KTH Arkitektur
och samhällsbyggnad

Från ståtlig befästning till vittrande världsarv

En jämförelse av byggnadstekniska metoder för sammanbindning av skalmurar

From magnificent fortification to withering heritage

A comparative study of constructional techniques for joining cavity walls

Författare: Julia Gustafsson och Johanna Silvemark

Uppdragsgivare: Gotlands Museum, Högskolan på Gotland, Tyréns

Handledare: Carl Thelin, Tyréns
Kai Ödeen, KTH ABE

Examinator: Sven-Henrik Vidhall, KTH ABE

Examensarbete: HS105X, 15 högskolepoäng inom Byggteknik och Design

Godkännandedatum: 2013-05-xx

Serienr: 2013;58

Omslagsbild, Visby Ringmur

Källa: Falk, Waldemar, Visby Stadsmur: En kulturhistorisk vandring, Länsmuseet Gotlands fornsal, Visby, 1999, s. 55

Sammanfattning

Detta examensarbete behandlar byggnadstekniska metoder med syftet att sammanbinda skalmurar. Arbetet utförs i samband med ett pågående forsknings- och utvecklingsprojekt rörande restaureringen av Visby ringmur på Gotland. Forskningsprojektet startades på uppdrag av Riksantikvarieämbetet efter ett murras i februari 2012.

Visby ringmur är en medeltida befästning av gotländsk kalksten som till huvudsaklig del uppfördes under åren 1250-1288. Muren är konstruerad som en skalmur vilket innebär en icke homogen mur bestående av två murskal med mellanliggande kärna. Senare på 1300-talet förhöjdes muren vilket bidrog till en överbelastning av främst det yttre murskalet. Detta i kombination med upprepad frostsprängning är sannolikt två av orsakerna till murraset 2012.

Metoderna som undersökts är ommurning med bindstenar, sammanbindning med kramlor och dragjärn samt uppstöttning med kontreforter. Dessa metoder studeras i fråga om verkningssätt samt lämplighet för Visby ringmur. Murning med bindstenar innebär att stenar med regelbundet mellanrum i ett murskift placeras tvärgående med kortsidan utåt, detta för att skapa en sammanbindning mellan murskalen i en skalmur. Kramlor och dragjärn ska även de verkar som förbindare mellan murskalen, de kan exempelvis utgöras av ett rundstål som infästs i vardera murskal. I rapporten undersöks dessa utifrån dragkraft i kombination med dess böjmoment. Önskvärt är att såväl kramlor som dragjärn ska kunna följa murens naturliga rörelser samtidigt som de ska sammanbinda murskalen. Slutligen undersöks kontreforter vilka muras mot skalmuren med syftet att ge stöd och uppta horisontala krafter. Kontreforter kan variera i utseende, i detta fall studeras kontreforter som muras av kalksten i vinkel mot murväggen. Med hjälp av ett jämviktsförhållande undersöks lämpliga dimensioner för kontreforterna.

Alla beräkningar i denna rapport baseras på ett antal antaganden om lastförhållanden för muren i samverkan med vald byggnadsteknisk metod. Teorier enligt Eurokoderna inte är utformade för äldre murverkskonstruktioner och därav inte alltid tillämpbara.

Resultaten visar att alla nämnda metoder skulle kunna tillämpas på muren om de utförs med lämpliga dimensioner i kombination med andra förebyggande åtgärder mot fukt- och frostproblemen. Dock skiljer sig lämpligheten för de olika metoderna åt med tanke på bevarandet av ringmurens kulturhistoriska värde.

Abstract

This is a final year project considering constructional techniques for joining cavity walls. The project is related to an ongoing scientific programme about the restoration of The City wall of Visby located on Gotland. The programme was set by Riksantikvarieämbetet as a reaction to a collapse of the outer masonry wall shell which took place in February 2012.

The City wall of Visby is a medieval fortification built out of limestone during the 13th century. The wall is constructed as a cavity wall with two separate masonry shells connected to each other through an intermediate core. During the 14th century the wall was heightened which lead to a higher stress, especially in the outer wall face. This occurrence in combination with repeated frost bursts is most likely two of the reasons to why a part of the wall collapsed in 2012.

The investigated techniques in this report are reconstructional masonry work using “through-stones”, wall ties out of steel and supportive buttresses. These techniques are investigated regarding their constructive actions and suitability for The City wall of Visby. Masonry work using “through-stones” consists of placing occasional masonry stones perpendicular to the remaining stones. In this way the two wall faces can be joined together. As well as “through-stones”, wall ties also provide a binding between the two wall faces. These ties can be made out of steel bars which ends are connected to each wall face. In this report wall ties are calculated considering tension in interaction with bending moment. A desirable quality for wall ties in this case is that they have the ability to follow the natural movements of the masonry wall without losing their binding capacity. Finally masonry buttresses are investigated, these are masonry units placed against the wall to support horizontal loadings. Buttresses vary in appearance; in this case they consist of limestone blocks laid against the wall face in a certain angle. Considering the state of equilibrium, adequate dimensions of the buttresses are defined.

Calculations in this report are based on a number of assumptions regarding loading conditions of the wall combined with the specific constructional technique. Existing theories based on Eurocode’s are not always possible to apply on medieval constructions such as The City wall of Visby.

The results in this report show that all mentioned techniques could be applied on The City wall of Visby if they are constructed with the right dimensions in combination with other preventive measures against problems due to water and frost. However, considering the fact that The City wall of Visby is a cultural heritage the suitability differs between the constructional techniques.

Förord

Denna rapport utgör ett examensarbete om 15 högskolepoäng för högskoleingenjörsutbildningen Byggteknik och Design vid KTH Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Arbetet påbörjades i mitten av mars och presenterades 31 maj 2013.

Examensarbetet har utförts i samband med ett forskningsprojekt angående restaureringen av Visby Ringmur som uppstartades av Riksantikvarieämbetet efter ett murras år 2012.

Vi vill främst tacka våra handledare Kai Ödeen från KTH och Tekn. Dr Carl Thelin från Tyréns, samt vår examinator och konstruktionslärare Sven-Henrik Vidhall för god vägledning under arbetets gång. Vidare vill vi tacka byggnadsantikvarie Ulrika Mebus, Gotlands Museum, Krister Berggren, Byggkonsult AB och Mikael Traung, m.t. restaurering- och murverkskonsult, vilka tagit sig tid för möten. Ett sista tack till Tekn. Dr Kristin Balksten verksam vid Högskolan på Gotland, som kom med förslaget om examensarbetets inriktning.

Stockholm 27.05.2013

Julia Gustafsson
Johanna Silvemark

Terminologi

Bakmur	En bakre murdel vilken ger stöd åt det yttre murskiktet.
Bindsten	Mursten vilken används som förbindare i en murkonstruktion, stenens kortsida vänds mot murens yta. Bindsten kan även benämnas som koppsten, murstenens kortsida kallas då för koppsida eller koppyta. Bindstenar i detta arbete definieras inte nödvändigtvis som genomgående stenar utan kan även avslutas i skalmurens kärna.
Dragjärn	Kan bland annat användas för att stabilisera sprickor i naturstensmurar eller sammanbinda två murskal i en skalmur som förlorat sin ursprungliga bindning. Dragjärn kan utgöras av olika material, ett relativt vanligt utförande är en rostfri rundstång som i ändsluten förankras med bricka och mutter. Dragjärn kan även benämnas som dragstag.
Fullmur	Massiv mur
Marktorn	Torn som murats upp från marken. Bildar ett avslut för ett murparti.
Murkärna	Mellanliggande fyllning i en skalmur.
Murskift	Ett horisontellt lager av murstenar i ett murverk.
Kontrefort	Stödmur som bland annat syftar till att avlasta en befintlig mur från horisontella laster som exempelvis jordtryck. Kontreforter kan även användas för att minska den befintliga murens slankhet och därmed förbättra bärförmågan för vertikala laster.
Kramla	Används främst till att sammanbinda en yttre murad fasad till en bakomliggande bärande konstruktion. Kramlor tillverkas i huvudsak av rostfria stålstänger som används raka eller formas till exempelvis en Z-eller U-form.
Kvadersten	Ett fyrkantigt hugget stenblock för byggnadsändamål. Kan exempelvis användas som fasadsten.
Liggfog	Horisontell fog mellan två angränsade skift i ett murverk.
Muravtäckning	Ett fuktavvisande skikt av exempelvis en cementpågjutning på murens ovansida.
Sadeltorn	Torn som hänger likt en sadel på murens överkant.
Skalmur	En icke massiv mur bestående av två murade ytskikt, så kallade murskal. Skalmuren har sitt ursprung i den medeltida byggnadskonsten. Bör inte förväxlas med den moderna definitionen där skalmur syftar till en yttre fasadmur.
Stötfog	Vertikal fog mellan två angränsande murstenar i ett skift.

Tinne	Fyrkantig uppmurning på krönet av en byggnad, exempelvis en mur. Tinnar på ett murkrön varvas med mellanliggande hålrum, så kallade skottluggar.
UNESCO	Förenta nationernas organisation för utbildning, vetenskap och kultur (The United Nations Organization for Education, Science and Culture). Ett FN-organ vars uppdrag bland annat är att upprätthålla tre listor med objekt av stort värde för nationerna, bland annat världsarvslistan.
Utbottning	Vid grundläggning; Det övre jordlagret grävs bort och ersätts med ett mer bärkraftigt material.

1. Inledning 1
1.1. Bakgrund 1
1.2. Avgränsning 2
1.2.1. Målgrupp 3
1.3. Syfte och Mål 3
1.4. Metoder och Material 3
1.4.1. Uppstart och Faktainsamling 3
1.4.2. Beräkningar och Utförande 4
2. Problemidentifikation och frågeställning 4
3. Strukturmekanisk analys 6
3.1. Materialmodell 6
3.2. Geometrimodell 7
3.3. Lastmodell 9
3.4. Strukturmodell 10
3.5. Upplagsmodell 11
4. Nedbrytningsmekanismer 12
4.1. Fukt 12
4.2. Frostsprängning 13
4.3. Syror 14
4.4. Saltsprängning 14
4.5. Temperaturspänningar 15
4.6. Växtlighet 15
5. Tidigare utförda restaureringsåtgärder 15
6. Byggnadstekniska metoder 18
6.1. Bindstenar 18
6.2. Kramlor och Dragjärn 19
6.2.1. Murkramlor 19
6.2.2. Dragjärn 21
6.2.3. Förutsättningar vid utförande och beräkningar 22
6.3. Kontreforter 25
6.3.1. Förutsättningar vid utförande och beräkningar 26
7. Resultat 29
7.1. Kramlor och Dragjärn 29
7.2. Kontreforter 30
8. Diskussion 30
8.1. Bindstenar 30

8.2. Kramlor och Dragjärn _____ 31
8.3. Kontreforter _____ 34
9. Slutsats _____ 37
10. Källförteckning _____ 38
10.1. Elektroniska källor _____ 38
10.2. Litteratur _____ 38
10.3. Muntliga referenser _____ 39
10.4. Övriga referenser _____ 39
11. Beteckningar _____ 40
11.1. Murens egentyngd _____ 40
11.2. Kramlor och Dragjärn _____ 40
11.3. Kontreforter _____ 41

Bilagor

Bilaga 1: Beräkning egentyngd
Bilaga 2: Utredning Kramlor och Dragjärn
Bilaga 3: Kontreforter – Utredning 1
Bilaga 4: Kontreforter – Utredning 2
Bilaga 5: Kontreforter – Utredning 3

1. Inledning

1.1. Bakgrund

När ämnet för detta examensarbete valdes beaktades ett gemensamt intresse för kultur- och byggnadsvård. I Sverige finns många befintliga byggnader och resurser vilka är viktiga att ta tillvara i arbetet för ett hållbart samhälle samt för att bevara spåren av landets kulturella historia. Arbetet bygger på ett forskningsprojekt angående Visby ringmur som initierats efter ett ras i februari 2012. Projektet drivs av bland andra Gotlands museum och utgör grunden för ett omfattande restaureringsarbete som har påbörjats under våren 2013. För detta ändamål arbetar en forskningsgrupp bestående av ingenjörer, forskare, hantverkare och andra specialister inom ämnet kultur- och byggnadsvård. I figur 1 utmärks platsen för raset på mur 38.

Visby ringmur är i många anseenden ett av Sveriges mest unika byggnadsverk, inte minst på grund av dess medeltida ursprung och kulturhistoriska värde. Huvuddelen av muren byggdes i två etapper under åren 1250-1288 och blev slutligen helt färdigställd under 1300-talet[1]. Epoken som rådde i Europa benämns högmedeltiden vilken bland annat kännetecknas av en god ekonomisk tillväxt och en markant befolkningsökning, sådant var även fallet i Visby. Ringmurens ursprungliga syfte var att skydda en blomstrande internationell handelsstad mot havets långväga inkräktare, följaktligen kom den första etappen av ringmuren att kallas Sjömuren.

Figur 1 - Plan Visby innerstad[2], pilen visar mur 38 där raset inträffade i februari 2012.

[1] Gotlands Museum - http://www.gotlandsmuseum.se/radda-ringmuren
[2] Samhällsbyggnadsförvaltningen, Region Gotland, Byggnadsordningen för Visby innerstad, laga kraft 26.03.2010

Det framgångsrika Visby lockade under högmedeltiden åtskilliga tyskar till den centrala stadskärnan. Innerstadens tyska befolkning växte snabbt och blev snart lika stor som den gotländska. Gemensamma intressen hos stadsbefolkningens köpmän väckte en idé om ytterligare påbyggnad av den befintliga muren, syftet var att avgränsa staden från det gotländska bondesamhället och hindra bönderna från att handla och etablera sig i Visby. Landmuren, som den nya etappen kom att kallas, intensifierade således konflikten mellan bönderna och köpmännen. Utfallet blev ett inbördeskrig år 1288 där stadsbefolkningen segrade skyddade av den mäktiga muren[3].

Ringmuren är konstruerad som en skalmur vilket innebär en icke homogen mur bestående av två murskal med mellanliggande kärna. Murkärnan består av fyllnadsmaterial av reststenar blandat med bruk. När muren stod färdig var den ståtliga 11 meter hög på sitt högsta parti och cirka 3,4 kilometer lång, längsmed fanns totalt 29 marktorn, varav 27 står kvar idag. Ytterligare fanns 22 sadeltorn varav endast 9 finns bevarade i dagsläget. Tjockleken varierar men kan vid basen uppmätas till mellan 1-1,3 meter för Sjömuren och 1,3-2,3 meter för Landmuren. Kalksten har nästan uteslutande använts som byggnadsmaterial, ett praktiskt val eftersom denna har brutits från närliggande dagbrott på Gotland. Främst söktes lättbruten sten nära markytan, vilket bland annat påträffades i Östergravar och vid Galgberget[4].

Idag är muren Nordeuropas bäst bevarade stadsmur och är den huvudsakliga anledningen till att Visby är listat på UNESCOs världsarvslista[5]. Ringmuren förvaltas av Riksantikvarieämbetet men ägs av Region Gotland. Det kontinuerliga underhållet som muren kräver ska enligt beräkningar kosta närmare en miljon kronor om året[6].

1.2.Avgränsning

Den primära inriktningen på detta arbete är att kartlägga byggnadstekniska metoder för sammanbindning av skalmurar samt verkningssätt för dessa. Studien begränsas till att ta upp rimliga byggnadstekniska lösningar för mur 38 där det aktuella raset har inträffat, restaureringsåtgärder utformade för andra murpartier ingår därför inte. Detta utesluter dock inte att de metoder som tas fram ej går att tillämpa för andra delar av muren. Omfattande ingrepp som förändrar konstruktionens utseende och bärande struktur bör helst undvikas i och med det kulturvärde som föreligger. I studierna beaktas inte den ekonomiska aspekten eller övriga resurser som kan komma att krävas vid restaureringen.

Sekundärt studeras nedbrytningsmekanismer såsom fuktdynamik, frostsprängning, växtlighet med mera, vilka påverkar murens beständighet och lastupptagningsförmåga. Byggnadstekniska metoder som behandlas är sammanbindande kramlor och dragjärn, bindstenar samt kontreforter. Dessa förklaras närmre under respektive avsnitt. Vad gäller kramlor granskas framförallt utföranden tillämpbara på befintliga murar, de ska främst syfta till att återskapa bindning i muren där ras ännu inte har inträffat.

[3] Falck, Waldemar, Visby Stadsmur: En kulturhistorisk vandring, Länsmuseet Gotlands fornsal, 1999
[4] Ibid
[5] Riksantikvarieämbetet - http://www.raa.se/upplev-kulturarvet/varldsarv/hansestaden-visby/
[6] Gotlands Museum - http://www.gotlandsmuseum.se/radda-ringmuren

1.2.1. Målgrupp

Huvudsaklig målgrupp för detta examensarbete är verksamhetsutövare inom kultur- och byggnadsvård, exempelvis hantverkare, antikvarier och ingenjörer. Utöver dem är arbetet riktat till övriga intressenter såsom studenter inom byggteknik och samhällsbyggnad eller liknande.

1.3.Syfte och Mål

Syftet är att kartlägga metoder för att sammanbinda äldre skalmurar och undersöka deras verkningssätt samt lämplighet i det specifika fallet gällande restaurering av Visby ringmur. Förhoppningsvis kan någon av dessa metoder leda till att sammanbindning uppnås utan att murens ursprungliga verkningssätt förloras. Utöver detta bör arbetet ge en god överblick av de nedbrytningsmekanismer ringmuren utsätts för, såsom fukt- och frostskador. Rapporten ska vara möjlig beakta vid val av teknik i det aktuella projektet och fungera som ett bra komplement till pågående utredning.

För vår egen del behandlas genom detta examensarbete ett nytt ämnesområde, vilket ger oss nya kunskaper och erfarenheter. Det kommer att ge en inblick i praktiskt arbete inom byggnadsvård vilket enbart behandlas ytligt i utbildningens kursinnehåll. Förhoppningsvis kommer även befintliga kunskaper befästas men nu inom ett nytt arbetsområde.

1.4.Metoder och Material

1.4.1. Uppstart och Faktainsamling

Vid uppstarten av detta examensarbete fanns ingen konkret problemformulering, enbart ett av oss framtaget ämnesområde rörande byggnadsvård. På dessa grunder kontaktades företag och organisationer verksamma inom byggnadsvård, bland andra Byggnadsvårdsföreningen, SPBA (Sveriges Praktiserande Byggnadsantikvarier) och Högskolan på Gotland. Mycket god respons erhölls från ett flertal verksamhetsutövare runt om i Sverige, att intresse inom området fanns blev därigenom ett faktum. Ett flertal förslag om inriktning presenterades, en del var dock väldigt omfattande och svåra att tydligt avgränsa. Slutligen valdes att arbeta vidare med ett svar från teknologie doktor Kristin Balksten verksam vid Högskolan på Gotland. Tillsammans med teknologie doktor Carl Thelin från Tyréns, Byggnadsvård & Kulturmiljö arbetar Kristin som forskningsledare inom projektet angående Visby ringmur. Projektledare i gruppen är byggnadsantikvarie Ulrika Mebus på Gotlands Museum. Alla tre har konsulterats under arbetets gång. Utomstående parter som har intervjuats är murverkskonsult Mikael Traung från m.t Restaurering sten och murverkskonsult AB samt Krister Berggren från Krister Berggren Byggkonsult AB. Att konsultera kunniga personer utanför projektets ramar kändes i vår mening högst aktuellt. Då deras uppfattning inte formats efter vad som redan diskuterats i det pågående projektet har de kunnat bidra med nya synvinklar och idéer om alternativa sätt att angripa problemet. Dessa kontakter har bland annat tillhandahållits med hjälp av SPBA.

Arbetets ordningsföljd består av en inledande fas med grundlig faktainsamling, detta har varit nödvändigt för att stärka de förkunskaper som krävts inför den efterföljande rapportskrivningen. Materialinsamling har genomförts via en studieresa till Visby för att där få tillgång till befintlig dokumentation i Gotlands Museums arkiv. Detta har i samband med handledning från berörda parter i forskningsprojektet skapat en god grund för examensarbetet. Utöver intervjuer och granskning av

dokumentation från Gotlands Museum har faktainsamling gjorts genom litteraturstudier i böcker som behandlar ämnesområdena Visby ringmur samt nya och äldre murverkskonstruktioner i allmänhet. Självfallet har även elektroniska källor varit mycket behjälpliga.

1.4.2. Beräkningar och Utförande

Beräkningsdelen i arbetet behandlar kramlor och dragjärn samt kontreforter. Vad gäller bindstenar är det en beprövad metod vilken sällan beräknas, därav ingår den inte i beräkningsdelen för detta arbete. I och med att Visby ringmur är en medeltida murverkskonstruktion är de moderna beräkningsmodellerna gällande murverk i Eurokod svåra att tillämpa. Beräkningarna bygger på ett framtaget scenario med ett flertal egna antaganden, detta beskrivs under avsnitt 6.2.3 för kramlor och dragjärn, respektive 6.3.1 för kontreforter. Samma scenario har använts för såväl kramlor och dragjärn som för kontreforter, detta för att underlätta en jämförelse mellan metoderna. Kramlor och dragjärn behandlas i samma beräkningsmodell då dessa är snarlika i sina verkningsätt. Beräkningar och antaganden i rapporten är kompletterade med illustrationer i form av fotografier samt ritningar gjorda i ritningsprogrammen Revit och AutoCAD. Alla beräkningar har genomförts i beräkningsmallar framtagna i Microsoft Excel.

Vad gäller kramlor är tekniska egenskaper för materialet av relevans, lämplig styvhet beaktas för bästa samverkan med murverket. Erfordrat antal kramlor per kvadratmeter mur är en annan fråga som behandlas. Metoden med dragjärn påminner något om kramling och är en restaureringsåtgärd som tidigare använts vid upprustning av äldre murverk. I examensarbetet beaktas dragjärn likt kramling i fråga om styvhet och nödvändigt antal i muren. I dessa beräkningar har Eurokod 3 för stål tillämpats. Vid dimensionering av kramlor och dragjärn bör åtgärder som rubbar den rådande lastfördelningen i murverket helst undvikas. Beträffande kontreforter genomförs en dimensionering av nödvändig geometri med avseende på horisontella laster och konstruktionens totala jämvikt.

2. Problemidentifikation och frågeställning

Den 24 februari 2012 rasade en yta om cirka 70 kvadratmeter av det yttre murskalet från Visby ringmur[7]. Raset skedde helt utan förvarnande indikationer i form av sprickor eller liknande som kunnat upptäckas med blotta ögat. Skadan har under en längre tid stått orörd och avspärrad eftersom en omfattande uppsäkring måste projekteras innan en arbetsaktivitet kan tillåtas på platsen. Visserligen uppstod vid tidpunkten för raset ett självbärande tillstånd genom valvverkan i det kvarvarande murskalet, men ytterligare ras har ändå inte kunnat uteslutas. Dessutom verkar högen av sten från raset stöttande mot den kvarvarande muren, varför även dessa rester står orörda för tillfället. En säkerhetsanordning kommer i det närmaste att byggas på platsen vilken möjliggör för restaureringsarbete efter lämplig metod. I och med murverkets kulturella värde är det extra viktigt med förundersökning och forskning innan skadan kan åtgärdas. Val av metoder måste vara anpassade så att hänsyn tas till murens kulturvärde både vad gäller konstruktion och utseende. En undersökning av det kvarvarande inre murskalet har genomförts och en fråga som uppkommit därvid är om det verkligen är

[7] Gotlands Museum - http://www.gotlandsmuseum.se/radda-ringmuren

starkt nog att förankra en lagning i, eller om det bör plockas ner och muras om[8]. Härav följer frågeställningen för detta examensarbete:

-*Vilka byggnadstekniska metoder, i fråga om skalmurars sammanbindning, kan komma att lämpa sig i kommande restaureringsarbete av Visby ringmur 2013 och hur skulle dessa fungera i praktiken?*

Den främsta orsaken till raset är troligtvis äldre lagningar av muren med cementbaserat fogbruk i kombination med fuktansamling och upprepad frostsprängning på grund av svängningar i utomhustemperatur. Fuktansamlig uppstår då regnet stängs inne i konstruktionen på grund av fogning med ett mycket tätt dubbelsidigt cementbaserat bruk. Fukten tränger in genom sprickor och andra otätheter i murskalen och kan därefter inte dräneras bort utan måste långsamt torkas ut. Fenomenet har bland annat medfört att konstruktionens ursprungliga fogar har urlakats på kalk. Fler delar av muren har lagats på liknande sätt, det vill säga genom en dubbelsidig omfogning med cementbaserat bruk. För att säkerhetsställa att inte ytterligare ras inträffar har dessa delar identifierats och studerats under den pågående utredningen[9].

En äldre punktlagning föranledd av en avloppshåltagning kan vara en annan bidragande orsak till raset. Denna lagning visas i figur 2a. Vid rasets södra kant finns även en sammanhängande stötfog, det vill säga en vertikal fog, den har troligtvis avgränsat rasets yta vilket även det illustreras i figur 2. Vidare föreligger en marknivåskillnad på knappt två meter mellan insida och utsida mur, denna skapar ett ständigt jordtryck utåt mot murens bottenparti[10].

Vid uppförandet av muren dimensionerades denna inte för de laster som den på grund av en senare murförhöjning bär idag. Murförhöjningen har bidragit till ökad spänning i murskalen, det yttre skalet har i synnerhet påverkats vilket bidrar till att detta är extra känsligt för ytterligare påfrestningar.

