvåra inträngning av vatten mot byggnadsstommen

Placeringen av armeringsnätet i putsen påverkar i stor utsträckning förmågan att ta upp drag- och böjdragspänningar. Spänningarna kan exempelvis uppstå p.g.a. krympning under härdningsfasen, temperaturskillnader, uppfuktning/uttorkning, geometriskillnader och ojämnt putsskikt. Nedan ges ett antal exempel på hur armeringsnätets placering påverkar den sprickfördelande förmågan och storleken på rörelserna i en spricka.

Nätarmering av stål placerat enligt alternativ som visas i Figur 4.5.1a) är den konfiguration som har sämst förutsättningar för att motverka uppkomsten av breda sprickor i putsens yta. Eftersom armeringsnätet ligger närmast isoleringen är dess sprickfördelande effekt begränsasd. Genom att förhindra putsens rörelser närmast isolerskiktet bidrar armeringsnät till en möjlig initiering av sprickor. Eftersom det endast finns armering på en sida, är putsen ej förhindrad att vinkeländras, vilket innebär att putsen kommer att röra sig ut ur planet med resultat att sprickvidden ökar med tiden. Denna typ av spricka är inte möjlig att måla över med bestående resultat.



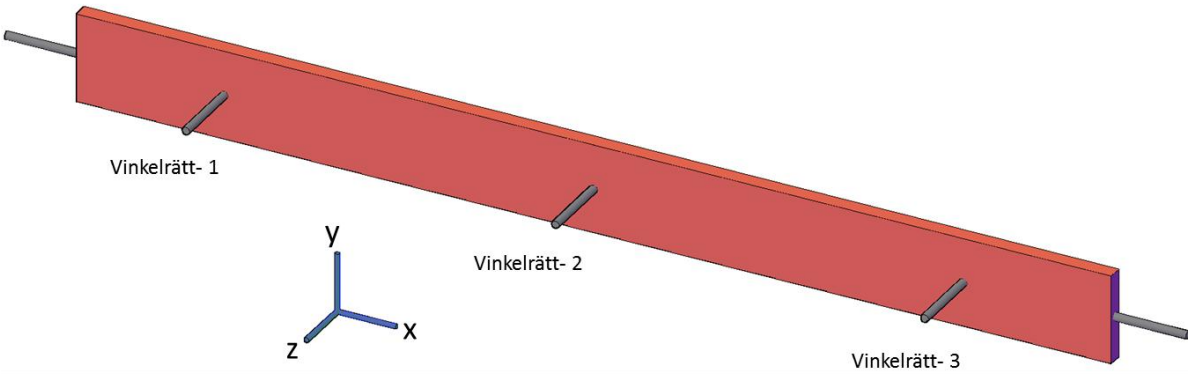
Figur 4.5.1. Armeringens placering samt dess effekter

Om endast ett lager armeringsnät ska användas är troligtvis konfigurationen enligt 4.5.1b) att föredra, vilken troligtvis begränsar sprickvidden i ytan. Eftersom det endast finns ett lager armering är putsen inte fullt rotationsförhindrad i detta fall heller, men troligtvis mer än 4.5.1a) p.g.a. vidhäftningen mot isoleringen.

I Figur 4.5.1c) är armeringsnätet placerat centriskt, vilket ökar förutsättningarna för en effektiv sprickfördelning. Den sprickfördelande effekten hos centriskt placerad armering är dock beroende på putstjockleken. Det har visats genom provning att den positiva effekten avtar om putsen är tjockare än 15 mm. Denna placering av armeringsnätet leder till ett visst rotationsmotstånd om vidhäftningen mot isoleringen är god.

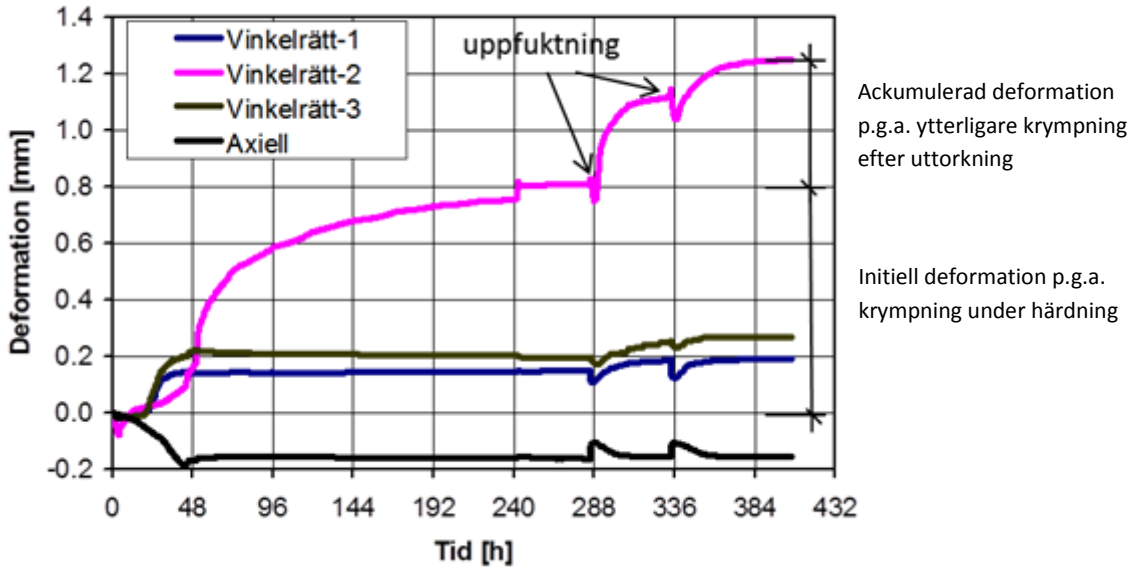
En placering av armeringsnäten enligt Figur 4.5.1d) får anses vara den bästa ur alla aspekter. Sannolikheten är stor att man får en effektiv sprickfördelning (styrks av försöken nedan) samtidigt som putsens rotation ut ur planet hindras effektivt.

I försök utförda av Sandin (2002) undersöktes effekten av enkel och-dubbelarmering. Remsor av puts med måtten 700x60x10 mm gjöts och strax efter, placerades på högkant enligt Figur 4.5.2. Fem LVDT-givare registrerade rörelserna i x och z-riktningen.

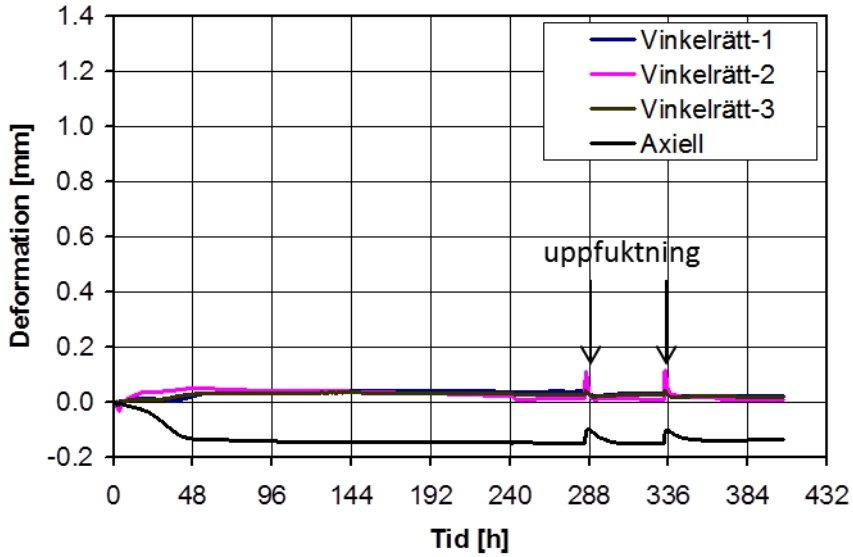


Figur 4.5.2 Provkroppen med lägen för LVDT-givare

Enligt Figur 4.5.1a eller b, där armeringen består av ett lager armering som placerats excentriskt, förhindras den initiella krympningen med följden att putsremsan kröker sig, se LVDT-givare 2 (vinkelrätt-2) i Figur 4.5.3. När putsen i princip är färdighärdad, väts en sida av putsytan med följden att efter uttorkning krymper putsen ytterligare. Detta upprepas ett antal gånger med samma effekt, se Figur 4.5.3. Fenomenet beskrivs mer ingående i kapitel 5.1 och förklaras med den så kallade karbonatiseringskrympningen.



Figur 4.5.3. Deformationer på grund av krympning i provkropp med excentriskt placerad armering.



Figur 4.5.4. Deformationer på grund av krympning i provkropp med dubbel, centrisk armering.

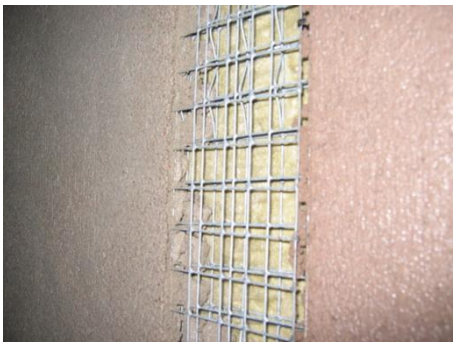
Försöket upprepades med dubbel mängd armering placerad enligt 4.5.1d) med resultatet att i princip inga rörelser i z-riktning uppstår, se Figur 4.5.4, samtidigt som fenomenet med att krympningen ökar efter uppfuktning/uttorkning uteblir.

4.5.1 Praktiska problem med att dubbelarmera putsen

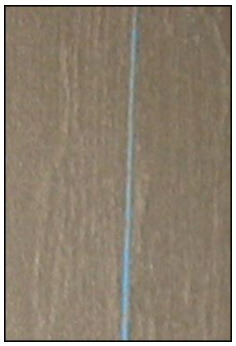
Att dubbelarmera putsen har stora fördelar gällande dess förmåga att motstå sprickor initiellt under härdning och tiden därefter. Sannolikheten ökar att de dragspänningar som uppstår, både på ytan och närmast isoleringen, kan tas om hand av nätarmeringen. Problemet är att detta är svårt att utföra i praktiken med dagens nät. Att försöka distansera ut ett enkelnät punktvis fungerar bara vid distansens omedelbara omgivning. Att försöka utföra detta på två nät, samtidigt som avståndet mellan de två näten ska vara fixt, förefaller vara praktiskt ogenomförbart. För att i praktiken centrera nätet skulle krävas att flera lager bruk appliceras, vilket är en omständlig och dyr lösning. Det kan samtidigt ifrågasättas huruvida flera lager bruk samverkar som en enhet.

Försök har utförts där en ny typ av nät har tagits fram, ett dubbelnät med givet avstånd mellan de enskilda näten. I och med att två nät sammankopplas innebär detta att en viss styvhet ut ur planet skapats. Detta är positivt eftersom det då möjliggör att punktvist justera ut nätet så att detta centreras i putsen. Två provväggar med måtten 2.5x2.5 m^2 putsades, se Figur 4.5.5. Konstruktionen var en träregelvägg med stenull som putsunderlag.

På den ena väggen användes ett bruk som är ändamålsenligt vid putsning på isolering (Therm 340 från materialleverantören Weber). På den andra väggen användes ett finputsbruk (Therm136 från materialleverantören Weber) som har stor benägenhet att spricka, och som har fungerat som ett referensbruk i tidigare projekt, Sandin (2002). Det sistnämda bruket ska enligt leverantörs (Weber) rekommendation maximalt påföras med en tjocklek av 5 mm, p.g.a. sprickrisken. I försöken användes 3 gånger så mycket putsbruk, det vill säga cirka 15 mm, i ett påslag. För att säkerställa att rätt mängd bruk (täckskikt) appliceras utanför det yttersta armeringsnätet, användes en modifierad version av den klassiska putsribban, nämligen en hård plastslang med fjäderbelastade krokar i ändarna, se Figur 4.5.6.



Figur 4.5.5. Provväggar, två olika bruk användes, Therm 136 (vänster) och 340 (höger). Båda var armerade med dubbelarmering. Visar en skarv mellan två armeringsnät därav flera nät.



Figur 4.5.6. Modern variant av putsribba, en 4 mm tjock plastslang med fjädrande krokar, vilka fästs i nätet.

Plastslangen kan fästas i nätet i valfri riktning och ha obegränsad längd. Eftersom denna slang är mycket mindre än en sedvanlig putsribba krävs inget återfyllning, då slangen tas bort.

Eftersom putsningen utfördes inomhus, utsattes ej väggen för några termiska laster. För att simulera regn och på detta vis ”stressa” putsen med fuktinducerade egenspänningar, fuktades dock ytan upp vid ett antal tillfällen.Väggarna monterades ner efter c:a. 4 månader utan någon förekomst av synliga sprickor.

4.5.2 Några kommentarer angående putsning med dubbelnät av stål

- Armeringen hamnar i rätt läge för att ta upp dragspänningar både på fram och baksida, vilket förhindrar rörelser ut ur planet.
- Styvheten i nätet gör att det är lättare att montera rätt, dvs med ett givet avstånd mellan de två nätplanen.
- Styvheten i nätet bidrar även till att appliceringen av putsen förenklas avsevärt samtidigt som tjockleken av putskakan kan styras med stor noggrannhet (detta gör troligtvis att arbetet går snabbare samt att kvalitén höjs).
- Användning av dubbelnät av stål gör att det inte behöver ställas lika hårda krav på putsbrukets krympningsegenskaper. Endast ett lager bruk krävs, såvida inte en. infärgad ytputs ska användas. Det kan dock vara nödvändigt att tillföra accelerande tillsatser för att påskynda putsens härdning och därmed möjliggöra ytbehandling inom rimlig tid.

4.6 Slutsatser

Vatten från slagregn kan transporteras in till stommen genom glipor vid fönster, dörrar och balkonger. Även breda sprickor, det vill säga sprickor med en bredd större än 0.2 millimeter, kan öppna upp vägar för vatteninträngning. Mängden inträngande vatten på grund av slagregn genom sprickor med bredder mindre än 0.2 millimeter är försumbar.

Uppkomsten av breda sprickor i puts på mineralullsisolering kan på ett effektivt sätt begränsas genom applicering av armering. För att uppnå optimal sprickbreddsbegränsande effekt med armeringen, ska den placeras 3-4 millimeter från putsen ytor. Ett enkelt sätt att uppnå effektiv sprickbreddsbegränsning är genom dubbelarmering. Även enkelarmering i närheten av putsens fria yta skulle kunna fungera effektivt men det är praktiskt svårt att få armeringen i rätt läge.

Såväl förzinkat stålnät som glasfibernät kan användas som putsarmering. När det gäller förmågan att begränsa sprickbredder är stålnät applicerat i två lager dubbelt så effektivt jämfört med motsvarande armering av glasfiberväv. För en puts med 15 millimeters tjocklek som är armerad med dubbelt stålnät blir medelavståndet mellan sprickorna 20-25 millimeter. Motsvarande avstånd för armering av glasfibernät blir 40-50 millimeter. För töjningar av storleksordningen 1.2 - 1.5 millimeter (gäller vanligt förekommande putssorter som används i svenskt klimat) blir sprickbredderna i puts med armering av stålnät 0.02-0.04 millimeter. Motsvarande sprickbredder för puts med armering av glasfiberväv blir dubbelt så stora. Sprickor i den här storleken är försumbara vad gäller vatteninträngningen, vilket leder till en fasad med god beständighet och lång livslängd.

