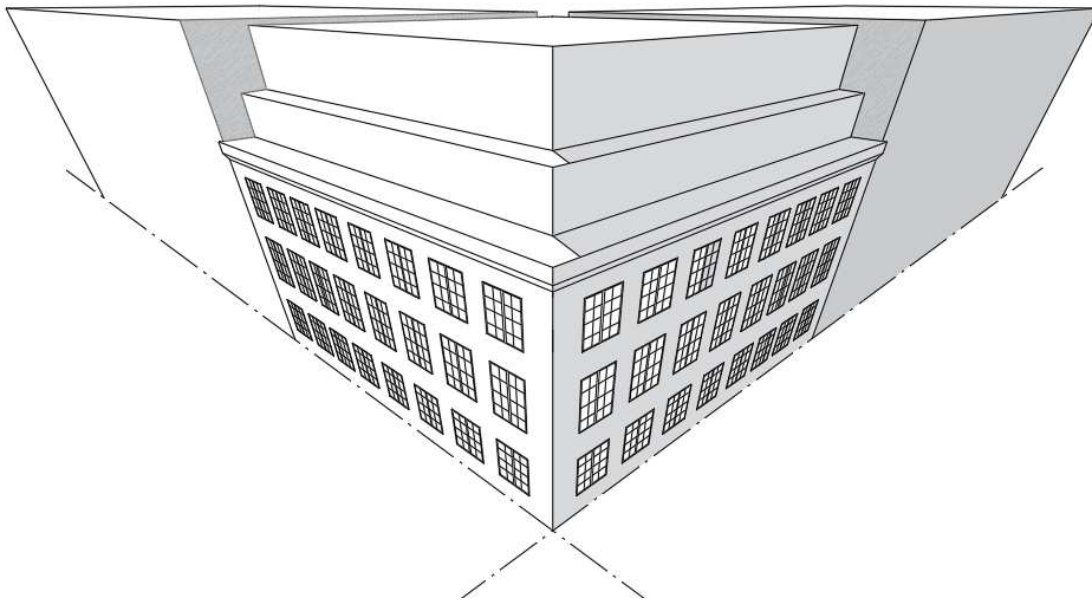




ANALYS AV ÄLDRE MURVERKSHUS

Gällande befintliga byggnadens förutsättningar för påbyggnad

Analysis of older masonry buildings
Regarding the existing structure's capability of storey extension



Författare: Viktor Karlsson och Enok Rosin
Uppdragsgivare: Byrån för Arkitektur och Konstruktion Stockholm Hongkong AB
Handledare: Ali Alatabi, BAK Stockholm Hongkong AB
Peter Eklund, KTH ABE
Institution: Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad
Examensarbete: 15 högskolepoäng inom byggt teknik och design
Examinator: Per-Magnus Roald, KTH ABE
Godkänd: 2018-06-28
Serienummer: TRITA-ABE-MBT-1860

Sammanfattning

Allt fler flyttar till Sveriges stadskärnor och förtätning ligger i tiden till den samtida bostadsbristen. Parallellt till detta nutida problem finns gott om äldre murverkshus. Våningspåbyggnad av dessa massiva murverksbyggnaderna kan intuitivt uppfattas som lämpliga och okomplicerade projekt. Bakom fasaden gömmer sig dock ett byggnadsmaterial olikt från dagens.

Genom denna studien har tre referensobjekt av äldre murverkshus analyserats. Gällande hållfasthetsegenskaper, bärförmåga i byggnaden och hur ändring av byggnaden avses eller har utförts. Med tanke på att byggnadstekniken för murverkshus under sent 1800-tal inte förändrades särskilt mycket kan generella beskrivningar av stommens befintliga uppbyggnad göras. Däremot måste en ha eller införskaffa förståelse för egenskaperna i dåtidens mursten och murbruk vid projektering av en påbyggnad.

Det finns flertalet analysmetoder för murverk och tillvägagångssättet för insamling av de okända egenskaperna kan vara komplicerade och svåra att tolka. När det gäller analysen av en byggnads bärförmåga kan programvaror vara till hjälp men nödvändigtvis inte för äldre murverkshus som utsätts för ökad belastning. Då ändringar i dessa hus kan skapa instabilitet och ändrat jämviktssystem.

I rapporten redogörs för olika beräkningsmetoder och hur bärförmågan påverkas efter vald metod. Rapporten redogör även för viktiga faktorer vid projektering av en påbyggnad.

Studien ska inte ses som en sammanfattning angående utförandet av påbyggnader, snarare är det en studie som berör tre referensobjekt och vad ett liknande projekt bör beakta.

Nyckelord: Påbyggnad, äldre murverkshus, murverk, hållfasthetstester, eurokod 6, jämviktssystem, förändrande förutsättningar, analytisk metod,

Abstract

Urbanization is an established trend in Sweden and with a simultaneous housing shortage the authorities are planning for densification of the cities.

In contrast to the issue of densifying cities, there are older masonry buildings occupying the attractive central locations of the mayor city areas. Hence, storey extensions of these massive buildings can be intuitively perceived as uncomplicated projects. Behind the facade, however, is a construction material different from today's.

Through the study carried out, three reference objects of masonry structures have been analyzed. Regarding strength properties of the existing structures and aspects that should be taken into account when it comes to storey extensions.

Given that the construction of masonry houses in the late 19th century does not differ very much, general descriptions of the existing structure of the body can be made. On the other hand, one must have or acquire an understanding of the characteristics of brick and mortar from the past when designing a storey extension.

There are several methods of analysis for masonry and the approach of obtaining the unknown strength properties can be complicated. Even difficult to interpret.

With today's possibilities to model structures in finite element programs results can easily be produced, but if the values are representative for the existing structure's capacity is difficult to evaluate. Considering that changes in these structures can create instability and altered equilibrium systems.

This report describes different calculation methods and how the load capacity is affected by the chosen method. It also outlines important factors when designing an extension of storeys.

Förord

Med det här examensarbete avslutar vi våra studier på högskoleingenjörsprogrammet Byggt teknik och Design med inriktning mot husbyggnad, projektering och konstruktion på Kungliga Tekniska Högskolan.

Att ha utfört ett examensarbete om äldre murverkshus har givit oss perspektiv på vad problemlösning innebär i näringslivet. Byggnadskonsten kräver god kunskap om byggnadsmaterialen mursten och murbruk samt kunskap om hur dessa samverkar. Något vi har fått lära oss och fördjupa oss inom på vägen. Vi är därför väldigt tacksamma för att vi fick möjligheten att utföra den här studien.

I samarbete med Byrån för Arkitektur och Konstruktion Stockholm Hongkong AB möjliggjordes det här arbetet. Vi vill därför tacka vår handledare i näringslivet, Ali Alatabi för tips och råd han har givit oss under arbetets gång. Vi vill även tacka Danial Hadian, konstruktör på BAK Stockholm Hongkong, för alla givande diskussioner och den hjälp vi har fått under arbetets gång.

Ett stort tack går till Elzbieta Lukaszewska, för ett oväntat samarbete och allt hon hjälpt oss med.

Vi vill även tacka de personer vi har varit i kontakt med i näringslivet, för givande information, råd och tips på litteratur.

Förordet avslutas med ett uttryck som har haft en speciell innebörd för oss under arbetets gång...

”Lagd sten ligger.”

Viktor Karlsson

Enok Rosin

Stockholm, juni 2018

Termer och definitioner

| | |
|-------------------|---|
| Kantpåkänning | Kapacitet av murverket vid bjälklagets upplag |
| Kemisk analys | I studien, analys av sammansättning i murbruk |
| Knäckning | Murpelarens bärförmåga i längdriktningen överskrids och brott uppstår |
| Koncentrerad last | Belastning som uppkommer vid upplag av bjälke |
| Liggfogar | Horisontella fogar mellan murstenar |
| Murbruk | Stelnande massa som används för sammanfogning av murstenar |
| Murpelare | Murverksparti mellan öppningar i fasad |
| Mursten | Tegelsten |
| Murverk | Murstenar lagda i ett specifikt mönster sammanfogat med murbruk |
| Provkropp | I studien, urborrad cylindrer från mursten |
| Påbyggnad | Vertikal tillbyggnad av befintlig konstruktion. |
| Stortegel | Tegelsten i storleken 300x145x75. |
| Stötfogar | Vertikala fogar mellan murstenar |
| Trycklinje | Illustrerar kraftfördelning över öppning, valv och fönster. |
| Tunnslipsanalys | I studien, analys utförd för att bestämma murbrukets sammansättning |
| Vidhäftning | Brukets förmåga att utveckla drag- och skjuvmotstånd mot mursten |

Förkortningar

| | |
|-----|--------------------------------|
| DTI | Teknologisk institut i Danmark |
|-----|--------------------------------|

Innehåll

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INLEDNING..... | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.1.1 | Murverkets historia..... | 1 |
| 1.1.2 | Förtätning..... | 1 |
| 1.1.3 | Sekelskifteshus..... | 2 |
| 1.2 | Syfte | 2 |
| 1.3 | Mål | 2 |
| 1.4 | Avgränsning..... | 2 |
| 2 | METODIK | 3 |
| 3 | NULÄGESBESKRIVNING | 4 |
| 4 | REFERENSRAM..... | 5 |
| 4.1 | Referensobjekt..... | 5 |
| 4.1.1 | Pahl 7..... | 5 |
| 4.1.2 | Vildsvinet 25..... | 6 |
| 4.1.3 | Norrmalm 3:1..... | 6 |
| 4.2 | Äldre byggteknik | 6 |
| 4.3 | Murverk..... | 8 |
| 4.3.1 | Beständighet och hållfasthet. | 8 |
| 4.3.2 | Statiskt system | 8 |
| 4.3.3 | Valvkonstruktioner..... | 9 |
| 4.3.4 | Deformationsegenskaper..... | 9 |
| 4.4 | Mursten..... | 10 |
| 4.5 | Murbruk | 10 |
| 4.6 | Förändrade förutsättningar | 11 |
| 4.6.1 | Instabilitet och ändrat jämviktssystem. | 12 |
| 4.6.2 | Främmande material..... | 12 |
| 4.6.3 | Konstruktionsregler..... | 12 |
| 4.6.4 | Modern byggteknik i äldre murverkshus | 13 |
| 4.6.5 | Analysmetoden X-drill..... | 13 |
| 4.7 | Ackreditering i Sverige | 14 |
| 4.8 | Hållfasthetstester enligt standard | 14 |
| 4.9 | Hållfasthetsberäkningar för murverk enligt eurokod 6 | 14 |
| 4.9.1 | Tryckhållfasthet..... | 14 |
| 4.9.2 | Skjuvhållfasthet..... | 14 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.9.3 | Böjhållfasthet..... | 15 |
| 5 | GENOMFÖRANDE..... | 16 |
| 5.1 | Grundläggande arbete..... | 16 |
| 5.1.1 | Inventering..... | 16 |
| 5.1.2 | Metoden X-drill..... | 16 |
| 5.1.3 | Ackrediterade verksamheter för test av murverk..... | 17 |
| 5.1.4 | Modellering i finita elementprogram..... | 17 |
| 5.2 | Utförda hållfasthetstester..... | 17 |
| 5.2.1 | Tryckhållfasthetstester av Pahl 7..... | 17 |
| 5.2.2 | Vidhäftningstest av Pahl 7..... | 18 |
| 5.2.3 | Tryckhållfasthetstest av Norrmalm 3:1..... | 19 |
| 5.2.4 | Tunnslipsanalys av murbruk från Norrmalm 3:1..... | 19 |
| 5.2.5 | Murverkets tryckhållfasthet..... | 20 |
| 5.2.6 | Murverkets skjuvhållfasthet..... | 21 |
| 5.2.7 | Murverkets böjdragskapacitet..... | 21 |
| 5.3 | Dimensionerande laster och vertikal bärförmåga..... | 21 |
| 5.3.1 | Laster..... | 22 |
| 5.3.2 | Lastkombinationer..... | 22 |
| 5.3.3 | Kantpåkänning..... | 23 |
| 5.3.4 | Knäckning..... | 24 |
| 5.3.5 | Koncentrerad last..... | 24 |
| 5.3.6 | Analytisk metod för valvkonstruktion..... | 25 |
| 6 | RESULTAT..... | 27 |
| 6.1 | Tryckhållfasthetstester..... | 27 |
| 6.1.1 | Pahl 7..... | 27 |
| 6.1.2 | Norrmalm 3:1..... | 27 |
| 6.2 | Vidhäftningstest Pahl 7..... | 28 |
| 6.3 | Tryckhållfasthetsberäkningar..... | 28 |
| 6.3.1 | Pahl 7..... | 28 |
| 6.3.2 | Norrmalm 3:1..... | 29 |
| 6.4 | Utnyttjandegrad av vertikala belastningar..... | 29 |
| 6.5 | Beräkningar av trycklinje..... | 31 |
| 7 | ANALYS OCH DISKUTION..... | 34 |
| 7.1 | Tryckhållfasthetsvärden på mursten..... | 34 |
| 7.2 | Murbrukets tryckhållfasthet..... | 34 |

| | | |
|-----|---|----|
| 7.3 | Vidhäftningstest på murbruk | 35 |
| 7.4 | Murverkets karakteristiska tryckhållfasthet | 35 |
| 7.5 | Murpelarens dimensionerande bärförmåga | 36 |
| 7.6 | Statik | 36 |
| 8 | SLUTSATS | 37 |
| 9 | REKOMMENDATIONER OCH FRAMTIDA STUDIER | 38 |
| 9.1 | Rekommendationer | 38 |
| 9.2 | Framtida studier..... | 38 |
| | REFERENSER..... | 39 |
| | BILAGA A: Upplag och infästningsmetoder för Vildsvinet 25 | |
| | BILAGA B: Äldre detaljritningar..... | |
| | BILAGA C: Indata och utdata för Pahl 7 | |
| | BILAGA D: Grafisk metod | |
| | BILAGA E: Tabell för murverk enligt EKS10..... | |

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

1.1.1 Murverkets historia

Murverkskonstruktioner har dominerat byggnadskonsten sedan uppkomsten av de tidiga civilisationerna. Fram till romarrikets fall dominerade murverk de antika stadsbilderna. Efter högkulturens kollaps, gick byggtekniska kunskaper förlorade och mer primitiva metoder ersatte de mer sofistikerade (Berg, 2010).

Murverkskonstruktionen blev återupplivat i början av medeltiden då katolska munkar utvecklade tekniken på nytt för att bygga kloster och kyrkor. Efterhand blev byggnadskeramik återigen ett dominerande stommaterial (Berg, 2010).

Under senare århundraden har bärande konstruktioner bestått av tegel. Allt eftersom mer tidseffektiva byggnadsmetoder blivit viktigare, har tegel som stommaterial ersatts av mer moderna byggnadsmaterial. Tegel används i dagsläget som fasadmaterial då effektiv byggnation prioriteras för att avlasta bostadsmarknaden i en tid präglad av urbanisering (Berg, 2010).

1.1.2 Förtätning

Urbanisering är en trend som pågår världen över och även i Sverige flyttar allt fler till urbana miljöer (Glasare & Eriksson, 2015). År 2030 förväntas 63% av Sveriges befolkning bo i någon av de tre största städerna, varav 80% kommer bo i någon av de 10 största (Amcoff, et al., 2015). Enligt boverkets undersökningar har 243 av landets 290 kommuner ett underskott av bostäder (Boverket, 2018). Samtidigt planerar landets kommuner för ett tätare stadsliv av befintliga stadskärnor (Glasare & Eriksson, 2015).

Tidigare har Sveriges städer byggts utåt men i brist på bostäder och en ökande befolkning i städerna väljer man istället att bygga inåt. En strategi som används för att motverka att städerna tar värdefull naturmark i anspråk och istället effektivisera befintlig bebyggelse (Adolfsson Jörby, 2016). I Stockholms översiktsplanen står även att:

"Stadens ambition är att förtäta stadsmiljön genom att komplettera med nya bostäder på lämpliga platser i alla delar av Stockholm" (Stockholms stad 2018:44)

Förtätning kretsar kring mer än att bygga bostäder. Det måste även skapas en god bebyggd miljö och därför ses urbaniseringen som en utmaning för samhälls- och bostadsplaneringen. Det krävs en helhetssyn där förtätningen ska ske så bebyggelser kompletteras med funktioner som saknas, exempelvis verksamheter som skolor och vårdcentraler (Boverket, 2012). Begreppet förtätning syftar på så vis till en tätare stadsmiljö där närheten till arbete, verksamheter, kulturutbud och parker är eftertraktat. Det är inte själva tätheten som är eftertraktad utan kvaliteten stadsmiljön ger i form av närheten. (Adolfsson Jörby, 2016).

Förtätning kan ske på många olika vis och medför oftast utmaningar (Lindgren & Widerberg, 2010). Det är dock inte alltid möjligt att förtäta städer genom komplettering av bostadsområden med ny bebyggelse. Samtidigt som nybyggnation i regel tar grönområden och obebyggd mark i anspråk (Ahnström, 2004).

En alternativ lösning är att ta vara på bebyggd mark genom komplettering av befintliga hus. Då kan befintlig byggnadsarea utnyttjas effektivt, genom exempelvis påbyggnad av våningar. Detta ger möjlighet till utökad invånartäthet samtidigt som grönområden bevaras. (Ahnström, 2004).

1.1.3 Sekelskifteshus

Många av stads kärnorna i Sveriges stora stadsregioner följer ett rutnät som utgörs av kvartershus med innergårdar. Arkitekturstilar som klassicism, ny stil, jugend och nationalromantik dominerar innerstaden i flera av de större stadsregionerna i Sverige. Inom tidsramen 1880 – 1920, användes tegel som bärande byggnadsmaterial i större utsträckning än idag. Stommen i flerbostadshus från den här perioden utgörs av bärande ytterväggar samt en centralt placerad hjärtmur (Björk, et al., 2013). Sekelskifteshus möjliggör på så sätt ytterligare förtätning av Sveriges stora stads kärnor genom våningspåbyggnad, eftersom den massiva stommen tillåter hög belastning (Fabricius, 1990).

1.2 Syfte

Syftet med den här studien är att analysera äldre murverkshus möjligheter för påbyggnad.

Frågeställningen är:

Kan en generell metod utvecklas gällande påbyggnader av äldre murverkshus?

Hur tillhandahålls och tillämpas äldre murverks hållfasthetsegenskaper?

Vad bör beaktas vid projektering för påbyggnad av äldre murverkshus?

1.3 Mål

Redogöra för hur en åldrad murverksstomme hållfasthetsegenskaper tillhandahålls.

Beskriva vad som bör beaktas vid planerad påbyggnad.

Redovisa tillämpbara hållfasthetstester samt beräkningar och analysera resultat från hållfasthetstester.

1.4 Avgränsning

Rapporten avgränsas till tre flerbostadshus med murverksstomme, uppförda under sent 1800-tal.

Litteratstudien som utförts har avgränsats i en riktning för att kunna ge läsaren vetskap och kännedom om flerbostadshus med murverksstomme. Därför har litteraturstudien berört statistiskt system, hållfasthetsegenskaper, bärförmåga och murverk som byggnadsmaterial. Rapporten redogör även för vad som bör beaktas vid förändrade förutsättningar så som påbyggnader.

Gällande hållfasthet och beräkningar läggs tyngden på tryckhållfasthet. Delvis på grund av ett oanvändbart vidhäftningstest men även på grund av studiens tidsbegränsning. Dimensionerande beräkningarna har utförts på en murpelare i yttermur, från markplan till takfot. Beräkningarna omfattar alltså inte hela byggnaden utan förhoppningen är att det ska ge ett perspektiv på hållfastheten i vertikalt bärande murverkswäggar i en stomme.

2 METODIK

Inventering och litteraturstudie

En litteraturstudie utfördes för att skapa en djupare förståelse för hur murverksstommar konstruerades under sent 1800-tal och hur det statiska systemet verkar. Litteraturstudien omfattar även murverk som konstruktion och dess hållfasthet samt hur murverk enligt europeisk standard testas. Information om äldre murverkshus har även samlats in via kontakt med näringslivet genom möten, mejl och telefonkonferenser.

Hållfasthetstester

I samarbete med RISE CBI Betonginstitutet i Stockholm, har två hållfasthetstester utförts på referensobjektet Pahl 7. Ett platsbaserat prov där murbrukets vidhäftning undersöktes och ett tryckhållfasthetstest på enskilda murstenar har utförts. Sistnämnda testet utfördes i Betonginstitutets lokaler. Genom provresultaten har sedan murstenarnas karakteristiska tryckhållfasthet analyserats.

Genom Karin Ericsson, uppdragsledare för ombyggnationen av Nationalmuseum, har även tryckhållfasthetsresultaten för test av murstenar på Nationalmuseum tillhandahållits. Dessa har också analyserats.

Beräkning av karakteristiska hållfasthetsvärden

Den karakteristiska tryckhållfastheten för murpelare i Pahl 7 har därefter beräknats enligt olika metoder från institutioner, eurokoder och äldre modeller. Samtliga tryckhållfasthetsvärden för mursten är resultatet av tryckhållfasthetstest av murstenar som tillhörde Pahl 7. Vid beräkning av murverkets tryckhållfasthet har även olika hållfasthetsvärden antagits på murbruket för att beräkna tryckhållfastheten enligt äldre och alternativa beräkningsmetoder. Resultaten har därefter sammanställts för att jämföras med dagens normer vad avser att bestämma karakteristiska tryckhållfastheten.

Dimensionerande beräkningar

Dimensionerande beräkningarna omfattar sedan murpelarnas vertikala bärförmåga med avseende på knäckning, kantpåkänning och koncentrerad last. Där äldre, dagens och alternativa metoder använts för att redovisa karakteristiska tryckhållfastheten. Även om dimensionerande beräkningarna därefter utfördes med nuvarande eurokoder.

Svagheter

Eventuell svaghet med vald metod är att inga renodlade intervjuer har utförts. Studien behandlar därav främst litteratur och rapporter som konstruktörer i näringslivet har rekommenderat.