[8] Byggnadsantikvarie Mebus, Ulrika - Intervju 20.03.2013
[9] Byggnadsantikvarie, Mebus, Ulrika - Intervju 20.03.2013
[10] Renström, Jörgen och Mebus, Ulrika, Rapport "Murraset", 2013

Figur 2 – a) Mur före raset 2012. Den vita pilen visar stötfogen och den gula visar tidigare avloppshål[11], b) Foto av raset[12], den vänstra kanten avgränsas av stötfogen i figur 2a.

Det praktiska arbetet med återuppbyggnaden av det rasade murpartiet uppstartas under våren och sommaren 2013. Anledningen till fördröjningen är som nämnts tidigare säkerhetsaspekterna. Dessutom är murning inget som normalt utförs vintertid på grund av de problem detta medför. Den låga temperaturen gör att brukets härdningsprocess sker avsevärt långsammare, dessutom finns risk för isbildning då brukets vatteninnehåll är högt. Vid all typ av murning önskas även att murstenarna i fråga förvarats varmt och torrt innan arbetet påbörjas för bästa förutsättningar vid härdning[13].

3. Strukturmekanisk analys

3.1.Materialmodell

Murverket kring Visby innerstad är som nämnt uppbyggt av Gotländsk kalksten med mellanliggande murbruk. Kalksten är en sedimentär bergart vilket innebär att den bildats genom kompaktering, cementering och omkristallisering av en jordart eller ett sediment till en fast bergart. Bergarten består av olika karbonatmineraler där kalcit är det dominerande[14]. Utifrån denna mineralogiska uppbyggnad kan bergartens kemiska resistens bedömas, som exempel kan nämnas att syror och salter är riskfaktorer i sammanhanget. Förutom ovan nämnda mineral förekommer vanligtvis lermineral och andra föroreningar, halten av dessa styr i viss grad kalkstenens beständighet. Inblandningen av lera skapar skiktningar i stenen, så kallade lerklov, vilka verkar försvagande. Lermineralen påverkas i större omfattning av yttre påfrestningar och nedbryts därmed snabbare än kalket, detta ger i sin tur en

[11] Renström, Jörgen och Mebus, Ulrika, Rapport "Murraset", 2013
[12] Artikel Dagens Nyheter - http://www.dn.se/nyheter/sverige/del-av-visby-ringmur-rasade
[13] SPEF Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005, s.75
[14] Jägryd, Anders, Kompendium i Geologi, Geologiska institutionen Lunds universitet, 2012

oregelbunden vittringsstruktur. Beständigheten styrs också av porositeten vilken kan variera mellan olika kalkstenar beroende på litifieringsgraden, det vill säga grad av omvandling till fast bergart[15].

Hårdhet	Densitet ρ_{ks}	Vattenabsorption	Tryckhållfasthet σ_{ks}
	kg/m^3	Viktprocent	MPa
9	2620-2875	1,3-0,2	104-208

Tabell 1 - Tekniska egenskaper för kalksten enligt Europeisk standard (EN-standard)

Murbruk används för att sammanfoga stenarna i en mur och består av en blandning av bindmedel, ballastmaterial, vatten och eventuella tillsatser. Benämningen murbruk kan ses som ett samlingsnamn för en mängd olika brukstyper som var och en innehåller olika tillsatsmedel samt olika mängd av de ingående beståndsdelarna. Viktigt att beakta vid val av murbruk är att detta inte ska verka som ett självständigt material i konstruktionen, det bör alltid samverka med murstenarna. Materialegenskaperna för de båda konstruktionsmaterialen måste anpassas till varandra för att en god vidhäftning och täthet ska uppnås i fogarna. Genom att variera sammansättningen på bruket styrs materialegenskaper såsom hållfasthet, vattenkvarhållning, krympning, lufthalt med mera. Dessa faktorer påverkar direkt eller indirekt vidhäftningen mellan murbruk och mursten. Likaså påverkas vidhäftningen också av murstenens struktur och vattenabsorption. Följaktligen bör lämpligt bruk väljas efter användningsområde och stensort, därmed tillverkar torrbruksleverantörer ofta specialanpassade murbruk för att bästa tänkbara funktion ska uppnås i murverket[16].

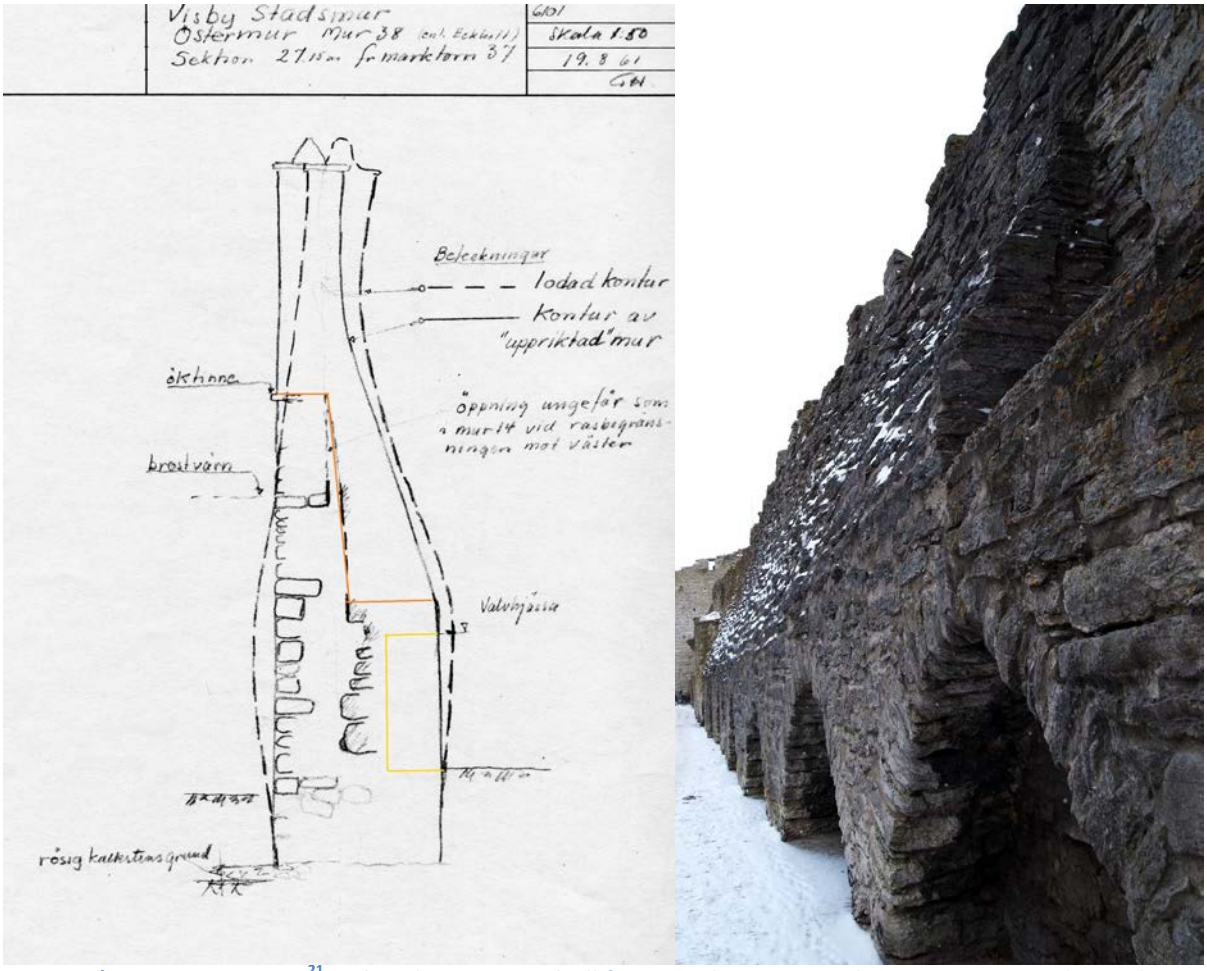
Det finns i dagsläget olika teorier om vilket murbruk som ursprungligen använts i Visby ringmur, gemensamt för dessa är att bruket i fogarna var kalkbaserat. Fogbruket har under årens lopp mer eller mindre urlakats på kalk. Något som med säkerhet kan fastställas är att förstärkningar av fogbruket har genomförts där det aktuella raset inträffat. Uttjänade fogar har lagats med cementbaserat bruk bestående av cement som bindmedel i kombination ballast, vatten och eventuella tillsatser. Det cementbaserade bruket är mycket starkt med låg rörelseförmåga[17]. I nuläget är planen att ersätta det starka bruket med ett nytt mer elastiskt murbruk som tillåter mer rörelse inom konstruktionen[18]. Gällande murkärnan har det genom forskning klarlagts att denna består av reststenar av kalksten blandat med lerbruk. Lerbruk består av bindmedlet lera blandat med vatten och sand, det är mer eftergivligt och elastiskt än kalkbruk. I dagens konstruktioner är lerbruk sällan förekommande[19].

3.2.Geometrimodell

Konstruktionen består av en drygt nio meter hög medeltida skalmur, vilket innebär en kanalmur uppbyggd av två murskal med en mellanliggande kärna. Ursprungligen byggdes muren ungefär sex meter hög till ovansida tinne, senare under 1300-talet förhöjdes muren med ytterligare cirka tre meter

[15] Balksten, Kristin och Mebus, Ulrika m.fl., Bruk av ruiner, Fornsalens förlag, 2012, s. 49
[16] SPEF - Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005, s. 66-67
[17] Biörnstad, Margareta med författarlag, Vård och underhåll: Rädda Visby ringmur! Rapport från en kampanj 1989-1995, Riksantikvarieämbetet och Cementa AB, 1996, s. 26-27
[18] Tekn. Dr, Thelin, Carl - Intervju 03.04.2013
[19] Byggnadsvårdsföreningen - http://byggnadsvard.se/material/lerbruk-historiens-och-framtidens-jordn%C3%A4ra-byggmaterial

och tinnarna murades igen. Det yttre murskalet består av stenar med en tjocklek om 0,25-0,5 meter. Det inre murskalet har en påmurning med inneslutna arkadbågar och är inklusive denna cirka 0,7-1 meter tjockt. Påmurningen är murad som massiv fullmur. Även murförhöjningen är till störst del murad som fullmur med en tjocklek om cirka 0,8 meter. Ursprungligen användes ovansidan av arkadbågarna som skyttegång, i samband med den senare förhöjningen täcktes denna över av ett vinklat murskal med bakomliggande fyllning. Detta har medfört att murens form i dag kan liknas vid en flaskform i genomskärning. Det yttre murskalet buktar något utåt. Muren behöver ursprungligen inte ha varit helt i lod eftersom kalkstensblocken skiljer sig något till form och storlek, men ytterligare utbuktning har troligtvis tillkommit som följd av rörelser i muren[20]. I figur 3 beskrivs geometrimodellen ytterligare.



Figur 3 - a) Tvärsnitt av mur 38[21]. Gul markering visar arkadbågarnas valv, orange markering visar ursprunglig överkant av muren. Den streckade linjen markerar murens utbuktning år 1961. b) Foto av insida mur, arkadbågar och skyttegång kan tydligt ses i bilden.

[20] Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013, s. 11-13
[21] Hammarlund, G, Skadeutredning, 1962

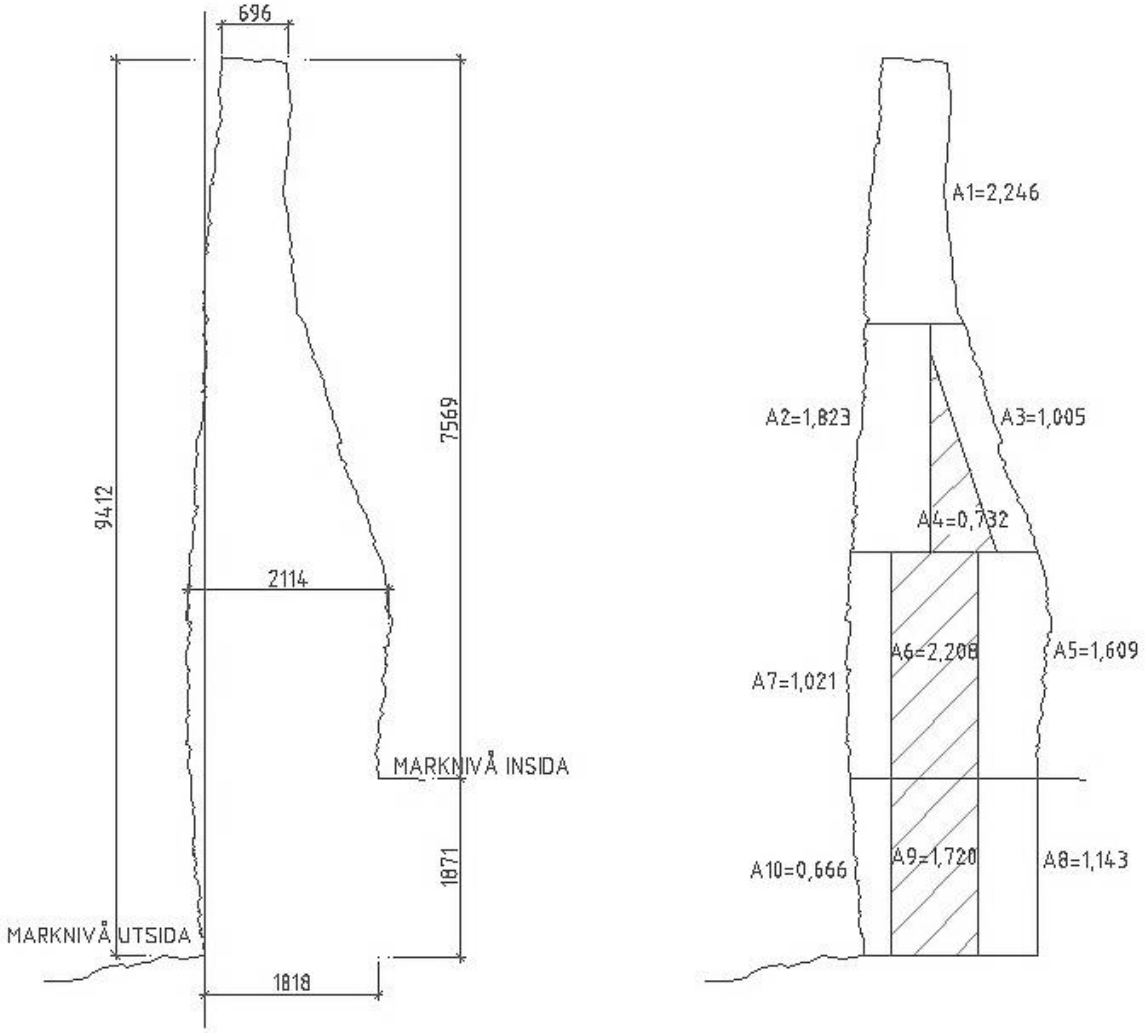
3.3.Lastmodell

Murens huvudsakliga belastning består av de vertikallaster som uppkommer till följd av egentyngden. Denna ges av murverkets densitet och volym och kan vid upplaget i detta fall uppskattas till dimensionerande 460 kN/m, se beräkningar i Bilaga 1, Beräkning av egentyngd. Egentyngden av murverket är grovt uppskattad eftersom kärnans sammansättning och därmed andelen murbruk i förhållande till reststen är okänd. I kärnan har andelen kalkstensrester antagits till 80 % och andelen murbruk antagits till 20 %. Likaså är areaindelning som representerar murkärna respektive stenskal i tvärsnittet mycket grovt uppskattad efter figur 4. Tungheten för kalksten är baserad på ett medelvärde av densitetsvariationen för kalkstenar enligt Europeisk standard (EN-standard). Tungheten för kärnans murbruk är baserad på tungheten för sand vilket är en beståndsdel i lerbruk.

Eftersom murkärnans bärande förmåga kan försummas överförs huvuddelen av murens laster till murskalen. Därmed belastas dessa av hela den fullmur som muren förhöjdes med på 1300-talet. Dock är det ovisst hur denna last procentuellt fördelas mellan de två murskalen, men med säkerhet upptar det yttre murskalet en större del av lasten. Detta kan fastställas i och med murförhöjningens utformning och placering, den största andelen av murförhöjningen är placerad ovanför det yttre murskalet. I övrigt kan muren påverkas något av jordtrycket som uppkommer till följd av skillnaden i marknivå som råder mellan insida och utsida mur. Skillnaden i marknivå varierar längs muren, vid raspartiet uppskattas den till knappt två meter vilket troligtvis är en av de största skillnaderna som uppnås[22]. Jordtrycket utgör en horisontell kraft vilken medför en risk stjälpning. Nyttig last och vindlast är mycket små i förhållande till murens egentyngd och därför nära försumbara vid beräkning[23]. Den nyttiga lasten skulle kunna bestå av olika aktiviteter mot och kring muren.

[22] Tekn. Dr, Thelin, Carl - Intervju 03.04.2013

[23] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s.53, 86



Figur 4 - Måttsatt och grovt areaindelat tvärsnitt av mur 38[24]. Skrafferade ytor motsvarar areor för murkärnan.

3.4.Strukturmodell

En murverkskonstruktion är i regel mycket stabil i sig själv, den har en god förmåga att uppta belastning i form av tryck. Murverket bärs upp genom fördelning av tryckkrafter bestående av egentyngd, samt genom friktion mellan stenarna. I och med att stenarna i murverket är av olika dimensioner samt att det råder relativt stora tryckspänningar, varierar spänning och töjning i olika riktningar. Dessutom är murverk, speciellt de utförda med kalkbruk, mycket krypbenägna konstruktioner. På grund av dessa förhållanden blir befintliga beräkningsteorier från Eurokoder olämpliga att använda vid beräkning av äldre murverkskonstruktioners bärförmåga. I stället görs antaganden om kraft- och spänningsfördelning, dessa antaganden kombineras med jämviktsvillkor för att statiskt kunna bestämma konstruktionens verkningssätt. Beräkningar likt dessa ger en god överblick men täcker dock inte inverkan av lokala sprickor och försvagningar. Vid antaganden om kraftfördelning kan som riktlinje den princip som säger att en kraft alltid väljer den mest fördelaktiga vägen till upplaget användas. Likt vattenflöden som alltid söker sig genom ledningar med minsta motstånd, väljer krafter att ledas genom de styvaste konstruktionsdelarna vilka är mer stabila. Det finns många teorier och beräkningar för murverk, problemet är att de oftast är anpassade till dagens konstruktioner. De moderna beräkningsmetoderna är

[24] Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013

exempelvis baserade på konstruktioner med nya typer av bruk vilka är betydligt starkare än det äldre kalkbruket[25]. Delar av dessa blir alltså inte tillämpbara för medeltida konstruktioner likt Visby ringmur.

Det aktuella fyllnadsmaterialet i ringmurens murkärna antas överföra en mycket liten tryckkraft i konstruktionen på grund av dess dåliga skick. Fyllnadsmaterialet är löst packat vilket innebär att murkärnan skulle deformeras vid belastning. Lasterna koncentreras därav till de styvare murskalen vilka är relativt tunna i förhållande till lasternas storlek, detta bidrar till att höga spänningar uppstår[26]. Kärnan utövar ett visst tryck mot väggarna. Vidare leder detta till att friktionskrafter uppstår mellan kärna och murskal vid rörelser, friktionen kan eventuellt motverka viss deformation och lutning om inte glidningen mellan ytorna är för stor[27].

Ett murverks förmåga att uppta dragspänning vinkelrätt mot liggfogarna är ytterst liten, normalt beskrivs detta med förhållandet 3-6 % av murverkets tryckhållfasthet[28]. Däremot är den totala draghållfastheten för murverket betydligt större parallellt med liggfogarna eftersom dessa utsätts för en motverkande friktionskraft som följd av vertikal tryckkraft. Detta innebär att draghållfastheten för muren parallellt med liggfogarna är större långt ner i konstruktionen, där det råder större tryck- och friktionskraft. Den bristande draghållfastheten leder vidare till en ökad risk för knäckning[29]. Om dragspänning uppstår i muren kommer sprickbildning normalt att ske som följd. Viss sprickbildning är väntad i en murverkskonstruktion eftersom muren hela tiden anpassar sig efter omgivande rörelser samt en viss krypning. Dessa sprickor behöver inte vara ett tecken på kollaps utan är en del av murverkets bärande struktur[30].

Tryckkraften i konstruktionen orsakar skjuvspänning i stötfogarna, vid hög tryckkraft kan denna skjuvspänning uppnå stötfogens skjuvhållfasthet vilket även detta leder till sprickbildning. Stötfogar i ett murverk är ofta dåligt ifyllda, om så är fallet beräknas de inte kunna ta upp någon nämnvärd skjuvspänning. Den maximala tryckkraften som kan överföras vinkelrätt mot liggfogarna begränsas av stenarnas skjuvhållfasthet. All sprickbildning i murverket bör begränsas till att ske i fogarna, för höga tryckkrafter kan medföra att stenar brister och därmed att den bärande strukturen mer eller mindre förstörs[31].

3.5.Upplagsmodell

Grundläggningens funktion är att skapa ett upplag till murverkskonstruktionen och genom detta överföra lasten från murverket till marken. Enligt utredningar som genomförts vid tidigare restaureringsarbete år 1961-1962 vid mur 38 skriver G. Hammarlund att muren grundlagts på kalkstensgrund. Vidare skriver Hammarlund att “Murens nedre del synes bestå av en utbottning av kalkstenshällar i kalkbruk, som avjämnats med tunna kalkstenshällar strax över marknivå på murens

[25] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s.51-57
[26] Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013, s. 13
[27] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s.90
[28] SPEF - Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005, s.147-148
[29] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s. 53-54
[30] Balksten, Kristin och Mebus, Ulrika m.fl., Bruk av ruiner, Fornsalens förlag, 2012, s. 92
[31] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s.54

utsida". Utifrån denna utbottning har sedan ett yttre och ett inre murskal arbetats upp[32]. En kalkstensgrund bedöms som en relativt god grund och bör inte medföra några stora negativa rörelser av betydelse för konstruktionen[33]. Grundläggningen kan dock variera längs med muren.

4. Nedbrytningsmekanismer

4.1.Fukt

Nästintill alla vanligt förekommande skador i ett murverk bottnar i en intensiv fuktnärvaro. Ringmuren tillförs fukt av i huvudsak nederbörd samt markfukt. Vid måttlig nederbörd sker en ytlig fuktabsorption i murverket och konstruktionen kan torka ut vid uppehåll. Adderas dock stark vind till en mer intensiv nederbörd uppstår slagregn vilket leder till en betydande vattengenomträngning, konstruktionen får då en mycket lång uttorkningstid. Vid sådana förhållanden blir så småningom uppsugningen mindre än slagregnsintensiteten och murstenarnas yttersta delar blir vattenmättade. En vattenfilm utvecklas på murytan och därigenom fås ett regngenomslag på grund av vatteninträngning via sprickor och andra otätheter i murskalen. Om muravtäckningen är dåligt utförd blir detta ytterligare en faktor som ökar den vatteninträngande effekten[34].

I ringmurens fall finns vintertid risk för att snö lagras på den flaskformiga murförhöjningen ovan skyttegången, när snön sedan smälter kan vatten lätt tränga in i muren. Denna del av muren är generellt sett mycket utsatt för vatteninträngning. Dessutom finns inga fungerande lösningar beträffande dränering och vattenavledning vilket medför att uttorkning i princip omöjliggörs. Efter en kraftig vatteninträngning i en murverkskonstruktion med otillräcklig dränerande förmåga har vattnet ingenstans att ta vägen. Enda utvägen är att diffundera genom muren i ångfas vilket ger en avsevärd längre uttorkningstid än transport i vätskefas. Uttorkning i diffusionsfas försvåras dessutom av det täta cementbaserade fogbruket, det har en mycket dålig vattengenomsläpplighet och förlänger därför uttorkningstiden ytterligare. Det ursprungliga kalkbruket är betydligt mer poröst vilket hade underlättat uttorkningen[35].

Ett murverk som under lång tid utsätts för kraftig fuktvandring riskerar saltupplösning i murbruket om detta är kalk- eller cementbaserat. Vattnet löser upp saltet och transporterar det vidare genom konstruktionen, detta kan drabba såväl kalk- som cementbaserade murbruk. Saltet kalciumkarbonat, som är en vanlig form av kalk, behöver utsättas för flytande vatten för att lösas upp och därmed lakas ur murbruket. Faktorer såsom lågt PH samt låg omgivande temperatur medför en ökad löslighet. Fenomenet med kalkurlakning resulterar i att murbruket förlorar sitt bindmedel om detta är kalkbaserat och konstruktionen riskerar instabilitet. Eftersom murkärnans bruk är baserat på lera som bindmedel har urlakning av kalk inte bidragit till kärnans dåliga skick. Dock har kalkurlakning drabbat det kalkbaserade fogbruket i murskalen. Ett tecken på att kalkurlakning skett kan vara saltutfällningar vilka i

[32] Hammarlund, G, Skadeutredning, 1962
[33] Projektledare, Mebus, Ulrika - Intervju 20.03.2013
[34] SPEF - Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005, s.75-78
[35] Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013

vissa fall uppenbarar sig som ljusa kalkavlagringar på murverkets yta och ibland som hängande stalaktiter (droppstensbildningar)[36], spår av sådana avlagringar har emellertid inte påträffats vid raset.