Placeringen samt mängden armering har en avgörande betydelse vad gäller förmågan att motstå drag- och böjdragspänningar. Dock finns praktiska problem med att dubbelarmera. Svårigheten ligger i att skapa ett bestämt avstånd mellan de två näten samtidigt som näten ska vara plana. Förslag på uppbyggnad av ett dubbelnät av stål redovisas och testas genom att två provväggar putsas. Till den ena väggen används ett bruk avsett för ändamålet och till den andra väggen ett finputsbruk (applicerades 3 ggr tjockare än rekommenderat av leverantör) med stor benägenhet att spricka, enligt tidigare tester. Testet pågick under fyra månader utan någon förekomst av synliga sprickor.

Förutom att sprickor i putsade fasader ej är tilltalande estetiskt, leder sprickor även till en fuktigare puts i sprickans närhet, med högre risk för påväxt, flagning av färg och vintertid frostsprängning. Vid slagregn ökar sannolikheten att vattenmängden är så stor att en betydande mängd tränger längre in bakom putsen. Frågan är vart detta vatten tar vägen?

Laboratorieundersökningarna visar att vatten transporteras i gränsskiktet mellan puts och isolering. Den faktor som har största inverkan på vattenflödet i gränsskiktet mellan puts och isolering är förekomsten av eventuella håligheter. I många fall hamnar putsnätet nära isoleringen med följd att bruket inte omsluter nätet. På detta vis är det möjligt att små ”kanalsystem” bildas där vattnet lätt kan transporteras. Eftersom vattnet tar den lättaste vägen finns stor sannolikhet att det leds in mellan skarvarna i isoleringen, både vertikala och horisontella, med följden att den bakomliggande stommen fuktas upp. Vid upprepande regn med tillhörande vattenläckge ökar sannolikheten att fukten inte hinner torka ut inom rimlig tid, vilket kan ge farliga fuktnivåer i väggen.

För att öka kunskapen om vilka spänningar som kan uppträda i en fasad med putsad isolering har 3-dimensionella datorsimuleringar utförts. I dessa simuleringar är det möjligt att se effekterna av fasadens geometri, isoleringens styvhet och variationer av bruksmängd per ytenhet på spänningar

som kan uppkomma i putsen. Parametrar såsom E-modul, böjdraghållfasthet och längdutvidgningskoefficient för puts samt E-modulen för tre olika typer av mineralullsisolering är utvärderade med egna försök och används som indata i beräkningarna.

Simuleringarna visar att det är viktigt med en jämntjock puts. I områden med tunnare puts ökar spänningen samtidigt som hållfastheten minskar, vilket ökar sannolikheten för sprickbildning. Vid fönster- och dörrsmygar utvecklas böjdragspänningar p.g.a. geometrin och de mothållande krafter från isoleringen. Storleken på spänningarna ökar med ökande styvhet på isoleringen. I dessa områden är det rimligt att dubbelarmera, dvs. både ha armering i botten och vid ytan av putsen.

Förslag på åtgärder som minskar risken för att inläckande vatten når väggarna är att isoleringen appliceras i fler skikt med förskjutna skarvar och att isolerskivornas kanter snedfasas eller falsas.

5 BESTÄNDIGHETSEGENSKAPER HOS SYSTEMET PUTSAD VENTILERAD SKIVA

I detta kapitel presenteras resultat från den del av projektet där putsade ventilerade skivfasaders sprickrelaterade beteende har studerats. För att kunna analysera fasadkonstruktionens sprickrelaterade beteende behövs bland annat kunskap om komponenternas temperatur- och fuktrelaterade beteende. I avsnitt 5.1 studeras fuktrelaterade materialegenskaper hos en vanligt förekommande putsbärande skiva samt till denna skiva anpassad puts. I avsnitt 5.2 studeras när och på vilket sätt sprickor uppstår i putsade ventilerade skivor. I avsnitt 5.3 analyseras vilka mekaniska påkänningar som uppstår i putsade skivor på grund av temperatur- och fuktrelaterade variationer, med beaktande av geometriska och utförandemässiga detaljers inverkan. I avsnitt 5.4 presenteras en beräkningsgång som konstruktörer kan använda för att bedöma det förväntade sprickbeteendet hos en putsad ventilerad fasad. I avsnitt 5.5 presenteras delstudiens viktigaste slutsatser.

5.1 Fuktrelaterade materialegenskaper

Fuktupptagning och fuktavgivning samt fuktrelaterade rörelser undersöks hos en cementbaserad skiva och en cementbaserad puts som ingår i ett vanligt förekommande system av putsade ventilerade skivor. Den putsbärande skivan är av typen Aquapanel Outdoor från Knauf Danogips och putsen är en produkt med beteckningen SERPO 261 Putsbruk EF från Weber Saint Gobain Byggprodukter AB. Undersökningen omfattar experimentella studier av uttorkningskrympning, fuktupptagning- och fuktavgivning samt relaterade rörelser vid olika nivåer på den relativa fuktigheten.

5.1.1 Material

Fasadens uppbyggnad

Skivorna, som i vanliga fall har måtten 1200*900*12.5 mm, kan monteras på stående eller liggande läkt av trä eller stål. Avståndet mellan läkten är i vanliga fall 600 mm, något tätare runt fönster och i randzoner. Skivorna skruvas mot läkten med självborrande skruv, varefter alla skivskarvar spacklas med fogspackel. Alla skarvar armeras med armeringsremsor som arbetas in i samma spackelmassa som används för att fylla skarvarna. När spackelmassan har härdat, påförs putsen i två steg. I första steg appliceras ett putsskikt med tjockleken 5-7 mm och ett armeringsnät av glasfiber arbetas in över hela ytan. När detta första skikt har härdat, påförs ytterligare cirka 3 mm puts. Systemets uppbyggnad visas i Figur 2.2.

Cementbaserade skivor

Skivor av typen Aquapanel Outdoor tillverkas av Knauf Gips KG i Tyskland. Skivan består av en kärna av cementbunden perlit och flygaska med ytskikt förstärkta av glasfiberväv. Uttryckt i viktprocent är sammansättningen portlandcement < 30 %, perlit < 50 %, flygaska < 20 %, glasfiber < 5 %.

Spackel

Som spackelmassa används en produkt som kombinerar flexibilitet med hög vidhäftningsförmåga. I de aktuella försöken har en produkt med den kommersiella beteckningen weber set 610 multi använts. Enligt tillverkaren består spackelmassan av < 40 % portlandcement, ballast av kvartshaltig natursand < 60 %, filler av dolomit < 10 %, PVAc-polymer < 10 % samt övriga tillsatsmedel < 3 %.

Skarvarmering (skarvremsa)
Skarvarmeringen består av en 200 mm bred remsa av alkaliseristent glasfibernät som belagts med en plastfolie med bredden 50 mm. Plastfolien förhindrar vidhäftning mot skivan och fungerar därmed som glidskikt. Skarvarmeringen arbetas in i den färska spackelmassa som används för att fylla spalten på 2-5 mm som bör finnas mellan anslutande skivor. Den använda armeringen har den kommersiella beteckningen weber 411 Skarvarmering.

Puts
Puts av typen SERPO 261 putsbruk EF tillverkas av Weber Saint Gobain Byggprodukter AB. Sedan 2012 marknadsförs produkten under beteckningen weber therm 261 putsbruk EF. Enligt information från tillverkarens byggvarudeklaration innehåller putsen 1-5 % kalciumhydroxid/kalk, 10-20 % portlandcement, 50-80 % sand med kornstorlek <1 mm, 10-15 % dolomit, tillsatsmedel/plasticerande 2-5 %, diverse andra tillsatsmedel såsom fibrer < 2 %.

Armeringsnät
Puts som appliceras på ventilerade skivor förses med sprickhämmande armering av alkaliresistent glasfibernät. Till puts av typen weber therm 261 putsbruk EF används ett akrylbelagt glasfibernät med maskvidd 6x6 mm av typen weber therm 397 EF-nät.

5.1.2 Provkroppar och mätning
Skivmaterialets egenskaper studerades på provkroppar med måtten 225x100x12.5 mm. Av olika anledningar var det inte praktiskt möjligt att få tag i nytillverkade skivor. Skivorna som användes i provningarna var tre månader gamla. Fram till provningen förvarades skivorna i originalförpackningen, det vill säga inplastade på förvaringspallar i ouppvärmda lagerlokaler i cirka tre månader. Fuktkvoten vid försökens början bestämdes genom uttorkning i ugn vid 80 grader C under två dygn. Fuktkvoten uppmättes till 7.7 %.

Provkroppar av puts med måtten 225x100x15 mm tillverkades genom gjutning i Plywoodformar. Två uppsättningar av putsprovkroppar tillverkades – en uppsättning utan nätarmering och en annan uppsättning med två lager nätarmering. I den senare uppsättningen placerades näten cirka 3 mm från provkropparnas under- respektive översida. Före avformning fick provkropparna härda under plastfolie i ett dygn. Provkropparna förvarades ytterligare tre dygn under plastfolie innan mätningarna påbörjades.

Mätning av fuktupptagnings- och fuktavgivningsegenskaper (sorption-desorption) samt relaterade rörelser genomfördes även på provkroppar bestående av putsat skivmaterial. Provkropparna hade måtten 300x100x27.5 mm och tillverkades genom att skivbitar placerades i plywoodformar, varpå man applicerade putsen i två lager. Armeringen av glasfibernät placerades cirka 3 mm från putsens fria yta. Total tjocklek på putsskiktet var 15 mm.

Cylindriska mätplattor av mässing med diametern 6 mm limmades mot provkropparnas ena yta på ett nominellt avstånd av 100.5 mm. Limmet var ett bisfenolbaserat tvåkomponentslim. Längdändringarna registrerades med hjälp av ett handhållet mätinstrument av typen Setzdehnungmesser från Staeger genom att instrumentets halvsfäriga mätytor placerades över stålkulor instansade i mätplattorna, se Foto 5.1.1 Instrumentets mätnoggrannhet är 0.001 mm.

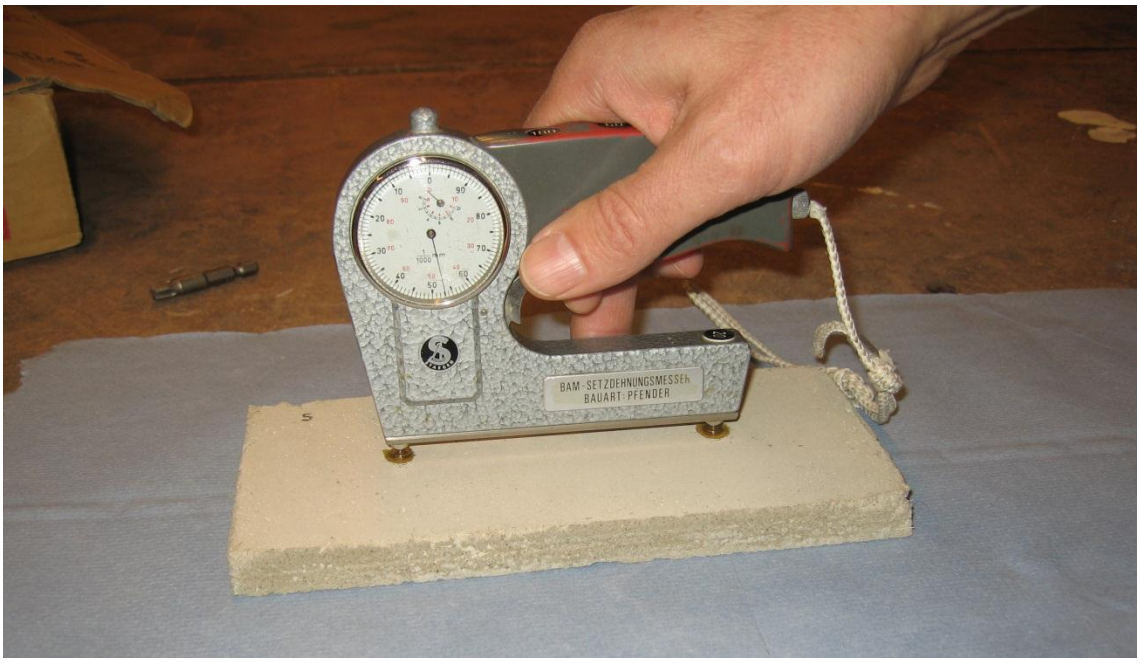


Foto 5.1.1 Mätning av fuktrelaterade längdändringar med handhållet precisionsinstrument.

Den använda metodens fördel jämfört med trådtöjningsgivare eller induktiva lägesgivare (LVDT) är att den är mindre känslig för höga fukt- och temperaturförhållanden. Vid långvarig blötning kan tvåkomponentslimmet som användes för att fästa mätplattorna bli mjukt med följden att mätplattorna lossnar från limmet.

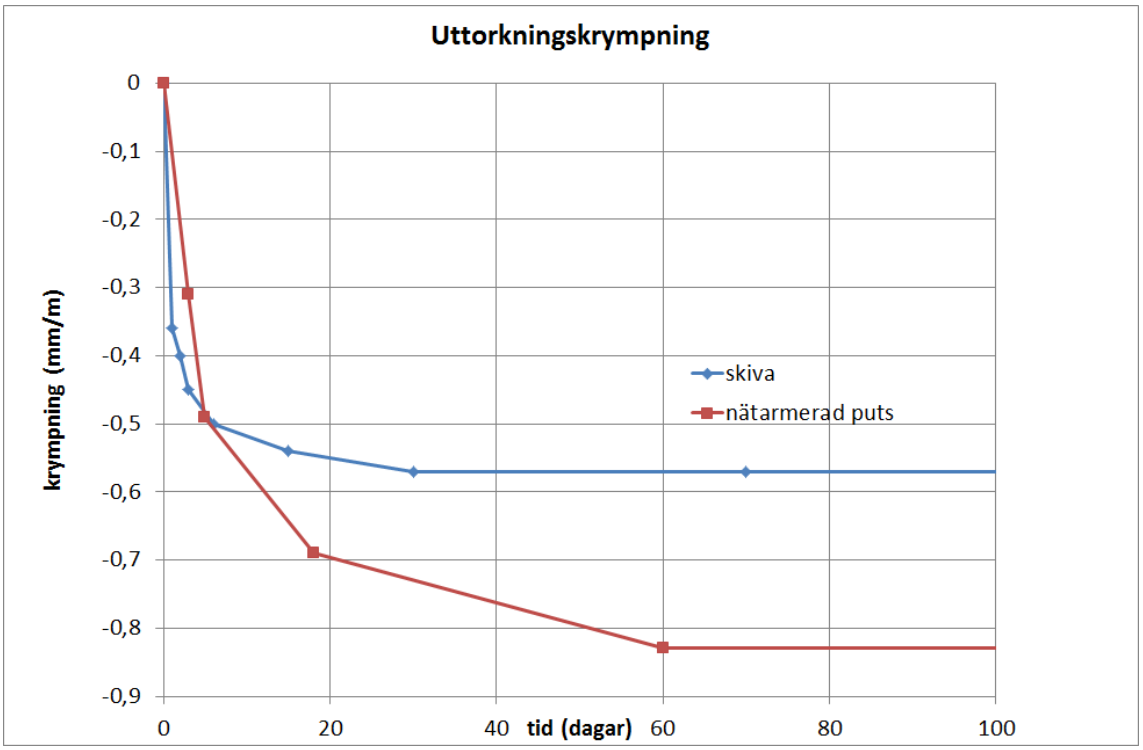
5.1.3 Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning mättes genom att provkroppar av skivmaterial och puts tilläts torka ut i laboratoriemiljö vid en temperatur på 20-22 garder C samt relativ fuktighet 30-40 % från ett fukttillstånd motsvarande det vid nytillverkning. Resultat erhållna för skivmaterial Aquapanel Outdoor och puts SERPO 261 Putsbruk EF visas i Figur 5.1.1.