Studien utfördes genom analyser av enbart tre referensobjekt. Detta gör att analysen har begränsats till byggnadernas förutsättningar och vad som ska utföras eller har utförts.

Svagheten med beräkningar är att det inte omfattar hela byggnaden Pahl 7. Då de dimensionerande beräkningarna har utförts på murpelare i fasad gällande tryckhållfasthet. Inte heller har någon större tyngd lagts på skjuv- och böjdraghållfasthet. Även om hållfasthetstester utfördes för att testa vidhäftning mellan sten och bruk har givna resultat varit oanvändbart och arbetet har avgränsats.

3 NULÄGESBESKRIVNING

Rapporten utförs i samarbete med Byrån för Arkitektur och Konstruktion Stockholm Hongkong AB. På kontoret arbetar både konstruktörer och arkitekter tillsammans, för att korta ned ledtider och effektivisera projekteringsfasen.

Under examensarbetet projekterar konsultbyrån konstruktionshandlingar för en påbyggnad av ett äldre murverkshus. Projektet är den första påbyggnad BAK Stockholm Hongkong utför och ansågs initialt sakna en erkänd metod för tillvägagång. Under studien följs projekteringen av påbyggnaden och därav har fastigheten Pahl 7 blivit ett referensobjekt för examensarbetet.

Det andra referensobjektet, Vildsvinet 25, är en färdigställd påbyggnad av ett flerbostadshus. Byggnaden ska främst verka som referens gällande hur en färdigställd påbyggnad har utförts.

Det tredje referensobjektet är Norrmalm 3:1. Byggnaden genomgår under studiens gång en omfattande ombyggnation och det har utförts tryckhållfasthetstester av murstenar samt analyser av murbruket. Resultat från tester ska ge underlag för beräkningar av äldre murverkshus hållfasthetsförmåga.

4 REFERENSRAM

4.1 Referensobjekt

Samtliga referensobjekt är murverkshus uppförda under sent 1800-tal. Under studien analyseras den färdigställda påbyggnaden av Vildsvinet 25, den pågående påbyggnaden av Pahl 7 och ombyggnationen av Norrmalm 3:1. Genom analysen av byggnaderna ges möjligheten att finna samband mellan äldre murverk.

4.1.1 Pahl 7

Fastigheten med beteckningen Pahl 7 projekteras under examensarbetet gång för en större förändring. Två nya våningar ska påbyggas och nya vindsvåningen ska inredas. Sammanlagt utökas bostadsytan med ca 950m², detta innebär att flerbostadshuset utökas med ca 10st lägenheter i varierande storlek (Axelsson, 2017).

Fastigheten är belägen i korsningen mellan Åsögatan och Renstiernas gata på Södermalm i Stockholm. Byggnaden uppfördes år 1883 och utgörs idag av fem våningsplan med handel i bottenvåning och bostäder i resterande fyra. Kvarteret har en varierande arkitektur med byggnader från sent 1800-tal till byggnader som uppfördes under miljonprogrammet. Området på Södermalm präglas dock av en typisk stenstadsbebyggelse där Pahl 7 är en av de lägre byggnaderna. I anslutning till fastigheten ligger Pahl 6 och 8, även de byggda på sent 1800-tal men med åtta resp. sju våningar (Axelsson, 2017).



Figur 4.1 Pahl 7 innan påbyggnad. Ovan takfot syns Pahl 8 till vänster och Pahl 6 till höger.

Fastigheten är byggd efter typisk byggnadsteknik från 1880-talet, med en stomme av murverk med bärande yttervägg och hjärtvägg och ett bjälklag bestående av träbjälkar. Yttermurarna består av 2-stens tjock stortegelevägg i markplan och 1½-stens i resterande våningar. Hjärtväggen består däremot av 1½-stens i markplan och 1-sten i resterande våningar. Källarväggarna består av 1-1,5m tjock murning av natursten.

Vid projektering av påbyggnaden kontrollerades bärförmågan av murverksväggarna. Det utfördes tryckhållfasthetstester av enskilda murstenar från huset och ett vidhäftningstest på murbruket för att testa brukets vidhäftning till murstenarna.

4.1.2 Vildsvinet 25

I korsningen mellan Storgatan och Grevgatan på Östermalm är fastigheten Vildsvinet 25 belägen. Byggnaden som uppfördes 1894 består idag av 5½ våningar. Byggnaden är ett färdigställt projekt vad avser våningspåbyggnad. År 2013-2014 utfördes påbyggnaden som gav byggnaden en ny våning med ett vindsetage (Lukaszewska, 2018).



Figur 4.2 Vildsvinet 25 från gatuvy, efter färdigställd påbyggnad.

Vid projektering av påbyggnaden utfördes inga hållfasthetstester av byggnadens murväggar. Istället angavs lägsta hållfasthetsklasser för befintligt murbruk och mursten där beräkningarna för befintlig stomme enbart omfattade vad påbyggnaden innebar för tryckhållfastheten. Det befintliga murbruket antogs vara hydrauliskt kalkbruk och vid beräkningar angavs till 0,5 MPa för karakteristiska tryckhållfastheten (Lukaszewska, 2018).

Gällande projektering av påbyggnaden lades tyngd på vad tillkommande balkar hade för inverkan på den befintliga murverksstommen. Upplagen placerades exempelvis mellan fönster, nära väggens centrumlinje för att undvika excentriciteter, upphöjda för att undvika kanttryck på murvägg vid deformationer av balk och jämna avstånd för minimal påverkan på jämviktssystemet i väggarna (Lukaszewska, 2018). Se *bilaga A* för upplag och infästningsmetod.

4.1.3 Norrmalm 3:1

På fastigheten med beteckningen Norrmalm 3:1 är Nationalmuseumbyggnaden på Blasieholmen i Stockholm belägen. Nationalmuseum invigdes år 1866 och är ett konstmuseum som i februari 2013 stängdes för ombyggnation och helrenovering. Byggnaden ska moderniseras och anpassa efter dagens krav (Statens Fastighetsverk, u.d.).

Nationalmuseum har under ombyggnationen utfört test av murbruk och mursten. Provingen utfördes av RISE CBI betonginstitutet. Murstenarna tryckhållfasthetstestades enligt standard SS-EN-772-1. Murbrukets bindemedel och sammansättning bedömdes genom tunnslipsanalys i ljusmikroskop och dess hållfasthet bedömes med mikrokemisk analys (Lindqvist & Trägårdh, 2013).

4.2 Äldre byggteknik

Hus från sekelskiftet byggdes vanligen med bärande ytterväggar samt centralt placerad hjärtvägg av murverk. Väggtjockleken varierar beroende på när byggnaden uppfördes men byggnadstekniken förändrades inte märkbart under sent 1800-tal (Björk, et al., 2013).

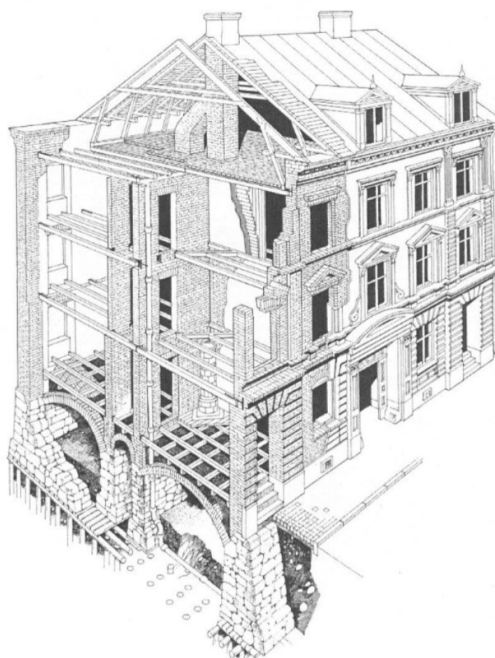
De bärande väggarna var ofta tjockare i källare och bottenplan och smalnade av i de överliggande våningsplanen. Ytermuren konstruerades med vanligen med 2-stenstjocklek i bottenvåningen, för

att sedan smalna av till 1½-stenstjocklek i de övre våningsplanen. Hjärtväggens tjocklek var tunnare än yttermurens och kunde byggas med 1½-stens tjocklek i bottenvåning och 1-stens tjocklek i övriga våningar. Den vanligaste murstensstorleken var stortegel (300x145x75) (Björk, et al., 2013).

Källarplanet byggdes med valv som fördelade lasterna från överliggande våningar ner till grund. Valvkonstruktioner förekommer även vid entréer och fönsteröppning, som i regel förstärktes med järnvägsräls. (Björk, et al., 2013).

Bjälklagsbalkarna förankrades till stommen med ankarjärn och vilade på ett lager murbruk för att skydda underliggande tegel (Björk, et al., 2013). Se *bilaga B* för detaljritning av äldre infästning.

Under 1880-talet var det schablonregler från lokala byggnadsstadgan som styrde tillåtna påkänningar i murverkshusen. Dessa schablonregler angav murtjockleken för våningarna som funktion av husets höjd (Lanevik, 1990). I *figur 4.4* anges vad som enligt normer var tillåtna påkänningar under 1880-talet.



Figur 4.3. Äldre murverkshus enligt byggteknik från sekelskiftet (Berg, 2010).

| TILLÅTNA RELATIVA PÅKÄNNINGAR | |
|--|----------|
| 3:o. För murverk Tryckpåkänning pr cm ² . | |
| Brottsäkerheten kan antagas 10- à 20-faldig. | |
| Vanlig tegelmur i kalkbruk..... | 4 kg |
| bättre d:o d:o..... | 7 » |
| gott, hårdbränt maskinslaget rödtegel eller eldfast tegel i cement..... | 14 » |
| cementbruk (1:4 à 1:2)..... | 10-12 » |
| cementbetong (1:4:8 à 1:3:6)..... | 7-8 » |
| d:o fet (1:2:3)..... | 10 » |
| sandstensmur i cement..... | 14 » |
| kallmur av sprängsten, vällagd..... | 10 » |
| d:o av kilad sten vällagd..... | 20 » |
| granitmur av sprängsten i cement..... | 25 » |
| d:o av huggen sten i cement..... | 50 » |
| granit..... | 60-120 » |
| Vid valvkonstruktioner och murade pelare av relativt större höjd i förhållande till tvärsektionsarean bör endast halva värdet av förestående koefficienter användas. | |

Figur 4.4. Tillåtna påkänningar enligt normer från 1880-talet (Hesselman, 1945).

4.3 Murverk

4.3.1 Beständighet och hållfasthet.

Murverk har mycket goda egenskaper vad det gäller beständighet mot klimat och mekanisk påverkan. Detta medger att murverk har låga underhållsbehov och dess livslängd räknas i hundratals år (Hervall, 1997).

Hållfastheten i ett murverk beror i första hand på murstenarna och murbrukets egenskaper men det påverkas även av hur murningsarbetet utförts, stenformat, fogtjockleken, väggtjocklek, höjd och bredd (Teknisk information, 1969). Äldre murverkskonstruktioners hållfasthetsegenskaper är däremot sällan kända då murbrukets och murstenarnas egenskaper förändrats med tiden. Hållfasthetsegenskaperna karakteriseras dock utav god förmåga att uppta tryckspänningar, förhållandevis dålig förmåga att uppta skjuvspänningar och dålig förmåga att uppta dragspänningar (Fabricius, 1990).

4.3.2 Statiskt system

Den klassiska indelningen av en byggnads vertikala och horisontala bärande delar gäller för majoriteten av alla murade byggnader. Bjälklag och tak är bärande konstruktioner som upptar horisontella laster, egentynngd, nyttig last, snö- och vindlast. Tak och bjälklag överför sedan belastningarna till vertikalt bärande mur och pelare. Mur och pelare för därefter ner krafterna till grundkonstruktion och vidare ner i undergrunden, detta innebär att en vertikalt bärande mur främst ska överföra tryck. Murväggarna verkar på så vis som väggpelare och således utsätts för knäckningsrisk. Genom bjälklag, skiljeväggar och gavlar som sekundärfunktion ges dock en stabiliserande effekt för murarna (Troelsgård, 1990).

Bjälklagen och skiljeväggarna kan överföra krafter i sitt egna plan och därmed verka som skivor som upptar krafterna vinkelrätt mot ytterväggen. Därför förutsätter det att krafterna kan överföras till andra bärande delar. Detta medför dock att sekundärfunktionerna kan utnyttjas för att uppta vindlast på fasaderna. Därav är oftast gavlar, ytterväggar, bärande och icke bärande skiljeväggar aktiva i det statiska systemet (Troelsgård, 1990).

På grund av detta är det statiska systemet i murverkskonstruktioner svårt att bestämma, anledningen är att konstruktionen är statiskt obestämd. Murverket består dessutom av två olika material, mursten och murbruk. Materialen har olika egenskaper och samverkar med varandra vid kraftfördelning. Murstenarna kan dessutom muras i olika vinklar och med olika format beroende på var i murverket murstenarna är placerade. Detta resulterar i att sambandet mellan spänning och töjning blir riktighetsberoende. Förhållandet är därför inte linjärt vilket betyder att Hooke's lag ej går att tillämpa (Fabricius, 1990).

Murverkets statiska system måste alltid vara i jämvikt för att konstruktionen inte ska spricka. Jämvikten kan kontrolleras med grafisk (se *bilaga D*) eller analytisk metod där de spänningarna som uppkommer inte får överstiga murens tryckhållfasthet (Fabricius, 1990).

Grafisk och analytisk metod beskriver hur trycklinjen utformas vid belastning av murverk och krafternas riktning mot upplagen med hänsyn till jämviktsvillkoren. Det är därför viktig att tillkommande belastningar från eventuell påbyggnad inte påverkar jämvikten i det statiska systemet, vilket förskjuter trycklinjen. Detta kan i sin tur kan orsaka skador (Fabricius, 1990).

4.3.3 Valvkonstruktioner

Valv är tryckta, statiskt obestämda konstruktioner som förekommer på platser i en fasad eller innervägg där en fri yta önskas, exempelvis fönster och passager. Konstruktionen bygger på att hela valvbågen är tryckt och i balans. Om krafterna som verkar på valvet inte tar ut varandra finns det risk för sprickbildning i delar som utsätts för dragspänningar. Hållfastheten i ett valv ökar generellt sett då den fria spännvidden minskar och höjden ökar. Ett exempel där detta koncept utnyttjats är vid gotiska kyrkor från medeltiden, där valven karakteriseras av en spetsig form. Valvkonstruktionens form beror på hur den är belastad. Ellipsformning är lämpligt då lasten är utbredd över den fria öppningen medan spetsiga val fördelar koncentrerade laster bättre (Berg, 2010).

I hus med murverksstomme leds belastningen från byggnaden ned till grunden genom valv i källarplanet. Det är därför viktigt att valven är dimensionerade för byggnadens belastning. Det finns olika tillvägagångssätt för att bestämma lastfördelningen i valv, till exempel analytisk metod. Metoden bygger på att genom skalenliga ritningar bestämma valvets trycklinje. Hamnar trycklinjen utanför valvets yttre gränser uppstår dragspänningar, detta betyder att konstruktionen spricker (Fabricius, 1990).

4.3.4 Deformationsegenskaper

Kraftöverföringar i en murverkskonstruktion medför deformationer, genom deformationerna kan sedan krafternas riktning och hur kraftöverföringen sker återges. Sprickor berättar dock hur inbördes byggnadsdelar, i förhållande till varandra, rört sig och var trycklinjen är belägen, då en trycklinje inte går tvärs sprickorna (Troelsgård, 1990).

Brott förekommer sällan i äldre murverkshus och med få undantag är det främst kalkbruk som använts. Det svaga bruket tillåter deformation av mikrosprickor utan uppkomst av stora sprickor. Därav kan en mur med kalkbruk ses som en plastisk konstruktion (Lanevik, 1990).

"ju svagare bruk desto starkare mur är för gamla hus en regel som ofta kommer i skymundan." (Lanevik 1990:208)

Det är mikrosprickorna som medger att stenarna kan röra sig inbördes men samtidigt är det viktigt att rörelserna sker tillräckligt långsamt. Sker rörelserna ojämnt eller hastigt kan en stor mängd småsprickor uppstå. Uppkomsten av sprickor i ett starkt bruk (exempelvis cementbruk) är däremot färre men avsevärt farligare (Lanevik, 1990).

"Det svaga bindemedlet ska i äldre murverk ses som en styrka eller tålighet och inte som en brist" (Lanevik 1990:213).

Utöver murverkets deformationsegenskaper har en tryckt murverkskonstruktion ett icke-linjärt spänningstjningssamband. Vid dimensionering av ett murverkstvärsnitt får det dock antas vara linjärt, rektangulärt, paraboliskt, paraboliskt-rektangulärt (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

4.4 Mursten

Under 1800-talets andra hälft kunde hårt och löst brända murstenar blandas med normalt brända. För murstenarnas kvalitet ställdes krav på att teglet skulle bestå av god lera, fast, tät och vara väl bränd. Vidare till 1880-talet tillverkades teglet i allmänhet med maskin och kvaliteten ansågs bli allt bättre. Samtidigt importerades mycket fasadtegel från Tyskland (Hesselman, 1945). Framtill 1920-talet var murverksbyggnader vanligtvis murade med stortegel i avvikande dimensioner. Det äldre teglet varierar även avsevärt i hållfasthet, vilket beror på lerans egenskaper och att teglet bränts olika hårt (Teknisk information, 1969). Dessutom är teglets färg beroende på lerans egenskaper. Vid hög kalkhalt blir teglet gult och vid kalkfattig lera blir teglet rött. (Hervall, 1997)

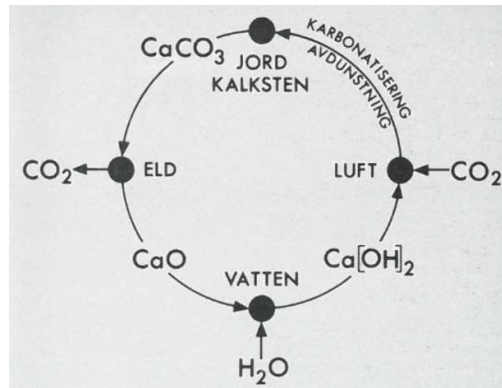


Figur 4.5. De urborrade murstenarna visar färgskillnaden mellan två stenar lagda intill varandra i hjärtväggen av Pahl 7.

Tegel har en förhållandevis hög tryckhållfasthet och jämfört med andra stenbaserade material även en hög draghållfasthet (Bergström, 2016). Draghållfastheten mäts till ungefär en femtedel till en tiondel av tryckhållfastheten. Generellt sett är tegelstommar tryckta konstruktioner men påverkas också av dragkrafter. Det uppkommer exempelvis dragpåkänningar vid höga vindbelastningar och vid utvidgning murbruket på grund av temperaturförändringar (Bergström, 2016).

4.5 Murbruk

Murbruk består av en blandning mellan ballastmedel, vatten, bindemedel, och tillsatsmedel. Beroende på kvaliteten av murbruket förändras dess förmåga att hantera krympnings- och svällningsrörelser. Bindemedlet i bruket varierar mellan cement, murcement, kalk eller en blandning mellan kalk och cement, vilket ger upphov till olika brukstyper med olika egenskaper (Lanevik, 1990). Kalkbaserat murbruk hårdnar när det reagerar med koldioxid. Härdningen kallas karbonatisering, en process som pågår under flera månader. Efter murbruket har karbonatiserats fortsätter en process av omkristallisering i bruket, något som pågår under en mycket lång tid, samtidigt som det ökar murbrukets beständighet. Därför är det viktigt att låta kalkbruk härda tills full karbonatisering innan exempelvis trycktestning (Lindqvist, 2007). Då murbrukets egenskaper är av stor betydelse för murverkets hållfasthet, gällande både vidhäftning mot sten och tryckhållfastheten (Teknisk information, 1969).



Figur 4.6. Karbonatiseringsprocessen (Lindgren & Moeschlin, 1985).

Det finns två olika huvudgrupper av kalkbruk, hydrauliskt och icke hydrauliskt. Ett exempel på ett icke hydrauliskt bruk är kalkhydratbruk. Kalkmassan binder endast bruket med hjälp av kalkhydrat vilket begränsar materialets egenskaper. Kalkhydratbruk kan bara härda i luft och inte i vatten eller miljöer med hög luftfuktighet vilket gör att användningsområden så väl som styrka minskar. Hydrauliskt kalkbruk härdar däremot när det kommer i kontakt med vatten vilket gör det starkare än kalkhydratbruk. (Lindgren & Moeschlin, 1985).

| Beteckning | Tidigare | Användningsområde |
|------------|----------|--|
| M10 | A-klass | Används för murning med höghållfasta stenar/murblock i utsatt miljö, oftast under eller i anslutning till mark. |
| M2,5 | B-klass | Används till fasadmurning i de flesta förekommande fall. |
| M1 | C-klass | Används till fasadmurning, oftast där man vill undvika delfogar, kräver mycket bra förutsättningar vad gäller vattenavledning. Används normalt inte i utsatta eller sjönära lägen. |
| M0,5 | D-klass | Används till renovering av äldre bebyggelse där kalk eller hydrauliska kalkbruk sedan tidigare använts. |

Figur 4.7. Beskrivning av olika murbruksklasser (Weber, u.d.).

4.6 Förändrade förutsättningar

Vid projektering av äldre murverkshus bör byggnaden bedömas från fall till fall, där byggnadens tekniska egenskaper bör visa vägen istället för dagens strikta byggnormer. För att kunna utgå från byggnadens förutsättningar måste därför en omfattande förundersökning utföras. Åtgärder vid ombyggnad kan då anpassas efter byggnadens förutsättningar, där nya detaljer samverkar med det befintliga, både statistiskt och byggnadsfysikaliskt (Berggren, 1990).