Förutom kalkurlakning kan rinnande vatten i kombination med sand eller andra partiklar ge upphov till nötning på i stort sett alla sorters stenar, oavsett hårdhet. Vidare har en stens porositet och porstruktur ett nära samband med dess vattenabsorption och därmed också dess frostbeständighet och känslighet för saltsprängning vilket beskrivs närmre under avsnitt 4.4 Saltsprängning. En öppen porstruktur som trots högt vatteninnehåll inrymmer luftrum är som regel frostbeständig, hur murverk påverkas av frost beskrivs under avsnitt 4.2 Frostsprängning. Porositeten hos kalksten kan variera mycket mellan olika stensorter då stenens uppbyggnad består av täta skikt, så kallad kärnsten. Dessa varvas med mer porösa skikt, så kallade lerklov[37]. Variationsintervallet för kalkstenssorternas vattenabsorption ligger mellan 0,2-1,5 viktprocent[38].

4.2.Frostsprängning

Frostsprängning är en fysikalisk nedbrytningsprocess som kan ske i porösa material då vatten i flytande form övergår till fast form, alltså is. Det finns olika teorier om hur frostsprängning uppstår. Enligt den klassiska teorin sker en volymökning med cirka 9 % då iskristaller bildas vilket skapar ett övertryck i porerna då vattnet pressas mot porväggarna. Vid tillräckligt stort vatteninnehåll leder detta till sönderspränging av materialet. Om materialet har en öppen porstruktur med kvarvarande luftfyllda porer kan dessa motta det undanträngda vattnet vid frysning för att förhindra frostsprängning. Porösa material kan sägas ha en kritisk vattenmättnadsgrad med avseende på sönderfrysning, överstigs denna uppstår frostskador. Förutom den normala risken för frostsprängning utsätts material för en utmattningslast vid upprepade temperaturväxlingar vilka medför omväxlande frysning och upptining. Detta innebär att den kritiska vattenmättnadsgraden minskar då sådan utmattningslast förekommer[39].

Frostsprängning anses vara en av orsakerna till ringmurens ras i februari 2012. Under vintern 2011-2012 utsattes konstruktionen för mycket regn och väderleken växlade stort i temperatur. I Visby var vintern till en början relativt varm och blåsig med många dagars intensiv nederbörd. I slutet av januari föll temperaturen och understeg noll grader, dock var kylan kortvarig och temperaturen steg återigen i mitten av februari. Därefter följde ytterligare en intensiv regnperiod. När den kalla perioden inföll i slutet av januari var den relativa fuktigheten i murverket högst sannolikt runt 100 % och risken för frostsprängning var mycket stor[40]. En utlösande faktor till raset kan alltså ha varit en lokal frostsprängning som därefter skapade en kedjereaktion av rörelser i murverket som slutligen orsakade den stora rasytan[41].

Frostsprängning i kalksten sker vanligtvis genom avspjälkning i skikt om cirka 1-10 millimeter parallellt med stenytan. Spjälkningen sker i regel utefter gränserna mellan skikten av tät kärnsten respektive

[36] Balksten, Kristin och Mebus, Ulrika m.fl., Bruk av ruiner, Fornsalens förlag, 2012, s. 65
[37] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Stenhandboken-Restaurering.pdf, s. 40-44
[38] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Natursten_Utemiljo.pdf, s. 13
[39] Balksten, Kristin och Mebus, Ulrika m.fl., Bruk av ruiner, Fornsalens förlag, 2012, s. 64-65
[40] Renström, Jörgen och Mebus, Ulrika, Rapport "Murraset", 2013
[41] Tekn. Dr, Thelin, Carl - Intervju 03.04.2013

porös lerklov vilka beskrivs under avsnitt 4.1 Fukt. Detta beroende på att lerkloven har betydligt högre vattenabsorption och samtidigt sämre hållfasthet än kärnstenen. Då sprickor och andra försvagningar förekommer kan i värsta fall större stycken sprängas loss[42].

4.3.Syror

Karbonatstenar såsom kalksten är i huvudsak uppbyggda av kalkföreningar vilka är basiska och därmed reagerar med sura ämnen. Syror verkar i princip frätande mot kalkstenens yta vilket kan skapa ojämnheter, stenens övriga tekniska egenskaper behöver dock inte påverkas av dessa[43]. Vid det rasade murpartiet anses angrepp av syror inte ha varit någon bidragande orsak till olyckan.

4.4.Saltsprängning

Åverkan av salter är i huvudsak av fysikalisk karaktär. Salterna kan angripa stenens ytskikt samt tränga djupare in om denna är porös, detta kan medföra vittring eller lossprängning då vattnet avdunstar och salterna kristalliserar. Vid kristallisationen skapas ett tryck inuti porerna och risk för avspjälkning av ytskiktet föreligger om trycket blir för stort, processen kan jämföras med frostsprängning då iskristallerna skapar ett porövertryck[44]. Kristallbildning inuti ett materials porer benämns subfluorescens, då tryckkraften på grund av subfluorescensen överstiger stenens draghållfasthet kommer avspjälkning att ske. Salters kristallstruktur är generellt beroende av omgivningens relativa fuktighet och temperatur. Den relativa fuktighet som råder då ett salt kristalliserar benämns som kritisk relativ fuktighet för saltet. Kalciumkarbonat $CaCO_3$ behöver som beskrivs i avsnitt 4.1 utsättas för flytande vatten för att lösas upp, detta innebär en ungefärlig kritisk relativ fuktighet på 100 %. Värt att belysa är också den ökade skaderisken på grund av utmattning då ett salt gång på gång kristalliseras och upplöses[45].

Salter återfinns i en mängd olika källor i ringmurens miljö. Kalcium och karbonater finns i kalkbaserade murbruk, natriumklorid finns i havet samt i tösalter, dessutom kan tösalter innehålla kalciumklorid. Vid intensiv närvaro av bilavgaser kan även kalciumsulfat (gips) skapas på kalkbaserade ytor, detta salt kan även påträffas som tillsats i cement. Förutom nämnda källor kan olika salter sugas upp i murverket via markfukt, detta kan undvikas genom att tillämpa korrekt dränering och kapillärbrytande tekniker vid grundläggning[46]. Några sådana vattenavledande funktioner finns dock inte under ringmuren. Trots att murverket i hög grad omges av salter av olika slag tros det rasade murpartiet inte ha haft någon koppling till saltsprängning[47]. Skador på grund av saltsprängning och frostsprängning kan dock vara svåra att skilja åt, men på grund av fuktiga väderförhållanden efterföljt av minusgrader är det högst troligt att frostsprängning är den utlösande faktorn.

[42] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Stenhandboken-Restaurering.pdf, s. 40-43
[43] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Natursten_Utemiljo.pdf, s. 13
[44] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Stenhandboken-Restaurering.pdf, s. 43-44
[45] Balksten, Kristin och Mebus, Ulrika m.fl., Bruk av ruiner, Fornsalens förlag, 2012, s. 59-61
[46] Ibid
[47] Tekn. Dr, Thelin, Carl - Intervju 03.04.2013

4.5.Temperaturspänningar

Kalksten utsätts som många andra material för temperaturbetingade rörelser. Stora temperaturvariationer resulterar i spänningar inom stenen vilka skapar glidningar mellan olika mineral då dessa har varierande utvidgningskoefficienter. Temperaturrörelser kan på så sätt såväl direkt som indirekt medföra lossprängning eller sprickor i sten och bruk, indirekt genom att verka som pådrivande faktor vid salt- och frostsprängning[48].

4.6.Växtlighet

Biologiska angrepp på murverk har, likt många andra murverksskador, orsakats av långvarig närvaro av fukt. Kalksten i kontakt med vatten blir med tiden oundvikligen utsatt för biologisk tillväxt. Faktorer som spelar in i tillväxtprocessen är stenens porositet, vattenabsorption och ytstruktur. En sten med grov yta och porös uppbyggnad skapar en godare miljö för beväxning av alger och lavar än en tät sten med slät yta[49]. Vidare kan alger och lavar bilda organiska syror som har förmågan att lösa upp kalkstenenens kalkmineral. En naturlig vittringsprocess startar och dessutom kan beväxta ytor hålla kvar mer fukt än ej drabbade ytor. Vittrad och fuktig sten ger en mycket god miljö för ytterligare tillväxt och därmed har en negativ cyklisk vittringsprocess påbörjats. Om växter slår rot i sprickor i murbruket kan lossprängning inträffa i konstruktionen. Biologisk nedbrytning undviks bäst genom ett regelbundet underhåll där skadade fogar lagas och befintliga växter avlägsnas med lämplig metod[50]. Ringmuren har under årens lopp rensats från alger, växter och tillhörande rotsystem, dock krävs ett mer kontinuerligt underhåll för att muren inte ska ta skada. Att bättre underhåll inte kunnat genomföras bottnar i en ekonomisk begränsning. Vid det aktuella rasområdet finns trots det ingen omfattande växtlighet som påverkat murpartiets dåliga skick[51].

5. Tidigare utförda restaureringsåtgärder

Visby ringmur har genom åren varit objekt för många åtgärder av olika slag, alla med syfte att förstärka konstruktionen. Hur detta fungerat på lång sikt är däremot något som skiljer från fall till fall. Det största dilemmat i fråga om vård av muren har varit murbruket. Fogarna är mycket djupa vilket har medfört att stora mängder fogmaterial fordrats vid omfogning. Fram till och med 70-talet genomfördes reparationer med cementbruk på olika partier av muren innan det uppmärksammades att detta kunde förorsaka skador på murverk. Reparationerna har olyckligtvis bidragit till murens idag värsta hot, nämligen fuktproblemen.

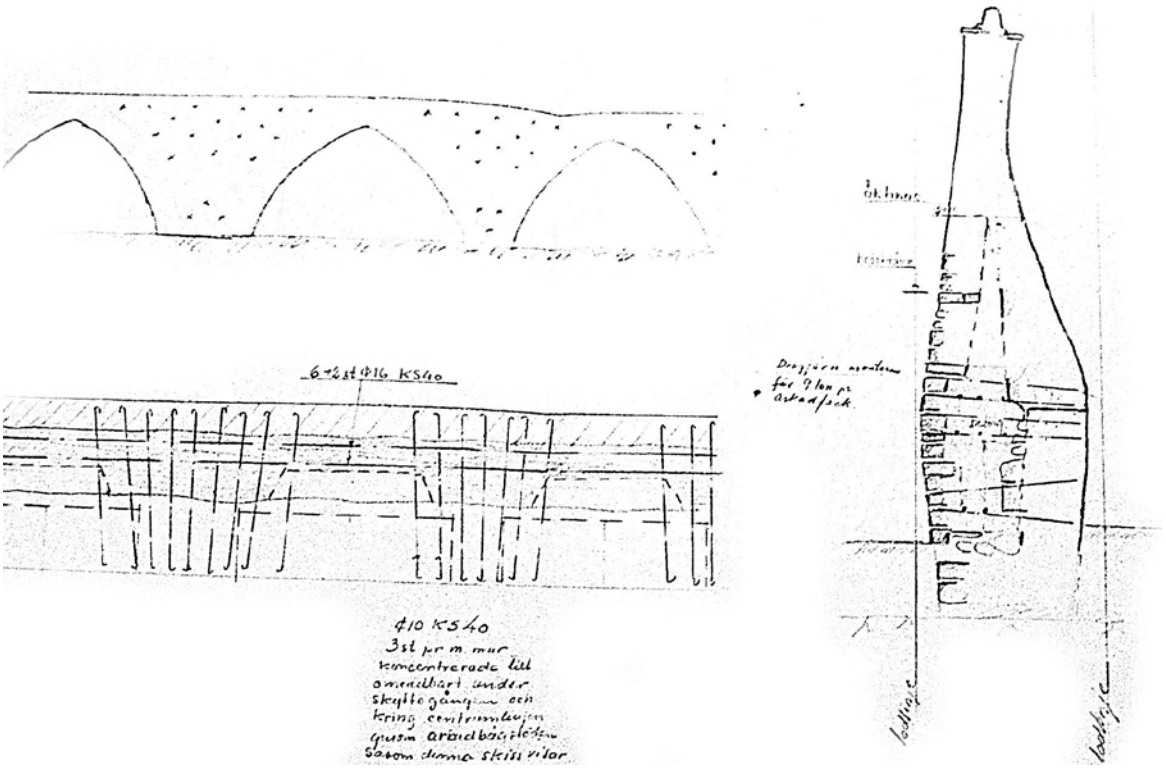
Under 1920- och 1930-talen blev betong och cement populärt på byggmarknaden. Vilka effekter det skulle innebära när cementbaserat bruk användes på konstruktioner anpassade för svagare kalkbruk var då okända. Lagningar med cementbaserat bruk är ett problem som ofta påträffas i äldre murverkskonstruktioner. Det är ett starkare bruk än rent kalkbruk, med helt andra hydrauliska förutsättningar. Tätheten i det cementbaserade bruket ansågs förr som en bra egenskap eftersom det

[48] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Stenhandboken-Restaurering.pdf, s. 44
[49] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Natursten_Utemiljo.pdf, s. 73
[50] Sveriges stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Stenhandboken-Restaurering.pdf, s. 45-46
[51] Projektledare, Mebus, Ulrika - Intervju 20.03.2013

kunde verka som ett avtäckande skikt på konstruktionen, då förutsågs inte risken för sprickbildning och andra otätheter. Vid murning bör beaktas att bruket ska fungera som ett offermaterial, det vill säga brista före konstruktionen. Är bruket starkare än det aktuella byggnadsmaterialet uppnås inte detta, så är fallet med Visby ringmur då ett starkt cementbaserat bruk använts i kombination med kalksten. Idag består många restaureringsarbeten av att byta ut cementbaserade fogar mot ett speciellt framtaget bruk som anpassats till ursprungskonstruktionen[52].

År 1962 genomfördes omfattande förstärkande åtgärder på samma mur som raset år 2012 berör, dock inte samma parti. Vid det tillfället användes dragjärn för att sammanbinda det yttre murskalet med det inre. Dragjärn förklaras vidare under avsnitt 6.2.2 Dragjärn. Orsaken till denna åtgärd var att lasten från den murförhöjning som gjorts befarades vara för stor för att upptas av de två murskalen. Dragjärnens främsta funktion var att fixera murskalen till sitt dåvarande läge, detta för att förebygga utbuktning och förhindra annan rörelse. Eventuella horisontalkrafter dessa stänger kunde uppta ansågs små. De vertikala dragjärnen placerades mellan arkadbågarna där det inre murskalet är som tjockast och fixerades inuti murskalens fogar. Därför blev lagningen aldrig synlig på murens yta. Dragjärn fästes även mellan arkadbågarnas topp och grundläggningen, samt mellan murförhöjningen och de gamla tinnarnas underkant för ytterligare förstärkning. Dragjärnen korrosionsskydd bestod av en omslutande betonggjutning[53]. En ritning som uppfördes i samband med de förstärkande åtgärderna på 60-talet visar hur dragjärnen placerades i muren, se figur 5.

[52] Biörnstad, Margareta med författarlag, Vård och underhåll: Rädda Visby ringmur! Rapport från en kampanj 1989-1995, Riksantikvarieämbetet och Cementa AB, 1996, s. 26-29
[53] Hammarlund, G, Skadeutredning, 1962



Figur 5 - Dragjärn i mur 38[54]. Övre bilden illustrerar murens insida med arkadbågar där dragjärn utmärkts med punkter. Den nedre bilden är en genomskärning ovanifrån tagen strax under murförhöjningen. Bilden till höger är en sektion av muren där de genomgående dragjärnen visas.

En annan åtgärd som vidtogs vid detta tillfälle var att riva ut delar av den gamla kärnan. För att komma åt att göra detta togs provisoriskt stenar bort från muren i valven under arkadbågarna. Detta var en lämplig ingångspunkt i och med att murskalet där är tunnare, samt att arkadbågarna bidrog med ett skydd vid arbetet. Kärnan ersattes sedan med gjuten betong vilken kunde bära de vertikala lasterna från murförhöjningen och därmed avlasta murskalen som börjat bukta utåt. Betonggjutningen utfördes som partier med mellanliggande avbrott för att eventuellt inträngt vatten skulle kunna dräneras bort. Dessutom gjöts betongpartierna med en lutning från mitten och dräneringsbrunnar lades i avbrotten mellan dessa. Riskerna med försämrad luftning och fuktansamling var alltså kända och projekteringen anpassades därefter[55]. Detta har dock visat sig otillräckligt, muren är bevisligen fuktigare i de partier där betongkärna gjutits. Detta kan ses på murens yta i form av lokalt ökad växtlighet.

Det är idag Riksantikvarieämbetet som bär ansvaret för vård och besiktning av muren. Besiktning sker löpande och resultaten sammanställs i en årlig planering av åtgärder. Detta har pågått under 1900-talet och framåt, det finns dock inte mycket dokumentation som visar när åtgärderna faktiskt utförts. I

[54] Hammarlund, G, Skadeutredning, 1962
[55] Ibid

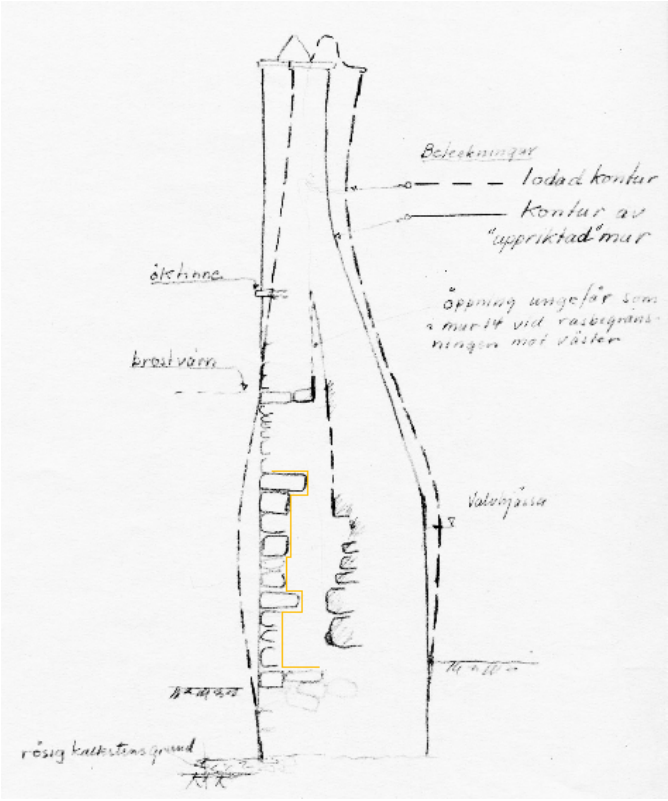
huvudsak består dagens restaureringsarbete av att byta ut de spruckna cementfogarna och ersätta dessa med specialframtaget kalkbruk[56].

6. Byggnadstekniska metoder

6.1.Bindstenar

Bindstenar kan användas på olika sätt i alla bärande murverkskonstruktioner. Metoden innebär att stenar med jämna mellanrum läggs tvärs murens längdriktning, med kortsidan utåt. På så vis uppnås en större hållfasthet genom att bindstenen, eller koppstenen som den också kallas, förbinder det yttre murskalet med den inre delen av murverket. Bindstenar i detta arbete definieras inte nödvändigtvis som genomgående stenar utan kan även avslutas i skalmurens kärna. Tekniken kan användas för att skapa olika mönster på en murad fasad. Som tumregel vid modern murning läggs minst var femte sten i ett skift som en bindsten, inte fler än fyra efterföljande skift muras utan bindare. Murförband uppnås inte enbart genom bindstenar utan även genom att de olika skiften muras omlott, en stötfog täcks alltså alltid av en sten i över- och underkant[57]. Visby ringmur är i det yttre murskalet noga murat i förband genom att murstenarna lagts omlott[58].

Genom granskning av ritningar som gjordes i samband med utredningar 1961 kan uttydas att metoden med bindstenar till viss del använts, avsikten med dessa var förmodligen att binda murskalen till den inre kärnan. Funktionen har dock inte uppfyllt den bindning som krävts efter lastökningen från murförhöjningen. Bindstenarna är få och stenarna i murkärnan har ett mycket dåligt förband, det vill säga en oordnad uppbyggnad. Figur 6 är ett tvärsnitt som ritats under utredningen på 60-talet, den inre konturen visar att principen med bindstenar har använts då stenar i murskalen med jämna mellanrum når längre in i kärnan.



Figur 6 – Tvärsnitt av mur 38[59]. Den inre konturen är markerad och visar hur bindstenar med jämna mellanrum lagts in i murskalet.

[56] Biörnstad, Margareta med författarlag, Vård och underhåll: Rädda Visby ringmur! Rapport från en kampanj 1989-1995, Riksantikvarieämbetet och Cementa AB, 1996, s. 27
[57] SPEF Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005, s. 28-29
[58] Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013
[59] Hammarlund, G, Skadeutredning, 1962

Ett tänkbart tillvägagångssätt vid restaurering av ringmuren skulle kunna vara nedplockning av de partier där åtgärder krävs, i synnerhet det rasade partiet. I sådant fall skulle murningstekniken med bindstenar kopplade till murkärnan kunna användas för att återuppbygga dessa murpartier. Detta förutsatt att fler bindstenar läggs in samt att murens kärna läggs om på ett mer ordnat och strukturerat sätt, med stenar som läggs omlott för en genomgående bindande verkan. Genom att blanda olika stenfraktioner i kärnan fylls eventuella hålrum igen för en bättre samverkan[60]. Alternativt skulle genomgående bindstenar kunna användas vilket medför en direkt sammankoppling mellan murskalen, därmed har kärnans uppbyggnad inte samma krav på bindande struktur. På så vis skulle moderna material inte behöva beblandas med den medeltida konstruktionen.

6.2. Kramlor och Dragjärn

Skillnaden i definition mellan kramlor och dragjärn kan tyckas vara något vag. I fallet Visby ringmur kan de båda syfta till att återskapa en förlorad stabilitet i muren och således användas som förstärkningsmetoder. Metoderna undersöks som förebyggande åtgärder på murpartier där rasrisken är hög. Troligtvis är dessa metoder inte idealiska där muren redan rasat eftersom denna del eventuellt kan vara i behov av ommurning från grunden som beskrivet under avsnitt 6.1. Bindstenar. Eftersom den befintliga murningsmetoden kan anses fungerande finns föga anledning att blanda in nya konstruktionsvarianter där ommurning med viss förbättring kan utföras på ursprungligt vis.

6.2.1. Murkramlor

Murkramlor förekommer i relativt många olika moderna utföranden och deras huvudsakliga syfte är att sammanbinda en fasadmur med en bakomliggande byggnadsstomme av exempelvis trä eller betong. Kramlorna hindrar då murverket från att knäckas ut samt överför transversallaster från det yttre murskalet till den bärande konstruktionen. Vanligtvis måste kramlornas bärförmåga dimensioneras för att klara den vindlast som påverkar konstruktionen. Därutöver behöver tillåtna utdragskrafter för kramlorna och dess infästningar kontrolleras. Tillåtna värden kan beräknas men provdragningar av infästningarna bör även göras på plats. Murkramlor kan också användas för att sammanbinda två murskal i en kanalmur, kramlornas ändar kan då inmuras i respektive murskals liggfogar. Vissa kramlor kan även eftermonteras i befintliga kanalmurar genom förborrning av båda murskalen[61].

Under 1950- och 60-talet användes murkramlor i relativt hög utsträckning, dock hade dessa bristande korrosionsresistens. Det bristfälliga rostskyddet har resulterat i korroderade kramlor som orsakat rostsprängning i konstruktioner, i vissa fall har kramlan helt gått av[62]. Ett belysande exempel på hur korroderade kramlor kan orsaka problem är Stockholms slott, där det just nu pågår en omfattande fasadrenovering. Fasaden består av kvaderstenar av Roslagssandsten som kramlats både vinkelrätt mot en bakmur och parallellt i varandra. Korroderade kramlor har där resulterat i sprickbildning i stenarna och en del ingjutna kramlor har dessutom påträffats helt pulveriserade. Varje fasadsten måste nu granskas och bytas vid behov[63]. Om konstruktioner utförda med kramlor utan rostskydd inte uppmärksammas i tid kan utfallet bli ett förödande ras. Utifrån denna vetskap har flertalet leverantörer

[60] Murverkskonsult, Traung, Mikael, Intervju 03.04.2013.
[61] SPEF Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005, s. 68-69, 156

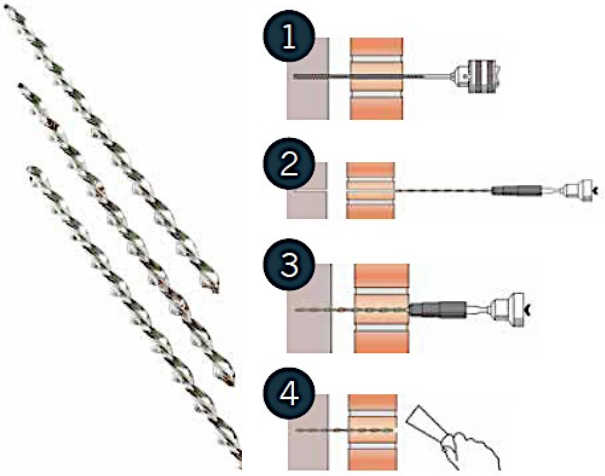
inom murverksbranschen utvecklat rostfria renoveringskramlor som kan tillämpas på befintliga murfasader vilka bedöms som riskkonstruktioner[64]. På grund av att konstruktioner i utomhusmiljöer ofta utsätts för syror från exempelvis försurat regnvatten utförs dessa kramlor vanligen av syrafast rostfritt stål[65].