Iakttagelser

Under de första 7 dagarna uppvisar skivorna en krympning i storleksordningen 0.50 mm/m, vilket motsvarar närmare 90 % av den totala uttorkningskrympningen på 0.55 mm/m, se Figur 5.1.1. Efter dag 30 skedde i praktiken ingen krympning alls. Viss krympning orsakad av uttorkning kan ha inträffat även under den tid skivorna lagrades inpackade i plast samt i samband med hantering av provkropparna. Även en viss självuttorkningskrympning krympning (autogen krympning) bör ha inträffat i skivorna under de 3 månader som gick från tillverkningen i Tyskland och labbmätningarnas start. Från undersökningsresultat presenterade i Tazawa & Miyazawa (1995) och Li et al. (2010) kan denna självuttorkningskrympning uppskattas till 0.2-0.5 mm/m.

Beteendet i nätarmerad puts är likt det som observerades hos skivmaterialet. Efter de 7 första dagarna registrerades en krympning på 0.55 mm/m, vilket motsvarar cirka 65 % av den totala uttorkningskrympningen på 0.85 mm/m, se Figur 5.1.1. Skillnader i förloppen vad gäller uttorkningskrympning hos putsen respektive skivorna kan därmed ha en viss inverkan på deformations- och spänningstillstånden i putsade skivkonstruktioner.



Figur 5.1.1 Uttorkningskrympning hos skivor Aquapanel Outdoor och puts SERPO 261 Putsbruk EF. Skivor och puts förvarades i plastförpackning och tilläts torka i laboratoriemiljö vid T=20-22 grader C och relativ fuktighet RF=30-40 %.

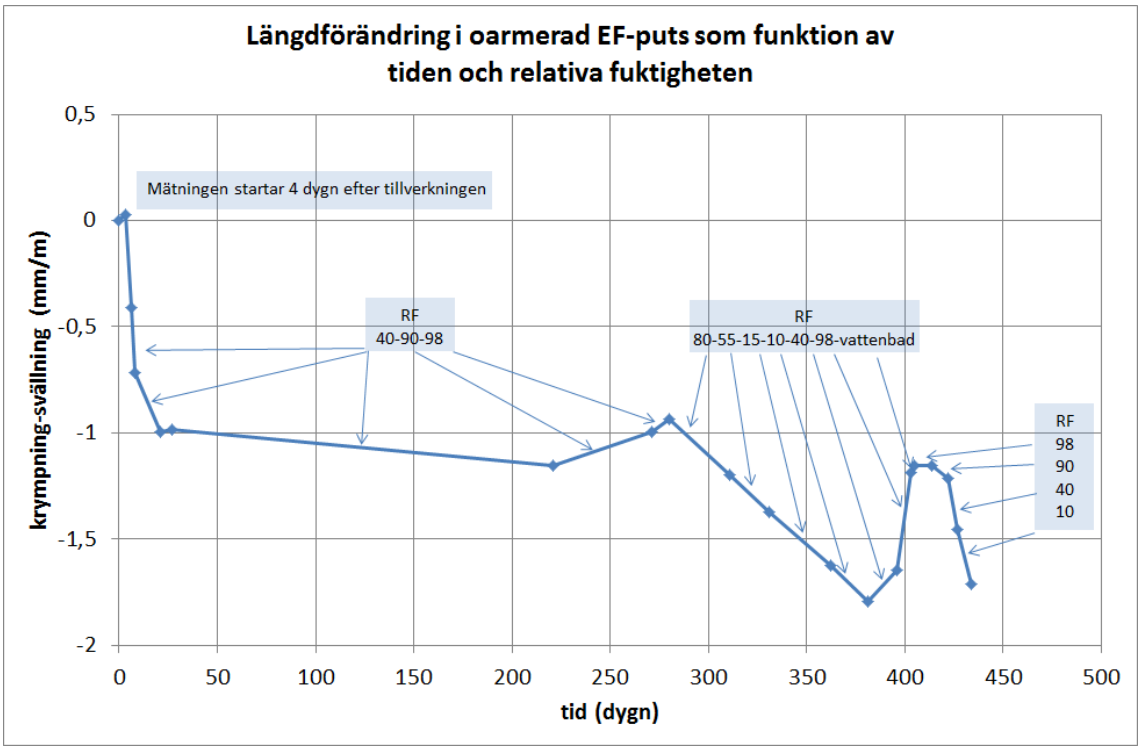
Oarmerad puts uppvisar vid varje mättillfälle högre värden på uttorkningskrympningen jämfört med den nätarmerade putsen. Uttorkningskrympningens slutvärde var 1.2 mm/m för oarmerad puts och 0.85 mm/m för nätarmerad puts. Skillnaden i uttorkningskrympning på 30 % är större än vad som skulle kunna förväntas med tanke på skillnaden i sammansättning mellan oarmerad respektive nätarmerad puts. Det har inte hittats någon logisk förklaring till den observerade skillnaden.

5.1.4 Fuktrelaterat beteende efter den första uttorkningsfasen

Förändringar i porsystemet hos cementbaserade putser och skivor som sker på grund av karbonatisering förändrar materialens egenskaper med avseende på både fuktupptagning och fuktrelaterade rörelser, Kamimura et al (1965). Effekten av karbonatisering är störst vid första uppfuktningen och avtar successivt. Hur snabbt denna effekt förväntas klinga av är för närvarande inte känt, Sandin (2002). För att fånga upp det fuktrelaterade beteendet efter den första uttorkningsfasen, har provkroppar av puts behandlats enligt följande:

- Cykel 1 - dygn 0-221, uttorkning vid cirka RF 40 %;
- Cykel 2 - dygn 222-280, stegvis uppfuktning till RF 98 %;
- Cykel 3 - dygn 281-381, stegvis uttorkning till RF 10 %;
- Cykel 4 - dygn 382-405, stegvis uppfuktning/vattenbad;
- Cykel 5 – dygn 405-434, stegvis uttorkning till RF 10 %.

Beteendet med avseende på fuktrelaterad rörelse visas för en provkropp av oarmerad puts i Figur 5.1.2.



Figur 5.1.2 Längdförändring i oarmerad EF-puts som funktion av tiden och relativa fuktigheten

Iakttagelser

Under de två uttorkningscyklerna (cykel 3 och cykel 5) är krympningen 0.85 mm/m i första cykeln och 0.55 mm/m i andra cykeln. Krympningen uppvisar en minskande trend vid upprepade uttorkningar, vilket är i överensstämmelse med observationer i Sandin (2002). Fler cykler av uppfuktning-uttorkning hade behövts för att fastställa när effekten av karbonatiseringskrympningen klingar av.

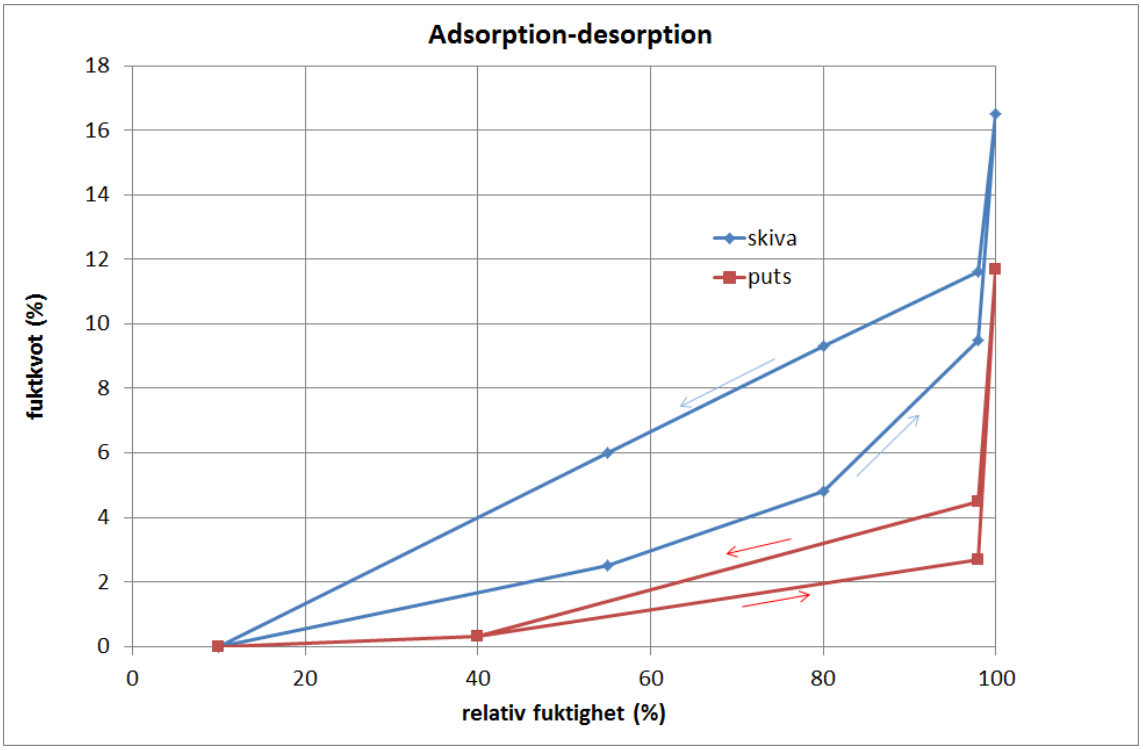
Den slutliga nivån på krympningen för oarmerad puts hamnar i genomsnitt på 1.5 mm/m. Upprepade fuktrelaterade rörelser kommer att äga rum kring detta genomsnittliga värde med en maximal amplitud på 0.55 mm/m.

Nätarmerad puts uppvisar samma principiella beteende som kan observeras hos oarmerad puts. Den slutliga nivån på krympningen hamnar i genomsnitt på 1.1 mm/m, medan amplituden på de återkommande fuktrelaterade rörelserna är 0.5 mm/m, se även avsnitt 5.1.5.

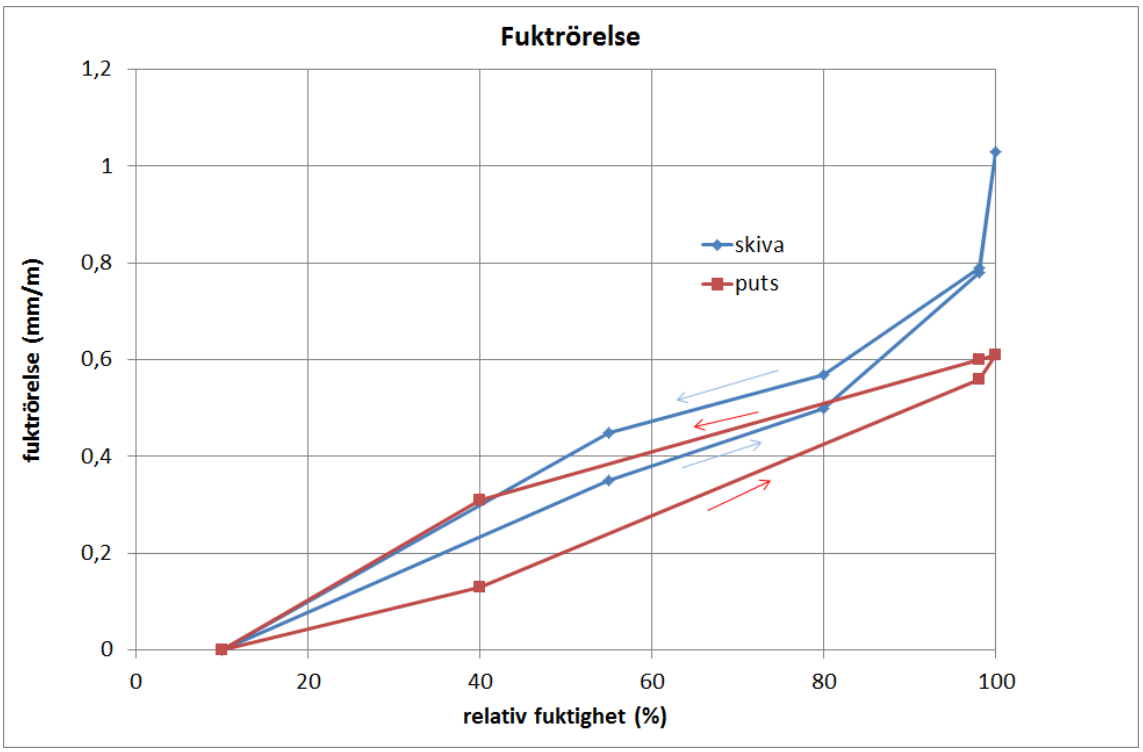
5.1.5 Fuktupptagning - fuktavgivning samt tillhörande rörelser

Fuktupptagning och fuktavgivning (adsorption och desorption) studerades genom att provkropparna utsattes för en cykel av uppfuktning med efterföljande uttorkning i ett klimatskåp med reglerbar relativ fuktighet och temperatur. Förändringar av provkropparnas fuktinnehåll mättes med våg med en mätnoggrannhet på 0.01 gram. Provkropparna förvarades i samma klimat tills förändringen i fuktkvot vid två på varandra följande mätningar genomförda med två dagars mellanrum var mindre än 0.1 %. Den relativa fuktigheten i klimatskåpet varierades mellan 10 – 98 % och temperaturen hölls vid 20 grader C. Uppfuktning av provkropparna gjordes genom nedsänkning i vattenbad under fem dagar. Mätning av fuktrörelser som inträffade på grund av förändringar i materialens fuktinnehåll genomfördes på samma provkroppar som användes vid mätningen av adsorptions-desorptionsegenskaperna. Fuktupptagning-fuktavgivning samt tillhörande rörelser har bestämts för skivmaterialet, oarmerad och armerad puts samt putsad nätarmerad skiva, se fler detaljer i Molnár

(2013). I Figur 5.1.3 och 5.1.4 visas en sammanställning från mätningarna på skivmaterialet och den nätarmerade putsen.



Figur 5.1.3 Adsorptions-desorptionskurva för skivor Aquapanel Outdoor och nätarmerad EF-puts (medelvärden).



Figur 5.1.4 Fuktrörelser i skivor Aquapanel Outdoor och nätarmerad EF-puts (medelvärden). Mätningarna genomförda på samma provkroppar som i Figur 5.1.3.