4.6.1 Instabilitet och ändrat jämviktssystem.

Äldre murverkshus är, som beskrivet under rubriken 4.3.4 *Deformationsegenskaper*, med få undantag murat med kalkbruk. Genom det svaga bruket tillåts konstruktionen att deformeras utan uppkomst av större sprickor och på så vis förekommer sällan brott till följd av höga spänningar i äldre murverkshus. Snarare beror brott på förändringar i stommen och att trycklinjen på så vis flyttats utanför dess tvärsnitt och instabilitet uppstår (se *statiskt system 4.3.2*). Ändringarna kan bero på exempelvis ombyggnationer eller ändrat statiskt system. En murverksbyggnad ses som, med eller utan skador, ett statiskt jämviktssystem och vid förändringar eller åtgärder kan även en byggnads jämvikt ändras. Vid ombyggnationer förändras i regel alltid jämvikten och därmed omlagras krafterna i byggnaden och nya deformationer uppstår (Lanevik, 1990).

4.6.2 Främmande material

Äldre murverkshus tillåter goda deformationsmöjligheter och ger en mycket rörlig byggnad. På så vis måste en murverkskonstruktion som förstärks med betong varsamt utformas och kontrolleras eftersom det föreligger risk att en betongkonstruktion som enbart medger små rörelser bildar en stel kropp som absorberar lasterna i dess omgivning. Befintliga stommens naturliga och oundvikliga rörelser tvingas då till nya spänningar och oönskade rörelser uppkommer. Detta kan leda till uppkomst av sprickor i murverket och till och med förvärra tillståndet i tidigare oskadda byggnadsdelar. Förstärkning av just betong skapar dessutom en såpass stark förbindelse med murverket att åtgärden anses irreversibel. Eftersom att delar av murverket går förlorat vid behov av att riva betongkonstruktionen. Trots att tegel är ett väldigt motståndskraftigt material, kan det även ta skador av betongens stora mängd vattenlösliga salter som kan vandra över till murverket och orsaka skador (Lanevik, 1990).

Detta gäller även när nytt murbruk används vid exempelvis en ombyggnation. Det är viktigt att det tillförda murbruket har samma hållfasthetsförmåga och deformationsegenskaper som det befintliga. Helst bör det vara svagare än det befintliga. Bruket ska också bestå av minsta möjliga mängd vattenlösliga salter. Av anledningar nämnda ovan (Lanevik, 1990).

4.6.3 Konstruktionsregler

Enligt Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoderna är det som utgångspunkt, vid ändring av en byggnad, att kravnivån är densamma som vid nybyggnad. Däremot får avvikelser av kravnivån förekomma om det finns specifika anledningar, såsom tekniska skäl och ändringens omfattning. Avsteget får dock inte innebära oacceptabel risk för säkerheten eller människors hälsa. Om ändringen medför utökad lasteffekt på bärande konstruktion måste dess bärförmåga beaktas, även om inte någon fysisk ändring planeras på aktuell byggnadsdel. Exempelvis befintliga stommen vid påbyggnad av nya våningar (Boverket, 2017).

Vid påbyggnader måste nya byggnadsdelar dimensioneras enligt europeiska konstruktionsstandarder (Eurokod). Om ändringen medför utökad belastning på befintlig byggnad får äldre normer eller eurokoder tillämpas vid dimensionering. Äldre normer som tillämpas kan vara sådan som användes vid uppförande av byggnaden. Den dimensionerande lasten ska däremot anpassas efter äldre normens förutsättningar på grund av att säkerheten är beroende av faktorer såsom hållfasthet, säkerhetsklasser, last och lastkombinationer. Detta innebär att partialkoefficienter inte går att blanda mellan olika modeller (Boverket, 2017).

Skärpta krav ska även tillämpas på delar ändringen berör. Skärpta krav kan innebära att snölastens dimensioneringsvärde enligt regler har förändrats sedan uppförandet av byggnaden. Därmed ska dagens dimensioneringsvärde användas i äldre metoden (Boverket, 2017).

4.6.4 Modern byggteknik i äldre murverkshus

Vid påbyggnad ökar belastningen på den befintliga byggnaden. Detta kan resultera i att balkar tillförs i det åldrade bjälklaget. Med nya balkar, tillkommer nya infästningar och där med eventuella komplikationer (Lukaszewska, 2018).

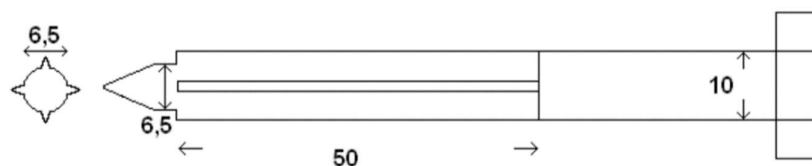
Moderna Infästningar i gamla tegelbyggnader kan orsaka skador på den befintliga stommen om de inte utförts rätt. Murbruket är känsligt för dragkrafter vilket gör att inspänningsmoment vid upplag kan äventyra murverkets hållfasthetsegenskaper. Ytterligare, måste murstenar som utgör upplaget skyddas från bjälklagsbalkens deformationer. Då det uppkommer stora tryckkrafter på upplagskanten, kan de yttre murstenarna spricka (Lukaszewska, 2018).

Upplagsprinciper från Vildsvinet 25 visar en möjlig lösning på ovan beskrivna problem. Där en stålbalk är upplagd på ett rullstöd för att eliminera inspänningsmoment. Balken är samtidigt upphöjd över upplagsarean för att underliggande murstenar inte ska utsättas för kanttryck (Lukaszewska, 2018).

För minskat böjmoment på liggfogarna, orsakat av horisontalkrafter från påbyggnaden, är infästningarna placerade längs centrumlinjen av murväggen. Detta medför även en minskad lastexcentricitet och förbättrad bärförmåga i väggen (Lukaszewska, 2018). I *bilaga A* redovisas upplag och vald infästningsmetod för Vildsvinet 25.

4.6.5 Analysmetoden X-drill

En metod och ett verktyg utvecklat av Teknologisk institut i Danmark för att på plats mäta den karakteristiska tryckhållfastheten av befintligt murbruk. X-drill är användbar när exempelvis en befintlig konstruktion utsätts för utökade laster eller vid håltagning av murverksvägg (Christiansen, u.d.).



Figur 4.8. Illustration av X-drill. En slät metallspik utrustad med fyra flänsar (Christiansen, u.d.)

För att mäta den karakteristiska tryckhållfastheten genom metoden förborras först ett $\varnothing 6$ hål i murbruket med ett djup på 70-80mm. Det förborrade hålet bevarar bruket bättre när borren slås in och säkerställer att enbart skruvens flänsar låses fast i bruket. Därefter borras ett $\varnothing 10$ hål på ett djup av 10mm, vilket reducerar inflytandet av vassa kanter i hålet. Sedan slås skruven in med längden L_i (cirka 15-20mm). Med hjälp av en momentnyckel som kan läsa av vridmoment utläses sedan vridningen som erfordras för brott M_v . Värdet m_v bestäms enligt *ekvation 4.1* (Christiansen, u.d.).

$$m_v = M_v / L_i \quad [4.1]$$

Minst 5 prover utförs beroende på variationen av resultaten. Av samtliga prov beräknas ett medelvärde $m_{v,m}$ som sedan används för att beräkna f_m enligt *ekv. 4.2* (Christiansen, u.d.).

$$f_m = c_p * m_{v,m} \quad [4.2]$$

Där c_p är en proportionskoefficient som utgörs av sambandet mellan f_m och $m_{v,m}$. Proportionskoefficienten kan sättas till värdet 3,2 (Christiansen, u.d.).

4.7 Ackreditering i Sverige

I Sverige är Swedac det nationella ackrediteringsorganet som utför kontroller på certifierings- och kontrollorgan enligt gällande standarder och regelverk (Swedac, u.d.). På Swedacs hemsida finns ett register för ackrediterade företag och organisationer. I registret går bland annat att söka efter vad verksamheten är ackrediterad för. Det vill säga vilken provning, kontroll, kalibrering och certifiering (Swedac, u.d.).

4.8 Hållfasthetstester enligt standard

Hållfasthetstester av murbruk, mursten och murverk utförs enligt svensk standard, vilket är en nationell tillämpning av den europeiska standarden. Listan nedan redogör samtliga hållfasthetstester som utförs vid bestämning av hållfasthetsegenskaper för mursten, murbruk och murverk.

En murstens tryckhållfasthet testas enligt standard: SS-EN 772-1.

En murstens böjhållfasthet testas enligt standard: SS-EN 772-6.

Murbruk tryck- och böjdraghållfasthet testas enligt standard: SS-EN 1015-11.

Murverks tryckhållfasthet testas enligt standard: SS-EN 1052-1.

Murverks böjdraghållfasthet testas enligt standard: SS-EN 1052-2:2016.

Murverks skjuvkraftskapacitet testas enligt standard: SS-EN 1052-3

Murverks vidhäftningshållfasthet med vridning testas enligt standard SS-EN 1052-5:2005.

4.9 Hållfasthetsberäkningar för murverk enligt eurokod 6

4.9.1 Tryckhållfasthet

Den karakteristiska tryckhållfastheten f_k bestäms genom provning (SS-EN 1052-1) eller hämtade data från andra källor, och beräknas enligt *ekv. 4.3* (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$f_k = K * f_b^\alpha * f_m^\beta \quad [4.3]$$

Där K är en konstant som beror på stenens form (Solida murstenar $K = 0,55$). Den normaliserade tryckhållfastheten för mursten och murbruk definieras som f_b respektive f_m . Där β och α är konstanter.

4.9.2 Skjuvhållfasthet

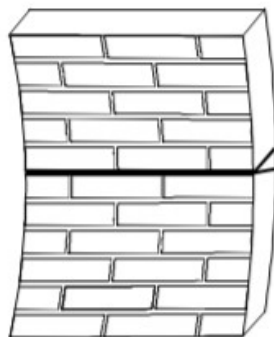
Den karakteristiska initiala skjuvhållfastheten f_{vk0} vid noll tryckspänning bör bestämmas genom provning (SS-EN 1052-3). Enligt *ekv. 4.4* beräknas sedan den karakteristiska skjuvhållfastheten. Formeln är endast avsedd för murverk, murat med normalfog eller en tunnfog som har tjocklek 0,5 – 3,0 mm (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4\sigma_d \quad [4.4]$$

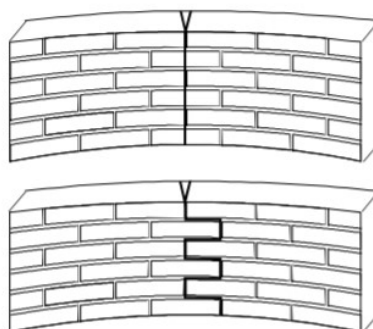
Den dimensionerande tryckspänning på provkroppen vinkelrätt mot skjuvriktningen på grund av lämplig lastkombination definieras som σ_d . Tryckspänningen är ett medelvärde över väggens tryckta del. f_{vk} får inte vara högre än $0,65 f_b$ eller f_{vlt} (f_{vlt} är ett gränsvärde för f_{vk})

4.9.3 Böjhållfasthet

Brott i tegelmur längs väggplanet delas in i två olika fall (se figur 4.9 och figur 4.10).



Figur 4.9. Brottyta parallellt liggfogarna, f_{xk1} .
(SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018)



Figur 4.10. Brottyta vinkelrätt mot fogarna, f_{xk2} .
(SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018)

Den karakteristiska böjhållfastheten betecknas med f_{xk1} och f_{xk2} . Böjhållfastheten bestäms antingen, med hjälp av provning utav murverket enligt SS-EN 1052-2 eller utläses enligt tabell 4.1 och tabell 4.2 (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

| Murstenar och murblock | f_{xk1} N/mm ² | | | |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|
| | Normalt murbruk | | Tunnfogsbruk | Lättmurbruk |
| | $f_m < 5$ N/mm ² | $f_m \geq 5$ N/mm ² | | |
| Tegel | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,10 |
| Kalksandsten | 0,05 | 0,10 | 0,20 | ej använd |
| Betong och lättklinkerbetong | 0,05 | 0,10 | 0,20 | ej använd |
| Autoklaverad lättbetong | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,10 |
| Fabrikstillverkad sten | 0,05 | 0,10 | ej använd | ej använd |
| Natursten | 0,05 | 0,10 | 0,15 | ej använd |

Tabell 4.1. Värderna för brottyta parallellt liggfogarna (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

| Murstenar och murblock | f_{xk2} N/mm ² | | | |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|
| | Normalt murbruk | | Tunnfogsbruk | Lättmurbruk |
| | $f_m < 5$ N/mm ² | $f_m \geq 5$ N/mm ² | | |
| Tegel | 0,20 | 0,40 | 0,15 | 0,10 |
| Kalksandsten | 0,20 | 0,40 | 0,30 | ej använd |
| Betong och lättklinkerbetong | 0,20 | 0,40 | 0,30 | ej använd |
| Autoklaverad lättbetong | $\rho < 400$ kg/m ³ | 0,20 | 0,20 | 0,15 |
| | $\rho \geq 400$ kg/m ³ | 0,20 | 0,40 | 0,15 |
| Fabrikstillverkad sten | 0,20 | 0,40 | ej använd | ej använd |
| Natursten | 0,20 | 0,40 | 0,15 | ej använd |

Tabell 4.2. Värderna för brottyta vinkelrätt mot liggfogarna (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

5 GENOMFÖRANDE

5.1 Grundläggande arbete

5.1.1 Inventering

I början av studien utfördes flertalet besök på Stockholms stadsbyggnadskontor, för att inventera handlingar och ritningar. I sökmotorn på databasen användes bland annat "påbyggnad" som nyckelord och innerstadsområden så som Östermalm och Södermalm för att finna relevanta ärenden. Genom sökningar hittades handlingar och kontaktuppgifter till konstruktörer som projekterade påbyggnaden av Vildsvinet 25. Detta kom senare att spela en viktig roll i studien. Fastigheten Pahl 7 var sedan arbetets början ett referensobjekt och därmed hämtades även handlingar för denna fastigheten på stadsbyggnadskontoret.

Genom sökningar på internet hittades litteratur och rapporter relevanta för arbetet. Genom att kontakta författare av erhållna publikationer tilldelades ytterligare information och kontaktuppgifter för kompletterande inventering. Via kontakt med näringslivet erhöles hemsidor och verktyg för analys av murverk. Genom handledning och förslag från BAK Stockholm Hongkong erhöles ytterligare information och litteratur.

Under arbetet har möten och konferenser av olika former utförts. I samband med inventering av handlingar från Vildsvinet 25 kontaktades ansvarig konstruktör och handläggare för påbyggnaden, Elzbieta Lukaszewska. Ett möte bokades in för genomgång av projektet, där frågor gällande hållfasthetstester, väggarnas hållfasthet, förstärkningar av stomme och infästningar för påbyggnaden besvarades.

I ett tidigt skede kontaktades Tomas Gustavsson och Miklós Molnár som båda är författare av erhållen litteratur. Genom mejlkonversation erhöles tips på verktyg och litteratur för beräkningar av murverk och kontakt förmedlades till Teknologisk institutet i Danmark.

Med Teknologisk institutet i Danmark hölls mejlkonversationer och telefonkonferenser gällande deras metoder för beräkningar men även gällande verktyget och metoden X-drill.

Elzbieta Lukaszewska tillhandahöll kontaktuppgifterna till Karin Ericsson, uppdragsledare för ombyggnationen av Nationalmuseum. Ericsson tillhandahöll information gällande projektet och resultat från hållfasthetstester av murverket.

Genom BAK Stockholm Hongkong erhöles kontaktuppgifter till Alexander Eriksson Brandels på RISE CBI Betonginstitutet. Efter mejlkonversation hölls ett möte som senare gav oss möjligheten att återkomma för genomgång av tryckhållfasthetstest för murstenar.

5.1.2 Metoden X-drill

Under genomförandet av studien rekommenderades att kontakta ansvariga för metoden och verktyget X-drill. Ett arbete påbörjades för att försöka införskaffa verktyget och utföra tester. Genom telefonkonferenser med Helge Hansen på Teknologisk Institut framkom däremot att metoden fortfarande var i utvecklingsstadiet, användning av metoden krävde dessutom utbildning. Det blev därför allt för omfattande att genomgå denna process under studien för att möjliggöra tester av murbrukets hållfasthet.

5.1.3 Ackrediterade verksamheter för test av murverk

Baserat på sökningar som utfördes i Swedacs register för ackreditering, finns det brist på juridiska personer ackrediterade för europeiska standarder gällande tester av murbruk, mursten och murverk. Standarder som söktes innefattar även samtliga delar och var följande:

EN 771 (SS-EN 771)
EN 772 (SS-EN 772)
EN 998 (SS-EN 998)
EN 1015 (SS-EN 1015)
EN 1052 (SS-EN 1052)
(Swedac, u.d.)

5.1.4 Modellering i finita elementprogram

Initialt förbereddes studien för modellering med strukturanalyser. Därav påbörjades inläring av rekommenderat program Robot Structural Analysis utvecklat av Autodesk. Relativt tidigt visade det sig att programmet inte är lämpat för modellering av murverk. Då programmet inte behandlar murverk som material och att skapa en vägg med samma tryckhållfasthetsegenskaper ansågs inte ge rätt förutsättningar. Därefter påbörjades inläring av finita elementprogram ETABS, ett program som behandlar murverk som material. Dessvärre kunde inte licens erhållas och utvärderingsversionen var väldigt begränsad eftersom modellfiler enbart gick att öppna i 30 dagar efter påbörjad modellering och framställda utdata kunde inte behandlas.

5.2 Utförda hållfasthetstester

5.2.1 Tryckhållfasthetstester av Pahl 7

Murstenar från Pahl 7 har tryckhållfasthetstestats hos RISE CBI Betonginstitutet. CBI i Stockholm är däremot inte ackrediterade för att utföra tryckhållfasthetstester enligt SS EN 772-1:2011 och testerna följde ej standard korrekt.

Ett antal murstenar togs från fastigheten Pahl 7, varav tre murstenar användes för att borra ut sex cylinderformade provkroppar. En kubformad provkropp erhöles även från en av murstenarna.



Figur 5.1: Provkroppar i form av cylindrar, från tryckhållfasthetstest (Foto: Alexander Eriksson-Brandels, 2018).

Provkropparna belastades i en hydraulisk tryckpress där cylindrarna och kuben utsattes för en tryckökning motsvarande 2 kN/s respektive 2,94 kN/s. Totalt erhöles karakteristisk tryckhållfasthet för kuben och fem av sex cylinderprov, då provkropp 3.2 gick sönder vid preparering.



Figur 5.2: Trycktest av kubformad provkropp.

5.2.2 Vidhäftningstest av Pahl 7

Ett platsbaserat test utfördes på referensobjektet Pahl 7, med avseende på vidhäftningsförmåga mellan mursten och bruk. Testet utfördes på begäran av BAK Stockholm Hongkong genom RISE CBI Betonginstitutet i Stockholm. CBI i Stockholm är däremot inte ackrediterade för att prova vidhäftningsförmågan av murbruk enligt europeisk standard SS-EN 1052-5:2005. Test utfördes inte heller enligt standarden.

Vindbjälklaget var uppbrutet på flera ställen över hjärtväggen, för att möjliggöra flera test. Ovanpå hjärtväggen var ett tunt skikt av murbruk bevarat. För att skapa en förbättrad kontaktyta slipades bruket med sandpapper.

Med en kärnbormaskin borrades en cirkulär yta av murbruket, ett fåtal centimetrar ned i översta murstenen, för att precisera dragytan. På den cirkulära ytan limmades en stålpuck ($\Phi 50\text{mm}$) med fästankordning fast.



Figur 5.3. Test av vidhäftningsförmågan i murbruket på hjärtväggen av Pahl 7. Till nedre cylindern har stålpucken limmats fast. Ursågad cylinder i ovankant av testades därefter.

Stålpucken kopplades sedan till en maskin som är avsedd för provning av vidhäftningsförmåga. När allt var monterat, applicerades en centrisk dragkraft (0,5MPa/s) från maskinen vinkelrätt mot provytan. Belastningen påfördes kontinuerligt tills brott uppstod (Taylan, 2018).



Figur 5.4 Förberedning av vidhäftningstest på hjärtväggen av Pahl 7.

5.2.3 Tryckhållfasthetstest av Norrmalm 3:1

Genom Karin Ericsson tillhandahölls rapporten från tryckhållfasthetstesten av murstenar från Norrmalm 3:1. Därefter mejlades kontaktpersonen för den utgivna rapporten, Jan Erik Lindqvist på RISE CBI Betonginstitutet. Genom mejlkonversation redogjorde Lindqvist för hur provtagningen utfördes.

Enligt Lindqvist (2018) är provtagningen utförd genom att tre murstenar togs ut från överkant av murade tegelbalkar på plan 4 och 6. Prov 1-3 är uttagna från plan 6 och 4-6 är uttagna från plan 4. Benämningarna på stenarna är ordnade i nummerordning. Exempelvis är benämningen "3.2" det andra provet utfört på mursten 3. Provtagningen av mursten 1 från plan 6 utfördes aldrig. Lindqvist (2018) menar att provet kan gått sönder vid preparering.

Lindqvist (2018) menar även att resultatet som redovisas har en spridning i hållfasthet, vilket inte är ovanligt. Teglet i byggnaden var även inhomogent och det var olika sorters tegel beroende på konstruktionsdel, exempelvis för balkar, valv och pelarfundament. Resultatet från tryckhållfasthetstestet redovisas under rubriken 6.1.2 *Norrmalm 3:1*.

5.2.4 Tunnslipsanalys av murbruk från Norrmalm 3:1

RISE CBI Betonginstitutet utförde analyser på murbruket i samband med ombyggnationen av Nationalmuseum. Genom Karin Ericsson tillhandahölls rapporten som redovisar resultatet av analysen. Resultatet av tunnslipsanalysen visar att detta murverk består av kalkbruk, eller ett hydrauliskt kalkbruk. Den mikrokemiska analysen visar att bruket motsvarar ett B till C murbruk med en tryckhållfasthet på 2 till 7,5MPa (Lindqvist & Trägårdh, 2013).

5.2.5 Murverkets tryckhållfasthet

Den karakteristiska tryckhållfastheten beräknades med hjälp av resultat från tryckhållfasthetstesterna samt genom antaganden för murbrukets hållfasthetsegenskaper.