Mellan olika leverantörer kan renoveringskramlan skilja sig till utseende men idén är densamma, de flesta är dock anpassade för husfasader. En variant som finns på marknaden är en rak kramla med vågformad ände vilken ska placeras i skalmurens liggfog, se figur 7. För montering krävs att fogen borras eller fräses upp och därefter förborras även bakomliggande stomme. Kramlan slås sedan in i det förborrade hålet och gjuts fast med bruk, infästningen bör kontrolleras genom provdragning.

Figur 7 - Exempel på utförande av renoveringskramla[66].

Vid fastgjutning av kramlan är det även viktigt att hindra bruket från att rinna ut i luftspalten så att fasadens ventilation inte hindras. Detta görs lättast genom att täta den inre änden av borrhålet med exempelvis mineralull eller en bottningslist. Murbruket kan sedan appliceras i borrhålet med hjälp av en fogspruta. Resultat blir i det närmaste osynligt eftersom kramlan placeras inuti fogen[67]. En förutsättning för metoden med renoveringskramlor är att det fria avståndet mellan kramlans infästningspunkter är tillräckligt stort, detta för att kramlan ska klara den utmattningslast som skapas av rörelseskillnader mellan murskal och byggnadsstomme. Är avståndet inte tillräckligt kan en rörelseupptagare i form av en skumgummislang träs över kramlans yttre del, detta leder till att kramlans fria längd ökar[68].

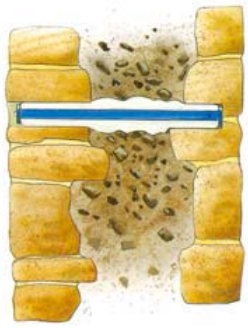
Ytterligare en eftermonteringskramla som kan monteras på befintliga fasader är en spiralformad variant som verkar genom mekanisk förankring, se figur 8. Detta innebär att inget förankringsbruk behöver appliceras. Murskal och stomme förborras och därefter monteras kramlan med hjälp av ett specialanpassat monteringsverktyg. Avslutningsvis täcks hålet med murbruk för att efterlikna murens utseende[69].



Figur 8 – Montering av Dryfix renoveringskramla[70].

[62] Murma AB - http://www.murma.se/pdf/murma_murverksskador.pdf, s. 9-11
[63] Murverkskonsult, Traung, Mikael, Intervju 03.04.2013
[64] Murma AB - http://www.murma.se/pdf/murma_murverksskador.pdf, s. 9-11
[65] Hebert, Sten, Miljöfrågan inom byggsektorn, S Hebert Miljökonsult AB, 2011
[66] Murma AB - http://www.murma.se/pdf/murma_murverksskador.pdf, s. 11
[67] Murma AB - http://www.murma.se/pdf/murma_murverksskador.pdf, s. 9-11
[68] Ibid
[69] Joma AB - http://www.joma.se/mediabank-1/byggbeslag-4/skalmurar-1.pdf, s. 21

En tredje variant som används på den brittiska marknaden är en rostfri stålkramla iklädd en polyesterstrumpa. Kramlan placeras i ett förborrat hål och därefter kan murbruk injekteras i strumpan, detta görs under ett högt tryck på 3 - 4,5 bar vilket erhålls i en särskild tyckbehållare. Strumpan expanderas och formar sig efter håligheterna i muren, dessutom hindrar den murbruket från att falla ned i luftspalten eller murkärnan. När bruket härdat är kramlan på plats genom såväl mekanisk som kemisk förankring. Hålet täcks därefter med lämpligt murbruk som efterliknar murens för minsta möjliga synlighet[71]. Principen för detta visas i figur 9.



Figur 9 - Kramla i bruksfylld polyesterstrumpa[72]

6.2.2. Dragjärn

Vår definition av dragjärn är ett järn, exempelvis ett rundstål, som genomborrar murverkskonstruktionen och är synligt på murens utsida. Detta järn upptar dragkrafter som konstruktionen i övrigt har svårt att bära. På murens utsida fästs dragjärnet lämpligtvis med bricka och mutter. Ändslutet bör inte vara för litet då detta riskerar en stor lokal tryckpåkänning mellan bricka och mur. Ju större brickan är vid dragjärnets förankringspunkter desto mer fördelas och utjämnas trycket mot muren[73]. Dragjärn kan liknas vid ankarjärn som användes i byggnader redan på medeltiden, dessa förankrades i bärande bjälklagsbalkar och avslutades på fasadens utsida med ett ankarslut[74]. Ankarslutet kunde utformas på olika sätt, en del var mycket vackra med prydligt smidda former. Figur 10 visar ett exempel där dragjärn använts i en skalmurskonstruktion för att sammanbinda det yttre och inre murskalet. Självklart skulle dragjärnens avslut om sådana tillämpas på ringmuren kunna utformas på ett mer estetiskt tilltalande sätt än en fyrkantig plåt.

Figur 10 - Dragjärn i skalmurskonstruktion på fastigheten Gotland, Kyllaj Hellvi Vivlings 1:128[75].

[70] Joma AB - http://www.joma.se/mediabank-1/byggbeslag-4/skalmurar-1.pdf, s. 21
[71] Peter Cox Ltd - http://www.petercox.com/brochures/Wall-Stabilisation.pdf
[72] Ibid
[73] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s. 232
[74] Nationalencyklopedin - http://www.ne.se/lang/ankare/115056
[75] Restaureringsrapport för åtgärder på kalkladeruiner på fastigheten Gotland, Kyllaj Hellvi Vivlings 1:128, Länsstyrelsen Gotland, 2008

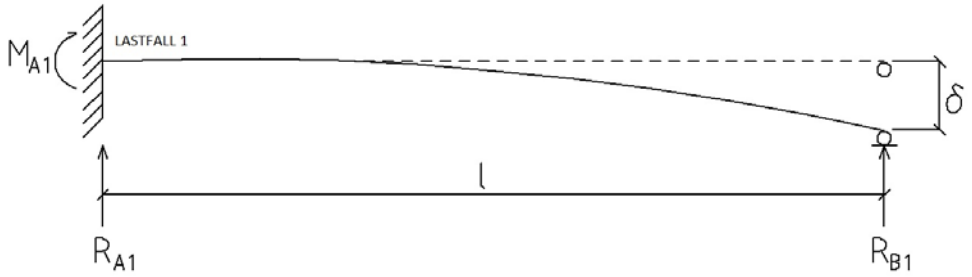
6.2.3. Förutsättningar vid utförande och beräkningar

Något som kan komma att bli ett problem vid tillämpning av renoveringskramlor är att dessa inte tillverkas i tillräckliga längder för att passa murverkskonstruktionen, eventuellt skulle kramlorna kunna specialbeställas från lämplig tillverkare. En lösning kan vara att tillverka kramlorna av smala rostfria kamstål som kan kapas till önskad längd och monteras på liknande sätt som renoveringskramlorna i avsnitt 6.2.1[76]. Huruvida det finns risk för att ringmuren förlorar sitt ursprungliga verkningssätt vid tillämpning av moderna material bör också diskuteras. Eftersom rena murverkskonstruktioner bedöms ha en god och fungerande lastöverföring till grunden bör detta tas tillvara och inte provoceras. Den största utmaningen med införandet av murkramlor i Visby ringmur blir därför att anpassa deras styvhet till murverkets. Kramlorna får inte vara för styva då dessa i sådant fall riskerar att uppta mer vertikal last än stenarna i skalet vilket orsakar en rubbad lastfördelning. För styva kramlor kan också skada kalkstenen på liknande sätt som cementbruket genom att inte tillåta tillräcklig rörelse i murverket[77].

För att kunna utreda eventuella dimensioner på kramlor i Visby ringmur har ett tänkbart scenario formulerats. Det inre murskalet antas vara stabilt medan det yttre murskalet påverkas av vertikala sättningar samt lutar utåt. Detta antagande grundar sig i den verkliga händelsen där enbart det yttre murskalet rasat och det inre står till synes opåverkat kvar. Dessutom råder särskilt höga spänningar i det yttre murskalet. Härav kan inverkan av jordtrycket bortses från då det upptas av det stabila inre murskalet. Lutningen på det yttre murskalet motsvaras av den verkliga utbuktningen som uppmätts till cirka fem grader strax intill det rasade murpartiet, se figur 13. Kramlor i form av kamstål borras in genomgående i befintlig mur för att sammanbinda det ostabila yttre murskalet till det inre mer stabila. Vid infästningspunkterna gjuts kamstålen fast med någon typ av elastiskt bruk som anpassats till kalkstenens egenskaper. Kramlornas infästningslängder antas kunna vara näst intill lika med murskalens tjocklek. Beträffande murens kärna antas denna vara elastisk och delvis kunna följa kramlans rörelser. Förhoppningsvis leder detta scenario fram till de mest lämpliga dimensionerna på kramlor anpassade för att kunna följa murens rörelser. Dessutom behandlas erforderligt antal kramlor per kvadratmeter mur.

Beräkningsgången är redovisad i Bilaga 2, Kramlor och Dragjärn vilken visar en beräkningsmall med vissa utbytbara värden samt efterföljande resultattabeller. Fokus ligger på kramlor men beräkningsmallen är även aktuell för motsvarande dragjärn, det vill säga undersökt dimension på kramlan men med ändslut av brickor utanpå murytorna. Beräkningarna utgår från två olika lastfall, ett där kramlan är fritt upplagd i ena änden och fast inspänd i den andra, samt ett där den är fast inspänd i båda ändar. Vilket av fallen som är mest rimliga beror på hur god vidhäftning som uppnås mellan kramla och mursten i infästningspunkterna. Ekvationerna för ändmoment och reaktionskraft skiljer sig något mellan de två lastfallen, se ekvationerna [6.2:1] och [6.2:2] i förhållande till [6.2:3] och [6.2:4]. Ett tredje tänkbart lastfall är att kramlan är fritt upplagd i båda infästningspunkter. Detta bortses från på grund av att inga ändmoment uppstår vid sättning i detta lastfall, det innebär att konstruktionen påverkas i mindre grad av deformationen. Genom att ta hänsyn till endast lastfall 1 och 2 uppnås resultat på säkra sidan. I figur 11 och 12 beskrivs skillnaden i hur deformationen verkar.

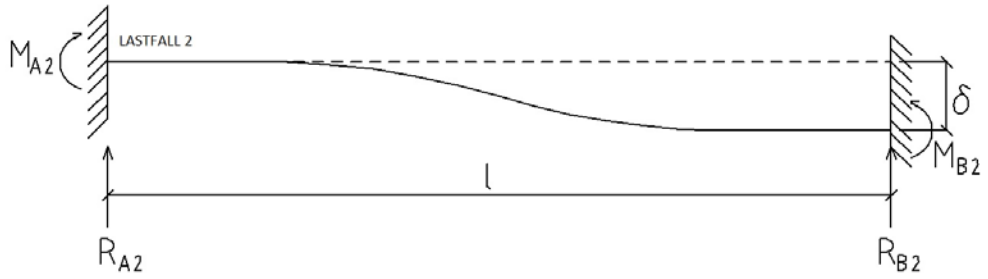
[76] VD Murma AB, Svensson, Ulf, Mailväxling 15.04.2013
[77] Tekn. Dr, Thelin, Carl - Intervju 03.04.2013



Figur 11 - Lastfall 1, kramla fast inspänd i punkt A och fritt upplagd i punkt B. δ motsvarar sättningen i det yttre murskalet.

$$R_{A1} = -R_{B1} = \frac{3EI}{l^2}\delta \qquad [6.2:1]$$

$$M_{A1} = -\frac{3EI}{l^2}\delta \qquad [6.2:2]$$

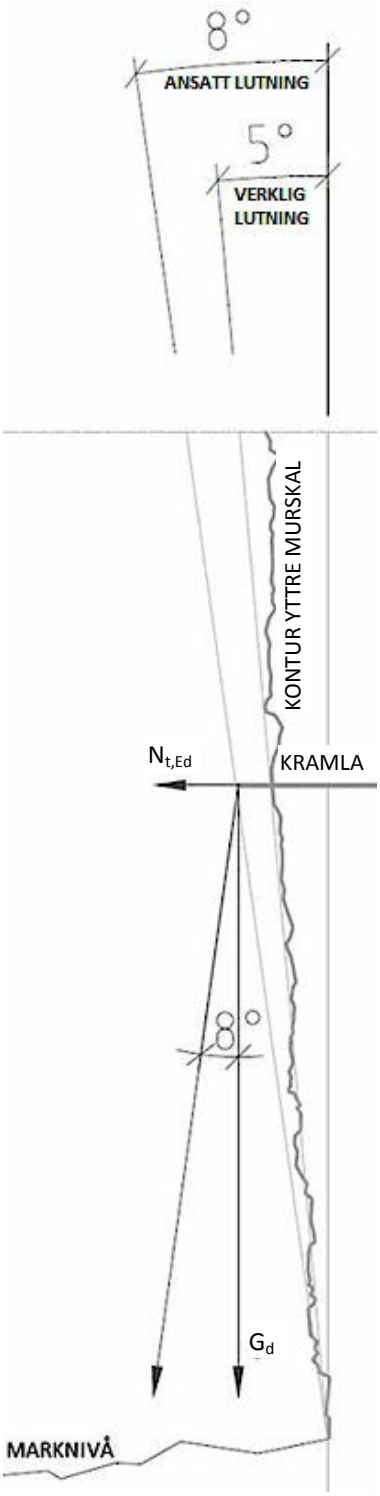


Figur 12 - Lastfall 2, kramla fast inspänd i punkterna A och B. δ motsvarar sättningen i det yttre murskalet.

$$R_{A2} = -R_{B2} = \frac{12EI}{l^2}\delta \qquad [6.2:3]$$

$$M_{B2} = -M_{A2} = \frac{6EI}{l^2}\delta \qquad [6.2:4]$$

Lutningen på det yttre murskalet bidrar till en dragkraft i varje kramla och den vertikala sättningen skapar en nedböjande kraft. Härav beaktas dragkraftskapacitet i interaktion med böjmomentkapacitet för kramlan enligt ekvation [6.2:7]. Detta på grund av att en kramla påverkad av ett nedböjande moment inte kan belastas av lika stor dragkraft som en rak och opåverkad kramla. Beteckningar för samtliga ekvationer redovisas under avsnitt 11.2.



Figur 13 - Kraftkomposanter av lutande väggarea.
$N_{t,Ed}$ = Dragkraft på kramla,
G_d = Dimensionerande egentyngd av lutande murskal med arean A_{ms}

$$Dragkraftskapacitet: N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A_{kr} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [6.2:5]$$

$$Böjmomentkapacitet: M_{b,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad [6.2:6]$$

$$Interaktion\ av\ böjmoment\ och\ dragkraft: \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{el,Rd}} \leq 1 \quad [6.2:7]$$

Utifrån känd sträckgräns och antagen dimension för kramlan kan dragkraftskapaciteten beräknas enligt formel [6.2:5]. Med samma förutsättningar beräknas kramlans momentkapacitet med hjälp av ekvation [6.2:6]. M_{Ed} är det moment kramlan belastas av, detta är i beräkningarna lika med ändmoment M_{A1} från ekvation [6.2:2] respektive M_{B2} från ekvation [6.2:4] i de olika lastfallen.

Genom interaktionen i ekvation [6.2:7] kan följaktligen den maximalt tillåtna belastande dragkraften $N_{t,Ed}$ för enskild kramla beräknas. Denna kraft utgör tillsammans med egentyngden G_d, två kraftkomposanter enligt figur 13. Egentyngden G_d motsvarar således tyngden av det yttre murskal med arean A_{ms} som belastar varje kramla. Resultanten till dessa komposanter har en lutning motsvarande murskalets lutning, denna är ansatt till åtta grader för att beräkningarna ska genomföras med en viss säkerhetsmarginal eftersom maximal lutning längs mur 38 kan variera. Den uppmätta lutningen intill raset uppgår som sagt till cirka fem grader.

Med hjälp av förhållandet mellan dragkraften $N_{t,Ed}$ och ansatt lutning kan komposanten G_d beräknas vilken begränsar kramlans lastarea A_{ms}. Genom att dividera egentyngden G_d med motsvarande utbredd egentyngd $G_{d,utb}$ per kvadratmeter murskal enligt Bilaga 2 erhålls lastarean A_{ms} som maximalt kan belasta en kramla vid en viss dimension och sättning.

Förutom att studera böjmoment i interaktion med dragkraft har kramlans längdutvidgning på grund av dragkraften beräknats enligt ekvation [6.2:11] vilken baseras på ekvationerna [6.2:8]-[6.2:10][78].

$$Normalspänning\ till\ följd\ av\ dragkraft: \sigma = \frac{N_{t,Ed}}{A_{kr}} \quad [6.2:8]$$

$$Töjning\ under\ inverkan\ av\ normalspänning: \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad [6.2:9]$$

$$Hookes\ lag: \sigma = \varepsilon \cdot E \quad [6.2:10]$$

$$Längdutvidgning: \Delta l = \frac{N_{t,Ed} \cdot l}{E \cdot A_{kr}} \quad [6.2:11]$$

[78] Burström, Per Gunnar, Byggnadsmaterial, Studentlitteratur AB, 2007

I en sista beräkning har även nödvändig area på en eventuell dragjärnsbricka framtagits med hänsyn till tryckhållfastheten för kalksten σ_{ks}, vilken kan avläsas i tabell 1 under avsnitt 3.1 Materialmodell. Brickans area A_{br} beräknas med ekvation [6.2:12] som kan jämföras med ekvation [6.2:8].

$$Minsta\ tillåtna\ area\ på\ dragjärnsbricka\text{: } A_{br} = \frac{N_{t,Ed}}{\sigma_{ks}} \qquad [6.2:12]$$

I beräkningarna används variabelvärden enligt tabell 2. Valet av diameter baseras på de minsta standardmåtten som finns på marknaden för kamstål, detta på grund av teorin om att lägre dimension ger lägre styvhet och därmed en mer eftergivlig kramla. Den största längden har uppskattats utifrån ett tvärsnitt intill det rasade murpartiet och motsvarar avståndet mellan kramlans infästningspunkter, det vill säga murkärnans tjocklek. I beräkningsfallet där längden 900 millimeter antagits, bortses från eventuell inverkan av murkärnans motstånd. Anledningen till att kortare längder har behandlats är att murkärnan förmodligen i viss grad motverkar kramlans nedböjning och därmed ökar risken för att murverket skadas vid en eventuell rörelse. Varje längdreduktion motsvarar ett procentuellt motstånd från murkärnan, exempelvis har längden 700 millimeter förkortats med 200 millimeter vilket motsvarar ett motstånd om cirka 20 % (200/900 ~ 0,2). Sättningarna är endast grovt antagna efter tänkbara rörelser i en murverkskonstruktion.

Beteckning					
Diameter kramla, d	6	8	10	12	mm
Sättning, δ	20	40	60	80	mm
Längd kramla, *l*	900	700	500	300	mm

Tabell 2 - Antagna variabelvärden för beräkning av lämpliga dimensioner för kramlor.

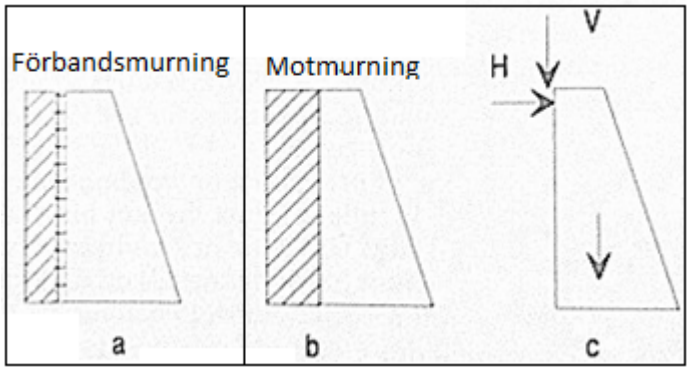
6.3.Kontreforter

Uppstöttning med kontreforter är något som länge använts inom murverkskonstruktion. De är vanliga på medeltida konstruktioner, inte minst på gotiska katedraler. Där användes kontreforter för att konstruktionen skulle kunna bära de enorma valven och fönsterpartierna, utan avsevärd ökning av väggarnas tjocklek[79]. Utefter ringmuren finns några exempel på kontreforter som använts för att avlasta muren lokalt under exempelvis sadeltorn. Den huvudsakliga funktionen är att de minskar väggens slankhetstal och knäcklängd, det vill säga längd utsatt för böjning. Kontreforter, eller strävpelare som de också kan kallas, kan även användas för att ta upp horisontella laster som exempelvis jordtryck. De kan muras mot befintliga murar för förstyvning, dock uppstår ofta problem med att skapa ett tillräckligt förband mellan mur och kontrefort. Förekommer glidning mellan de båda delarna måste dessa beaktas som två skilda enheter, mellan vilka enbart krafter i form av horisontalkraft och möjligtvis friktionskraft kan överföras. Om kontreforten däremot muras med förband in i muren, eller på annat vis förbinds tillräckligt för att undgå glidning, kan konstruktionen verka som en enhet vilken även kan ta upp vertikala laster. Helst ska förbindningen ske genom att bindstenar från kontreforten muras in i den befintliga väggen. Detta kan vara problematiskt att lösa eftersom bindstenarna kan bli svåra att passa in

[79] Heyman, Jacques, The Stone Skeleton, Cambridge University Press, 1995

både i den nya konstruktionen och i den gamla väggen. En mindre komplicerad metod är kramling, men den innebär en lägre styvhet än vad som kan uppnås med bindstenar[80].

Kontreforter kan konstrueras på olika sätt, exemplen som följer i figur 14 visar kontreforter utförda med förbands- respektive motmurning.



Figur 14 – Typer av konforter, förbandsmurning respektive motmurning och dess kraftverkan.

Figur 14a visar en kontrefort inmurad med förband där den totala konstruktionen verkar som en enhet. I figur 14b visas en motmurad kontrefort där mur och kontrefort verkar som två skilda enheter. Kraftverkan för en motmurad kontrefort beskrivs i figur 14c, friktionskraften mellan vägg och kontrefort betecknas med V medan H betecknar den horisontalkraft som verkar på kontreforten från muren. V och H bör dimensioneras så att excentriciteten vid kontrefortens bas inte blir stor i förhållande till grundläggningens förmåga att ta upp moment. I stället för murade kontreforter kan strävpelare av trä, stål eller betong även vara lämpliga val[81].

Vid förbandsmurning bör kontrefortens grundläggning tas i beaktande då den har betydelse för lastfördelningen. Utförs kontrefortens grundläggning på ett åtskilligt styvare sätt än den befintliga murens, kommer så småningom allt mer last vandra över från vägg till kontrefort. Detta sker efter den princip om lastvandring till styvare byggnadsdelar som beskrivs under avsnitt 3.4 Strukturmodell. Detta innebär att kontrefortens dimensioner då måste göras större än om grundläggningen skulle vara mer likartad murens. Om konstruktionsdelarna grundläggs på någorlunda liknande sätt, vilket bör eftersträvas om kontreforten ska uppta vertikala laster från muren, kan dessa beaktas mer som en samverkande enhet. Den totala konstruktionens trycklinje ska då anpassas så att excentriciteten blir obetydlig i förhållande till den totala tyngdpunkten[82].

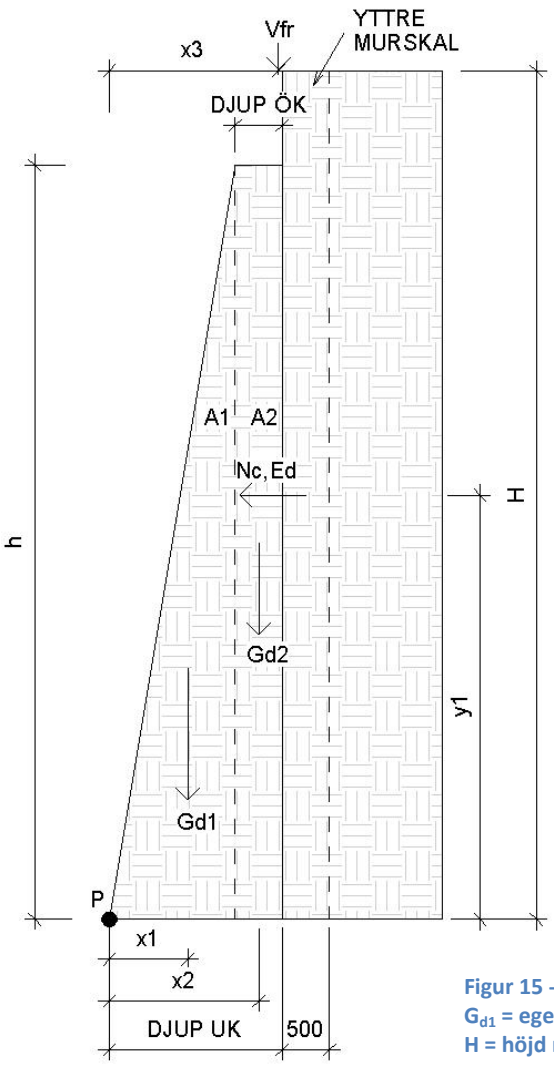
6.3.1. Förutsättningar vid utförande och beräkningar

Liksom vid beräkningarna för kramlor och dragjärn är det nödvändigt att anta ett scenario för dimensionering av kontreforter. För att kunna göra en befogad jämförelse mellan de två metoderna antas i detta fall samma scenario som för kramlor och dragjärn. Scenariot lyder alltså att det yttre murskalet lutar utåt vilket medför en horisontell belastning på kontreforten, kraftverkan illustreras i

[80] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s. 88-89, 230
[81] Ibid
[82] Ibid

figur 15. Den sättning som beaktas i scenariot för kramlor och dragjärn bortses från i detta fall. Detta på grund av att kontrefortens huvudsakliga syfte är att stödja det yttre murskalet horisontellt och därmed förhindra utbuktning och eventuellt ras. Det inre murskalet anses vara stabilt med samma motivering som för kramlor och dragjärn under avsnitt 6.2.3. Då de båda murskalen verkar som två skilda enheter kan jordtrycket anses upptas av enbart det inre stabila murskalet. Därav kan eventuell inverkan av jordtrycket i även det här fallet försummas.