Iakttagelser av fuktupptagnings-fuktavgivningsbeteendet

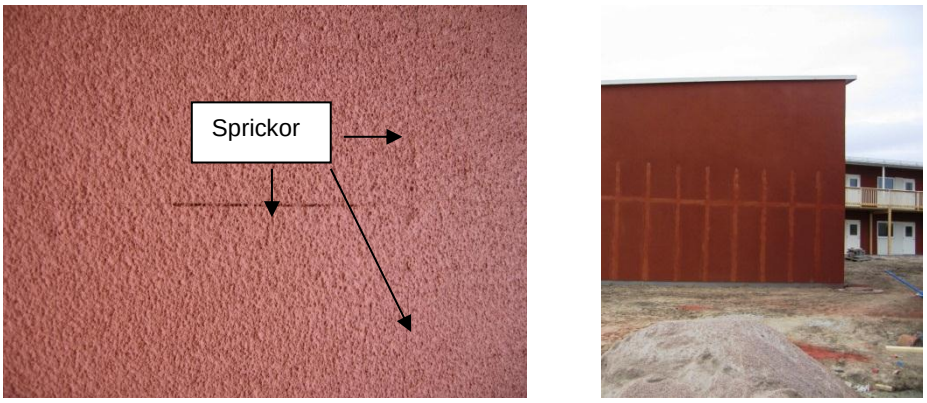
Aquapanelskivorna uppvisar ett adsorptions-desorptionsbeteende som är typiskt för cementbundna material. Vid uppfuktning till relativa fuktigheten 98 % erhålles en fuktkvot på cirka 10 %. Efter vattenlagring under flera dygn ökar fuktkvoten till över 15 %. I desorptionsfasen är fuktkvoten 3-4 procentenheter högre jämfört med adsorptionsfasen. Putsens egenskaper med avseende på fuktupptagning och fuktavgivning uppvisar principiella likheter med motsvarande egenskaper hos skivmaterialet. Den största skillnaden är att fuktkvotsnivåerna i putsen inom det hygroskopiska området är endast hälften så stora som motsvarande i skivmaterialet. Detta beror med stor sannolikhet på tillsatser med hydrofoberande egenskaper. Fuktkvoten vid RF 40 % är cirka 0.5 %, vid RF 98 % cirka 3.5 %. Efter fem dygns nedsänkning i vatten är putsens fuktkvot cirka 12 %.

Iakttagelser av fuktrelaterade rörelser

Fuktrörelserna i skivmaterialet i samband med uppfuktning-uttorkning ligger inom intervallet 0.8-1.0 mm/m. Putsen uppvisar stora likheter med skivmaterialet även med avseende på fuktrelaterade rörelser. Spannet för fuktrörelser vid uppfuktning från RF 10 % till blött tillstånd är i intervallet 0,6-0,7 mm/m, vilket är cirka 20-30 % mindre än motsvarande rörelser hos skivmaterialet. Den aktuella putsen och skivmaterialet har snarlika egenskaper med avseende fuktrörelser på men skillnaderna i rörelsemönstret kan ge upphov till viss transversell deformation.

5.2 Sprickfördelande egenskaper

Trots att fasader med putsade ventilerade skivor marknadsförs som mycket tåliga, är tillgången på kvantitativ information som möjliggör analyser av fasadlösningens långsiktiga funktion begränsad. Med tanke på att fasadlösningen är förhållandevis ny i Sverige, är det viktigt att aktörer inblandade i projekteringen och byggandet förses med underlag som möjliggör självständiga analyser av fasadens mekaniska funktion, lämpligheten i val av delkomponenter samt vid utformning av olika detaljer. Brist på den här typen av information kan, i kombination med begränsad erfarenhet, leda till felaktig utformning av putsade ventilerade fasader. Figur 5.2.1 visar en putsad ventilerad fasad med omfattande sprickbildning orsakad av bland annat utelämnad skarv- och putsarmering.



a) b)

Figur 5.2.1 Nybyggd putsad ventilerad fasad. a) Vertikala och horisontella sprickor vid skivskarvarna på grund av utelämnad skarv- och putsarmering; b) Misslyckad reparation med nya sprickor.

Beteendet hos dragbelastade provkroppar av putsade skivor har undersökts på experimentell väg. Den putsbärande skivan var Aquapanel Outdoor från Knauf Danogips och putsen var en produkt med

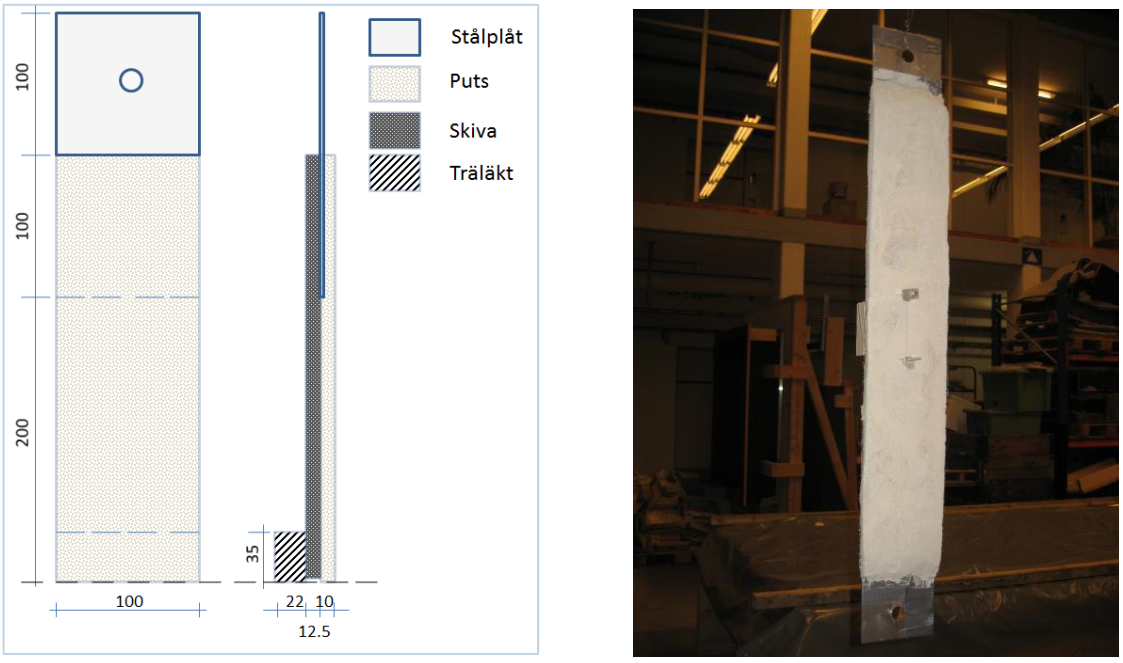
beteckningen SERPO 261 putsbruk EF från Weber Saint Gobain Byggprodukter AB. Undersökningen inriktades på: a) uppskattning av påtvingade deformationer som ger upphov till dragsprickor; b) karakterisering av uppsprickningsmönstret; c) inverkan av skarv- och putsarmeringen på sprickbildningen.

5.2.1 Provkroppar

Provkroppar med måtten 600x100x22.5 mm användes. Provkropparna tillverkades enligt följande:

- skivbitar med måtten 300x100x12.5 mm sågades ut;
- skivbitarna försågs med dragplåtar av stål som limmades fast med epoxylim;
- två skivbitar placerades i varandras förlängning och ett 100 mm brett område runt skarvarna spacklades med weber set 610 multi. I det färska spacklet applicerades 411 Skarvarmering;
- efter spacklets härdning applicerades cirka 7 mm puts SERPO 261 putsbruk EF. I det färska bruket inarbetades armering av glasfibernät weber therm 397 EF-nät;
- när det första putsskiktet var härdat påfördes ytterligare cirka 3 mm puts SERPO 261 putsbruk EF.

Två olika typer av provkroppar togs fram. I ena fallet tillverkades provkropparna med skivskarvar förankrade mot träläkt, se Figur 5.2.2. I andra fallet sammanfogades skivorna utan förankring mot läkt, föreställande så kallade fria skarvar. Provkropparna fick härda 7 dygn under plast, varefter de förvarades i laboratoriemiljö med temperatur kring 20 grader C och relativ fuktighet kring 40 %. Vid provningstillfället var provkropparna 28 dygn gamla eller äldre.



a) b)

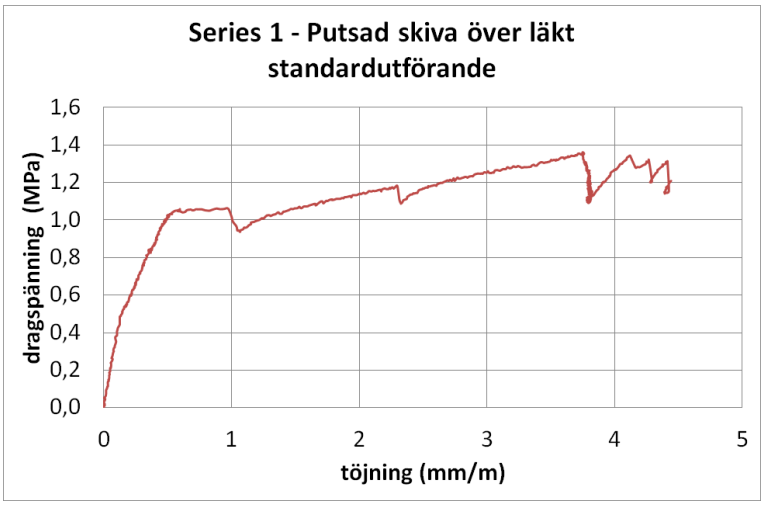
Figur 5.2.2 Provkroppar av putsade Aquapanel Outdoor-skivor. a) skiss av en halv provkropp med skarv förankrad mot träläkt; b) provkropp med pålimmade givarfästen.

Dragbelastningen av provkropparna genomfördes i en provningsmaskin under konstant deformation. Deformationerna registrerades genom induktiva lägesgivare (LVDT). Sprickbildningen observerades

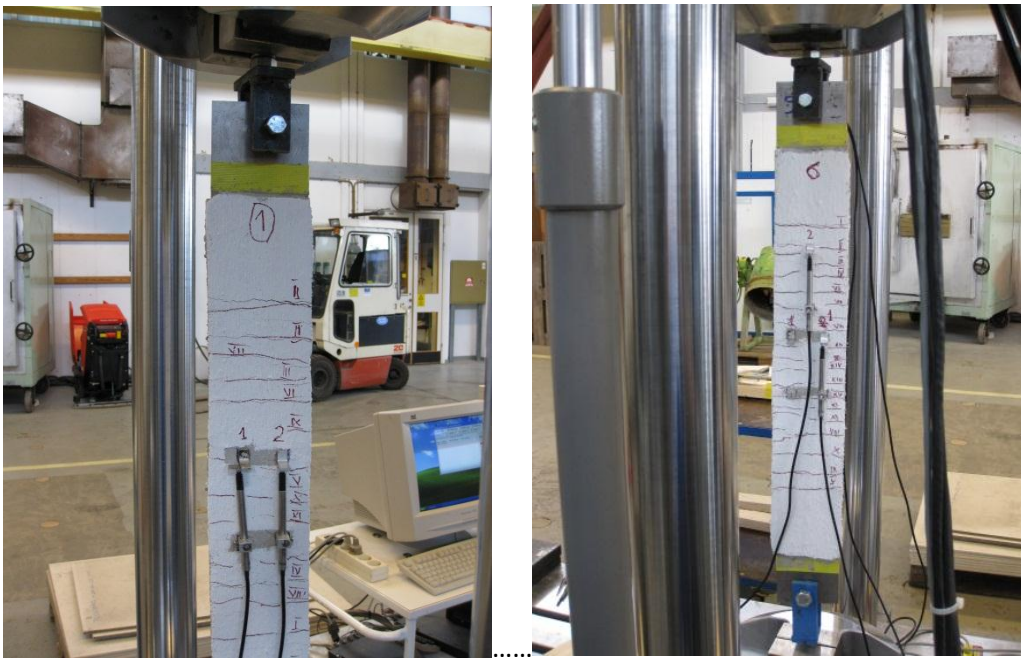
genom kontinuerlig okulär observation – synliga sprickor markerades med röd spritpenna. Ordningen i vilken sprickan uppkom antecknades direkt på provkroppen, samtidigt som aktuell lastnivå registrerades.

5.2.2 Resultat

Typisk spännings-töjningskurva uppmätt i området nära skarven visas i Figur 5.2.3. Sprickmönster vid höga värden på den påtvingade deformationen (töjning större än 5 mm/m) visas i Figur 5.2.4.



Figur 5.2.3 Spännings-töjningskurva för putsad skiva



Figur 5.2.4 Sprickmönster vid höga värden på den påtvingade deformationen (töjning större än 5 mm/m). Sprickorna har markerats med röd spritpenna för att framhäva sprickmönstret.

Iakttagelser

De viktigaste iakttagelserna när det gäller dragbelastade putsade skivor är följande:

- De första sprickorna uppstår vid en töjning motsvarande 0.4 – 0.5 mm/m, vilket motsvarar en dragspänning på cirka 1 MPa;
- De första synliga sprickorna uppstår utanför skarvzonen - försöken har inte kunnat visa att skarvområdet utgör någon svaghetszon;
- Med ökande påtvingad deformation uppstår fler sprickor och att vid en töjning motsvarande 4-5 mm/m är hela provkroppen uppsprucken. Medelavståndet mellan sprickorna varierar mellan 25 – 40 mm, sprickbredderna mellan 0.1 – 0.2 mm;
- Efter avlastning minskar sprickbredderna till under 0.02 mm, vilket är knappt synligt för ögat;

I det praktiska byggandet förekommer att man av misstag utelämnar skarv- eller putsarmeringen. Försök har genomförts för att påvisa effekterna av dessa två avvikelser.

Försöksresultaten antyder att skarvarmeringen skulle utan några negativa konsekvenser kunna utelämnas vid skarvar fästa mot läkt. Skarvarmering ska däremot appliceras vid fria skarvar, då just den delen av den putsade skivan där skarvarmeringen finns överför en koncentrerad dragkraft.

Försöken visar att utelämnad putsarmering leder till att färre men bredare sprickor uppstår, vilket inverkar negativt på fasadens beständighet och utseende.