Medelvärde samt standardavvikelse av resultaten från tryckhållfasthetstesterna erfordrades. Det lägsta medelvärdet noterades och beräknades genom att standardavvikelsen subtraherades från medelvärdet. Detta resultat användes sedan för att beräkna den karakteristiska tryckhållfastheten. Provkroppar med hög tryckhållfasthet kasserades för att minska standardavvikelsen (se tabell 6.1 till 6.4).

Då inga tryckhållfasthetstester för murbruket kunde utföras användes alternativa beräkningsmetoder från Teknologisk Institut i Danmark (Härefter benämnt DTI). Beräkningar utfördes även med antagandet att murbruket är av klass M0,5.

Den första beräkningsmetoden förutsätter att varianskoefficienten för testresultaten av murstenarnas tryckhållfasthet inte är högre än 25%. Varianskoefficienten sänktes till godtyckligt värde genom att bortse från de högsta hållfasthetsvärdena från resultaten. Där f_k beräknades med ekv. 5.1 (Teknologisk Institut, 2013). Murbrukets och teglets tryckhållfasthet betecknas med f_m respektive f_b .

$$f_k = 0,75 * (0,625 * f_b^{0,77} - 0,0015 * f_b^2) \quad [5.1]$$

För att sedan lösa ut f_m enligt SS-EN 1996-1-1:2005+A5:2012. Där murstenens tryckhållfasthet angavs till medelvärdet av resultaten från tryckhållfasthetstesterna för murstenarna.

$$f_m = \left(\frac{f_k}{K * f_b^{0,7}} \right)^{\frac{1}{0,3}} \quad [5.2]$$

Den andra beräkningsmetoden baserades på antagandet att murbruket består av ren kalk. Metoden baserades på Mohr-Coulombs brottkriterium. Friktionsvinklen μ för kalkbruk har tagits fram på DTI genom forskning och definieras som 0,47 radianer (Feilberg Hansen & Pedersen, 2015).

$$\varphi = \arctan(\mu) \quad [5.3]$$

$$k = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad [5.4]$$

Brottgränsen f_m för rent kalkbruk kan sedan beräknas med Mohr-Coulombs brottkriterium. Där c är kohesionen. Kohesionen definieras som 0,11 MPa utifrån forskning på Aalborg universitet (Feilberg Hansen & Pedersen, 2015).

$$f_m = 2 * c * \sqrt{k} \quad [5.5]$$

Den karakteristiska tryckhållfastheten beräknades enligt ekv. 5.6 med antagen murbruksklass M0,5 (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018). Där f_k beräknades med $K=0,55$

$$f_k = K * f_b^{0,7} * f_m^{0,3} \quad [5.6]$$

Den dimensionerande tryckhållfastheten beräknades med därefter enligt *ekv. 5.7* (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018). Där partialkoefficienten angavs till $\gamma_m = 1,5$.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad [5.7]$$

Tryckhållfastheten beräknades även enligt Kreügers formel för bärförmåga (Ekblad, 1948). Där höjden på byggnaden definierades som 17 m och tjockleken till 1½-sten (455mm) för Pahl 7 och 2 stens tjocklek (600 mm) för Norrmalm 3:1. Då höjden på murstenen är 7,5 cm definieras $r=11$ och $s=4,5$ om höjden är 6,5 cm beräknas f_k med $r=12$ och $s=5$ (Ekblad, 1948).

$$f_k = \frac{f_b \cdot (6 + 0,1 \cdot f_m)}{(r + s \cdot \frac{h}{t})} \quad [5.8]$$

h = byggnadshöjd

t = tegelmurens tjocklek

5.2.6 Murverkets skjuvhållfasthet

Murverkets skjuvhållfasthet beräknades med antagen hållfasthetsklass M0,5 och M1 enligt *ekv. 5.9* (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$f_{vk} = f_{vk} + 0,4\sigma_d \quad [5.9]$$

f_{vk} = karakteristiska skjuvhållfastheten.

f_{vko} = Initiala skjuvhållfastheten för provkroppen utan belastning

σ_d = tryckspänningen vinkelrätt mot skjuvriktningen

Tryckspänningen erhöles från beräkningar utförda av BAK Stockholm Hongkong. Skjuvhållfastheten f_{vko} baserades på resultat från vidhäftningstesterna utförda på Pahl 7 och enligt tabellvärden från eurokod 6 (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

5.2.7 Murverkets böjdragskapacitet

Den dimensionerande böjdragskapaciteten beräknades enligt *ekv. 5.10* och *5.11* där $f_{xk.1}$ och $f_{xk.2}$ är tabellvärden från standard och partialkoefficienten γ_m angavs till 1,5 (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$f_{xd1} = \frac{f_{xk1}}{\gamma_m} \quad [5.10]$$

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk1}}{\gamma_m} \quad [5.11]$$

5.3 Dimensionerande laster och vertikal bärförmåga

Dimensionerande beräkningar av murverk gäller för referensobjekt Pahl 7. Genom platsbesök och ritningsavläsning har mätningar och värden angivits. Sedermera beräknas lasterna vertikalt ned i en murpelare i yttermur, enligt eurokoder. För indata, utdata förutsättningar för Pahl 7 se *bilaga C*.

5.3.1 Laster

Murväggarna i Pahl 7 är byggda med 1½-stens stortegel och baserat på testresultat av murstenar från Pahl 7 angavs densiteten ρ_{mur} till 1800kg/m³, dimensioner på mursten och tjockleken t för en murpelare. Genom ritningsavläsning angavs den fria våningshöjden h till 3,3m. Den påförda egentygden i murpelare per våning beräknades enligt *ekv. 5.12*.

$$g_{k.mur} = h * t * \rho_{mur} \quad [5.12]$$

Flerbostadshuset Pahl 7 är beläget i Stockholm, därav angavs den karakteristiska snölasten s_k till 2kN/m² (Boverket, 2015). Byggnaden anses vara belägen i ett område med normal topografi och exponeringsfaktorn C_e angavs till normalvärdet 1,0. Den termiska koefficienten C_t angavs till normalvärdet 1,0. För sadeltaket med en lutning under 30° angavs formfaktorn μ för snölasten till 0,8. Snölasten beräknades sedan enligt *ekv. 5.13* (SS-EN 1991-1-3/AC:2009, 2016).

$$s = s_k * \mu * C_e * C_t \quad [5.13]$$

Innan utförd påbyggnad består Pahl 7, från markplan, utav av fem våningar och ett vindsbjälklag. Varje våning och murpelare per våning räknades med samma dimensionerande vertikala belastning, förutom vindsbjälklag och takkonstruktionen. Då vindsbjälklaget i byggnaden har brandtegel i ovanskiktet.

Genom ritningsavläsning angavs bjälkarnas längd till 6m med ett centrumavstånd på 600mm. Efter en detaljritning på en bjälklagskonstruktion från sekelskiftet beräknades egentygdena i bjälklaget (se *bilaga B*). Tungheten för respektive byggnadsmaterial i konstruktionen valdes efter tabeller i standard SS EN-1991-1-1. Egentygden $g_{k.bjl}$ i bjälklaget och på vinden $g_{k.vind}$ beräknades därefter till 2,32 kN/m² respektive 3,66 kN/m². Karakteristiskt värde för den nyttiga lasten $q_{k.bjl}$ för bjälklagen i flerbostadshuset valdes till 2,0 kN/m² efter lastkategori A (SS-EN 1991-1-1/AC:2009, 2009).

Takkonstruktion är av en svensk takstol med centrumavståndet 1,2m, och en längd på 10,5m. Värdet för takkonstruktionens egentygnd angavs till 1,5 kN/m².

5.3.2 Lastkombinationer

Dimensionering i brottgränstillstånd har utförts enligt partialkoefficientmetoden. Flerbostadshuset har dimensionerats efter säkerhetsklass 3 (Stor risk för allvarlig personskada.) (SS-EN 1990, 2010). Detta medför att partialkoefficienten angavs till $\gamma_d = 1,0$. Lastreduktionsfaktorer för byggnaden angavs efter lastkategori A för bjälklag i flerbostadshus samt efter den karakteristiska snölasten på mark s_k i Stockholm (se *tabell 5.1*) (Boverket, 2016). Lastfördelningen beräknades därefter som linjelaster ned i murpelare för varje våning och takkonstruktionen. Karakteristiska linjelasten från takkonstruktionen beräknades enligt *ekv. 5.14* och *5.15*.

$$G_{k.tak} = g_{k.tak} * \frac{l_{tak}}{2} \quad [5.14]$$

$$Q_{k.tak} = q_{k.tak} * \frac{l_{tak}}{2} \quad [5.15]$$

Karakteristiska linjelasten från våningsbjälklagen beräknades enligt *ekv. 5.16* och *5.17*.

$$G_{k.bjl} = g_{k.bjl} * \frac{l_{balk}}{2} \quad [5.16]$$

$$Q_{k.bjl} = q_{k.bjl} * \frac{l_{balk}}{2} \quad [5.17]$$

Lastnedräkningen utfördes därefter genom *ekv. 5.18* och *5.19*, där den ogynnsamma lastkombination valdes. Lastkombinationerna utfördes med egentygnd av bjälklag, murpelare och takkonstruktion samt variabla laster som samverkande och som huvudlast (SS-EN 1990, 2010).

$$\gamma_d * 1,35 * G_k + \gamma_d * 1,5 * \psi_{0,1} * Q_{k,1} + \gamma_d + 1,5 + \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad [5.18]$$

$$\gamma_d * 0,89 * 1,35 * G_{kj} + \gamma_d * 1,5 * Q_{k,1} + \gamma_d + 1,5 + \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad [5.19]$$

Genom lastnedräkningen ned till murpelare på markplan valdes därefter det dimensionerande värdet för linjelasten.

| Lastreduktionsfaktorer | |
|------------------------|-----|
| ψ_0 | 0,7 |
| ψ_1 | 0,5 |
| ψ_2 | 0,3 |
| $\psi_{0,snö}$ | 0,7 |
| $\psi_{1,snö}$ | 0,4 |
| $\psi_{2,snö}$ | 0,2 |

Tabell 5.1. Lastreduktionsfaktorer för Pahl 7 (SS-EN 1990, 2010).

5.3.3 Kantpåkänning

Effektiva höjden h_{ef} för murpelaren beräknades enligt *ekv. 5.20*. Där reduktionsfaktorn ρ_n räknades som $\rho_n = 1,0$. Effektiva väggjockelen t_{ef} beräknades enligt *ekv. 5.21*. Reduktionsfaktorn ρ_t angavs värdet 1,0. Slankhetstalet λ_c för murpelaren beräknades enligt *ekv. 5.22* (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$h_{ef} = \rho_n * h \quad [5.20]$$

$$t_{ef} = \rho_t * t \quad [5.21]$$

$$\lambda_c = h_{ef} / t_{ef} \quad [5.22]$$

För värden på samtliga excentriciteter angavs lägsta tillåtna värde enligt standard.

Initialexcentriciteten e_{init} beräknas enligt *ekv. 5.23*. Därefter beräknades excentriciteten e_i enligt *ekv. 5.24*. Värdet på reduktionsfaktorn för slankhet och excentricitet beräknades enligt *ekv. 5.25*.

Murväggens vertikala bärförmåga med hänsyn till kantpåkänning beräknas därefter enligt *ekv. 5.26*.

Där f_d är den dimensionerande tryckhållfastheten (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$e_{init} = \frac{h_{ef}}{450} \quad [5.23]$$

$$e_i = e_{init} \geq 0,05t \quad [5.24]$$

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} \quad [5.25]$$

$$N_{Rd} = \Phi_i * t * f_d \quad [5.26]$$

5.3.4 Knäckning

Väggens bärförmåga vad avser knäckning beräknades genom att lastexcentriciteten e_m beräknades enligt *ekv. 5.27*. Initialexcentriciteten e_{init} beräknas som beskrivet under rubriken 5.3.3

Kantpåkänning. Excentriciteten e_{hm} orsakad av horisontella laster försumrades. Excentriciteten e_k orsakas på grund av krypning, men på grund av att slankhetstalet resulterade i ett värde lägre än 15, försumrades excentriciteten. Även för knäckning beräknades samtliga excentriciteter med minsta tillåtna värde enligt standard. Elasticitetsmodulen angavs enligt standard till $E = 1000f_k$ och därigenom enligt Bilaga G i SS-EN-1996-1-1:2005+A1:2012 beräknades reduktionsfaktorn ϕ_m med beaktande av slankhetstal och lastexcentriciteten enligt *ekv. 5.31*. Sedan beräknades vertikala bärförmågan med hänsyn till knäckning enligt *ekv. 5.32*. Där f_d är den dimensionerande tryckhållfastheten (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$e_m = e_{init} + e_{hm} \quad [5.27]$$

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0,05t \quad [5.28]$$

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_{mk}}{t} \quad [5.29]$$

$$u = \frac{\frac{h_{ef}}{t_{ef}} - 2}{23 - 3 \frac{e_{mk}}{t}} \quad [5.30]$$

$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}} \quad [5.31]$$

$$N_{Rd,m} = \Phi_m * t * f_d \quad [5.32]$$

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,m} \quad [5.33]$$

e i *ekv. 5.31* är basen för naturliga logaritmen.

5.3.5 Koncentrerad last

Den koncentrerade belastningen från ett bjälklag beräknades från det upplag där högst punktlast från befintliga bjälkar uppstod, vilket var vid takstolens upplag.

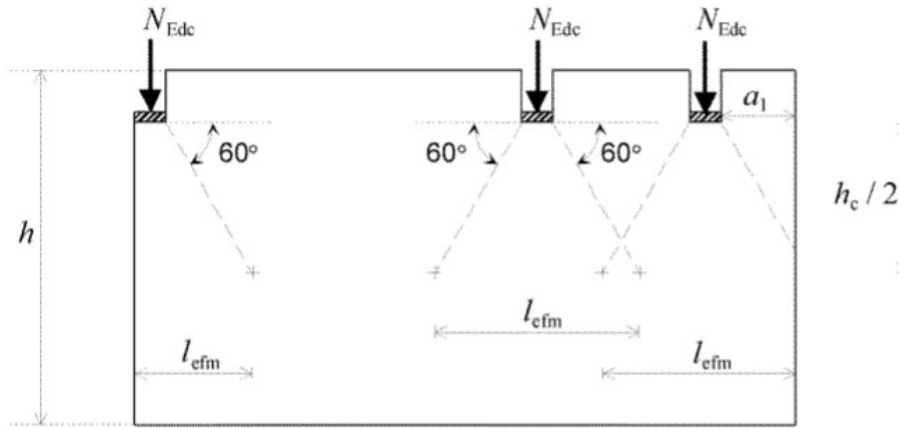
Väggens effektiva belastningslängd l_{efm} vid mitthöjd ges enligt *ekv. 5.34*. Där h_c är höjden upptill lastnivå. A_{ef} är den effektivt belastade arean enligt *ekv. 5.35*. Förstoringsfaktorn β bör inte vara mindre än 1,0 och inte heller större enligt formler givna i *ekv. 5.36*. Där a_1 definieras som avståndet från väggände till närmaste kant av belastad area. A_b är den belastade arean, där divisionen A_b/A_{ef} ej tas högre än 0,45. Slutligen beräknades den koncentrerade lastkapaciteten N_{Rdc} enligt *ekv. 5.37* (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

$$l_{efm} = 2 * \left(\frac{h_c}{2}\right) * \tan(30) \quad [5.34]$$

$$A_{ef} = l_{efm} * t \quad [5.35]$$

$$\beta = \min\left\{\left(1 + 0,3 \frac{a_1}{h_c}\right)\left(1,5 - 1,1 \frac{A_b}{A_{ef}}\right); 1,25 + \frac{a_1}{2h_c}; 1,5\right\} > 1 \quad [5.36]$$

$$N_{Rdc} = \beta * A_b * f_d \quad [5.37]$$



Figur 5.5. Beskrivande illustration för beräkning av koncentrerade laster (SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018).

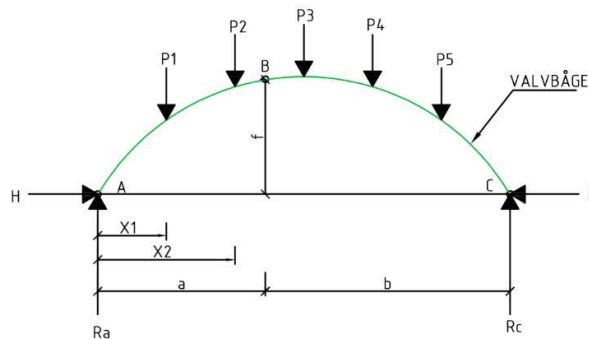
5.3.6 Analytisk metod för valvkonstruktion

Det utfördes en analys av valvkonstruktioner för att bilda en uppfattning om hur trycklinjen påverkas vid olika belastningar. Detta beräknades i Excel och illustrerades sedan i AutoCad, där belastningen från murens egetyngd och upplag räknades som symmetriskt placerade punktkrafter.

Trycklinjen beräknades för ett hypotetiskt valv placerat på översta våningsplanet i ett sekelskifteshus och studerades utifrån tre olika lastfall. Ett lastfall där valvet belastades av befintligt vindsbjälklag, ett fall där valvet belastades symmetriskt av en hypotetisk påbyggnad och ett fall där valvet belastades osymmetriskt av påbyggnad.

Analytisk metod bygger på jämviktsekvationer, där krafterna i konstruktionen måste ta ut varandra för att trycklinjen inte ska ge upphov till dragkrafter. Valvet ska ritas skalenligt med de tre punkterna A, B och C som placeras längs bågen. A och C representerar valvets upplag medan B utgör en punkt på bågen. Den vertikala höjden mellan B och AC betecknas som f, horisontala längden AB betecknas a och horisontala längden BC betecknas b. Avståndet från upplag A till en specifik kraft betecknas x_i .

Det första som bestämdes var de vertikala stödreaktionerna vid valvets upplag (punkt A och C). Detta utfördes med hjälp av jämviktsekvationerna 5.38 och 5.39.



Figur 5.6. Skalenligt ritat valv samt belastning som punktkrafter.

$$R_c = \frac{1}{l} * \sum_1^n P_i * x_i \quad [5.38]$$

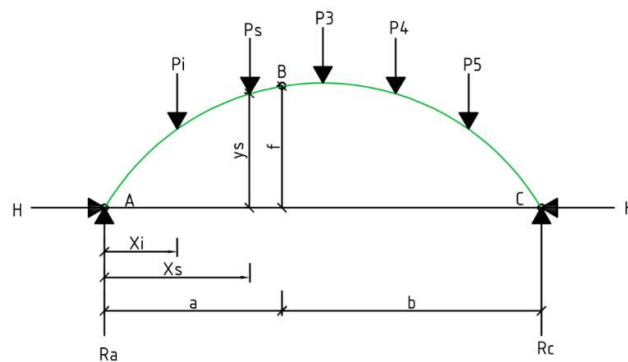
$$R_a = \sum_1^n P_i - R_c \quad [5.39]$$

På grund av kraftfördelningen i valvkonstruktionen uppkommer det även horisontalkrafter vid upplagen. Horisontalkraften (H) beräknades med hjälp av ekv. 5.40. Där $(x_i - a)$ representerar avståndet mellan punkten B och Kraften P . Nedanstående formel beräknas med alla krafter höger om punkten B .

$$H = \frac{1}{f} * (Rc * b - \sum_m^n P_i * (x_i - a)) \quad [5.40]$$

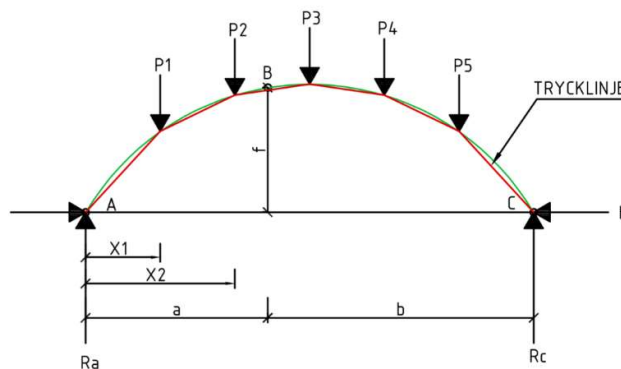
Horisontalkraften vid upplagen kan även beräknas utifrån momentet i punkten B dividerat med höjden på f över upplagen A och C . Trycklinjens höjd över upplagen vid en specifik kraft P_i kan på så sätt bestämmas med ekv. 5.41, där trycklinjens höjd beräknas vid varje kraft och betecknas med y_s .

$$y_s = (Ra * x_s - \sum_1^{s-1} P_i * (x_s - x_i)) / H \quad [5.41]$$



Figur 5.7. Illustrerat valv med beteckningar enligt ekv. 5.41.

Höjden y som trycklinjen ligger på vid en kraft P kan därmed beräknas och ritas skalenligt (Fabricius, 1990).



Figur 5.8. Valv med ritad trycklinje samt belastning.

6 RESULTAT

6.1 Tryckhållfasthetstester

Följande är resultaten från tryckhållfasthetstester där murstenarna testats på RISE CBI Betonginstitutet. De gulmarkerade resultaten utsorterades för att minska variationskoefficienten.

6.1.1 Pahl 7

| Pahl 7: Resultat från tryckhållfasthetstester | | | |
|---|-------------------|------------------|--|
| Prov | Densitet | Tryckhållfasthet | |
| nr | kg/m ³ | MPa | |
| 1.1 | 1620 | 11 | |
| 1.2 | 1740 | 18.2 | |
| 2.1 | 1710 | 10.2 | |
| 2.2 | 1680 | 8.6 | |
| 3.1 | 1700 | 6.8 | |
| Anlys av resultat | | | |
| Max | 18.2 | MPa | |
| Min | 6.8 | MPa | |
| Medel | 10.96 | MPa | |
| $\sigma=$ | 4.36 | MPa | |
| Variationskoefficient | 40 | % | |

Tabell 6.1. Resultat från samtliga utförda tryckhållfasthetstest av murstenar på Pahl 7.

| Pahl 7: Resultat från tryckhållfasthetstester | | | |
|---|-------------------|------------------|--|
| Prov | Densitet | Tryckhållfasthet | |
| nr | kg/m ³ | MPa | |
| 1.1 | 1620 | 11 | |
| 2.1 | 1710 | 10.2 | |
| 2.2 | 1680 | 8.6 | |
| 3.1 | 1700 | 6.8 | |
| Anlys av resultat | | | |
| Max | 11 | MPa | |
| Min | 6.8 | MPa | |
| Medel | 7.29 | MPa | |
| $\sigma=$ | 1.86 | MPa | |
| Variationskoefficient | 25 | % | |

Tabell 6.2. Balanserat resultat från utförda tryckhållfasthetstest av murstenar på Pahl 7. Provkropp 1.2 utsorterades.