Som tidigare beskrivet under avsnitt 6.3 Kontreforter, är det svårt att uppnå sådan vidhäftning mellan mur och kontrefort att de båda kan anses verka som en enhet. På grund av detta antas kontreforten vara av motmurad typ, se figur 14b-c. Motmurning innebär att friktionskrafter uppstår mellan murskalets och kontrefortens ytor. Friktionskraften bör inte antas större än 40 % av horisontalkraften som verkar mot kontreforten[83]. Med säkerhetsmarginal ansätts därmed friktionskraften i beräkningarna för detta scenario till 30 % av horisontalkraften. Friktionskraften verkar i aktuellt scenario gynnande för kontreforten.



Utifrån antagna tvärsnittsmått för kontreforten och en bestämd lutning på det yttre murskalet kan ett jämviktsvillkor med hjälp av en momentekvation kring punkten P i figur 15 ställas upp, se ekvation [6.3:1] för beskrivet jämviktsvillkor. Ekvation [6.3:1] ger efter utveckling ekvation [6.3:2]. Beräkningsgången för kontreforter är redovisade i bilagorna 3-5, vilka visar beräkningsmallar med vissa utbytbara värden samt efterföljande resultattabeller. Beteckningar beskrivs i avsnitt 11.3.

$$M_{x1} + M_{x2} = M_{y1} - M_{x3} \qquad [6.3:1]$$

$$(G_{d1} \cdot x_1) + (G_{d2} \cdot x_2) =$$

$$(N_{c,Ed} \cdot\ y_1) - (V_{fr} \cdot x_3) \qquad [6.3:2]$$

Egentyngderna G_{d1} och G_{d2} ger kontrefortens minsta tillåtna volym, det vill säga area multiplicerat med erforderlig bredd. Bredden kan således brytas ut ur ekvation [6.3:3] nedan.

$$(A_1 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g \cdot x_1)\ + (A_2 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g \cdot x_2)\ =$$

$$= (N_{c,Ed}\ \cdot\ y_1) - (V_{fr}\ \cdot\ x_3) \qquad [6.3:3]$$

Figur 15 - Kraftverkan mellan mur och motmurad kontrefort.
G_{d1} = egentyngd kontrefort med arean A1, G_{d2} = egentyngd kontrefort med arean A2, H = höjd mur, h = höjd kontrefort, $N_{c,Ed}$ = Horisontalkraft mot kontrefort, P = Momentnollpunkt, V_{fr} = Friktionskraft, x_1, x_2, x_3, y_2 = Hävarmar till krafter

[83] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s.88-89

I beräkningarna har variabelvärden enligt tabell 3 använts. Centrumavstånden mellan kontreforterna är endast antagna efter avstånd som ger ett estetiskt godtagbart intryck. Höjden h för kontreforterna begränsas till att maximalt uppnå murens höjd om nio meter, samt till att minst täcka den del av muren som väsentligt buktar utåt. Vid övriga antagande om tvärsnittets mått, såsom djup i över- och underkant kontrefort, har jämförelser gjorts med dimensioner på befintliga kontreforter längs Visby ringmur likt den i figur 16. Djupet i underkant begränsas till maximalt två meter då det är önskvärt att kontreforten estetiskt sett inte ska ge ett för grovt intryck och avvika för mycket från murytan. Av samma anledning väljs ett mindre djup i överkant vilket bidrar till en triangulär form som ger ett slankare intryck. I beräkningarna har dimensionerna 0,5 och en meter prövats som överkantsdjup.

Beteckning										
Centrumavstånd, s	10	12	14	16	18	20	22	24	26	m
Höjd kontrefort, h	6	7	8	9						m

Tabell 3 - Antagna variabelvärden för beräkning av lämpliga dimensioner för kontreforter.

Lutningen av det yttre murskalet har liksom vid dimensionering av kramlor och dragjärn ansatts till åtta grader. Denna lutning inkluderar en stor säkerhetsmarginal då lutningen i det framtagna scenariot antas vara konstant längs murens höjd. I det verkliga fallet varierar denna lutning och den största vinkeln intill raset är som nämnt uppmätt till cirka fem grader. För att undvika överdimensionering av kontreforterna har ytterligare fall prövats där lutningen reducerats till fem grader. Anledningen till att en reducerad lutning inte används vid beräkning av kramlor är att dessa har en mindre lastarea vars lutning kan vara konstant och uppnå maximal vinkel.

Figur 16 – Befintlig kontrefort längs Visby ringmur[84]

[84] Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013

7. Resultat

7.1.Kramlor och Dragjärn

Tabell 4 nedan är tagen ur beräkningar för kramlor enligt lastfall två, längden på kramlan har reducerats till 700 millimeter med hänsyn till det motstånd kärnan utövar mot kramlan. Detta resonemang förklaras under avsnitt 6.2.3. Resterande resultattabeller finns på sidorna 8-15 i Bilaga 2, Utredning kramlor och dragjärn.

Böjmomentkapacitet överskrids
Otillräcklig lastarea

Lastfall 2, L = 700 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	3,5	5,2	6,4	6,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,03	0,07	0,14	0,24	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	8,9	28,1	68,7	142,4	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,9	2,9	7,0	14,5	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	34	45	56	68	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,0	0,8	0,7	0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	78	115	143	153	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	1,7	0,9	-1,9	-7,4	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,06	0,14	0,27	0,47	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	17,8	56,3	137,4	284,9	N
	Motsvarande nedböjande vikt	1,8	5,7	14,0	29,0	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	68	90	113	135	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,5	0,2	-0,2	-0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	38	21	-42	-166	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	-0,1	-3,3	-10,1	-21,7	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,09	0,21	0,41	0,71	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	26,7	84,4	206,1	427,3	N
	Motsvarande nedböjande vikt	2,7	8,6	21,0	43,5	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	101	135	169	203	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,0	-0,5	-1,0	-1,6	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-2	-74	-226	-486	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	-1,9	-7,5	-18,4	-35,9	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,12	0,28	0,55	0,95	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	35,6	112,5	274,8	569,8	N
	Motsvarande nedböjande vikt	3,6	11,5	28,0	58,0	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	135	180	225	270	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-0,5	-1,2	-1,9	-2,6	mm
mm	Area dragjärnsbricka A_{br}	-42	-169	-411	-806	mm^2

Tabell 4 - Resultat från sida 11 i Bilaga 2, Utredning Kramlor och Dragjärn. Lastfall 2 för kramla med längd 700 millimeter.

7.2.Kontreforter

Tabell 5 nedan är tagen ur beräkningar för kontreforter enligt Bilaga 5, Utredning 3 för kontreforter. Tabellen visar resultat från beräkningar där hänsyn tagits till den friktionskraft som verkar mellan enheterna samt en reducerad lutning med vinkeln fem grader.

Resultattabell, Utredning 3

Bredd på kontrefort då djup ök = 0.5 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,6	5,0
7	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3
8	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
9	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,4

Bredd på kontrefort då djup ök = 1 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	1,7	2,1	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,1	4,5
7	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
8	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3
9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0

Tabell 5 - Resultat ur Bilaga 5, Utredning 3 för kontreforter med hänsyn till friktionskraft samt reducerad lutning. s = Centrumavstånd mellan kontreforter, h = kontreforternas höjd. Alla värden är angivna i meter.

8. Diskussion

8.1. Bindstenar

För tillämpning av bindstenar krävs nedplockning och ommurning av de murpartier där åtgärder krävs. Detta kan anses problematiskt då det är många och stora partier som utgör riskområden. Nedplockning och ommurning av så stora murpartier innebär mycket arbete, dessutom krävs omfattande uppsäkring under arbetets gång. En annan negativ aspekt är att ommurning innebär en rekonstruktion av ursprungsmurverket vilket kan anses sänka murens antikvariska värde.

Ommurning med bindstenar medför dock ett flertal fördelar. Eftersom metoden med bindstenar bristfälligt användes vid uppförandet av ringmuren som till stor del fortfarande står kvar idag, finns

anledning att tro att metoden med viss förbättring kan hålla i minst 700 år till. Förutom en bättre ordnad kärna och fler bindstenar, som beskrivs under avsnitt 6.1 Bindstenar, skulle förbättrande åtgärder exempelvis kunna vara en väl fungerande muravtäckning och dränering samt ett mer elastiskt bruk i fogar och kärna. På så vis förebyggs ytterligare fukt- och frostskador. Återanvändandet av ursprungliga material och byggnadstekniker kan även med hänsyn till det byggnadsantikvariska värdet anses positivt.

8.2. Kramlor och Dragjärn

Vidare kan nu spekuleras kring hur kramlings- eller dragjärnsmetoder kan appliceras på Visby Ringmur. En stor risk vid borrning genom murar är att murkärnan separerar från murskalen[85]. För äldre skalmurskonstruktioner är det vanligt att sådan separation sker naturligt efter några hundra år[86]. För att minimera rasrisken vid restaureringen behöver muren därmed säkras upp under arbetets gång. Säkringen kan exempelvis utföras genom uppstöttning med hjälp av träkonsoler, se figur 17, dessa bör dock dimensioneras av en konstruktör[87].

Figur 17 - Uppstöttning av mur vid Tureholms Slott[88].

Resultattabellerna i Bilaga 2, Kramlor och Dragjärn, visar att mindre diametrar på kramlor ger lägre kraftpåverkan på muren vid en eventuell sättning. Krafterna som krävs för att kramlan ska följa murens rörelser är alltså mindre än vid större diametrar. Jämförs dessa krafter med de som skulle kunna skapas av murstenarnas egentyngd vid rörelse kan dessa teoretiskt betraktas som relativt små. En kalksten med storleken 30x30x10 centimeter uppskattas väga omkring 25 kilogram vilket motsvarar en egentyngd på 245 Newton. Denna kraft kan jämföras med den kraft om cirka 18 Newton som krävs för att en kramla med diametern sex och längden 700 millimeter ska böjas ned 40 millimeter, se tabell 4 under avsnitt 7 Resultat. Dock är det föga troligt att en hel mursten kommer att belasta en enstaka kramla eftersom vertikala tryckkrafter i muren i huvudsak överförs mellan stenarna. Trots detta bör det vara praktiskt möjligt att uppnå den lilla kraft som krävs för att böja en kramla med diametern sex millimeter vid vertikala rörelser i murverket.

Betraktas interaktionen i ekvation [6.2:7] mellan dragkraft och böjmoment, framgår att en kramla med diametern sex millimeter kan böjas mycket och samtidigt belastas av en relativt stor dragkraft då murkärnans motstånd försummas eller uppgår till cirka 20 %. Detta kan styrkas med resultattabellerna på sidorna 8-11 i Bilaga 2, vilka visar att de beräknade lastareorna som belastar kramlan oftast inte understiger orimliga värden. Trots stora sättningar kan kramlor med diametern sex millimeter i många

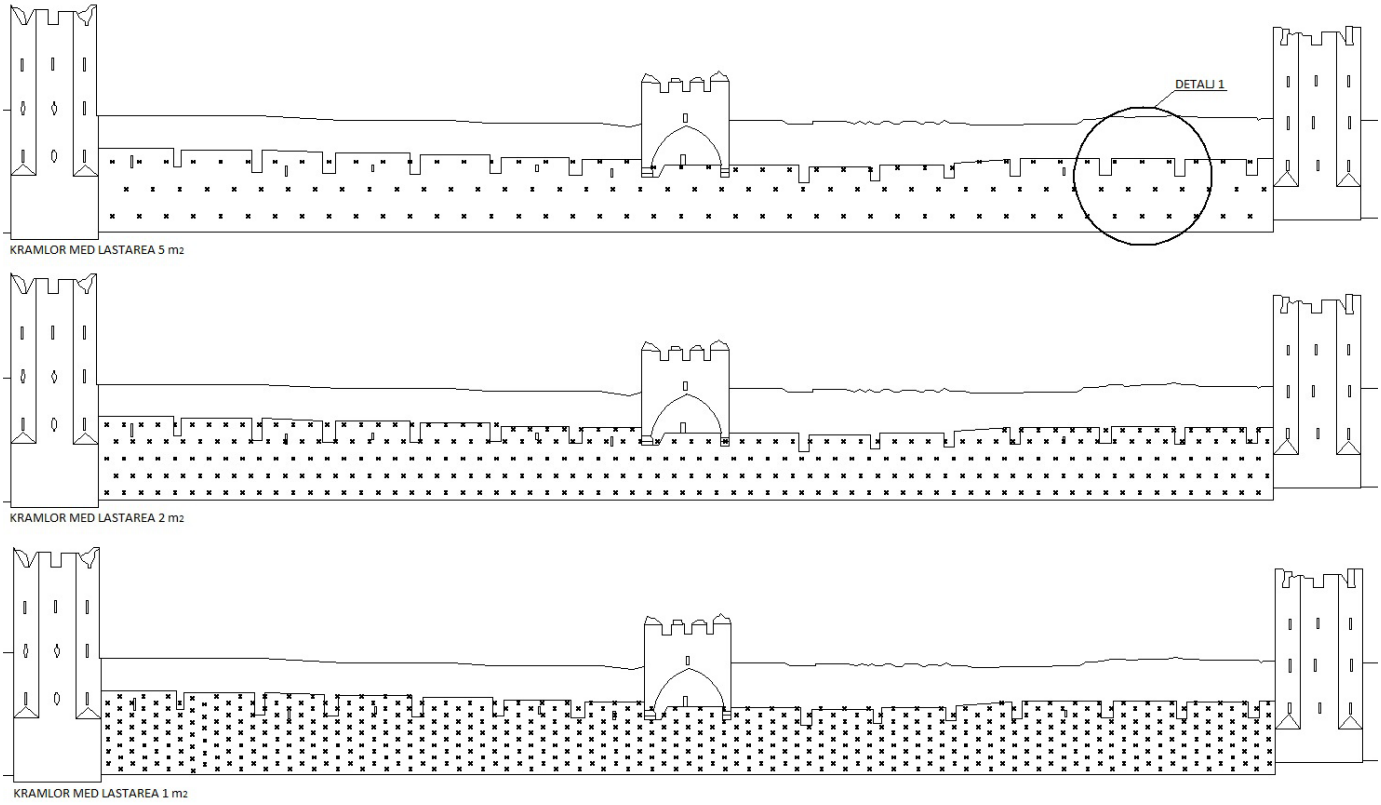
[85] Murverkskonsult, Traung, Mikael, Intervju 03.04.2013
[86] Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990, s 213
[87] Restaureringkonsult, Berggren, Krister, Intervju 16.04.2013
[88] Berggren, Krister, foto taget 2005

fall avlasta en area på över en kvadratmeter murskal eftersom interaktionen i ekvation [6.2:7] ger tillräckligt utrymme för kramlan att uppta motsvarande dragkraft.

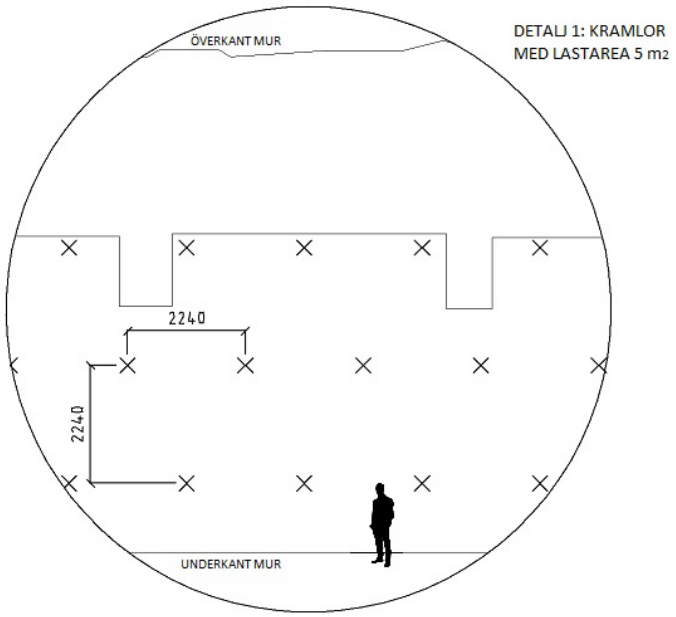
Resultattabellen under avsnitt 7 belyser att kramlans böjmomentkapacitet slutligen överskrids då sättningen blir för stor, det vill säga utnyttjandegraden gällande kramlans böjmoment blir större än 100 procent. Interaktionen i ekvation [6.2:7] visar att kramlan därefter inte har utrymme kvar till att uppta några dragkrafter. Denna övergång beror på att vid ökad dimension på kramlan ökar tröghetsmomentet vilket medför att ett större nedböjande moment krävs, detta samband visas i ekvation [6.2:2] respektive [6.2:4]. Böjmomentkapaciteten i sin tur beror av böjmotståndet W_{el}, se ekvation [6.2:6], som visserligen också ökar med diametern men inte i samma utsträckning som tröghetsmomentet. Detta leder till att det nedböjande momentet slutligen överstiger böjmomentkapaciteten. Valet av dimension på kramlan styrs följaktligen av styvheten som är produkten av tröghetsmomentet och materialets elasticitetsmodul. Ju större diameter desto högre styvhet och därav en mindre eftergivlig kramla. Detta innebär en högre risk för att murverket tar skada vid en eventuell sättning då kramlan inte formas efter rörelsen.

Föregående diskussion pekar mot att kramlor med mindre diameter är mer lämpliga som val i alla anseenden. Resultattabellerna påvisar att en kramla med diametern sex millimeter är tillämpbar med godkända värden i många av fallen. Kramlor med diametrarna 10 och 12 millimeter uppvisar en otillräcklig momentkapacitet i förhållande till det nedböjande momentet i majoriteten av resultaten. Vidare medför mindre diameter på kramlorna mindre ingångshål vid förborrning av muren, dock krävs fler hål per kvadratmeter murskal. Detta speglas i resultattabellerna i Bilaga 2, som exempel kan i tabell 4 under avsnitt 7.1 avläsas att det krävs en kramla med diameter sex och längd 700 millimeter per 3,5 kvadratmeter murskal då sättningen uppgår till 20 millimeter. Hade en kramla med diametern 12 millimeter använts vid samma sättning skulle motsvarande lastarea istället uppgå till 6,8 kvadratmeter. Dock kan det i praktiken anses nödvändigt att montera kramlorna med tätare avstånd än beräknat för att skapa en kontinuerlig sammanbindning mellan murstenarna. Därmed kan den positiva aspekten med att grövre kramlor ger färre ingångshål anses försumbar.

Figur 18 illustrerar tre olika utfall för hur kramlor skulle kunna fördelas på ringmuren. Vid första anblick ser fördelningen av kramlor tillräckligt tät ut i figurens första fall, lastarean för en kramla uppgår där till fem kvadratmeter. Om vidare reflektion görs med hänsyn till detalj 1 i figur 19 kan dock avståndet mellan kramlorna anses vara något för stort. Trots att kramlan enligt beräkningarna ofta kan belastas av den lastarea ett stort avstånd innebär, kan en tätare fördelning vara nödvändig för att kontinuerligt sammanbinda stenarna mellan murskalen. Blir avståndet mellan kramlorna för stort medför det att stora areor lämnas obundna. Därmed riskerar stenar att falla ut från konstruktionen då vidhäftningen sinsemellan dem i dagsläget inte är tillräcklig inom den beräknade lastarean. För att full funktion i detta avseende ska uppnås krävs troligtvis att kramlornas lastareor uppgår till en till två kvadratmeter. Dessa utfall illustreras i de två sista fallen i figur 18, synligt är att oerhört många håltagningar kommer att krävas vilket innebär ett stort ingripande på muren. Vidare medför tätare placerade kramlor än beräknat att de nedböjande krafter som skapas vid en eventuell sättning fördelas på fler kramlor. Därmed blir nedböjning av kramlorna svårare att uppnå eftersom den nedböjande kraften som verkar på en enskild kramla minskar.



Figur 18 - Kramlor fördelade på Visby ringmur med lastarea fem, två respektive en kvadratmeter murskal per kramla. Ovan tinnarna monteras inte kramlor eftersom skalmurskonstruktionen där övergår till fullmur.



Figur 19 - Detalj 1 ur figur 18. Kramlor med lastarea 5m^2 fördelade på Visby ringmur. Detalj med syfte att ge en bättre bild av areor och avstånd.

Förutom kontroll av drag- och böjmomentkapacitet genomförs i beräkningsgången en kontroll av kramlans längdutvidgning som följd av dragkraften. Resultaten av detta visar att kramlan högst förlängs cirka två millimeter vid stor dragkraft, det pekar mot att kramlan knappast kommer att tillåta horisontell rörelse i muren. Förutsatt att vidhäftningen mellan murverk och kramla i infästningspunkterna är tillräcklig, kan detta spekulativt innebära att kramlan sammanbinder de två murskalen väl och motverkar att dessa separerar. I praktiken är risken att vidhäftningen i infästningspunkterna inte är tillräckligt stark för att motverka att kramlan lösgörs från murbruket vid höga dragkrafter. För att undvika detta kan kramlan alternativt utformas som ett dragjärn, det vill säga med avslutande brickor på utsidan av murskalen. På så vis uppnås en betydligt säkrare vidhäftning. Minsta tillåtna area på en sådan bricka uppgår enligt beräkningarna aldrig till mer än cirka fyra kvadratcentimeter. Om dragjärn tillämpas som metod på Visby ringmur kan alltså brickorna utföras mycket små vilket ger ett relativt diskret ingrepp. Alla resultat och beräkningar av detta visas i Bilaga 2, Utredning Kramlor och Dragjärn.

Angående frågan om det motstånd murkärnan utövar på kramlan vid deformationen visar beräkningarna att detta har betydande inverkan på det nedböjande momentet och därmed den dragkraft kramlan kan belastas av. En minskad längd innebär ett ökat nedböjande moment som genom interaktionen i ekvation [6.2:7] medför att en lägre dragkraft kan belasta kramlan. Detta resultat utgör en stor riskfaktor vid tillämpning av kramlor i Visby ringmur då såväl murkärnans bredd som sammansättning i hög grad kan variera längs med muren. Att kärnans sammansättning är okänd innebär att motståndet som utövas på kramlorna inte med säkerhet kan fastställas. Om kramlans fria längd antas till 300 millimeter motsvarar det ett motstånd från kärnan om 70 %. Resultattabellerna på sidorna 14-15 i Bilaga 2 visar att om sådant stort motstånd förekommer är kramling ett ytterst olämpligt val av metod. Kramlornas utnyttjandegrad för böjmoment överskrids då i samtliga utfall. Även då den fria längden antas till 500 millimeter, motsvarande ett motstånd från kärnan om cirka 45 %, visar resultattabellerna på sidorna 12-13 i Bilaga 2 att utnyttjandegraden överskrids i majoriteten av utfallen. Därmed kan kramling anses vara ett osäkert val av restaureringsmetod.