5.3 Analys av påkänningar orsakade av temperatur- och fuktvariationer

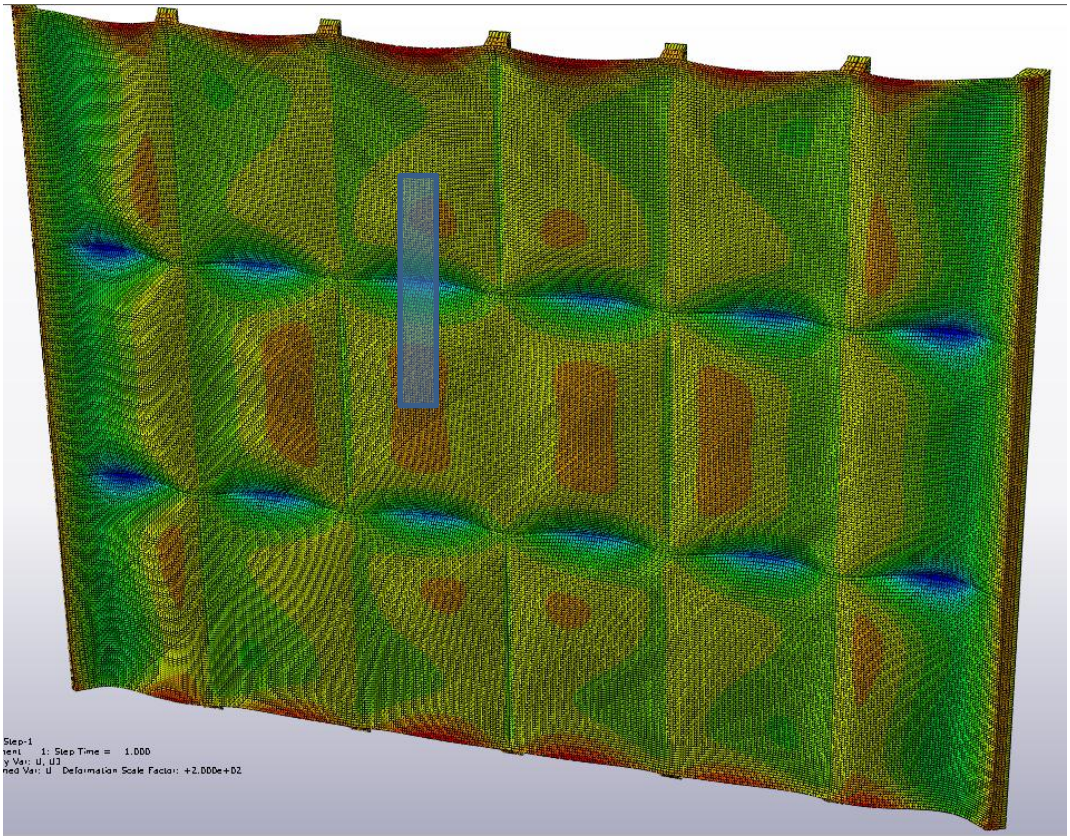
I föregående avsnitt har inverkan av fuktrelaterade rörelser i cementbaserade skivor, puts och putsades skivor studerats. I studien har den obehindrade, så kallade fria rörelsen studerats, vilket belyser hur materialen reagerar på fuktbelastning. I verkliga fasadkonstruktioner är putsade skivor infästa mot läktsystemet, vilket hindrar fria rörelser. Därmed uppstår påkänningar i skivan och putsen, vilka kan leda till sprickbildning. Rörelser i läktsystemet eller i väggarna kan också bidra till rörelser och påkänningar i putsade skivor – detta belyses närmare i avsnitt 5.4.

5.3.1 Simulering av putsade skivors mekaniska beteende

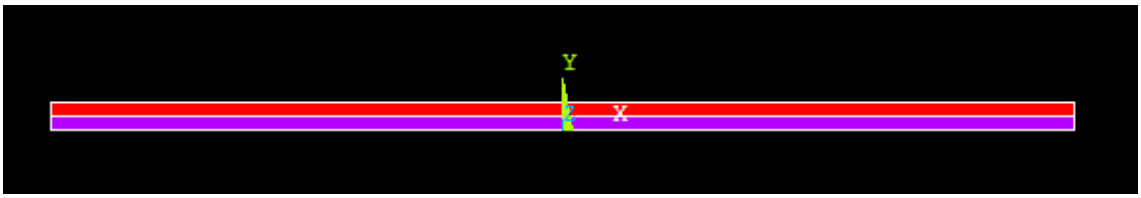
Inverkan av temperatur och fuktrörelser på putsade skivors beteende analyserades genom finit elementsimulering på tvådimensionella modeller. Simuleringsresultaten har verifierades genom handräkning och finit elementsimulering på en tredimensionell modell. En parameterstudie genomfördes för att visa på betydelsen av olika materialegenskaper, delkomponenter och av geometriska förhållanden på putsade skivors mekaniska beteende.

Merparten av analyserna genomfördes på en remsa av en putsad skivfasad innehållande en fri skarv. Valet motiveras av att den fria skarven utgör ett diskontinuitetsområde i konstruktionen. Skarvar som är fästa mot läkterna med hjälp av skruvar utgör också diskontinuitetszoner men det mekaniska beteendet här styrs i mycket hög grad av läkternas mekaniska egenskaper.

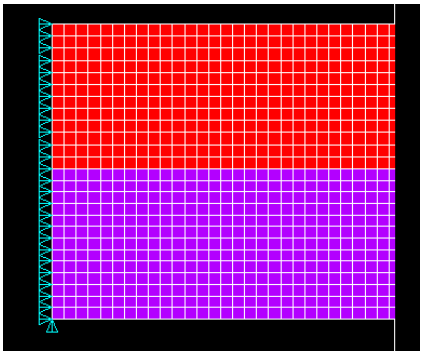
Finita elementmodellens uppbyggnad visas i Figur 5.3.1 och materialegenskaperna i Tabell 5.3.1.

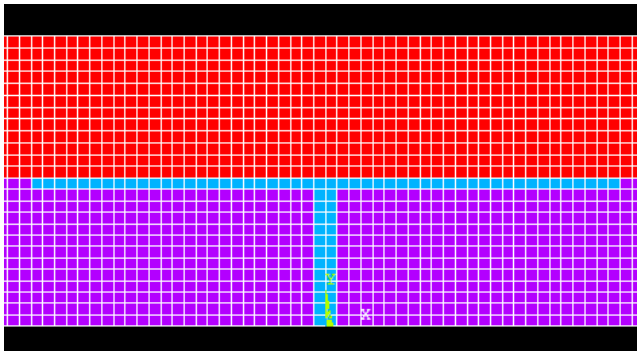


a)



b)





c) *d)*

Figur 5.3.1 Modell som användes i finita elementsimuleringarna. a) 3D-modell – markeringen visar området som används i 2D-simuleringen; b) 2D-modell av en 900 mm lång putsad skivremsa; c)randvillkor vid modellens vänstra ände; d) detalj av modellens centrala del med glidskikt och fri skarv.

Tabell 5.3.1 Materialegenskaper använda i simuleringsmodellerna

Material	Skikttjocklek (mm)	E-modul (GPa)	Längdutvidgningskoefficient (-)xe-6
Skiva (Aquapanel Outdoor)	12.5	8	7
Puts (SERPO 261 EF)	12	6	10
Spackel (Weber set 610 multi)	12.5	0.1	10

Finita elementsimuleringarna i 2D genomfördes med hjälp av det kommersiella programmet Ansys. Temperatur- och fuktlasterna simulerades som termiska laster av storleksordningen en temperaturenhet. Den termiska lasten applicerades enbart på den putsade skivan medan när det gäller läktsystemet antogs att detta var fast inspänt mot underlaget och inte påverkades av några termiska laster. I och med att all simulering genomfördes med linjärelastiska materialegenskaper, kan spänningar och töjningar vid godtyckliga temperatur- och fuktlaster uppskattas genom proportionell upp- eller nedskalning.

När det gäller kraftöverföring genom skivskarvarna, har det antagits att spackelmassan som används för att fylla ut glappet mellan skivorna inte genomför några laster i dragbelastning. I tryckbelastning antas krafter kunna föras över den spacklade skarven men totalt sett betraktas denna kraftöverföring ha en begränsad effekt på grund av spackelmassans förhållandevis låga styvhet.

Armeringen av glasfibernät i putsen har inte modellerats som ett separat material, utan det har antagits att putsen utgör ett homogent skikt med putsens mekaniska egenskaper. Denna förenkling har begränsad inverkan på finita elementsimuleringar där de ingående materialen antas ha linjärelastiska egenskaper och analysens syfte är att jämföra spänningsnivåer.

Analyserna på den tredimensionella modellen genomfördes i det kommersiella finita elementprogrammet Brigade. Samma materialegenskaper har använts som i 2D-simulerigarna. I likhet med 2D-fallet, applicerades de termiska lasterna på enbart den putsade skivan medan det fast inspända läktsystemet antogs vara opåverkat av den termiska lasten.

Handräkningen genomfördes på en modell lik den som användes i 2D-simuleringen. Spänningar uppskattades genom att utgå från kraft- och momentjämvikt.

5.3.2 Resultat från simuleringen av putsade skivors mekaniska beteende

Två områden kan urskiljas med avseende på respons för aktuell belastning:

- Ett cirka 50-100 mm brett område ömse sidor om den fria skarven, vilket motsvarar glidskiktets bredd i skarvarmeringen;
- Områdena utanför den fria skarven enligt ovan.

Jämförelse av resultaten från simuleringarna samt handräkningen

Resultat som erhölls med finit elementsimuleringar på 2D- respektive 3D-modeller visar god överensstämmelse både kvalitativt och kvantitativt. En svårighet som uppstår när simuleringsresultat från 2D- och 3D-modeller ska jämföras är att randvillkoren inte hanteras på samma sätt. Detta gör att modeller skapade i 2D respektive 3D leder till vissa avvikelser, t.ex. olika absoluta nivåer på spänningsfördelningar eller deformationer. Arbetsinsatsen för att ta fram en 3D modell av en putsad ventilerad fasad och genomföra förhållandevis enkla linjärelastiska beräkningar är omfattande.

Överenstämmelsen mellan finit elementsimuleringarna och handräkningen gav rimlig överensstämmelse. Båda metoderna pekar ut samma områden som mest respektive minst belastade, dock var avvikelserna när det gäller spänningsnivåer i vissa fall stora. Skillnaderna kan återigen förklaras genom olikheter avseende randvillkoren. Resultaten som fås med hjälp av handräkningsmetoden påverkas förhållandevis mycket av beräkningsantagandena, vilket bör betraktas som en nackdel.

Slutsatsen från datorsimuleringarna och handberäkningen är att en tvådimensionell finit elementanalys levererar stabila och tillförlitliga resultat med en rimlig arbetsinsats. I situationer då komplicerade detaljer ska undersökas kan det dock vara motiverat att genomföra simuleringarna på tredimensionella modeller.

Temperatur- och fuktgradienter

Effekten av temperatur- och fuktbelastningens fördelning genom det putsade skivtvärsnittet har studerats för två vanligt förekommande situationer: a) jämn temperatur- och fuktfördelning, det vill säga ingen gradient; b) linjär gradient i enbart putsen, enbart i skivan eller i både skivan och putsen.

Simuleringarna visar att områden utanför dem fria skarvarna uppvisar en spännings- och töjningsfördelning som i praktiken är proportionell mot den termiska lasten. Vid fria skarvar sker en omlagring av spänningarna på grund av den lokala tvärsnittsförändringen. Merparten av alla krafter överförs i detta område genom putsskitet.

Vid en sammandragning som orsakas av en jämn temperaturfördelning i hela fasadkonstruktionen (det vill säga ingen gradient genom tvärsnittet) uppstår de största dragspänningarna i putsens underkant. Skarvarmeringen spelar en aktiv roll i kraftöverföringen över skarven. Beroende på förhållandet mellan skivans och putsens tjocklek, utsätts putsens utsida för tryckt- eller dragpåkänningar. De kritiska dragspänningarna finns dock i putsens underkant. Påkänningarna här är två-tre gånger större än i putsen utanför skarvområdet. Det omvända gäller för fallet när det sker en utvidgning. I detta fall uppstår de största dragspänningarna i närheten av putsens yta.

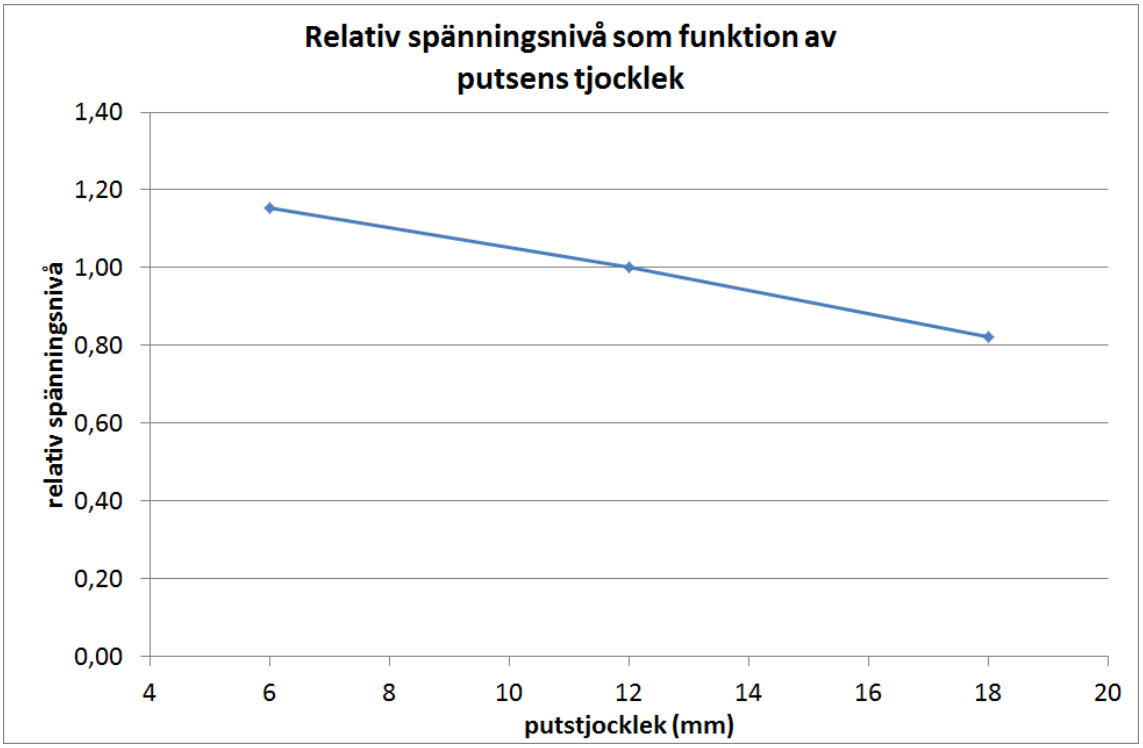
Vid sammandragning eller utvidgning som orsakas av gradienter i putsen, skivan eller i båda materialen, är resulterande spänningar och töjningar generellt lägre jämfört med fallet med jämn temperaturfördelning. Påkänningarna minskar mest runt den fria skarven.

Den experimentella studien i avsnitt 5.2 visar att dragbelastade putsade skivor spricker vid påtvingade deformationer av 0.5 mm/m eller högre. Den termiska längdutvidgningskoefficienten hos den studerade skiv- och putsmaterialet är cirka 10e-6 1/^{o}C. Detta innebär att det krävs en temperaturförändring på cirka 50 grader för att åstadkomma en spricka i en putsad skivfasad. Detta kan inträffa om putsen färgats i en mörk kulör, t.ex. svart. Vid ljusare kulörer kommer temperaturförändringarna vara lägre. Studien av fuktrelaterade längdförändringar i putsade skivor i avsnitt 5.1 visar att både initialkrympningen och återkommande fuktrörelser orsakade av variationer i luftens relativa fuktighet kan vara större än de 0.5 mm/m som krävs för att initiera sprickor. Rörelser i läktsystemet, t.ex. om trä används, kan också åstadkomma rörelser som överstiger sprickgränsen.