6.1.2 Norrmalm 3:1

| Norrmalm 3:1: Resultat från tryckhållfasthetstester | | | |
|---|-------------------|------------------|--|
| Prov | Densitet | Tryckhållfasthet | |
| nr | kg/m ³ | MPa | |
| 2.1 | 1690 | 10.9 | |
| 2.2 | 1680 | 11.5 | |
| 2.3 | 1640 | 11.6 | |
| 3.1 | 1450 | 9.8 | |
| 3.2 | 1460 | 12 | |
| 3.3 | 1470 | 10.9 | |
| 4.1 | 1680 | 10.4 | |
| 4.2 | 1750 | 9.6 | |
| 5.1 | 1670 | 16.1 | |
| 5.2 | 1690 | 14.3 | |
| 5.3 | 1740 | 21.2 | |
| 6.1 | 1770 | 28.5 | |
| 6.2 | 1710 | 21.2 | |
| 6.3 | 1740 | 23.6 | |
| 6.4 | 1730 | 20.8 | |
| Anlys av resultat | | | |
| Max | 28.5 | MPa | |
| Min | 9.6 | MPa | |
| Medel | 15.49 | MPa | |
| $\sigma=$ | 6.03 | MPa | |
| Variationskoefficient | 39 | % | |

Tabell 6.3. Resultat från samtliga utförda tryckhållfasthetstest av murstenar på Norrmalm 3:1.

| Norrmalm 3:1: Resultat från tryckhållfasthetstester | | | |
|---|-------------------|------------------|--|
| Prov | Densitet | Tryckhållfasthet | |
| nr | kg/m ³ | MPa | |
| 2.1 | 1690 | 10.9 | |
| 2.2 | 1680 | 11.5 | |
| 2.3 | 1640 | 11.6 | |
| 3.1 | 1450 | 9.8 | |
| 3.2 | 1460 | 12 | |
| 3.3 | 1470 | 10.9 | |
| 4.1 | 1680 | 10.4 | |
| 4.2 | 1750 | 9.6 | |
| 5.1 | 1670 | 16.1 | |
| 5.2 | 1690 | 14.3 | |
| Anlys av resultat | | | |
| Max | 16.1 | MPa | |
| Min | 9.6 | MPa | |
| Medel | 9.68 | MPa | |
| $\sigma=$ | 2.03 | MPa | |
| Variationskoefficient | 21 | % | |

Tabell 6.4. Balanserat resultat från samtliga utförda tryckhållfasthetstest av murstenar på Norrmalm 3:1. Provkropp 5.3 – 6.4 utsorterades.

6.2 Vidhäftningstest Pahl 7

Resultatet i *tabell 6.5* redovisar att testen inte var genomförbara. Detta på grund av att vidhäftningen mellan murbruk och mursten var så pass låg att bruket släppte vid förberedelse av alla test förutom ett. Prov 6 var det enda test som utfördes en mursten ned i hjärtväggen, resterande utfördes på överkant av hjärtväggen.

| Prov | Brottlast | Draghållfasthet | Anmärkning |
|------|-----------|-----------------|------------------|
| | [N] | [MPa] | |
| 1a | 0 | 0 | Ej genomförbart. |
| 1b | 0 | 0 | Ej genomförbart. |
| 2 | 0 | 0 | Ej genomförbart. |
| 3 | 0 | 0 | Ej genomförbart. |
| 4 | - | - | Ej genomförbart. |
| 5 | 0 | 0 | Ej genomförbart. |
| 6 | 57 | 0,03 | Brott i bruket. |

Tabell 6.5. Resultat av vidhäftningstest på Pahl 7.

6.3 Tryckhållfasthetsberäkningar

6.3.1 Pahl 7

| Resultat från tryckhållfastheter för murbruk [Mpa] | | | | | | |
|---|---------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|-------|-------------------------|
| | Rent kalkbruk | | Murbruksklass M0.5 | Enligt metod från DTI | | |
| f_m | 0.346 | | 0.5 | 0.850 | | |
| f_k beräknat enligt SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012 [Mpa] | | | | | | |
| $f_{k.min}$ | 1.531 | Beräknat | 1.709 | Beräknat | 2.004 | Beräknat |
| $f_{k.max}$ | 2.144 | med | 2.393 | med | 2.806 | med |
| $f_{k.medel}$ | 1.608 | $f_m = 0.346\text{MPa}$ | 1.795 | $f_m = 0.5\text{MPa}$ | 2.105 | $f_m = 0.850\text{MPa}$ |
| $f_{d.min}$ | 1.021 | | 1.140 | | 1.336 | |
| $f_{d.max}$ | 1.429 | | 1.596 | | 1.871 | |
| $f_{d.medel}$ | 1.072 | | 1.197 | | 1.403 | |
| f_k beräknat enligt Kreuger (1916) [Mpa] | | | | | | |
| $f_{k.min}$ | 0.226 | Beräknat | 0.227 | Beräknat | 0.299 | Beräknat |
| $f_{k.max}$ | 0.367 | med | 0.368 | med | 0.370 | med |
| $f_{k.medel}$ | 0.305 | $f_m = 0.346\text{MPa}$ | 0.306 | $f_m = 0.5\text{MPa}$ | 0.308 | $f_m = 0.873\text{MPa}$ |
| $f_{d.min}$ | 0.151 | | 0.151 | | 0.199 | |
| $f_{d.max}$ | 0.245 | | 0.245 | | 0.247 | |
| $f_{d.medel}$ | 0.203 | | 0.204 | | 0.205 | |

Tabell 6.6. Karakteristisk tryckhållfasthet enligt metoder från DTI, Kreüger och antagen murbruksklass enligt eurokod 6. Tryckhållfastheterna är beräknade utifrån resultat från tryckhållfasthetstester utförda på Pahl 7.

6.3.2 Norrmalm 3:1

| Resultat från tryckhållfastheter för murbruk | | | | | | |
|---|---------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-------------------------|
| | Rent kalkbruk | Murbruksklass M0.5 | Enligt metod från DTI | | | |
| f_m | 0.346 | 0.5 | 0.873 | | | |
| f_k beräknat enligt SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012 [Mpa] | | | | | | |
| $f_{k.min}$ | 1.949 | Beräknat | 2.176 | Beräknat | 2.572 | Beräknat |
| $f_{k.max}$ | 2.799 | med | 3.125 | med | 3.693 | med |
| $f_{k.medel}$ | 1.960 | $f_m = 0.346\text{MPa}$ | 2.188 | $f_m = 0.5\text{MPa}$ | 2.586 | $f_m = 0.873\text{MPa}$ |
| $f_{d.min}$ | 1.299 | | 1.451 | | 1.715 | |
| $f_{d.max}$ | 1.866 | | 2.083 | | 2.462 | |
| $f_{d.medel}$ | 1.307 | | 1.459 | | 1.724 | |
| f_k beräknat enligt Kreuger (1916) [Mpa] | | | | | | |
| $f_{k.min}$ | 0.303 | Beräknat | 0.304 | Beräknat | 0.306 | Beräknat |
| $f_{k.max}$ | 0.509 | med | 0.51 | med | 0.513 | med |
| $f_{k.medel}$ | 0.370 | $f_m = 0.346\text{MPa}$ | 0.371 | $f_m = 0.5\text{MPa}$ | 0.373 | $f_m = 0.873\text{MPa}$ |
| $f_{d.min}$ | 0.202 | | 0.203 | | 0.204 | |
| $f_{d.max}$ | 0.339 | | 0.340 | | 0.342 | |
| $f_{d.medel}$ | 0.247 | | 0.247 | | 0.249 | |

Tabell 6.7. Karakteristisk tryckhållfasthet enligt metoder från DTI, Kreüger och antagen murbruksklass enligt eurokod 6. Tryckhållfastheterna är beräknade utifrån resultat från tryckhållfasthetstester utförda på Norrmalm 3:1.

6.4 Utnyttjandegrad av vertikala belastningar

Beräkningarna av den dimensionerande bärförmågan i murpelare har utförts genom det balanserade medelvärde för tryckhållfastheten i samtliga murstenar från Pahl 7. Därefter beräknats efter murbruksklass M0,5, rent kalkbruk, enligt DTIs metoder och Kreugers formel (se *tabell 6.8* till *6.11*).

| Beräkning av murbruk: M0,5 | | |
|---|-----------------|--------------------------------|
| Dim. tryckhållfasthet i murverk, $f_d = 1,20$ [Mpa] | Utnyttjandegrad | |
| Kantpåkänning | | |
| $N_{rd,i} = 526,94$ kN/m | > | $N_{id} = 280,3$ kN/m 53,19 % |
| Knäckning | | |
| $N_{rd,m} = 475,16$ kN/m | > | $N_{md} = 293,8$ kN/m 61,83 % |
| Koncentrerad last | | |
| $N_{rd,c} = 58,67$ kN | > | $N_{ed,c} = 26,47$ kN 45,121 % |

Tabell 6.8. Utnyttjandegrad vid dimensionering av murpelare, beräknat med murbruksklass M0,5

| | | |
|---|-----------------|--------------------------------|
| Beräkning av murbruk som: Kalkbruk | | |
| Dim. tryckhållfasthet i murverk, $f_d = 1,07$ [Mpa] | Utnyttjandegrad | |
| Kantpåkänning | | |
| $N_{rd,i} = 472,04$ kN/m | > | $N_{id} = 280,3$ kN/m 59,38 % |
| Knäckning | | |
| $N_{rd,m} = 425,65$ kN/m | > | $N_{md} = 293,8$ kN/m 69,02 % |
| Koncentrerad last | | |
| $N_{rd,c} = 52,56$ kN | > | $N_{ed,c} = 26,47$ kN 50,369 % |

Tabell 6.9. Utnyttjandegrad vid dimensionering av murpelare, beräknat med kalkbruk.

| | | |
|---|-----------------|--------------------------------|
| Beräkning av murbruk : Enligt DTI | | |
| Dim. tryckhållfasthet i murverk, $f_d = 1,41$ [Mpa] | Utnyttjandegrad | |
| Kantpåkänning | | |
| $N_{rd,i} = 621,99$ kN/m | > | $N_{id} = 280,3$ kN/m 45,06 % |
| Knäckning | | |
| $N_{rd,m} = 560,87$ kN/m | > | $N_{md} = 293,8$ kN/m 52,38 % |
| Koncentrerad last | | |
| $N_{rd,c} = 69,26$ kN | > | $N_{ed,c} = 26,47$ kN 38,226 % |

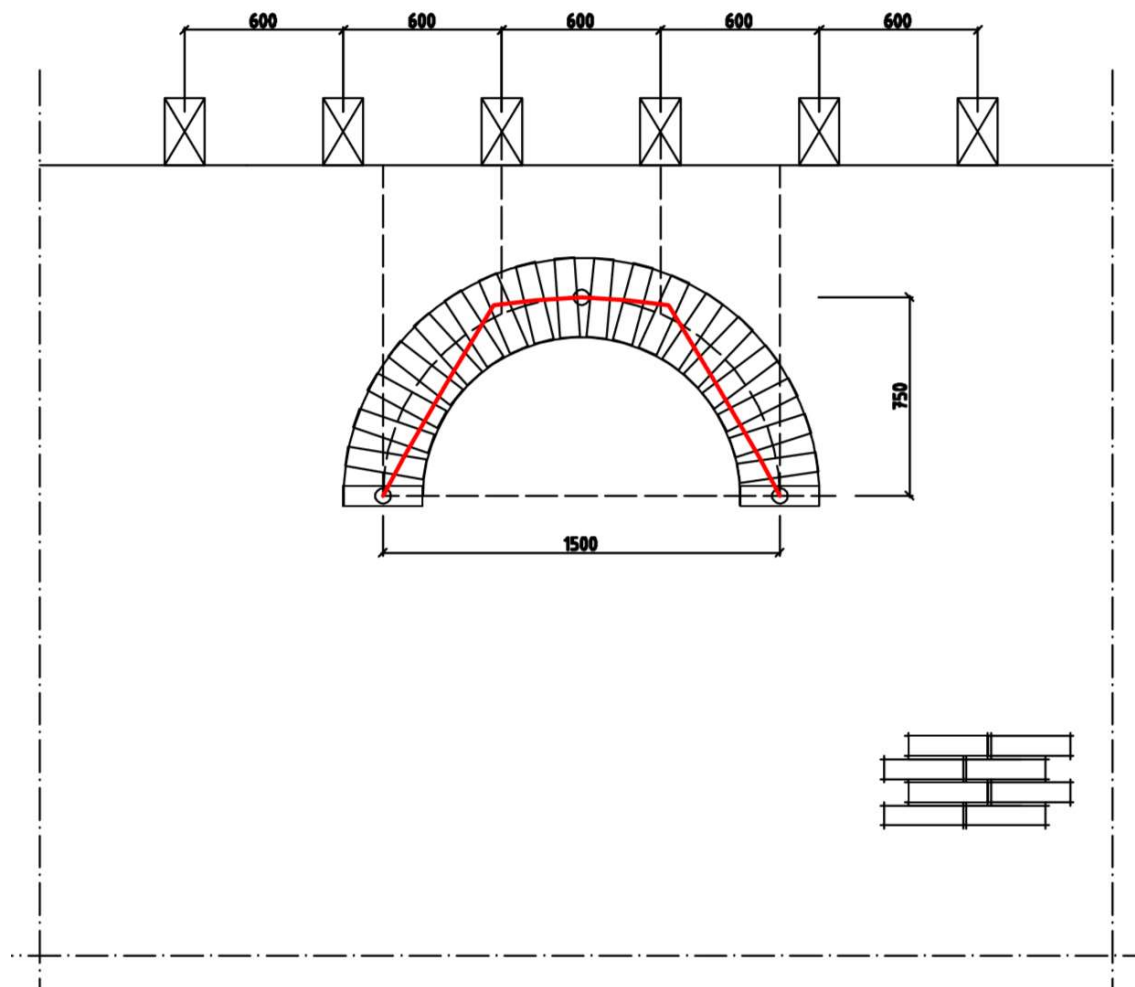
Tabell 6.10. Utnyttjandegrad vid dimensionering av murpelare, beräknat enligt DTI:s metoder

| | | |
|---|-----------------|--------------------------------|
| Beräkning av murbruk som: Kreuger | | |
| Dim. tryckhållfasthet i murverk, $f_d = 0,33$ [Mpa] | Utnyttjandegrad | |
| Kantpåkänning | | |
| $N_{rd,i} = 146,40$ kN/m | > | $N_{id} = 280,3$ kN/m 191,45 % |
| Knäckning | | |
| $N_{rd,m} = 132,01$ kN/m | > | $N_{md} = 293,8$ kN/m 222,55 % |
| Koncentrerad last | | |
| $N_{rd,c} = 16,30$ kN | > | $N_{ed,c} = 26,47$ kN 162,4 % |

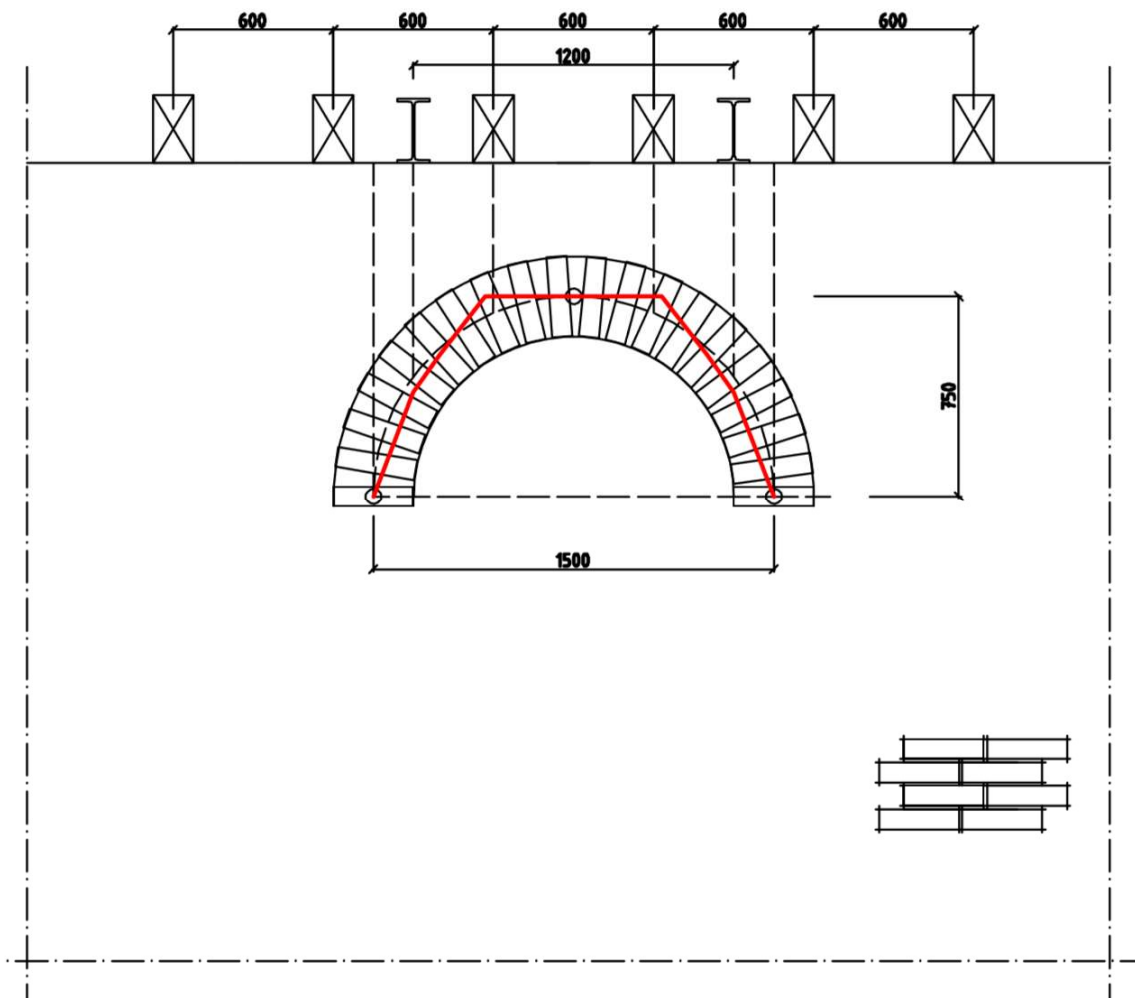
Tabell 6.11. Utnyttjandegrad vid dimensionering av murpelare, beräknat enligt Kreugers metod.

6.5 Beräkningar av trycklinje

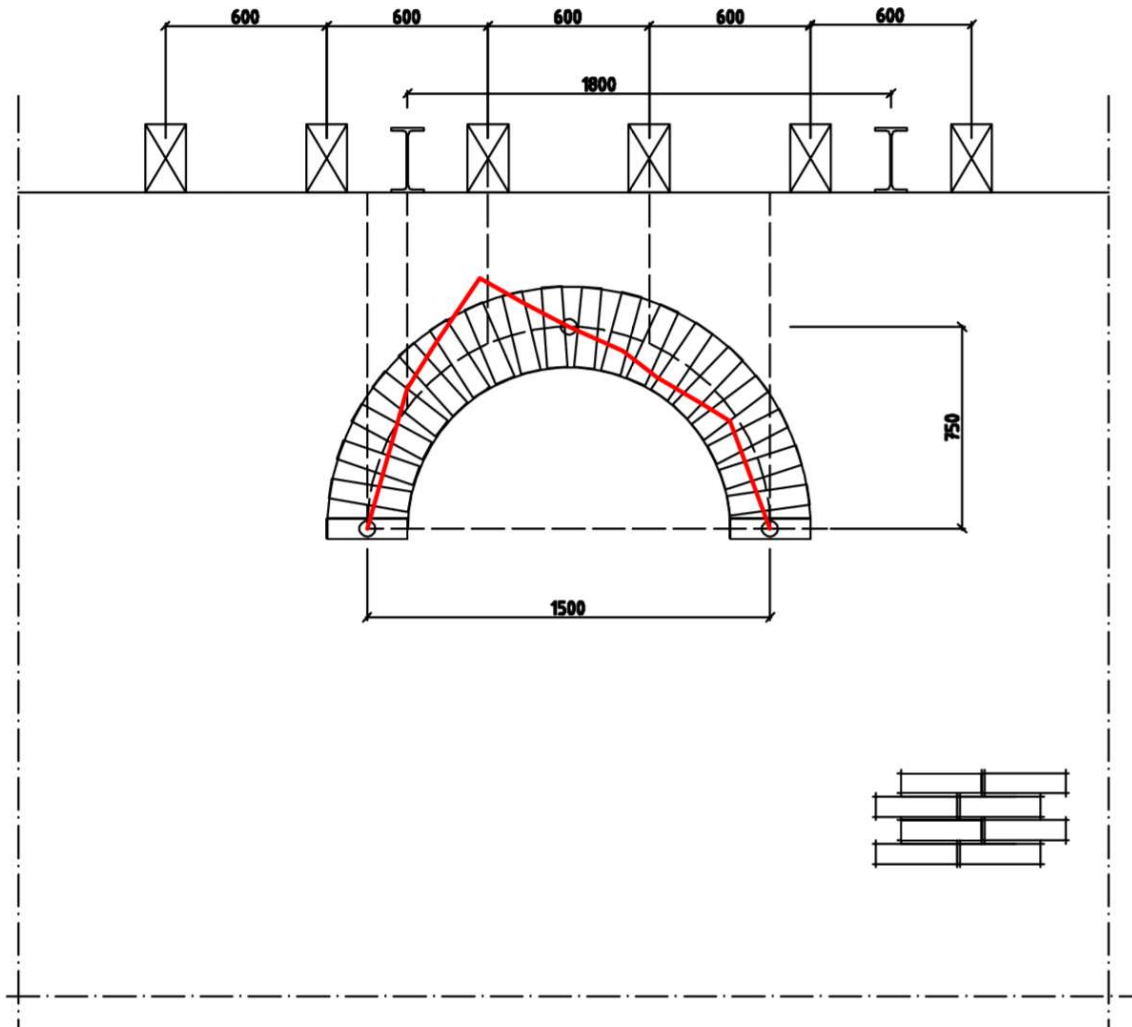
Illustrationerna nedan redogör för hur trycklinjen påverkas vid olika lastfall. I *bilaga C* ges indata och utdata för analytisk metod. Belastningen är uppskattad utifrån ritningsunderlag från Pahl 7 samt detaljritning av äldre vindsbjälklag (se *bilaga D*). Valvet är placerat på översta våningsplanet i ett sekelskifteshus. Trycklinjen illustreras i rött och de sträckande linjerna ovan valvet representerar krafternas verkningslinje och belastningsområdets avgränsning.