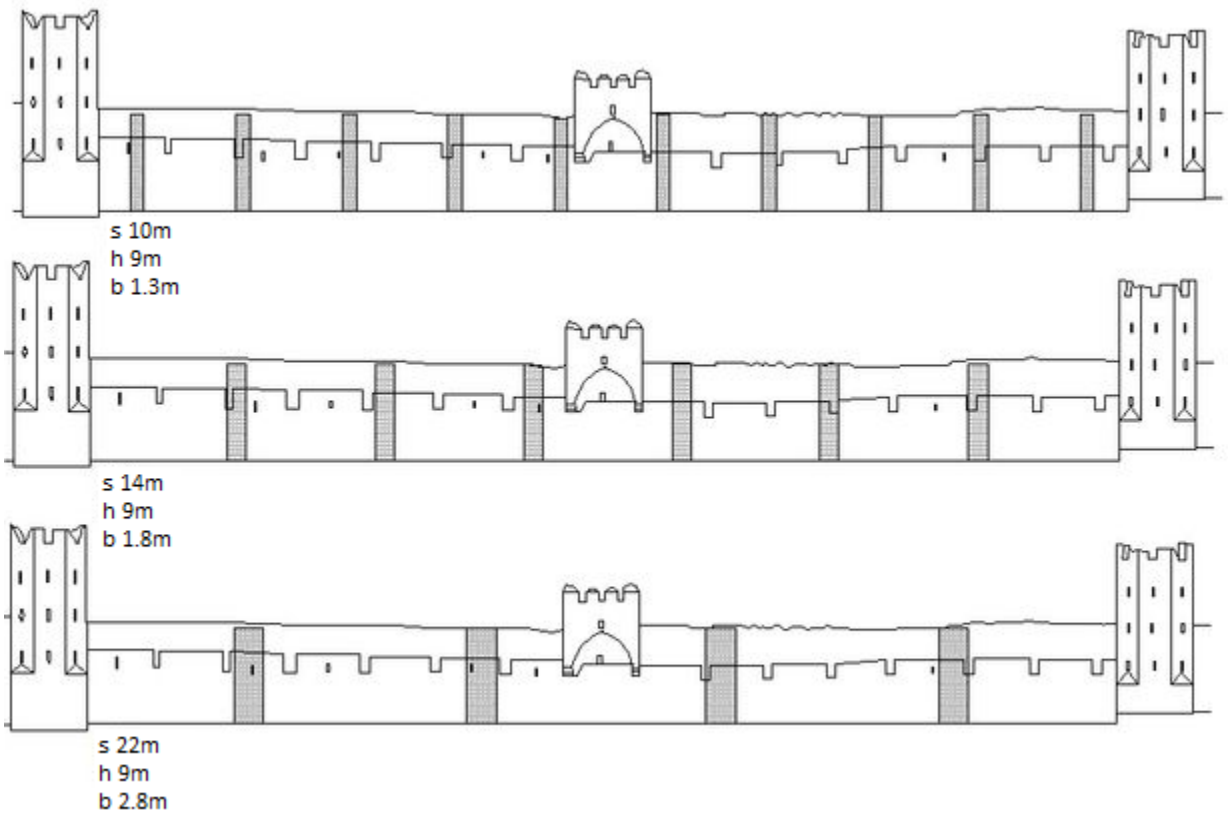
En positiv aspekt med kramlor och dragjärn är att ingreppen på ett sätt är reversibla, det vill säga att kramlorna eller dragjärnen kan avlägsnas om önskat resultat ej skulle uppnås. Det ursprungliga murverket bevaras vid ingreppen vilket ur antikvarisk synvinkel kan anses positivt. Dock efterlämnas de hål som borrats vid monteringen.

8.3.Kontreforter

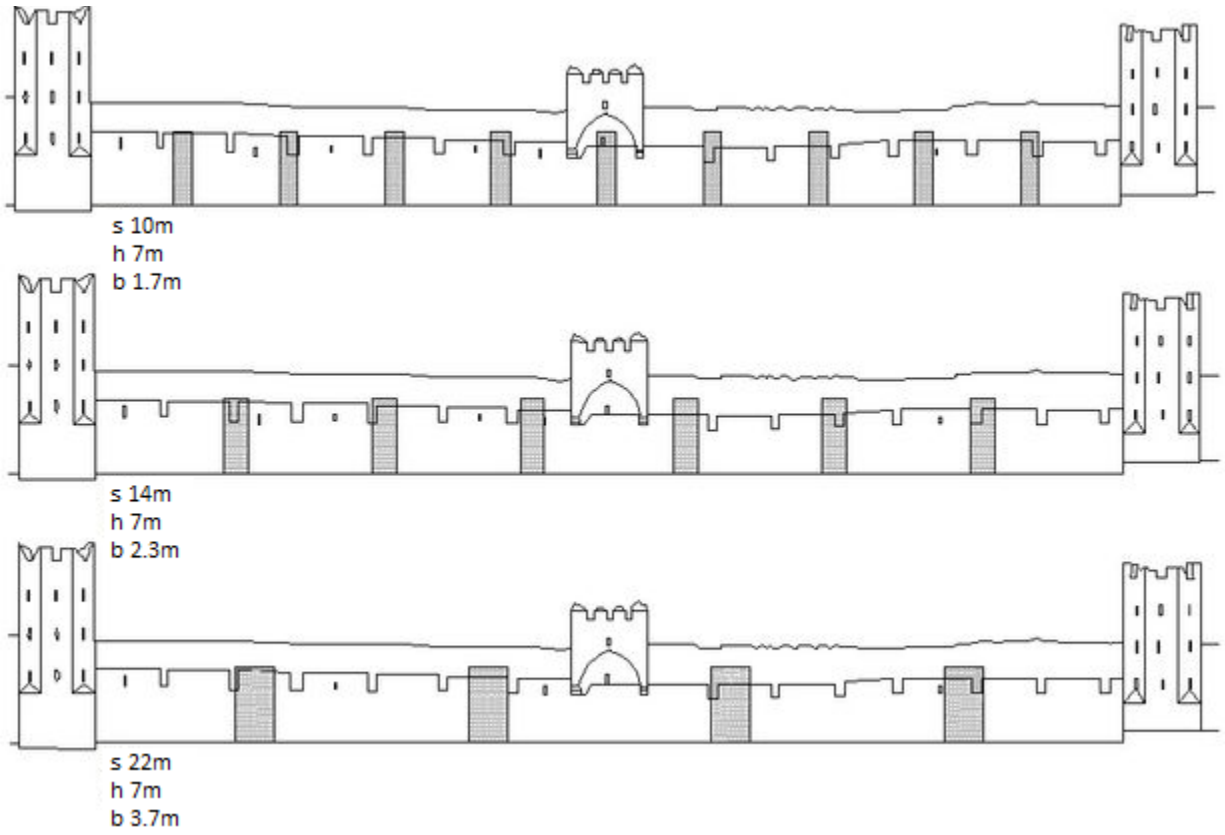
Då kontreforter kan utföras helt i kalksten möjliggörs ett byggtekniskt utförande utan inblandning av nya material. Detta kan på flera sätt anses positivt, inte minst ur en antikvarisk synvinkel då bevarandet av ursprungliga material och byggnadstekniker är av stor vikt. Dessutom är murens material och byggnadsteknik beprövad och uppvisar god beständighet. Detta styrks av att muren i fråga fortfarande står kvar drygt 700 år senare. Kontreforter kan i detta anseende jämföras med kramlor och dragjärn som långsiktigt har ett okänt verkningssätt vid tillämpning på muren. Ur en antikvarisk synvinkel finns dock även en negativ effekt av kontreforter, dessa förändrar påtagligt murens karaktäristiska utseende.

Ur resultattabellerna i Bilaga 3, Utredning 1 kan mycket stora breddimensioner avläsas, kontreforternas bredd varierar mellan cirka två till nio meter beroende på centrumavstånd och höjd. I detta

beräkningsfall har hänsyn inte tagits till friktion mellan mur och kontrefort eller verklig lutning på murskalet, det vill säga alla säkerhetsmarginaler inkluderas. De resulterande breddimensionerna kan uppfattas skrymmande då de täcker stor del av murens yta. Ur ett antikvariskt perspektiv är detta mindre lämpligt och bör helst undvikas. Vidare undersökningar visar att dessa värden kan förbättras genom att tillämpa en mer verklighetstrogen vinkel samt att inkludera en viss friktion som bör uppstå vid motmurning mellan skikten. När enbart friktion påverkar utfallet enligt resultattabellerna i Bilaga 4 varierar breddmåtten mellan cirka två till åtta meter, följaktligen sker ingen betydande förbättring i detta beräkningsfall. När lutningen dessutom reduceras till verklig vinkel, se Bilaga 5, uppnås betydligt lägre dimensioner som varierar mellan cirka en till fem meter. Tillämpas dessa dimensioner ger kontreforterna ett slankare intryck vilket inte förändrar murens ursprungliga utseende i lika hög grad som ovan nämnda beräkningsfall. Beträffande förhållandet mellan höjd och bredd på kontreforterna prioriteras av samma anledning en mindre bredd framför en lägre höjd. Figurerna 20-21 nedan är ett försök att avspegla hur de olika utfallen skulle kunna se ut i verklig miljö. Dessa figurer skapar dock ingen uppfattning om vilken effekt kontreforternas djup ger på det visuella intrycket.

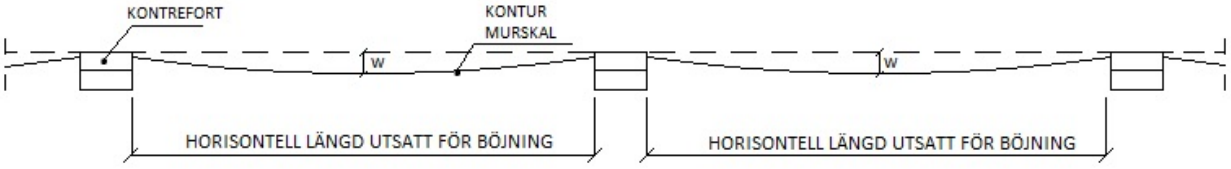


Figur 20 - Kontreforter med höjden nio meter, djup i överkant 0,5m. Olika centrumavstånd s resulterar i olika bredder b.



Figur 21 - Kontreforter med höjden sju meter, djup i överkant 0,5m. Olika centrumavstånd s resulterar i olika bredder b.

Vidare styrs kontreforternas dimensioner även av deras centrumavstånd. Det minsta centrumavståndet som ansatts i beräkningarna är tio meter vilket ger minsta möjliga breddmått. Ett litet centrumavstånd medför också en tätare fördelning av stöd längs muren och minskar därmed den horisontella längden mur som utsätts för böjning. Ju kortare horisontell längd som kan utsättas för böjning desto mindre är rimligtvis risken för ras mellan kontreforterna. Utböjningen mellan kontreforterna avbildas i figur 22.



Figur 22 - Planvy av mur som visar utböjningen längs murskalet mellan kontreforter. Utböjningen betecknas w.

Utöver murens utseende kommer kontreforterna även förändra murens lastfördelning. Till skillnad från kramlorna, vilka inte ska påverka den ursprungliga lastfördelningen, är syftet med kontreforterna att avlasta murskalet. För att detta ska ske krävs en lastvandring mellan enheterna.

I varje beräkningsfall i bilagorna 3-5 har två olika överkantsdjup om 0,5 och en meter prövats. Större kontreforter är fördelaktiga då mer massa ger högre motståndskraft, dock bidrar detta till ett mer

skrymmande intryck. I fråga om det visuella intrycket bör därmed överkantsdjupet 0,5 meter väljas framför en meter.

9. Slutsats

Syftet med detta examensarbete var att kartlägga och utreda olika byggnadstekniska metoder för att sammanbinda skalmurar såsom Visby ringmur. Studien visar att Visby ringmur är i stort behov av flera restaureringsåtgärder för att kulturarvet ska kunna leva vidare. I dagsläget är delar av konstruktionen i ett mycket dåligt skick och risken för ytterligare ras bedöms därav relativt hög. Plötsliga ras kan innebära en fara för personer som bor och vistas kring muren, förebyggande handlingar bör därför genomföras inom kort. Oavsett vilken metod som väljs vid restaureringen av Visby ringmur är det viktigt att göra en god uppsäkring för att undvika rasolyckor vid montering. Vidare vill vi påpeka att ingen hänsyn tagits till ekonomiska förutsättningar eller övriga resursbehov för de olika byggnadstekniska metoderna i vår utredning.

Av de byggnadstekniska metoder som behandlats i detta arbete framstår ommurning med bindstenar som det mest tillförlitliga alternativet. Metoden är beprövad med bevisad beständighet och kommer dessutom inte att förändra murens ursprungliga utseende. Vidare tillåter ommurning goda möjligheter att förbättra konstruktionen ytterligare genom en mer ordnad uppbyggnad av kärnan, god dränering och avtäckning samt ett för muren mer anpassat bruk. Om dessa åtgärder genomförs har muren mycket goda förutsättningar att motstå nedbrytningsmekanismer såsom fukt- och frostskador. Förhoppningsvis kommer då Visby ringmur kunna stå kvar i ytterligare hundratals år. Emellertid innebär ommurning en rekonstruktion av det ursprungliga murverket vilket kan anses sänka murens antikvariska värde.

Orsaken till att vi föredrar ommurning med bindstenar framför metoder med kramlor och dragjärn är att dessa kan anses vara riskfyllda då de inte är beprövade på äldre murverkskonstruktioner i tillräcklig omfattning. Beräkningarna visar dock att kramlor och dragjärn av små dimensioner kan vara ett fungerande alternativ då de har god förmåga att uppta dragkrafter samt kan följa murens vertikala rörelser. I fråga om styvhet kan kramlor och dragjärn alltså anses väl tillämpbara. Metoderna kan naturligtvis rekommenderas för montering på mindre murpartier för att praktiskt undersöka dess funktioner. Därmed bör ett gott underlag erhållas för vidare tillämpning på resterande delar av muren samt andra äldre murverkskonstruktioner. Kramlor är i fråga om bevarandet av murens utseende ett bra alternativ då dessa är dolda i konstruktionen. Om dragjärn tillämpas som metod på Visby ringmur kan enligt beräkningarna brickorna utföras mycket små vilket ger ett relativt diskret ingrepp trots att dragjärnen är synliga på murytan.

Gällande kontreforter anser vi att dessa är minst lämpliga för ändamålet att restaurera ringmuren. Enligt våra beräkningar krävs relativt stora och tätt placerade kontreforter för att uppnå tillräcklig funktion. Visserligen kan kontreforterna stabilisera muren och metoden är beprövad sedan tidigare men samtidigt medför kontreforterna att murens karaktäristiska utseende påtagligt förändras. Med hänsyn till murens byggnadsantikvariska värde bör sådan omfattande förändring helst undvikas.

10. Källförteckning

10.1. Elektroniska källor

Byggnadsvårdsföreningen - http://byggnadsvard.se/material/lerbruk-historiens-och-framtidens-jordn%C3%A4ra-byggmaterial

Dagens Nyheter - http://www.dn.se/nyheter/sverige/del-av-visby-ringmur-rasade

Gotlands Museum - http://www.gotlandsmuseum.se/radda-ringmuren

Murma AB - http://www.murma.se/pdf/murma_murverksskador.pdf

Nationalencyklopedin - http://www.ne.se/lang/ankare/115056

JOMA AB - http://www.joma.se/mediabank-1/byggbeslag-4/skalmurar-1.pdf

Peter Cox Ltd - http://www.petercox.com/brochures/Wall-Stabilisation.pdf

Riksantikvarieämbetet - http://www.raa.se/upplev-kulturarvet/varldsarv/hansestaden-visby/

Sveriges Stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Stenhandboken-Restaurering.pdf

Sveriges Stenindustriförbund - http://media.sten.se/2011/12/Natursten_Utemiljo.pdf

10.2. Litteratur

Balksten, Kristin och Mebus, Ulrika m.fl., Bruk av ruiner, Visby: Fornsalens förlag, 2012

Biörnstad, Margareta med författarlag, Vård och underhåll: Rädda Visby ringmur! Rapport från en kampanj 1989-1995, Riksantikvarieämbetet och Cementa AB, 1996, s. 26-27

Burström, Per Gunnar, Byggnadsmaterial, Studentlitteratur AB, Lund, 2007

Falk, Waldemar, Visby Stadsmur: En kulturhistorisk vandring, Visby: Länsmuseet Gotlands fornsal, 1999

Hammarlund, G, Skadeutredning, Visby, 1962

Hebert, Sten, Miljöfrågan inom byggsektorn - Miljö som möjlighet, S Hebert Miljökonsult AB, 2011

Heyman, Jacques, The Stone Skeleton, Cambridge University Press, 1995

Humble, Olle, med författarlag, Äldre Murverkshus, Statens råd för byggnadsforskning, 1990

Jägryd, Anders, Kompendium i Geologi, Geologiska institutionen Lunds universitet, 2012

Renström, Jörgen och Mebus, Ulrika , Rapport Murraset, Visby: Gotlands Museum, 2012

Samhällsbyggnadsförvaltningen, Region Gotland, Byggnadsordningen för Visby innerstad, laga kraft 26.03.2010

SPEF Sveriges Murnings- och Putsentreprenörföretag, Rätt Murat och Putsat, Carlshamn Tryck & Media AB, 2005

Thelin, Carl, Rapport Visby Ringmur – Raset Mur 38, Del 1, Tyréns, 2013

10.3. Muntliga referenser

Murverkskonsult, Traung, Mikael - Intervju 04.04.2013, Stockholm: m.t Restaurering sten och murverkskonsult AB

Projektledare och byggnadsantikvarie, Mebus, Ulrika - Intervju 20.03.2013, Visby: Gotlands Museum

Restaureringkonsult, Berggren, Krister, Intervju 16.04.2013, Stockholm: Krister Berggren byggkonsult AB

Tekn. Dr, Thelin, Carl - Intervju 03.04.2013, Stockholm: Tyréns huvudkontor

10.4. Övriga referenser

VD Murma AB, Svensson, Ulf, Mailväxling 15.04.2013.

11. Beteckningar

11.1. Murens egentyngd

An	Tvärsnittsarea, murdel n	[m^2]
A_{ks}	Tvärsnittsarea, kalksten	[m^2]
A_{mk}	Tvärsnittsarea, murkärna	[m^2]
A_{sa}	Tvärsnittsarea, sand	[m^2]
G_d	Dimensionerande egentyngd, mur	[kN/m]
G_k	Karakteristisk egentyngd, mur	[kN/m]
$G_{k,p}$	Karakteristisk egentyngd, murförhöjning	[kN/m]
$G_{d,p}$	Dimensionerande egentyngd, murförhöjning	[kN/m]
$G_{k,ks1}$	Karakteristisk egentyngd, kalksten utanför murkärna	[kN/m]
$G_{k,ks2}$	Karakteristisk egentyngd, kalksten i murkärna	[kN/m]
$G_{k,sa}$	Egentyngd, sand i murkärna	[kN/m]
g	Tyngdacceleration	[m/s^2]
γ_d	Säkerhetsfaktor	[-]
γ_{ks}	Tunghet, kalksten	[kN/m^3]
γ_{sa}	Tunghet, sand	[kN/m^3]
ρ_{ks}	Densitet, kalksten	[kg/m^3]

11.2. Kramlor och Dragjärn

A_{br}	Area dragjärnsbricka	[mm^2]
A_{kr}	Tvärsnittsarea, kramla	[mm^2]
A_{ms}	Lastarea: Area av murskal som belastar kramla	[m^2]
A_{proj}	Projekterad area, infästning kramla	[mm^2]
d	Diameter, kramla	[mm]
E	Elasticitetsmodul för armeringsstål	[MPa]
f_{yk}	Sträckgräns armeringsstål	[MPa]
G_d	Dimensionerande egentyngd yttre murskal, koncentrerad	[kN]
$G_{k,utb}$	Karakteristisk egentyngd yttre murskal, utbredd	[kN]
$G_{d,utb}$	Dimensionerande egentyngd yttre murskal, utbredd	[kN]
g	Tyngdacceleration	[m/s^2]
I	Tröghetsmoment kramla	[mm^4]
l	Längd mellan murskal	[mm]
l_{in}	Infästningslängd, kramla	[mm]
M_{A1}	Moment av deformation vid A, lastfall 1	[Nmm]

M_{A2}	Moment av deformation vid A, lastfall 2	[Nmm]
M_{B2}	Moment av deformation vid B, lastfall 2	[Nmm]
M_{Ed}	Moment av last	[Nmm]
$M_{el,Rd}$	Momentkapacitet (bärförmåga)	[Nmm]
$N_{t,Ed}$	Dragkraft av last	[kN]
$N_{t,Rd}$	Dragkraftskapacitet (bärförmåga)	[kN]
R_{A1}	Stödreaktion vid A, lastfall 1	[N]
R_{A2}	Stödreaktion vid A, lastfall 2	[N]
R_{B1}	Stödreaktion vid B, lastfall 1	[N]
R_{B2}	Stödreaktion vid B, lastfall 2	[N]
t	Tjocklek yttre murskal	[mm]
W_{el}	Böjmotstånd, elastiskt	[mm^3]
α	Lutningsvinkel yttre murskal	[°]
γ_d	Säkerhetsfaktor	[-]
γ_M	Partialkoefficient stål	[-]
Δl	Längdutvidgning, kramla	[mm]
δ	Antagen sättning	[mm]
ε	Töjning	[-]
ρ_{ks}	Densitet, kalksten	[kg/m^3]
σ	Normalspänning	[MPa]
$\sigma_{hål}$	Hålkanttryck	[MPa]
σ_{ks}	Tryckhållfasthet kalksten	[MPa]

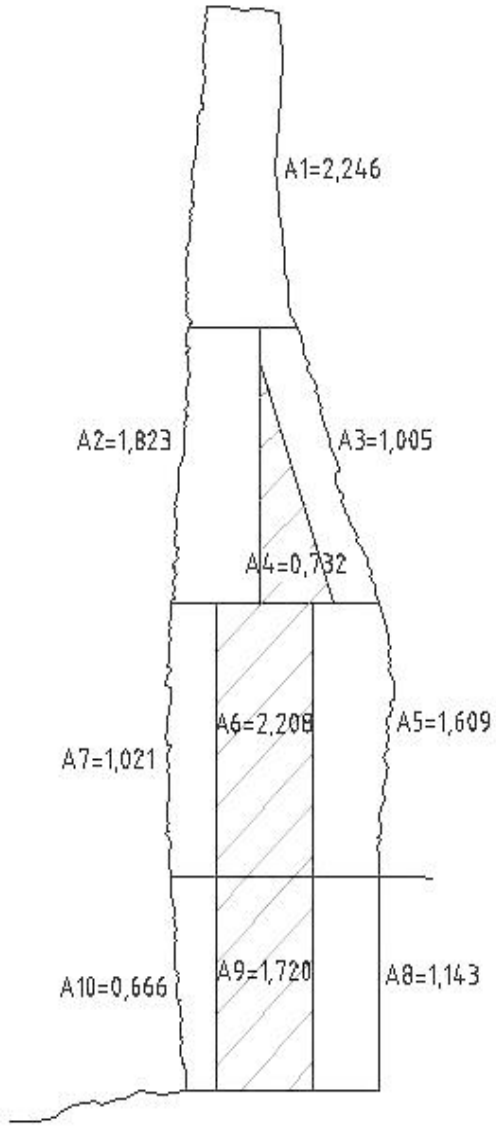
11.3. Kontreforter

A_1	Tvärsnittsarea kontrefort, triangulär del	[m^2]
A_2	Tvärsnittsarea kontrefort, rektangulär del	[m^2]
A_{ms}	Lastarea: Area av yttre murskal som belastar kontrefort	[m^2]
b	Bredd, kontrefort	[m]
d_{uk}	Djup, underkant kontrefort	[m]
$d_{ök}$	Djup, överkant kontrefort	[m]
G_d	Dimensionerande egentyngd yttre murskal, koncentrarad	[kN]
G_{d1}	Dimensionerande egentyngd kontrefort, triangulär del	[kN]
G_{d2}	Dimensionerande egentyngd kontrefort, rektangulär del	[kN]
G_{k1}	Karakteristisk egentyngd kontrefort, triangulär del	[kN]
G_{k2}	Karakteristisk egentyngd kontrefort, rektangulär del	[kN]

$G_{d,utb}$	Dimensionerande egentyngd yttre murskal, utbredd	[kN]
g	Tyngdacceleration	[m/s^2]
H	Höjd, mur	[m]
h	Höjd, kontrefort	[m]
M_{y1}	Moment av $N_{c,Ed}$	[kNm]
M_{x1}	Moment av G_1	[kNm]
M_{x2}	Moment av G_2	[kNm]
M_{x3}	Moment av V_{fr}	[kNm]
$N_{c,Ed}$	Tryckkraft av last	[kN]
s	Centrumavstånd, kontreforter	[m]
V_{fr}	Friktionskraft	[kN]
x_1	Hävarm G_1	[m]
x_2	Hävarm G_2	[m]
x_3	Hävarm V_{fr}	[m]
y_1	Hävarm $N_{c,Ed}$	[m]
α	Lutningsvinkel yttre murskal	[°]
ρ_{ks}	Densitet, kalksten	[kg/m^3]

Bilaga 1 - Beräkning av egentyngd för Visby ringmur

1. Total egentyngd



Egentyngden är grovt uppskattad då andelen murbruk i förhållande till kalksten i kärnan är okänd.
I beräkningarna uppskattas kärnan bestå av 80 % kalksten och 20 % murbruk. Mubruket består av lerbruk innehållande lera, sand och vatten. Därmed har brukets tunghet approximerats till tungheten för sand.

Figuren visar en grov areaindelning av muren, se även figur 4 avsitt 3.3. Lastmodell i rapporten.

1.1. Tunghet

Densitet kalksten	ρ_{ks}	2750	kg/m^3	(Enligt EN-standard, ρ_{ks} = 2620 - 2875 kg/m^3)
Tyngdacceleration	g	9,82	m/s^2	
Tunghet kalksten ($\rho_{ks} \cdot g$)	γ_{ks}	27	kN/m^3	
Tunghet Sand	γ_{sa}	18	kN/m3	(Enligt Statens Geotekniska Institut)

1.2. Areaindelning

Area för tvärsnitt som uppskattas bestå av endast kalksten:

ΣA_{ks} = A1 + A2 + A3 + A5 + A7 + A8 + A10 9,5 m^2

Area för tvärsnitt som motsvarar murkärnan bestående av sand och kalksten:

Total area murkärna: ΣA_{mk} = A4 + A6 + A9 4,7 m^2

80 % av murkärnans area: $\Sigma A0.8_{mk}$ 3,7 m^2

20 % av murkärnans area: $\Sigma A_{0.2mk}$ 0,9 m^2

1.3. Karakteristisk egentyngd

Egentyngd kalksten

$G_{k,ks1} = \Sigma A_{ks} \cdot \gamma_{ks}$ 257 kN/m

Egentyngd kalksten i murkärna

$G_{k,ks2} = \Sigma A_{0.80mk} \cdot \gamma_{ks}$ 101 kN/m

Egentyngd sand i murkärna

$G_{k,sa} = \Sigma A_{0.2mk} \cdot \gamma_{sa}$ 17 kN/m

Total egentyngd murverk ΣG_k 374 kN/m

1.4. Dimensionerande egentyngd enligt EKS

Säkerhetsklass 2: Någon risk för allvarliga personskador, γd = 0,91

Ekvation 6.10.a. är den mest ogynsamma lastkombinationen när endast egentyngd beaktas:

$\Sigma G_d = \gamma_d \cdot 1{,}35 \cdot \Sigma G_k$ **460** kN/m

2. Egentyngd av murförhöjning som belastar murskalen

En annan intressant last är murförhöjningens egentyngd från och med skyttegången. Murförhöjningen vilar enbart på murskalen eftersom murkärnan inte har någon bärande förmåga. Dock är det ovisst hur mycket av denna last som fördelas till det yttre respektive det inre murskalet.