Putsskiktets tjocklek

Effekten av putsskiktets tjocklek har undersökts för fallet med jämn temperaturfördelning över hela fasadkonstruktionen. Den putsbärande skivans tjocklek är 12.5 mm. Den relativa förändringen i

maximal dragspänningsnivå i närheten av fria skarvar redovisas i Figur 5.3.2. Putsskiktets tjocklek påverkar inte påkänningarna utanför de fria skarvarna.



Figur 5.3.2 Inverkan av putsens tjocklek på de relativa spänningsnivåerna i närheten av fria skarvar. Skivtjocklek 12.5 mm.

Av Figur 5.3.2 framgår att en ökning av putsens tjocklek från 12 mm till 18 mm minskar påkänningarna med cirka 20 %. Påkänningarna ökar med cirka 15 % om putstjockleken minskar till 6 mm. Ur spricksäkerhetssynpunkt är ett tjockt putsskikt därmed fördelaktigare än ett tunt putsskikt. Det bör samtidigt nämnas att putsarmeringens sprickbreddsbegränsande effekt är testad för provkroppar med putstjocklek 10 mm, se resultat i avsnitt 5.2. Det är inte helt klarlagt om ett enda lager putsarmering skulle fungera lika effektivt om putstjockleken ökade till 15 mm eller ännu större.

Glidskiktet

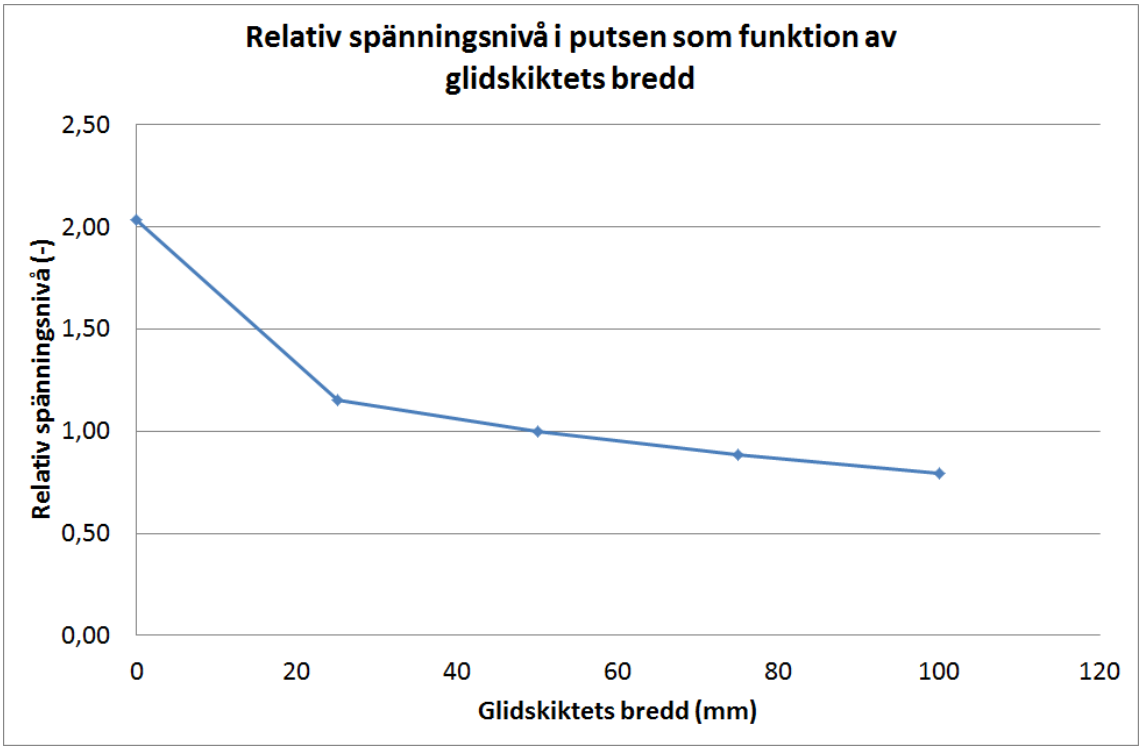
Glidskiktet som finns inbyggt i skarvarmeringen har som funktion att begränsa påkänningarna i närheten av fria skarvar. Inverkan av utelämnat glidskikt samt av glidskiktets bredd visas i Figur 5.3.3. Glidskiktets närvaro påverkar inte påkänningarna utanför de fria skarvarna.

Av Figur 5.3.3 framgår att glidskiktet har en mycket positiv inverkan när det gäller att begränsa påkänningarna runt fria skarvar. Utelämnat glidskikt ger cirka dubbelt så stora påkänningar jämfört med en skarv där man har glidskikt, oavsett glidskiktets bredd. En ökning av glidskiktets bredd från det vanligt förekommande 50 mm till 75-100 mm skulle minska påkänningarna i närheten av fria skarvar med ytterligare 15-20 %.

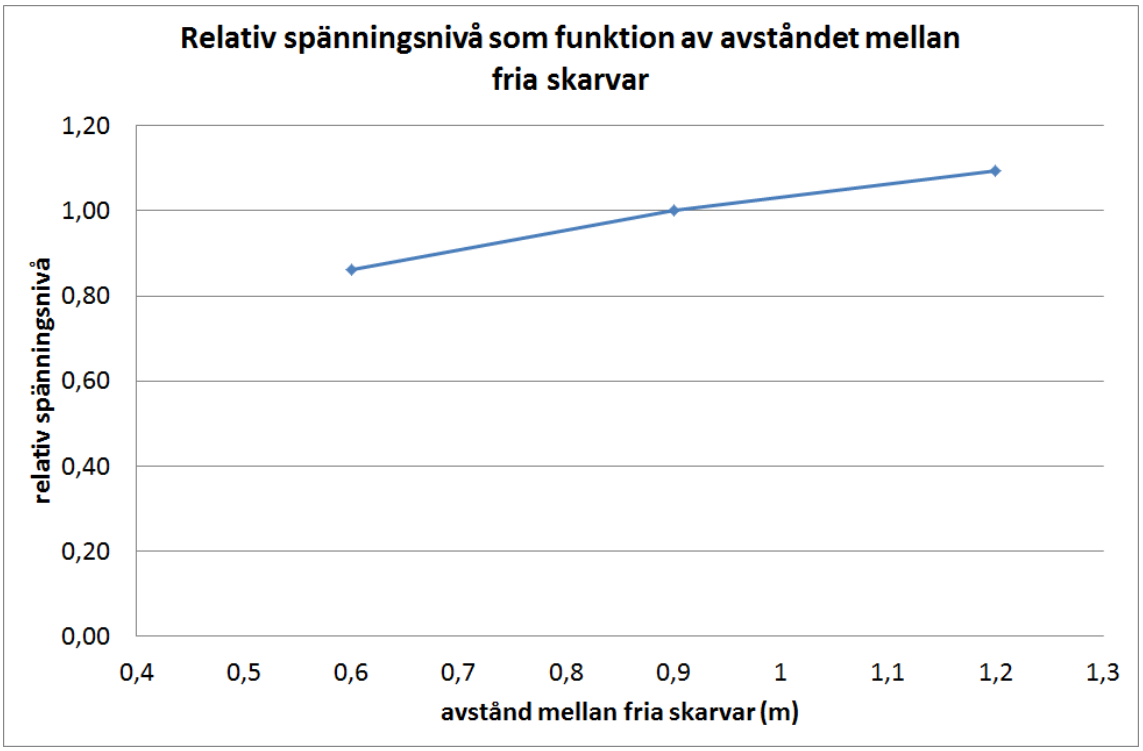
Avståndet mellan fria skarvar

Avståndet mellan fria skarvar bestäms av skivornas storlek. Skivorna som ingick i denna studie hade måtten 1200x900x12.5 mm, vilket ger ett avstånd på 900 mm mellan de fria skarvarna. Inverkan av avståndet mellan de fria skarvarna på de relativa spänningsnivåerna i närheten av de fria skarvarna

visas i Figur 5.3.4. Avståndet mellan de fria skarvarna har begränsad inverkan på påkänningarna utanför de fria skarvarna.



Figur 5.3.3 Inverkan av glidskiktets bredd på de relativa spänningsnivåerna i närheten av fria skarvar.



Figur 5.3.4 Inverkan av avståndet mellan de fria skivskarvarna på de relativa spänningsnivåerna i närheten av fria skarvar.

Parameterstudien visar att avståndet mellan de fria skarvarna, vilket indirekt bestäms av den putsbärande skivans geometri, har viss inverkan på de relativa spänningsnivåerna i närheten av fria skarvar. Kortare skivor ger lägre påkänningar, vilket i kombination med lättare hantering av skivorna på arbetsplatsen torde utgöra en intressant effektiviseringsmöjlighet.

Samverkande effekter

Undersökningen av olika parametrars inverkan på putsade fasaders mekaniska funktion visar att genom medvetna val kan påfrestningarna på fasadkonstruktionen begränsas. Genom att kombinera två eller fler olika åtgärder, såsom större putstjocklek, bredare glidskikt och kortare avstånd mellan de fria skarvarna, kan nivån på påkänningarna i närheten av fria skarvar sänkas med 30-40 %.

5.4 Kvantitativ analys av putsade ventilerade skivfasaders sprickrelaterade beteende

Den experimentella studien i avsnitt 5.1. visar att putsade ventilerade skivor av cementbaserade material uppvisar fuktrelaterade rörelser upp till 1.5 mm/m. Studien i avsnitt 5.2 visar att dragsprickor uppstår om storleken på de påtvingade rörelserna är större än 0.5 mm/m. Av samma experimentella studie framgår att sprickbredderna är mindre än 0.2 mm upp till deformationsnivåer motsvararande 4-5 mm/m. Detta betyder att putsade skivor av cementbaserade material förankrade mot underlag som inte leder till större deformationer än 4-5 mm/m kommer att utveckla ett sprickmönster där sprickornas bredd håller sig inom en acceptabel gräns. Motsvarande analyser av det sprickrelaterade beteendet är fullt möjliga att genomföra för putsade skivfasader med andra komponenter.

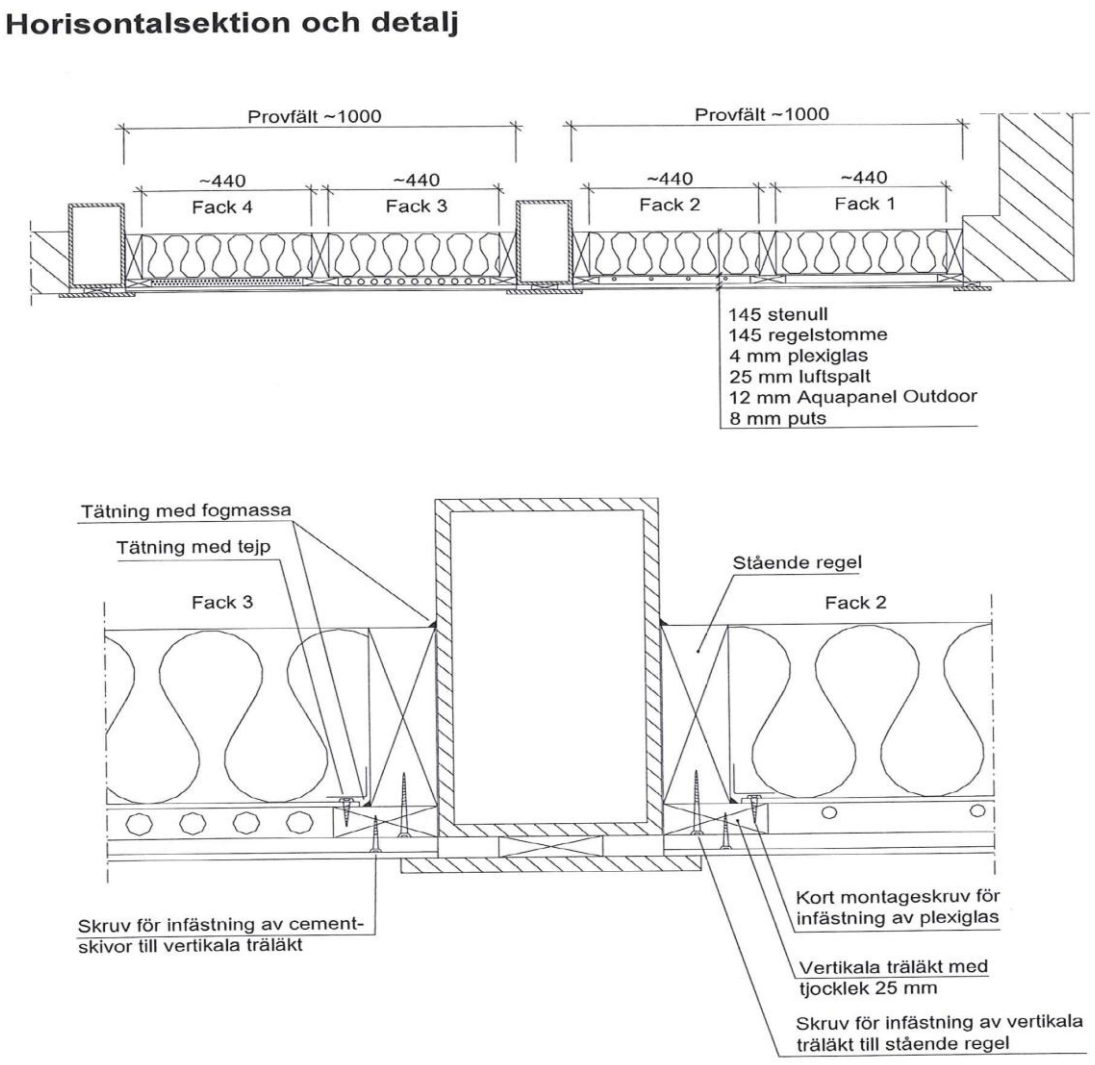
5.4.1 Fältstudie av temperatur- och fuktrelaterade rörelser i putsad ventilerad skivfasad

En fältstudie genomfördes för att studera deformationer hos en putsad ventilerad skivfasad. Resultaten från mätningarna användes för att verifiera om beteendet hos den här typen av fasadkonstruktioner är möjliga att förutse genom beräkning.

Väggen med den ventilerade fasaden ingår i ett provhus i Lund, i närheten av Lunds Tekniska Högskola. Från början uppfördes de putsade ventilerade fasaderna för att studera luftomväxlingar i spalten mellan den putsade fasadskivan och den bakomliggande väggen, Falk (2010). Den aktuella fasaden består av:

- cementbaserade skivor Aquapanel Outdoor med tjockleken 12.5 mm;
- puts SERPO 261 Putsbruk EF med tjockleken 8-9 mm;
- vertikala träläkt med måtten 70x25 mm, med en luftspalt på 25 mm till den bakomliggande väggen. Skivorna är förankrade mot de vertikala läkten med självborrande rostfria skruvar;
- vindskyddskiva av plexiglas med tjockleken 10 mm. Plexiglas användes för att underlätta studier av luftrörelser i forskningsprojektet som presenteras i Falk (2010). Skivorna av Plexiglas är fästa mot samma vertikala läkt som de putsbärande skivorna;

Figur 5.4.1 visar fasadens uppbyggnad i horisontell genomskärning. Fasaden byggdes under våren 2008, vilket innebär att initiell krympning i både skivorna och putsen redan hade ägt rum när mätningarna i detta projekt startade i november 2011. Alla horisontella läkt avlägsnades från luftspalten innan mätningarna påbörjades i detta projekt.