Figur 6.1 Trycklinje för valv symmetriskt belastat av vindsbjälklag illustrerat av bjälkar



Figur 6.2. Valv symmetriskt belastad av hypotetisk påbyggnad illustrerat av I-balkar och bjälkar.



Figur 6.3. Valv osymmetriskt belastad av hypotetisk påbyggnad illustrerat av I-balkar och bjälkar.

7 ANALYS OCH DISKUTION

7.1 Tryckhållfasthetsvärden på mursten

Skillnaden i tryckhållfasthet mellan olika murstenar bidrog till att resultaten från både Pahl 7 och Norrmalm 3:1 blev svårtolkade. Den stora variationen mellan stenarna gjorde att medelvärdet inte representerade tryckhållfastheten enligt varianskoefficienten (se *tabell 6.1* och *6.3*) och därför gjordes valdet att balansera resultatet. Där höga hållfasthetsvärden som avvek från medelvärdet togs bort för att minska varianskoefficienten till under 25% (Enligt metoder från DTI). Sett utifrån dimensionering ansågs detta ge ett representativt värde, eftersom även standard SS-EN 772-1:2011 (se rubrik *4.8 Hållfasthetstester enligt standard*) ställer krav på beräkning av medelvärde och varianskoefficient från samtliga provkroppar.

Spridning i karakteristisk tryckhållfasthet är inte ovanlig för äldre murstenar. Som beskrivs under rubrik *4.4 Mursten* kunde teglet brännas olika hårt samtidigt som lerans egenskaper spelar en viktig roll. Även genom kontakt med Lindqvist (2018) ges samma svar, att spridning i tryckhållfasthet inte är ovanlig. Utöver spridning i hållfasthet mellan olika murstenar varierade även hållfastheten mellan provkroppar från samma mursten (*enligt tabell 6.1 till 6.4*). Även om det testades tre gånger så många provkroppar vid ombyggnationen av Norrmalm 3:1, gav resultatet en högre standardavvikelse och en jämlig varianskoefficient som Pahl 7.

Provkropp 3.2 från Pahl 7 gick sönder redan vid preparering av test och därför testades den aldrig. Liknade händelse förkom förmodligen också vid Norrmalm 3:1. Genom mejlkonversation skriver Lindqvist (2018) att prov från mursten 1 aldrig genomfördes och att provet kan ha havererat vid preparering. Detta tyder på att en stor variation av materialegenskaper kan förväntas vid test av murstenar och det illustreras även i *figur 4.5*, där två murstenar lagda precis intill varandra skiljer avsevärt i färg.

Vad gäller hållfasthetstester är Vildsvinet 25 en intressant påbyggnad eftersom inga tester utfördes vid projektering. Istället angavs lägsta hållfasthetsklasser för den karakteristiska tryckhållfastheten i murbruk och mursten och beräknades efter det. Inte heller utfördes beräkningar på böjdragmoment orsakad av tillkommande horisontallaster från påbyggnaden. Istället lades tyngden på det statiska systemet och på att minimera de tillkommande våningarnas inverkan på befintlig stomme. Viktigt att tillägga är dock att påbyggnaden av Vildsvinet 25 hade 2-stens tjocka murväggar och enbart påbyggdes med 1½ våning, till skillnad från Pahl 7 med 1½-stens murväggar och 2½ våningar.

7.2 Murbrukets tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten för murbruk är svår att testa då godtyckliga provkroppar är svåra att erhålla från befintligt murverk. Materialet är mycket poröst och faller i regel samman vid behandling. Detta upptäcktes vid utförande av vidhäftningstest på murbruket (Se rubrik *6.2 Vidhäftningstest*).

Utifrån litteratur som berör ämnet kunde det däremot fastställas att murbruket i sekelskiftesbyggnader vanligen består utav kalkbruk (se rubrik *deformationsegenskaper 4.3.4*), med eller utan hydrauliska egenskaper.

Under studien har det ständigt varit problematiskt att redogöra för murbrukets hållfasthetsegenskaper. Det har inneburit att olika beräkningsmetoder och antaganden utförts efter rekommendationer från näringslivet.

Resultaten från beräkning av rent kalkbruks tryckhållfasthet, enligt beräkningsmetod från DTI och antagen murbruksklass M0.5 visade att den teoretiska hållfastheten varierade inom den lägre

hållfasthetsmarginalen, M0.5 – M1. Resultatet från tunslipsanalysen utfört på Norrmalm 3:1 visar även att tryckhållfastheten för åldrat murbruk kan nå en murbruksklass mellan M2-M10.

Vidare kan det diskuteras om de angivna tryckhållfastheterna enligt murbruksklass är konservativa då murbrukets egenskaper har förändrats med tiden. Karbonatiseringen som sker i härdande kalkbruk pågår i 12 månader och ökar hållfastheten i materialet (enligt rubrik 4.5 *Murbruk*). Bruket härdar även då materialet omkristalliseras, vilket pågår under hela byggnadens livslängd.

Vidare kan det diskuteras om studiens resultat hade förändrats om metoden och verktyget X-drill hade använts eftersom faktiska tryckhållfasthetsvärden kunde erhållits, vilket kunde ge ett perspektiv på vad ett åldrat kalkbruk faktiskt tål.

7.3 Vidhäftningstest på murbruk

Vidhäftningstesterna på murbruket visade att vidhäftningsförmågan överlag var försumbar. En betydande felkälla var att majoriteten av provkropparna togs från det översta lagret murbruk på hjärtväggen som tidigare var i direkt kontakt med brandteglet (se *bilaga B*). Bruket kan på så sätt enbart varit ett fyllnadsmaterial och inte ett bärande murbruk.

Det sista testet som utfördes var det enda test som togs från en mursten ner i hjärtväggen och det enda som gav ett hållfasthetsvärde (se *tabell 6.5*). Den potentiella felkällan diskuterades även med Elzbieta Lukaszewska. Lukaszewska (2018) menar också att annat bruk kan ha använts ovanpå hjärtväggen gentemot i murväggarna.

I efterhand kan sägas att bättre förberedelser kunde ha gjorts för att skapa en bättre förståelse kring murbruk och hur vidhäftningstesterna bör utföras. Trots detta bör däremot tilläggas att testets utförande förlitades på expertis från näringslivet. På grund av felkällan anses att vidhäftningstestet inte är representativt för vidhäftningsförmågan i murbruket. Detta kom sedermera att påverka beräkningar gällande skjuv- och böjdraghållfasthet.

Vidhäftningen mellan murbruk och mursten kan beskrivas som förmågan att uppta skjuv- och dragspänningar. Då vidhäftningstesterna inte ansågs kunna tas till hänsyn i beräkningarna begränsades rapporten till enbart tryckhållfasthetsberäkningar.

7.4 Murverkets karakteristiska tryckhållfasthet

Murverkets tryckhållfasthet varierade beroende på beräkningsmetod där resultatet från Norrmalm 3:1 visade en högre tryckhållfasthet överlag jämfört med Pahl 7. Den högsta tryckhållfastheten för både Pahl 7 och Norrmalm 3:1 erhöles då beräkningarna utfördes enligt metod från DTI.

Resultaten för beräkningar utförda med murbruksklass M0,5 jämfördes med Kreügers formel från 1916 och äldre normer från 1880. Tryckhållfastheten beräknat utifrån sekelskiftets principer visade att den karakteristiska hållfastheten enligt nutida normer blev markant högre. Detta tyder på att byggnader från samma period är överdimensionerade. Den karakteristiska hållfastheten beräknat enligt samtida normer blev betydligt lägre jämfört med murverkets verkliga hållfasthet enligt SS-EN 1996-1:2005+A1:2012. Detta är en möjlig förklaring till varför äldre murverkshus har så massiva murverksstommar.

7.5 Murpelarens dimensionerande bärförmåga

Beräkningarna som utfördes på murpelare är begränsade men ger ett perspektiv på vertikala bärförmågan i en massiv murverksstomme.

Beräkningsgångarna gällande kantpåkänning, knäckning och koncentrerad last följde nuvarande eurokoder, där framtagna värden för samtliga karakteristiska tryckhållfastheter användes. Förutom karakteristiska tryckhållfastheten från Kreügers formel är utnyttjandegraden för övriga karakteristiska tryckhållfastheter snarlika (se rubrik *6.4 Utnyttjandegrad av vertikala belastningar*). Även om Kreügers formel inte är utformad för tillämpning i eurokoder så ger resultatet ett perspektiv på vad dåtidens murverk ansågs klara av med avseende på bärförmåga.

7.6 Statik

Som nämnt under rubriken *4.3.2 Statiskt system* måste alltid det statiska systemet vara i jämvikt för att undvika sprickbildning. Vid påbyggnad av ett murverkshus måste därför det statiska systemet beaktas eftersom den utökade belastningen medför nytt jämviktssystem. Som exempel kan nämnas öppningar, valv och fönster där det är extra känsligt för dragspänningar. Därför måste kraftfördelningen i dessa kritiska konstruktioner beaktas. Uppkomst av dragkrafter kan medföra sprickbildning i konstruktionen.

Trycklinjens förändring är viktig att kontrollera då denna illustrerar belastningens påverkan. En jämförelse mellan de trycklinjer beräknade under rubrik *6.5 Beräkning av trycklinje*, redogör hur det statiska systemet förändras vid ökad belastning då krafterna placerats symmetriskt och osymmetriskt över valvet (enligt *bilaga C*). Symmetrin gör att jämvikten i systemet fortskrider, där momentet minskar i takt med trycklinjens förflyttning mot valvets centrumlinje. Valvet utsatt av osymmetrisk belastning visar hur trycklinjen utformas i olika lastfall där moment och dragspänningar uppkommer i konstruktionen. I kontrast till dessa teoretiska beräkningar uppfylls sällan jämviktsvillkoren för påbyggnad i praktiken. Däremot visar beräkningarna att trycklinjen förändras markant vid ökad belastning oavsett om valvet belastas symmetriskt kontra osymmetriskt.

8 SLUTSATS

Sammanfattningsvis har den befintliga murverkstommens materialegenskaper varit ett ständigt återkommande problem. Utifrån den information som är sammanställd i rapporten kan det däremot säkerställas att referensobjekten som undersökts är överdimensionerade.

Vid påbyggnader bör murstenarnas tryckhållfasthet testas, men risk för spridda resultat föreligger. Hur tryckhållfasthetsresultaten ska analyseras förblir subjektivt. Dock rekommenderas att medelvärdets pålitlighet bedöms utifrån testresultatens varianskoefficient.

Gällande murbrukets tryckhållfasthetsegenskaper kan konservativa värden tillämpas enligt lägre murbruksklasser, där till exempel Vildsvinet 25 beräknades med M0,5. Alternativt kan kemiska analysmetoder tillämpas för att erhålla murbrukets hållfasthetsegenskaper.

Utöver teoretiska antaganden bör nämnda analyser och hållfasthetstester utföras, då äldre murverkshus är komplicerade stomsystem med varierande materialegenskaper.

Det är viktigt att projektera påbyggnader varsamt, där flertalet aspekter bör beaktas. Det statiska systemet i byggnaden kräver goda kunskaper om hur trycklinjen över valv verkar, hur tillkommande balkar bör infästas och hur jämviktsystemet förändras av tillkommande krafter. Parallellt till detta, måste det beaktas att äldre murverkshus inte samverkar särskilt bra med dagens starkare byggnadsmaterial.

Av allt att döma finns det goda möjligheter för påbyggnad av äldre murverkshus, främst gällande byggnadens tryckhållfasthetsegenskaper. Att beskriva en generell metod för hur påbyggnader av äldre murverkshus bör utföras, är att projektera efter befintliga byggnadens förutsättningar. Djupgående inventeringar måste lägga grunden för vad som är möjligt att genomföra och inte enbart fokusera på vad stommen klarar av gällande tryckhållfasthet. Tillvägagångssättet bör även utformas efter den specifika byggnaden då alla projekt är olika.

Slutligen ska den här rapporten inte ses som en sammanfattning angående utförandet av påbyggnader, snarare är det en studie som berör tre referensobjekt och vad ett liknande projekt bör beakta.

9 REKOMMENDATIONER OCH FRAMTIDA STUDIER

9.1 Rekommendationer

Om det hör till vanligheten att företaget ifråga behandlar befintliga murverkskonstruktioner kan det vara lämpligt att genomgå en utbildning och inhandla verktyg som krävs för att utföra metoden X-drill. Även om metoden ej beprövades under studien, tycks verktyget vara tidseffektivt och precist enligt publicerade rapporter.

På marknaden är utbudet av FEM-program som behandlar murverk ringa gentemot exempelvis stål, betong och trä. Om det däremot finns en metod eller ett program för att tidseffektivt modellera en murverkskonstruktion och samtidigt återge rätt egenskaper i konstruktionen kan det vara lämpligt. Emellertid finns det programvaror som behandlar murverk som byggnadsmaterial men inlärning av ett nytt program är tidskrävande. Av den anledningen rekommenderas att använda beräkningsprogrammen så som Excel, Mathcad Prime, Tekla Tedds, EC6design eller dylikt.

När det gäller projektering av äldre murverkshus rekommenderas att läsa litteratur under rubriken *Referenser*, då mycket annan intressant information funnits men som tyvärr inte ryms inom ramarna för denna rapport.

9.2 Framtida studier

Ett område för framtida examensarbete är att studera böjdraghållfastheten i befintligt murverk, där horisontalkrafterna som tillkommer vid påbyggnad kan beräknas och jämföras med hållfasthetsvärden framtagna genom eventuellt hållfasthetstester. Alternativt fördjupa sig inom hur grund- och markförhållanden påverkas av en påbyggnad.

REFERENSER

- Adolfsson Jörby, S., 2016. *Rätt tätt - en idéskrift om förtätning av städer och orter*, Karlskrona: Boverket.
- Ahnström, A., 2004. *PLANERA FÖR FÖRTÄTNING GENOM PÅBYGGNAD*, Blekinge: Blekinge Tekniska Högskola.
- Amcoff, J., Sandberg, S., Lindström, A. & Syssner, J., 2015. *Urbanisering*, Stockholm: Sveriges Kommuner och Landsting.
- Axelsson, A. L., 2017. *Planbeskrivning - Detaljplan för fastigheten Pahl 7 i stadsdelen Södermalm*, Stockholm: Stadsbyggnadskontoret.
- Berggren, K., 1990. 1. Varsam ombyggnad. i: O. Humble, red. *Äldre murverkshus - Reparationer och ombyggnad*. Stockholm: Byggforskningsrådet.
- Berg, S. A., 2010. *Byggnadshistoria murverk och ROT - projektering 2:a upplagan*. Stockholm: Lärnö AB.
- Bergström, P. G., 2016. *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper. 2:a red.* Lund: Stundetlitteratur AB.
- Björk, C., Reppen, L. & Per Kallstenius, 2013. *Så byggdes husen 1880-200*. Stockholm: Svensk Byggtjänst.
- Boverket, 2012. *Vision för Sverige 2025*, u.o.: Boverket.
- Boverket, 2015. *Karta med snölastzoner*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/byggande/regler-for-byggande/om-boverkets-konstruktionsregler-eks/sa-har-anvander-du-eks/karta-med-snolastzoner/>
[Använd 22 Maj 2018].
- Boverket, 2015. *Karta med vindlastzoner*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/byggande/regler-for-byggande/om-boverkets-konstruktionsregler-eks/sa-har-anvander-du-eks/karta-med-vindlastzoner/>
[Använd 22 Maj 2018].
- Boverket, 2016. *Boverkets konstruktionsregler, EKS 10*, Karlskrona: Boverket.
- Boverket, 2017. *Krav vid ändring av byggnader*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-konstruktionsregler/overgripande-bestammelser/krav-vid-andring/>
[Använd 25 Maj 2018].
- Boverket, 2018. *Boverket.se*. [Online]
Available at:
<http://www.boverket.se/sv/samhallsplanering/bostadsplanering/bostadsmarknaden/bostadsmarknadsenkaten-i-korthet/?mode=feedback&success=true>
[Använd 9 Maj 2018].
- Cajdert, A., 1997. Dimensionering av murverk. i: *Bärande tegelmurverk*. Stockholm: Svensk Byggtjänst; Mur och putsinformation (MPI).
- Christiansen, P. D., u.d. *In situ determination of the compressive strength of mortar joints using an X-drill*, Århus: Danska Teknologisk Institut.

- Ekblad, K.-G., 1948. Kreügers gamla formel. *TEGEL*, p. 105.
- Fabricius, O., 1990. Statik. i: O. Humble, red. *Äldre murvershus - Reparationer och ombyggnad*. Stockholm: Byggeforskningsrådet.
- Feilberg Hansen, K. & Pedersen, E. S., 2015. *Eksperimentel og teoretisk undersøgelse af ældre murværks styrkeegenskaber*, Köpenhamn: Statens byggeforskningsinstitut Aalborg universitet.
- Glasare, G. & Eriksson, A.-S., 2015. *Förtätning av Städer*, Stockholm: Sveriges Kommuner och Landsting.
- Hervall, A., 1997. Egenskapsredovisning. i: *Bärande tegelmurverk*. Stockholm: Svensk Byggtjänst; Mur och puts information (MPI).
- Hesselman, G., 1945. *Från skråhantverk till byggnadsindustri. Om husbyggen i Stockholm 1840-1940*. Stockholm: Tidskriften Byggmästaren .
- Lanevik, H., 1990. Uppbyggnad. i: H. Olle, red. *Äldre Murverkshus - Reparation och ombyggnad*. Stockholm: Byggeforskningsrådet.
- Lindgren, C. & Widerberg, C., 2010. *Våningspåbyggnad av hus från miljonprogrammet - Etapp 1*, Malmö: Skanska Sverige AB.
- Lindgren, J. & Moeschlin, J., 1985. *TEGEL Tillverkning - Konstruktion - Gestaltning*. Göteborg: Svensk Byggtjänst.
- Lindqvist, J.-E., 2007. *Hur man tolkar analyser av historiska mur-, fog-, och putsbruk.*, Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Lindqvist, J. E. & Trägårdh, J., 2013. *Provning av tegel och bruk från valv i Nationalmuseet*, Borås: CBI betonginstitutet AB.
- Lukaszewska, E., 2018. [Intervju] (18 April 2018).
- SS-EN 1990, 2010. *Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*. u.o.: Swedish Standards Institute.
- SS-EN 1991-1-1/AC:2009, 2009. *Laster på bärverk - Del 1-1: Allmänna laster - Tunghet, egentygnd, nyttig last för byggnader*, u.o.: Swedish Standards Institute.
- SS-EN 1991-1-3/AC:2009, 2016. *Laster på bärverk - Del 1-3: Allmänna laster - Snölast*, u.o.: Swedish Standards Institute.
- SS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012, 2018. *Dimensionering av murverkskonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler för armerade och oarmerade murverkskonstruktioner*, u.o.: Swedish Standards Institute.
- Statens Fastighetsverk, u.d. *sfv.se*. [Online]
Available at: <https://www.sfv.se/sv/fastigheter/pagaende-byggprojekt/stockholm/renovering/renovering1/>
[Använd 6 maj 2018].
- Stockholm stad, 2018. *Översiktsplan för Stockholms stad*, Stockholm: Stockholm stad.
- Swedac, u.d. *Ackrediteringsregister*. [Online]
Available at: <http://search.swedac.se/sv/ackrediteringar/>
[Använd 15 April 2018].

Swedac, u.d. *Detta gör Swedac*. [Online]

Available at: <https://www.swedac.se/om-swedac/detta-gor-swedac/>

[Använd 15 April 2018].

Taylan, H., 2018. *Vidhäftningsprovning mellan tegel och bruk på plats, Åsögatan 166, Södermalm.*, Stockholm: RISE CBI Betonginstitutet.

Teknisk information, 1969. *Tekniska data för tegel och tegelkonstruktioner.*. 3:e red. Stockholm: Tegelindustrins centralkontor AB.

Teknologisk Institut, 2013. *Statistiske Beregninger af ældre murværk*, Århus: Teknologisk Institut.

Teknologisk institut, 2018. *ec6design*. [Online]

Available at: <https://www.ec6design.com/da/main/loginerksbalkar>

[Använd 6 Maj 2018].