2.1. Areaindelning

Area för tvärsnitt som uppskattas bestå av endast kalksten:

$\Sigma A_{ks} = A1 + A2 + A3$ 5,1 m^2

Area för tvärsnitt som motsvarar murkärnan bestående av sand och kalksten:

Total area murkärna: $A_{mk} = A4$ 0,7 m^2

80 % av murkärnans area: $A4_{0.8}$ 0,6 m^2

20 % av murkärnans area: $A4_{0.2}$ 0,1 m^2

2.2. Karakteristisk egentyngd

Egentyngd kalksten

$G_{k,ks1} = \Sigma A_{ks} \cdot \gamma_{ks}$ 137 kN/m

Egentyngd kalksten i murkärna

$G_{k,ks2} = \Sigma A_{0.80mk} \cdot \gamma_{ks}$ 16 kN/m

Egentyngd sand i murkärna

$G_{k,sa} = \Sigma A_{0.2mk} \cdot \gamma_{sa}$ 3 kN/m

Egentyngd påmurning $\Sigma G_{k,p}$ 155 kN/m

2.3. Dimensionerande egentyngd enligt EKS

Säkerhetsklass 2: Någon risk för allvarliga personskador, γd = 0,91

Ekvation 6.10.a. är den mest ogynsamma lastkombinationen när endast egentyngd beaktas:

$\Sigma G_{d,p} = \gamma_d \cdot 1{,}35 \cdot \Sigma G_{k,p}$ **191** kN/m

Bilaga 2 - Utredning av lämplighet för kramlor och dragjärn i Visby Ringmur

Beräkningarna baseras på att
kramlan består av kamstål med sträckgräns 500 Mpa,
vilken i dagsläget är en vanlig stålkvalitet för
armeringsjärn på marknaden. För att kunna utföra
beräkningarna testas en lämplig stångdiameter
samt en ansatt sättning.
Lutningen på murverket ansätts i sitt värsta
läge till 8°.
Beräkningarna grundas på Eurokodstandard, EKS.

Figurförklaring

Figuren till höger illustrerear kraftverkan mellan kramla (eller dragjärn) och det yttre lutande murskalet. Bilden återfinns även i rapporten, se figur 13 i avsnitt 6.2.3 Kramlor och Dragjärn Förutsättningar för utförande och beräkningar.

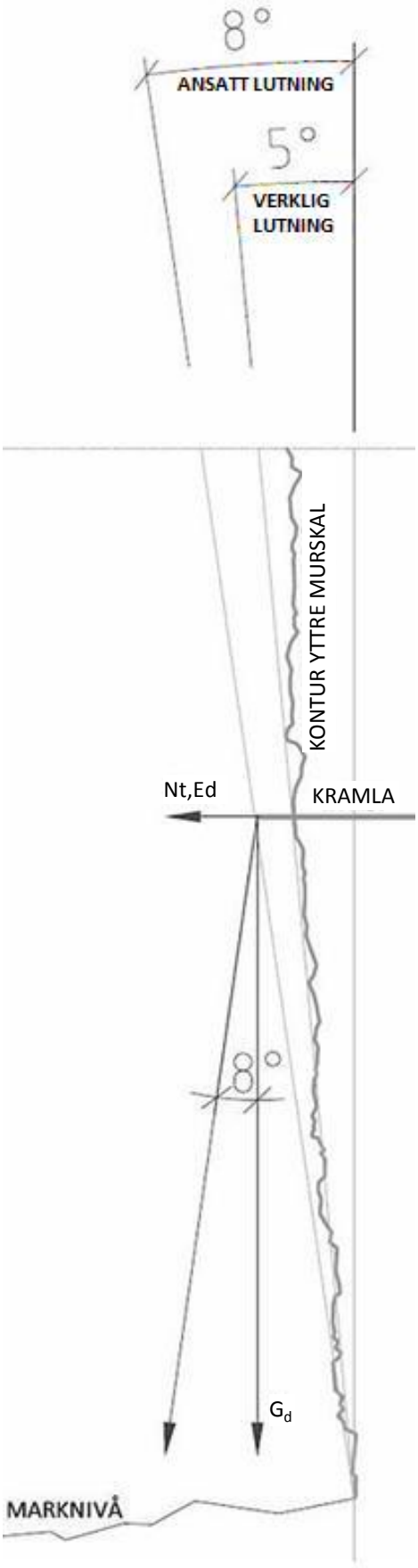
$N_{t,Ed}$ = Dragkraft av murskal som belastar kramlan.
G_d = Murskalets egentyngd

Färgförklaring:

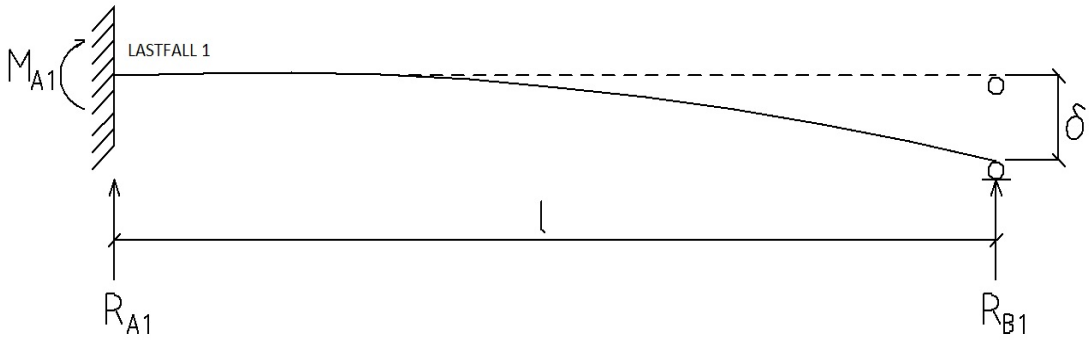
Variabla Inmatningsvärden

Beräknade resultat

Antaganden



Lastfall 1 - Fast inspänd i punkt A och fritt upplagd i punkt B



Figuren ovan illustrerar lastfall 1: Kramlan är fast inspänd i punkt A och fritt upplagd i punkt B.

l = Längd mellan murskal

M_{A1} = Moment av deformation

R_{A1} = Stödreaktion vid punkt A

R_{B1} = Stödreaktion vid punkt B

δ = Antagen sättning

Indata

Diameter på kramla	d	6	mm
Tvärsnittsarea	A_{kr}	28	mm^2
Antagen sättning	δ	20	mm
Elasticitetsmodul	E	200	Gpa
Sträckgräns	f_{yk}	500	Mpa
Partialkoefficient kamstål	γ_M	1,15	-
Avstånd, infästningspunkter	l	900	mm
Densitet kalksten	ρ_{sk}	2750	kg/m^3
Tyngdaccelaration	g	9,82	m/s^2
Största tjocklek, yttre murskal	t	500	mm
Lutning yttre murskal	α	8	°

Tröghetsmoment	I	$\pi \cdot d^4/64$	64	mm^4
Böjmotstånd, elastiskt	W_{el}	$\pi \cdot d^3/32$	21	mm^3

Dimensionerande egentyngd enligt EKS

Karakteristisk utbredd egentyngd, yttre murskal

$G_{k,utb} = \rho_{sk} \cdot g \cdot t$ 13,5 kN/m^2

Säkerhetsklass 2: Någon risk för allvarliga personskador, γd = 0,91

Ekvation 6.10.a. är den mest ogynsamma lastkombinationen när endast egentyngd beaktas:

$G_{d,utb} = \gamma_d \cdot 1{,}35 \cdot G_{k,utb}$ 16,6 kN/m^2

Deformationsfall - Lastfall 1

Moment till följd av deformation

$M_{A1} = -3 \cdot E \cdot I \cdot \delta / l^2$ | 0,9 | Nmm

Stödreaktion till följd av deformation

$R_{A1} = -R_{B1} = 3 \cdot E \cdot I \cdot \delta / l^3$ | 1,0 | N

Motsvarande vikt | 0,1 | kg

Böjmomentkapacitet

$M_{b,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_{yk} / \gamma_M$ | 9,2 | Nmm

Utnyttjandegrad Böjmomentkapacitet | 10 | %

Dragkraftskapacitet

$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = A_{kr} \cdot f_y / \gamma_M$ | 12,3 | kN

Interaktion böjmoment och dragkraft

$(N_{t,Ed} / N_{t,Rd}) + (M_{Ed} / M_{el,Rd}) \leq 1$ M_{Ed} sätts till M_{A1}

$N_{t,Ed} \leq (1 - (M_{Ed} / M_{el,Rd})) \cdot N_{t,Rd}$ | 11,0 | kN

En kramla kan maximalt belastas med dragkraften $N_{t,Ed}$ vid antagen sättning och dimension enligt ovan.

Beräkning av lastarea per kramla

Den lastarea som beräknas är den lutande väggarea som en kramla maximalt kan bära gällande dragkraft.

Dimensionerande utbredd egentyngd, yttre murskal, $G_{d,utb}$ 16,6 kN/m^2

Tyngd av lastarea per kramla $G_d = A_{ms} \cdot G_{d,utb} = N_{t,Ed} / \tan\alpha$ 78,5 kN

Väggarea per kramla $A_{ms} = G_d / G_{d,utb}$ | 4,7 | m^2

Tyngden G_d överförs via kalkstenarna vidare till grunden och ska inte bäras av kramlan. Kramlan ska endast ta upp dragkraften som bildas på grund av snedställningen.

Kontroll, längdutvidgning av kramla till följd av dragkraft

Normalspänning mot yta utsatt för dragkraft $\sigma = N_{t,Ed}/A_{kr}$

Töjning till följd av normalspänning $\varepsilon = \Delta l / l$

Hookes lag (spänningen är proportionell mot töjningen) $\sigma = \varepsilon \cdot E$

Längdutvidgning

$\Delta l = N_{t,Ed} \cdot l / (E \cdot A_{kr})$ | 1,8

Kontroll hålkanttryck

Infästningslängd, l_{in} 50 mm

Hålkanttryck, $\sigma_{hål} = R_{B1}/A_{proj} = R_{B1}/(d \cdot l_{in})$	0,00	Mpa
Tryckhållfasthet kalksten	104 - 208	Mpa
Tryckhållfasthet kalkbruk	≈ 1	Mpa

Detta tyder på att murverket med god marginal bör hålla för hålkanttrycket vid infästning av kramla.

Kontroll av tryckhållfasthet mellan bricka och murskal om kramlan byts mot ett dragjärn

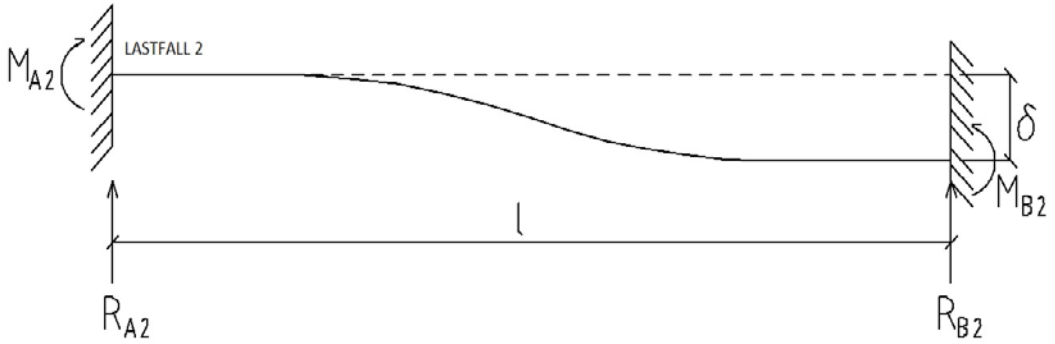
$\sigma_{ks} = N_{t,Ed}/A_{br}$

$A_{br} = N_{t,Ed}/\sigma_{ks}$ 106 mm^2

Tryckhållfasthet kalksten, σ_{ks}	104 - 208	Mpa
Minsta tryckhållfasthet kalksten	104	Mpa

Resultatet visar att brickans area har mycket låga krav på storlek

Lastfall 2 - Fast inspänd i båda ändar



Figuren ovan illustrerar lastfall 2: Kramlan är fast inspänd i både punkt A och B punkt B.

l = Längd mellan murskal

M_{A2} = Moment av deformation

M_{B2} = Moment av deformation

R_{B2} = Stödreaktion vid punkt A

R_{B2}= Stödreaktion vid punkt B

δ = Antagen sättning

Indata

Diameter på kramla	d	6	mm
Tvärsnittsarea	A_{kr}	28	mm^2
Antagen sättning	δ	20	mm
Elasticitetsmodul	E	200	Gpa
Sträckgräns	f_{yk}	500	Mpa
Partialkoefficient kamstål	γ_M	1,15	-
Avstånd, infästningspunkter	*l*	900	mm
Densitet kalksten	ρ_{sk}	2750	kg/m^3
Tyngdaccelaration	g	9,82	m/s^2
Största tjocklek, yttre murskal	t	500	mm
Lutning yttre murskal	α	8	°

Tröghetsmoment	I	$\pi \cdot d^4/64$	64	mm^4
Böjmotstånd, plastiskt	W_{el}	$\pi \cdot d^3/32$	21	mm^3

Dimensionerande egentyngd enligt EKS

Karakteristisk utbredd egentyngd, yttre murskal

$G_{k,utb} = \rho_{sk} \cdot g \cdot t$ 13,5 kN/m^2

Säkerhetsklass 2: Någon risk för allvarliga personskador, γd = 0,91

Ekvation 6.10.a. är den mest ogynsamma lastkombinationen när endast egentyngd beaktas:

$G_{d,utb} = \gamma_d \cdot 1{,}35 \cdot G_{k,utb}$ 16,6 kN/m^2

Deformationsfall - Lastfall 2

Moment till följd av deformation

$M_{B2} = -M_{A2} = 6 \cdot E \cdot I \cdot \delta / l^2$ | 1,9 | Nmm

Stödreaktion till följd av deformation (nedböjande kraft)

$R_{A2} = -R_{B2} = 12 \cdot E \cdot I \cdot \delta / l^3$ | 4,2 | N

Motsvarande nedböjande vikt | 0,4 | kg

Momentkapacitet

$M_{b,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_{yk} / \gamma_M$ | 9,2 | Nmm

Utnyttjandegrad Böjmomentkapacitet | 20 | %

Dragkraftskapacitet

$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = A_{kr} \cdot f_y / \gamma_M$ | 12,3 | kN

Interaktion böjmoment och dragkraft

$(N_{t,Ed} / N_{t,Rd}) + (M_{Ed} / M_{el,Rd}) \leq 1$ M_{Ed} sätts till M_{B2}

$N_{t,Ed} \leq (1 - (M_{Ed} / M_{el,Rd})) \cdot N_{t,Rd}$ | 9,8 | kN

En kramla kan maximalt belastas med dragkraften $N_{t,Ed}$ vid antagen sättning och dimension ovan.

Beräkning av lastarea (lutande väggarea) per kramla

Den lastarea som beräknas är den lutande väggarea som en kramla maximalt kan bära gällande dragkraft.

Dimensionerande utbredd egentyngd, yttre murskal, $G_{d,utb}$ 16,6 kN/m^2

Tyngd av lastarea per kramla $G_d = A_{ms} \cdot G_{d,utb} = N_{t,Ed} / \tan\alpha$ 69,6 kN

Lastarea per kramla $A_{ms} = G_d / G_{d,utb}$ | 4,2 | m^2

Tyngden G_d överförs via kalkstenarna vidare till grunden och ska inte bäras av kramlan. Kramlan ska endast ta upp dragkraften som bildas på grund av snedställningen.

Kontroll, längdutvidgning av kramla till följd av dragkraft

Normalspänning mot yta utsatt för dragkraft $\sigma = N_{t,Ed}/A_{kr}$

Töjning till följd av normalspänning $\varepsilon = \Delta l / l$

Hookes lag (spänningen är proportionell mot töjningen) $\sigma = \varepsilon \cdot E$

Längdutvidgning

$\Delta l = N_{t,Ed} \cdot l / (E \cdot A_{kr})$ | 1,6

Kontroll hålkanttryck

Infästningslängd, l_{in} 50 mm

Hålkanttryck, $\sigma_{hål} = R_{B2} / A_{proj} = R_{B2} /(d \cdot l_{in})$ 0,01 Mpa

Tryckhållfasthet kalksten 104 - 208 Mpa

Tryckhållfasthet kalkbruk ≈ 1 Mpa

Detta tyder på att murverket med god marginal bör hålla för hålkanttrycket vid infästning av kramla.

Kontroll av tryckhållfasthet mellan bricka och murskal om kramlan byts mot ett dragjärn

$\sigma_{ks} = N_{t,Ed}/A_{br}$

$A_{br} = N_{t,Ed}/\sigma_{ks}$ 94 mm^2

Tryckhållfasthet kalksten, σ_{ks} 104 - 208 Mpa

Minsta tryckhållfasthet kalksten 104 Mpa

Resultatet visar att brickans area har mycket låga krav på storlek

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 1, L = 900 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	4,7	8,1	12,2	16,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,00	0,01	0,02	0,03	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	1,0	3,3	8,1	16,8	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,1	0,3	0,8	1,7	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	10	14	17	20	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,8	1,7	1,6	1,6	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	106	181	272	376	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	4,2	6,8	9,7	12,5	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,01	0,02	0,03	0,06	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	2,1	6,6	16,2	33,5	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,2	0,7	1,6	3,4	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	20	27	34	41	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,6	1,4	1,3	1,2	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	94	153	216	279	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	3,7	5,5	7,2	8,2	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,01	0,02	0,05	0,08	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	3,1	9,9	24,2	50,3	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,3	1,0	2,5	5,1	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	31	41	51	61	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,4	1,2	1,0	0,8	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	82	124	161	183	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	3,1	4,3	4,7	3,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,01	0,03	0,06	0,11	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	4,2	13,2	32,3	67,0	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,4	1,3	3,3	6,8	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	41	55	68	82	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,2	0,9	0,6	0,4	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	70	96	105	86	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 2, L = 900 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	4,2	6,8	9,7	12,5	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,01	0,03	0,06	0,11	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	4,2	13,2	32,3	67,0	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,4	1,3	3,3	6,8	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	20	27	34	41	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,6	1,4	1,3	1,2	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	94	153	216	279	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	3,1	4,3	4,7	3,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,03	0,07	0,13	0,22	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	8,4	26,5	64,6	134,0	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,9	2,7	6,6	13,6	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	41	55	68	82	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,2	0,9	0,6	0,4	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	70	96	105	86	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	2,0	1,7	-0,3	-4,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,04	0,10	0,19	0,34	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	12,6	39,7	97,0	201,1	N
	Motsvarande nedböjande vikt	1,3	4,0	9,9	20,5	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	61	82	102	123	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,8	0,4	0,0	-0,4	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	46	38	-7	-107	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	1,0	-0,8	-5,3	-13,4	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,06	0,13	0,26	0,45	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	16,8	53,0	129,3	268,1	N
	Motsvarande nedböjande vikt	1,7	5,4	13,2	27,3	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	82	109	136	164	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,4	-0,2	-0,7	-1,2	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	22	-19	-119	-301	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 1, L = 700 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	4,4	7,3	10,5	14,0	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,01	0,02	0,03	0,06	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	2,2	7,0	17,2	35,6	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,2	0,7	1,7	3,6	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	17	23	28	34	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,3	1,2	1,1	1,0	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	98	163	236	313	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	3,50	5,20	6,40	6,80	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,01	0,04	0,07	0,12	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	4,5	14,1	34,3	71,2	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,5	1,4	3,5	7,3	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	34	45	56	68	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,0	0,8	0,7	0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	78	115	143	153	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	2,6	3,0	2,3	-0,3	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,02	0,05	0,10	0,18	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	6,7	21,1	51,5	106,8	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,7	2,1	5,2	10,9	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	51	68	84	101	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,8	0,5	0,2	0,0	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	58	68	51	-7	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	1,7	0,9	-1,9	-7,4	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,03	0,07	0,14	0,24	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	8,9	28,1	68,7	142,4	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,9	2,9	7,0	14,5	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	68	90	113	135	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,5	0,2	-0,2	-0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	38	21	42	-166	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 2, L = 700 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	3,5	5,2	6,4	6,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,03	0,07	0,14	0,24	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	8,9	28,1	68,7	142,4	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,9	2,9	7,0	14,5	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	34	45	56	68	%
	Längdutvidgning kramla Δl	1,0	0,8	0,7	0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	78	115	143	153	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	1,7	0,9	-1,9	-7,4	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,06	0,14	0,27	0,47	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	17,8	56,3	137,4	284,9	N
	Motsvarande nedböjande vikt	1,8	5,7	14,0	29,0	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	68	90	113	135	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,5	0,2	-0,2	-0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	38	21	-42	-166	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	-0,1	-3,3	-10,1	-21,7	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,09	0,21	0,41	0,71	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	26,7	84,4	206,1	427,3	N
	Motsvarande nedböjande vikt	2,7	8,6	21,0	43,5	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	101	135	169	203	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,0	-0,5	-1,0	-1,6	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-2	-74	-226	-486	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	-1,9	-7,5	-18,4	-35,9	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,12	0,28	0,55	0,95	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	35,6	112,5	274,8	569,8	N
	Motsvarande nedböjande vikt	3,6	11,5	28,0	58,0	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	135	180	225	270	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-0,5	-1,2	-1,9	-2,6	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-42	-169	-411	-806	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 1, L = 500 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	3,5	5,2	6,6	7,1	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,02	0,05	0,09	0,16	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	6,1	19,3	47,1	97,7	N
	Motsvarande nedböjande vikt	0,6	2,0	4,8	10,0	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	33	44	55	66	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,7	0,6	0,5	0,4	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	79	117	147	160	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	1,8	1,1	-1,5	-6,9	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,04	0,10	0,19	0,33	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	12,2	38,6	94,2	195,4	N
	Motsvarande nedböjande vikt	1,2	3,9	9,6	19,9	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	66	88	110	132	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,4	0,1	-0,1	-0,4	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	40	25	-34	-154	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	0,0	-3,0	-9,6	-20,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,06	0,14	0,28	0,49	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	18,3	57,9	141,4	293,1	N
	Motsvarande nedböjande vikt	1,9	5,9	14,4	29,9	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	99	132	166	199	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,0	-0,4	-0,7	-1,1	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	1	-68	-215	-467	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	-1,7	-7,2	-17,7	-34,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,08	0,19	0,38	0,65	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	24,4	77,2	188,5	390,9	N
	Motsvarande nedböjande vikt	2,5	7,9	19,2	39,8	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	132	177	221	265	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-0,4	-0,8	-1,3	-1,8	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-38	-161	-397	-780	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 2, L = 500 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	1,8	1,1	-1,5	-6,9	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,08	0,19	0,38	0,65	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	24,4	77,2	188,5	390,9	N
	Motsvarande nedböjande vikt	2,5	7,9	19,2	39,8	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	66	88	110	132	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,4	0,1	-0,1	-0,4	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	40	25	-34	-154	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	-1,7	-7,2	-17,7	-34,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,16	0,39	0,75	1,3	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	48,9	152,4	377,0	781,7	N
	Motsvarande nedböjande vikt	5,0	15,7	38,4	79,6	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	132	177	221	265	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-0,4	-0,8	-1,3	-1,8	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-38	-161	-397	-780	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	-5,2	-15,5	-33,9	-62,7	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,24	0,58	1,13	1,95	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	73,3	231,6	565,5	1172,6	N
	Motsvarande nedböjande vikt	7,5	23,6	57,6	119,4	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	199	235	331	397	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-1,1	-1,8	-2,5	-3,2	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-117	-347	-759	-1406	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	-8,7	-23,7	-50,0	-90,7	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,33	0,77	1,51	2,61	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	97,7	308,8	754,0	1563,5	N
	Motsvarande nedböjande vikt	10,0	31,4	76,8	159,2	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	265	353	442	530	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-1,8	-2,8	-3,7	-4,7	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-195	-532	-1122	-2033	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