Figur 5.4.1 Horisontellt snitt genom provhusets yttervägg med putsad ventilerad fasad. Falk (2010).

Induktiva lägesgivare (LVDT) monterades i fack 3 och 4:

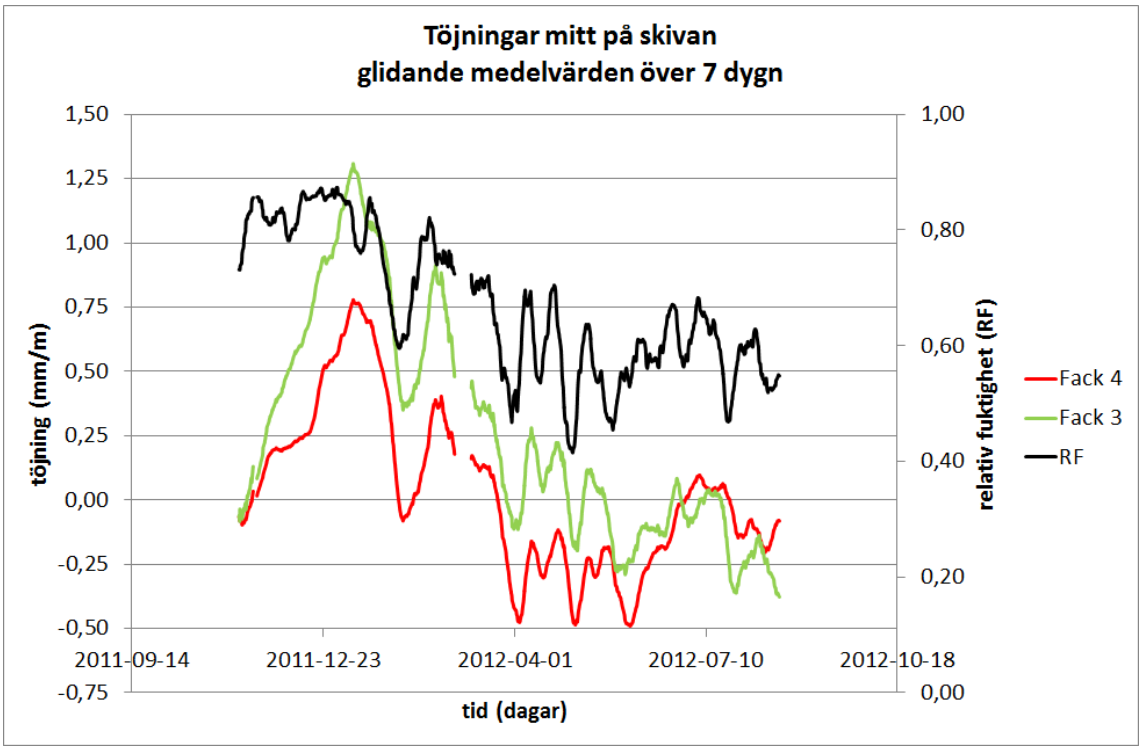
- centriskt på skivorna för att registrera deformationer parallellt med de vertikala träläkten;
- centriskt över den fria skarven mellan två skivor, parallellt med de vertikala träläkten.

Samtidigt loggades temperaturen i skivan 1 mm in från luftspalten samt i luftspalten i tre lägen – i närheten av luftintaget, vid halva höjden samt i närheten av luftutloppet i luftspaltens ovankant. Även relativa fuktigheten loggades i motsvarande lägen.

Mätningarna pågick under perioden 4 november 2011 till 24 augusti 2012. Under samma period skedde viss insamling av klimatdata på taket på V-huset vid Lunds tekniska högskola (ca 100 meter från provhuset) samt vid Ekologihuset (ca 300 meter från provhuset). Viss klimatdata för Lund köptes in från SMHI.

Resultat från fältmätningarna på putsade ventilerade skivor

Resultat från mätningarna av deformationer mitt på de putsbärande skivornas baksida i fack 3 och 4 visas i Figur 5.4.2. Resultaten visar glidande medelvärden över 7 dygn.



Figur 5.4.2 Töjning mitt på de putsbärande skivornas baksida i fack 3 och 4. I diagrammet visas även den relativa fuktigheten vid luftspaltens inlopp. Glidande medelvärden över 7 dygn.

Av Figur 5.4.2 framgår att deformationerna mitt på skivan visar en ökande trend från början av november till början av januari, då maximum uppnås. Storleken på deformationerna motsvarar en ökning av töjningen på mellan 0.75-1.25 mm/m. Detta sker samtidigt som den relativa fuktighetens medelvärde ökar från 75 % till cirka 90 %. Även temperaturens medelvärde ökar med cirka 7 grader under perioden (visas inte i Figur 5.4.2). Följande tolkningar görs av observerat förlopp:

- utvidgningen som kan förväntas på grund av fuktrelaterad svällning i den putsade skivan uppskattas från Figur med hjälp av figur 5.1.4. Enligt figuren sväller skiva och puts cirka 0.2 mm/m, då relativa fuktigheten ökar från 75 % till 90 %;
- utvidgningen på grund av temperaturökningen uppskattas med hjälp av skivans respektive putsens längdutvidgningskoefficienter. Enligt Tabell 5.3.1 är skivans och putsens längdutvidgningskoefficient 7e-6 respektive 10e-6 – i medeltal kan räknas med 8e-6. Utvidgningen beräknas nu som produkten av längdutvidgningskoefficienten multiplicerat med temperaturökning, vilket ger 8e-6 x 7 =0.06 mm/m);
- den sammanlagda utvidgningen är summan av utvidgningen på grund av fuktrelaterad svällning och temperaturökning, vilket ger 0.20+0.06=0.26 mm/m;

Den uppmätta utvidgningen under perioden november-januari är av storleksordningen 0.75-1.25 mm/m, vilket är tre till fem gånger större än den beräknade med utgångspunkt i den putsade skivans materialegenskaper. En första slutsats är att de uppmätta deformationerna mitt på de putsbärande skivorna inte kan förklaras av putsens och skivans rörelser.

I nästa steg undersöks storleken på de förväntade rörelserna i träläkten:

- fuktutvidgningen längs med fibrerna hos trä av nordiskt gran- eller tallvirke uppgår till 0.1 mm/m för varje procentenhets ökning av virkets fuktkvot;
- en 15 procentig ökning av relativa fuktigheten som inträffar under den studerade perioden medför en ökning av virkets fuktkvot med cirka 5 procentenheter. Träläkten, som de putsbärande skivorna är fästa emot, förväntas därmed expandera cirka 0.5 mm/m på grund av uppfuktningen;
- utvidgningen på grund av temperaturökningen hos trä parallellt med fibrerna är cirka hälften av längdutvidgningen hos cementbaserade material, vilket gör att denna ökning försummas;
- träläktens utvidgning beräknas därmed vara 0.5 mm/m;

Den uppmätta utvidgningen under perioden november-januari är av storleksordningen 0.75-1.25 mm/m, vilket är 50-150 % större än den beräknade med utgångspunkt i den putsade skivans materialegenskaper. En andra slutsats blir då att även träläkternas längdutvidgning är mindre än den observerade.

I tredje steg undersöks rörelserna i vidskyddskivan av plexiglasskivan:

- vindskyddsskivan av plexiglas är fäst med hjälp av skruvar mot träläkterna, se Figur 5.4.1, vilket gör att deformationer i plexiglaset påverkar träläkterna och därmed även den putsade skivan;
- den termiska längdutvidgningskoefficienten hos plexiglas uppgår till cirka 100e-6, vilket är tio gånger större än hos cementbaserade material eller stål;
- under perioden november-januari ökar temperaturen ed cirka 7 grader, vilket ger en utvidgning av storlekordningen 0.7 mm/m.

En utvidgning av storleksordningen 0.7 mm/m är i rimlig överensstämmelse med utvidgningar på 0.75 – 1.25 mm/m som observerades på provhusets fasad.

Utvärderingen av observationerna från fältstudien bekräftar att förväntade deformationer hos putsade ventilerade skivor förankrade mot läkt kan uppskattas genom en enklare handräkningsmetod.

5.4.2 Beräkningsexempel

Deformationer och sprickrelaterat beteende undersöks hos en putsad ventilerad fasad förankrad mot vertikala stålläkt. Skivan är av typen Aquapanel Outdoor medan putsen SERPO 261 putsbruk EF. Fasadens principiella uppbyggnad framgår av Figur 5.3.1. Byggnaden finns i Lund och är målad i en ljus kulör. De bärande ytterväggarna av lättbetong är isolerade med en utvändig tilläggsisolering av 50 mm mineralull. Analysen genomförs med hjälp av följande data:

- Egenskaper hos skivan och putsen har bestäms av materialleverantörerna. I vårt fall har vi tillgång till skivans och putsens fuktrelaterade rörelser i form av Figur 5.1.4. Den putsade skivans uttorkningskrympning uppges bli 1,2 mm/m.
- Enligt materialleverantörerna börjar putsade skivor av den aktuella typen spricka upp vid en påtvingad dragdeformation av 0,6 mm/m;
- Medelsprickavståndet för en uppsprucken Aquapanelskiva belagd med 8-12 mm nätarmerad puts uppges vara mellan 25-40 mm;

- Enligt materialleverantörerna är både skivans och putsens termiska längdutvidgningskoefficient 10e-6;
- Stålläktens termiska längdutvidgningskoefficient är 10e-6;
- Data som innehåller information om temperaturer och relativ fuktighet för Lund köps in från SMHI;

Fråga 1: Kommer fasadkonstruktionen att bli uppsprucken?
På grund av förankringen mot stålläkten kommer den putsade skivans fria rörelser att hindras. Då storleken på den putsade skivans uttorkningskrympning (1.2 mm/m) är större än gränstöjningen som ger dragsprickor (0.6 mm/m), kommer fasadkonstruktionen att spricka upp.

Fråga 2: Hur breda sprickor uppstår på grund av den putsade skivans uttorkningskrympning?
Enligt uppgift förväntas den nybyggda fasadkonstruktionen krympa 1.2 mm/m, vilket innebär att medelvärdet på sprickornas bredd kan beräknas som produkten av medelsprickavståndet (25-40 mm) och krympningen. Sprickbredderna på grund av fasadkonstruktionens uttorkningskrympning blir därmed 0,03-0,05 mm. Sprickor med den här bredden är i praktiken inte synliga för fria ögat. Relaxationseffekter i skiv- och putsmaterialet förväntas dessutom bidra till att minska denna sprickbredd.

Fråga 3: Hur breda kan sprickorna bli under brukstiden?
För att besvara denna fråga måste förväntade rörelser hos både den putsade skivan och läktsystemet beaktas. Vi antar att stålläkten är förankrade mot stommen av tilläggsisolerad lättbetong, vilket gör att rörelser orsakade av temperatur och fuktvariationer i stommen under året försummas. Vi antar att stålläkten kommer att följa temperaturvariationerna i den putsade skivan. I och med att den termiska längdutvidgningskoefficienten hos stål, skiva och puts i praktiken är lika stora, uppstår inte några temperaturrelaterade skillnader i rörelse mellan den putsade skivan och läktsystemet. Detta förutsätter dock att stålläkten kan röra sig fritt i förhållande till väggen. Om detta inte är fallet måste skillnaderna i rörelse beaktas, vilket görs i nästa stycke.

En analys, t.ex. simulering med hjälp av programmet WUFI, avslöjar att temperaturerna i en vitmålad putsad ventilerad fasad i Lund varierar i spannet -20 till +35 grader C. Med en årsmedeltemperatur på 7 grader C blir amplituden på temperaturvariationerna cirka 27 grader C.

Genom samma simulering fås att den relativa fuktigheten i luftspalten under den torraste sjudygnsperioden i medeltal är 35 %. Relativa fuktighetens årsmedelvärde i luftspalten är cirka 70 %, vilket ger en variationsamplitud på 35 %. Det bör påpekas att de torraste perioderna inträffar under perioden maj-augusti, det vill säga under perioder då medeltemperaturen kan nå upp till 20 grader C. De höga medeltemperaturerna motverkar därmed sammandragningen på grund av uttorkning.

Med hjälp av uppgifter om temperatur- och fuktförhållandena i den putsade skivan kan storleken på de förväntade deformationerna uppskattas till:

- Sammandragningen på grund av nedkylning under kalla perioder beräknas som produkten av längdutvidgningskoefficienten och temperatursänkningen, det vill säga 10e-6x27 = 0.27 mm/m;
- Rörelser som kan äga rum under torra men varma perioder uppskattas som summan av två motriktade rörelser. Med hjälp av Figur 5.1.4 uppskattas den putsade skivans

sammandragning till 0.3 mm/m då relativa fuktigheten sjunker från 70 % till 35 %. En utvidgning sker på grund av temperaturökning från 7 till 20 grader C. Storleken på denna utvidgning uppskattas bli 10e-6x(20-7) = 0.13 mm/m. Sammantaget sker en sammandragning på 0.3 – 0.13 = 0.17 mm/m;

Slutsatsen av beräkningen ovan är att temperatur- och fuktvariationer kommer att bidra till en sammandragning motsvarande 0.27 mm/m. Denna sammandragning överlagrar den uttorkningskrympning som inträffar i den nybyggda fasadkonstruktionen, vilket ger en total sammandragning på 1.2 + 0.27 = cirka 1.5 mm/m.

Sprickbredderna, beräknade som produkten av medelsprickavståndet (25-40 mm) och krympningen, blir 0.04-0.06 mm/m. Sprickor med den här bredden kan alltså observeras under kortare perioder av mycket kallt eller mycket torrt väder. Sprickbredder av den här storleksordningen är fortfarande acceptabla både utseendemässigt och ur vatteninträngningssynpunkt.

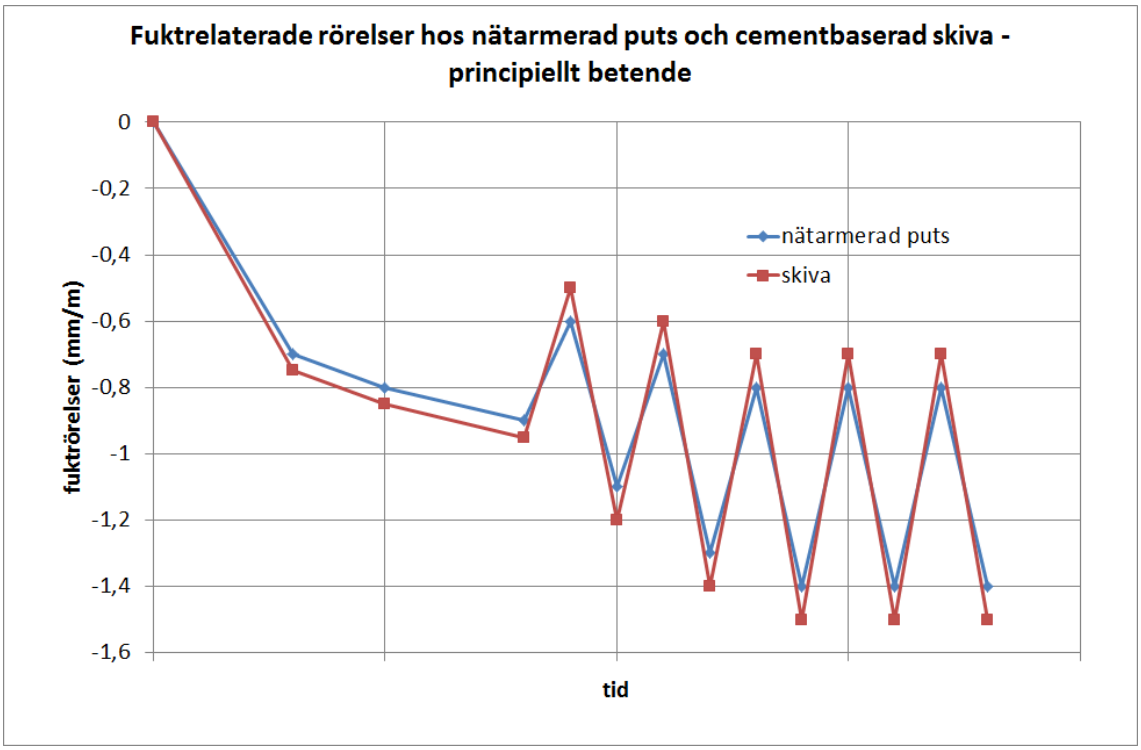
Mer invecklade analyser kan behöva genomföras vid komplicerade geometriska förhållanden eller när högre krav ställs på bedömningarnas träffsäkerhet.