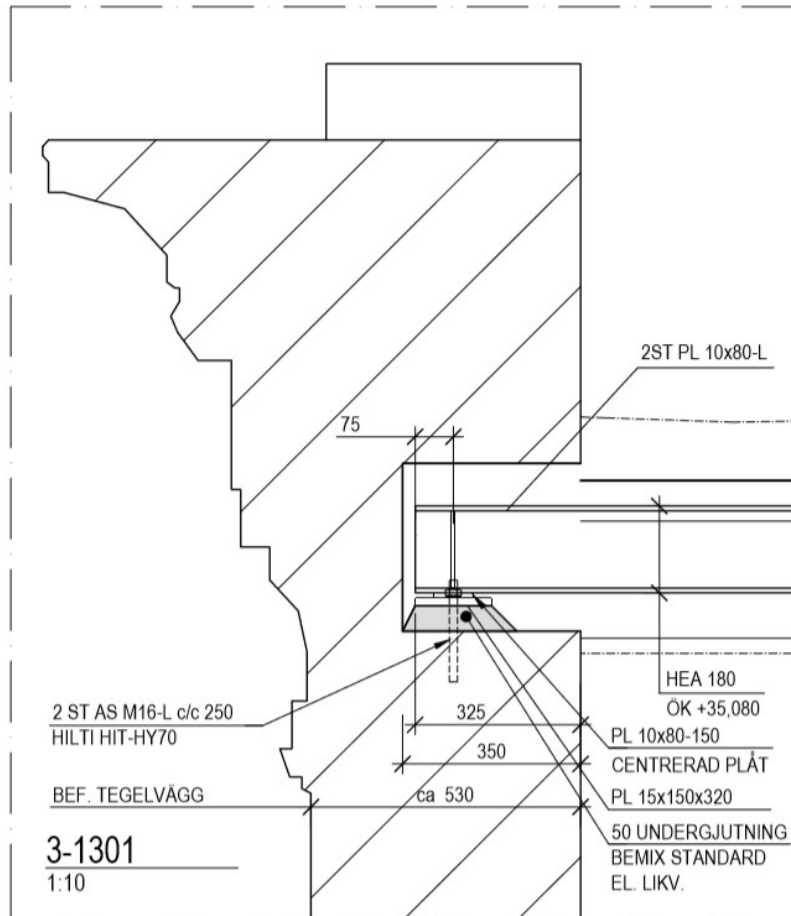
Troelsgård, E., 1990. Bärande delar i samverkan. i: O. Humble, red. *Äldre Murverkshus - Reparationer och ombyggnad*. Stockholm: Byggeforskningsrådet.

Weber, u.d. *weber.se*. [Online]

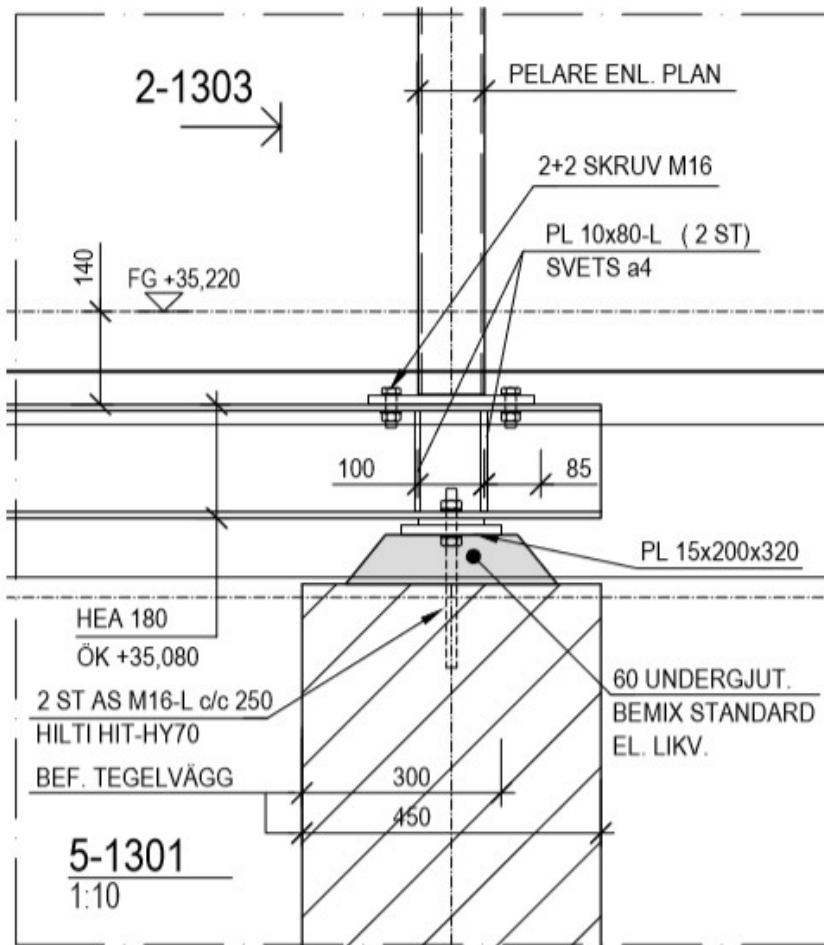
Available at: <https://www.weber.se/fasad-puts-och-murbruk/teknisk-information/murbruksklasser.html>

[Använd 7 Juni 2018].

BILAGA A: Upplag och infästningsmetoder för Vildsvinet 25

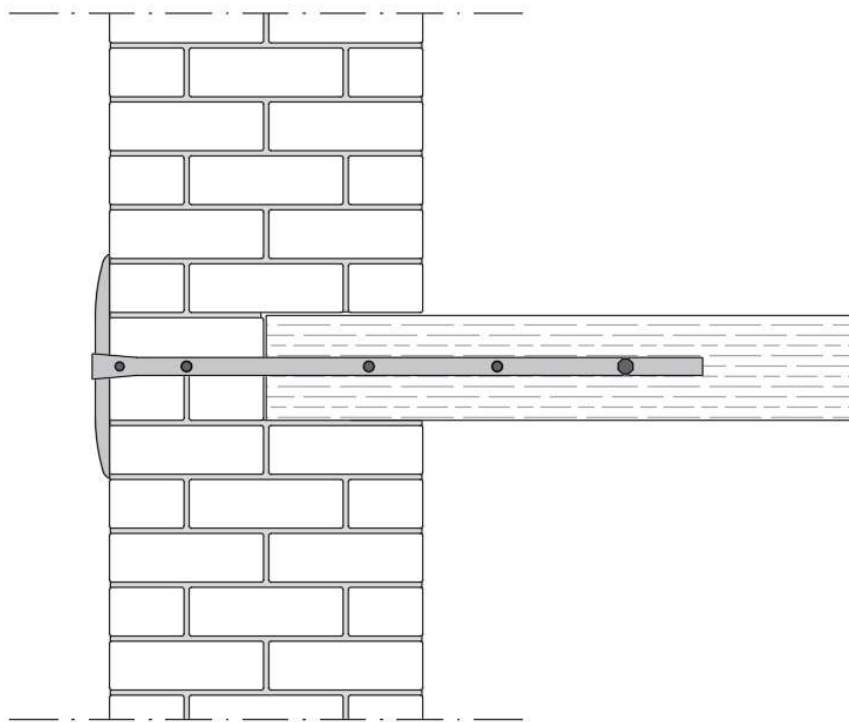


Infästningsmetod i ytttermur för Vildsvinet 25 (ritning utfördes på Byggnadstekniska Byrån och tillhandahölls av Elzbieta Lukaszewska).



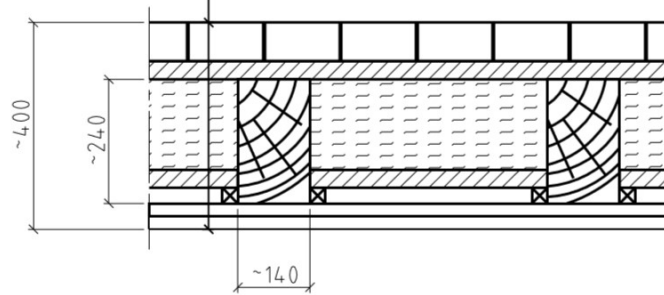
Infästningsmetod på hjärtvägg för Vildsvinet 25 (ritning utfördes på Byggnadstekniska Byrån och tillhandahölls av Elzbieta Lukaszewska).

BILAGA B: Äldre detaljritningar



Detaljritning av infästning för bjälke med ankarjärn (illustrerad av författarna).

75 BRANDBOTTEN AV TEGEL SATT I KALKBRUK
(BRANDTEGEL/STORTEGEL 300x145x75 - 12"TEGEL)
35 BRÄDER /UNDERGOLV (RÅSPONT 35x190)
~180 mm FYLLNING AV KALKGRUS - BYGGMÄSTAREFYLLNING
~140x~240 c/c ~700 GOLVBJÄLKAR
~30 TROSSBOTTEN
30 LUFTMELLANRUM
~35 BRÄDOR/UNDERPANEL/SPRÄCKPANEL
PUTSAD VASSMATTA



Detaljritning av tidstypiskt bjälklag från sent 1800-tal (ritning utfördes på Byggnadstekniska Byrån och tillhandahålls av Elzbieta Lukaszewska).

BILAGA C: Indata och utdata för Pahl 7

| INDATA | | |
|---|------------------|----------------------|
| Kommun: | Stockholm | |
| Lastkategori: | A1 | |
| Säkerhetsklass: | 3 | |
| Terrängtyp: | 4 | |
| Formfaktor för snö μ_1 : | 0,8 | |
| Topografi för bebyggelse: | Normal | |
| Formfaktor för vind μ_1 : | 1,2 | |
| Väggkonstruktion: | Massiv tegelvägg | |
| Antal våningar m. vind: | 5 | |
| Stenbredd: | 1½ | |
| Elasticitetsmodul: | E = 1000 fk | |
| Reduktionsfaktor, ρ_2 : | 1 | |
| Reduktionsfaktor för h_{tot} : | ρ_2 | |
| Murstens längd: | 300 | [mm] |
| Murstens bredd: | 145 | [mm] |
| Murstens höjd: | 75 | [mm] |
| Murverkets densitet: | 1800 | [kg/m ³] |
| Väggjocklek (inkl. fog), t: | 455 | [mm] |
| Fria våningshöjden, h: | 3,3 | [m] |
| Total byggnadshöjd, h_{tot} : | 17 | [m] |
| Vägglängd, L: | 24 | [m] |
| cc-avstånd för bjälkar, cc: | 600 | [mm] |
| cc-avstånd för takstolar, cc _{tak} : | 1200 | [mm] |
| Spännvidd för balkar l_{balk} : | 6 | [m] |
| Spännvidd för takstol l_{tak} : | 10,5 | [m] |
| Egentyngd bjälklag, $g_{k,bj}$: | 2,32 | [kN/m ²] |
| Egentyngd bjälklag, $g_{k,vind}$: | 3,67 | [kN/m ²] |
| Egentyngd tak $g_{k,tak}$: | 1,5 | [kN/m ²] |
| Balkbredd, B: | 152 | [mm] |
| Balkhöjd, H: | 254 | [mm] |
| Balkens upplagslängd: | 227,5 | [mm] |

Indata för beräkningar av Pahl 7

| Egentyngd Bjälklag | Höjd [mm] | Bredd [mm] | cc | Andel % | Tunghet [kN/m ³] | Egentyngd [kN/m ²] |
|-----------------------|-----------|------------|-----|---------|------------------------------|--------------------------------|
| Brandtegel | 75 | 145 | - | 1 | 18 | 1,35 |
| Bräder/undergolv | 35 | 190 | - | 1 | 3,5 | 0,1225 |
| Fyllning kalkgrus | 180 | | 600 | 0,7462 | 13 | 1,7460 |
| Golvbjälkar | 254 | 152,4 | 600 | 0,2538 | 3,5 | 0,1354 |
| Trossbotten | 30 | | 600 | 0,7462 | 8 | 0,1791 |
| 30x30 läkt | 30 | | 600 | 0,1000 | 3,5 | 0,0105 |
| luftmellanrum | 30 | | - | 1 | 0 | 0 |
| Brädot/underpanel | 35 | | - | 1 | 3,5 | 0,1225 |
| Utan brandtegel: | | | | | | |
| $\Sigma g_{k,bj} =$ | | | | | | 2,316 |
| Med brandtegel: | | | | | | |
| $\Sigma g_{k,vind} =$ | | | | | | 3,666 |

Beräkningar av egentyngd för ett tidstypiskt bjälklag från slutet på 1800-talet.

| UTDATA | | |
|---------------------------------------|-------|----------------------|
| Partialkoefficienten, $v_m =$ | 1 | - |
| Referensvindhastighet, $v_b =$ | 24 | [m/s] |
| Karak. Hastighetstryck, $q_k =$ | 0,576 | [kN/m ²] |
| Dim.vindlast, $q_d =$ | 0,864 | [kN/m ²] |
| Karakteristisk snölast, $s_k =$ | 2 | [kN/m ²] |
| variabellast, snö, $q_{k.snö} =$ | 1,6 | [kN/m ²] |
| Variabellast, lastkat. $q_{k.bjl} =$ | 2 | [kN/m ²] |
| Effektiv tjocklek, $t_{ef} =$ | 455 | [mm] |
| Effektiv höjd, $h_{ef} =$ | 3,3 | [m] |
| Slankhetstal, $\lambda_c =$ | 7,25 | <27 OK! |
| Vägg höjd till last, $h_c =$ | 3,046 | [m] |
| Lastreduktionsfaktor $\psi_0 =$ | 0,7 | - |
| Lastreduktionsfaktor $\psi_1 =$ | 0,5 | - |
| Lastreduktionsfaktor $\psi_2 =$ | 0,3 | - |
| Lastreduktionsfaktor $\psi_{0.snö} =$ | 0,7 | - |
| Lastreduktionsfaktor $\psi_{1.snö} =$ | 0,4 | - |
| Lastreduktionsfaktor $\psi_{2.snö} =$ | 0,2 | - |

Utdata för beräkningar av murpelare i Pahl 7

| Brottsgränstillstånd för murpelare (6.10a 6.10b) [kN/m] | | | | | | | |
|---|--------|---------|--------|--------|--------|----------|--------|
| Våning | EG BJL | EG VÄGG | EG TAK | NY BJL | NY TAK | N_{ed} | |
| Bjl 1: | 6,95 | 135,1 | 0 | 6 | 0 | 280,28 | [kN/m] |
| Bjl 2: | 6,95 | 108,1 | 0 | 6 | 0 | 228,12 | [kN/m] |
| Bjl. 3: | 6,95 | 81,1 | 0 | 6 | 0 | 175,95 | [kN/m] |
| Bjl. 4: | 6,95 | 54,1 | 0 | 6 | 0 | 123,78 | [kN/m] |
| Vind: | 11,00 | 27,0 | 0 | 6 | 0 | 77,09 | [kN/m] |
| Tak: | 0 | 0 | 7,875 | 0 | 8,4 | 22,06 | [kN/m] |

Lastnedräkning i brottsgränstillstånd för murpelare i Pahl 7

| Beräkning med M0,5 | | |
|---|--------|-------------------|
| Dim. tryckhållfasthet, $f_d =$ | 1,20 | [Mpa] |
| Kantpåkänning | | |
| Dim. Vertikal last, $N_{jd} =$ | 280,3 | [kN/m] |
| Excentriciteten $e_{init} =$ | 0,0073 | [m] |
| Excentri. toppen/botten, $e_j =$ | 0,0228 | [m] |
| Kap.red.faktor kantpåkänning $\phi_j =$ | 0,97 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,j} =$ | 526,94 | [kN/m] |
| Knäckning | | |
| Dim. Vertikal last, $N_{md} =$ | 293,8 | [kN/m] |
| Excentriciteten $e_{hm} =$ | 0 | [m] |
| Excentric. mitthöjd $e_m =$ | 0,0073 | [m] |
| Excentric krypning, $e_k =$ | 0 | [m] |
| Excentri. i mitthöjd, $e_{mk} =$ | 0,0228 | [m] |
| $u =$ | 0,2484 | - |
| $A_1 =$ | 0,900 | - |
| Kap.red.faktor knäckning $\phi_m =$ | 0,873 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,m} =$ | 475,16 | [kN/m] |
| Koncentrerad last | | |
| Dim. Upplagslast, $N_{ed,c} =$ | 26,47 | [kN] |
| Eff. belastningslängd, $l_{efm} =$ | 1,76 | [m] |
| Avstånd från belastad area, $a_1 =$ | 1,523 | [m] |
| Belastad area, $A_b =$ | 0,035 | [m ²] |
| Eff. Belastad area, $A_{ef} =$ | 0,80 | [m ²] |
| $A_b/A_{ef} =$ | 0,043 | - |
| Förstoringsfaktor konc.last, $\beta =$ | 1,414 | - |
| Upplagets kapacitet $N_{rd,c} =$ | 58,52 | [kN] |

Dimensionerande beräkningar med karakteristisk tryckhållfasthet från murstenstest och antagen murbruksklass M0,5. Därefter beräkningar utförda enligt eurokod 6 för murpelare i Pahl 7.

| Beräkning med rent kalkbruk | | |
|---|--------|-------------------|
| Dim. tryckhållfasthet, $f_d =$ | 1,07 | [Mpa] |
| Kantpåkänning | | |
| Dim. Vertikal last, $N_{jd} =$ | 280,3 | [kN/m] |
| Excentriciteten $e_{init} =$ | 0,0073 | [m] |
| Excentri. toppen/botten, $e_j =$ | 0,0228 | [m] |
| Kap.red.faktor kantpåkänning $\phi_j =$ | 0,97 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,j} =$ | 472,04 | [kN/m] |
| Knäckning | | |
| Dim. Vertikal last, $N_{md} =$ | 293,8 | [kN/m] |
| Excentriciteten $e_{hm} =$ | 0 | [m] |
| Excentric. mitthöjd $e_m =$ | 0,0073 | [m] |
| Excentric krypning, $e_k =$ | 0 | [m] |
| Excentri. i mitthöjd, $e_{mk} =$ | 0,0228 | [m] |
| $u =$ | 0,2484 | - |
| $A_1 =$ | 0,900 | - |
| Kap.red.faktor knäckning $\phi_m =$ | 0,873 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,m} =$ | 425,65 | [kN/m] |
| Koncentrerad last | | |
| Dim. Upplagslast, $N_{ed,c} =$ | 26,47 | [kN] |
| Eff. belastningslängd, $l_{efm} =$ | 1,76 | [m] |
| Avstånd från belastad area, $a_1 =$ | 1,523 | [m] |
| Belastad area, $A_b =$ | 0,035 | [m ²] |
| Eff. Belastad area, $A_{ef} =$ | 0,80 | [m ²] |
| $A_b/A_{ef} =$ | 0,043 | - |
| Förstoringsfaktor konc.last, $\beta =$ | 1,414 | - |
| Upplagets kapacitet $N_{rd,c} =$ | 52,42 | [kN] |

Dimensionerande beräkningar med karakteristisk tryckhållfasthet från murstenstest och antaget kalkbruk. Därefter beräkningar utförda enligt eurokod 6 för murpelare i Pahl 7.

| Beräkning enligt DTIs metoder för murbruk | | |
|---|--------|-------------------|
| Dim. tryckhållfasthet, f_d = | 1,41 | [Mpa] |
| Kantpåkning | | |
| Dim. Vertikal last, N_{jd} = | 280,3 | [kN/m] |
| Excentriciteten e_{mit} = | 0,0073 | [m] |
| Excentri. toppen/botten, e_j = | 0,0228 | [m] |
| Kap.red.faktor kantpåspänning ϕ_j = | 0,97 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,j}$ = | 621,99 | [kN/m] |
| Knäckning | | |
| Dim. Vertikal last, N_{md} = | 293,8 | [kN/m] |
| Excentriciteten e_{hm} = | 0 | [m] |
| Excentric. mitthöjd e_m = | 0,0073 | [m] |
| Excentric krypning, e_k = | 0 | [m] |
| Excentri. i mitthöjd, e_{mk} = | 0,0228 | [m] |
| u = | 0,2484 | - |
| A_z = | 0,900 | - |
| Kap.red.faktor knäckning ϕ_m = | 0,873 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,m}$ = | 560,87 | [kN/m] |
| Koncentrerad last | | |
| Dim. Upplagslast, $N_{ed,c}$ = | 26,47 | [kN] |
| Eff. belastningslängd, l_{efm} = | 1,76 | [m] |
| Avstånd från belastad area, a_z = | 1,523 | [m] |
| Belastad area, A_b = | 0,035 | [m ²] |
| Eff. Belastad area, A_{ef} = | 0,80 | [m ²] |
| A_b/A_{ef} = | 0,043 | - |
| Förstoringsfaktor konc.last, β = | 1,414 | - |
| Upplagets kapacitet $N_{rd,c}$ = | 69,07 | [kN] |

Dimensionerande beräkningar med karakteristisk tryckhållfasthet från murstenstest och beräknad murbrukshållfasthet enligt metoder från DTI. Därefter beräkningar utförda enligt eurokod 6 för murpelare i Pahl 7.

| Beräkning enligt Kreügers formel för tryckhållfasthet | | |
|---|--------|-------------------|
| Dim. tryckhållfasthet, f_d = | 0,33 | [Mpa] |
| Kantpåkning | | |
| Dim. Vertikal last, N_{jd} = | 280,3 | [kN/m] |
| Excentriciteten e_{mit} = | 0,0073 | [m] |
| Excentri. toppen/botten, e_j = | 0,0228 | [m] |
| Kap.red.faktor kantpåspänning ϕ_j = | 0,97 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,j}$ = | 146,40 | [kN/m] |
| Knäckning | | |
| Dim. Vertikal last, N_{md} = | 293,8 | [kN/m] |
| Excentriciteten e_{hm} = | 0 | [m] |
| Excentric. mitthöjd e_m = | 0,0073 | [m] |
| Excentric krypning, e_k = | 0 | [m] |
| Excentri. i mitthöjd, e_{mk} = | 0,0228 | [m] |
| u = | 0,2484 | - |
| A_z = | 0,900 | - |
| Kap.red.faktor knäckning ϕ_m = | 0,873 | - |
| Vertikal bärförmåga, $N_{rd,m}$ = | 132,01 | [kN/m] |
| Koncentrerad last | | |
| Dim. Upplagslast, $N_{ed,c}$ = | 26,47 | [kN] |
| Eff. belastningslängd, l_{efm} = | 1,76 | [m] |
| Avstånd från belastad area, a_z = | 1,523 | [m] |
| Belastad area, A_b = | 0,035 | [m ²] |
| Eff. Belastad area, A_{ef} = | 0,80 | [m ²] |
| A_b/A_{ef} = | 0,043 | - |
| Förstoringsfaktor konc.last, β = | 1,414 | - |
| Upplagets kapacitet $N_{rd,c}$ = | 16,26 | [kN] |