Otillräcklig lastarea

Lastfall 1, L = 300 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	0,4	-2,1	-7,8	-17,7	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,09	0,22	0,44	0,75	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	28,3	89,4	218,2	452,4	N
	Motsvarande nedböjande vikt	2,9	9,1	22,2	46,1	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	92	123	153	184	%
	Längdutvidgning kramla Δl	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	9	-48	-175	-397	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	-4,4	-13,6	-30,3	-56,5	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,19	0,45	0,87	1,51	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	56,5	178,7	436,3	904,8	N
	Motsvarande nedböjande vikt	5,8	18,2	44,4	92,1	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	184	245	307	368	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-0,5	-0,9	-1,3	-1,7	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-99	-305	-679	-1267	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	-9,3	-25,1	-52,7	-95,3	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,28	0,67	1,31	2,26	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	84,8	268,1	654,5	1357,2	N
	Motsvarande nedböjande vikt	8,6	27,3	66,7	138,2	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	276	368	460	552	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-1,1	-1,7	-2,3	-2,9	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-208	-563	-1182	-2137	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	-14,1	-36,6	-75,2	-134,1	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,38	0,89	1,75	3,02	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	113,1	357,4	872,7	1809,6	N
	Motsvarande nedböjande vikt	11,5	36,4	88,9	184,3	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	368	491	613	736	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-1,7	-2,5	-3,3	-4,1	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-317	-821	-1685	-3007	mm^2
mm						

Böjmomentkapacitet överskrids

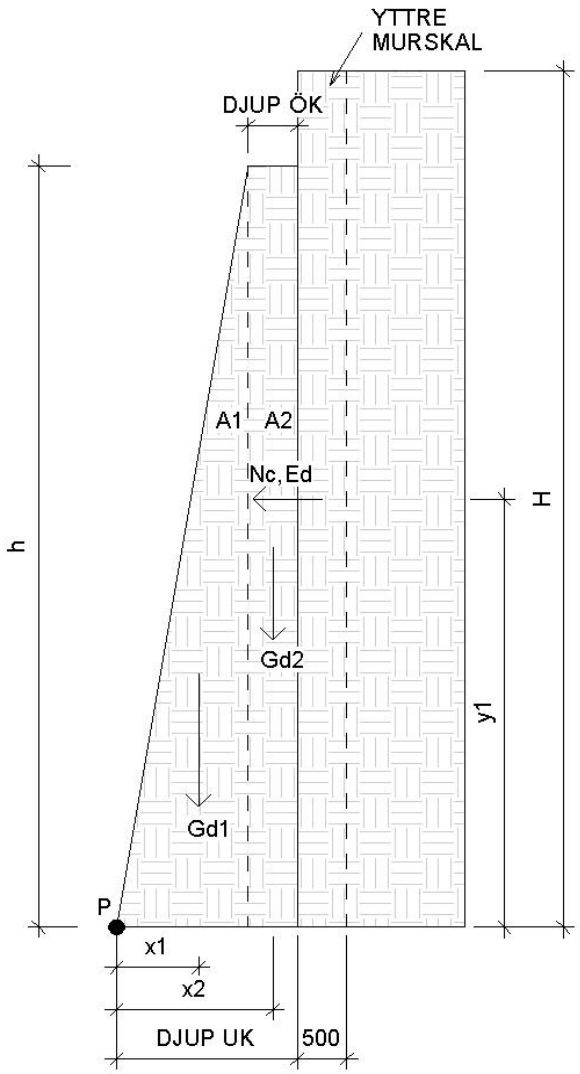
Otillräcklig lastarea

Lastfall 2, L = 300 mm						
δ	d	6	8	10	12	mm
20	Lastarea, A_{ms}	-4,4	-13,6	-30,3	-56,5	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,38	0,89	1,75	3,02	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	113,1	357,4	872,7	1809,6	N
	Motsvarande nedböjande vikt	11,5	36,4	88,9	184,3	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	184	245	307	368	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-0,5	-0,9	-1,3	-1,7	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-99	-305	-679	-1267	mm^2
40	Lastarea, A_{ms}	-14,1	-36,6	-75,2	-134,1	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	0,75	1,79	3,49	6,03	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	226,2	714,9	1745,3	3619,1	N
	Motsvarande nedböjande vikt	23,0	72,8	177,7	368,6	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	368	491	613	736	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-1,7	-2,5	-3,3	-4,1	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-317	-821	-1685	-3007	mm^2
60	Lastarea, A_{ms}	-23,8	-59,6	-120,1	-211,8	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	1,13	2,68	5,24	9,05	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	339,3	1072,3	2618,0	5428,7	N
	Motsvarande nedböjande vikt	34,6	109,2	266,6	552,8	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	552	736	920	1104	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-2,9	-4,1	-5,3	-6,5	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-534	-1336	-2692	-4747	mm^2
80	Lastarea, A_{ms}	-33,5	-82,6	-165,0	-289,4	m^2
	Hålkanttryck $\sigma_{Hål}$	1,51	3,57	6,98	12,06	MPa
	Stödreaktion (nedböjande kraft) R_B	452,4	1429,8	3490,7	7238,2	N
	Motsvarande nedböjande vikt	46,1	145,6	355,5	737,1	kg
	Utnyttjandegrad Böjmoment	736	981	1227	1472	%
	Längdutvidgning kramla Δl	-4,1	-5,7	-7,3	-8,9	mm
	Area dragjärnsbricka A_{br}	-752	-1852	-3699	-65	mm^2
mm						

Bilaga 3 - Utredning av lämplighet för kontreforter i Visby ringmur

Utredning 1: Lutning 8°, Ingen friktion mellan enheter

I ett första fall beräknas dimensioner för en kontrefort där det yttre murskalet har en relativt stor lutning på åtta grader. I beräkningarna antas lutningen vara konstant längs murens höjd, detta överensstämmer dock inte med det verkliga förhållandet där murskalets lutning varierar längs murhöjden. I detta fall tas heller ingen hänsyn till den gynnande friktionskraft V_{fr} som högst sannolikt skapas mellan kontrefort och mur. Detta är alltså beräkningar gjorda med stora säkerhetsmarginaler.



SEKTION - KRAFTVERKAN KONTREFORT MOT MUR

Figurförklaring:

Figuren visar kraftverkan mellan kontrefort och mur. Figuren återfinns även i rapporten, se figur 15 avsnitt 6.3.1 Kontreforter - Förutsättningar för utförande och beräkningar.

A_1	Triangulär area kontrefort
A_2	Rektangulär area kontrefort
G_{d1}	Egentyngd kontrefortdel A_1
G_{d2}	Egentyngd kontrefortdel A_2
$N_{c,Ed}$	Horisontell kraft från mur

Resterande beteckningar återfinns i efterföljande beräkningar samt i avsnitt 11 i rapporten.

Färgförklaring:

Variabla Inmatningsvärden

Beräknade resultat

Antaganden

Indata

Höjd yttre murskal	H	9	m	
Densitet kalksten	ρ_{ks}	2750	kg/m^3	
Tyngdacceleration	g	9,82	m/s^2	
Dim. utbredd egentyngd yttre murskal	$G_{d,utb}$	16,6	kN/m^2	Se beräkning i Bilaga 2
Lutning yttre murskal	α	8	°	
Centrumavstånd kontreforter	s	16	m	
Höjd kontrefort	h	8	m	
Djup vid kontrefortens underkant	d_{uk}	2	m	
Djup vid kontrefortens överkant	$d_{ök}$	0,5	m	

Horisontell kraft mot kontrefort av lutande skal

Lastarea kontrefort

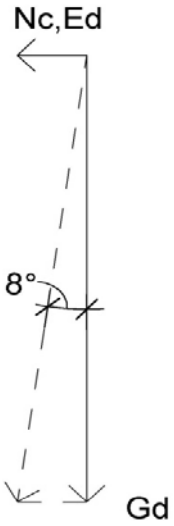
$A_{ms} = s \cdot H$ 144 m^2

Dimensionerande egentyngd murskal

$G_d = G_{d,utb} \cdot A_{ms}$ 2390 kN

Horisontell kraft mot kontrefort

$N_{c,Ed} = G_d \cdot \tan(8)$ **336** kN



Figuren till höger visar kraftförhållandet mellan det yttre murskalets egentyngd och den horisotella kraften mot kotreforten skapad av det lutande murskalet.

Momentberäkning kring P

Momentberäkning kring P ger samband ur vilket erfordlig bredd b av kontrefort kan erhållas.

Karakteristisk egentyngd kontrefort:

$G_{k1} = A_1 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g$ 162 · b kN

$G_{k2} = A_2 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g$ 108 · b kN

Dimensionerande egentyngd kontrefort:

Kontrefoternas egentyngd är en permanent gynnsam last. Lastkombinationer 6.10.a och 6.10.b, EKS ger:

$G_{d1} = 1{,}0 \cdot G_{k1}$ 162 · b kN

$G_{d2} = 1{,}0 \cdot G_{k2}$ 108 · b kN

Hävarm till G_{d1} x_1 1,0 m

Hävarm till G_{d2} x_2 1,8 m

Hävarm till $N_{c,Ed}$ y_1 4,5 m

Moment av G_{d1}

$M_{x1} = G_{d1} \cdot x_1$ 162 · b kNm

Moment av G_{d2}

$M_{x2} = G_{d2} \cdot x_2$ 189 · b kNm

Moment av $N_{c,Ed}$

$M_{y1} = N_{c,Ed} \cdot y_1$ **1512** kNm

Jämviktsvillkor

$M_{x1} + M_{x2} = M_{y1}$

$162 \cdot b + 189 \cdot b = 1512$ ⇒ b = **4,3** m

Resultattabell Utredning 1

Bredd på kontrefort då djup ök = 0.5m uk = 2m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	3,6	4,3	5,0	5,7	6,5	7,2	7,9	8,6	9,3
7	3,1	3,7	4,3	4,9	5,5	6,2	6,8	7,4	8,0
8	2,7	3,2	3,8	4,3	4,8	5,4	5,9	6,5	7,0
9	2,4	2,9	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3	5,7	6,2

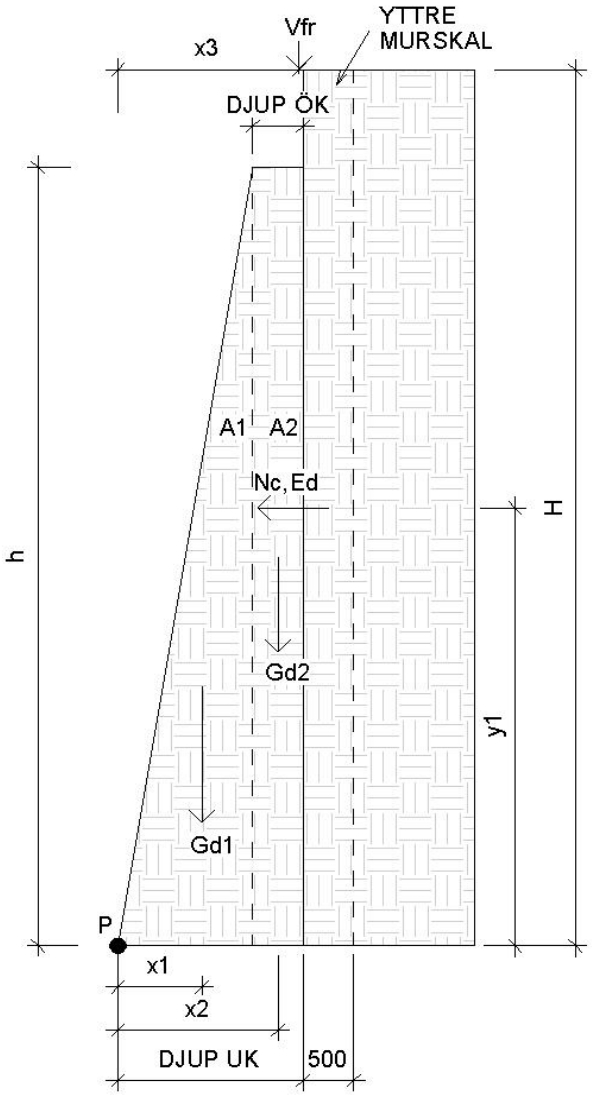
Bredd på kontrefort då djup ök = 1 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	3,2	3,8	4,5	5,1	5,7	6,4	7,0	7,6	8,3
7	2,7	3,3	3,8	4,4	4,9	5,5	6,0	6,5	7,1
8	2,4	2,9	3,3	3,8	4,3	4,8	5,2	5,7	6,2
9	2,1	2,5	3,0	3,4	3,8	4,2	4,7	5,1	5,5

Alla värden är angivna i meter.

Bilaga 4 - Utredning av lämplighet för kontreforter i Visby ringmur

Utredning 2: Lutning 8°, Inklusive friktion mellan enheter

Likt föregående fall beräknas dimensioner för en kontrefort där det yttre murskalet har en relativt grov lutning på åtta grader. I detta fall tas även hänsyn till den gynnande friktionskraft V_{fr} som skapas mellan kontrefort och mur. Dessa beräkningar är trots tillägget av friktionskraften gjorda med goda säkerhetsmarginaler.



SEKTION - KRAFTVERKAN KONTREFORT MOT MUR

Figurförklaring:

Figuren visar kraftverkan mellan kontrefort och mur. Figuren återfinns även i rapporten, se figur 15 avsnitt 6.3.1 Kontreforter - Förutsättningar för utförande och beräkningar.

A_1	Triangulär area kontrefort
A_2	Rektangulär area kontrefort
G_{d1}	Egentyngd kontrefortdel A_1
G_{d2}	Egentyngd kontrefortdel A_2
$N_{c,Ed}$	Horisontell kraft från mur
V_{fr}	Friktionskraft mellean mur och kontrefort.

Resterande betecknigar återfinns i efterföljande beräkningar samt i avsnitt 11 i rapporten.

Färgförklaring:

Variabla Inmatningsvärden

Beräknade resultat

Antaganden

Indata

Höjd yttre murskal	H	9	m	
Densitet kalksten	ρ_{ks}	2750	kg/m^3	
Tyngdacceleration	g	9,82	m/s^2	
Dim. utbredd egentyngd yttre murskal	$G_{d,utb}$	16,6	kN/m^2	Se beräkning i Bilaga 2
Lutning yttre murskal	α	8	°	
Centrumavstånd kontreforter	s	16	m	
Höjd kontrefort	h	8	m	
Djup vid kontrefortens underkant	d_{uk}	2	m	
Djup vid kontrefortens överkant	$d_{ök}$	0,5	m	

Horisontell kraft mot kontrefort av lutande skal

Lastarea kontrefort

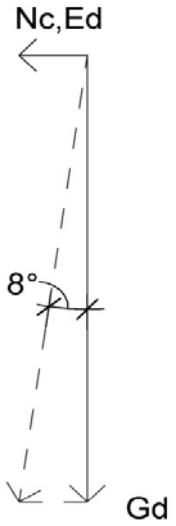
$A_{ms} = s \cdot H$ 144 m^2

Dimensionerande egentyngd murskal

$G_d = G_{d,utb} \cdot A_{ms}$ 2390 kN

Horisontell kraft mot kontrefort

$N_{c,Ed} = G_d \cdot \tan(8)$ **336** kN



Figuren till höger visar kraftförhållandet mellan det yttre murskalets egentyngd och den horisotella kraften mot kotreforten skapad av det lutande murskalet.

Momentberäkning kring P

Momentberäkning kring P ger samband ur vilket erfordlig bredd b av kontrefort kan erhållas

Karakteristisk egentyngd kontrefort:

$G_{k1} = A_1 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g$ 162 · b kN

$G_{k2} = A_2 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g$ 108 · b kN

Dimensionerande egentyngd kontrefort:

Kontrefoternas egentyngd är en permanent gynnsam last. Lastkombinationer 6.10.a och 6.10.b, EKS ger:

$G_{d1} = 1{,}0 \cdot G_{k1}$ 162 · b kN

$G_{d2} = 1{,}0 \cdot G_{k2}$ 108 · b kN

Friktionskraft, $V_{fr} = 0.3 \cdot N_{c,Ed}$ **101** kN

Friktionskraften är beräknad utifrån ett påstående ur boken Äldre murverkshus (se källförteckning) som säger att den friktionskraft som skapas vid motmurning inte bör vara större än 40 % av horisontalkraften mot kontreforten från muren. Därav ansätts i denna beräkning friktionskraften till 30 % av horisontalkraften för att ta hänsyn till en viss säkerhetsmarginal.

Hävarm till G_{d1} x_1 1,0 m

Hävarm till G_{d2} x_2 1,8 m

Hävarm till V_{fr} = Djup kontrefort uk x_3 2,0 m

Hävarm till $N_{c,Ed}$ y_1 4,5 m

Moment av G_{d1}

$M_{x1} = G_{d1} \cdot x_1$ 162 · b kNm

Moment av G_{d2}

$M_{x2} = G_{d2} \cdot x_2$ 189 · b kNm

Moment av V_{fr}

$M_{x3} = V_{fr} \cdot x_3$ **202** kNm

Moment av $N_{c,Ed}$

$M_{y1} = N_{c,Ed} \cdot y_1$ **1512** kNm

Jämviktsvillkor

$M_{x1} + M_{x2} = M_{y1} - M_{x3}$

$$\begin{array}{rr} & 162 \cdot b \\ + & 189 \cdot b \\ \hline = & 1310 \end{array} \quad \Rightarrow \quad b = \boxed{3{,}7}\ \text{m}$$

Resultattabell Utredning 2

Bredd på kontrefort då djup ök = 0.5 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	3,1	3,7	4,4	5,0	5,6	6,2	6,8	7,5	8,1
7	2,7	3,2	3,7	4,3	4,8	5,3	5,9	6,4	6,9
8	2,3	2,8	3,3	3,7	4,2	4,7	5,1	5,6	6,1
9	2,1	2,5	2,9	3,3	3,7	4,1	4,6	5,0	5,4

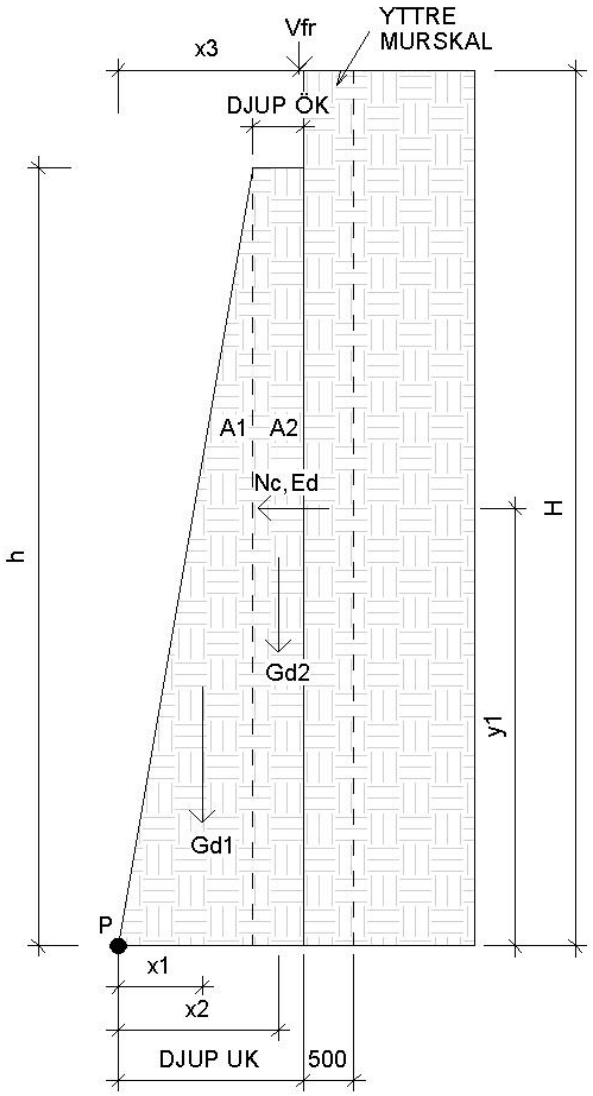
Bredd på kontrefort då djup ök = 1 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,5	6,1	6,6	7,2
7	2,4	2,8	3,3	3,8	4,3	4,7	5,2	5,7	6,1
8	2,1	2,5	2,9	3,3	3,7	4,1	4,5	5,0	5,4
9	1,8	2,2	2,6	2,9	3,3	3,7	4,0	4,4	4,8

Alla värden är angivna i meter.

Bilaga 5 - Utredning av lämplighet för kontreforter i Visby ringmur

Utredning 3: Lutning 5° samt friktion mellan enheter

I ett tredje fall beräknas dimensioner för en kontrefort då det yttre murskalet har en konstant lutning på fem grader, dock bör det återigen påpekas att lutningen i verkligheten varierar längs murens höjd. Denna lutning motsvarar den värsta lutning som mätts upp i en mursektion strax bredvid det aktuella murraset. Likt föregående fall tas i denna beräkning hänsyn till den gynnande friktionskraft V_{fr} som skapas mellan mur och kontrefort. Detta är alltså beräkningar gjorda med säkerhetsmarginaler med tanke på att lutningen i verkligheten varierar längs murens höjd.



SEKTION - KRAFTVERKAN KONTREFORT MOT MUR

Figurförklaring:

Figuren visar kraftverkan mellan kontrefort och mur. Figuren återfinns även i rapporten, se figur 15 avsnitt 6.3.1 Kontreforter - Förutsättningar för utförande och beräkningar.

A_1	Triangulär area kontrefort
A_2	Rektangulär area kontrefort
G_{d1}	Egentyngd kontrefortdel A_1
G_{d2}	Egentyngd kontrefortdel A_2
$N_{c,Ed}$	Horisontell kraft från mur
V_{fr}	Friktionskraft mellean mur och kontrefort.

Resterande betecknigar återfinns i efterföljande beräkningar samt i avsnitt 11 i rapporten.

Färgförklaring:

Variabla Inmatningsvärden

Beräknade resultat

Antaganden

Indata

Höjd yttre murskal	H	9	m	
Densitet kalksten	ρ_{ks}	2750	kg/m^3	
Tyngdacceleration	g	9,82	m/s^2	
Dim. utbredd egentyngd yttre murskal	$G_{d,utb}$	16,6	kN/m^2	Se beräkning i Bilaga 2
Lutning yttre murskal	α	5	°	
Centrumavstånd kontreforter	s	16	m	
Höjd kontrefort	h	8	m	
Djup vid kontrefortens underkant	d_{uk}	2	m	
Djup vid kontrefortens överkant	$d_{ök}$	0,5	m	

Horisontell kraft mot kontrefort av lutande skal

Lastarea kontrefort

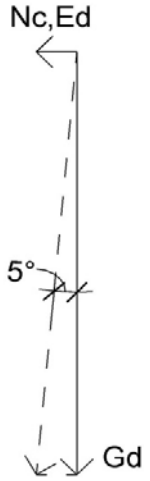
$A_{ms} = s \cdot H$ 144 m^2

Dimensionerande egentyngd murskal

$G_d = G_{d,utb} \cdot A_{ms}$ 2390 kN

Horisontell kraft mot kontrefort

$N_{c,Ed} = G_d \cdot \tan(5)$ **209** kN



Figuren till höger visar kraftförhållandet mellan det yttre murskalets egentyngd och den horisotella kraften mot kotreforten skapad av det lutande murskalet.

Momentberäkning kring P

Momentberäkning kring P ger samband ur vilket erfordlig bredd b av kontrefort kan erhållas

Karakteristisk egentyngd kontrefort:

$G_{k1} = A_1 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g$ $162 \cdot b$ kN

$G_{k2} = A_2 \cdot b \cdot \rho_{ks} \cdot g$ $108 \cdot b$ kN

Dimensionerande egentyngd kontrefort:

Kontrefoternas egentyngd är en permanent gynnsam last. Lastkombinationer 6.10.a och 6.10.b, EKS ger:

$G_{d1} = 1{,}0 \cdot G_{k1}$ $162 \cdot b$ kN

$G_{d2} = 1{,}0 \cdot G_{k2}$ $108 \cdot b$ kN

Friktionskraft, $V_{fr} = 0.3 \cdot N_{c,Ed}$ **63** kN

Friktionskraften är beräknad utifrån ett påstående ur boken Äldre murverkshus (se källförteckning) som säger att den friktionskraft som skapas vid motmurning inte bör vara större än 40 % av horisontalkraften mot kontreforten från muren. Därav ansätts i denna beräkning friktionskraften till 30 % av horisontalkraften för att ta hänsyn till en viss säkerhetsmarginal.

Hävarm till G_{d1}	x_1	1	m
Hävarm till G_{d2}	x_2	1,8	m
Hävarm till V_{fr} = Djup kontrefort uk	x_3	2	m
Hävarm till $N_{c,Ed}$	y_1	4,5	m

Moment av G_{d1}

$M_{x1} = G_{d1} \cdot x_1$ $162 \cdot b$ kNm

Moment av G_{d2}

$M_{x2} = G_{d2} \cdot x_2$ $189 \cdot b$ kNm

Moment av V_{fr}

$M_{x3} = V_{fr} \cdot x_3$ **125** kNm

Moment av $N_{c,Ed}$

$M_{y1} = N_{c,Ed} \cdot y_1$ **941** kNm

Jämviktvillkor

$M_{x1} + M_{x2} = M_{y1} - M_{x3}$

$$\begin{aligned} & 162 \cdot b \\ + \; & 189 \cdot b \\ = \; & 816 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad b = 2{,}3 \text{ m}$$

Resultattabell Utredning 3

Bredd på kontrefort då djup ök = 0.5 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5	3,9	4,3	4,6	5,0
7	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3
8	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
9	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,4

Bredd på kontrefort då djup ök = 1 m och uk = 2 m									
h s	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6	1,7	2,1	2,4	2,7	3,1	3,4	3,8	4,1	4,5
7	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
8	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3
9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0

Alla värden är angivna i meter.