5.5 Slutsatser

5.5.1 Slutsatser från undersökningen av fuktrelaterade materialegenskaper

Den cementbaserade skivan och nätarmerade putsen som ingick i undersökningen uppvisar snarlika fuktrelaterade beteenden. Båda materialen uppvisar i samband med första uttorkningen efter tillverkningen en uttorkningskrympning av storleksordningen 0.8 mm/m. I samband med efterföljande uppfuktningar och uttorkningar inträffar ytterligare krympning, vilket tillskrivs karbonatiseringen. Storleken på denna ytterligare krympning uppgår till cirka 0.3 mm/m. Både skivan och den nätarmerade putsen krymper sammanlagt cirka 1.1 mm/m efter ett antal uttorknings och uppfuktningscykler. Detta värde kan betraktas som ett medelvärde på den långsiktiga krympningen. Materialen kommer under inverkan av slagregn samt variationer i luftfuktighet att pendla kring detta medelvärde. Spannet för denna fuktrelaterade rörelse är cirka 0.5-0.6 mm/m för nätarmerad puts, cirka 0.8 mm/m för skivan och cirka 0.55 mm/m för den putsade skivan. Figur 5.5.1 visar det beskrivna beteendet i form av en principiell kurva.

En förutsättning för att undvika större transversella deformationer i putsade skivor är att deformationer i samband med uttorkning och uppfuktning i delmaterialen är av samma storleksordning. Det studerade cementbaserade skivmaterialet och den nätarmerade putsen uppfyller detta krav både med avseende på slutvärdet på krympningen och på deformationer orsakade av klimatrelaterade fuktvariationer. Stora transversella deformationer kan däremot förväntas om skivmaterialet har hunnit genomgå en väsentlig del av den förväntade krympningen före putsning. I exponerade cementbaserade skivor kan mer än hälften av den totala krympningen inträffa under tre torra sommardagar. Det rekommenderas därför att putsning sker i direkt anslutning till det cementbaserade skivmaterialets uppsättning. Längre uppehåll mellan skivornas uppsättning och putsningen bör undvikas.



Figur 5.5.1 Fuktrelaterade rörelser hos nätarmerad puts och cementbaserad skiva.

Vid användning av skiv- och putsmaterial som uppvisar skilda egenskaper med avseende på fuktrelaterade rörelser förväntas stora transversella deformationer kunna inträffa. Exempel på en materialkombination av den här typen är en cementbaserad puts som appliceras på en skiva av icke-cementbaserat material.

5.5.2 Slutsatser från undersökningen av dragbelastade putsade ventilerade skivors sprickfördelande förmåga

Den dragbelastade cementbaserade skivan med nätarmerad puts uppvisar ett elastiskt beteende upp till påtvingade deformationsnivåer motsvarande 0.4-0.5 mm/m. Med ökande påtvingad deformation uppstår ett heltäckande system av sprickor med ett medelavstånd på 25-40 mm. Försöken har inte kunnat visa någon skillnad i beteendet mellan provkroppar med läkt och provkroppar med fri skarv. Sprickbredderna vid en påtvingad deformation på 1.5 mm/m, vilket motsvarar maximal förväntad krympning i den putsade skivan, är mellan 0.04-0.06 mm. Sprickor i puts börjar bli synliga först vid en sprickbredd på 0.1-0.2 mm. Enligt resultat presenterade i kapitel 4, är vatteninträngning genom sprickor med bredden mindre än 0.2 mm försumbar.

Mot ovan brakgrund dras slutsatsen att nätarmerade putsade skivor har en mycket bra sprickfördelande effekt. Konstruktionen förväntas därmed kunna fungera bra både vad gäller att förhindra vatteninträngning och ur estetisk synpunkt.

Avvikelser från standardutförandet kan äventyra putsade skivors goda beständighets- och estetiska egenskaper. Utelämnad nätarmering i putsen leder med stor sannolikhet till att det bildas sprickor som kan vara både vattenförande och störande ur estetisk synpunkt.

Leverantörer rekommenderar att puts som används för putsning på skivor har ett högt innehåll av plasticerande medel och dispergerad fiberarmering. Försöken där nätarmeringen som ska placeras i

närheten av putsens yta utelämnats visar att sprickor med stora bredder uppkommer. Den sprickbegränsande effekten av den plasticerande tillsatsen och den dispergerade fiberarmeringen har därmed visat sig vara otillräcklig. Frågan kan ställas om inte puts utan dessa tillsatser som förses med nätarmering skulle kunna fungera lika effektivt ur sprickbegränsande synpunkt. En lösning i den här riktningen skulle bli billigare och därmed öka konkurrenskraften hos putsade ventilerade skivfasader.

5.5.3 Slutsatser från analysen av påkänningar orsakade av temperatur- och fuktvariationer

Slutsatsen från analysen av temperatur- och fuktgradienters inverkan på putsade skivors mekaniska beteende sammanfattas enligt följande:

- störst påkänningar i form av spänningar och töjningar uppstår då den putsade skivan utsätts för en jämn temperatur- eller fuktfördelning;
- påkänningarna utanför skarvområdet är proportionella mot temperatur- eller fuktbelastningen;
- områdena i närheten av de fria skarvarna utsätts för de största påkänningarna;
- putsade ventilerade skivfasader kommer under normala förhållanden att utsättas för påkänningar som är tillräckligt stora för att kunna ge upphov till sprickor i både putsen och skivan;
- skarv- och putsarmeringen fyller en viktig sprickfördelande funktion.

Parameterstudiens resultat sammanfattas enligt följande:

- ur spricksäkerhetssynpunkt är ett tjockt putsskikt fördelaktigare än ett tunt putsskikt. I dagsläget är det inte helt klarlagt hur effektivt ett enda lager nätarmering fungerar om putstjockleken är större än 10 mm;
- glidskiktet har en mycket positiv inverkan när det gäller att begränsa påkänningarna runt fria skarvar. Utelämnat glidskikt ger cirka dubbelt så stora påkänningar jämfört med att utforma en skarv med glidskikt, oavsett glidskiktets bredd. En ökning av glidskiktets bredd från det vanligt förekommande 50 mm till 75-100 mm skulle minska påkänningarna i närheten av fria skarvar med ytterligare 15-20 %;
- avståndet mellan de fria skarvarna, har viss inverkan på de relativa spänningsnivåerna i närheten av fria skarvar. Kortare skivor ger lägre påkänningar, vilket i kombination med lättare hantering av skivorna på arbetsplatsen torde utgöra en intressant effektiviseringsmöjlighet;
- genom att kombinera två eller fler olika åtgärder, såsom större putstjocklek, bredare glidskikt och kortare avstånd mellan de fria skarvarna, kan nivån på påkänningarna i närheten av fria skarvar sänkas med 30-40 %.

5.5.4 Slutsatser från den kvantitativa analysen av putsade ventilerade skivors sprickrelaterade beteende

Det är fullt möjligt att genomföra en kvantitativ analys av det sprickrelaterade beteendet för putsade skivfasader om följande förutsättningar är uppfyllda:

- temperatur- och fuktrelaterade rörelseegenskaper hos systemets komponenter är bestämda;

- sprickkriterier och sprickfördelande förmåga hos den putsade skivan, inklusive hos skivskarvarna, är bestämda genom provning;
- temperatur- och fuktrelaterade laster som förväntas verka på fasadkonstruktionen är kända.

Fältstudier och beräkningar visar att putsade cementbaserade skivfasader under svenska förhållanden kommer att vara uppspruckna, men bredden på sprickorna kommer bara vid enstaka tillfällen under ett år överstiga 0,06 mm/m. I genomsnitt kommer sprickbredderna att vara cirka 0,03 mm breda, vilket kan betecknas som mikrosprickor. Sprickbredder av den här storleksordningen är acceptabla både utseendemässigt och ur beständighetssynpunkt.

6 SAMMANFATTNING

Tilläggsisolering bestående av mineralull och puts är en vanlig metod för att förbättra energiprestandan hos flerbostadshus från miljonprogrammet. En annan aktuell, men betydligt mindre utprovad metod, innebär att man tilläggsisolerar fasaden varefter man putsar på en ventilerad skiva. Målsättningen med projektet har varit att undersöka om dessa två tilläggsisoleringssystem har potentialen att kombinera goda egenskaper när det gäller energieffektivisering med långsiktig beständighet.

Resultaten visar att de två studerade tilläggsisoleringssystemen har, i kombination med fönsterbyte, en potential att väsentligt sänka uppvärmningsbehovet i tidstypiska flerbostadshus. I ett flerbostadshus med ytterväggar av tegel eller lättbetong med 50 mm utvändig tilläggsisolering kan uppvärmningsbehovet sänkas med uppemot 25-30 procent på årsbasis. Drygt hälften av besparingarna hänför sig till tilläggsisoleringen. De kallaste månaderna kan uppvärmningsbehovet sänkas med uppemot 50 procent, vilket innebär att även effektbehovet för uppvärmning kan sänkas efter en energirenovering. Tilläggsisolering med mineralull leder till en snabb uttorkning av väggarna, vilket gör att även inomhusklimatet snabbt förbättras tack vare torrare och varmare väggar.

En långsiktig förbättring av energiprestandan med de studerade tilläggsisoleringssystemen är avhängig av att vatten från slagregn hindras från att tränga in i de tilläggsisolerade väggarna. Eventuella glipor vid fönster, dörrar och balkongsanslutningar utgör de vanligaste vägarna för vatteninträngning från slagregn. Även större sprickor i putsen kan leda till inläckage av vatten. Vatten som har läckt in genom putsen kan transporteras vidare mot insidan av väggen genom skarvar mellan isolerskivorna. Utöver försämrad värmeisoleringsförmåga orsakar inläckande vatten även beständighetsproblem i form av ökad risk för frostskador och mikrobiell påväxt.

Rätt applicerat kan nätarmering av stål eller glasfiber effektivt begränsa uppkomsten av stora sprickor (sprickbredd större än 0,2 millimeter) i putsskiktet. Andra faktorer som minskar risken för sprickbildning är puts som appliceras i jämntjocka lager. Putsens sprickbenägenhet minskar med ökande tjocklek på putslagret. Förslag på åtgärder som kan minska risken för att inläckande vatten når väggarna är att isoleringen appliceras i fler skikt med förskjutna skarvar eller att isolerskivornas kanter snedfasas eller falsas.

Putsade ventilerade skivors sprickbenägenhet påverkas huvudsakligen av de ingående komponenternas fukt- och temperaturrörelser, aktuell klimatpåverkan samt av olika utformningsmässiga detaljer. En modell har utvecklats som möjliggör att projektörer kan bedöma sprickbenägenheten hos en putsad ventilerad skivfasad med hjälp av materialegenskaper, vald geometri, detaljutformning och aktuell klimatpåverkan. Tillämpning av den utvecklade modellen på en vanligt förekommande fasadlösning (ytarmerad mineralisk tjockputs på cementbaserade skivor) visar att under svenska förhållanden är den putsade skivans sprickbenägenhet hög samtidigt som sprickbredderna är begränsade, i genomsnitt mindre än 0,03 millimeter. Vatteninträngningen som kan uppstå på grund av sprickor av den här storleken är försumbar och ger därmed inte upphov till beständighetsproblem.

REFERENSER

Capener C-M., Sandin K., Molnár M., Jönsson J. (2012) - Energy efficient retrofitting of a 1950-ies multi-dwelling block house considering hygrothermal properties – field measurements and simulation. 5th International Building Physics Conference, Kyoto, Japan, 2012.

Kamimura, K., Sereda, P.J. and Swenson, E.G. (1965) – Changes in weight and dimensions in the drying and carbonation of Portland cement mortars. Magazine of Concrete Research, Vol. 17, No. 50, pp. 5-14.

Karagiozis, A., Künzel, H.M., Holm, A. (2001) - WUFI ORNL/IBP – A North American Hygrothermal Model: Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII (Buildings VIII), Clearwater Beach, Florida, USA, December 2-7, 2001.

Kumaran, M.K., Lackey, J.C., Normandin, N., Tariku, F., v.Reenen, D. (2002) - A Thermal and Moisture Transport Property Database for Common Building and Insulating Materials – Final Report from ASHRAE Research Project 1018-RP.

Künzel, H.M. (1995) - Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components – One- and two-dimensional calculation using simple parameters, IRB Verlag, Germany.

Levin, Per, (2009) - ”Brukarindata för energiberäkningar i bostäder 09”, Rapport från Sveby-programmet.

Li, Y., Bao, J. and Guo, Y. (2010) – The relationship between autogenous shrinkage and pore structure of cement paste with mineral admixtures. Construction and Building Materials 24 (2010), pp 1855-1860.

Molnár M., Capener C-M., Jönsson J., Sandin K. (2011) - Tensile cracking of rendered ventilated rain-screen cladding systems. 9th Nordic Building Physics Symposium, Tampere, Finland, 2011.

Sandin, K. (1984) - Fuktens inverkan på energiflödet genom ytterväggar, Avdelningen för Byggnadsmateriallära, Lunds Tekniska Högskola, Rapport TVBM-3019, Lund, Sweden.

Sandin, K. (2002) – Sprickbildning i puts på isolering. Inledande studier av putsens krympning och svällning. Lunds tekniska högskola, avdelningen för byggnadsmaterial, Rapport TVBM-3101, ISSN 0348-7911 TVBM.

Sjögren, J.-U. (2007) - Användning av kall- och varmvatten i flerbostadshus, Energi och Miljö, nr 11, 2007, Stockholm.

Tariku, F., Kumaran, M.K. (2006) - Hygrothermal modelling of aerated concrete wall and comparison with field experiment, Proceedings of the 3rd International Building Physics Conference, Montreal, Canada, August 27, 2006, pp 321-328.

Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1995) – Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 2, pp. 281-287.

Warfvinge, C. (2008). Mycket energi att spara i miljonprogrammet, VVS-Forum, April 2008, pp 7-12.