Dimensionerande beräkningar med karakteristisk tryckhållfasthet beräknad enligt Kreügers metod. Därefter beräkningar utförda enligt eurokod 6 för murpelare i Pahl 7.

| Indata: Valv symmetriskt belastad av murverkets egentyngd samt vindsbjälklag | | | | | | | | |
|--|----------|------|---------------------------------|------|------------------|----------------------|-------|----|
| Murvägg | | | | | Extra belastning | | | |
| Murpelaren höjd | h= | 0.5 | m | | F= | 12.7 | kN | |
| Murvägg tjocklek | t= | 0.45 | m | | | | | |
| Mursten densitet | ρ = | 1800 | kg/m ³ | | | | | |
| Egentyngd över valv | EG= | 18 | kN/m ³ | | | | | |
| Linjelast över valv | q= | 4.05 | kN/m | | | | | |
| Punktlast | P= | 0.68 | kN | | | | | |
| Antal punktlaster | n= | 9 | | | | | | |
| Dimensioner valv | | | | | | | | |
| f= | 0.75 | m | | | | | | |
| t= | 0.3 | m | | | | | | |
| l.fri= | 1.2 | m | | | | | | |
| l= | 1.5 | m | | | | | | |
| a= | 0.75 | m | | | | | | |
| b= | 0.75 | m | | | | | | |
| Utada: Beräkning av trycklinje för valv belastad av murverkets egentyngd | | | | | | | | |
| Punktlastens läge från A | | | Punktlastens läge i vertikalled | | | Punktlastens storlek | | |
| x0= | 0 | m | y0= | 0 | m | P0= | 0 | kN |
| x1= | 0.08 | m | y1= | 0.15 | m | P1= | 0.68 | kN |
| x2= | 0.25 | m | y2= | 0.44 | m | P2= | 0.68 | kN |
| x3= | 0.42 | m | y3= | 0.72 | m | P3= | 13.38 | kN |
| x4= | 0.58 | m | y4= | 0.74 | m | P4= | 0.68 | kN |
| x5= | 0.75 | m | y5= | 0.75 | m | P5= | 0.68 | kN |
| x6= | 0.92 | m | y6= | 0.74 | m | P6= | 0.68 | kN |
| x7= | 1.08 | m | y7= | 0.72 | m | P7= | 13.38 | kN |
| x8= | 1.25 | m | y8= | 0.44 | m | P8= | 0.68 | kN |
| x9= | 1.42 | m | y9= | 0.15 | m | P9= | 0.68 | kN |
| x10= | 1.50 | m | y10= | 0 | m | P10= | 0 | kN |
| Stödreaktioner | | | | | | | | |
| Rc= | 15.738 | kN | | | | | | |
| Ra= | 15.738 | kN | | | | | | |
| H= | 8.593 | kN | | | | | | |

Beräkningar av trycklinje för ett symmetriskt belastat valv. Belastningen bestod av murverkets ovanliggande egentyngd samt vindsbjälklag.

| Indata: Valv symetriskt belastad av murverkets egentyngd och hypotetisk påbyggnad | | | | | | | | |
|---|----------|------|---------------------------------|------------------|----|----------------------|-------|----|
| Murvägg | | | | Extra belastning | | | | |
| Murpelaren höjd | h= | 0.5 | m | F= | 83 | kN | | |
| Murvägg tjocklek | t= | 0.45 | m | | | | | |
| Mursten densitet | ρ = | 1800 | kg/m ³ | | | | | |
| Egentyngd över valv | EG= | 18 | kN/m ³ | | | | | |
| Linjelast över valv | q= | 4.05 | kN/m | | | | | |
| Punktlast | P= | 0.68 | kN | | | | | |
| Antal punktlaster | n= | 9 | | | | | | |
| Dimensioner valv | | | | | | | | |
| f= | 0.75 | m | | | | | | |
| t= | 0.3 | m | | | | | | |
| l.fri= | 1.2 | m | | | | | | |
| l= | 1.5 | m | | | | | | |
| a= | 0.75 | m | | | | | | |
| b= | 0.75 | m | | | | | | |
| Utada: Beräkning av trycklinje för valv belastad av murverkets egentyngd | | | | | | | | |
| Punktlastens läge från A | | | Punktlastens läge i vertikalled | | | Punktlastens storlek | | |
| x0= | 0 | m | y0= | 0 | m | P0= | 0 | kN |
| x1= | 0.15 | m | y1= | 0.39 | m | P1= | 83.68 | kN |
| x2= | 0.25 | m | y2= | 0.53 | m | P2= | 0.68 | kN |
| x3= | 0.42 | m | y3= | 0.75 | m | P3= | 83.68 | kN |
| x4= | 0.58 | m | y4= | 0.75 | m | P4= | 0.68 | kN |
| x5= | 0.75 | m | y5= | 0.75 | m | P5= | 0.68 | kN |
| x6= | 0.92 | m | y6= | 0.75 | m | P6= | 0.68 | kN |
| x7= | 1.08 | m | y7= | 0.75 | m | P7= | 83.68 | kN |
| x8= | 1.25 | m | y8= | 0.53 | m | P8= | 0.68 | kN |
| x9= | 1.35 | m | y9= | 0.39 | m | P9= | 83.68 | kN |
| x10= | 1.50 | m | y10= | 0 | m | P10= | 0 | kN |
| Stödreaktioner | | | | | | | | |
| Rc= | 168.982 | kN | | | | | | |
| Ra= | 168.982 | kN | | | | | | |
| H= | 64.364 | kN | | | | | | |

Beräkningar av trycklinje för ett symmetriskt belastat valv. Belastningen bestod av murverkets ovanliggande egentyngd samt hypotetisk påbyggnad.

| Indata: Valv osymmetriskt belastad av murverkets egentyngd och hypotetisk påbyggnad | | | | | | | | |
|---|----------|------|---------------------------------|------|------------------|----------------------|-------|----|
| Murvägg | | | | | Extra belastning | | | |
| Murpelarens höjd | h= | 0.5 | m | F= | 83 | kN | | |
| Murvägg tjocklek | t= | 0.45 | m | | | | | |
| Mursten densitet | ρ = | 1800 | kg/m ³ | | | | | |
| Egentyngd över valv | EG= | 18 | kN/m ³ | | | | | |
| Linjelast över valv | q= | 4.05 | kN/m | | | | | |
| Punktlast | P= | 0.68 | kN | | | | | |
| Antal punktlaster | n= | 9 | | | | | | |
| Dimensioner valv | | | | | | | | |
| f= | 0.75 | m | | | | | | |
| t= | 0.3 | m | | | | | | |
| l.fri= | 1.2 | m | | | | | | |
| l= | 1.5 | m | | | | | | |
| a= | 0.75 | m | | | | | | |
| b= | 0.75 | m | | | | | | |
| Utada: Beräkning av trycklinje för valv belastad av murverkets egentyngd | | | | | | | | |
| Punktlastens läge från A | | | Punktlastens läge i vertikalled | | | Punktlastens storlek | | |
| x0= | 0 | m | y0= | 0 | m | P0= | 0 | kN |
| x1= | 0.15 | m | y1= | 0.53 | m | P1= | 83.68 | kN |
| x2= | 0.25 | m | y2= | 0.68 | m | P2= | 0.68 | kN |
| x3= | 0.42 | m | y3= | 0.93 | m | P3= | 83.68 | kN |
| x4= | 0.58 | m | y4= | 0.84 | m | P4= | 0.68 | kN |
| x5= | 0.75 | m | y5= | 0.75 | m | P5= | 0.68 | kN |
| x6= | 0.92 | m | y6= | 0.66 | m | P6= | 0.68 | kN |
| x7= | 1.08 | m | y7= | 0.56 | m | P7= | 0.68 | kN |
| x8= | 1.25 | m | y8= | 0.46 | m | P8= | 0.68 | kN |
| x9= | 1.35 | m | y9= | 0.4 | m | P9= | 83.68 | kN |
| x10= | 1.50 | m | y10= | 0 | m | P10= | 0 | kN |
| Stödreaktioner | | | | | | | | |
| Rc= | 109.036 | kN | | | | | | |
| Ra= | 146.038 | kN | | | | | | |
| H= | 41.309 | kN | | | | | | |

Beräkningar av trycklinje för ett osymmetriskt belastat valv. Belastningen bestod av murverkets ovanliggande egentyngd samt hypotetisk påbyggnad.

| Tryckhållfasthet för åldrat Murverk | | | | | | |
|---|------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|------------------------|
| K | | Murat med kalkbruk? | | Ja | | |
| murstensgrupp 1 | | K= 0.55 | | väggens dimensioner | | |
| Faktorer | | α= 0.7 | | β= 0.3 | | byggnads höjd, h= 17 m |
| | | | | väggens tjocklek, t= 0.45 m | | |
| Resultat tryckhållfasthetstester Mursten (fb) | | | Tryckhållfasthet Murbruk (fm) | | jämförelse med äldre beräkningsmetoder | |
| Prov Nr | fb,i | Enhet | F _{brott} | Enhet | Välj värde på fb, utifrån min, max eller mean: mean | |
| 1 | 11 | MPa | | kN | Framtaget värde på fm genom att anta murbruksklass | |
| 2 | 10.2 | MPa | | kN | Antag murbruksklass: M 0.5 | |
| 3 | 8.6 | MPa | | kN | fk= 0.306 < 1.795 MPa | |
| 4 | 6.8 | MPa | | kN | fk beräknat utifrån antagen murbruksklass | |
| 5 | | MPa | | kN | fk beräknat utifrån tryckhållfastheten för kalkbruk | |
| 6 | | MPa | | kN | fk= 0.305 < 1.608 MPa | |
| 7 | | MPa | | kN | fk beräknat då varianskoefficienten är mindre än 25% | |
| 8 | | MPa | | kN | fk= 0.308 < 2.105 MPa | |
| 9 | | MPa | | kN | Insättning av fk i formeln: | |
| 10 | | MPa | | kN | fk=K*fb^0,7*fm^0,3 | |
| 11 | | MPa | | kN | För att lösa ut fm | |
| 12 | | MPa | | kN | fm= 0.850 MPa | |
| 13 | | MPa | | kN | Beräkning av fm förutsatt att murverket murats med kalkbruk | |
| 14 | | MPa | | kN | fk= 1.269 < 1.795 MPa | |
| 15 | | MPa | | kN | fk beräknat utifrån tryckhållfastheten för kalkbruk | |
| 16 | | MPa | | kN | fk= 1.267 < 1.608 MPa | |
| Analys av testresultat (fb) | | | | kohesions-konstant | | c= 0.11 |
| min= 6.8 MPa | | | | murbrukets tryckhållfasthet | | fm= 0.346 |
| max= 11.00 MPa | | | | | | |
| mean= 9.15 MPa | | | | | | |
| Standard avvikelse= 1.86 MPa | | | | | | |
| Varians-koefficient= 25 % | | | | | | |
| Antal prover: 4 st | | | | | | |
| confidensintervall: 2.16 | | | | avgränsning: 0.02 | | |
| Karakteristisk Tryckhållfasthet Murverk | | | | | | |
| fk murverk med kalkbruk | | fk baserat på beräknat fm | | fk baserat antaget fm | | |
| fk.min= 1.531 | | fk.min= 2.004 | | fk.min= 1.709 | | |
| fk.max= 2.144 | | fk.max= 2.806 | | fk.max= 2.393 | | |
| fk.mean= 1.608 | | fk.mean= 2.105 | | fk.mean= 1.795 | | |
| Dimensionerande Tryckhållfasthet Murverk | | | | fk= 1.608 MPa | | MPa |
| | | | | fd= 1.072 MPa | | MPa |
| | | | | fd.min= 1.072 MPa | | MPa |

Excelfil för beräkningar av karakteristisk tryckhållfasthet enligt metoder från DTI, Kreüger och eurokod 6

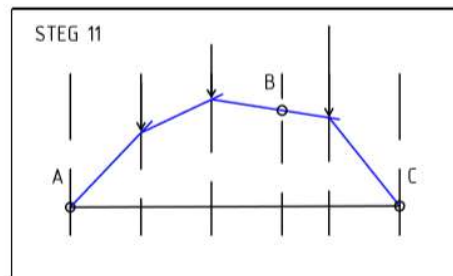
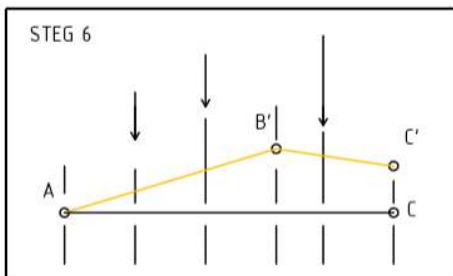
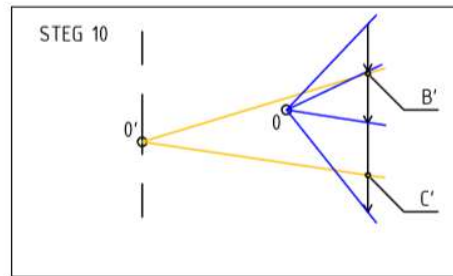
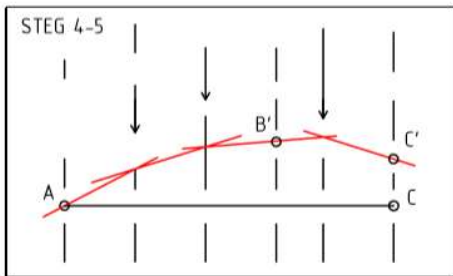
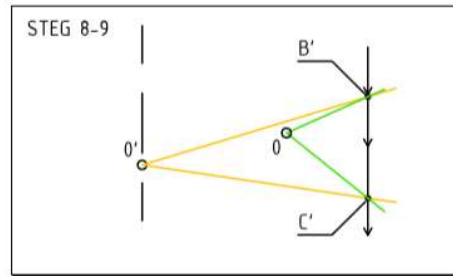
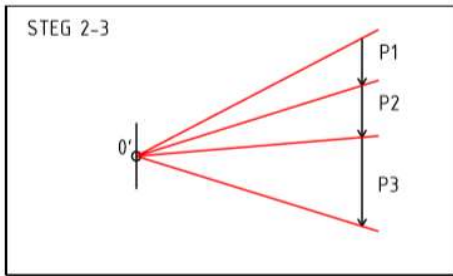
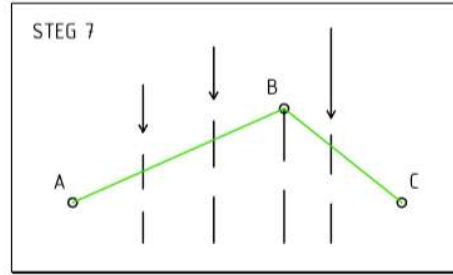
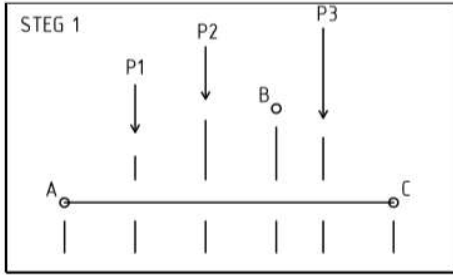
BILAGA D: Grafisk metod

Grafiskmetod används för att illustrera lastfördelningen i ett murverk. Metoden bygger på att skalenligt rita upp valvkonstruktionen belastad med de krafter som uppkommer från byggnadens egentyngd. Metoden har historiskt sätt använts för att beräkna lastfördelningen hos valv.

Det ska väljas tre punkter som trycklinjen förväntas skära. Krafter placeras sedan ut mellan punkterna utifrån var de verkar på valvet. Genom att rita krafterna vertikalt, skalenligt under varandra bildas en kraftpolygon. Linjer dras sedan från krafternas start och slutpunkter till en punkt till vänster om kraftpolygonen. Trycklinjen erhålls sedan genom att analysera skärningspunkterna mellan linjerna från kraftpolygonen (Fabricius, 1990).

Exempel:

1. För följande exempel belastas valvet med tre krafter, P1, P2 och P3. Trycklinjen går genom punkt A, B och C. Rita en skalenlig figur.
2. Krafterna ska sedan placeras skalenligt under varandra. Förslagsvis P1 överst, P2 och sedan P3 underst. Krafterna bildar tillsammans en kraftpolygon.
3. Placera en punkt också kallad "pol" till vänster om kraftpolygonen och döp denna till O'. Dra sedan linjer (polstrålar) från över och underkant för varje kraft i kraftpolygonen till polen O'.
4. Dra sedan en linje från startpunkt A med samma lutning som övre polstrålen i kraftpolygonen fram till verkningslinjen för kraften P1. Från denna skärningspunkt ska en linje parallellt med nästa polstråle i kraftpolygonen dras fram till verkningslinjen för kraften P2. Upprepa denna process för alla polstrålar i kraftpolygonen. När alla polstrålar är dragna bildar linjerna tillsammans en linpolygon.
5. Observera att linpolygonen inte skär punkterna B och C. Placera därför ut punkterna B' och C' vid skärningspunkterna med verkningslinjen för B, C och linpolygonen.
6. Dra sedan linjer från Punkt A till B' och B' till C' i linpolygonen. Linjerna benämns som AB' och B'C'.
7. Dra en linje mellan punkt A till B och B till C i den skalenliga figuren ritad i steg 1. Döp linjerna till AB och BC.
8. Rita upp kraftpolygonen från steg 2 utan polstrålar och placera polen O' i samma punkt som steg 2. Dra sedan en linje med samma lutning som AB' genom punkt O'. Notera skärningspunkten mellan linjen och kraftpolygonen och döp denna till B'. Upprepa samma process för linjen B'C' och döp skärningspunkt till C'.
9. Dra en linje med samma lutning som AB genom den översta skärningspunkten i kraftpolygonen från steg 7. Dra sedan en linje med samma lutning som BC genom den undre skärningspunkten i kraftpolygonen från steg 7. Döp skärningspunkt till O där linjerna AB och BC skär varandra.
10. Dra sedan linjer från överkant och underkant för varje kraft i kraftpolygonen till polen O.
11. Rita trycklinjen genom att upprepa steg 4 och utgå från kraftpolygonen ritad i steg 10 (Fabricius, 1990).



BILAGA E: Tabell för murverk enligt EKS10.

Boverkets konstruktionsregler, EKS 10
 Avdelning H – EN 1996
 Kap. 6.1.1 – Tillämpning av SS-EN 1996-1-1

Tabell H-4 Karakteristiska värden

| Murstenar/ murblock | Hållfast- hetsklass | f_t (MPa) Murbruksklass enligt SS-EN 998-2 | | | | Tunn- fogs- bruk |
|-------------------------------|------------------------|--|------|-----|------|------------------------|
| | | M10 | M2,5 | M1 | M0,5 | |
| Tegelblock | 6 | – | – | – | – | 2,0 ^c |
| | 8 | – | – | – | – | 2,5 ^c |
| | 10 | – | – | – | – | 2,8 ^c |
| | 12 | – | – | – | – | 3,3 ^c |
| Tegelsten | 12 | 5,2 | 3,6 | 2,7 | 1,0 | – |
| | 15 | 5,8 | 4,2 | 3,2 | 1,3 | – |
| | 25 | 7,5 | 6,0 | 4,5 | 1,8 | – |
| | 35 | 8,9 | 7,5 | 5,7 | 2,3 | – |
| | 45 | 10,0 | 9,0 | 6,8 | 2,3 | – |
| | 55 | 11,1 | 10,3 | 7,8 | 2,3 | – |
| Kalksandsten | 25 | – | 6,0 | 4,5 | – | 12,3 ^a |
| | Betongsten | 25 | 7,5 | 6,0 | – | – |
| Betonghålblock | 5 | – | 2,0 | 1,5 | – | 2,6 ^a |
| | 10 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | – | 4,6 ^a |
| Massiva betong- block | 10 | 3,8 | 3,6 | 2,8 | – | 5,7 ^a |
| | 15 | 4,7 | 4,7 | 3,7 | – | 8,0 ^a |
| Lättbetongblock | 2,0 | – | 1,2 | 0,9 | – | 1,4 ^a |
| | 2,5 | – | 1,4 | 1,0 | – | 1,7 ^a |
| | 3 | – | 1,6 | 1,2 | – | 2,0 ^a |
| | 3,5 | – | 1,7 | 1,3 | – | 2,3 ^a |
| | 4,0 | – | 1,9 | 1,5 | – | 2,6 ^a |
| | 4,5 | – | 2,1 | 1,6 | – | 2,9 ^a |
| | 5 | – | 2,2 | 1,7 | – | 3,1 ^a |
| Lättklinkerblock ^b | 2 | – | 1,8 | 1,2 | 0,8 | 1,4 ^a |
| | 3 | – | 2,4 | 1,6 | 1,0 | 2,0 ^a |
| | 5 | – | 3,4 | 2,2 | 1,2 | 3,1 ^a |
| | 10 | – | 4,3 | 3,4 | 1,2 | 5,7 ^a |

^a Dimensionering enligt formel (3.3) i SS-EN 1996-1-1 med faktorn K enligt nedan:

- Betongsten K=0,80
- Kalksandsten K=0,80
- Betonghålblock K=0,65. Grupp 2
- Lättbetong K=0,80
- Lättklinker K=0,80

^b För murverk av torrstaplade lättklinkerblock med nätarmerad puts används $f_t=0,5-1,0$ MPa.

^c Karakteristisk tryckhållfasthet för tunnfogade tegelblock är beräknad med formel 3.4 i SS-EN 1996-1-1, 3.6.1.2. För dessa gäller grupp 3 med K=0,50.

(BFS 2015:6).

Karakteristisk tryckhållfasthet enligt tabeller från EKS10 (Boverket, 2016).